



河北省“十四五”臭氧污染控制
目标与气候协同的减排路径研究
Report of the ozone target and control
strategy in Hebei Province during the
14th FYP period

北京大学

2022.9

Peking University
September, 2022

致谢

本研究由【北京大学】统筹撰写，由能源基金会提供资金支持。

ACKNOWLEDGEMENT

This report is a product of Peking University and is funded by Energy Foundation China.

项目负责人：谢绍东

项目承担单位：北京大学环境科学与工程学院

项目参与单位：河北省环境应急与重污染天气预警中心

河北省生态环境科学研究院

目 录

第 1 章 河北省近地面臭氧污染特征	1
1.1 近年来河北省环境空气质量变化趋势.....	1
1.1.1 综合指数及各项污染物变化情况.....	1
1.1.2 超标天数的变化特征与趋势.....	2
1.2 地面臭氧污染现状与变化趋势.....	4
1.2.1 臭氧浓度年际变化分析.....	4
1.2.2 臭氧浓度的月度变化趋势.....	10
1.2.3 臭氧浓度日变化趋势.....	20
1.3 重点城市臭氧污染现状.....	22
第 2 章 河北省大气污染源排放清单与减排效果	27
2.1 2020 年大气污染物排放总体情况.....	27
2.2 各类源排放特征与空间分布.....	30
2.2.1 工业源.....	30
2.2.2 移动源.....	43
2.2.3 扬尘源.....	49
2.2.4 生活源.....	51
2.2.5 其他源.....	56
2.3 各类污染物的城市分布特征.....	58
2.3.1 一次 PM _{2.5} 城市分布特征.....	58
2.3.2 PM ₁₀ 城市分布特征.....	60
2.3.3 SO ₂ 城市分布特征.....	62
2.3.4 NO _x 城市分布特征.....	64
2.3.5 VOC _s 城市分布特征.....	66
2.4 “十三五”期间大气污染物减排效果分析.....	68
2.4.1 “十三五”期间实施的大气污染治理方案.....	68

2.4.2	“十三五”期间大气污染防治措施减排量分析.....	72
2.4.3	“十四五”期间减排效益来源分析.....	74
第 3 章	控制臭氧生成的 VOCS 关键物种和排放源.....	76
3.1	2020 年河北省人为源 VOCs 组分排放清单	76
3.2	VOCs 优势物种排放特征	82
3.3	全省夏季分组分排放特征.....	88
3.4	夏季人为源 VOCs 臭氧生成潜势	90
3.4.1	全省夏季臭氧生成潜势	90
3.4.2	各城市夏季臭氧生成潜势	92
3.4.3	重点城市人为源 VOCs 臭氧生成潜势.....	95
3.5	各市控制 O ₃ 生成的人为源 VOCs 关键物种和关键源.....	104
第 4 章	近年河北省 VOCS 污染特征.....	106
4.1	2019 年/2020 年河北省 VOCs 污染水平及臭氧生成潜势时空分 布变化特征	106
4.1.1	VOCs 污染水平时空分布变化特征	106
4.1.2	VOCs 臭氧生成潜势时空分布变化特征	109
4.2	2019 年/2020 年重点城市 VOCs 污染水平及臭氧生成潜势变化 特征	114
4.2.1	石家庄市	114
4.2.2	衡水市	116
4.2.3	邯郸市	119
4.3	臭氧高发季 VOCs 日变化特征	122
4.3.1	石家庄市 VOCs 日变化特征.....	122
4.3.2	衡水市 VOCs 日变化特征.....	125
4.3.3	邯郸市 VOCs 日变化特征.....	127

第 5 章“十四五”河北省臭氧控制目标与减排方案	130
5.1“十四五”臭氧污染控制目标设计	130
5.1.1 “十三五”河北省空气质量优良率变化与现状	130
5.1.2 “十四五”O ₃ 控制目标的确定	134
5.1.3 臭氧前体物减排目标	137
5.2 河北省臭氧污染回溯模拟	138
5.2.1 模拟范围和模拟网格的构建	138
5.2.2 模拟时段的选择	140
5.2.3 源排放清单的调整和处理	141
5.2.4 气象模拟结果评估	145
5.2.5 空气质量模拟结果评估	149
5.2.6 模拟的臭氧污染区域特征	156
5.3 臭氧浓度敏感性回溯模拟分析	158
5.3.1 DDM-3D 模拟的敏感性系数的日变化特征	158
5.3.2 臭氧日最大 8 小时均值对前体物排放敏感度的定量分析	160
5.3.3 臭氧日最大 8 小时浓度对各类源前体物排放敏感性的空间分布 ..	162
5.4 基于回溯模拟 EKMA 曲线的控制方案情景分析	165
5.4.1 EKMA 曲线绘制方法	166
5.4.2 重点城市 EKMA 曲线及控制方案情景分析	168
5.4.3 “十四五”臭氧污染控制情景模拟方法	183
5.5 基于情景模拟结果的达标分析	191
5.5.1 分析方法	191
5.5.2 基于基准年（2020）观测值的城市达标分析	193
5.6 臭氧改善目标的化石能源削减目标和碳减排分析	195
5.6.1 化石能源削减目标与碳减排分析	195
5.6.2 “十四五”空气质量改善与碳减排目标建议	201
5.6.3 气候协同的减排措施	203
5.7 臭氧前体物减排路径与措施	204

5.7.1	调整优化能源与产业结构	205
5.7.2	推进工业领域污染减排	206
5.7.3	强化交通污染源减排与推进低碳交通运输体系建设	210
5.7.4	有序开展生活源农业源污染防治	213
5.8	小结	214
第 6 章 臭氧污染管控政策建议		217
6.1	建立健全臭氧前体物控制监督管理体系	217
6.1.1	VOCs 地方排放标准制修订建议	217
6.1.2	建立健全监测监控体系	218
6.1.3	全面实施排污许可制度	219
6.1.4	加强统计与调查	219
6.1.5	加强监督执法	219
6.2	“十四五”VOCs 重点行业管控建议方案	220
6.3	臭氧污染监测预警体系	222
6.4	VOCs 监督管理体系	223
6.5	NO _x 和 VOCs 非线性协同减排策略	225
6.6	加强省域大气污染联防联控和大气污染综合治理	225

第1章 河北省近地面臭氧污染特征

1.1 近年来河北省环境空气质量变化趋势

1.1.1 综合指数及各项污染物变化情况

图 1-1 给出了“十三五”期间河北省环境空气质量综合指数的年际变化，由图可见河北省环境空气质量得到了大幅改善，2020 年河北省环境空气质量综合指数较 2015 年降低了 32%。从图 1-2 所示主要污染物的年日均浓度看，PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂ 和 CO 均呈下降趋势，但 O₃ 浓度呈上升趋势。从综合指数改善贡献情况来看，环境空气质量改善 PM_{2.5} 贡献了 29.7%、PM₁₀ 贡献了 25.7%、SO₂ 贡献了 14.5%、NO₂ 贡献了 21.7%、CO 贡献了 14.5%，O₃ 由于浓度升反作用了 6.2%。

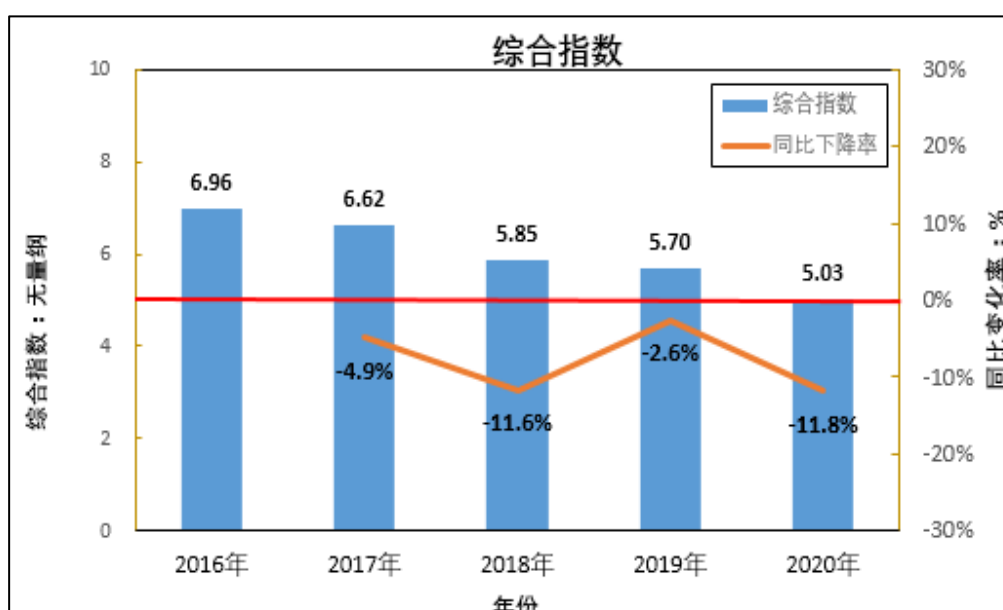


图 1-1 2015-2020 年河北省环境空气质量综合指数变化趋势

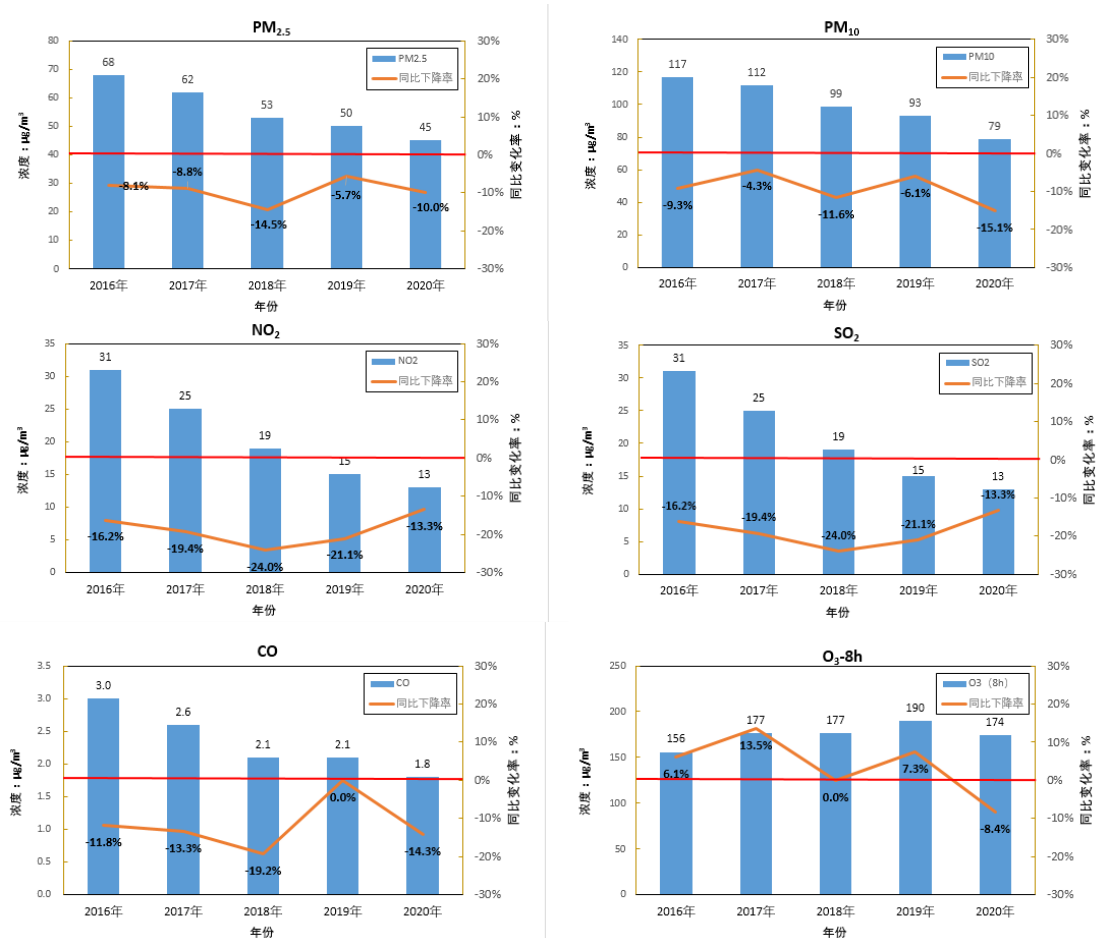


图 1-2 十三五期间河北省主要污染物变化趋势（单位：µg/m³ CO: mg/m³）

1.1.2 超标天数的变化特征与趋势

图 1-3 给出了河北省十三五期间环境空气质量超标的天数，由图可见，河北省各市平均超标天数减少了 46 天，其中的主要减少年份在 2016 年和 2020 年，2017-2020 年超标天数变化不明显甚至个别年份出现反弹。

超标天数中，河北省首要污染物主要为 PM_{2.5}、PM₁₀ 和 O₃，其中以 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 为首要污染物的超标天逐渐减少，见图 1-4。

由图 1-4 可见，2015-2019 年期间以 O₃ 为首要污染物天数逐年增加，2020 年略有降低。2015 年-2018 年超标天中首要污染物占比最高的均为 PM_{2.5}，分别为 2015 年 71.8%、2016 年 68.6%、2017 年 54.5%、2018 年 47.1%，2019 年-2020 年 O₃ 为首要污染物天数超过 PM_{2.5}，O₃ 成为影响河北省空气质量达标天数的首要污染物。

非达标天数

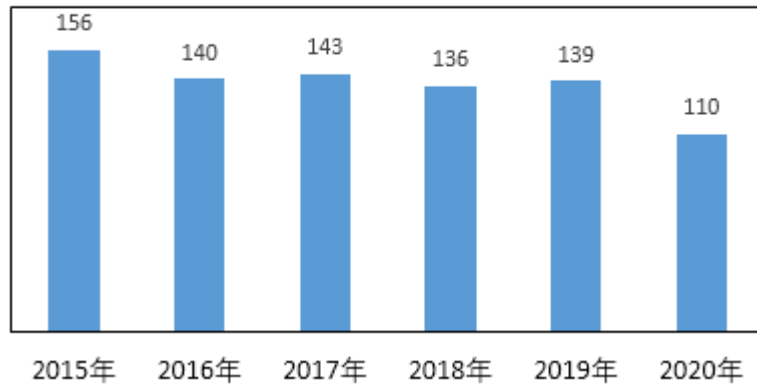


图 1-3 十三五期间河北省超标天数的变化趋势（单位：天）

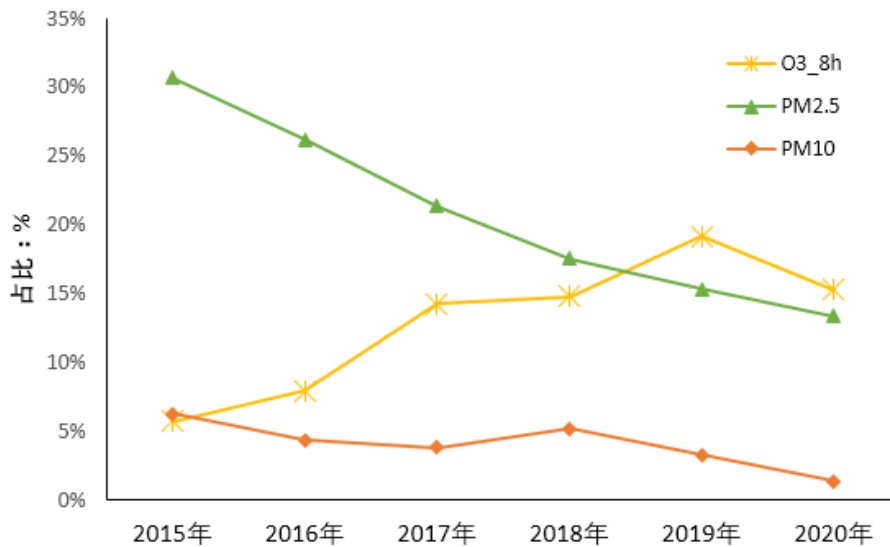


图 1-4 十三五期间河北省非达标天首要污染物占比变化趋势

2019年河北省以O₃超标为首要污染物的超标天数为70天，占全年总天数的19.2%，与2015年的21天（占比5.8%）相比增加了49天，因O₃超标造成达标天数比率较2015年多损失了13.4个百分点；

2019年河北省以PM_{2.5}超标为首要污染物的超标天数为56天，占全年总天数的15.3%，与2015年的112天（占比30.7%）相比减少了56天，因PM_{2.5}超标造成达标天数比率较2015年少损失15.4个百分点。

2019年，臭氧浓度增长造成的超标天数增加，基本抵消了PM_{2.5}改善对达标天数的贡献。

2020年，通过各项臭氧管控措施实施，以O₃超标为首要污染物的超标天数较2019年减少14天，管控效果较为显著。

1.2 地面臭氧污染现状与变化趋势

1.2.1 臭氧浓度年际变化分析

(1) 全省臭氧百分位浓度的年际变化分析

对比分析2015-2020年河北省臭氧浓度的年际变化，如图1-5所示河北省臭氧不同百分位浓度整体均呈上升趋势。

其中2015-2020年，河北省臭氧不同百分位浓度整体均呈上升趋势，其中高值90百分位浓度呈上升趋势，上升速度最快，年均上升幅度为10.75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ；第75百分位逐年上升，年均上升8.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ；中位50百分位浓度逐年上升，年均上升幅度为5.25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ；低值第25百分位2015-2018年逐年上升，2019年较2018年下降2.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，2015-2019年年均上升幅度3.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ；背景第5百分位浓度2015-2018年逐年上升，2019年较2018年下降6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，2015-2019年年均上升幅度2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。由此可见，河北省臭氧基准浓度和低值浓度经过2015-2018年逐年上升后2019年有所下降，但典型气象条件和污染气象条件下臭氧90百分位、75百分位、50百分位浓度在逐年上升，尤其是污染较重时段90百分位浓度上升最为明显。

2020年5百分位、25百分位较2019年持续增长，其余浓度有明显回落，50百分位同比下降了4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、75百分位同比下降了9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、90百分位同比下降了15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。2020年臭氧污染水平与2018年基本持平。

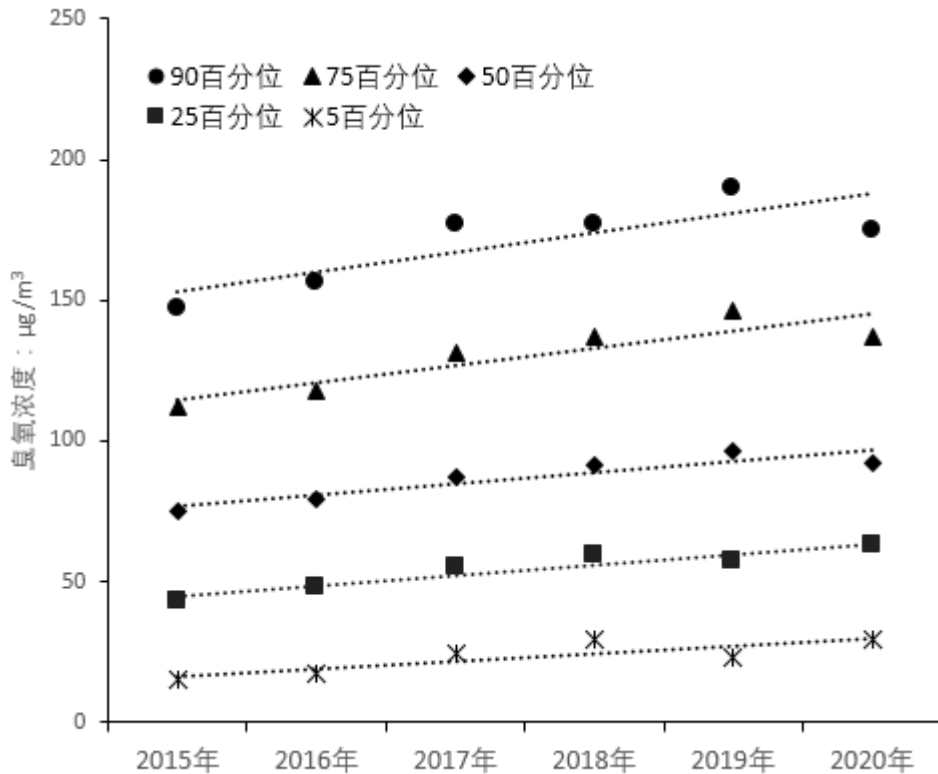


图 1-5 2015-2020 年河北省臭氧百分位浓度对比

(2) 各市年际变化分析

如图 1-6 所示各市第 90 百分位浓度对比图可见，从污染重心来看，2015 年-2017 年各市第 90 百分位浓度污染重心在保定、唐山等中部和东部城市，2018-2020 年污染重心逐渐变为石家庄、邢台、邯郸、廊坊、唐山等城市，与秋冬季 PM_{2.5} 污染重心基本重合。

从浓度年际变化来看，2015 年-2019 年浓度呈增长趋势，其中承德、张家口增加不明显，年均上升幅度分别为 0.25、4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ；邢台、秦皇岛、邯郸、石家庄浓度增加最为显著，年均上升幅度分别为 20.25、20.25、18、17.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ；其余各市年均上升幅度在 5.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 至 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 之间。2020 年各市浓度均较 2019 年有所降低，降低幅度较大的石家庄、保定、邢台降低了 26、25、23 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，廊坊、衡水、张家口、秦皇岛、邯郸下降幅度在 11 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 至 19 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 之间，沧州、唐山、承德下降幅度较小，分别下降了 7、8、9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

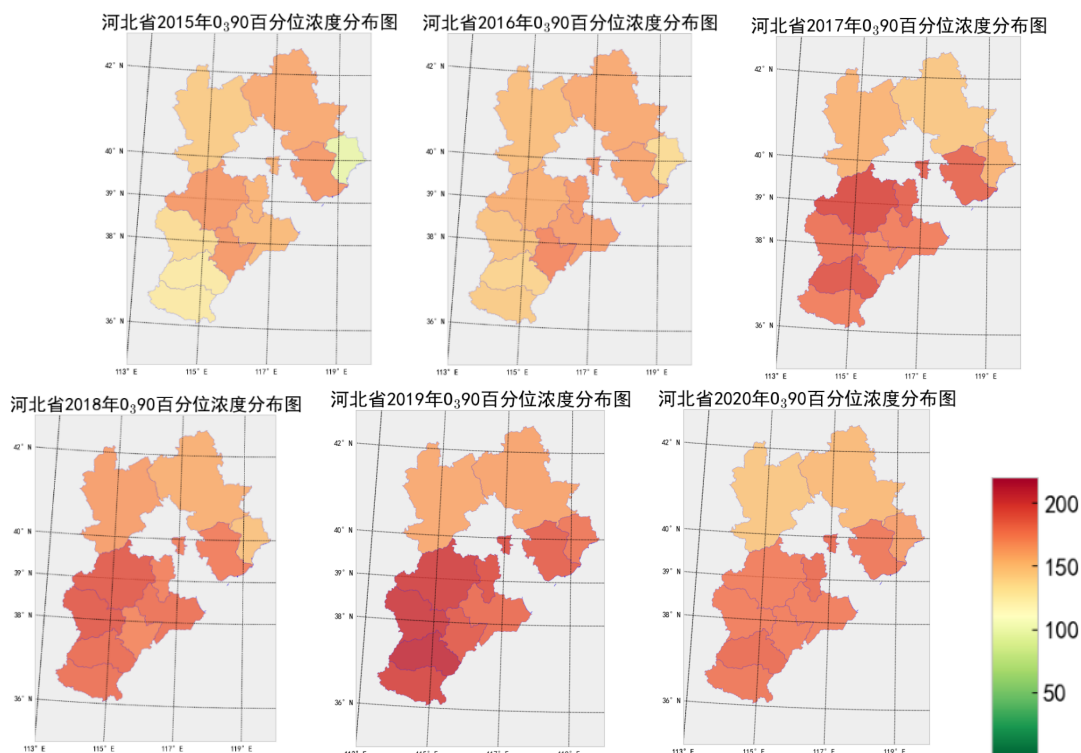


图 1-6 2015-2020 年河北省各市臭氧第 90 百分位浓度对比图

图 1-7 所示各市第 75 百分位浓度变化趋势与 90 百分位基本一致，从污染重心来看，2015 年-2017 年各市第 75 百分位浓度污染重心在保定、衡水、廊坊、沧州等中部和东部城市，2018-2020 年污染重心逐渐变为石家庄、邢台、邯郸等中南部城市。

从浓度年际变化来看，2015 年-2019 年浓度呈增长趋势，其中承德、张家口增加不明显，年均上升幅度分别为 0.25 、 $4\mu\text{g}/\text{m}^3$ ；邯郸、邢台、石家庄、秦皇岛浓度增加最为显著，年均上升幅度分别为 16 、 15.25 、 14.75 、 $12.5\mu\text{g}/\text{m}^3$ ；其余各市年均上升幅度在 $3.5\mu\text{g}/\text{m}^3$ 至 $8\mu\text{g}/\text{m}^3$ 之间。2020 年承德市浓度与 2019 年持平，其余各市均有所降低，降低幅度较大的保定、邯郸、邢台、石家庄、唐山降低了 $11\mu\text{g}/\text{m}^3$ 至 $19\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，其余各市下降幅度较小，分别下降了 $1\mu\text{g}/\text{m}^3$ 至 $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

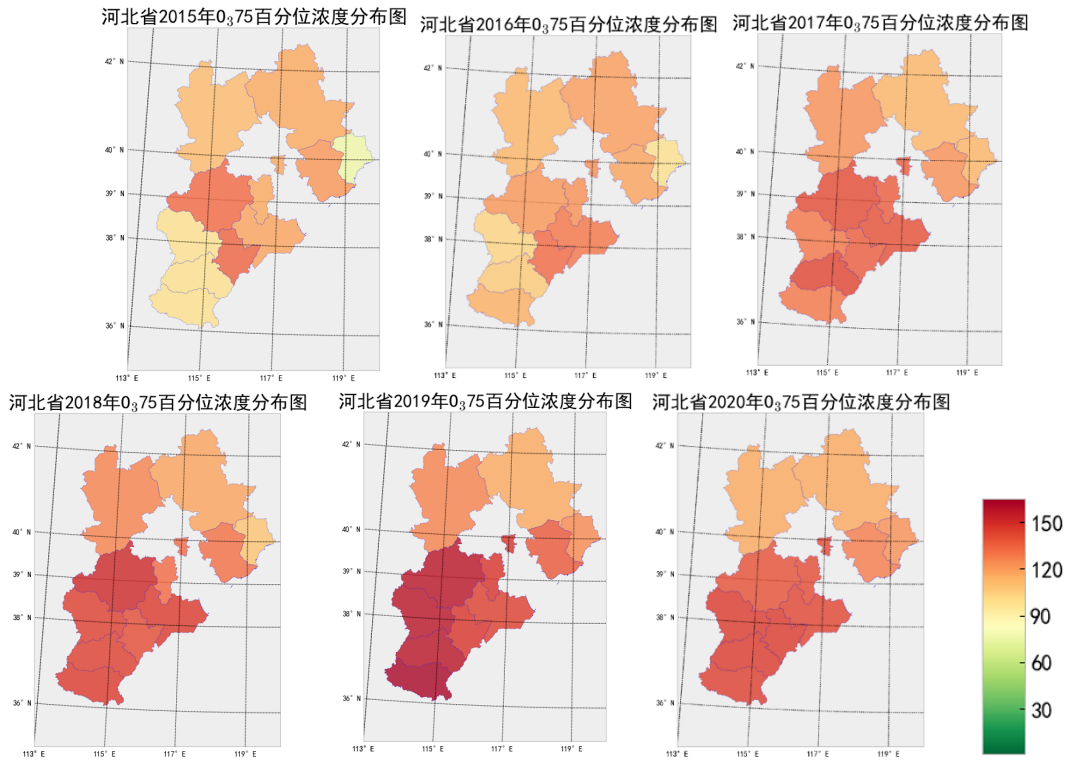


图 1-7 2015-2020 年河北省各市臭氧第 75 百分位浓度对比图

图 1-8 所示各市第 50 百分位浓度变化趋势图可见,从污染重心来看,2015 年-2017 年各市第 50 百分位浓度污染重心在承德、张家口和衡水、沧州等北部和东部城市,2018-2020 年污染重心逐渐变为邯郸、衡水、沧州等东南部城市。

从浓度年际变化来看,2015 年-2019 年浓度呈增长趋势,其中承德增加不明显,年均上升幅度为 $0.5\mu\text{g}/\text{m}^3$;邯郸、邢台、石家庄浓度增加较为显著,年均上升幅度分别为 9.5 、 8.25 、 $7.75\mu\text{g}/\text{m}^3$;其余各市年均上升幅度在 $3\mu\text{g}/\text{m}^3$ 至 $5.25\mu\text{g}/\text{m}^3$ 之间。2020 年衡水和沧州市浓度较 2019 年分别增加了 $3\mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $1\mu\text{g}/\text{m}^3$,其余各市均有所降低,降低幅度较大的保定降低了 $11\mu\text{g}/\text{m}^3$,其余各市下降幅度在 $2\mu\text{g}/\text{m}^3$ 至 $6\mu\text{g}/\text{m}^3$ 之间。

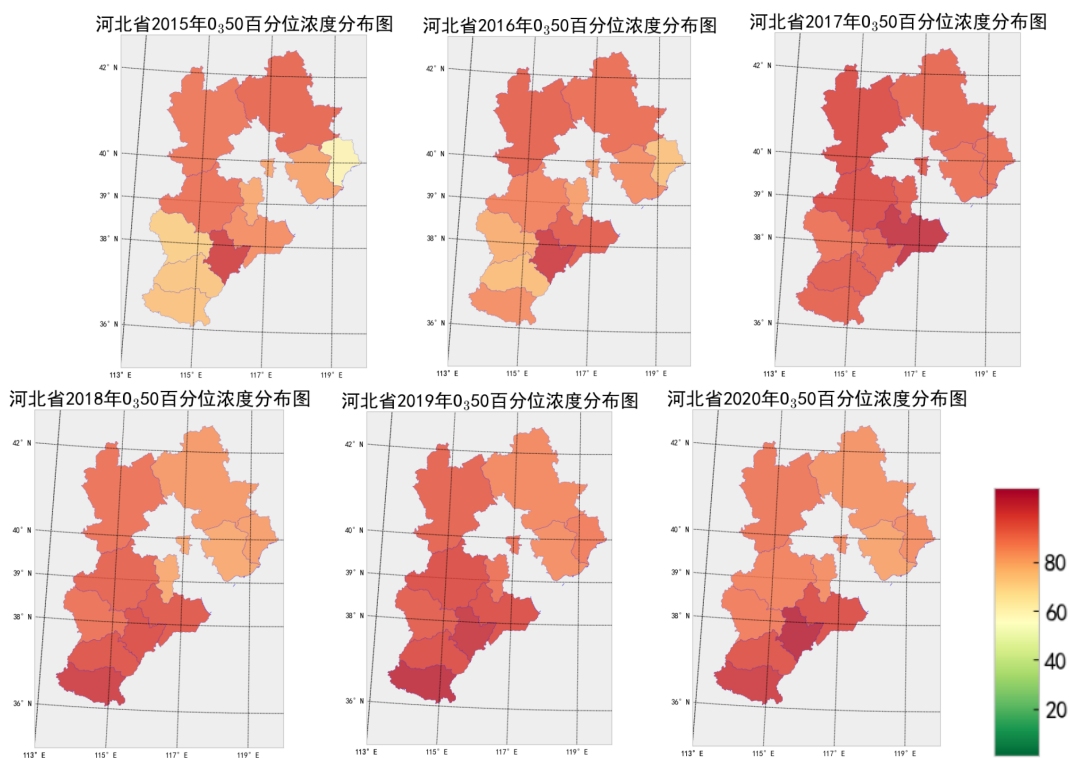


图 1-8 2015-2020 年河北省各市臭氧第 50 百分位浓度对比图

从图 1-9 所示各市第 25 百分位浓度变化趋势与以上百分位浓度变化趋势明显不同,从污染重心来看,各市第 25 百分位浓度污染重心始终在张家口市, 2020 年增加了衡水、沧州东南部城市。

从浓度年际变化来看, 2015 年-2020 年浓度持续增长, 其中承德、张家口增加不明显, 年均上升幅度分别为 $1.5\mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $2.5\mu\text{g}/\text{m}^3$; 其余各市年均上升幅度在 $4.25\mu\text{g}/\text{m}^3$ 至 $7\mu\text{g}/\text{m}^3$ 之间。

从图 1-10 各市第 5 百分位浓度变化趋势与 25 百分位浓度变化趋势基本一致, 从污染重心来看, 各市 25 百分位浓度污染重心始终在张家口市。

从浓度年际变化来看, 2015 年-2018 年浓度持续增长, 2019 年略有降低, 2020 年再次反弹, 总体呈上升趋势, 各市年均上升幅度在 $1\mu\text{g}/\text{m}^3$ 至 $5.5\mu\text{g}/\text{m}^3$ 之间。

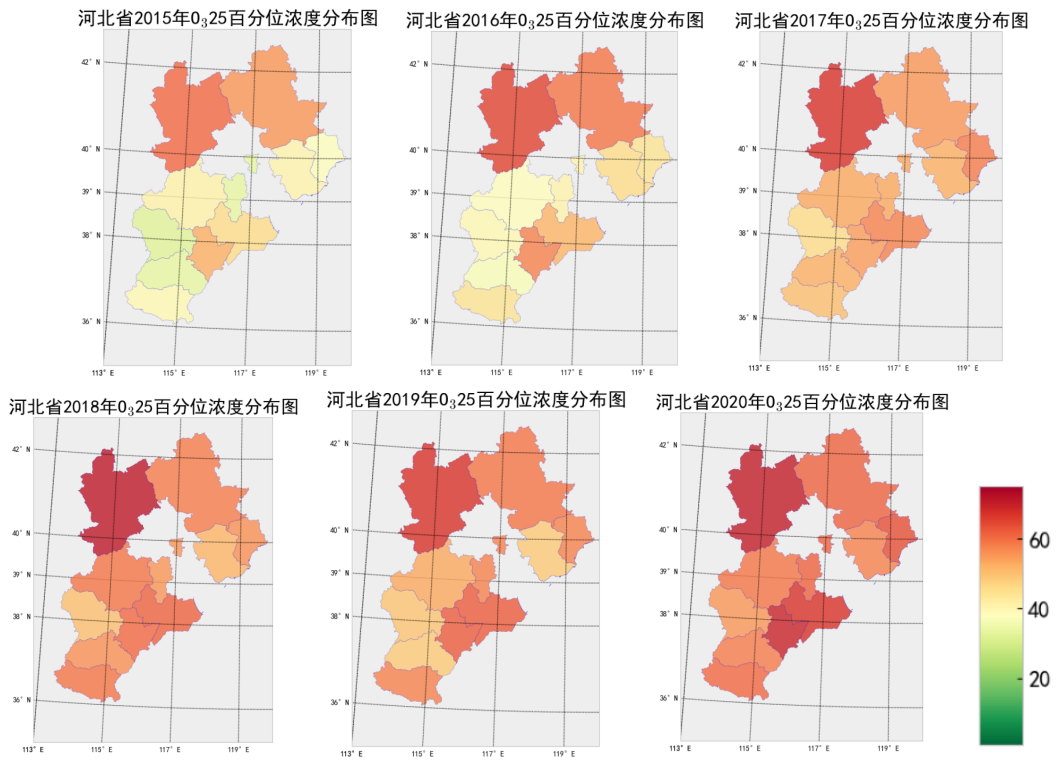


图 1-9 2015-2020 年河北省各市臭氧第 25 百分位浓度对比图

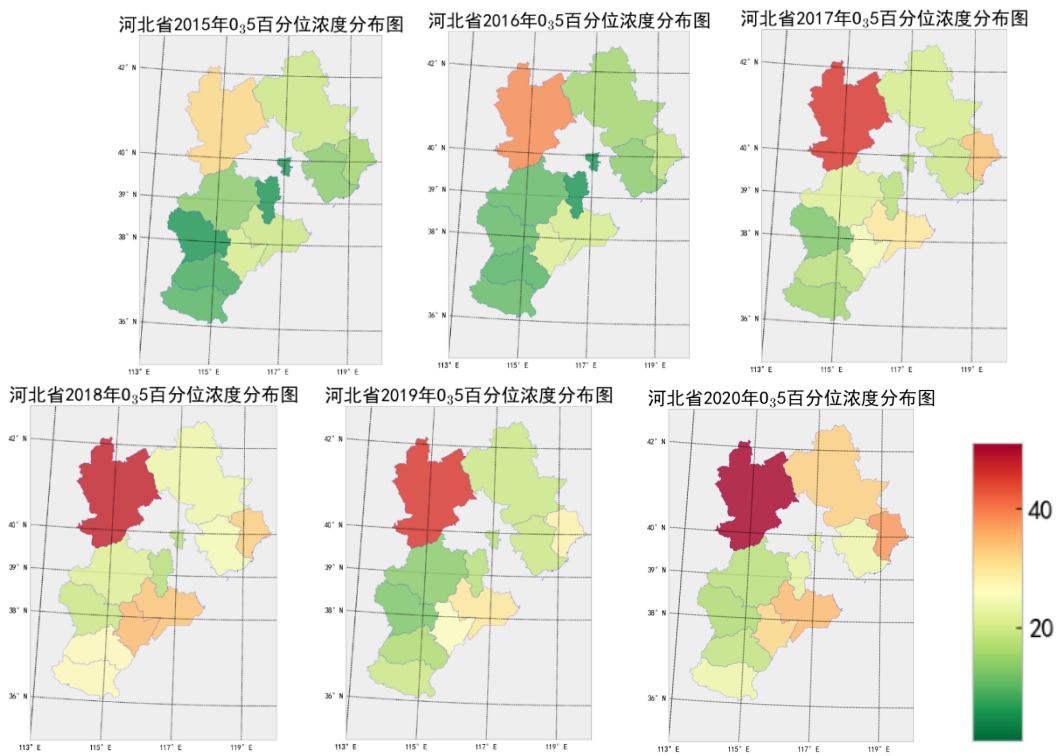


图 1-10 2015-2020 年河北省各市臭氧第 5 百分位浓度对比

1.2.2 臭氧浓度的月度变化趋势

(1) 全省月度变化分析

从图 1-11 所示 2015-2020 年不同百分位浓度变化趋势可以看出，臭氧月浓度均呈现两端低中间高的分布特点，5-9 月为臭氧污染较重时段。从不同年度来看，2015-2019 年各百分位浓度呈明显上升趋势，2020 年较 2019 年有显著降低，上升趋势得到减缓。

第 90 百分位浓度为典型的双峰分布，高值分别出现在 6 月和 9 月前后，2015-2019 年的最高浓度均出现在 6 月，峰值浓度年上升幅度 $13.75\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，2020 年峰值浓度较 2019 年降低了 $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。月浓度低值均出现在 12 月，2020 年较 2015 年上升了 $13\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

第 75 百分位和 50 百分位浓度变化趋势与 90 百分位基本一致也呈双峰分布，峰值在 6 月，年上升幅度分别为 $15.75\mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $15.5\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，2020 年第 75 百分位和 50 百分位浓度均较 2019 年降低了 $12\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

第 25 百分位和第 5 百分位浓度高值主要在 6 月，主要呈单峰分布，仅 2016 年和 2019 年 9 月第 25 百分位、2017 年 9 月第 5 百分位略有反弹。从峰值年浓度的年上升幅度来看，2015-2019 年年上升幅度分别为 $15.25\mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $11\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，2020 年第 25 百分位浓度较 2019 年降低 $11\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，第 5 百分位较 2019 年上升 $3\mu\text{g}/\text{m}^3$ 增长幅度明显放缓。

各百分位月浓度低值均出现在 12 月，90 百分位 2020 年较 2015 年上升了 $13\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，75 百分位上升了 $15\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，50 百分位上升了 $16\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，25 百分位上升了 $15\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，5 百分位上升了 $15\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

2015-2020 年不同百分位浓度整体上升，但 2020 年峰值浓度较 2019 年有明显降低。

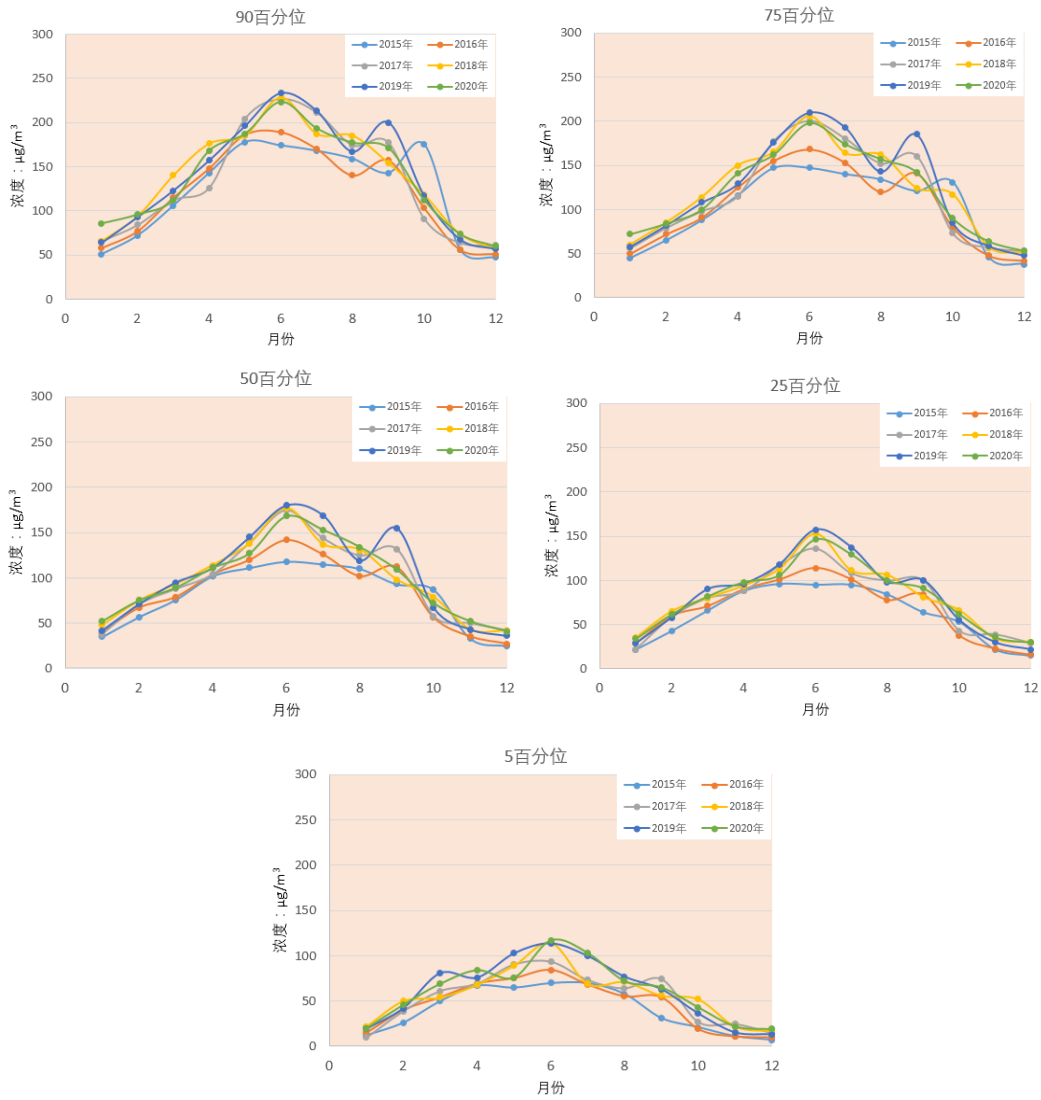


图 1-11 2015-2020 年河北省近地面臭氧不同百分位月浓度变化趋势

(2) 各市月度变化分析

从图 1-12 所示 2015-2020 年浓度较高的 4 月-10 月分析可见，4 月份各市小提琴图分析臭氧 4 月浓度主要分布范围 $90\mu\text{g}/\text{m}^3$ 至 $130\mu\text{g}/\text{m}^3$ 左右，自北向南各市浓度分布逐渐集中，邯郸、衡水、邢台、石家庄等南部城市浓度分布相对集中，但张家口、承德、秦皇岛、廊坊、唐山等市分布比较分散，存在比较明显的离散值，更易出现异常高值，国家标准中规定的 90 百分位浓度高值主要出现在唐山、承德、廊坊等市。

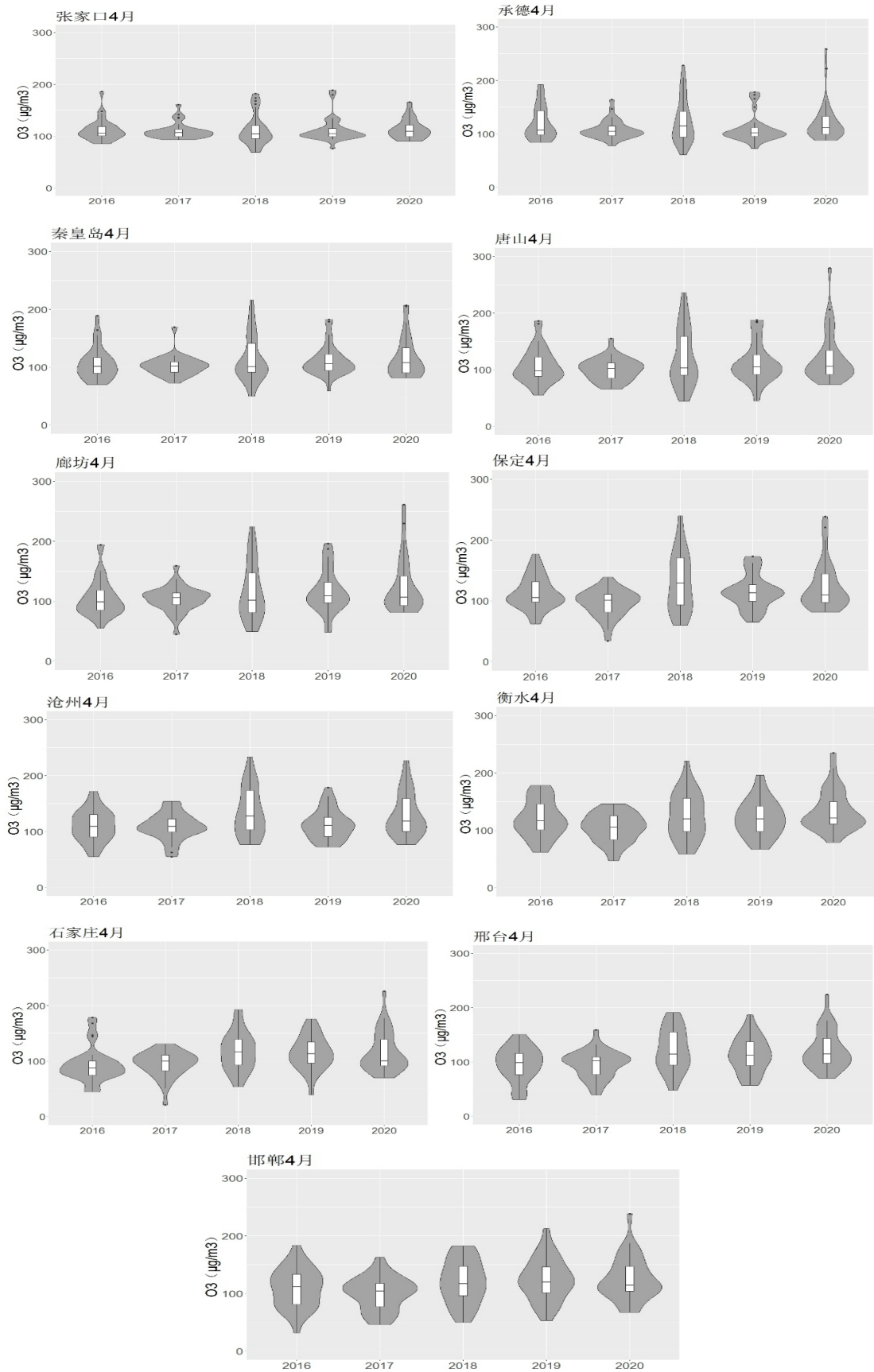


图 1-12 2015-2020 年各市 4 月浓度小提琴图

从图 1-13 所示 5 月份各市小提琴图可看出,臭氧 5 月浓度分布较 4 月份集中,浓度主要分布范围 $100\mu\text{g}/\text{m}^3$ 至 $170\mu\text{g}/\text{m}^3$ 左右,张家口、承德、秦皇岛城市的浓度水平明显低于其它城市,但会出现部分较高浓度离散值。其它城市浓度分布较为集中,从年度变化来看,2015-2019 年浓度水平持续上升,2020 年有一个显著的回落。5 月份 90 百分位浓度高值易于出现在唐山、保定、廊坊等市。

从图 1-14 所示的 6 月份各市小提琴图可以看出,浓度主要分布范围 $120\mu\text{g}/\text{m}^3$ 至 $200\mu\text{g}/\text{m}^3$ 左右,臭氧 6 月浓度水平显著高于其它月份。从分布情况来看,邢台、邯郸、衡水离散程度高于其它城市,会出现明显的低值。从年度变化来看,2015-2019 年浓度水平持续上升,2020 年有一个明显的回落,其中中南部保定、衡水、石家庄、邢台、邯郸改善最为显著。6 月份 90 百分位浓度高值易于出现在唐山、石家庄、保定等市。

从图 1-15 所示 7 月份各市小提琴图可以看出,浓度主要分布范围 $110\mu\text{g}/\text{m}^3$ 至 $170\mu\text{g}/\text{m}^3$ 左右,各市浓度分布均比较分散,存在比较明显的离散值。从年度变化来看,中南部和东部的邯郸、邢台、石家庄、沧州、衡水、保定、廊坊 2020 年均有所改善,张家口、承德浓度变化不明显,2015 年-2017 年处于各市中较高水平,2018 年-2020 年由于其他城市浓度增长造成相对浓度水平较低。7 月份 90 百分位浓度高值易于出现在保定、邢台等市。

从图 1-16 所示的 8 月份各市小提琴图可以看出,浓度主要分布范围 $90\mu\text{g}/\text{m}^3$ 至 $150\mu\text{g}/\text{m}^3$ 左右,张家口、承德浓度分布集中,浓度水平迅速降低;秦皇岛、唐山整体浓度水平较低,但部分时间出现浓度高值;其它城市分布比较分散,存在比较明显的离散值。8 月份 90 百分位浓度高值易于出现在邢台、唐山等市。

从图 1-17 所示的 9 月份各市小提琴图可以看出,浓度主要分布范围 $80\mu\text{g}/\text{m}^3$ 至 $150\mu\text{g}/\text{m}^3$ 左右,各市浓度分布均比较分散,存在比较明显的离散值。张家口、承德 90 百分位浓度基本降至 $160\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下,臭氧污染基本结束;其它城市由于出现部分高值浓度,90 百分位浓度基本还高于 $160\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。9 月份 90 百分位浓度高值易于出现在唐山、石家庄、邯郸、保定等市。

从图 1-18 所示的 10 月份各市小提琴图可以看出,浓度主要分布范围 $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ 至 $90\mu\text{g}/\text{m}^3$ 左右,各市浓度分布均相对集中,但均存在部分高浓度离散值。各市 90 百分位浓度基本降至 $160\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下,臭氧浓度基本达标。10 月份 90 百分位浓度高值易于出现在衡水、沧州、廊坊等市。

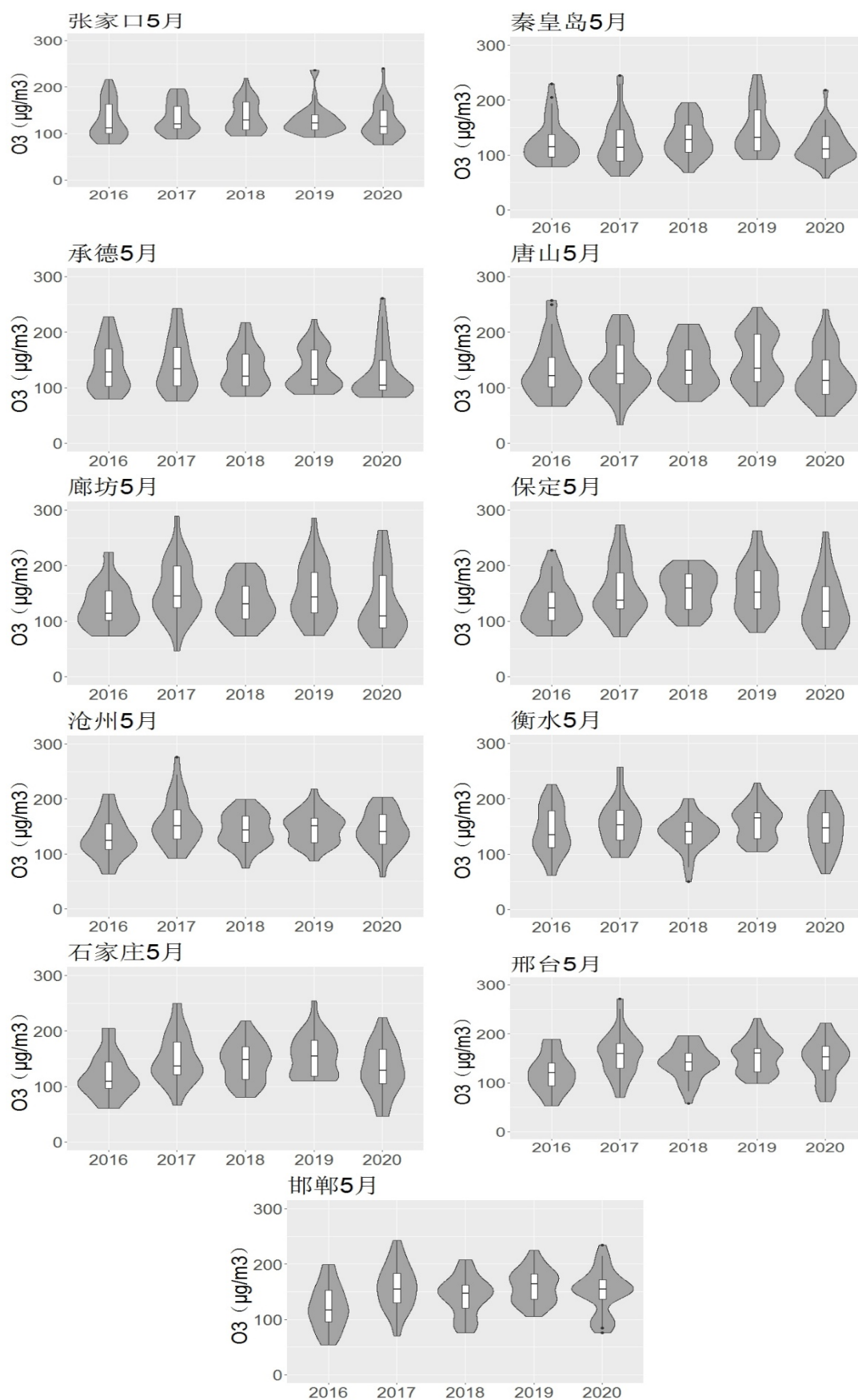


图 1-13 2015-2020 年各市 5 月浓度小提琴图

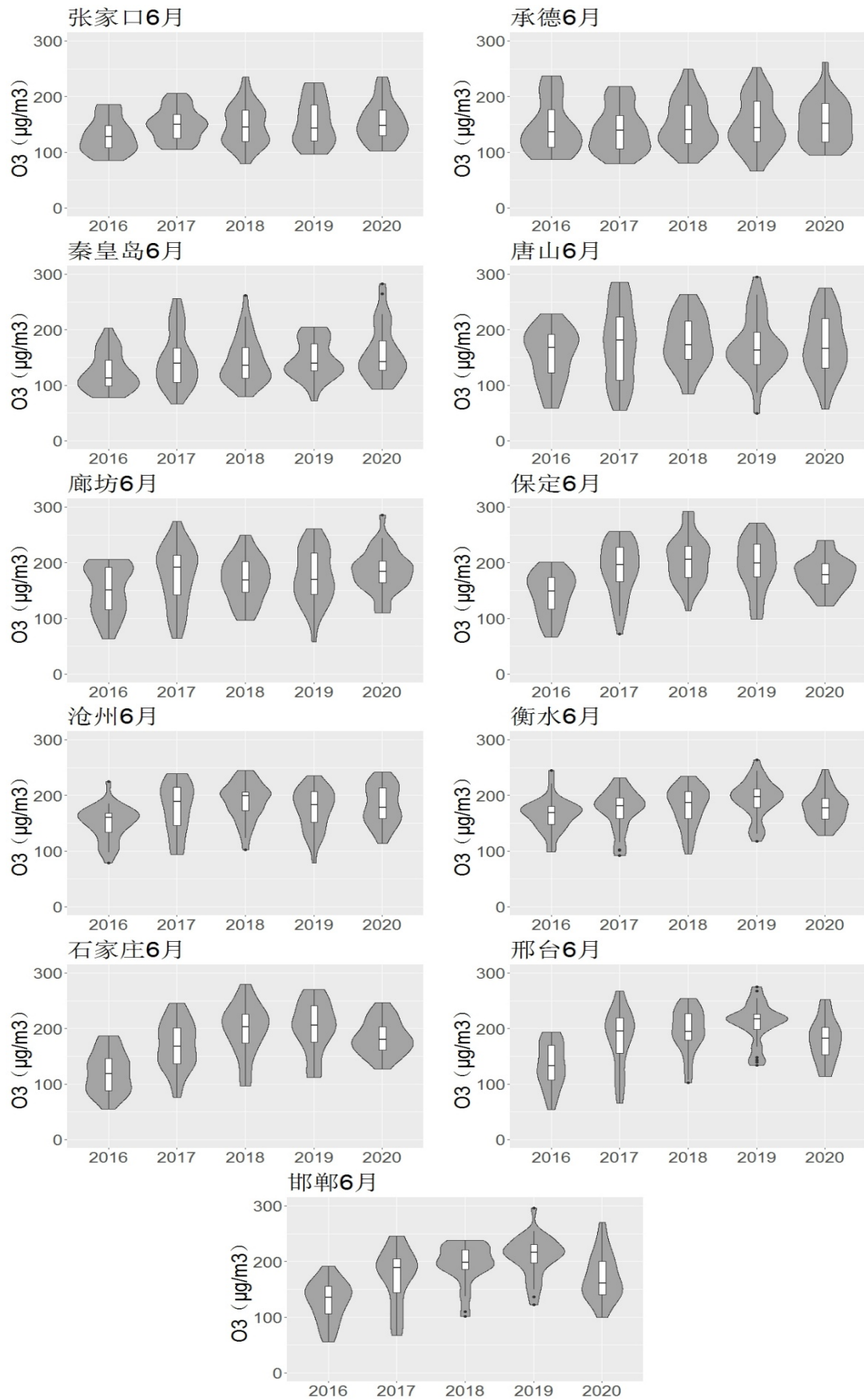


图 1-14 2015-2020 年各市 6 月浓度小提琴图

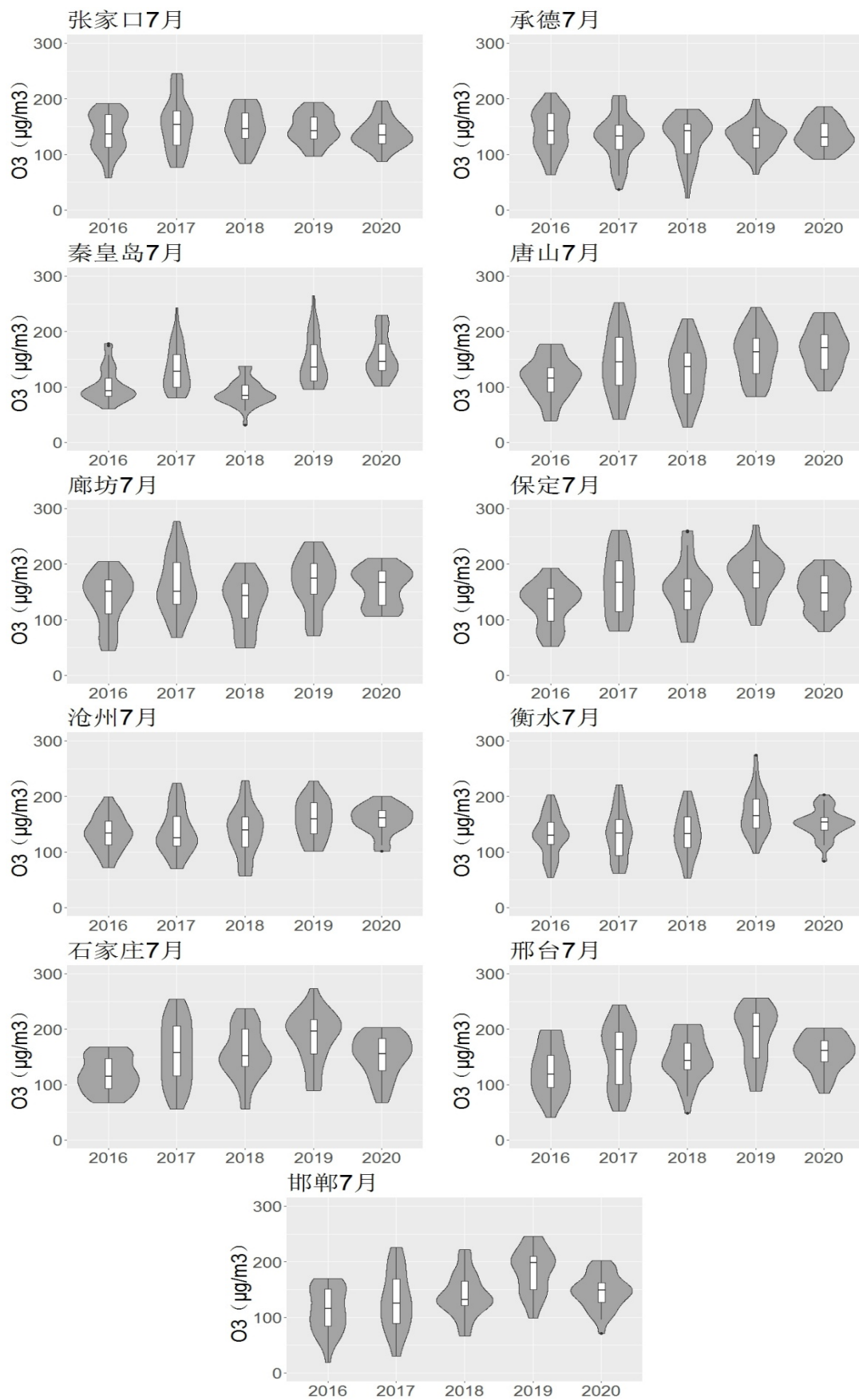


图 1-15 2015-2020 年各市 7 月浓度小提琴图

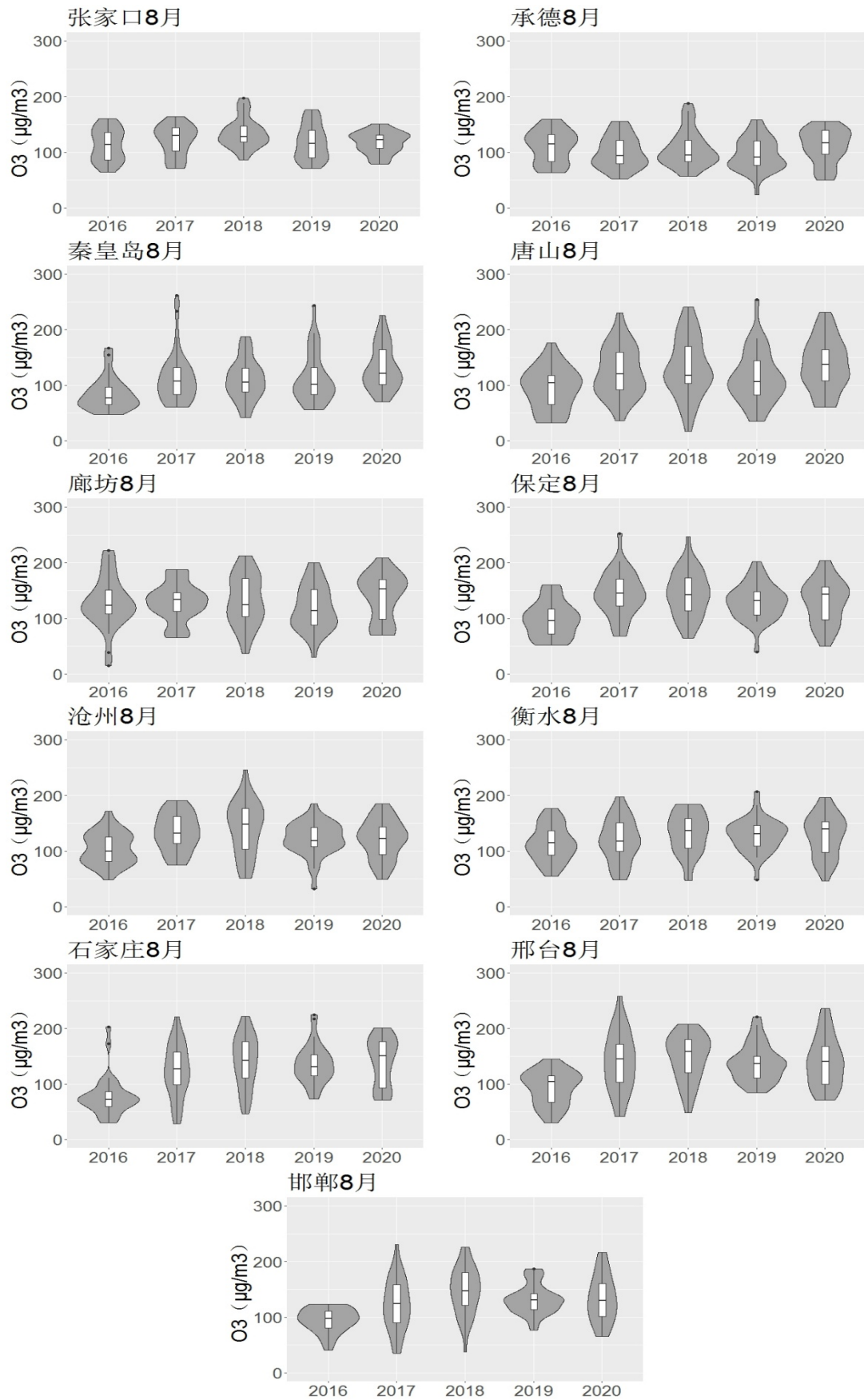


图 1-16 2015-2020 年各市 8 月浓度小提琴图

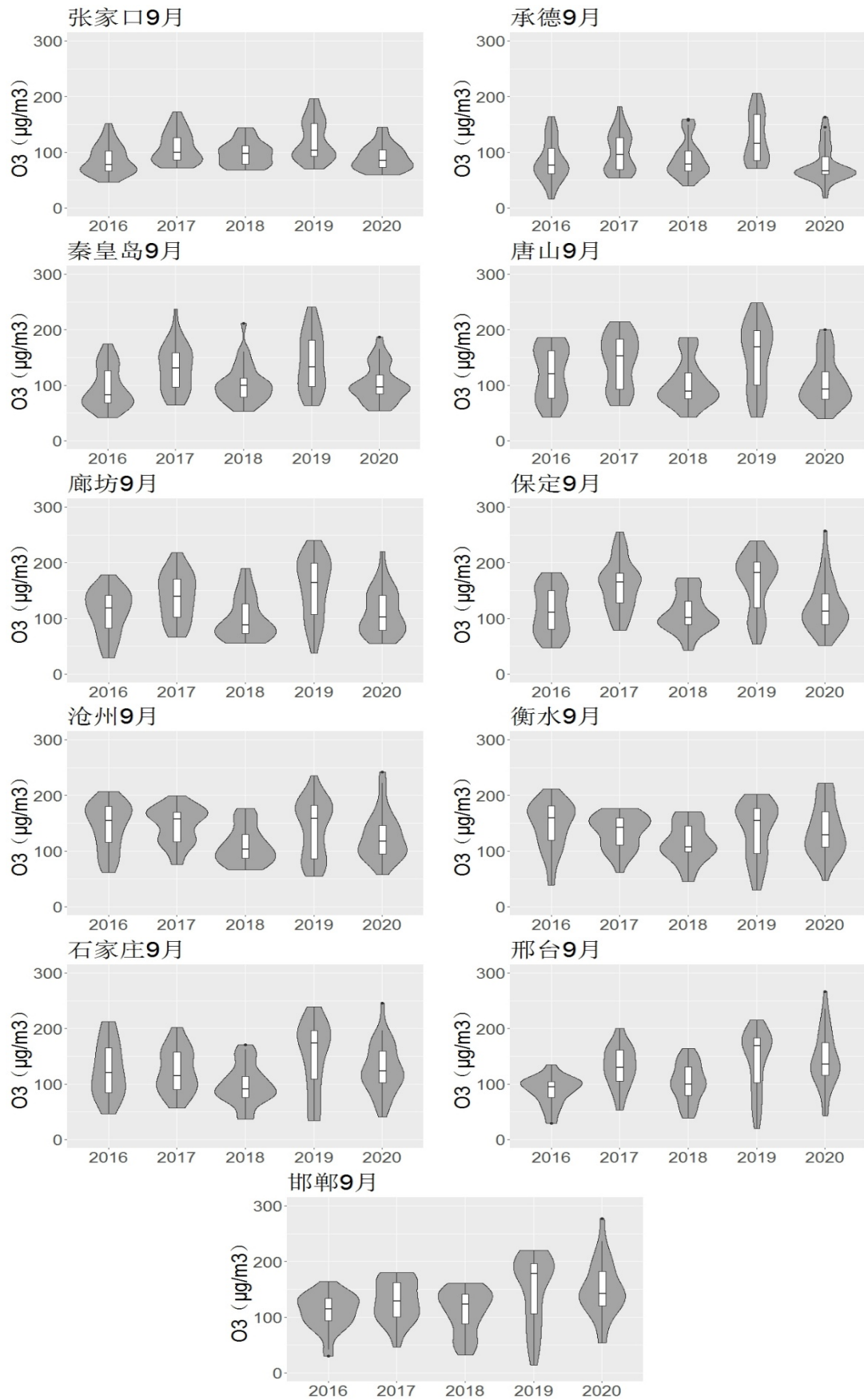


图 1-17 2015-2020 年各市 9 月浓度小提琴图

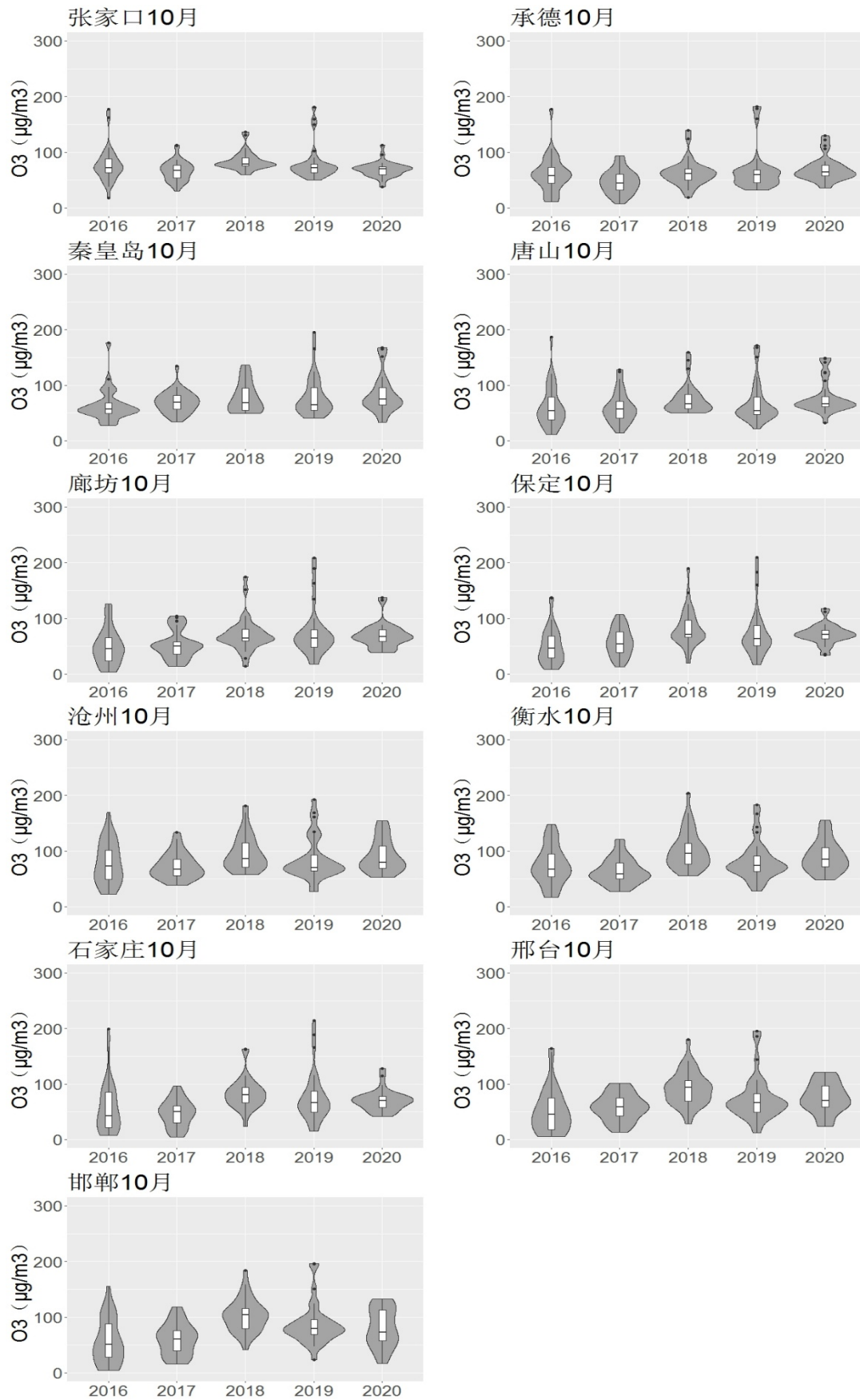


图 1-18 2015-2020 年各市 10 月浓度小提琴图

1.2.3 臭氧浓度日变化趋势

(1) 全省日变化趋势分析

选取 2016-2020 年 5-9 月臭氧污染较重时段做臭氧小时浓度的日变化，见图 1-19。由图 1-19 可见，臭氧浓度较高时段均出现在午后 14-17 时，低值浓度出现在日出前后 5-7 时。峰值浓度 2016 年<2020 年<2018 年<2019 年<2017 年，低值浓度 2016 年<2017 年<2018 年<2019 年=2020 年。2020 年与 2016 年相比小时浓度增长了 8-14 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，增长率约 6%-26%之间，其中 9 时-12 时和 19 时-23 时增长较多。

从小时浓度增减变化来看，与上一小时浓度相比 7 时至 15 时为臭氧小时浓度增长阶段，其中 8 时至 13 时增长较为显著，较上一小时浓度增长比例达到 10%-35%左右，9 时和 10 时的增长率均在 30%以上。17 时至次日 6 时为小时浓度减少阶段，其中 19 时至 22 时降低较为显著，减少率在 10%以上。

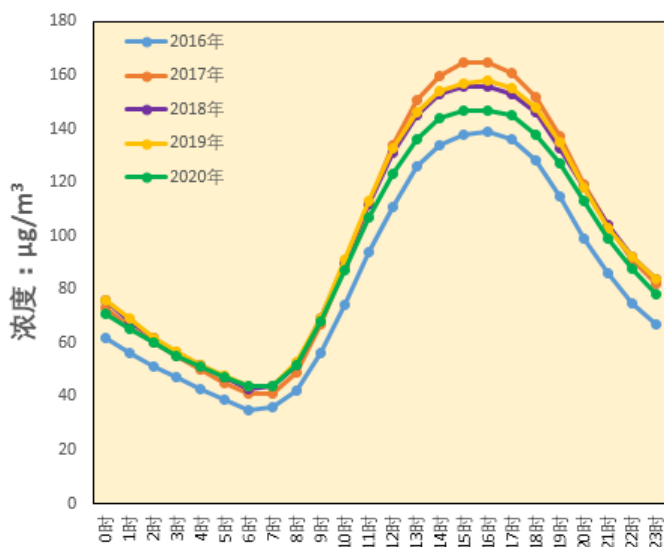


图 1-19 2016-2020 年 5-9 月河北省臭氧日均浓度变化曲线图

从图 1-20 所示的 5 月-9 月各月臭氧小时浓度日变化可见，从浓度水平来看，9 月<8 月<5 月<7 月<6 月，其中 9 月份整体浓度低于 8 月，但是 15 时最高值要高于 8 月。

从小时浓度增减变化来看，各月份 8 时至 15 时为臭氧小时浓度增长阶段，高值均出现在 15-16 时；17 时开始下降，18-23 时为迅速下降阶段；最低值出现在 6-7 时，5 月-7 月最低值出现在 6 时，8 月-9 月最低值在 7 时。9 月份 18 时至 23 时的浓度下降速度 $14\mu\text{g}/\text{m}^3/\text{h}$ ，下降速度高于其它月份。

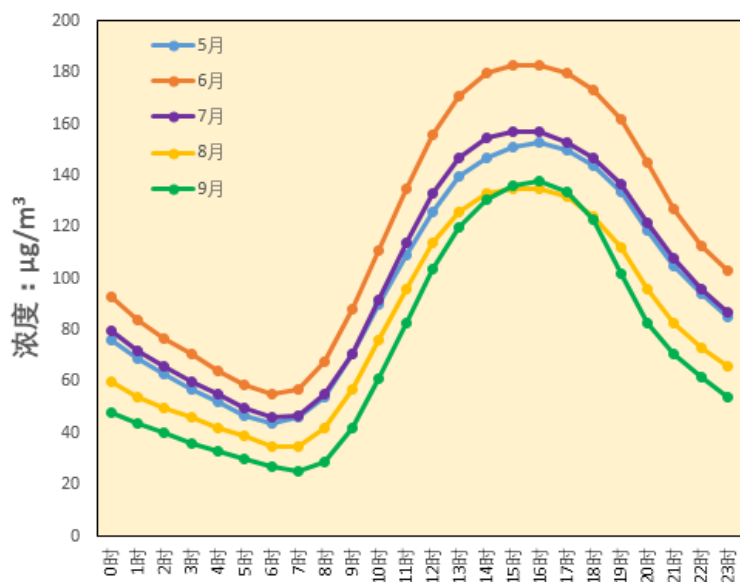


图 1-20 5月-9月河北省臭氧日均浓度变化曲线图

(2) 部分城市日变化趋势分析

自北向南选取张家口、廊坊、石家庄和邯郸 2019 年 5-9 月臭氧污染较重时段的臭氧小时浓度日变化，浓度较高时段主要出现在 14-17 时，其中张家口市峰值浓度出现的时间略早，在 14-15 时左右，邯郸、石家庄、廊坊峰值浓度出现在 15-16 时左右，四市浓度低值均出现在 5-7 时左右。

对比四市日变化趋势可见，午后浓度快速上升阶段从南至北上升速率逐渐降低，主要考虑因为纬度变化所致，由南往北太阳辐射逐步减轻。夜间时段张家口浓度明显高于其它三市，下午时段又明显低于其它三市，考虑张家口可能受地形和天然源排放影响本底值浓度较高。

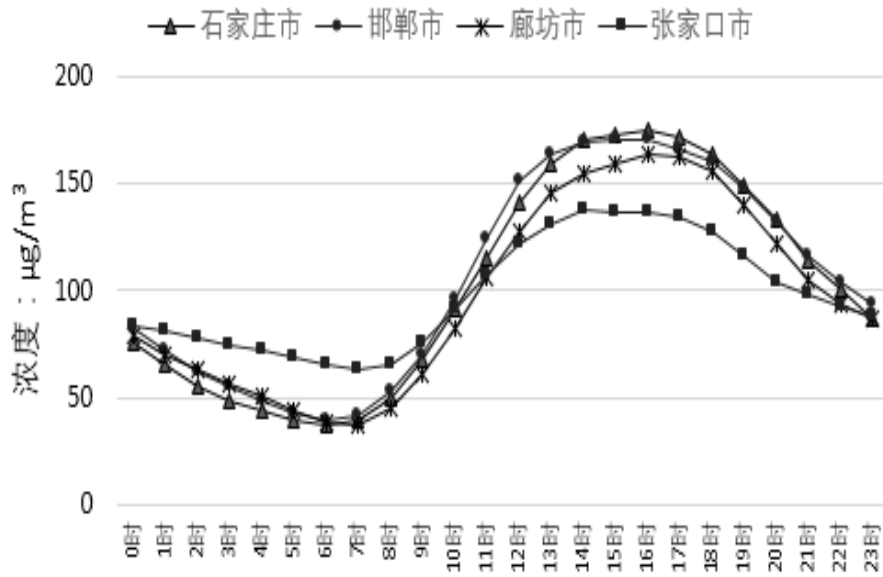


图 1-21 2019 年 5-9 月典型城市臭氧日均浓度变化曲线图

1.3 重点城市臭氧污染现状

图 1-22 给出了 2014-2020 年河北省各城市地面臭氧超标天数，各城市臭氧超标的天数有逐年增加趋势，超标天数超过 60 天的城市有沧州、石家庄、衡水、邯郸、保定、廊坊、唐山和邢台，超标天数接近 40 天的城市有张家口、承德和秦皇岛。

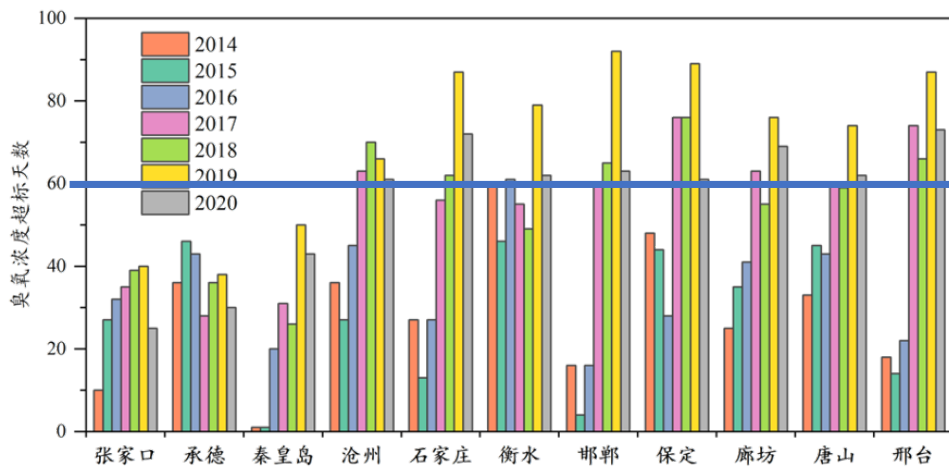


图 1-22 2014-2020 年河北省各城市臭氧超标天数

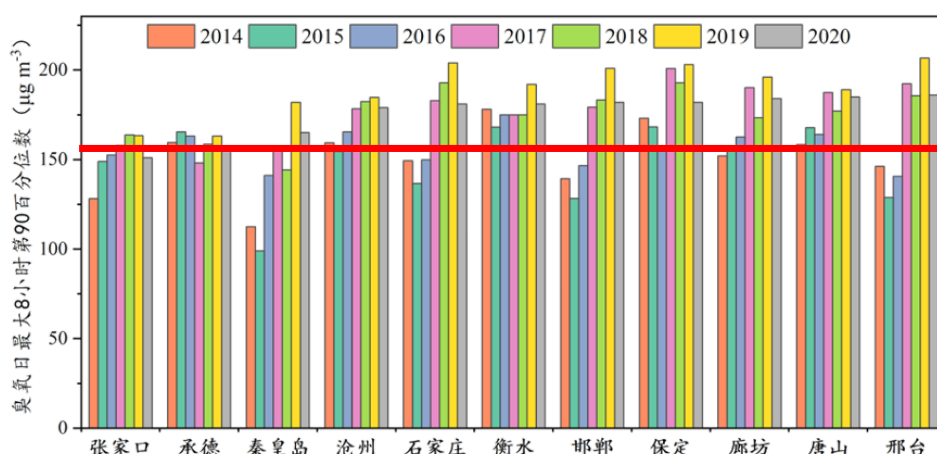


图 1-23 2014-2020 年河北省各城市臭氧日最大 8 小时第 90 百分位浓度

图 1-23 给出了 2014-2020 年间河北省各城市臭氧最大 8 小时第 90 百分位浓度，2020 年除张家口市外其他城市均超过了国家空气质量的二级标准。

由图 1-24 所示 2014-2020 年臭氧日最大 8 小时浓度的逐日分布可见，5 月下旬至 7 月底是臭氧超标出现频率高的月份。邯郸市 2019 年超标天数最多，6 月是臭氧污染最重的月份，即使在 9 月份也有出现超标的现象；衡水市臭氧超标天数最多的月份也是 5 月底至 6 月份；石家庄市臭氧超标天数最多的月份则是 5 月底至 7 月初。很显然，多年观测结果发现各城市臭氧超标常常出现在 6 月份，因此 6 月份臭氧污染的控制应是每年特别关键的月份。

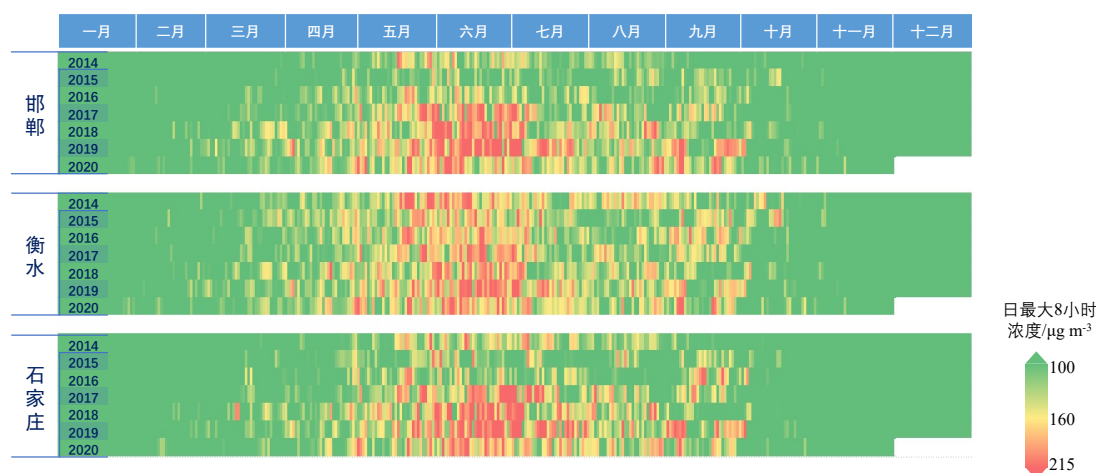


图 1-24 邯郸、衡水和石家庄臭氧日最大 8 小时浓度的日变化

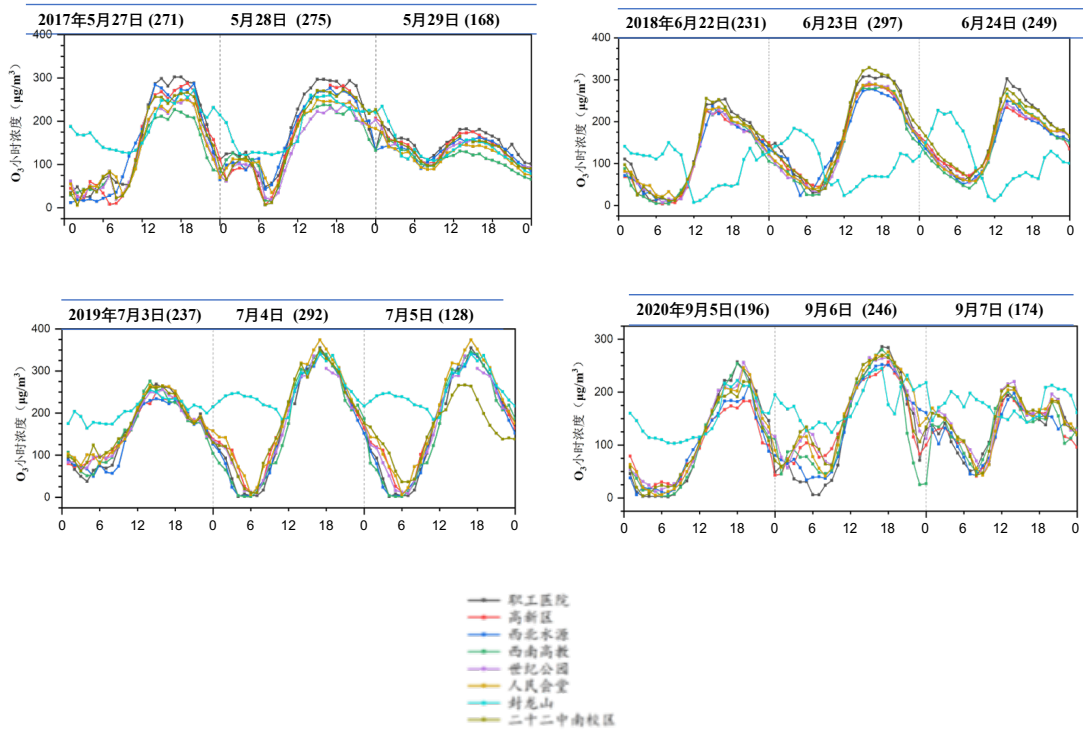


图 1-25 2017-2020 年石家庄市典型臭氧污染过程的逐日小时浓度变化

图 1-25 给出了 2017-2020 年石家庄市典型臭氧污染过程中地面臭氧小时浓度的逐时变化，其连续几天的污染过程分别出现在 2017 年 5 月 27-29 日、2018 年 6 月 22-24 日、2019 年 7 月 3 日-5 日和 2020 年 9 月 5-7 日，也就是说 5 月至 9 月均可能出现较重的连续多日的 O_3 污染过程。由图 1-25 可见，封龙山站点呈现出不同于其他站点的变化规律，其 O_3 浓度相对较低且高值常常出现在夜间零时至凌晨 6 时；除封龙山站点外的其它站点在 O_3 污染过程中变化规律类似且浓度水平差别不大，2019 年 O_3 小时浓度达到了 $390\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，2017、2018 和 2019 年也达到了 $300\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，近年来 O_3 最大值出现在 15-16 时。

图 1-26 给出了 2017-2020 年邯郸市典型臭氧污染过程中地面臭氧小时浓度的逐时变化，其连续几天的污染过程分别出现在 2017 年 6 月 19-21 日、2018 年 6 月 6-8 日、2019 年 6 月 14-16 日和 2020 年 9 月 5-7 日。显然，邯郸市不同于石家庄市，近几年发生的较重连续多日的 O_3 污染过程几乎出现在 6 月，当然即使 9 月也会发生重污染事件。由图 1-26 可以看出，邯郸市这几个站点 O_3 污染过程的变化规律十分类似，而且各小时浓度水平和出现 O_3 小时浓度峰值的时间也无明显差异，小时浓度最大值在 2019 年达到 $380\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，近年来 O_3 最大值出现在 15-16 时。

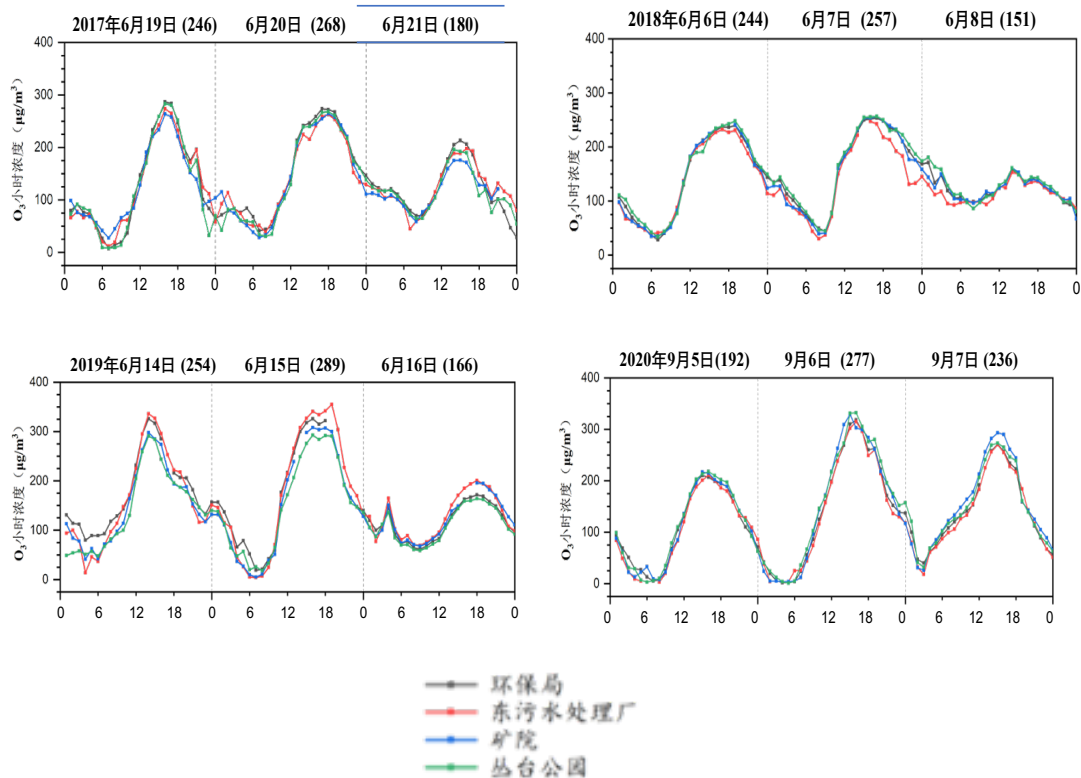


图 1-26 2017-2020 年邯郸市典型臭氧污染过程的逐日小时浓度变化

图 1-27 给出了 2017-2020 年衡水市典型臭氧污染过程中地面臭氧小时浓度的逐时变化，其连续几天的污染过程分别出现在 2017 年 5 月 27-29 日、2018 年 6 月 26-28 日、2019 年 7 月 1-3 日和 2020 年 6 月 26-28 日。可见，衡水市不近几年发生的较重连续多日的 O₃ 污染过程出现在 5 月底-7 月初，也就是说 O₃ 连续污染事件常常发生在 5 月底至 7 月初，其它月份还未发生。由图 1-27 可以看出，衡水市这几个站点在 O₃ 污染事件出现后 O₃ 小时浓度的变化规律十分类似，而且各小时浓度水平和出现 O₃ 小时浓度峰值的时间也无明显差异，小时浓度最大值在 2019 年达到 300µg/m³，其 O₃ 最大值出现在 15-16 时。

对比图 1-25-图 1-27 可见发现，石家庄地面 O₃ 出现污染时的小时最大浓度水平高于邯郸和衡水市，邯郸又略高于衡水市，但它们出现 O₃ 浓度峰值的时间几乎均在 15-16 时发生，城市各站点 O₃ 小时浓度的逐时变化趋势十分类似，出现 O₃ 峰值的时间也差别不大。

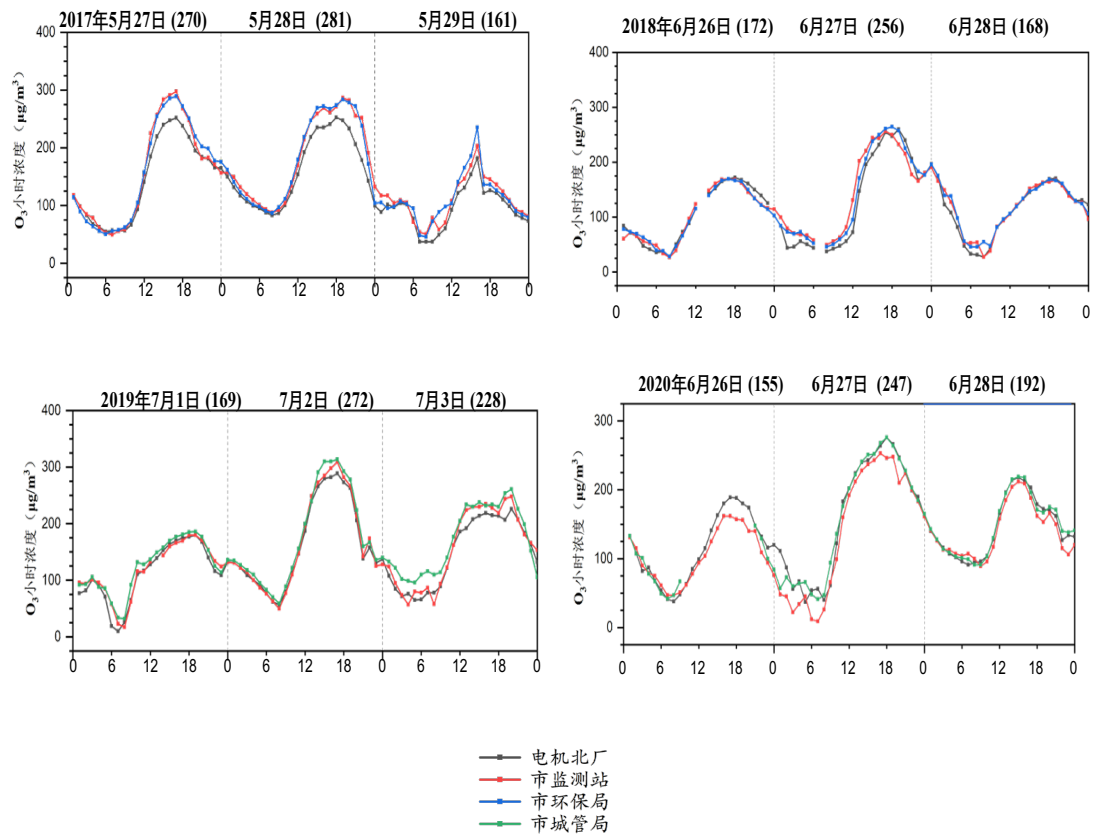


图 1-27 2017-2020 年衡水市典型臭氧污染过程的逐日小时浓度变化

第2章 河北省大气污染源排放清单与减排效果

2.1 2020 年大气污染物排放总体情况

2020 年河北省大气一次 PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO_x、VOCs、CO、NH₃ 年排放量分别为 56.1 万吨、134.9 万吨、26.1 万吨、110.7 万吨、102.2 万吨、1455.0 万吨、112.4 万吨。图 2-1 展示了河北省所有污染源的大气污染物排放分担率。

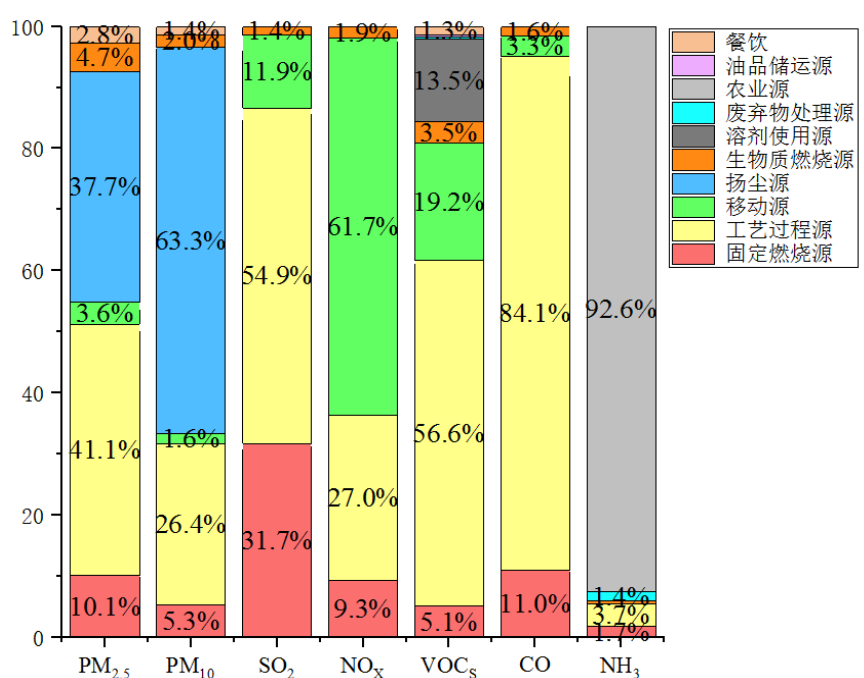


图 2-1 主要部门排放量及贡献比例

由图 2-32 可知，化石燃料固定燃烧源是 SO₂、CO 的第二排放源，占总排放量的比分别为 31.7%、11.0%；是一次 PM_{2.5}、PM₁₀、NO_x 的第三排放源，在总排放量中占比分别为 10.1%、5.3%、9.3%；工艺过程源是一次 PM_{2.5}、SO₂、VOCs、CO 的首要排放源，占总排放量的百分比分别为 41.1%、54.9%、56.6%、84.1%；是 PM₁₀、NO_x 的第二排放源，占总排放量的比分别为 26.4%、27.0%；移动源是 NO_x 的首要排放源，VOCs 的第二排放源，占总排放量的占比分别为 61.7%、19.2%；溶剂使用源是 VOCs 的重要来源，占总排放量的比为 13.5%；

农业源是 NH₃ 的首要排放源，占总排放量的占比为 92.6%；扬尘源是 PM₁₀ 的首要排放源，占总排放量的比为 63.3%，是一次 PM_{2.5} 的第二排放源，在总排放量中占比为 37.7%。

生物质燃烧源一次 PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO_x、VOCs、CO 排放量分别占总排放量的 4.7%、2.0%、1.4%、1.9%、3.5%、1.6%；油品储运销源、餐饮油烟源对 VOCs 排放的贡献均较小，其排放量在 VOCs 排放总量中占比分别是 0.3%、1.3%。废弃物处理源 NH₃ 排放量在 NH₃ 总排放量中占比为 1.4%。

如果按照

表 2-1 所示的工业源、移动源、扬尘源、生活源和其他源分类，得到图 2-2 所示河北省主要排放源的大气污染物排放分担率。

表 2-1 污染源分类

一级源	二级源	备注
工业源	钢铁	
	水泥	
	炼焦	
	工业锅炉	燃煤、天然气、燃料油、煤气、液化气、生物质等工业锅炉
	电力	
	热力生产和供应	
	陶瓷	
	玻璃	
	药品制造	
	精炼石油产品	
	人造板制造	
	工业溶剂使用源	汽车喷涂、家具喷涂、家电喷涂、装备制造喷涂、电子器件喷涂、印刷、染料印染等行业
	其他行业	沥青油毡、石墨碳素、煤炭开采、石油开采、基础化学原料制造、肥料制造、化学农药制造、泡沫塑料、涂料油墨颜料及类似产品制造、合成树脂、合成纤维、轮胎制造、人造革合成革、植物油加工、焙烤食品制造业、造酒、造纸和纸制品业等行业
规模以下企业	未列入环境统计规模以上企业的工业企业	
移动源	柴油车	
	汽油车	
	其他燃料车	
	工程机械	
	农业机械	
	沿海船舶	

一级源	二级源	备注	
	民航飞机		
	施工扬尘		
	道路扬尘		
扬尘源	农田扬尘		
	裸地扬尘		
	裸露山体扬尘		
	民用锅炉	民用、公辅机构、商用及农业生产锅炉	
	民用散烧	散烧煤、散烧天然气、户用生物质炉具	
	干洗		
	汽修		
生活源	建筑涂料		
	家用溶剂		
	道路市政设施防腐		
	油品储运销		
	餐饮		
	沥青铺路		
	农村人体活动	主要指农村旱厕 NH ₃ 排放源	
	秸秆焚烧		
	其他源	农业源	畜禽养殖、氮肥施用、农药使用
		废弃物处理源	污水处理、生活垃圾处理、危废处理

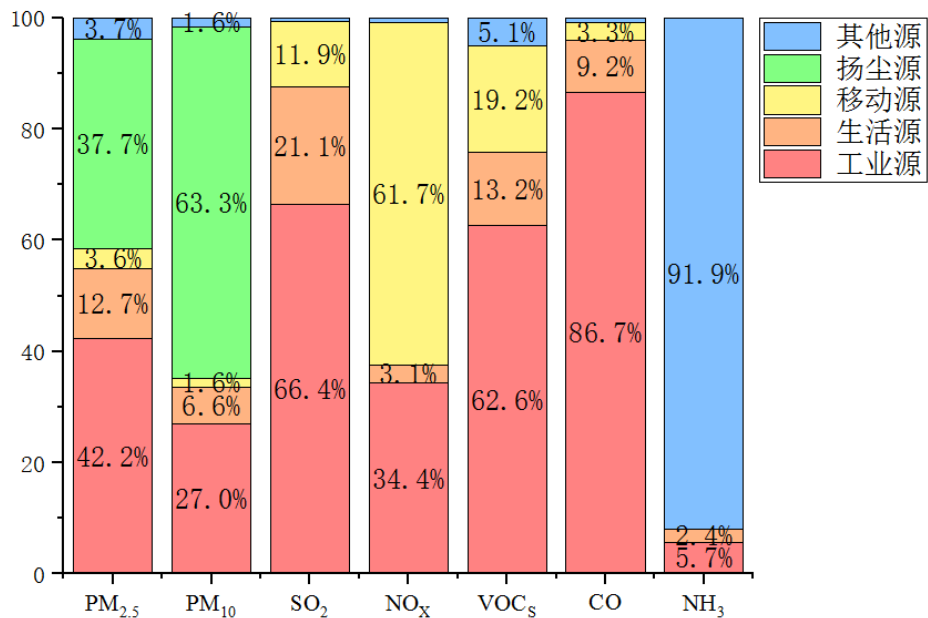


图 2-2 主要排放源大气污染物排放分担率

由图 2-2 可知，工业源是一次 PM_{2.5}、SO₂、VOCs、CO 的首要排放源，在总排放量中占比分别为 42.2%、66.4%、62.6%、86.7%；是 PM₁₀、NO_x、NH₃ 的第二排放源，在总排放量中占比分别为 27.0%、34.4%、5.7%；移动源是 NO_x 的首要排放源，VOCs 的第二排放源，在总排放量中的占比分别为 61.7%、19.2%；扬尘源是 PM₁₀ 的首要排放源，一次 PM_{2.5} 的第二排放源，在总排放量中占比分别为 63.3%、37.7%；生活源对一次 PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO_x、VOCs、CO、NH₃ 的排放贡献分别为 12.7%、6.6%、21.1%、3.1%、13.2%、9.2%、5.7%；其他源是 NH₃ 的首要排放源，占 91.9%。

2.2 各类源排放特征与空间分布

2.2.1 工业源

(1) 总体排放情况及二级源排放分担率

2020 年河北省工业源一次 PM_{2.5} 排放量 24.3 万吨，PM₁₀ 排放量 37.4 万吨，SO₂ 排放量 17.7 万吨，NO_x 排放量 38.6 万吨，VOCs 排放量 67.5 万吨，CO 排放量 1261.3 万吨，NH₃ 排放量 6.4 万吨，结果见表 2-2，其主要行业污染物排放分担率见图 2-3。

表 2-2 工艺过程源大气污染物排放量（吨）

行业	PM _{2.5}	PM ₁₀	SO ₂	NO _x	VOCs	CO	NH ₃
钢铁	165887	249675	86401	187000	232871	11509859	4820
水泥	24005	41409	7328	30892	25315	284605	4327
炼焦	7785	9115	4832	8480	60695	59651	1901
工业锅炉	3324	4406	9175	41841	31901	102972	3654
电力	2260	2500	16576	28083	4551	227529	17634
热力生产和供应	733	811	4110	11727	937	41624	885
陶瓷	123	445	2162	11756	15656	0	0
玻璃	544	557	4755	9777	4086	0	1541
药品制造	0	0	0	0	49378	0	0
精炼石油产品	0	0	0	0	24600	0	0
人造板制造	0	0	0	0	24352	0	0
工业溶剂使用源	0	0	0	0	23874	0	0
其他行业	1693	3625	9068	3470	72874	387742	29394
规模以下企业	30687	51145	28738	47813	68667	0	0
合计	237040	363688	173146	380839	639757	12613982	64154

一次 PM_{2.5}、PM₁₀ 排放贡献较高的主要有钢铁、水泥行业，一次 PM_{2.5} 排放量分别占工业源总排放的 70.0%、10.1%；PM₁₀ 分别占 68.7%、11.4%。SO₂ 排放贡献较高的有钢铁、电力行业和工业锅炉，分别占工业源总排放量的 49.9%、9.6%、5.3%。NO_x 排放贡献较高有钢铁、工业锅炉、水泥、电力行业，占比 49.1%、11.0%、8.1%、7.4%。VOCs 排放贡献较高有钢铁、炼焦、制药等行业，占比分别为 37.8%、9.9%、8.0%。对 CO 排放贡献较高的是钢铁行业，占工业源总排放的 91.2%。可知，钢铁行业对一次 PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO_x、VOCs、CO 的排放贡献均居首位。另外，规模以下企业一次 PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO_x、VOCs 的排放占比分别为 12.9%、14.1%、16.6%、12.6%、11.1%。

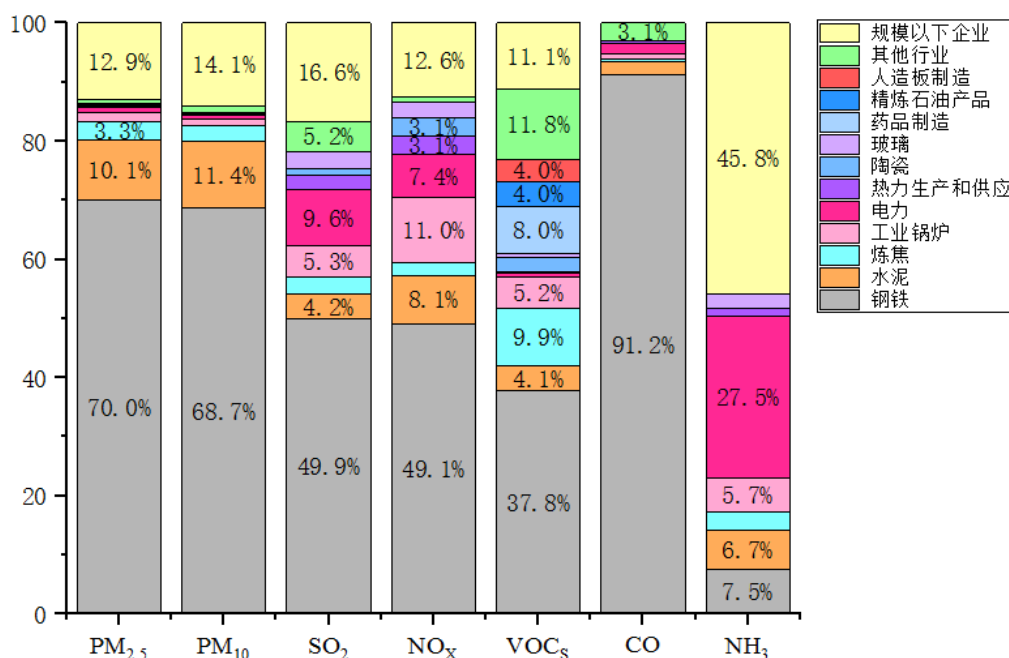


图 2-3 工业源主要行业污染物排放分担率

(2) 钢铁行业排放特征

2020 年河北省钢铁行业一次 PM_{2.5} 排放量 16.6 万吨，PM₁₀ 排放量 25.0 万吨，SO₂ 排放量 8.6 万吨，NO_x 排放量 18.7 万吨，VOCs 排放量 23.3 万吨，CO 排放量 115.1 万吨，NH₃ 排放量 0.5 万吨，分别占工业源排放总量的 70.0%、68.7%、49.9%、49.1%、37.8%、91.2%、7.5%。

钢铁行业包括烧结（球团）、炼钢、炼铁以及钢压延加工和黑色金属铸造企业。各生产环节排放量见表 2-3，占比情况见图 2-4。从各生产环节污染物排放情况看，SO₂、NO_x、VOCs、CO 排放主要来自烧结/球团环节，分别占整个钢铁行业排放的 74.5%、56.8%、82.3%、53.3%；而一次 PM_{2.5}、PM₁₀ 排放主要来自炼钢和炼铁环节，炼钢占到整个钢铁行业排放量的 51.8%、46.2%，炼铁占 32.6%、35.0%；NH₃ 排放主要来自企业自备电厂的氨逃逸，占整个钢铁行业排放的 84.0%。

表 2-3 不同生产环节产品产量及大气污染物排放量（吨）

生产环节	活动水平	PM _{2.5}	PM ₁₀	SO ₂	NO _x	VOC _s	CO	NH ₃
炼焦（焦炭）	15141711	3806	6409	4711	6124	24651	24227	772
烧结/球团 （烧结矿/球团矿）	383415265	15482	31864	64337	106227	191708	6134644	
炼铁（生铁）	221093322	54149	87397	7738	37586		3380517	
炼钢（粗钢）	219228312	85870	115405			13154	1918248	
钢压延加工 （钢材）	372805214	384	446	2407	4648	42		
黑色金属铸造 （铸铁）	2056716	2596	4173	352	410	2272		
自备电厂 （耗煤量）	26111480	3600	3981	6856	32005	1044	52223	4047
合计		165887	249675	86401	187000	232871	11509859	4820

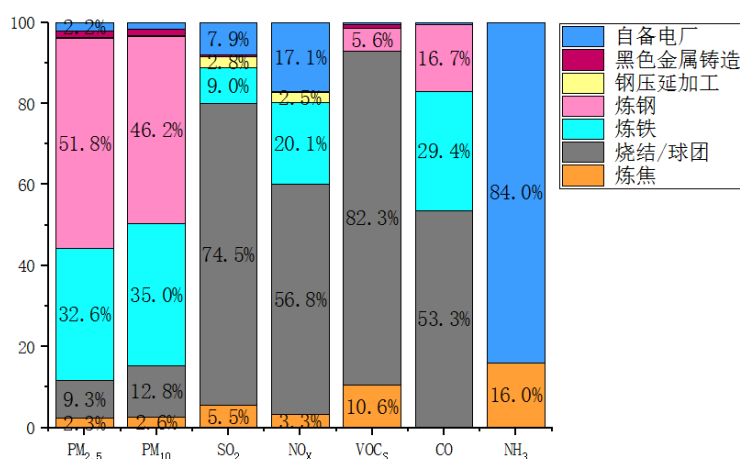


图 2-4 不同生产环节大气污染物排放量占比

各市钢铁行业大气污染物排放分担率见图 2-5，可知，河北省钢铁企业排放主要集中在唐山、邯郸二市，其中唐山市钢铁行业各类大气污染物排放量占到全省钢铁行业排放量的 52.1-57.6%，邯郸市占 17.5-22.2%。

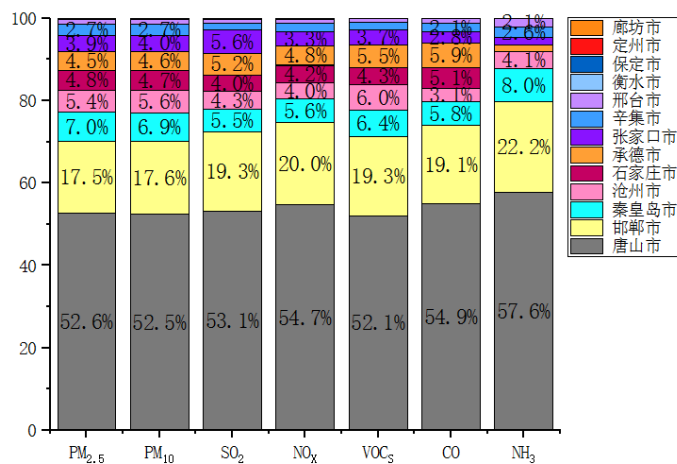


图 2-5 各市钢铁行业大气污染物排放分担率

主要钢铁企业（包含烧结、球团、炼钢、炼铁工序钢铁企业）排放空间分布见

图 2-6。除衡水、定州为无钢市，保定尚有一家球团矿生产企业外，秦皇岛、承德、石家庄、张家口、沧州、邢台、辛集、廊坊均分布有少量钢铁生产企业，各项大气排放量合计占到全省的 30%左右。

(3) 水泥行业排放特征

2020 年水泥行业一次 PM_{2.5} 排放量 2.4 万吨，PM₁₀ 排放量 4.1 万吨，SO₂ 排放量 0.7 万吨，NO_x 排放量 3.1 万吨，VOCs 排放量 2.5 万吨，CO 排放量 28.5 万吨，分别占工业源排放总量的 10.1%、11.4%、4.2%、8.1%、4.1%、2.3%。

水泥行业包括孰料和水泥生产企业。排放量见表 2-4。可知，孰料生产是水泥行业的主要排放环节，一次 PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO_x、VOCs、CO、NH₃ 分别占整个水泥行业排放的 84.7%、77.8%、100%、100%、100%、100%、100%。

各市水泥行业大气污染物排放分担率见图 2-7，水泥行业主要污染物排放空间分布见图 2-8。可知，河北省水泥行业排放量最大的是唐山市，各项污染物排放量占全省排放量的 25.2-39.2%。

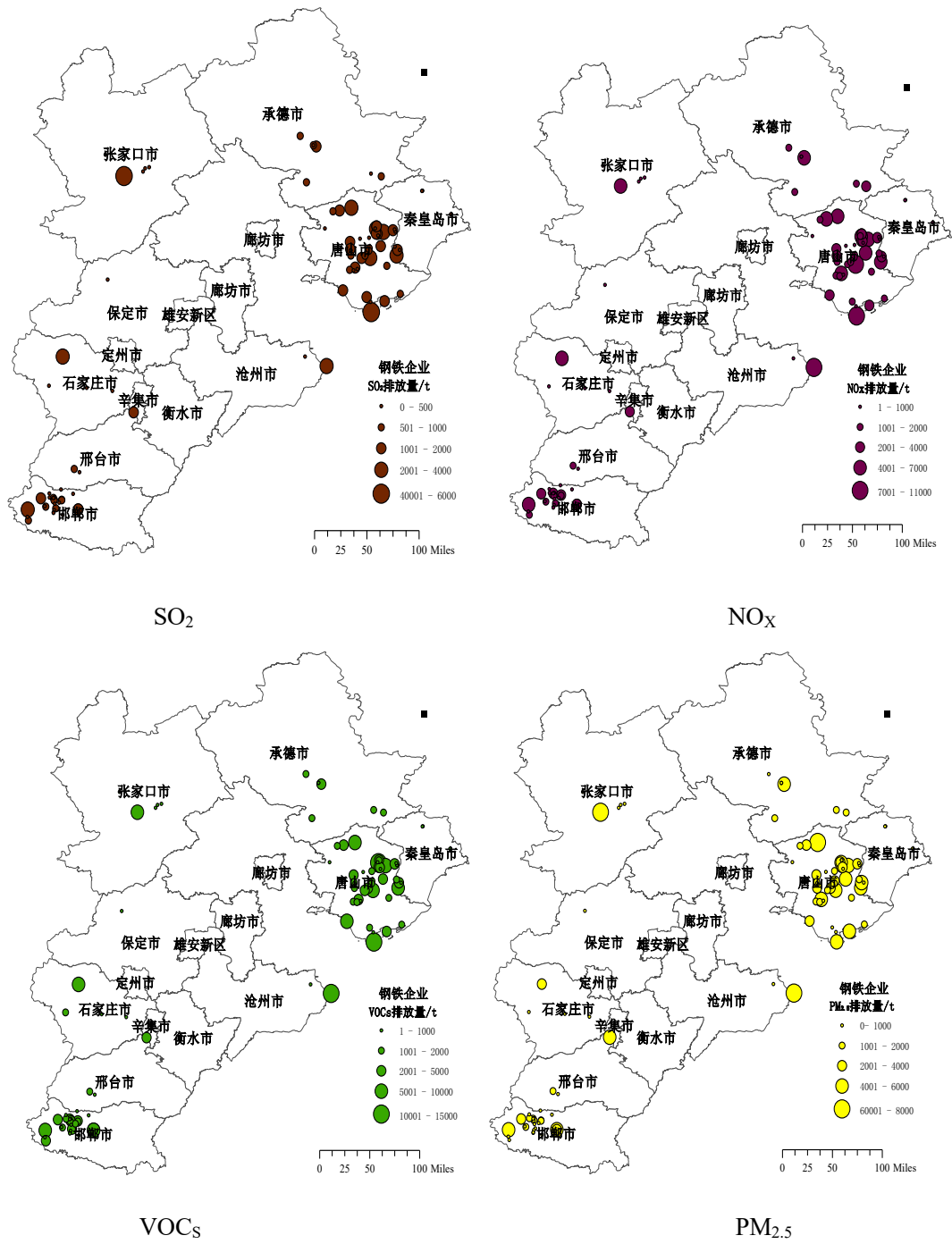


图 2-6 钢铁行业主要大气污染物排放空间分布

表 2-4 水泥行业不同产品产量及大气污染物排放量 单位：吨

生产环节	产品产量 (万 t)	PM _{2.5}	PM ₁₀	SO ₂	NO _x	VOCs	CO	NH ₃
熟料	7671	20329	32219	7328	30892	25315	284605	4327
水泥	18379	3676	9190	—	—	—	—	—
合计		24005	41409	7328	30892	25315	284605	4327

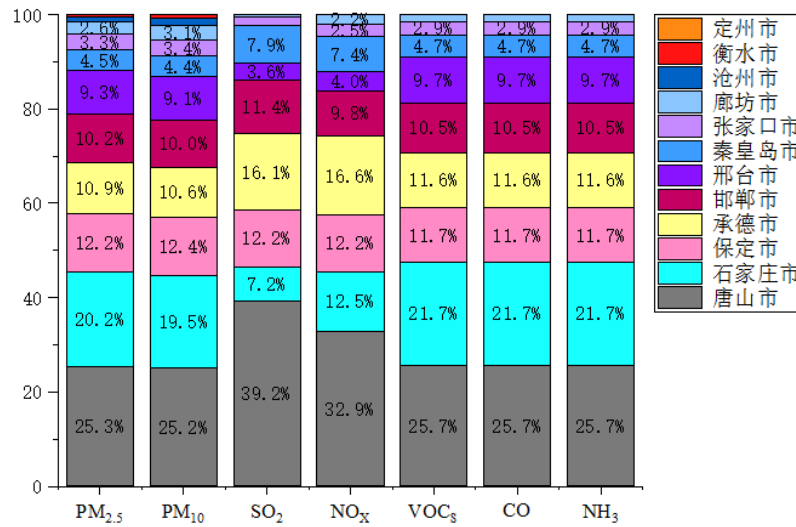


图 2-7 各市水泥行业大气污染物排放分担率

(4) 焦化行业排放特征

2020年河北省焦化行业一次PM_{2.5}排放量2.4万吨,PM₁₀排放量4.1万吨,SO₂排放量0.5万吨,NO_x排放量0.8万吨,VOCs排放量6.1万吨,CO排放量6.0万吨,NH₃排放量0.4万吨,分别占工业源排放总量的3.3%、2.5%、2.8%、2.2%、9.5%、0.5%、3.0%。

各市焦化行业大气污染物排放分担率见图 2-9,主要焦化企业排放空间分布见图 2-10。可知,河北省焦化行业排放主要集中在唐山、邯郸二市,其中唐山市焦化行业各类大气污染物排放量占到全省的54.2-57.1%,邯郸市占22.1-23.2%。

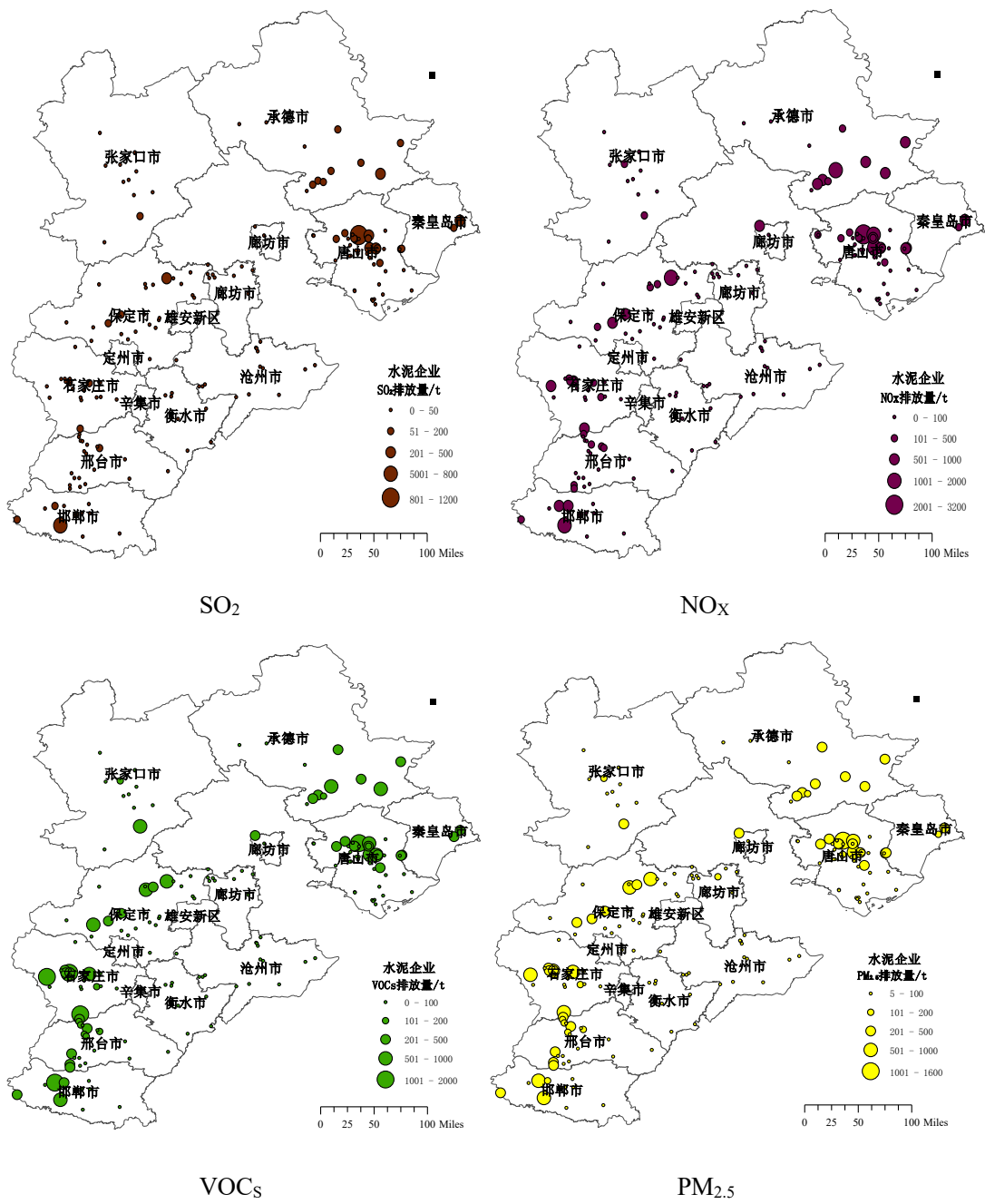


图 2-8 水泥行业主要大气污染物排放空间分布

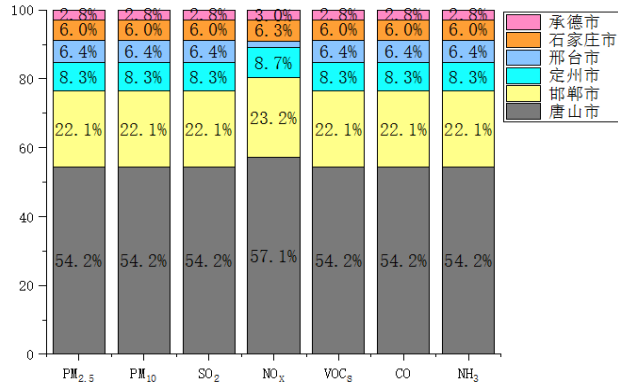


图 2-9 各市焦化行业大气污染物排放分担率

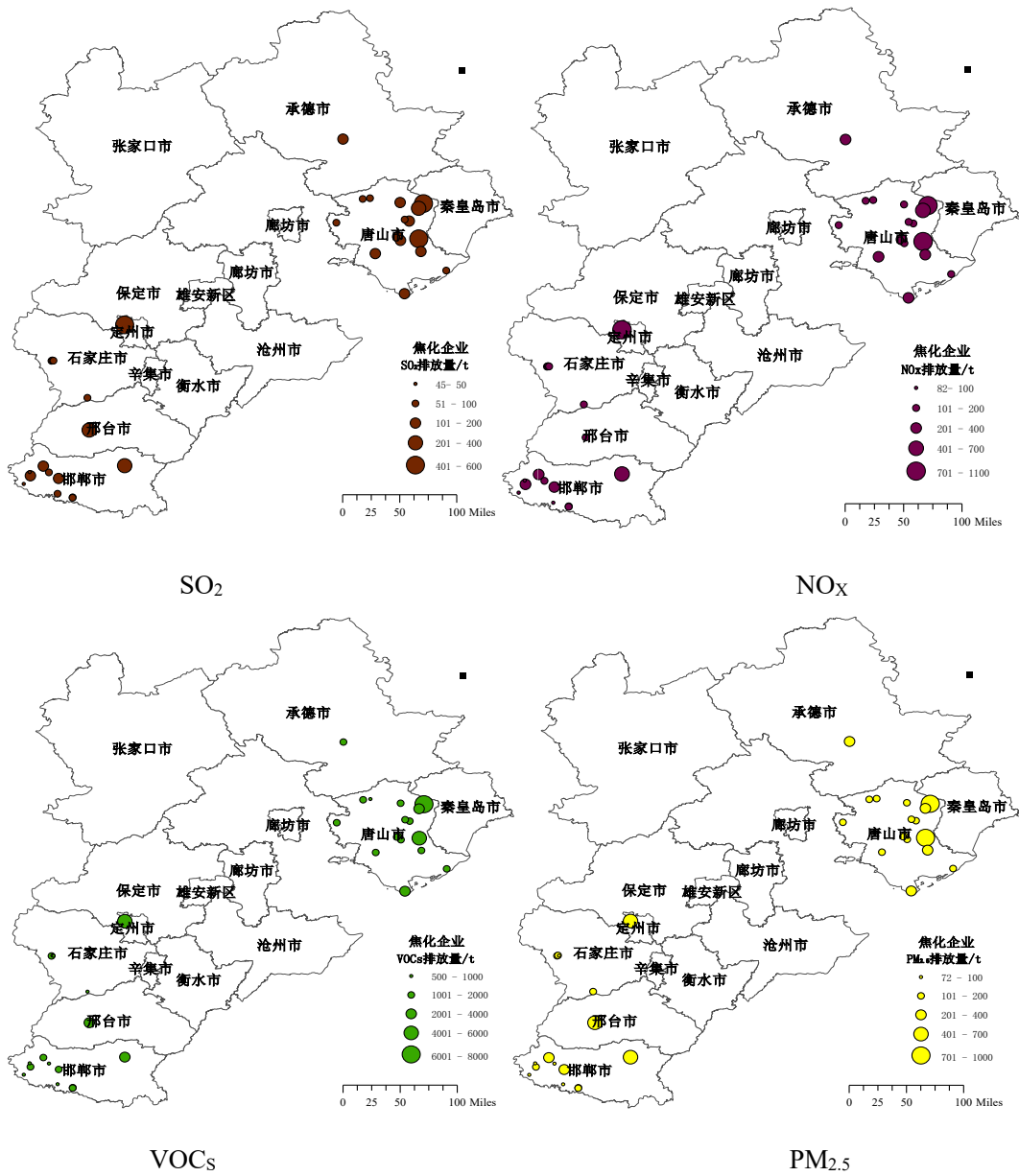


图 2-10 焦化行业主要大气污染物排放空间分布

(5) 工业锅炉排放特征

2020年河北省工业锅炉一次PM_{2.5}排放量0.3万吨,PM₁₀排放量0.4万吨,SO₂排放量0.9万吨,NO_x排放量4.2万吨,VOCs排放量3.2万吨,CO排放量10.3万吨,NH₃排放量0.4万吨,分别占工业源排放总量的1.4%、1.2%、5.3%、11.0%、5.0%、0.8%、5.7%。

工业锅炉主要燃料消耗量及污染物排放量见表2-5,各类燃料的排放分担率见图2-11。可知,工业锅炉中,燃煤锅炉对一次PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO_x、VOC_s的排放贡献最高,分别占55.7%、50.8%、44.7%、35.1%、48.8%。生物质锅炉对NO_x、VOC_s、CO、NH₃的排放占比分别为27.8%、37.5%、63.9%、69.5%。天然气对NO_x的排放贡献占工业源总排放量的26.7%。

表 2-5 工业锅炉主要燃料消耗量及其大气污染物排放量 (吨)

燃料种类	燃料耗量	单位	PM _{2.5}	PM ₁₀	SO ₂	NO _x	VOC _s	CO	NH ₃
煤炭	720	万吨	1851	2239	4100	14668	15553	14401	1116
生物质	1057	万吨	552	651	1591	11623	11947	65763	2537
天然气	660252	万立方米	157	157	0	11164	792	8312	
高炉煤气	125	万吨	375	375	0	1437	625	13605	
焦炭	32	万吨	142	405	424	262	13	641	
醇基燃料	12	万吨	70	98	0	676	15	69	
燃料油	11	万吨	29	45	1207	486	326	68	
焦炉煤气	8640	万立方米	3	3	0	75	2	112	
柴油	1700	吨	1	1	5	16	0	1	
液化气	58	吨	0	0	0	0	2	0	
其他燃料	104	万吨标煤	144	432	1847	1435	2625	0	
	合计		3324	4406	9175	41841	31901	102972	3654

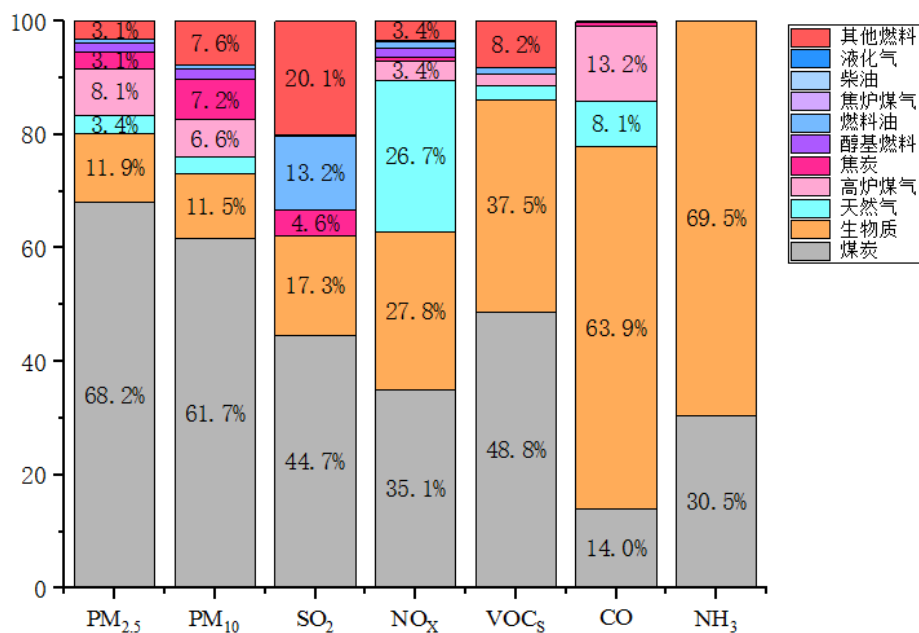


图 2-11 工业锅炉不同燃料污染物排放分担率

各市工业锅炉燃料消耗量占比及污染物排放分担率见图 2-12。燃煤耗量前三位的城市是沧州、唐山、邢台，分别占全省工业锅炉燃煤消耗量的 23%、21%、17%；生物质消耗较多的是邢台、廊坊、石家庄，占全省工业锅炉生物质消耗量的 16%、14%、10%。天然气消耗前三位的是沧州、廊坊、邢台，分别占全省工业锅炉天然气消耗量的 16%、15%、14%。

工业锅炉中，各项污染物排放占比最高的是唐山市，一次 PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO_x、VOC_s、CO 排放占比分别为 34%、37%、19%、22%、16%、17%。工业锅炉一次 PM_{2.5}、PM₁₀ 排放较高的还有承德市，排放占比为 25%、23%；SO₂、NO_x、VOC_s、CO 排放较高的还有承德和石家庄。

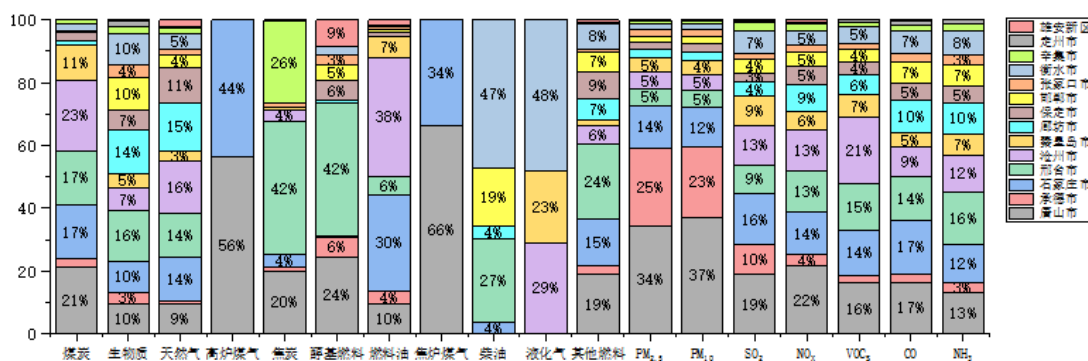


图 2-12 各市工业锅炉燃料消耗占比及污染物排放分担率

(6) 电力行业排放特征

2020年,河北省电力行业一次PM_{2.5}排放量0.2万吨,PM₁₀排放量0.3万吨,SO₂排放量1.7万吨,NO_x排放量2.8万吨,VOCs排放量0.5万吨,CO排放量22.8万吨,NH₃排放量1.8万吨,分别占工业源排放总量的1.0%、0.7%、9.6%、7.4%、0.7%、1.8%、27.5%。

各市电力行业(不包括自备电厂)燃煤消耗量、装机容量及年发电量见表2-6,主要大气污染物排放空间分布见图2-13。装机容量、年发电量、燃煤消耗量及污染物排放量前三位的城市是石家庄、唐山、张家口。

表 2-6 各市电力行业装机容量、燃煤消耗量及污染物排放量 单位: 吨

市	装机容量(万千瓦)	燃煤消耗量(万吨)	年发电量(万千瓦时)	PM _{2.5}	PM ₁₀	SO ₂	NO _x	VOCs	CO	NH ₃
石家庄市	806	1853	3733850	437	483	2039	3779	741	37062	2872
唐山市	716	1975	2864710	373	412	2651	3923	790	39506	3062
张家口市	589	1438	2591825	325	360	3924	5126	575	28766	2229
沧州市	528	1108	2371663	329	363	1553	2796	443	22153	1717
邯郸市	527	1307	2404194	221	244	1656	3201	523	26134	2025
邢台市	269	625	1210536	123	137	1035	1229	250	12498	969
定州市	252	461	1142068	48	53	1027	2788	184	9221	715
保定市	251	701	1208267	126	140	723	1696	280	14010	1086
秦皇岛市	207	555	1264660	48	53	136	792	222	11105	861
廊坊市	203	439	926485	74	81	507	870	176	8779	680
承德市	177	511	659392	85	94	610	973	204	10224	792
衡水市	140	384	665548	62	69	593	807	154	7675	595
辛集市	2	20	14819	10	11	123	103	8	396	31

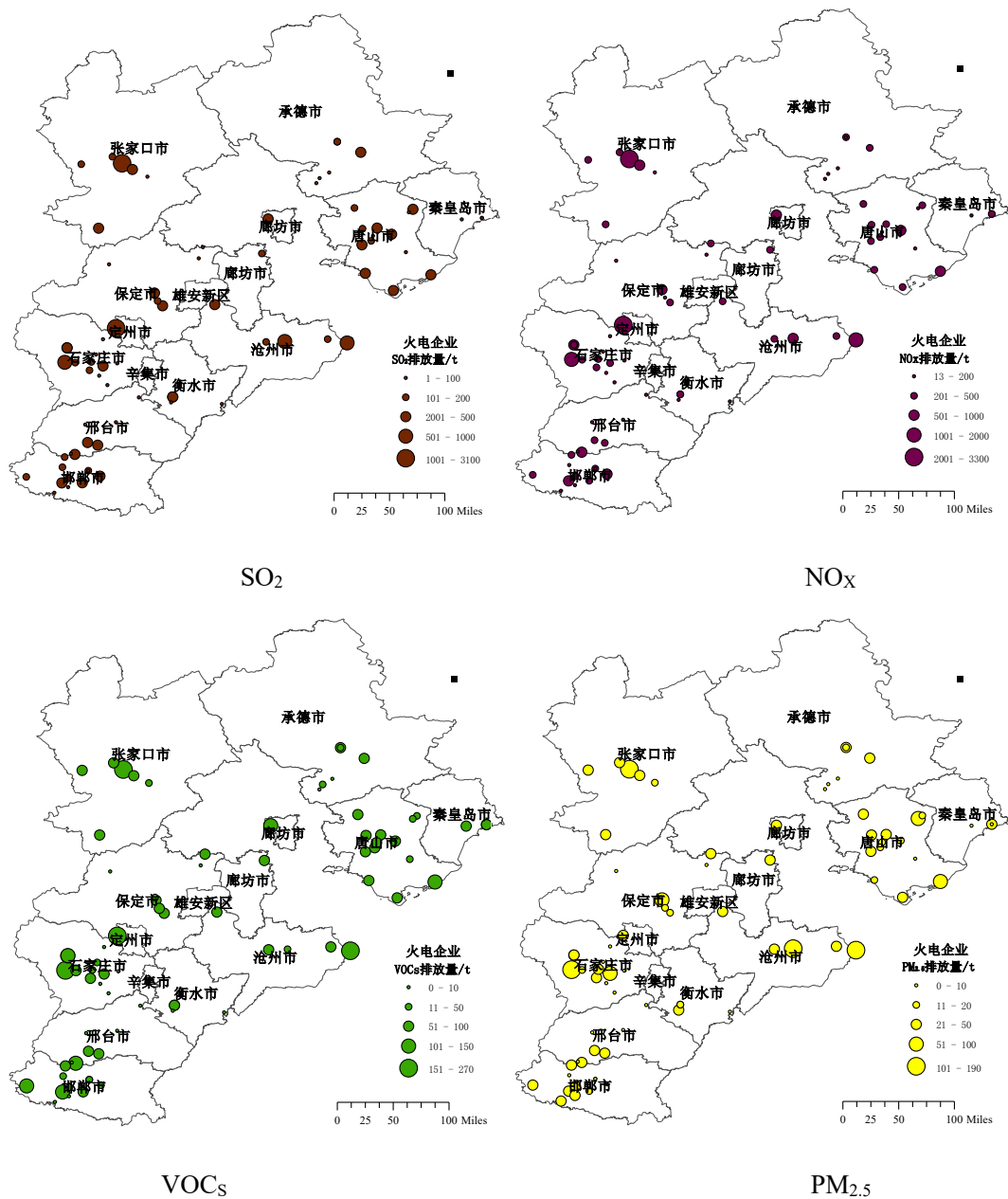


图 2-13 火电行业主要大气污染物排放空间分布

(7) 制药行业排放特征

2020 年河北制药行业 VOC_s 排放量 4.9 万吨。

制药行业排放空间分布见图 2-14。可知，石家庄、衡水、沧州三市排放量最大，分别占全省制药行业 VOC_s 排放总量的 46.7%、18.2%、16.50%。

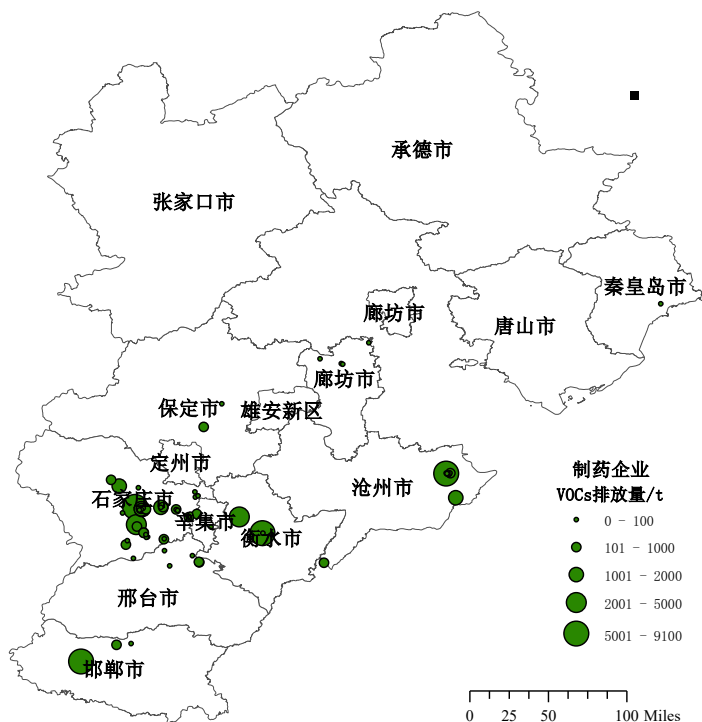


图 2-14 制药行业 VOCs 排放空间分布

(8) 工业溶剂使用源排放特征

2020 年，河北省工业溶剂使用源 VOCs 排放量 2.4 万吨，占工业源 VOCs 排放总量的 3.6%。

工业溶剂使用源包括汽车喷涂、家电喷涂、装备制造喷涂、印刷、家具喷涂、电子器件喷涂、染料印染使用的有机溶剂 7 类，其中，汽车喷涂 VOCs 排放量最高，为 1.5 万吨，家电喷涂、装备制造喷涂、印刷、家具喷涂 VOCs 排放量均为 0.2 万吨，电子器件喷涂、染料印染 VOCs 排放量分别为 0.01 万吨、0.002 万吨，7 类源 VOCs 排放量分别占工业溶剂使用源 VOCs 排放总量的 62.9%、10.2%、9.4%、9.6%、7.4%、0.4%、0.1%，见图 2-15。

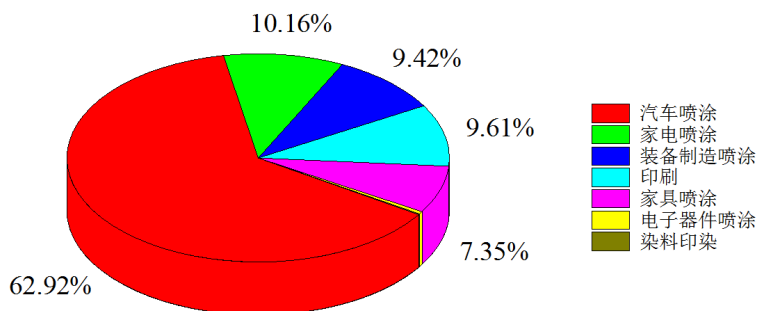


图 2-15 主要工业溶剂使用源排放占比

各市工业溶剂使用源类别及排放量见表 2-7。工业溶剂使用源 VOCs 排放量较大的有保定、石家庄、沧州，分别占全省工业溶剂使用源总 VOCs 排放量的 41.1%、11.3%、10.4%，其中保定排放量较大的行业是汽车喷涂和装备制造喷涂，石家庄排放量较大的是包装印刷和家电喷涂，沧州排放量较大的是汽车喷涂。

表 2-7 各市工业溶剂使用源类别及排放量（吨）

市	汽车喷涂	家电喷涂	装备制造喷涂	印刷	家具喷涂	电子器件喷涂	染料印染	合计
保定市	8785		683	304	20	1	20	9813
石家庄市	287	982	148	1220	41	10	3	2692
沧州市	1876	35	179	271	107	3		2471
定州市	2030		44					2074
廊坊市	313	347	199	243	895	27		2024
邯郸市	51	1061	96	19	12	4	1	1245
张家口市	1070		152	6	1			1228
唐山市	213		232	17	254	0		715
邢台市	327		200	19	71	10	3	630
秦皇岛市	27		218	61	89	46		439
衡水市	45		39	42	264			391
雄安新区市				92				92
承德市			56		1			57
辛集市			2					2
合计	15022	2426	2248	2294	1756	101	27	23874

2.2.2 移动源

（1）总体排放情况和二级排放源分担率

2020 年河北省移动源排放量见表 2-8。全省移动源一次 PM_{2.5} 排放量为 2.0 万吨，PM₁₀ 排放量为 2.1 万吨，SO₂ 排放量为 3.1 万吨，NO_x 排放量为 68.2 万吨，VOCs 排放量为 19.6 万吨，CO 排放量为 47.4 万吨。其中，道路机动车为 NO_x、VOCs、CO 的主要排放源，分别为占移动源排放总量的 68.5%、86.1%、78.3%；非道路移动机械为一次 PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂ 的主要排放源，分别占移动源排放总量的 68.7%、67.3%、63.4%。

表 2-8 移动源大气污染物排放量（吨）

一级源	二级源	PM _{2.5}	PM ₁₀	SO ₂	NO _x	VOCs	CO
道路机动车	柴油车	5178	5734	8475	382553	8276	93550
	汽油车	436	464	2868	26866	141806	200976
	其他燃料车	651	723	0	58550	18662	76184
	小计	6266	6921	11343	467970	168744	370710
非道路移动源	工程机械	3270	3451	0	50377	8197	34604
	农业机械	3786	3786	1523	76234	7332	23801
	船舶	6620	6911	18138	86338	11228	43169
	民航飞机	75	77	0	2312	380	1297
	小计	13751	14224	19661	215261	27137	102872
合计		20017	21145	31004	683231	195880	473583

不同类型的移动源其 VOCs、NO_x 排放量占比见图 2-16。可知，VOCs 排放量占比最高的汽油车，占移动源总排放量的 62.7%；NO_x 排放量占比最高的是柴油车，占移动源总排放量的 40.0%，另外，沿海船舶、农业机械对 NO_x 也有较高的贡献，分别占 21.8%、19.3%。

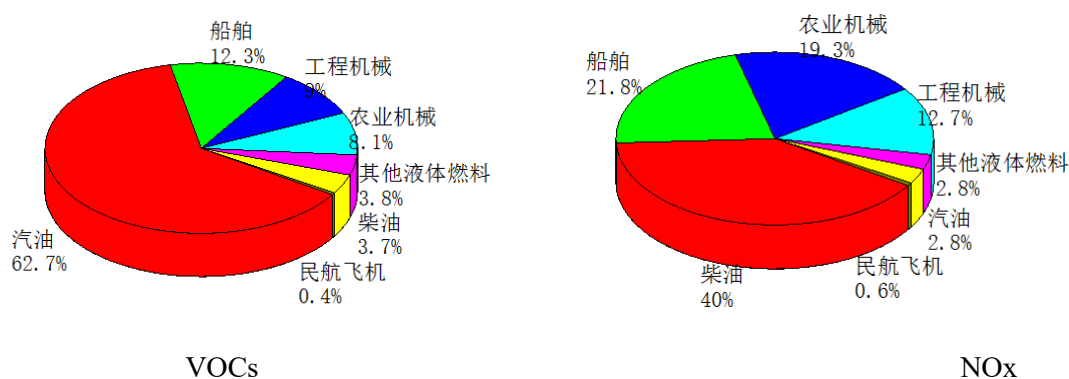


图 2-16 不同类型移动源主要污染物排放占比

各市移动源主要污染物排放量见表 2-9，分布见图 2-17。移动源排放量较大的有唐山、沧州、石家庄、保定市。其中 VOCs 排放量前三的为唐山、石家庄、保定，三市机动车保有量最大，以小客车为主。NO_x 排放量前三的为唐山、沧州、石家庄，其中唐山和沧州除重型柴油车排放量较大以外，沿海船舶的 NO_x 排放量也较高。

表 2-9 2020 年河北省及各市移动源排放量（吨）

市	污染源分类	PM _{2.5}	PM ₁₀	SO ₂	NO _x	VOC _s	CO
唐山市	道路机动车	1251	1386	1502	71487	23605	59373
	非道路移动机械	3736	3890	8579	51800	6692	25673
	小计	4987	5276	10082	123286	30297	85046
沧州市	道路机动车	903	999	1500	64550	18449	52026
	非道路移动机械	2751	2846	5481	40920	4985	18612
	小计	3654	3845	6980	105470	23434	70638
石家庄市	道路机动车	1240	1372	1895	84905	28479	61333
	非道路移动机械	1087	1124	160	19195	2594	10046
	小计	2327	2496	2055	104100	31073	71379
秦皇岛市	道路机动车	73	79	377	11915	6814	10394
	非道路移动机械	1895	1972	4527	26213	3361	12815
	小计	1968	2051	4904	38128	10175	23210
保定市	道路机动车	624	687	1578	57564	24590	50151
	非道路移动机械	975	1004	182	17166	2187	8379
	小计	1599	1691	1760	74730	26777	58530
邢台市	道路机动车	626	691	1016	43489	13471	29021
	非道路移动机械	641	649	202	12257	1320	4624
	小计	1267	1340	1218	55746	14792	33645
邯郸市	道路机动车	565	621	1228	51421	17347	35344
	非道路移动机械	691	709	142	12643	1587	5945
	小计	1255	1330	1369	64065	18934	41289
张家口市	道路机动车	454	502	684	29127	9186	23761
	非道路移动机械	209	216	38	3726	479	1828
	小计	663	717	722	32854	9665	25590
衡水市	道路机动车	131	143	512	16903	7857	14199
	非道路移动机械	526	532	169	10085	1079	3762
	小计	656	675	681	26988	8936	17961
廊坊市	道路机动车	238	262	648	21474	12726	22246
	非道路移动机械	416	430	63	7149	952	3723
	小计	654	692	711	28624	13678	25969
承德市	道路机动车	163	179	404	15134	6220	12861
	非道路移动机械	277	281	83	5269	581	2058
	小计	440	460	487	20403	6801	14918
雄安新区	非道路移动机械	377	398		5809	945	3990
	小计	377	398		5809	945	3990
定州市	非道路移动机械	85	88	12	1459	197	774
	小计	85	88	12	1459	197	774
辛集市	非道路移动机械	84	86	23	1569	178	643
	小计	84	86	23	1569	178	643
全省	道路机动车合计	6266	6921	11343	467970	168744	370710
	非道路移动机械合计	13751	14224	19661	215261	27137	102872
	总计	20017	21145	31004	683231	195880	473582

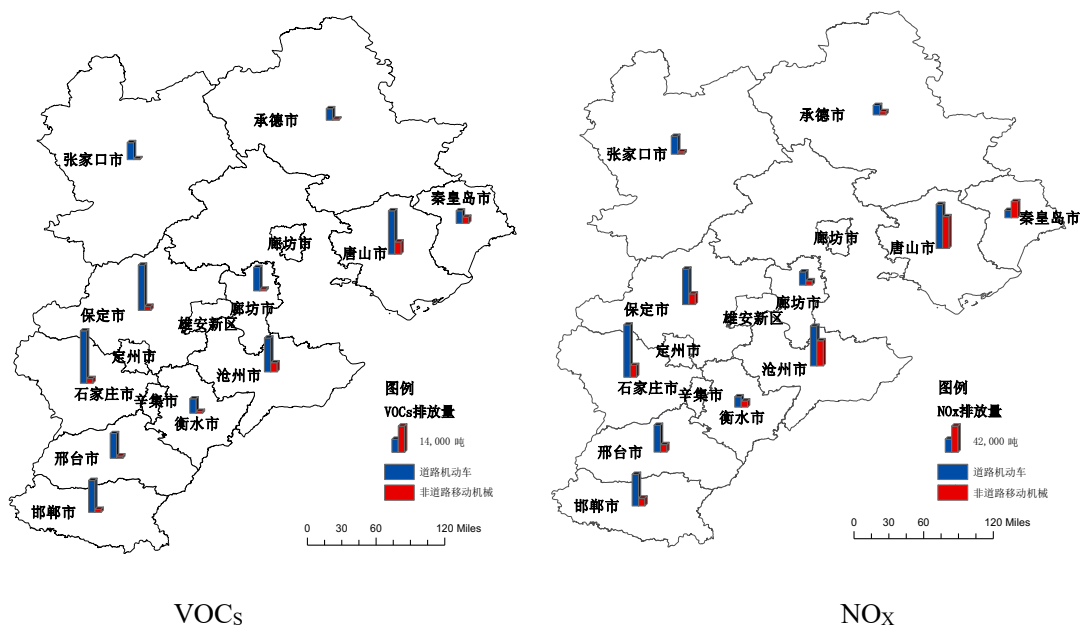


图 2-17 各市移动源主要污染物排放分布

(2) 道路机动车排放特征

2020年河北省全省机动车保有量达到1823.3万辆，其中载客汽车1490.8万辆，载货汽车232.2万辆，出租车6.9万辆，公交车1.6万辆，摩托车76.1万辆，低速汽车和三轮汽车15.7万辆。载客汽车以小型客车为主，占比98.2%；摩托车以普通摩托车为主，占比99.6%；载货汽车以轻型载货和重型载货汽车为主，占比分别为64.1%、34.5%。保有量前三位的城市为石家庄、保定、唐山，分别占全省保有量的16.5%、15.0%、12.8%。

道路移动源不同燃料车型排放数据见表2-10。结果显示，柴油车是道路移动源中PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂及NO_x的主要排放源，占比分别为82.6%、82.8%、74.7%、81.7%。汽油车是VOCs、CO的主要排放源，占比分别为84.0%、54.2%。

道路移动源各车型详细排放量见表2-11，不同车型的道路机动车主要污染物排放占比见图2-18。根据各类型机动车的排放贡献来看，重型货车是PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂及NO_x的主要排放源，分担率分别为63.6%、64.0%、58.6%、74.7%。小型客车是VOCs、CO的主要排放源，分担率分别为73.0%、38.2%。

表 2-10 道路移动源分油品大气污染物排放量（吨）

分油品车型	PM _{2.5}	PM ₁₀	SO ₂	NO _x	VOCs	CO
柴油车	5178	5734	8475	382553	8276	93550
汽油车	436	464	2868	26866	141806	200976
其他	651	723		58550	18662	76184
合计	6266	6921	11343	467970	168744	370710

表 2-11 道路移动源大气污染物排放量（吨）

车辆类型	PM _{2.5}	PM ₁₀	SO ₂	NO _x	VOCs	CO
微型客车	8	9	41	540	2084	3800
小型客车	378	399	2641	19417	123222	141710
中型客车	23	25	60	993	150	863
大型客车	219	243	190	11075	453	4305
微型货车	0	0	0	9	13	55
轻型货车	1089	1207	1372	65915	14358	65246
中型货车	78	87	144	4728	76	1030
重型货车	3985	4427	6649	349436	18456	122402
出租车	25	26	25	605	2532	14274
公交车	88	98	22	6345	1097	5052
低速货车	79	85	82	1367	238	1178
三轮汽车	282	302	117	7063	1614	4638
普通摩托车	13	13	0	475	4421	6142
轻便摩托车	0	0	0	1	29	17
合计	6266	6921	11343	467970	168744	370710

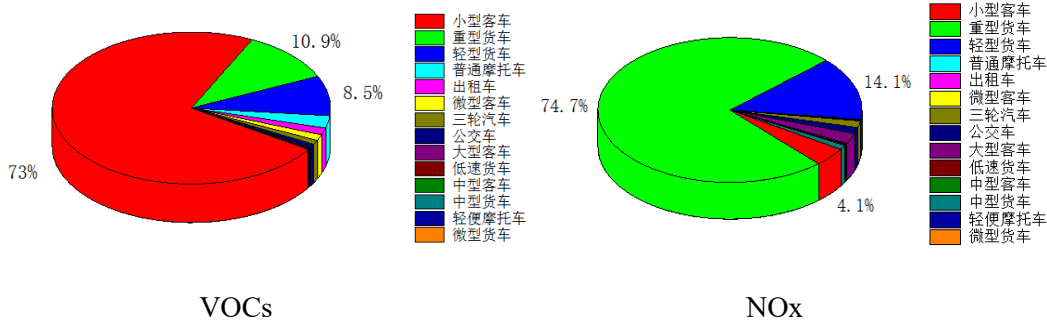


图 2-18 不同车型的道路机动车主要污染物排放占比

不同排放标准道路移动源详细排放量见表 2-12, 不同排放标准的道路机动车主要污染物排放占比见图 2-19。根据各排放标准机动车的排放贡献来看, 国四和国五柴油车对 NO_x 的排放分担率分别为 23.7%、30.1%, 国三及以下柴油车对 NO_x 的排放分担率为 28.0%。对 VOCs 排放分担率较高的是国四汽油车和国五汽油车, 分别为 35.3%和 25.7%, 国三及以下汽油车对 VOCs 的排放分担率为 23.0%。

表 2-12 不同排放标准道路移动源大气污染物排放量 单位: 吨

	PM _{2.5}	PM ₁₀	SO ₂	NO _x	VOC _s	CO
柴油国一	15	16	5	364	103	247
柴油国二	368	397	200	8565	1842	5788
柴油国三	3536	3926	2210	121912	3867	35427
柴油国四	967	1071	2441	110938	1098	21496
柴油国五	292	324	3619	140773	1365	30592
汽油国一前	0	0	0	1	25	131
汽油国一	38	42	43	1716	3724	32219
汽油国二	53	58	136	7333	9911	24094
汽油国三	106	119	409	7847	25185	47561
汽油国四	134	137	1314	6288	59618	57358
汽油国五	105	108	966	3682	43343	39613
其他国一前	0	0		19	25	194
其他国一	14	15		1088	363	1725
其他国二	1	1		201	53	236
其他国三	19	22		3301	747	3005
其他国四	59	65		7142	1667	7841
其他国五	558	620		46799	15807	63183
合计	6266	6921	11343	467970	168744	370710

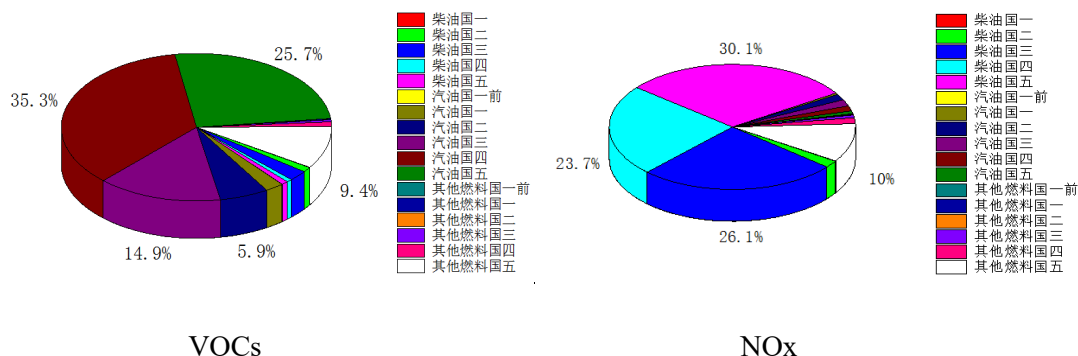


图 2-19 不同排放标准的道路机动车主要污染物排放占比

(3) 非道路移动机械排放特征

非道路移动源各类型详细排放量见表 2-13，不同类型非道路移动机械主要污染物排放占比见图 2-20。2020 年，河北省非道路移动机械排放一次 PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO_x、VOCs、CO 分别为 1.4 万吨、1.4 万吨、2.0 万吨、21.5 万吨、2.7 万吨、10.3 万吨。其中，沿海船舶排放量最高，其排放的一次 PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO_x、VOCs、CO 分别占 48.1%、48.6%、92.3%、40.1%、41.4%、42.0%。

表 2-13 非道路移动源污染物排放量（吨）

排放源	PM _{2.5}	PM ₁₀	SO ₂	NO _x	VOCs	CO
沿海船舶	6620	6911	18138	86338	11228	43169
工程机械	3270	3451		50377	8197	34604
民航飞机	75	77		2312	380	1297
农业机械	3786	3786	1523	76234	7332	23801
合计	13751	14224	19661	215261	27137	102872

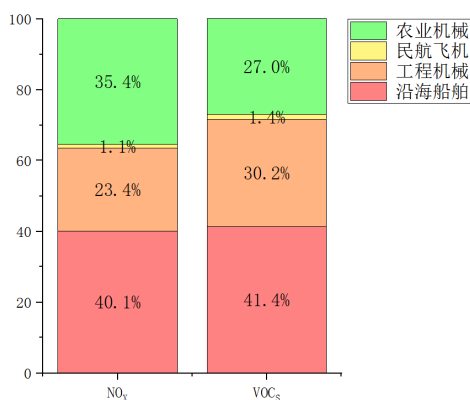


图 2-20 不同类型非道路移动机械主要污染物排放占比

2.2.3 扬尘源

2020 年全省扬尘源一次 PM_{2.5}、PM₁₀ 排放量分别为 19.1 万吨、77.5 万吨。河北省及各市场扬尘源排放量见表 3-16，各市场扬尘源主要污染物排放分布见图 2-21。各城市中，扬尘源排放量较大的有石家庄、唐山、张家口。

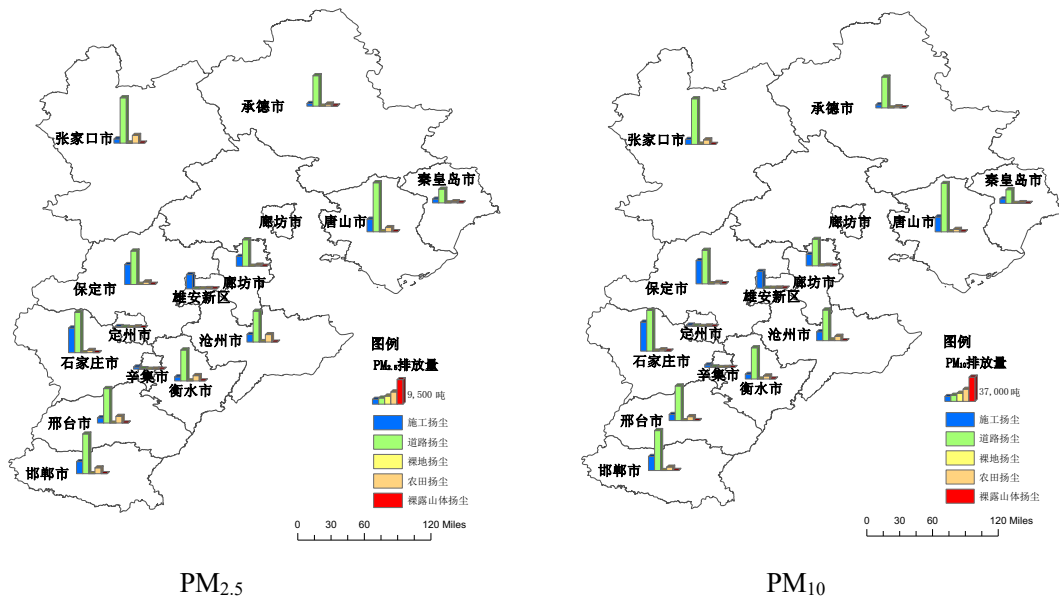


图 2-21 各市扬尘源主要污染物排放分布

各类扬尘源排放占比见图 2-22，其中，道路扬尘的一次 PM_{2.5}、PM₁₀ 排放量为 14.5 万吨、58.2 万吨，对一次 PM_{2.5}、PM₁₀ 排放量分担率最大，占比分别为 68.2%、68.5%。不同道路类型中，县道和乡道排放量最大，二者之和占到了道路扬尘总排放量的 50%左右，国道和省道的排放量约占 35%左右，城市道路约占到 15%。

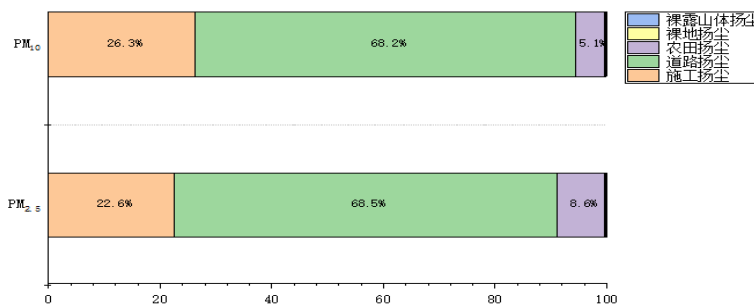


图 2-22 各类扬尘源排放占比

2.2.4 生活源

(1) 总体排放情况及二级源排放分担率

2020年河北省生活源一次PM_{2.5}排放量7.1万吨，PM₁₀排放量8.9万吨，SO₂排放量5.5万吨，NO_x排放量3.5万吨，VOC_s排放量13.4万吨，CO排放量133.8万吨，NH₃排放量2.7万吨。结果见表2-14。

表 2-14 生活源大气污染物排放量（吨）

二级源分类	PM _{2.5}	PM ₁₀	SO ₂	NO _x	VOC _s	CO	NH ₃
民用散烧	55711	69808	54540	27345	31434	1335545	1886
餐饮	15445	18922	0	0	13706	0	0
家用溶剂					37839		
建筑涂料					19717		
汽修					12392		
沥青铺路					11244		
干洗					1277		
道路市政设施防腐					3412		
民用锅炉	132	162	547	7240	91	2325	0
油品储运销	0	0	0	0	3300	0	0
农村人体活动	0	0	0	0	0	0	25030
小计	71288	88891	55087	34584	134414	1337869	26916

生活源各类二级源的排放分担率见图2-23。其中，民用散烧对一次PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO_x、CO的排放贡献最高，占生活源总排放量的比例分别高达78.1%、78.5%、99.0%、79.1%、99.8%。VOC_s排放贡献最高的是家用溶剂使用源，占生活源总排放量的28.2%，民用散烧和建筑涂料分别占23.4%和14.7%。NH₃排放贡献最高的是农村人体活动源，占生活源总排放量的93.0%。此外，餐饮源一次PM_{2.5}、PM₁₀、VOC_s排放量分别占到生活源总排放量的21.7%、21.3%和10.2%，民用锅炉（包括商用、农业生产等）NO_x排放量占生活源总排放量的20.9%。

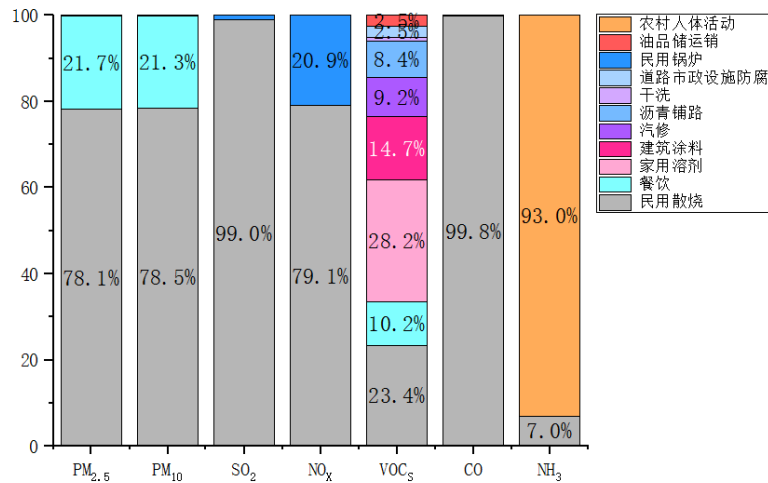


图 2-23 生活源二级源排放分担率

(2) 民用散烧源排放特征

民用散烧源主要燃料消耗量及污染物排放量见表 2-15，各类燃料的排放分担率见图 2-24。可知，民用散烧源中，燃煤对一次 PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO_x、VOC_s、CO 的排放贡献最高，占比分别高达 91.6%、92.8%、98.9%、52.4%、85.6%、96.1%。天然气对 NO_x 的排放贡献占民用散烧源总排放量的 42.4%。

表 2-15 民用散烧源主要燃料消耗量及其大气污染物排放量（吨）

燃料种类	燃料消耗量	单位	PM _{2.5}	PM ₁₀	SO ₂	NO _x	VOC _s	CO	NH ₃
燃煤	7175149	吨	51011	64760	53960	14342	26894	1283155	
天然气	794257	万 m ³				11596		10325	
薪柴	1450470	吨	4700	5048	580	1407	4540	42064	1886
合计			196246	243503	55711	69807	54540	27345	31434

各市民用散烧源燃料消耗量及污染物排放量见表 2-16。2020 年，民用散煤耗量前三位的城市是张家口、承德、唐山市，分别占全省民用散煤消耗量的 29%、21%、8%；民用天然气消耗前三位的是廊坊、保定、石家庄市，分别占全省民用天然气消耗量的 20%、16%、15%；薪柴消耗前三位的是石家庄、承德、保定市，分别占全省民用薪柴消耗量的 32%、22%、14%。民用燃烧源中，各项污染物排放占最高的是张家口市，一次 PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO_x、VOC_s、CO 排放占比分别为 31%、31%、25%、13%、23%、20%；其次是承德市，占比分别为 23%、23%、17%、9%、19%、15%。

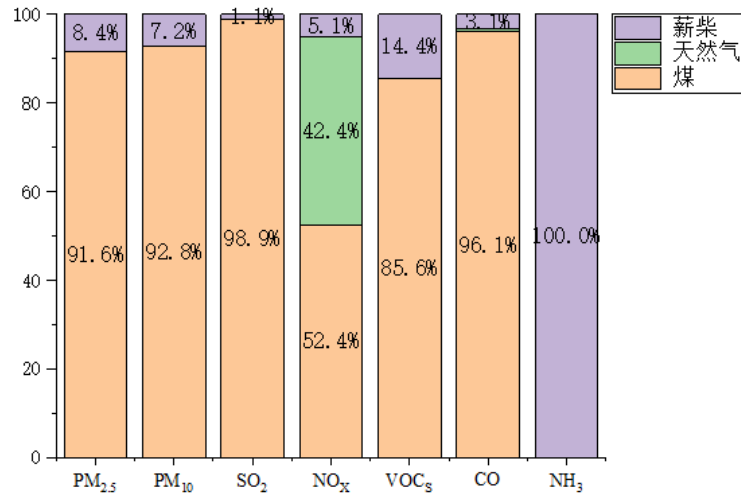


图 2-24 民用散烧源不同燃料污染物排放分担率

表 2-16 各市民用散烧源燃料量比及污染物排放量

市	燃料消耗量			污染物排放量 (吨)						
	燃煤量 (吨)	天然气 (万 m ³)	薪柴 (吨)	PM _{2.5}	PM ₁₀	SO ₂	NO _x	VOC _s	CO	NH ₃
张家口市	2053273	31194	27570	17410	21822	13514	3561	7107	272905	36
承德市	1530697	3826	323385	13086	16226	9511	2508	5890	198153	420
唐山市	577038	13200	139808	4920	6189	4847	1798	3045	136170	182
保定市	605560	127449	87090	4459	5653	4965	3443	2856	138863	113
石家庄市	524383	117341	468023	4434	5332	3396	2979	2993	87707	608
秦皇岛市	497740	17485	199470	3106	3866	3308	1478	2319	98810	259
邢台市	404271	75400	63158	2483	3204	4344	2426	2134	117252	82
邯郸市	296204	71100	285	2130	2747	3198	1931	1470	81404	0
沧州市	417582	115000	20850	1190	1616	3825	2822	1609	104245	27
衡水市	73226	46071	119565	800	983	1450	1201	941	41605	155
辛集市	72977	1067	0	793	1002	771	205	378	16844	0
定州市	100861	16381	1035	776	999	994	553	523	28395	1
雄安新区	21338		233	123	169	416	122	169	11128	0
廊坊市	0	158743	0	0	0	0	2318	0	2064	0

(3) 餐饮源排放特征

2020年河北省餐饮源排放一次PM_{2.5}、PM₁₀、VOCs排放量分别为1.5万吨、1.9万吨、1.4万吨，占生活源排放总量的21.7%、21.3%、10.2%，见表2-17。餐饮源包括居民餐饮和餐饮企业，居民餐饮一次PM_{2.5}、PM₁₀、VOCs排放量分别为1.4万吨、1.7万吨、1.2万吨，占餐饮源排放总量的89.5%、89.3%、89.7%；餐饮企业一次PM_{2.5}、PM₁₀、VOCs排放量分别为0.2万吨、0.2万吨、0.1万吨，占餐饮源排放总量的10.5%、10.7%、10.3%。各城市中，餐饮源排放量较大的是保定、石家庄、邯郸，各项污染物排放量分别占全省餐饮源排放总量的13.3%、13.1%、12.1%。

表 2-17 各市餐饮源污染物排放量（吨）

市	居民餐饮			餐饮企业			合计		
	PM _{2.5}	PM ₁₀	VOCs	PM _{2.5}	PM ₁₀	VOCs	PM _{2.5}	PM ₁₀	VOCs
保定	1717	2099	1526	342	428	299	2059	2526	1826
石家庄	1899	2321	1688	132	165	115	2031	2486	1803
邯郸	1745	2132	1551	125	156	109	1870	2289	1660
唐山	1455	1778	1293	239	299	209	1694	2077	1503
邢台	1351	1651	1201	171	214	150	1522	1865	1351
沧州	1378	1685	1225	113	141	99	1491	1825	1324
廊坊	899	1099	799	106	132	92	1005	1231	892
张家口	808	988	718	98	122	86	906	1110	804
衡水	820	1002	729	71	88	62	890	1090	790
承德	655	800	582	55	68	48	709	868	630
秦皇岛	575	703	511	87	109	76	662	812	587
定州	225	275	200	22	27	19	247	302	219
雄安新区	184	224	163	38	48	34	222	272	197
辛集	116	142	103	20	26	18	137	168	121
全省	13826	16899	12290	1619	2023	1416	15445	18922	13706

(4) 生活溶剂使用源排放特征

生活溶剂使用源包括家庭溶剂使用、建筑涂料、汽修、沥青铺路、道路市政设施防腐、干洗等，排放量分别为3.8万吨、2.0万吨、1.2万吨、1.1万吨、0.3万吨、0.1万吨，占生活溶剂使用源VOCs排放总量的44.1%、23.0%、14.4%、13.1%、4.0%、1.5%，见图2-25。各城市生活溶剂使用源VOCs排放量见表2-18，

生活溶剂使用源排放量较大的有保定、石家庄、唐山，分别占全省生活溶剂使用源的 15.5%、15.3%、11.7%；排放量较大的源类均为家庭溶剂使用以及建筑涂料使用。

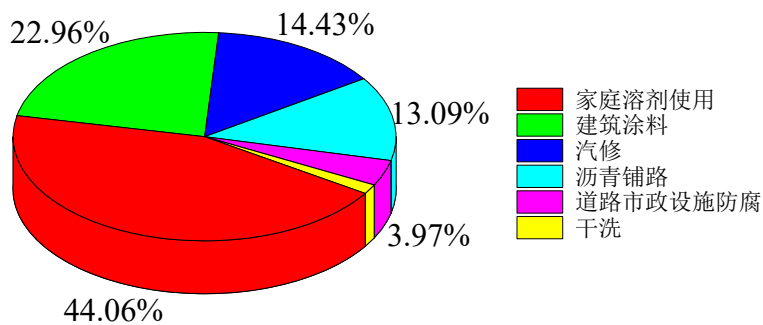


图 2-25 生活溶剂使用源排放占比

表 2-18 各市生活溶剂使用源 VOC_s 排放量 (吨)

市	家庭溶剂使用	建筑涂料	汽修	沥青铺路	道路市政设施防腐	干洗	合计
保定	4700	4112	1884	2060	403	149	13308
石家庄	5197	2915	2155	2184	509	196	13157
唐山	3982	1993	1605	1936	374	149	10038
邯郸	4775	2176	1184	1102	260	161	9658
沧州	3772	1944	1309	1068	107	120	8320
邢台	3698	1111	950	332	259	116	6467
廊坊	2460	1187	1036	1293	345	86	6407
张家口	2212	930	658	414	131	75	4419
衡水	2243	858	623	48	265	69	4106
承德	1791	600	421	807	308	55	3983
秦皇岛	1573	638	566	0	334	55	3167
定州	615	1037			39	19	1711
雄安新区	503	84				16	603
辛集	319	132			77	10	537
合计	37839	19717	12392	11244	3412	1277	85882

2.2.5 其他源

其他源主要包括秸秆焚烧源、农业源和废弃物处理源。2020年共计排放一次PM_{2.5} 2.1万吨，PM₁₀ 2.1万吨，SO₂ 0.2万吨，NO_x 0.9万吨，VOCs 5.2万吨，CO 12.5万吨，NH₃ 103.3万吨。

(1) 秸秆焚烧源排放特征

2020年河北省秸秆焚烧源一次PM_{2.5}排放量为2.1万吨，PM₁₀排放量为2.1万吨，SO₂排放量为0.1万吨，NO_x排放量为0.8万吨，VOCs排放量为2.0万吨，CO排放量为12.5万吨，NH₃排放量为0.1万吨。各市秸秆焚烧源污染物排放量见表2-19，排放量较大的有邯郸、邢台、沧州、石家庄。

表 2-19 各市秸秆焚烧源污染物排放量 单位：吨

市	PM _{2.5}	PM ₁₀	SO ₂	NO _x	VOCs	CO	NH ₃
邯郸市	3217	3282	229	1283	3010	19507	174
邢台市	2924	2983	211	1169	2743	17883	158
沧州市	2826	2883	194	1119	2628	16782	153
石家庄市	2548	2599	182	1016	2380	15468	137
保定市	2479	2530	170	982	2307	14728	135
唐山市	1664	1697	98	622	1596	8870	98
衡水市	1375	1403	144	591	1345	10413	69
廊坊市	911	930	49	348	829	4784	51
张家口市	725	740	30	271	669	3476	44
承德市	643	656	27	238	593	3042	39
定州市	480	490	35	192	449	2960	26
雄安新区	426	434	30	169	398	2577	23
辛集市	397	405	30	160	373	2477	21
秦皇岛市	375	382	17	138	348	1811	22

(2) 农业源排放特征

2020年河北省农业源NH₃、VOCs排放量分别为101.5万吨、2.8万吨。农业源包括畜禽养殖、氮肥施用、农药使用，见表2-20。农业源NH₃排放主要来自于畜禽养殖和氮肥施用，排放量分别为52.0万吨、49.5万吨，占农业源NH₃排放总量的51.2%、48.8%；农业源VOCs主要来自于农药使用源。

各市中，农业源NH₃排放量较高的有唐山市、石家庄市、邯郸市，分别占全省农业源NH₃排放总量的13.5%、12.9%、12.3%，各市畜禽养殖、氮肥施用排

放量贡献相当；农业源 VOCs 排放量较高的有邢台、保定、衡水，分别占全省农业源 VOCs 排放总量的 13.9%、12.7%、11.9%，均主要来自于农药使用源。

表 2-20 全省及各市农业源污染物排放量（吨）

市	NH ₃			VOCs
	畜禽养殖	氮肥施用	小计	农药使用
唐山	71008	65757	136764	2177
石家庄	66878	64113	130992	3043
邯郸	63496	61832	125327	2601
保定	46728	52027	98755	3580
沧州	40558	46584	87142	2811
衡水	34286	51938	86224	3361
邢台	37446	43580	81026	3903
承德	51970	18641	70611	547
张家口	39251	20732	59983	1463
秦皇岛	26372	17234	43606	1833
廊坊	20284	21153	41437	1130
定州	9867	15650	25517	515
辛集	10350	11801	22150	913
雄安新区	1404	4436	5840	292
合计	519896	495477	1015374	28169

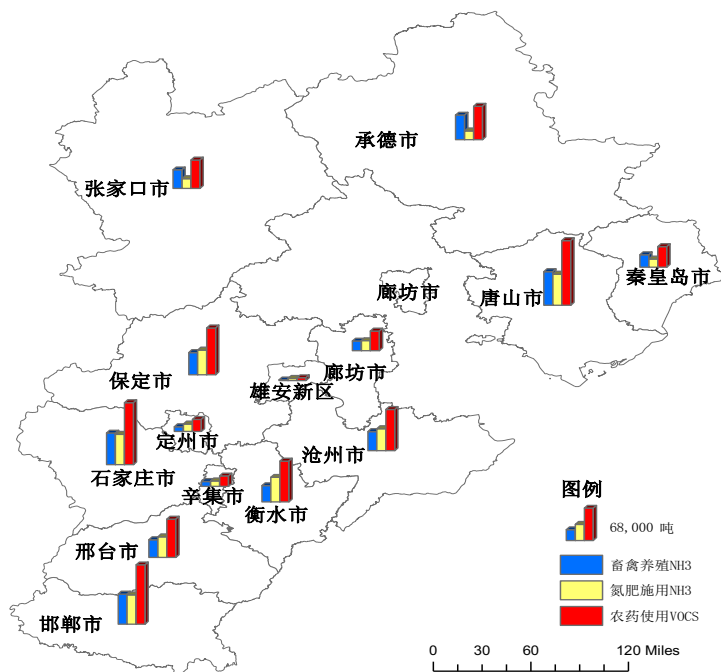


图 2-26 各市主要农业源 NH₃ 排放分布

(3) 废弃物处理源排放特征

2020年，河北省废弃物处理源污染物排放量见表 2-21。一次 PM_{2.5} 排放量为 40 吨，PM₁₀ 排放量为 56 吨，SO₂ 排放量为 145 吨，NO_x 排放量为 503 吨，VOCs 排放量为 4065 吨，NH₃ 排放量为 1.6 万吨。

废弃物处理源中，生活垃圾处理对 VOCs 的排放贡献均居首位，占废弃物处理源总排放量的比例为 96.5%。污水处理、生活垃圾处理对 NH₃ 的排放占比分别为 42.5%、57.2%。

表 2-21 废弃物处理源排放量 单位：吨

类别	PM _{2.5}	PM ₁₀	SO ₂	NO _x	VOCs	NH ₃
污水处理	0	0	0	0	0	6894
生活垃圾	3	4	0	0	3924	9269
危废处理	37	52	145	503	141	0
合计	40	56	145	503	4065	16203

2.3 各类污染物的城市分布特征

2.3.1 一次 PM_{2.5} 城市分布特征

如表 2-22 所示，唐山、邯郸、石家庄三市排放量最大，贡献了全省排放总量的 48.6%，其中，唐山贡献率最高为 25.2%，邯郸、石家庄贡献率分别为 13.8%、9.6%。辛集、雄安新区、定州排放量最低，分别占全省排放总量的 1.3%、1.2%、0.6%。

图 2-27 给出了各市一次 PM_{2.5} 的二级排放源贡献，由图可知，作为全省两大钢铁城市，唐山市、邯郸市一次 PM_{2.5} 的首要来源均为钢铁行业，对全市总排放量的贡献比例分别 61.7%、37.5%；道路扬尘是唐山市一次 PM_{2.5} 的第二大贡献源，对唐山市的贡献比例为 13.4%；道路扬尘、规模以下企业是邯郸市一次 PM_{2.5} 的第二、第三大贡献源，对邯郸市的贡献比例分别为 19.8%、16.7%。此外，辛集市、秦皇岛市钢铁行业占比也较高，分别贡献了全市一次 PM_{2.5} 排放总量的 61.8%、43.1%；道路扬尘是秦皇岛市一次 PM_{2.5} 的第二大贡献源，对秦皇岛市的贡献比例为 19.7%。张家口市、承德市一次 PM_{2.5} 的排放特征相似，主要来源均

为民用散烧、道路扬尘、钢铁行业，对张家口市的贡献比例分别为 34.1%、34.5%、12.6%，对承德市的贡献比例分别为 29.1%、28.5%、18.2%。雄安新区一次 PM_{2.5} 的主要来源为施工扬尘，对全市的贡献比例为 81.2%。定州市一次 PM_{2.5} 的主要来源为民用散烧、炼焦行业，对全市的贡献比例分别为 24.2%、20.3%。其他城市一次 PM_{2.5} 的排放特征类似，均主要来源于道路扬尘，其中，衡水市、廊坊市道路扬尘的贡献均超过 50%，对各市一次 PM_{2.5} 排放总量的贡献比例分别为 57.7%、55.6%，道路扬尘对石家庄市、沧州市、保定市、邢台市的贡献比例分别为 29.0%、27.8%、34.5%、40.2%；对于石家庄市、保定市、廊坊市，施工扬尘是除道路扬尘外的第二大贡献源，在全市一次 PM_{2.5} 排放总量中的占比分别为 17.7%、20.5%、20.5%；对于沧州市，钢铁行业、规模以下企业是一次 PM_{2.5} 的第二、第三大贡献源，对沧州市的贡献比例分别为 21.1%、13.4%。

表 2-22 各市一次 PM_{2.5} 排放总量及占比（吨）

排序	城市	排放量	全省占比
1	唐山	141412	25.2%
2	邯郸	77484	13.8%
3	石家庄	53743	9.6%
4	张家口	50732	9.0%
5	沧州	42768	7.6%
6	承德	41326	7.4%
7	保定	37368	6.7%
8	邢台	33146	5.9%
9	秦皇岛	26820	4.8%
10	衡水	20655	3.7%
11	廊坊	18412	3.3%
12	辛集	7289	1.3%
13	雄安新区	6783	1.2%
14	定州	3197	0.6%

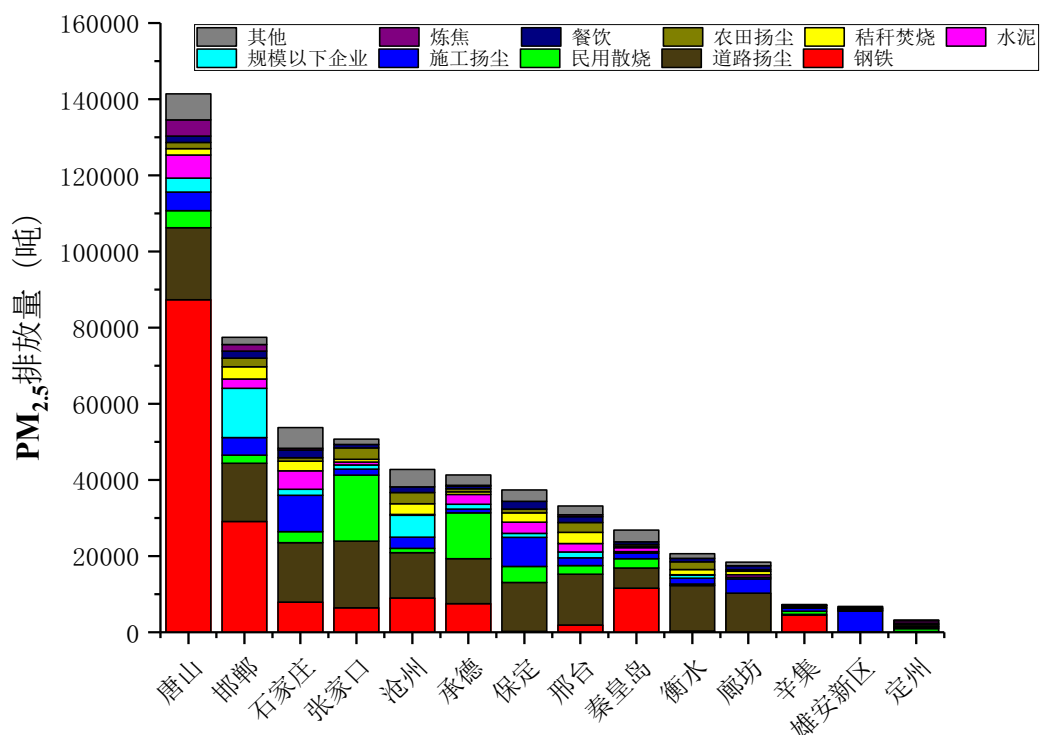


图 2-27 各市一次 PM_{2.5} 二级排放源贡献

2.3.2 PM₁₀ 城市分布特征

唐山、邯郸、石家庄三市排放量最大，贡献了全省排放总量的 43.9%，其中，唐山贡献率最高为 20.2%，邯郸、石家庄贡献率分别为 12.7%、11.0%，见表 2-23。雄安新区、辛集市、定州市排放量最低，占全省排放总量的 2.0%、1.0%、0.4%。

图 2-28 给出了各市 PM₁₀ 的二级排放源贡献。由图可知，与一次 PM_{2.5} 类似，唐山、辛集市 PM₁₀ 的主要来源为钢铁行业，其排放量对全市 PM₁₀ 排放总量的贡献比例分别为 48.2%、49.4%，唐山市 PM₁₀ 的第二大贡献源是道路扬尘，贡献比例为 27.5%，辛集市第二大贡献源是施工扬尘，贡献比例为 28.2%。定州和雄安新区 PM₁₀ 主要来自施工扬尘，其排放量对全市（区域）PM₁₀ 排放总量的贡献比例分别为 31.2%、94.4%；定州市第二、第三大贡献源分别是民用散烧、炼焦行业。贡献比例分别为 17.1%、13.0%。其他城市 PM₁₀ 的排放特征类似，均主要来自于道路扬尘，其中，石家庄市、张家口市、保定市、沧州市、承德市、邢台市、衡水市、廊坊市道路扬尘的贡献均超过了 40%，特别是张家口市、承德市、邢台市、衡水和廊坊市，占比高达 56.9%、51.3%、60.0%、72.1%、63.0%；道路扬尘对邯郸市、石家庄市、保定市、沧州市、秦皇岛市的贡献比例分别为 36.0%、

42.5%、46.5%、45.5%、37.2%。对于邯郸市、秦皇岛市，钢铁行业是除道路扬尘源外的第二大贡献行业，在全市 PM₁₀ 排放总量中的占比分别为 25.6%、30.5%；施工扬尘和规模以下企业对邯郸市 PM₁₀ 的贡献也较高，贡献比例分别为 12.7%、12.6%；施工扬尘对秦皇岛市 PM₁₀ 的贡献也较高，贡献比例为 12.1%。对于沧州市，除道路扬尘外，钢铁行业、施工扬尘对全市 PM₁₀ 的贡献也较高，贡献比例均为 13.3%。对于张家口市、承德市，民用散烧是除道路扬尘外的第二大贡献行业，在各市 PM₁₀ 排放总量中的占比分别为 17.5%、16.3%。对于石家庄市、保定市、邢台市、衡水市、廊坊市，施工扬尘是除道路扬尘外的第二大贡献行业，对各市 PM₁₀ 总排放量的贡献比例分别为 30.2%、32.3%、10.6%、10.9%、27.3%。

表 2-23 各市 PM₁₀ 排放总量及占比（吨）

排序	城市	排放量	全省占比
1	唐山	271804	20.2%
2	邯郸	171533	12.7%
3	石家庄	148227	11.0%
4	张家口	123939	9.2%
5	保定	111150	8.2%
6	沧州	104509	7.7%
7	承德	92876	6.9%
8	邢台	89338	6.6%
9	衡水	66846	5.0%
10	廊坊	64957	4.8%
11	秦皇岛	56645	4.2%
12	雄安新区	27420	2.0%
13	辛集	13427	1.0%
14	定州	5838	0.4%

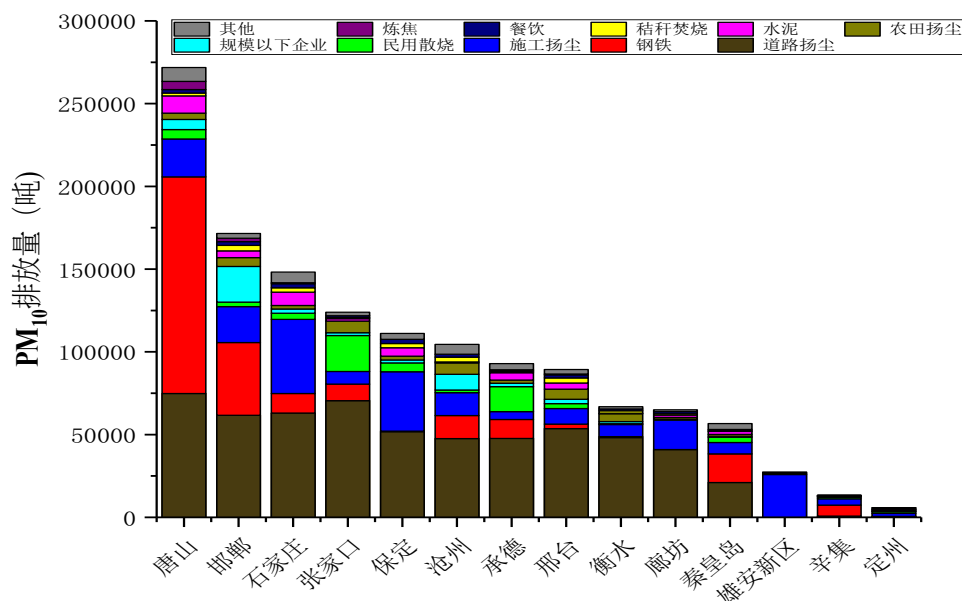


图 2-28 各市 PM₁₀ 二级排放源贡献

2.3.3 SO₂ 城市分布特征

表 2-24 给出了各城市 SO₂ 排放量及其占全省排放量的百分比，可见，唐山、邯郸、张家口三市排放量最大，贡献了全省排放总量的 55.4%，其中，唐山贡献率最高为 31.4%，邯郸、张家口贡献率分别为 14.6%、9.7%。辛集市、定州市、雄安新区排放量最低，分别占全省排放总量的 1.4%、1.0%、0.2%。

图 2-29 给出了各市 SO₂ 的二级排放源贡献。由图可知，唐山市 SO₂ 的主要来源也为钢铁行业，其排放量对全市 SO₂ 排放总量的贡献比例为 56.0%，沿海船舶、规模以下企业是 SO₂ 的第二、第三大排放源，对全市 SO₂ 排放总量的贡献比例分别为 10.3%、9.8%。邯郸市排放特征与唐山市类似，钢铁行业、规模以下企业是主要的污染源，贡献比例分别为 44.8%、22.9%。此外，石家庄市、辛集市钢铁行业占比也较高，分别贡献了全市 SO₂ 排放总量的 18.1%、39.3%；除钢铁企业外，规模以下企业和民用散烧对两市 SO₂ 的贡献也较高，对石家庄市的贡献比例分别为 15.0%、16.8%，对辛集市的贡献比例分别为 27.9%、21.3%；石家庄市 SO₂ 贡献较大的还有电力、热力生产和供应行业，占全市排放总量的 11.4%；相较于其他城市，石家庄市陶瓷行业 SO₂ 的贡献比例最高，为 5.1%，其他城市 SO₂ 的贡献比例均不大于 1.0%。沧州市、秦皇岛市 SO₂ 排放的主要来源均为沿海船舶、民用散烧和钢铁行业，对沧州市 SO₂ 排放总量的贡献比例分别为 25.8%、

18.8%、18.4%，对秦皇岛市 SO₂ 排放总量的贡献比例分别为 26.8%、19.4%、28.6%。张家口市、承德市、邢台市、保定市、衡水市、雄安新区 SO₂ 排放的主要来源均为民用散烧，贡献比例分别为 53.3%、46.7%、34.4%、41.7%、32.3%、78.2%；除民用散烧外，张家口市和承德市 SO₂ 贡献较大的还有钢铁行业和电力、热力生产与供应行业，对张家口市的贡献比例分别为 19.2%、17.4%，对承德市的贡献比例分别为 22.6%、11.1%；邢台市 SO₂ 贡献较大的还有规模以下企业，占比分别为 15.3%；保定市 SO₂ 贡献较大的还有电力、热力生产与供应行业，占比分别为 10.1%；衡水市 SO₂ 贡献较大的还有电力、热力生产与供应行业和工业锅炉，占比分别为 15.8%、15.5%；雄安新区 SO₂ 贡献较大的还有规模以下企业和工业锅炉，占比分别为 6.2%、9.5%。定州市 SO₂ 排放的主要来源为民用散烧、炼焦行业和电力、热力生产与供应行业，对定州市 SO₂ 排放总量的贡献比例分别为 38.5%、15.6%、39.8%。廊坊市 SO₂ 排放的主要来源为玻璃行业、规模以下企业和电力、热力生产与供应行业，对廊坊市 SO₂ 排放总量的贡献比例分别为 34.7%、23.4%、15.4%。

表 2-24 各市 SO₂ 排放总量及占比（吨）

排序	城市	排放量	全省占比
1	唐山	81861	31.4%
2	邯郸	37217	14.3%
3	张家口	25318	9.7%
4	沧州	20260	7.8%
5	承德	20073	7.7%
6	石家庄	19156	7.3%
7	秦皇岛	16661	6.4%
8	邢台	12539	4.8%
9	保定	11827	4.5%
10	廊坊	4850	1.9%
11	衡水	4337	1.7%
12	辛集	3616	1.4%
13	定州	2581	1.0%
14	雄安新区	531	0.2%

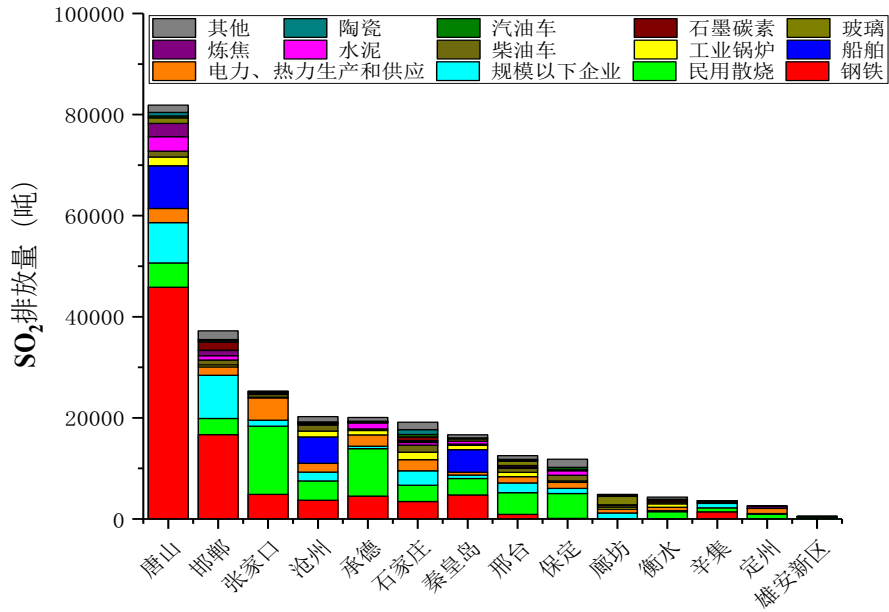


图 2-29 各市 SO₂ 二级排放源贡献

2.3.4 NO_x 城市分布特征

表 2-25 给出了各市 NO_x 排放总量及占比，可见，唐山、石家庄、邯郸三市排放量最大，贡献了全省排放总量的 49.7%，其中，唐山贡献率最高为 24.6%，其次是石家庄为 13.1%，邯郸为 11.9%。辛集、雄安新区、定州市排放量最低，均占全省排放总量的 0.9%、0.6%、0.6%。

图 2-30 给出了各市 NO_x 的二级排放源贡献。由图可知，大部分城市 NO_x 的主要排放源为柴油车，石家庄市、沧州市、邯郸市、保定市、邢台市、张家口市、承德市、廊坊市、衡水市柴油车其对全市 NO_x 排放总量的贡献分别为 45.8%、42.4%、31.5%、52.2%、45.8%、45.9%、30.9%、39.7%、43.3%，是唐山市的第二大排放贡献源，占 20.3%。唐山市、辛集市 NO_x 的主要排放源为钢铁行业，对全市 NO_x 排放总量的贡献分别为 37.5%、38.9%；另外，钢铁行业对邯郸市、秦皇岛市、张家口市、承德市的排放贡献也较大，分别占 28.3%、17.5%、11.4%、21.1%。邯郸市、辛集市规模以下企业的 NO_x 排放量也较高，对全市 NO_x 的总排放量贡献分别为 11.5%、26.7%。沧州市、邢台市、衡水市、辛集市农业机械的 NO_x 排放量较高，对全市 NO_x 的总排放量贡献分别为 10.0%、12.8%、25.6%、12.2%。工程机械是雄安新区的特色排放源，贡献比例为 88.0%，另外对定州市

的排放贡献也达到 13.4%。船舶是秦皇岛市的特色排放源，贡献比例为 35.1%，另外对唐山市、沧州市的排放贡献也达到 14.7%、19.2%。此外，电力、热力生产和供应行业对定州市、张家口市的贡献比例也较高，分别为 44.0%、13.3%；水泥行业对承德市的贡献比例明显高于其他城市，占比达到 12.1%，其他城市的贡献比例不超过 4.0%；陶瓷行业对石家庄市的贡献比例明显高于其他城市，占比达到 5.3%，其他城市的贡献比例不超过 1.0%；炼焦行业对定州市的贡献比例明显高于其他城市，占比达到 11.7%，其他城市的贡献比例不超过 2.0%。

表 2-25 各市 NO_x 排放总量及占比（吨）

排序	城市	排放量	全省占比
1	唐山	272939	24.6%
2	石家庄	145178	13.1%
3	邯郸	132146	11.9%
4	沧州	129195	11.7%
5	保定	93493	8.4%
6	邢台	78992	7.1%
7	秦皇岛	60511	5.5%
8	张家口	54368	4.9%
9	廊坊	42729	3.9%
10	承德	42472	3.8%
11	衡水	32977	3.0%
12	辛集	9521	0.9%
13	雄安新区	6598	0.6%
14	定州	6336	0.6%

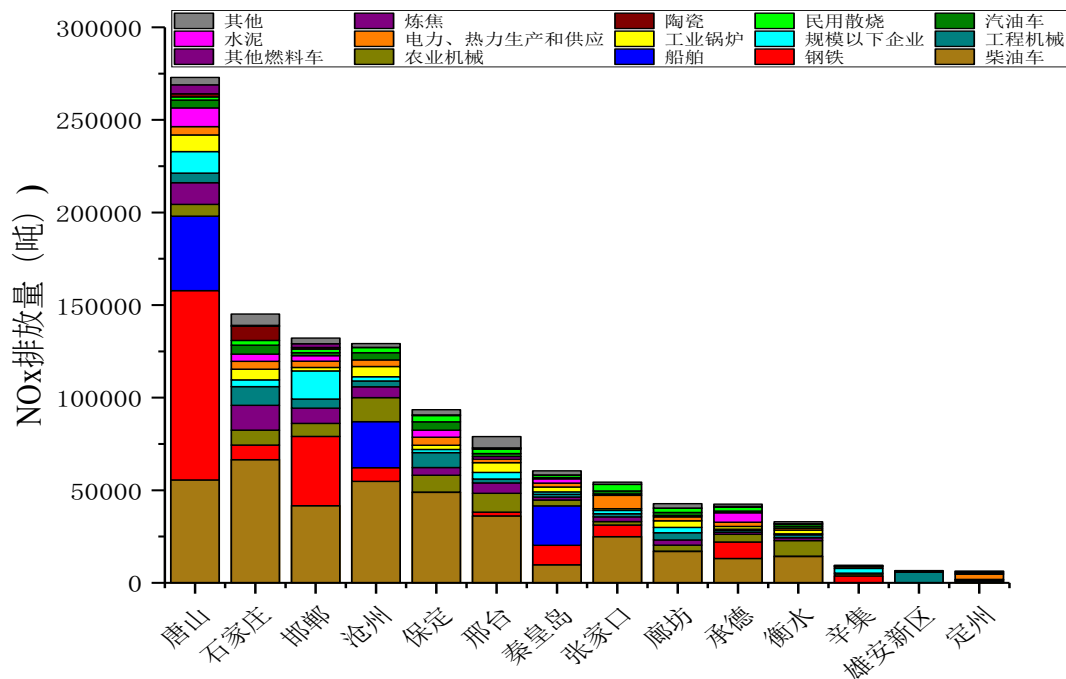


图 2-30 各市 NO_x 二级排放源贡献

2.3.5 VOC_s 城市分布特征

表 2-26 给出了各城市 VOC_s 排放总量及占比，可见，唐山、邯郸、石家庄三市 VOC_s 排放量最大，贡献了全省排放总量的 51.7%，其中，唐山贡献率最大，为 23.4%，邯郸、石家庄分别为 14.9%、13.4%。定州市、辛集、雄安新区排放量最低，均占全省排放总量的 1.2%、1.0%、0.3%。

图 2-31 给出了各市 VOC_s 的二级排放源贡献。由图可知，VOC_s 来源较广，涉及行业较多。唐山市 VOC_s 主要来源为钢铁行业和炼焦行业，对全市 VOC_s 排放总量的贡献比例分别为 50.8%、13.8%。邯郸市 VOC_s 主要来自于钢铁行业（29.6%）、规模以下企业（23.3%）。石家庄市 VOC_s 主要来自于汽油车（16.9%）、药品制造（16.8%）。保定市 VOC_s 主要来自于汽油车（31.0%）、工业涂装（13.3%）。邢台市 VOC_s 主要来自于汽油车（18.5%）、规模以下企业（6.9%）、炼焦行业（6.8%）、农药使用（6.7%）、家庭溶剂使用（6.4%）。衡水市 VOC_s 主要来自于药品制造（21.1%）、汽油车（16.7%）、规模以下企业（10.4%）。承德市和张家口市 VOC_s 主要来源均为钢铁行业、汽油车、民用散烧，对承德市的贡献比例分别为 32.7%、14.6%、12.5%，对张家口市的贡献比例分别为 22.6%、20.8%、18.6%。定州市 VOC_s 主要来自于炼焦行业（40.6%）、工业涂装（16.6%）。沧

州市 VOCs 主要来自于精炼石油产品（15.4%）、汽油车（13.3%）、钢铁行业（12.0%），精炼石油产品对沧州市的贡献比例明显高于其他城市，其他城市的贡献比例不超过 5.0%。廊坊市 VOCs 主要来自于人造板制造（31.0%）、汽油车（21.7%），人造板制造对廊坊市的贡献比例明显高于其他城市，其他城市的贡献比例不超过 3.0%。秦皇岛市 VOCs 主要来自于钢铁行业（29.3%）、造酒业（19.2%）、汽油车（11.8%），造酒业对秦皇岛市的贡献比例明显高于其他城市，其他城市的贡献比例不超过 3.5%。辛集市 VOCs 主要来自于钢铁行业（39.5%）、化学农药制造（12.0%）、植物油加工（10.7%），化学农药制造对辛集市的贡献比例明显高于其他城市，其他城市的贡献比例不超过 2.5%，植物油加工对辛集市的贡献比例明显高于其他城市，其他城市的贡献比例不超过 5.0%。雄安新区 VOCs 主要来自于工程机械（31.7%）、家庭溶剂使用（16.8%）、秸秆焚烧（13.3%）工程机械和秸秆焚烧对雄安新区的贡献比例明显高于其他城市，其他城市的贡献比例分别不超过 2.0%、5.0%。

表 2-26 各市 VOCs 排放总量及占比 单位：吨

排序	城市	排放量	全省占比
1	唐山	238691	23.4%
2	邯郸	152059	14.9%
3	石家庄	137113	13.4%
4	沧州	116633	11.4%
5	保定	71548	7.0%
6	邢台	57922	5.7%
7	廊坊	52474	5.1%
8	秦皇岛	50754	5.0%
9	衡水	42417	4.2%
10	承德	38967	3.8%
11	张家口	37821	3.7%
12	定州	12472	1.2%
13	辛集	10100	1.0%
14	雄安新区	2983	0.3%

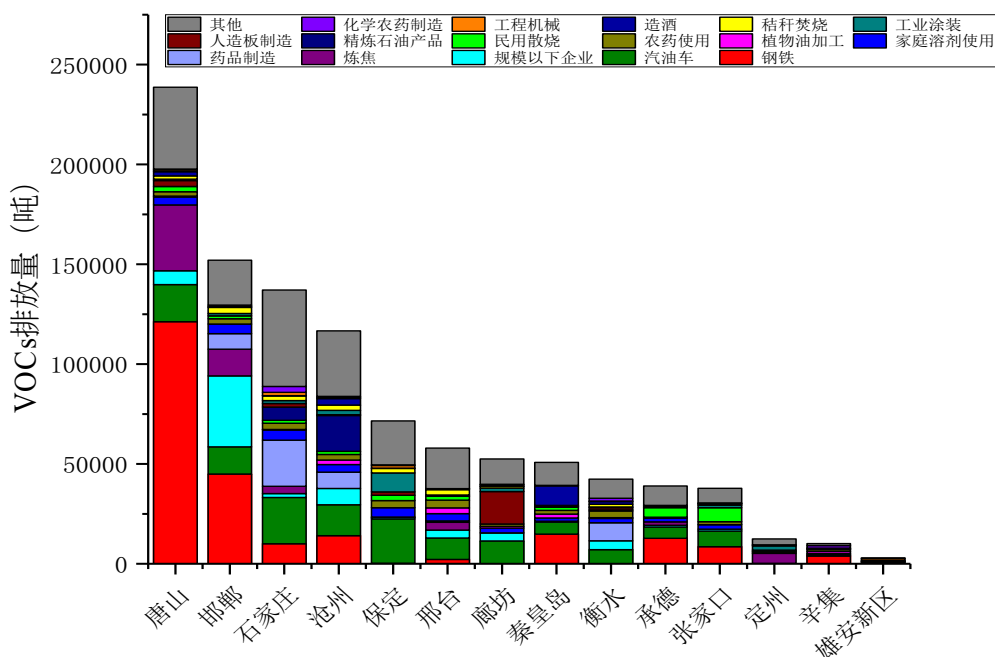


图 2-31 各市 VOCs 二级排放源贡献

2.4 “十三五”期间大气污染物减排效果分析

2.4.1 “十三五”期间实施的大气污染治理方案

河北省“十三五”期间坚持源头防治，着力治本攻坚，把握供给侧结构性改革主线，把调整结构、转型升级作为治本之策。坚定不移调整产业结构，大力压减过剩产能、淘汰落后产能，培育发展新动能，实现长大于消、长优于消。加快调整能源结构，大幅减少煤炭消费，增加清洁能源使用，促进用能结构日趋合理。持续优化交通运输结构，减少公路运输，大力推动铁路运输，发展多式联运，提升铁路货运比例。强力优化产业布局，破解煤电围城、钢铁围城、重化围城难题，有效解决城市重点污染源问题。“十三五”期间，河北省发布实施了一系列大气污染防治减排方案，主要的方案有：

- 1) 《河北省大气污染防治行动计划实施方案》；
- 2) 《河北省大气污染深入治理三年(2015—2017)行动方案》；
- 3) 《河北省打赢蓝天保卫战三年行动方案》；
- 4) 《河北省 2019 年大气污染综合治理工作方案》；
- 5) 《河北省加强臭氧污染防治的指导意见》

- 6) 《河北省冬季清洁取暖实施方案》；
 - 7) 《河北省钢铁行业去产能工作方案（2018—2020年）》；
 - 8) 《河北省柴油货车污染治理攻坚战实施方案》；
 - 9) 《关于加快推进重型柴油货车污染防治的若干措施》；
 - 10) 《关于实施第六阶段国家机动车大气污染物排放标准方案》；
 - 11) 《关于加快推进重点行业挥发性有机物治理工作的通知》
 - 12) 《关于进一步加强加油站挥发性有机物排放管控工作的通知》；
 - 13) 《河北省“散乱污”企业深度整治行动方案》；
 - 14) 《河北省扬尘污染防治办法》；
 - 15) 《河北省燃煤锅炉治理实施方案》；
 - 16) 《河北省推进燃煤工业锅炉改造行动计划》；
 - 17) 《河北省燃煤发电机组超低排放升级改造专项行动实施方案》；
 - 18) 《河北省开展关停取缔实心粘土砖瓦窑专项行动实施方案》
 - 19) 《河北省 2017—2018 年秋冬季大气污染综合治理攻坚行动方案》；
 - 20) 《河北省 2018—2019 年秋冬季大气污染综合治理攻坚行动方案》；
 - 21) 《河北省 2020—2021 年秋冬季大气污染综合治理攻坚行动方案》。
- 梳理以上列出的河北省各项大气污染防治方案，将方案中减排措施进行分类。

（1）产业结构调整措施实施情况

压减过剩产能。着眼深化供给侧结构性改革，坚决去、主动调、加快转，综合运用市场化、法治化手段，严格执行严于国家标准的环保、能耗、水耗、质量、技术、安全等六类地方标准，倒逼过剩产能退出。“十三五”期间，全省累计压减退出粗钢产能 8212.4 万吨、水泥 1194.9 万吨、煤炭产能 5590 万吨、焦炭产能 3144.4 万吨、关停平板玻璃 4999 万重量箱，全省炼钢产能控制在 2 亿吨以内。

重污染企业退城搬迁。以优化产业结构和工业布局为导向，以调整不符合生态环境功能定位为目标，结合城市功能定位和规划调整，推进城市重点污染工业企业退城、搬迁、改造、关停。“十三五”期间，累计完成省定工业企业退城搬迁 84 家。

“散乱污”企业综合整治。2017 年以来持续保持“散乱污”企业动态清零成果，对列入关停取缔类的“散乱污”企业实行“两断三清”，对列入整合搬迁

类的推进入园进区，对列入升级改造类的实施清洁生产技术改造，以“零容忍”态度共整治“散乱污”企业 13.18 万家。

（2）能源结构调整措施实施情况

锅炉综合整治。基本完成 35 蒸吨/小时及以下燃煤锅炉淘汰,65 蒸吨以上除层燃炉、抛煤机外的燃煤锅炉基本达到超低排放，推进燃气锅炉低氮燃烧改造。累计淘汰燃煤锅炉 6.76 万台,燃煤锅炉提升改造 529 台、燃气锅炉低氮燃烧改造 12108 台、其他燃烧类型锅炉（燃油（醇基燃料）锅炉、燃生物质锅炉）改造合计 3070 台。

电力结构调整。开展火电企业深度治理。因地制宜规模化开发利用风能、太阳能、核电、生物质能、水电等新能源和可再生能源资源。“十三五”期间累计完成火电行业深度治理项目 116 个，淘汰火电 234.15 万千瓦。

冬季清洁取暖改造。继续扩大城市（县城）集中供热范围、推进工业余热利用、强化清洁能源保障、坚持宜气则气、宜电则电，多种清洁替代方式协同推进，边远山区洁净煤托底政策推进农村地区清洁取暖改造。加强监督检查，严控散煤复燃。全省累计完成清洁取暖改造 1125.91 万户。全省配送洁净煤 908.09 万户。

（3）交通运输结构调整措施实施情况

交通结构调整措施包括货运结构调整、机动车结构升级、强化机动车监管、推进油品清洁化、开展非道路移动机械治理、强化船舶污染防治等。

货运结构调整。制发《河北省推进运输结构调整实施方案(2018—2020年)》，优先安排“4+2”城市(邯郸、邢台、石家庄、保定,定州、辛集)21 个普通干线公路绕城项目建设。提高港口铁路集疏港运量，积极发展多式联运。

机动车结构升级。“十三五”期间累计淘汰国三及以下营运柴油货车 21.49 万辆，淘汰摩托车及老旧车 171.99 万辆。提高机动车排放标准，2019 年 7 月 1 日起，全省实施机动车国六排放标准。

强化机动车监管。推进机动车尾气遥感监测网络建设，探索建立生态环境部门检测、公安交管部门处罚、交通运输部门监督维修的联合监管机制（I/M）。

推进油品清洁化。开展油品升级，推动油气回收工作，2018 年 10 月起，全省范围内供应国六标准的车用汽柴油，所有加油站全部加设油气回收系统。加强

油品监管，组织开展打击“黑加油站（点）”专项行动，对成品油市场和重型柴油车开展集中专项整治。

非道路移动机械治理。出台《河北省机动车和非道路移动机械排放污染防治条例》，建立健全机动车和非道路移动机械排放污染防治监管机制，提高监督管理能力，建立了非道路移动机械信息和排放状况数据库。

强化船舶等污染防治。制定《河北省港口和船舶污染治理三年作战计划（2018-2020年）》，进入船舶大气污染物排放控制区的船舶要求使用硫含量不大于0.5% m/m的船用燃油。大力推动靠港船舶使用岸电，截止目前，累计建成港口高压岸电22套，32个5万吨以上泊位具备岸电供应能力。

（4）工业企业治理情况

重点行业超低排放改造。在全国率先开展和完成符合条件的钢铁、焦化行业超低排放改造，累计完成钢铁行业超低排放改造项目82家，焦化行业超低排放改造项目56家。推进水泥、平板玻璃、陶瓷行业超低排放改造，累计完成水泥行业超低排放改造项目60家，平板玻璃行业超低排放改造项目24家、陶瓷行业超低排放改造项目63家。

工业炉窑专项治理。印发《河北省工业炉窑综合治理实施方案》，全面开展排查，建立10515台工业炉窑底数管理清单，按照“淘汰取缔一批、提标改造一批、搬迁入园一批，清洁能源替代一批”原则，实施分类整治。截止2020年10月底，累计淘汰不达标工业炉窑533台，取缔燃煤热风炉2台，淘汰炉膛直径3米以下燃料类煤气发生炉21台，清洁能源替代工业炉窑306台，深度治理2562台。

挥发性有机物综合整治。制定《河北省2020年大气污染综合治理工作方案》以及《河北省2020年臭氧污染防控攻坚方案》，通过严格VOCs空间准入和环境准入、全面深化工业源VOCs综合整治、推进源头替代、积极开展生活源VOCs减排治理、依法整治涉VOCs产业集群、大力推行错时生产和作业等大力开展挥发性有机物综合整治工作。截至2020年9月底，完成925家低VOCs原辅材料替代，5166家无组织排放治理，1207家高效治理设施建设，对2885家实施“一厂一策”精细化管控，27个涉VOCs工业园区（企业集群）治理，建设5个集中喷涂中心（有机溶剂集中回收处置中心）。对重点行业企业进行走航监测

和泄露检测与修复(LDAR)。加强空气质量预测预报和夏季臭氧污染分析研判,精准预测未来7天臭氧浓度,提前采取应对措施。

2.4.2 “十三五”期间大气污染防治措施减排量分析

(1) “十三五”期间河北省大气污染物排放量变化

经核算,2020年河北省一次PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO_x、VOCs、NH₃和CO年排放量分别为52.8万吨、130.7万吨、23.7万吨、110.2万吨、94.9万吨、113.2万吨和1428.8万吨。同比2015年,2020年SO₂、PM_{2.5}、PM₁₀排放量大幅下降,降幅分别为78%、52%、046%;NO_x、NH₃、VOCs排放量降幅相对较小,分别为30%、15%、14%;其中CO排放量同比2015年出现不降反升现象,上升幅度为35%。

(2) “十三五”期间主要措施减排贡献

根据“十三五”期间实施的主要措施,计算各个源类减排量,评估主要措施的减排贡献。

图2-32为“十三五”期间各项减排措施对全省减排量的贡献情况。由图2-32可知,“十三五”期间PM_{2.5}减排贡献较大的为民用燃烧源(45%)、钢铁提标改造(14%)、道路扬尘源(14%)和秸秆焚烧源(9%);PM₁₀减排贡献较大的为道路扬尘源(31%)、民用燃烧源(29%)、钢铁提标改造(12%)、裸地扬尘源(7%)和秸秆焚烧源(5%);SO₂减排贡献较大的为民用燃烧源(31%)、钢铁提标改造(24%)、工业锅炉(20%)、电力行业(14%)和热力生产和供应(5%);NO_x减排贡献较大的为电力行业(26%)、民用燃烧源(11%)、工业锅炉(10%)和道路机动车排放源(9%);VOCs减排贡献较大的是炼焦(21%)、民用燃烧源(17%)、秸秆焚烧(16%)和道路机动车源(12%);CO减排贡献较大的为民用燃烧源(72%)、秸秆焚烧(11%)、道路机动车排放源(8%)。

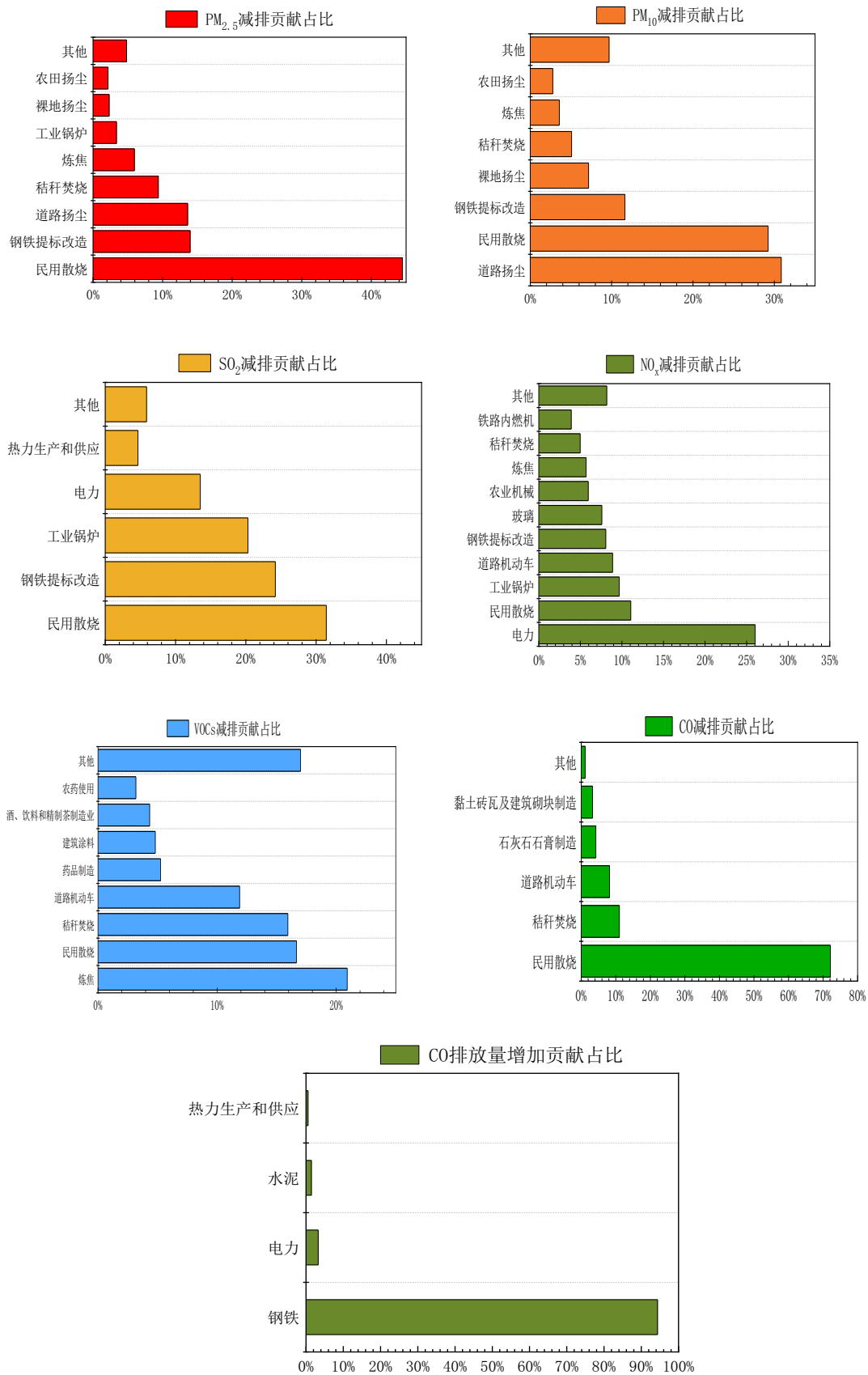


图 2-32 各项污染物减排量的措施贡献

2.4.3 “十四五”期间减排效益来源分析

能源结构调整。民用散烧为各项污染物减排的主要贡献源类之一。河北省自2016年开始推进散煤清洁化工作，“十三五”期间，气代煤839.85万户，电代煤159.34万户，洁净煤配送户数908.09万户，这一措施有力地降低了各项污染物排放量，八个传输通道城市平原地区已基本实现散煤清零。2020年污染物排放分担率显示，目前民用散煤燃烧源排放对PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO_x、VOCs和CO分担率仅为9.7%、5.0%、23.0%、1.3%、2.8%和8.9%，在各项污染物排放的分担率占比均较低。民用散烧源的减排空间已经极大压缩，“十四五”期间不会产生明显的减排效益，应巩固“十三五”成果，严防散煤复烧。

产业结构调整 and 提标改造。“十三五”期间河北省推进实施了钢铁、焦炭、水泥等重点工业行业超低排放改造（深度治理）措施，对PM_{2.5}、PM₁₀、NO_x、SO₂的减排贡献分别为21%、17%、24%、27%。可见，该措施的污染物减排效益明显，在推动行业的高质量发展、促进产业转型升级、助力打赢蓝天保卫战中具有重要作用。此外，“十三五”期间河北省持续推进重点行业产能压减，但根据产量数据，粗钢和水泥产量不降反升，较2015年分别增加3796.5万吨、11820.8万吨。钢铁行业的产量增加为河北省CO排放量不降反升35%的主要成因。

2020年污染物排放分担率显示，钢铁、焦化、电力、水泥等重点行业仍为我省各项污染物的主要贡献源类，对PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO_x、VOCs和CO分担率分别为37%、23%、48%、24%、56%和84%。因此，产业结构调整 and 提标改造依然为“十四五”期间减排的主要发力点。为了挖掘工业企业的减排潜力，一方面应在巩固“十三五”提标改造成果的基础上，通过清洁生产、清洁能源替代、生产工艺改进、产品升级等碳减排方式削减重点工业企业的源头污染物产生量；另一方面应在砖瓦、石灰等其他行业继续推进提标改造，推动全行业绿色发展。

交通结构调整。“十三五”期间河北省国三及以下营运柴油货车累计淘汰214947辆，淘汰摩托车和老旧车1719925辆，各项道路机动车的管理措施对NO_x、VOCs减排量贡献为9%、12%。根据2020年NO_x排放分担率显示，柴油车、其他燃料机动车和汽油车对NO_x污染物排放分担率分别为34.7%、5.3%和2.4%，其中柴油车对NO_x排放分担率占比最高；2020年VOCs排放分担率显示，汽油车对VOCs污染物排放分担率为17%，位列VOCs排放分担率占比

第二位，对 VOCs 排放贡献较高。2020 年移动源污染物排放量统计显示，国四车污染物排放量占比为 41%，是主要排放车型。据此，在之后工作规划中应逐步推进国四柴油车的淘汰和升级改造工作，从车路油三方面全方位施策，降低汽油车的燃油蒸汽挥发和尾气排放，确保 NO_x、VOCs 浓度的有效降低。

用地结构调整。“十三五”期间我省加大道路清扫频率、采用单元网格布点管理等措施强化道路扬尘源的治理，使道路扬尘源对全省 PM_{2.5}、PM₁₀ 减排量的贡献占比分别达到 14%、31%，是两项污染物减排量的第三、第一大贡献者。根据 2020 年污染物排放分担率显示，道路扬尘源依然是 PM₁₀ 的首要贡献源，是 PM_{2.5} 的第二大贡献来源。在下一步对 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 治理工作中，扬尘源的管控具有重要作用。

第3章 控制臭氧生成的 VOCs 关键物种和排放源

3.1 2020 年河北省人为源 VOCs 组分排放清单

表 3-1 为 2020 年河北省各类人为源 VOCs 排放量，总计 102 万吨。然后基于各种源的特征谱便得到 VOCs 分组分排放量，图 3-1 显示了 8 个一级源对 VOCs 物种清单的排放贡献率，工艺过程源、移动源、溶剂使用源、固定燃烧源、生物质燃烧源、餐饮、油品储运销、废弃物处理源 VOCs 排放量分别 51.8 万吨、17.8 万吨、13.8 万吨、5.3 万吨、3.1 万吨、1.3 万吨、0.3 万吨、0.2 万吨，分别占 VOCs 物种清单的 55.3%、19.0%、14.8%、5.6%、3.3%、1.4%、0.4%、0.3%。

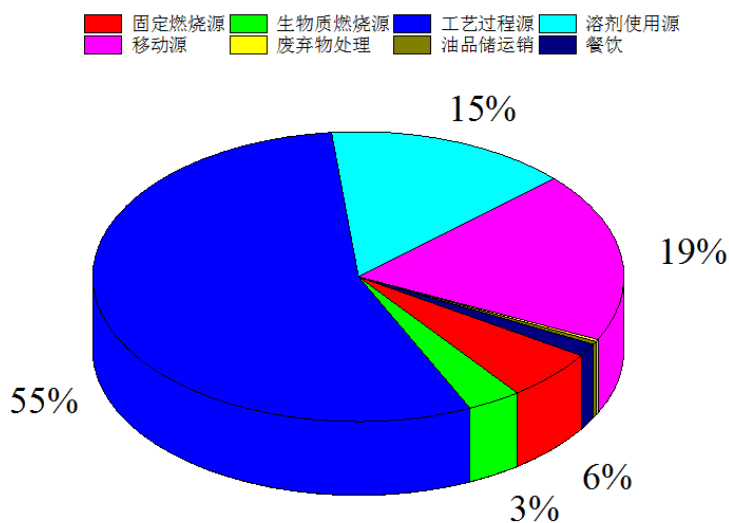


图 3-1 各一级源对 VOCs 的贡献率

图 3-2 分别给出了河北省一级源中的重点二级源对 VOCs 物种清单的排放贡献率。由图 3-2 可见，工艺过程源中，钢铁、炼焦、药品制造、泡沫塑料是主要排放源，排放量分别为 21.6 万吨、7.5 万吨、5.0 万吨、3.5 万吨，分别占 VOCs 物种清单的 23.0%、8.0%、5.4%、3.7%；移动源中，汽油车是主要排放源，排放量为 14.2 万吨，占 VOCs 物种清单的 15.1%；溶剂使用源中，非工业

表 3-1 2020 年河北省各类人为源 VOCs 排放量 (吨)

一级排放源	二级排放源	VOCs		
固定燃烧源	电力	4551		
	热力生产和供应	937		
	工业锅炉	19954		
	民用锅炉	91		
	民用散煤、民用天然气	26894		
	小计	52426		
生物质燃烧	生物质锅炉	11947		
	秸秆焚烧	19669		
	户用生物质炉具	4540		
	小计	36157		
工艺过程源	钢铁	232871		
	有色金属冶炼和压延加工业	0		
	非金属矿物制品业	水泥	25315	
		黏土砖瓦及建筑砌块制造	1768	
		石灰石石膏制造	1711	
		陶瓷	15656	
		玻璃	4086	
		沥青油毡	22	
		石墨碳素	220	
		人造板制造	24352	
		石油加工、炼焦	炼焦	60695
			精炼石油产品	24600
	采选矿	煤炭开采	8023	
		石油开采	8265	
	化学原料和化学制品制造业	基础化学原料制造	3424	
		肥料制造	6796	
		药品制造	49378	
		化学农药制造	7645	
		涂料、油墨、颜料及类似产品制造	3389	
		合成树脂	1953	
化学纤维制造业	合成纤维	341		
	轮胎制造	124		
橡胶和塑料制品业	泡沫塑料	1104		
	人造革合成革	9		
	植物油加工	10093		

一级排放源	二级排放源	VOC _s	
	焙烤食品制造业	385	
	造酒	17478	
	造纸和纸制品业	122	
	规模以下企业	68667	
	小计	578495	
溶剂使用源	工业溶剂使用源	汽车喷涂	15022
		家具喷涂	1756
		家电喷涂	2426
		装备制造喷涂	2248
		电子	101
		印刷	2294
		染料印染	27
	非工业溶剂使用源	干洗	10871
		汽修	11637
		建筑涂料	9566
		农药使用	30186
		家庭溶剂使用	37839
		沥青铺路	11244
		道路市政设施防腐	3412
	小计	137925	
废弃物处理	污水处理	0	
	生活垃圾	4824	
	危废处理	109	
	小计	4065	
移动源	道路机动车	柴油车	8276
		汽油车	141806
		其他燃料车	18662
	非道路移动源	工程机械	8197
		农业机械	7332
		沿海船舶	11228
		民航飞机	380
	小计	195880	
油品储运销		3300	
餐饮		13706	
	总计	1021954	

溶剂使用源占 VOCs 物种清单的 12.1%，其中生活及商业用品溶剂使用、农药使用、建筑喷涂、汽修是主要排放源，排放量分别为 3.8 万吨、2.8 万吨、2.0 万吨、1.2 万吨，分别占 VOCs 物种清单的 4.1%、3.0%、2.1%、1.3%；工业溶剂使用源占 VOCs 物种清单的 2.7%，其中汽车喷涂是主要排放源，排放量为 1.2 万吨，占 VOCs 物种清单的 1.3%；**固定燃烧源**中，民用散烧和工业锅炉是主要排放源，排放量分别为 2.7 万吨、1.9 万吨，分别占 VOCs 物种清单的 2.9%、2.0%；**生物质燃烧源**中，秸秆焚烧是主要排放源，排放量为 2.0 万吨，占 VOCs 物种清单的 2.1%。

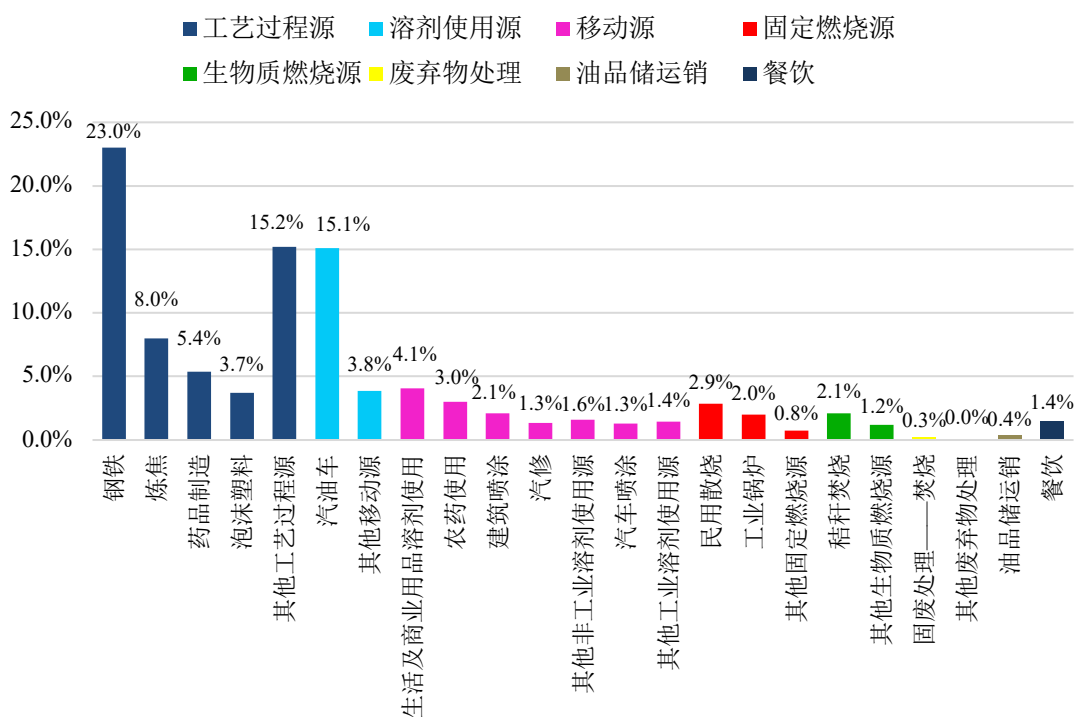


图 3-2 各二级源对 VOCs 物种清单的贡献率

图 3-3 展示出 VOCs 物种的组成。烷烃、芳香烃、OVOCs、烯炔烃、卤代烃、其他 6 大类分别排放 VOCs 31.4 万吨、30.7 万吨、16.7 万吨、9.6 万吨、2.8 万吨、2.4 万吨，分别占 VOCs 物种清单总量的 33.6%、32.8%、17.8%、10.3%、3.0%、2.6%。

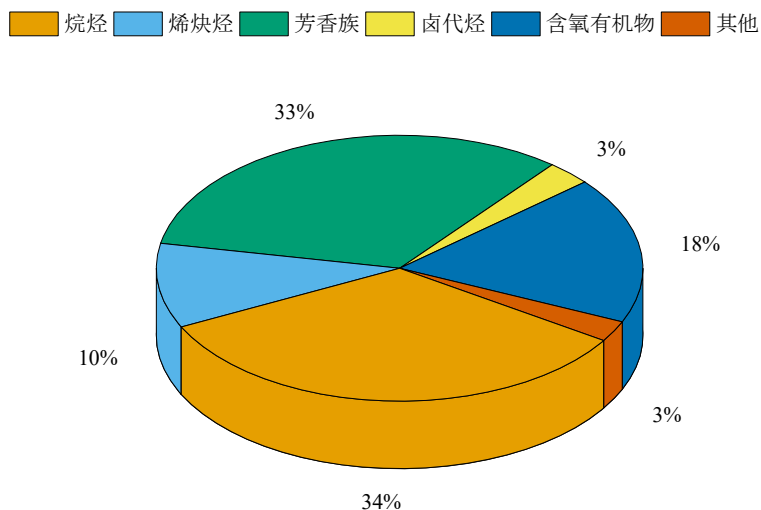


图 3-3 VOCs 物种构成

图 3-4 展示了各物种中二级源对 VOCs 的贡献率。**烷烃**中，汽油车、钢铁、炼焦、农药使用是主要排放源，占 VOCs 物种清单的 20.9%，排放量分别为 7.0 万吨、5.7 万吨、4.3 万吨、2.5 万吨，分别占 VOCs 物种清单的 7.5%、6.1%、4.6%、2.7%。

芳香烃中，钢铁、泡沫塑料、汽油车、炼焦是主要排放源，占 VOCs 物种清单的 22.8%，排放量分别为 13.1 万吨、3.2 万吨、2.9 万吨、2.1 万吨，分别占 VOCs 物种清单的 14.0%、3.4%、3.1%、2.2%。

OVOCs 中，药品制造、造酒、生活及商业用品溶剂使用、餐饮是主要排放源，占 VOCs 物种清单的 12.1%，排放量分别为 4.6 万吨、2.9 万吨、2.7 万吨、1.1 万吨，分别占 VOCs 物种清单的 4.9%、3.1%、2.9%、1.2%。

烯炔烃中，汽油车、民用散烧、炼焦、钢铁是主要排放源，占 VOCs 物种清单的 6.8%，排放量分别为 3.3 万吨、1.1 万吨、1.0 万吨、1.0 万吨，分别占 VOCs 物种清单的 3.5%、1.1%、1.1%、1.1%。

卤代烃中，VOCs 的主要排放源是钢铁行业，排放量为 1.7 万吨，占 VOCs 物种清单的 1.8%。

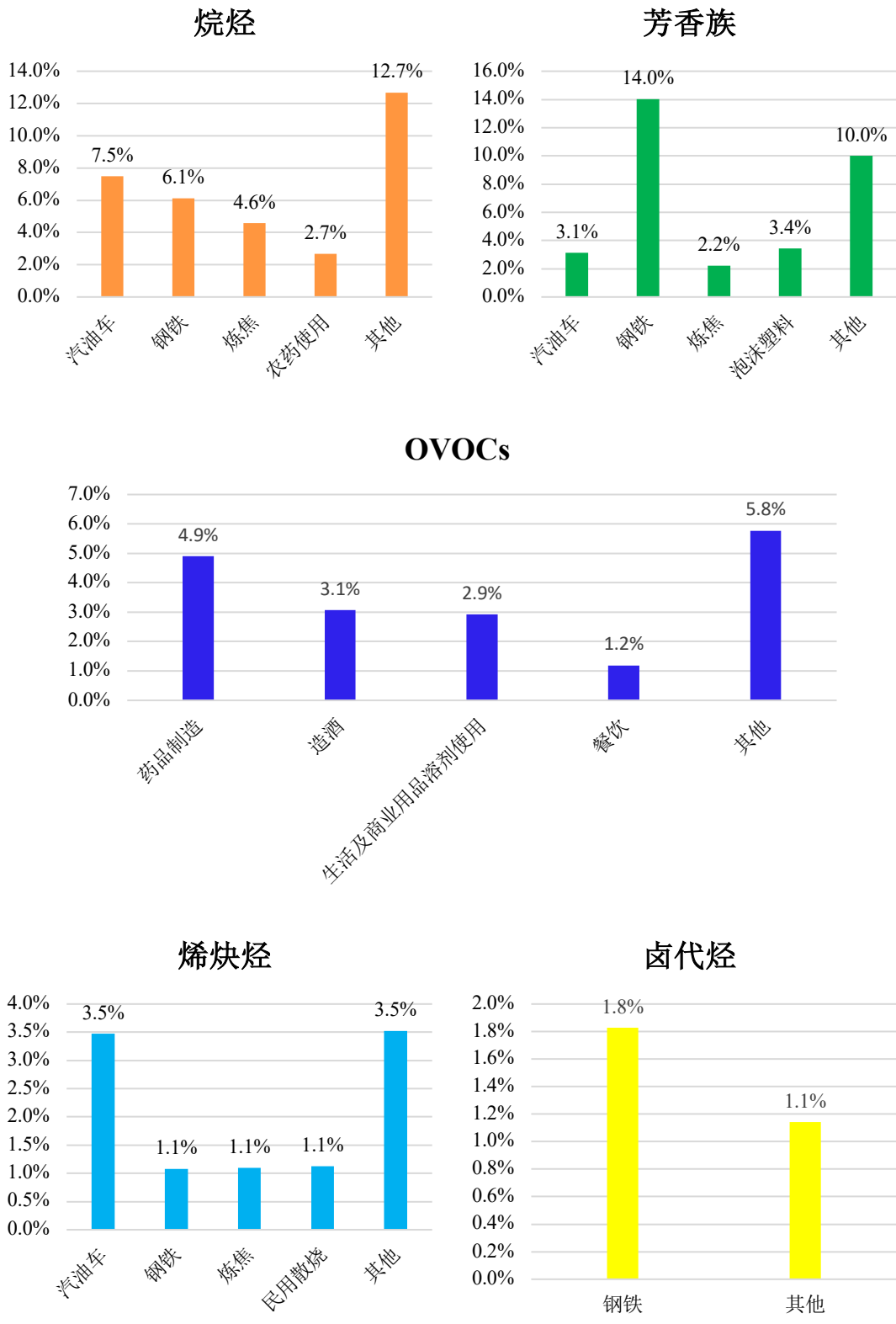


图 3-4 各物种中二级源对 VOCs 的贡献率

3.2 VOCs 优势物种排放特征

根据河北省发布的 VOCs、臭氧防治政策和河北省环科院编制的河北省 2020 年大气污染源排放清单，对工艺过程源、移动源、溶剂使用源、餐饮、油品储运销、废弃物处理 6 个一级源，汽油车、炼焦、药品制造、泡沫塑料等 46 个二级源（去除钢铁、水泥等不可控行业和无 VOCs 排放的行业）进行分析。

VOCs 组分清单中，占比大于 1%的有乙醇、苯乙烯、甲苯、丙酮、正己烷、异戊烷、间，对-二甲苯、乙烷、正丁烷、丙烷等共计 30 种，合计贡献了组分清单中 VOCs 总量的 74.6%。其中，乙醇贡献最大，为 9.1%；其次是苯乙烯、甲苯，贡献均为 5.4%；丙酮、正己烷、异戊烷、间，对-二甲苯、乙烷 5 种组分贡献在 3.1%~5.0%之间；正丁烷、丙烷、苯、乙苯、异丁烷、正戊烷 6 种组分贡献在 2.0%~2.6%之间；乙酸乙酯、甲醇、2-甲基戊烷、环己烷等其余 16 种组分贡献在 1.0%~1.8%之间，如图 3-5 所示。

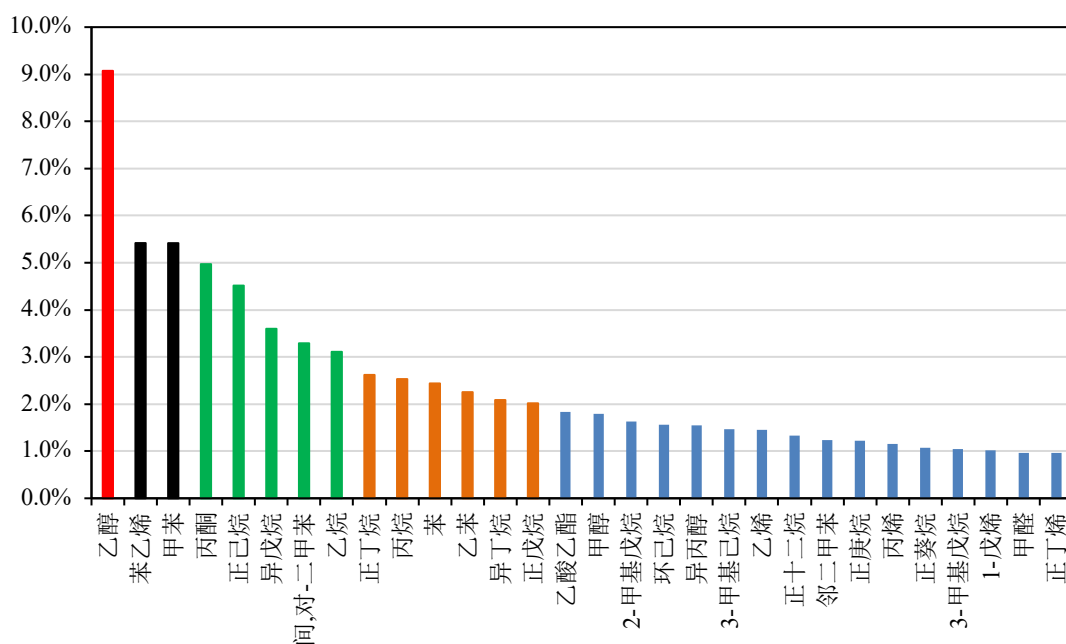


图 3-5 占比大于 1%的物种排序

依据排放量和 VOCs 物种的光化学反应活性，选取如下物种进行详细的来源分析。VOCs 物种分别为乙醇、苯乙烯、甲苯、丙酮、正己烷、异戊烷、间，对-二甲苯、苯、乙苯、乙酸乙酯、甲醇、异丙醇、乙烯、邻二甲苯、丙烯、甲醛、正丁烯。

由图 6、图 7 可知，对于乙醇，一级源中，工艺过程源、溶剂使用源是其主要排放源，贡献比例分别为 58.0%、42.0%；二级源中，造酒、生活和商业溶剂使用是其主要排放源，贡献比例分别为 51.5%、41.7%。

对于苯乙烯，一级源中，工艺过程源是其主要排放源，贡献比例为 96.4%；二级源中，泡沫塑料是其主要排放源，贡献比例为 85.9%。

对于甲苯，一级源中，工艺过程源、移动源、溶剂使用源是其主要排放源，贡献比例分别为 50.9%、31.3%、16.3%；二级源中，炼焦、汽油车、合成纤维制造、建筑喷涂是其主要排放源，贡献比例分别为 33.7%、28.5%、9.8%、8.7%。

对于丙酮，一级源中，工艺过程源是其主要排放源，贡献比例为 90.9%；二级源中，药品制造是其主要排放源，贡献比例为 89.1%。

对于正己烷，一级源中，溶剂使用源、工艺过程源是其主要排放源，贡献比例分别为 68.9%、23.2%；二级源中，农药使用、植物油加工、炼焦是其主要排放源，贡献比例分别为 66.8%、10.7%、8.2%。

对于异戊烷，一级源中，移动源、工艺过程源是其主要排放源，贡献比例分别为 71.9%、24.3%；二级源中，汽油车、炼焦是其主要排放源，贡献比例分别为 70.9%、16.6%。

对于间，对-二甲苯，一级源中，溶剂使用源、移动源、工艺过程源是其主要排放源，贡献比例分别为 61.0%、22.0%、15.7%；二级源中，建筑喷涂、汽油车、汽车喷涂、道路市政设施防腐、炼焦是其主要排放源，贡献比例分别为 18.6%、18.1%、14.6%、8.0%、8.0%。

对于苯，一级源中，移动源、工艺过程源、溶剂使用源是其主要排放源，贡献比例分别为 49.7%、36.3%、11.7%；二级源中，汽油车、炼焦、建筑喷涂是其主要排放源，贡献比例分别为 43.2%、25.6%、6.8%。

对于乙苯，一级源中，溶剂使用源、工艺过程源、移动源是其主要排放源，贡献比例分别为 54.4%、29.3%、15.6%；二级源中，建筑喷涂、汽油车、汽车喷涂、合成纤维制造、道路市政设施防腐是其主要排放源，贡献比例分别为 15.0%、13.9%、12.4%、9.0%、8.0%。

对于乙酸乙酯，一级源中，工艺过程源、溶剂使用源是其主要排放源，贡献比例分别为 77.6%、22.1%；二级源中，药品制造、汽车喷涂是其主要排放源，贡献比例分别为 74.6%、10.0%。

对于甲醇，一级源中，工艺过程源、溶剂使用源是其主要排放源，贡献比例分别为 59.7%、40.3%；二级源中，人造板制造、汽修是其主要排放源，贡献比例分别为 46.1%、40.3%。

对于异丙醇，一级源中，工艺过程源、溶剂使用源是其主要排放源，贡献比例分别为 58.7%、40.8%；二级源中，药品制造、生活及商业用品溶剂使用是其主要排放源，贡献比例分别为 58.7%、31.9%。

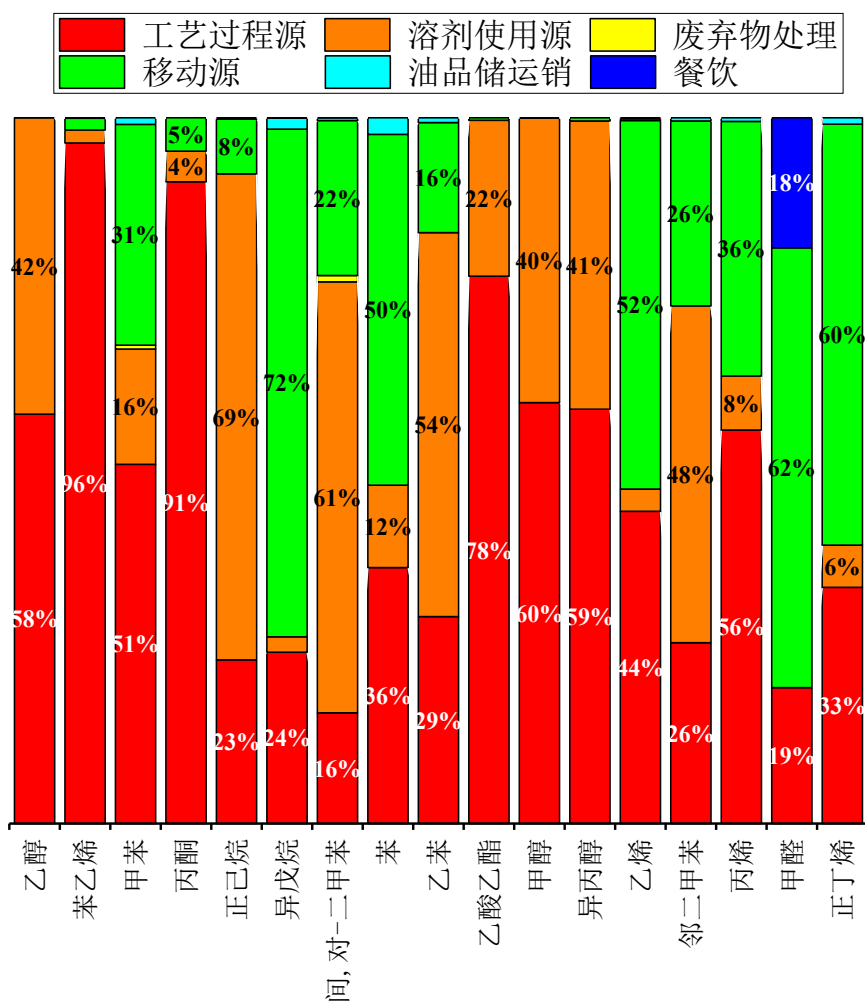
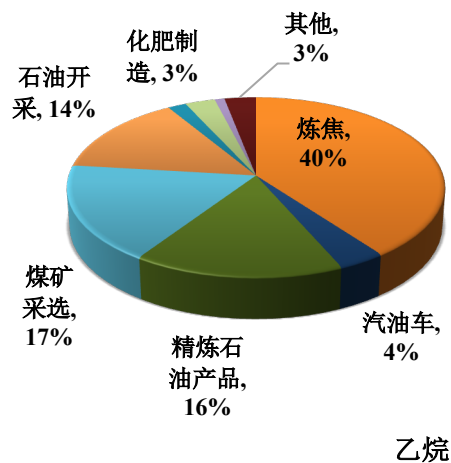
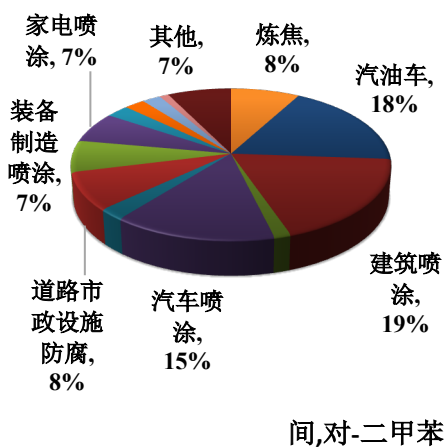
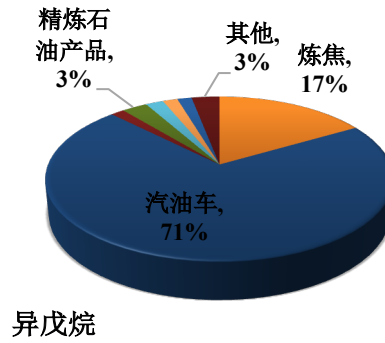
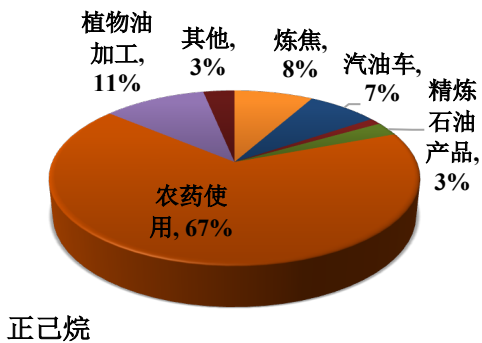
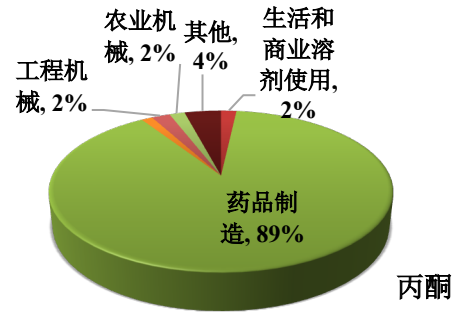
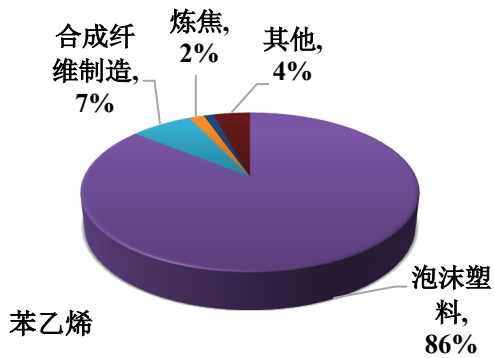
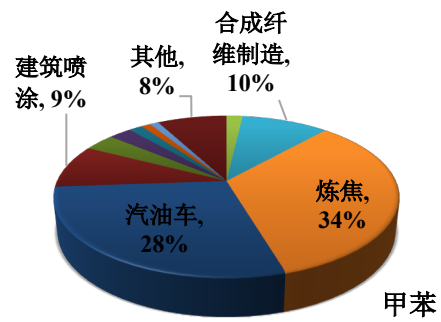
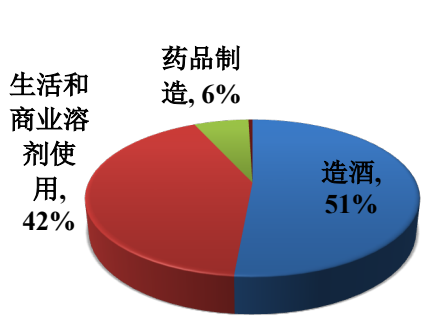
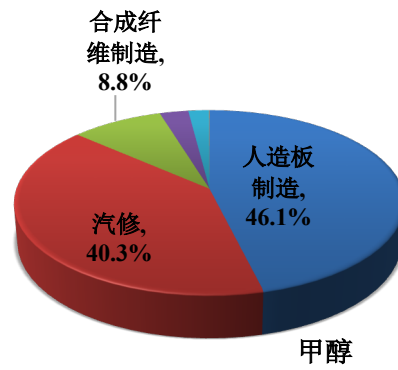
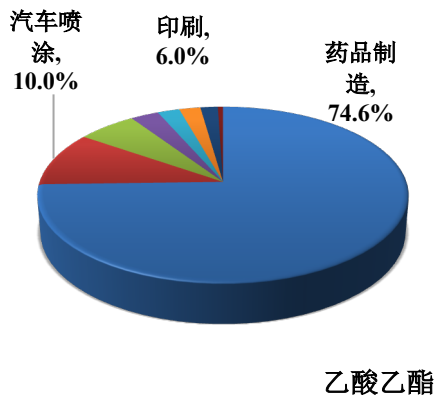
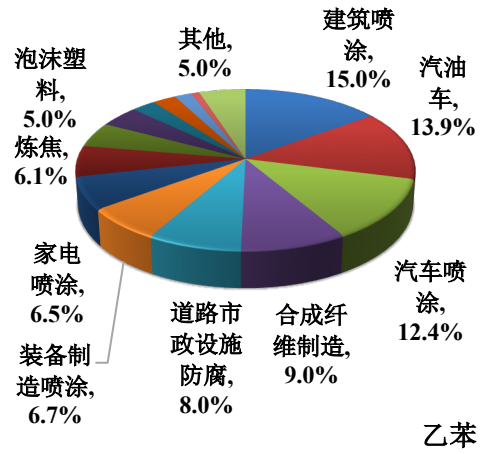
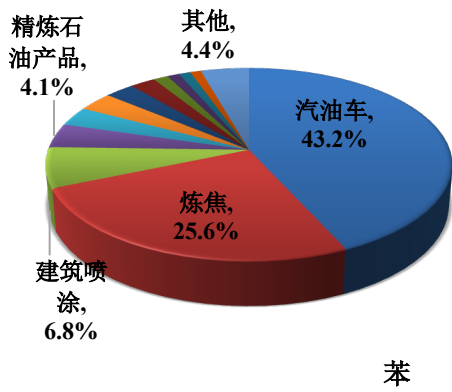
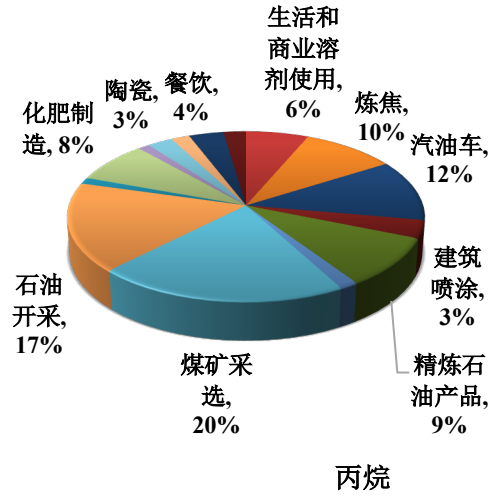
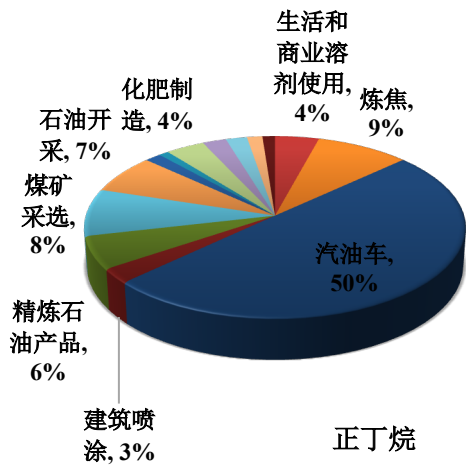


图 3-6 排名前十的组分一级排放源贡献





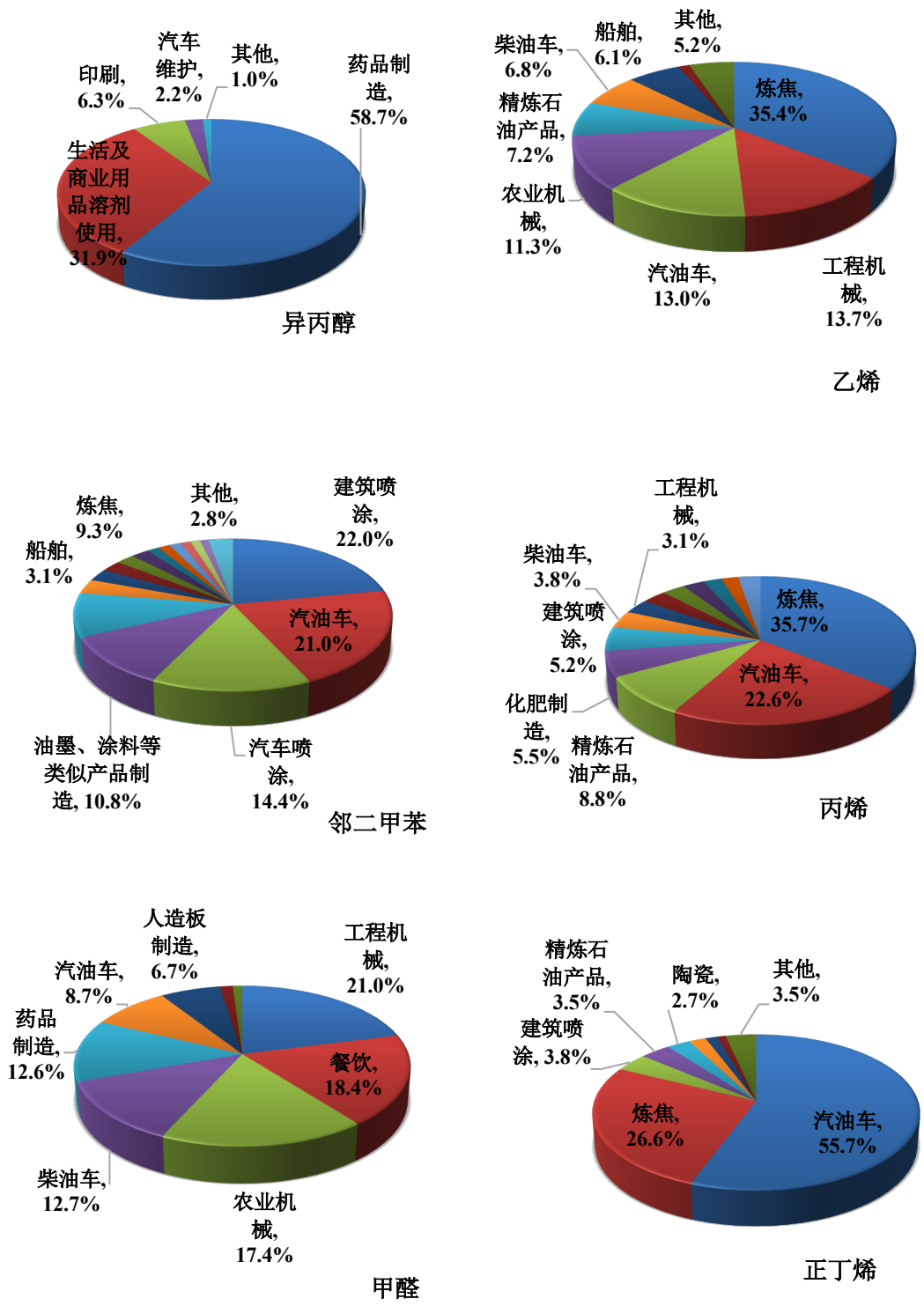


图 3-7 排名前十的组分二级排放源贡献

对于乙烯，一级源中，移动源、工艺过程源是其主要排放源，贡献比例分别为 52.2%、44.3%；二级源中，炼焦、工程机械、汽油车、农业机械是其主要排放源，贡献比例分别为 35.4%、13.7%、13%、11.3%。

对于邻二甲苯，一级源中，溶剂使用源、移动源、工艺过程源是其主要排放源，贡献比例分别为 47.7%、26.2%、25.6%；二级源中，建筑喷涂、汽油车、汽车喷涂、油墨、涂料等类似产品制造、炼焦是其主要排放源，贡献比例分别为 22.0%、21.0%、14.4%、10.8%、9.3%。

对于丙烯，一级源中，工艺过程源、移动源是其主要排放源，贡献比例分别为 55.8%、36.1%；二级源中，炼焦、汽油车、精炼石油产品是其主要排放源，贡献比例分别为 35.7%、22.6%、8.8%。

对于甲醛，一级源中，移动源、工艺过程源、餐饮是其主要排放源，贡献比例分别为 62.3%、19.3%、18.4%；二级源中，工程机械、餐饮、农业机械、柴油车、药品制造、汽油车是其主要排放源，贡献比例分别为 21.0%、18.4%、17.4%、12.7%、12.6%、8.7%。

对于正丁烯，一级源中，移动源、工艺过程源是其主要排放源，贡献比例分别为 59.6%、33.5%；二级源中，汽油车、炼焦是其主要排放源，贡献比例分别为 55.7%、26.6%。

3.3 全省夏季分组分排放特征

夏季臭氧污染更为频繁，2019 年夏季河北省人为源 VOCs 排放化学组成见图 3-8，芳香烃、烷烃、OVOCs 和烯烃排放量分别占河北省人为源 VOCs 排放总量的 29.49%、26.90%、20.67%和 10.11%；烷烃和芳香烃是河北省夏季人为源 VOCs 排放的主要化学组分，分别为 14.4 万吨和 15.9 万吨，OVOCs 和烯烃的年排放量分别为 11.2 万吨和 5.4 万吨。卤代烃和炔烃的排放量较小，其排放量分别占人为源 VOCs 排放总量的 3.18%和 1.74%，排放量分别为 1.7 万吨和 0.9 万吨。其他 VOCs 排放量占 7.91%。

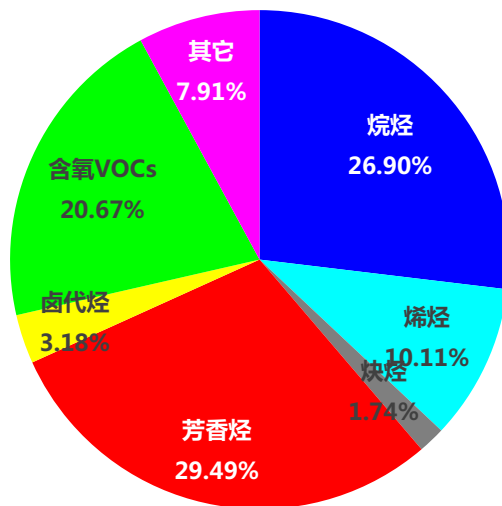


图 3-8 2019 年夏季河北省人为源 VOCs 排放化学组成

图 3-9 给出 2019 年夏季河北省人为源 VOCs 不同化学组分的来源构成，整体与全年差异不大。相比全年，夏季机动车排放对烯炔、炔炔的贡献显著较高，固定化石燃料燃烧对烷烃、烯炔、炔炔的贡献显著则较低，主要由于夏季机动车油气挥发贡献更高，由于夏季不需要供暖，固定化石燃料燃烧排放更低。

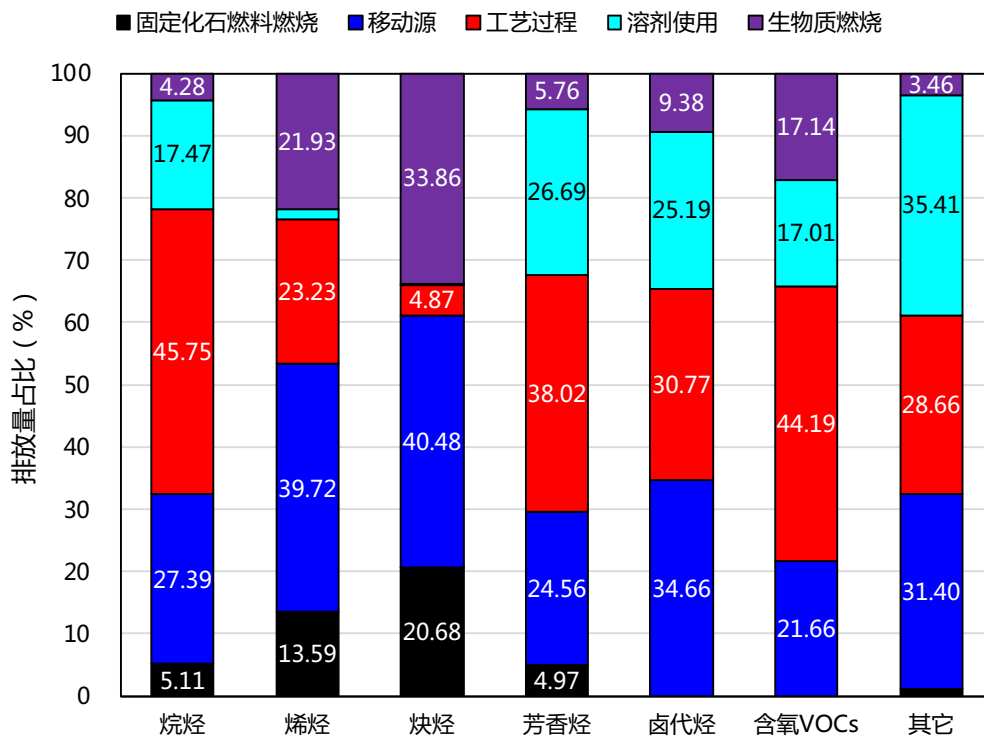


图 3-9 2019 年夏季河北省人为源 VOCs 不同化学组分的源贡献

不同城市 VOCs 组分的排放贡献也有差异，各城市夏季排放总量和组分占比如图 3-10 所示。总体来说，芳香烃和烷烃是 11 个城市夏季人为源 VOCs 排放量最大的两类组分。沧州和邢台的烷烃贡献高于其他城市，唐山、廊坊的芳香烃贡献高于其他城市。

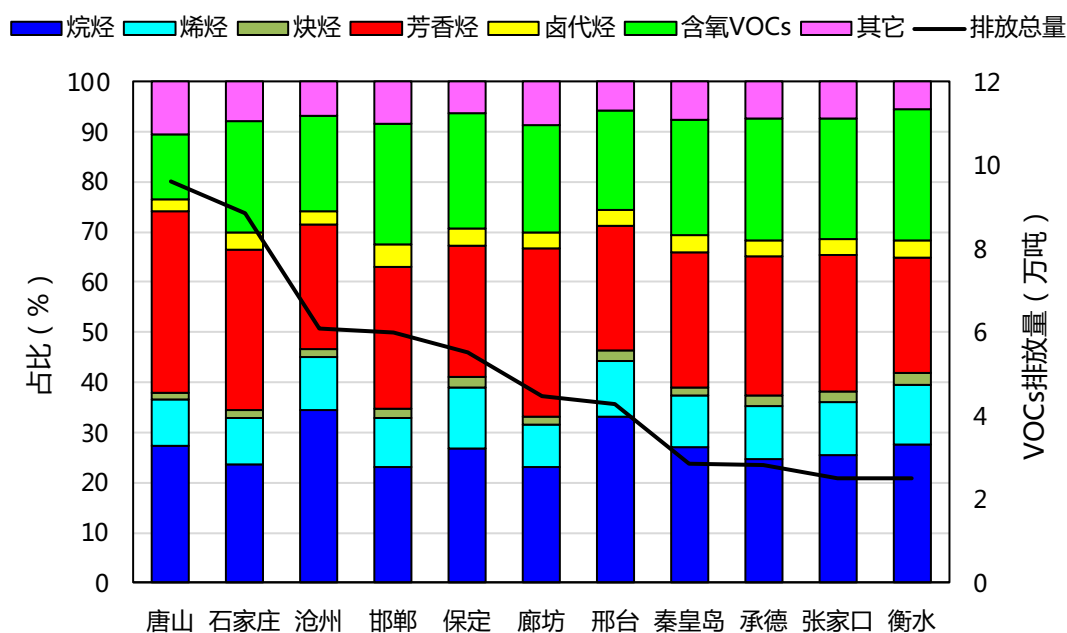


图 3-10 2019 年夏季河北省 11 个城市人为源 VOCs 排放的化学组成

3.4 夏季人为源 VOCs 臭氧生成潜势

3.4.1 全省夏季臭氧生成潜势

2019 年河北省夏季不同组分对臭氧生成潜势的贡献比如图 3-11，贡献最显著的组分为芳香烃、烯烃和含氧 VOCs，占比分别为 39.29%、30.91%和 20.34%。

2019 年河北省臭氧生成潜势 (OFP) 前 10 的物种依次为乙烯、间/对-二甲苯、甲苯、丙烯、甲醛、1,2,4-三甲基苯、乙醛、顺-2-丁烯、邻-二甲苯、苯乙烯，对臭氧生成的贡献为 19.23 万吨、14.07 万吨、13.72 万吨、12.96 万吨、12.84 万吨、9.51 万吨、7.90 万吨、6.59 万吨、6.05 万吨、4.96 万吨。排放量前 10 的物种的一级源 OFP 如图 3-12 所示。

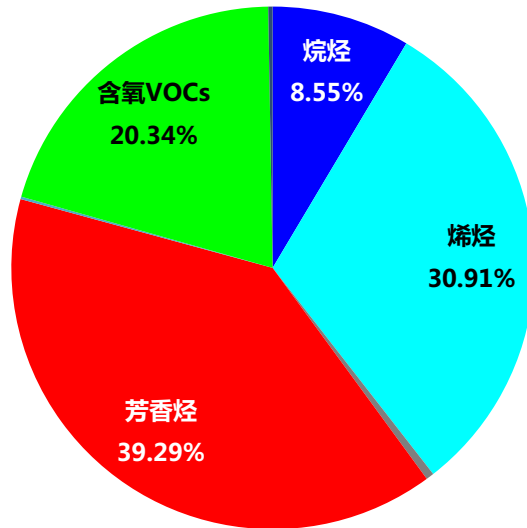


图 3-11 2019 年夏季河北省不同组分对人为源 VOCs 臭氧生成潜势的贡献比

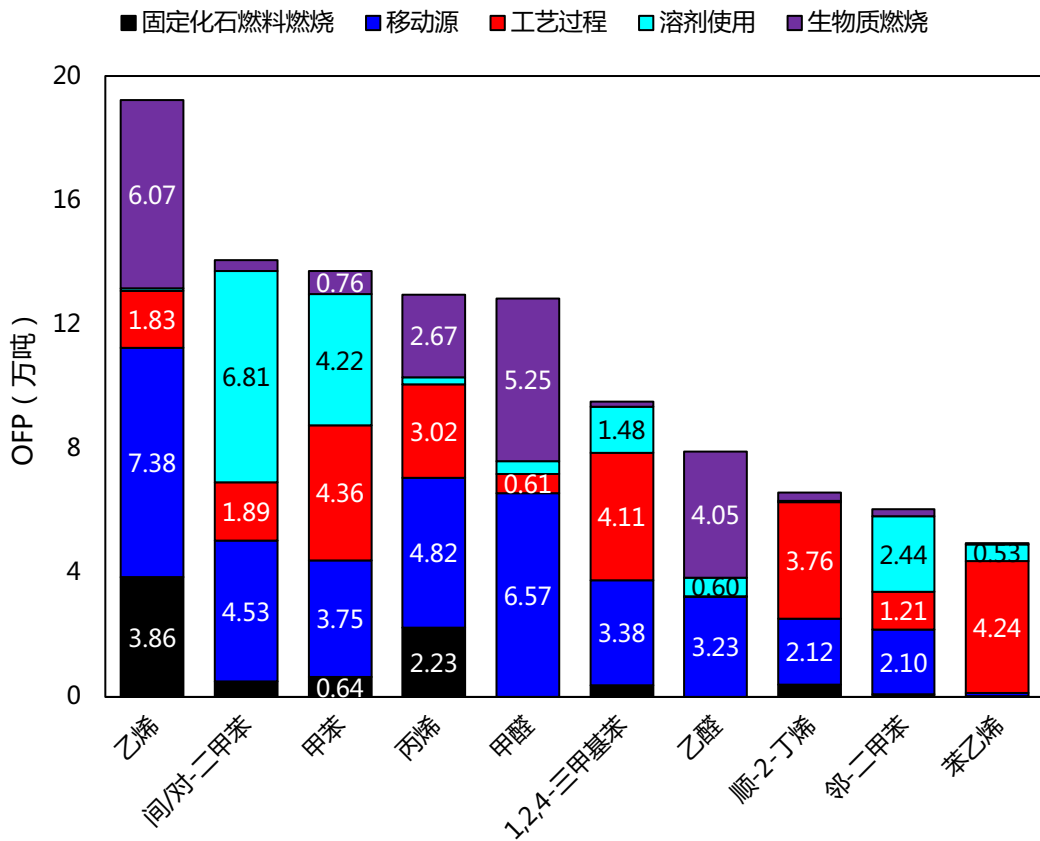


图 3-12 2019 年河北省臭氧生成潜势 (OFP) 前 10 的物种的总 OFP 及一级源 OFP

3.4.2 各城市夏季臭氧生成潜势

图 3-13、图 3-14、图 3-15 为河北省 11 个城市 2019 年夏季烯烃、芳香烃及 OVOCs 的 OFP 及其一级源贡献。其中，夏季烯烃贡献最高的城市为唐山、石家庄，占比分别为 15.92%、14.53%。唐山的芳香烃贡献最高显著高于其他城市，其次为石家庄，占比分别为 21.98%、14.98%。OVOCs 贡献最高的城市依次为石家庄、唐山、邯郸、保定，占比分别为 14.93%、12.78%、12.75%、12.31%。

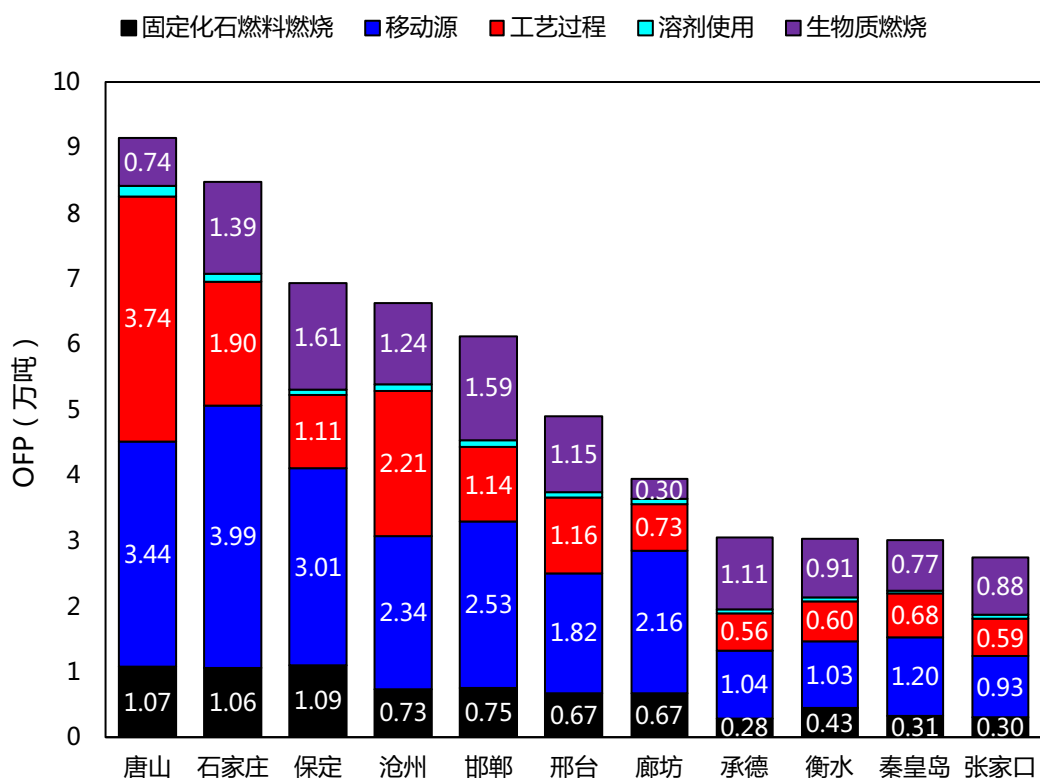


图 3-13 2019 年夏季河北省 11 个城市人为源烯烃的总 OFP 及其一级源 OFP

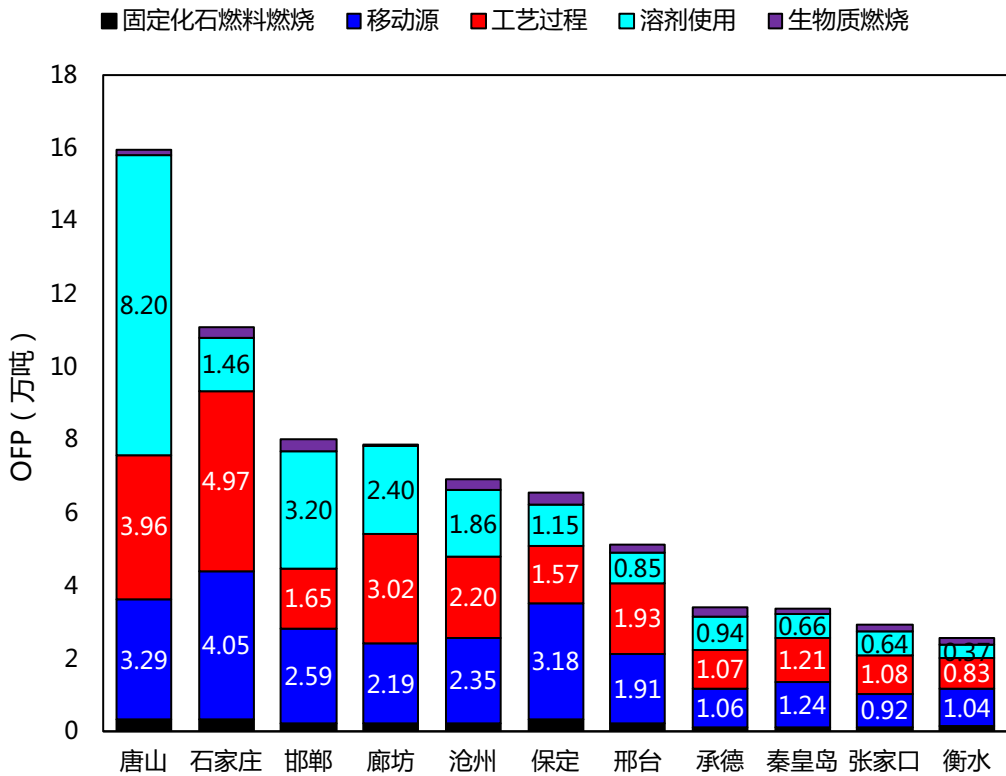


图 3-14 2019 年夏季河北省 11 个城市人为源芳香烃的总 OFP 及其一级源 OFP

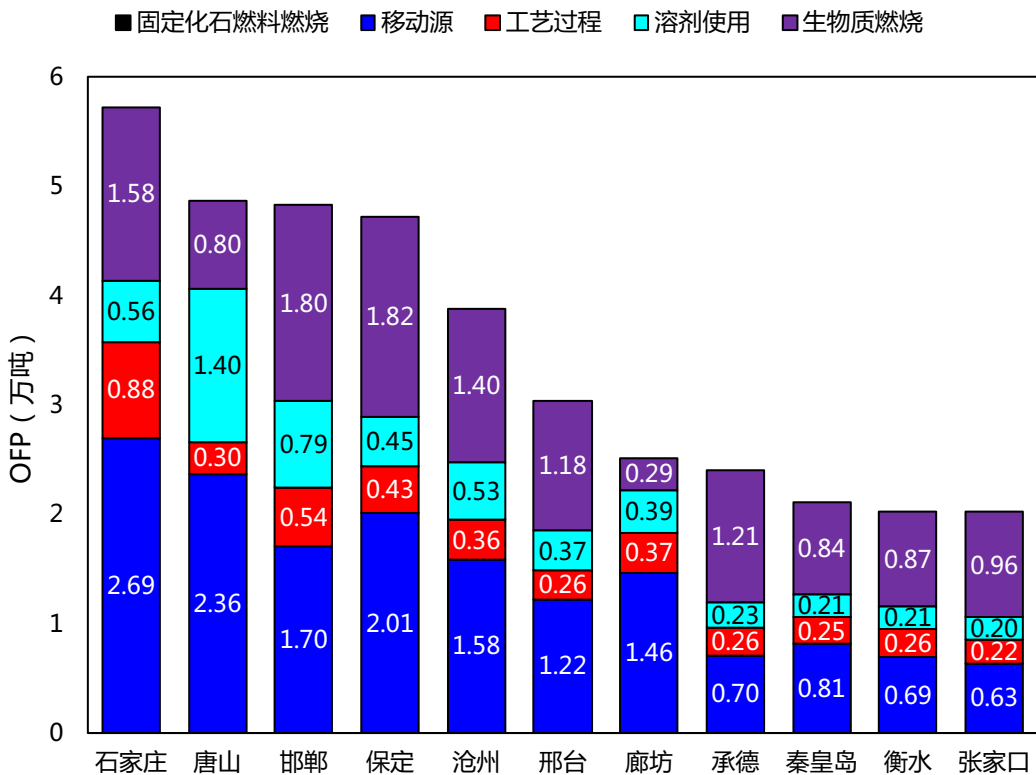


图 3-15 2019 年夏季河北省 11 个城市人为源含氧 VOCs 的总 OFP 及其一级源 OFP

计算出各个城市 VOCs 各化学物种 O₃ 生成潜势便得到各市 VOCs 的 O₃ 生成潜势，其空间分布如图 3-16 所示。

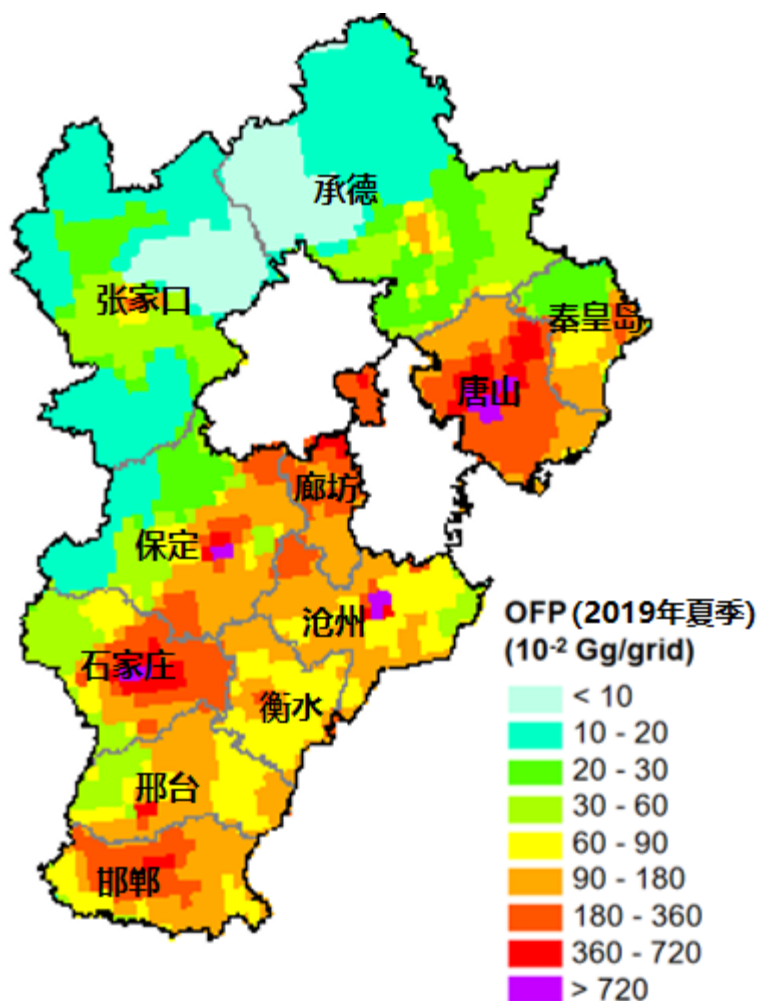


图 3-16 河北省各市夏季 VOCs O₃ 生成潜势的空间分布

由图 3-16 可以看出，河北省 O₃ 生成潜势最大的是唐山市，其次是石家庄市、邯郸市、廊坊市，保定东部、沧州东北部、张家口市区的 O₃ 生成潜势也比较高，承德的 O₃ 生成潜势最低。

对比图 1-7 所示 2019-2020 年 O₃ 最大 8 小时 90 百分位浓度和图 3-16 所示 O₃ 生成潜势的空间分布图可见，它们的空间分布趋势的一致性比较好，说明人为源 VOCs 排放对 O₃ 的贡献作用明显，因此控制 O₃ 应重点控制人为源 VOCs 的排放。

3.4.3 重点城市人为源 VOCs 臭氧生成潜势

(1) 石家庄

2019 年石家庄人为源 VOCs 排放化学组成见图 3-17, 从图中可以看出, 芳香烃是石家庄人为源 VOCs 的主要组成部分, 其占石家庄人为源 VOCs 排放总量的 32.26%; 其次烷烃和 OVOCs 的排放量也较大, 分别占石家庄人为源 VOCs 排放总量的 23.39%和 22.52%。烯烃和卤代烃的排放量较小, 其排放量分别占人为源 VOCs 排放总量的 9.09%和 3.23%, 炔烃占 1.55%, 其他 VOCs 排放量占 7.96%。

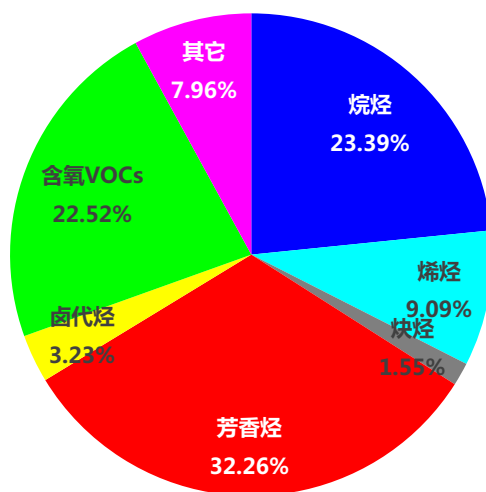


图 3-17 2019 年夏季石家庄人为源 VOCs 排放化学组成

芳香烃主要来源于橡胶和塑料制品贡献最高为 37%，其次为道路移动源、涂料油墨制造、表面涂装，分别贡献了 20%、9%、8%；含氧 VOCs 主要来源于有机化学产品制造最高为 53%，其次为道路移动源、生物质露天焚烧、非道路移动源、生活溶剂使用，分别贡献了 14%、8%、7%、7%、6%；烷烃则来源于道路移动源，其贡献率 28%，其次为石油精炼、其他溶剂使用、煤化工、涂料油墨制造、非道路移动源，分别贡献 10%、10%、7%、7%、6%；烯烃来源于道路移动源，贡献率为 32%，其次为非道路移动源、生物质燃料燃烧、生物质露天焚烧、有机化学产品制造、散煤燃烧，分别贡献了 14%、10%、8%、8%、8%。

基于 2019 年夏季石家庄人为源 VOCs 分组分排放清单，其二级源贡献如图 3-18 所示。其中，贡献最高的为道路移动源占 29%，其次是非道路移动源、有

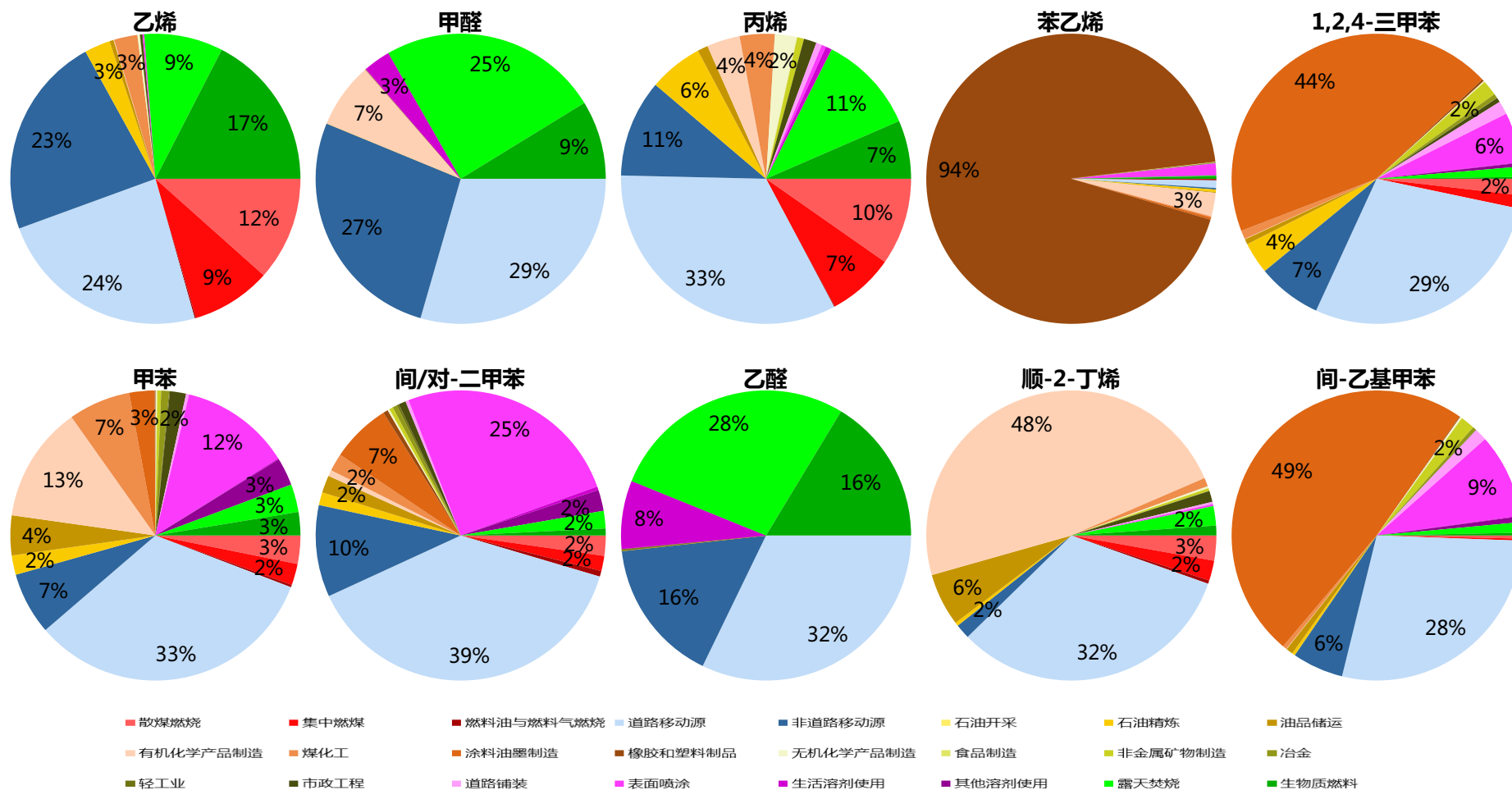


图 3-20 2019 年夏季石家庄人为源 VOCs 贡献臭氧生成潜势前 10 物种的二级源贡献

图 3-20 进一步给出 2019 年夏季石家庄人为源 VOCs 贡献臭氧生成潜势前 10 物种的二级源贡献。

(2) 邯郸

2019 年夏季邯郸人为源 VOCs 排放量为 5.6 万吨，其 VOCs 排放的化学组成见图 3-21，从图中可以看出，芳香烃是邯郸人为源 VOCs 的主要组成部分，其占邯郸人为源 VOCs 排放总量的 29.48%；其次 OVOCs 和烷烃的排放量也较大，分别占邯郸人为源 VOCs 排放总量的 25.10%和 21.81%。烯烃和卤代烃的排放量较小，其排放量分别占总量的 10.15%和 4.63%，炔烃占 1.84%，其他 VOCs 占 6.99%。

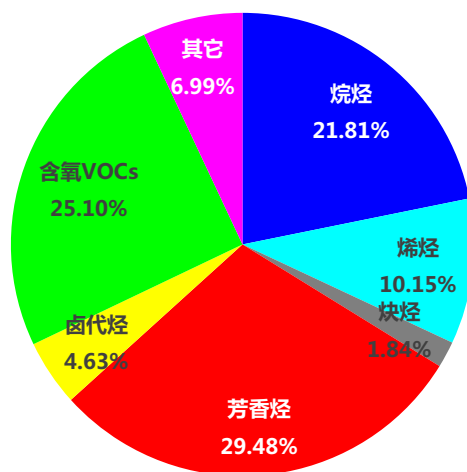


图 3-21 2019 年夏季邯郸人为源 VOCs 排放化学组成

芳香烃主要来源于表面喷涂，其贡献率高达 36%，其次为道路移动源贡献 21%；含氧 VOCs 则来源于有机化学产品制造，其贡献率为 32%，其次为道路移动源、生物质露天焚烧、表面喷涂、食品制造，分别贡献了 13%、13%、10%、10%；烷烃来源于道路移动源，其贡献率为 28%，其次为煤化工、其他溶剂使用、表面喷涂，分别贡献了 14%、10%、8%；烯烃主要来源于道路移动源，其贡献率达到 28%，其次为非生物质燃料燃烧、生物质露天焚烧、道路移动源，分别贡献了 15%、13%、12%；

基于 2019 年夏季邯郸人为源 VOCs 分组分排放清单，得到如图 3-22 所示人为源 VOCs 对 O₃ 生成潜势的源贡献率。由图 3-22 可见，对 O₃ 生成贡献率

最高为道路移动源占 26%，其次是表面喷涂、生物质露天焚烧、生物质燃料燃烧、非道路移动源等，分别贡献 18%、12%、8%、8%。

图 3-23 给出了邯郸夏季 VOCs 物种对 O₃ 生成贡献前的 10 种 VOCs 物种以及其来源构成。由图 3-23 可见，对 O₃ 生成贡献前 10 的物种依次为乙烯、间/对-二甲苯、甲醛、甲苯、丙烯、乙醛、1,2,4-三甲苯、邻-二甲苯、顺-2-丁烯、乙苯，其 O₃ 生成潜势分别为 2.1 万吨、1.7 万吨、1.6 万吨、1.5 万吨、1.3 万吨、1.0 万吨、0.9 万吨、0.7 万吨、0.7 万吨、0.5 万吨，占夏季总 OFP 的比例依次为 10.56%、8.79%、7.93%、7.76%、6.76%、5.02%、4.64%、3.63%、3.46%、2.55%。

图 3-24 进一步给出 2019 年夏季邯郸人为源 VOCs 贡献臭氧生成潜势前 10 物种的二级源贡献。

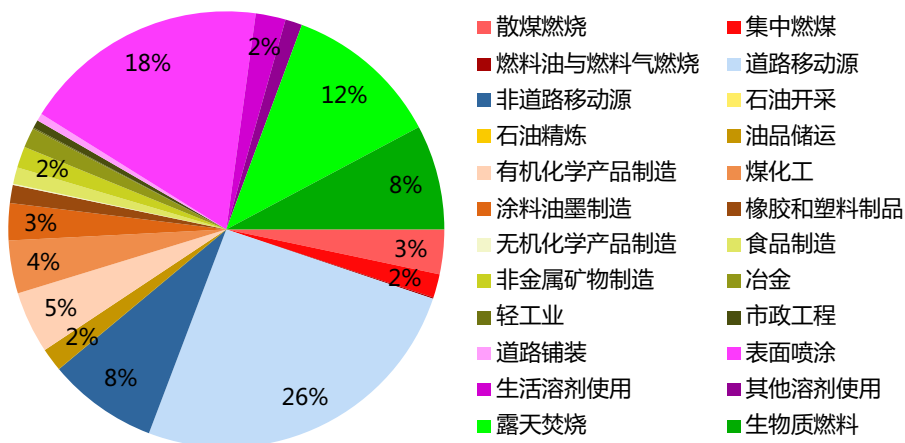


图 3-22 2019 年夏季邯郸人为源 VOCs 臭氧生成潜势二级源贡献

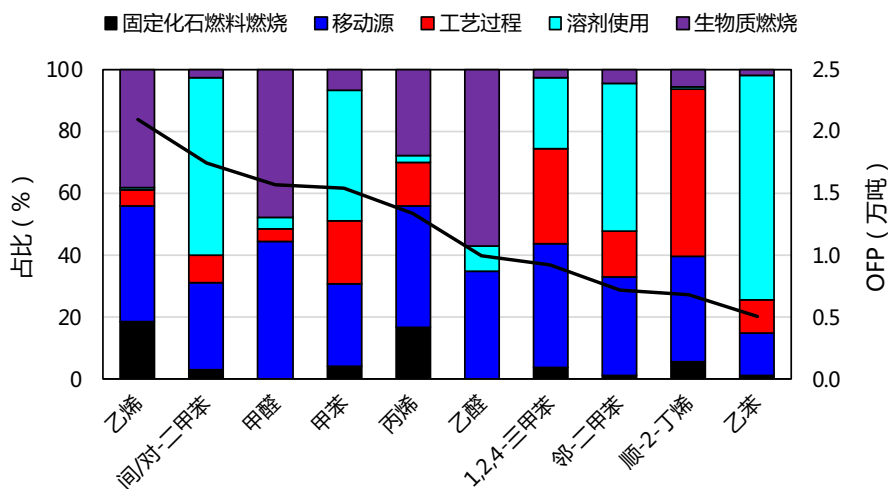


图 3-23 2019 年夏季邯郸人为源 VOCs 贡献臭氧生成潜势前 10 物种一级源贡献

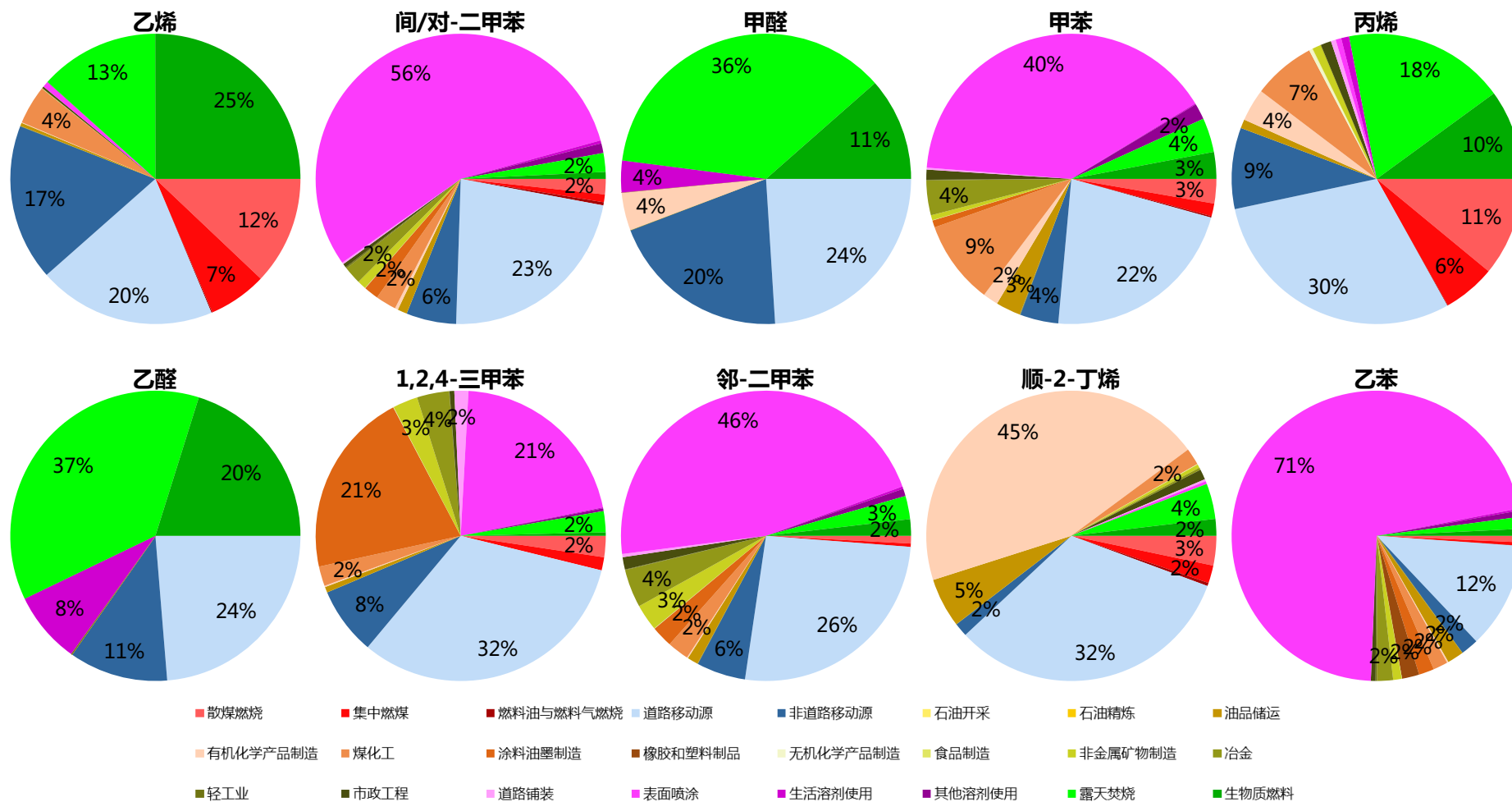


图 3-24 2019 年夏季邯郸人为源 VOCs 贡献臭氧生成潜势前 10 物种的二级源贡献

(3) 衡水

2019 年夏季衡水人为源 VOCs 排放的化学组成见图 3-25，从图中可以看出，烷烃是衡水人为源 VOCs 的主要组成部分，其占衡水人为源 VOCs 排放总量的 27.47%；其次 OVOCs 和芳香烃的排放量也较大，分别占石家庄人为源 VOCs 排放总量的 26.47%和 22.88%；烯烃和卤代烃的排放量分别占人为源 VOCs 排放总量的 11.83%和 3.38%，炔烃占 2.41%，其他 VOCs 排放量占 5.55%。

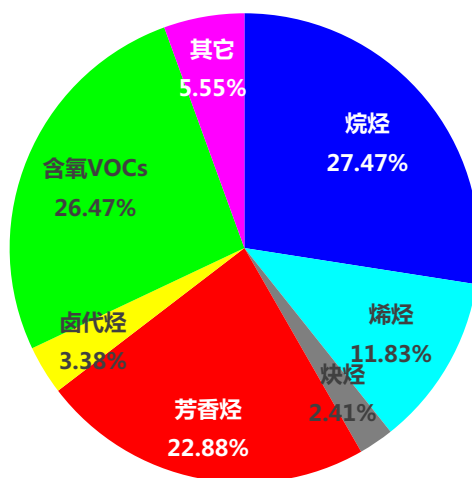


图 3-25 2019 年夏季衡水人为源 VOCs 排放化学组成

进一步统计研究结果发现。烷烃主要来源于溶剂使用和道路移动源，其贡献率分别为 22%和 21%，涂料油墨制造贡献了 13%；烯烃则来源于道路移动源和生物质燃料燃烧源，其贡献最率均为 23%，其次为散煤燃烧、非道路移动源、生物质燃料燃烧，分别贡献了 11%、10%、9%；芳香烃来源于道路移动源，其贡献率为 25%，其次为橡胶和塑料制品制造、表面喷涂、生物质燃料燃烧、涂料油墨制造，分别贡献了 11%、9%、9%、8%；含氧 VOCs 来源于有机化学产品制造，贡献率为 45%，其次为道路移动源、生物质露天焚烧、生物质燃料燃烧，分别贡献了 11%、10%、10%。

基于 2019 年夏季衡水人为源 VOCs 分组分排放清单，得到臭氧生成 OFP 的级源贡献，如图 3-26 所示。显然，对 O₃ 生成潜势贡献最大的是道路移动源，贡献率达到 25%，其次是生物质燃料燃烧、生物质露天焚烧、非道路移动源等，分别贡献 15%、10%、9%。

图 3-27 给出了衡水夏季对 O₃ 生成潜势 OFP 贡献前 10 种 VOCs 物种以及其来源构成，前 10 物种依次为乙烯、甲醛、丙烯、甲苯、乙醛、间/对-二甲苯、1,2,4-三甲苯、顺-2-丁烯、邻-二甲苯、1-丁烯，其 OFP 依次为 1.1 万吨、0.7 万吨、0.7 万吨、0.5 万吨、0.5 万吨、0.5 万吨、0.4 万吨、0.3 万吨、0.2 万吨、0.2 万吨，占夏季总 OFP 的比例依次为 13.93%、8.57%、8.43%、5.93%、5.71%、5.59%、4.40%、3.70%、2.77%、2.65%。

图 3-28 进一步给出 2019 年夏季衡水人为源 VOCs 贡献臭氧生成潜势前 10 物种的二级源贡献。

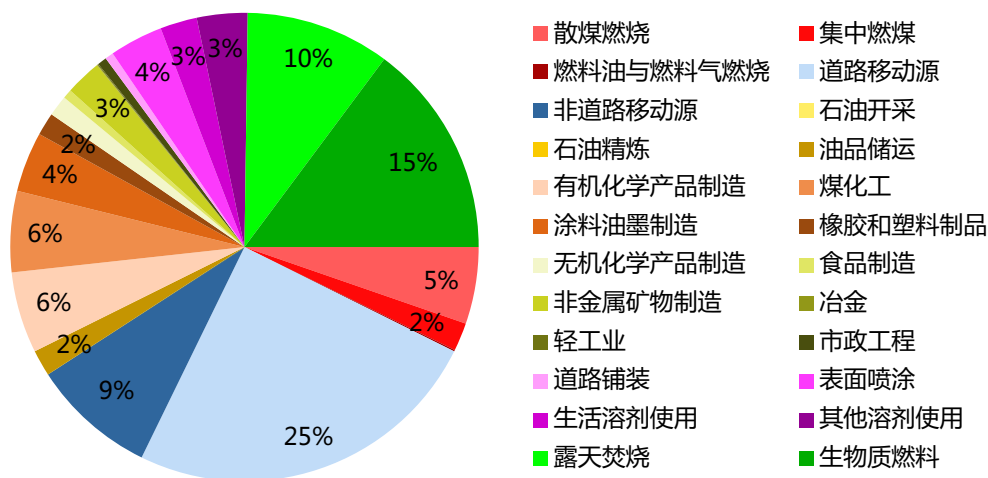


图 3-26 2019 年夏季衡水人为源 VOCs 臭氧生成潜势二级源贡献

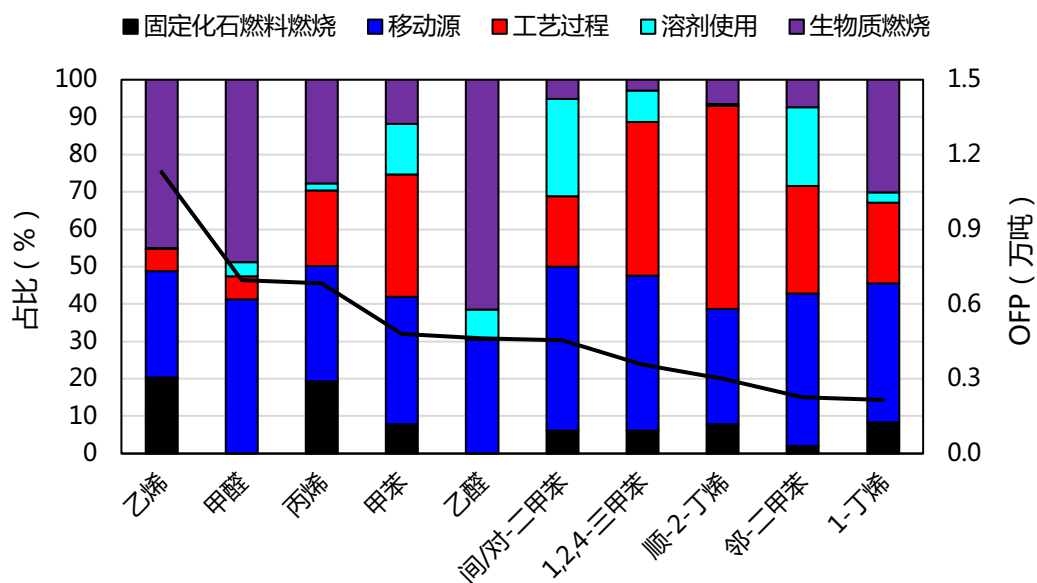


图 3-27 2019 年夏季衡水人为源 VOCs 贡献臭氧生成潜势前 10 物种一级源贡献

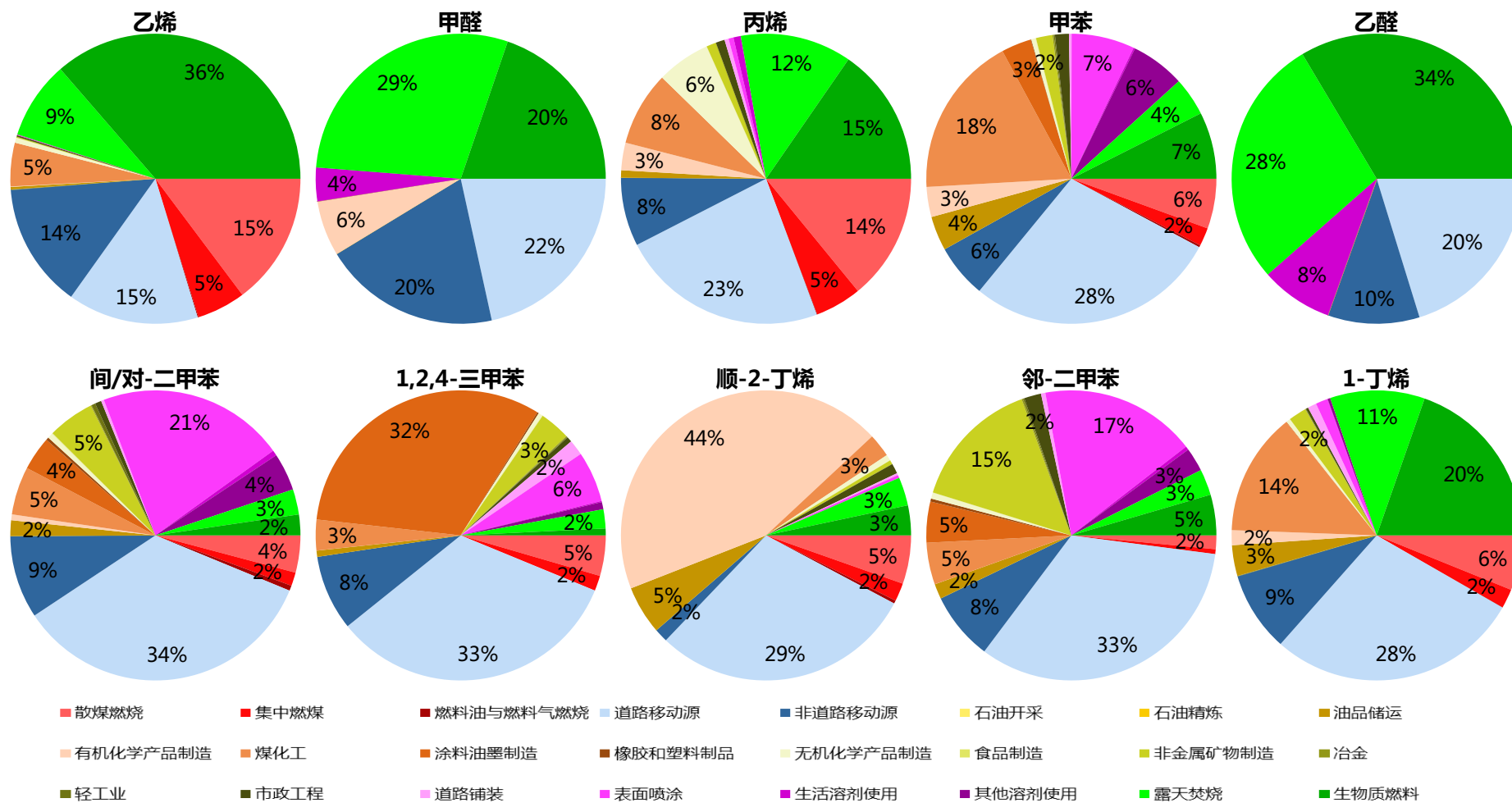


图 3-28 2019 年夏季衡水人为源 VOCs 贡献臭氧生成潜势前 10 物种的二级源贡献

3.5 各市控制 O₃ 生成的人为源 VOCs 关键物种和关键源

根据市级 2019 年夏季人为源 VOCs 物种和排放源对臭氧生成潜势贡献的大小,筛选出各城市夏季实现有效降低臭氧生成的关键控制物种和关键控制的排放源,结果列于表 3-2 所示。

表 3-2 河北省 11 个城市基于人为源 VOCs 夏季 OFP 的优控物种和排放源

序号	基于 OFP 的夏季人为源 VOCs	
	关键控制物种	关键控制源
石家庄市	乙烯、甲醛、丙烯、苯乙烯、甲苯、1,2,4-三甲基苯、间/对-二甲苯、顺-2-丁烯、间-乙基甲苯	道路移动源、非道路移动源、橡胶和塑料制品、涂料油墨制造、有机化学产品制造、表面喷涂、秸秆露天焚烧与生物质燃料燃烧、石油精炼
唐山市	甲苯、间/对-二甲苯、乙烯、丙烯	钢结构喷涂、小客车、炼焦、农用机械
廊坊市	1,2,4-三甲基苯、间/对-二甲苯、乙烯、甲苯、甲醛、丙烯、间-乙基甲苯	小客车、涂料、农用机械、家具喷涂
保定市	乙烯、甲醛、丙烯、间/对-二甲苯、甲苯、乙醛	小客车、秸秆露天焚烧、秸秆燃料、农用机械、工业散煤、炼焦
沧州市	乙烯、丙烯、甲醛、甲苯、间/对-二甲苯、1,2,4-三甲基苯	小客车、秸秆露天焚烧、石油精炼、钢结构喷涂、农用机械、秸秆燃料、炼焦
衡水市	乙烯、甲醛、丙烯、甲苯、乙醛、间/对-二甲苯、1,2,4-三甲基苯、顺-2-丁烯、邻-二甲苯、1-丁烯	道路移动源(小客车)、秸秆燃料、秸秆露天焚烧、非道路移动源(农用机械)、煤化工(炼焦)、有机化学品制造、表面喷涂、涂料油墨制造、工业散煤
邢台市	乙烯、丙烯、甲醛、间/对-二甲苯、甲苯、1,2,4-三甲基苯、乙醛	小客车、建筑材料、秸秆燃料、秸秆露天焚烧、炼焦、农用机械

基于 OFP 的夏季人为源 VOCs		
序号	关键控制物种	关键控制源
邯郸市	乙烯、间/对-二甲苯、甲醛、甲苯、丙烯、乙醛、1,2,4-三甲苯、邻-二甲苯、顺-2-丁烯、乙苯	道路移动源、表面喷涂、秸秆露天焚烧、秸秆燃料、非道路移动源(农业机械)、有机化学产品制造、煤化工、涂料油墨制造、散煤燃烧
秦皇岛	乙烯、甲醛、丙烯、甲苯、间/对-二甲苯、1,2,4-三甲基苯、乙醛	小客车、秸秆露天焚烧、秸秆燃料、化学原料药制造、农业机械
张家口	乙烯、甲醛、丙烯、甲苯、间/对-二甲苯、乙醛	小客车、秸秆露天焚烧、秸秆燃料、农业机械、炼焦
承德	乙烯、甲醛、丙烯、甲苯、间/对-二甲苯、乙醛	小客车、秸秆露天焚烧、秸秆燃料、钢结构喷涂、农业机械

第4章 近年河北省 VOCs 污染特征

4.1 2019 年/2020 年河北省 VOCs 污染水平及臭氧生成潜势 时空分布变化特征

4.1.1 VOCs 污染水平时空分布变化特征

2019 年-2020 年秦皇岛市 VOCs 数据未联网，本报告不含秦皇岛市）。

2019 年-2020 年，河北省 VOCs 污染中心始终位于廊坊和石家庄-邢台-邯郸一线，石家庄污染水平最高，如图 4-1 所示。

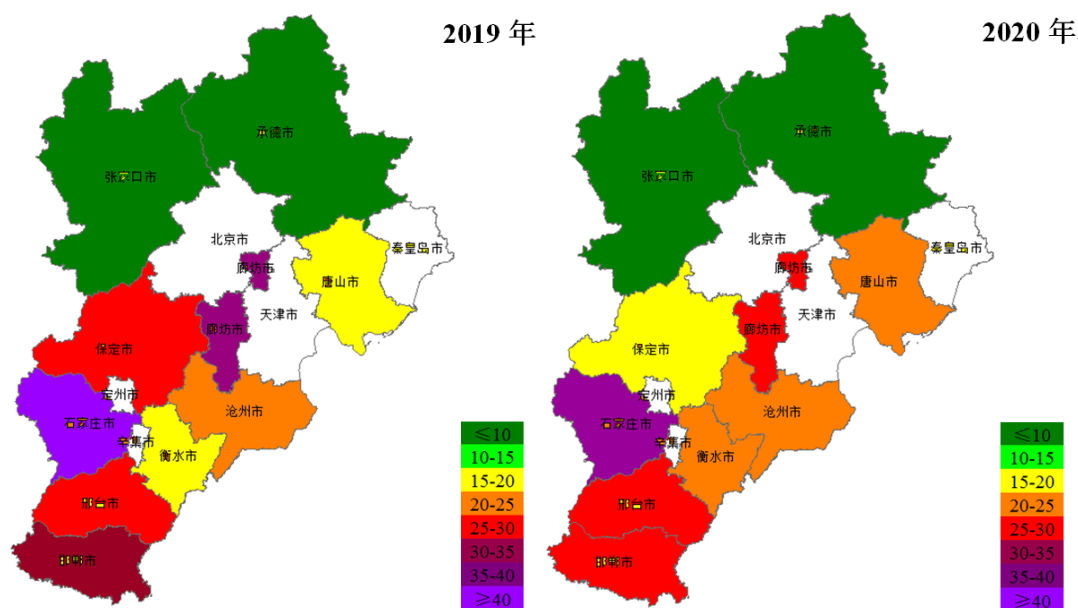


图 4-1 2019 年/2020 年 VOCs 污染分布图

2020 年，河北省平均 TVOC 浓度为 22.8ppb，各市 TVOC 平均浓度在 9.8ppb（张家口）-35.4ppb（石家庄）之间，偏西北部的张家口、承德、保定 VOCs 污染水平较低，分别为 9.8ppb、9.9ppb、18.4ppb；偏东部的唐山、沧州、衡水污染水平居中，分别为 24.1ppb、23.3ppb、24.4ppb；中部的廊坊和南部的石家庄、邢台、邯郸污染水平最高，分别为 27.5ppb、35.4ppb、26.2ppb、28.7ppb。

2020年河北省平均TVOC浓度较2019年的26.0ppb下降12.3%，其中中南部的石家庄、保定、廊坊、邢台、邯郸TVOC浓度较2019年同比下降，下降率分别为39.3%、37.5%、29.7%、11.9%、12.6%，其中石家庄、保定下降率最高；北部张家口、承德和偏东部的唐山、沧州、衡水TVOC浓度较2019年同比上升，上升率分别为20.7%、86.2%、54.9%、6.5%、24.7%，其中承德、唐山上升率最高，见图4-2。

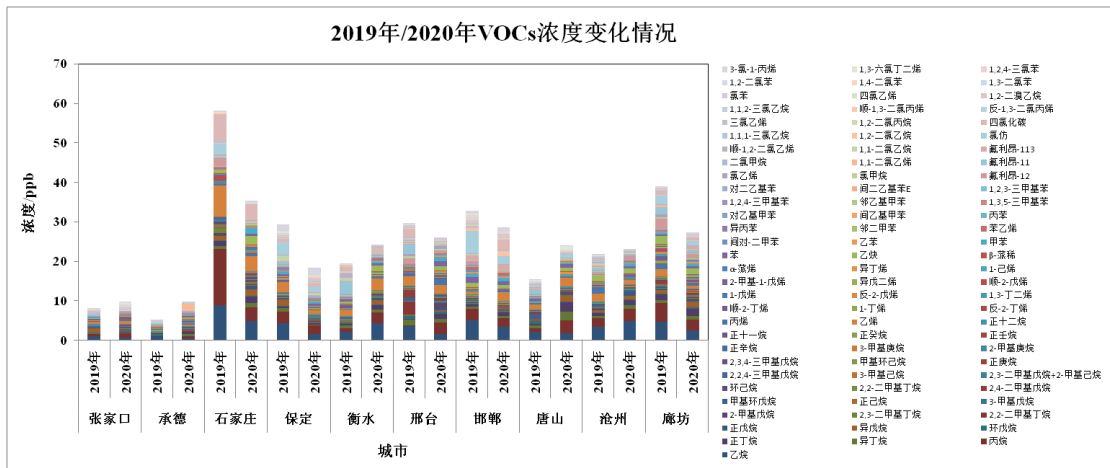


图 4-2 2019 年/2020 年河北省各市 VOCs 浓度对比情况

2019年-2020年，各市VOCs主要组分中，烷烃、卤代烃浓度最高，张家口、承德、石家庄、邢台、唐山、沧州、廊坊烷烃在VOCs组成中占绝对优势，保定、衡水、邯郸卤代烃与烷烃占比相当，芳香烃、烯烃在VOCs组成中浓度居中，炔烃浓度最低。

如图4-3所示，对2019年-2020年各市VOCs主要组分的分析结果显示，在2020年TVOC浓度同比下降的城市中，2020年烷烃、卤代烃浓度均有不同程度下降，且其下降对城市TVOC浓度的降低贡献作用较大，其中石家庄、保定、邢台、邯郸、廊坊2020年烷烃和卤代烃贡献率分别为60.0%和36.3%、49.5%和28.1%、124.7%和183.5%、41.9%和61.1%、27.1%和38.6%。臭氧生成反应活性较高的烯烃和芳香烃浓度则存在不同程度的上升或下降，2020年石家庄、保定、廊坊烯烃浓度同比下降，贡献率分别为18.8%、18.9%、39.6%，邢台、邯郸烯烃浓度同比上升；2020年保定、邯郸芳香烃浓度同比略有下降，贡献率分别为

4.3%、25.4%，石家庄、邢台、廊坊芳香烃浓度同比上升。邢台 TVOC 浓度同比下降，但由于其烯烃、芳香烃浓度同比上升，造成其臭氧生成潜势显著升高。

2020 年 TVOC 浓度同比上升的城市中，张家口、承德各类主要组分浓度均有不同程度上升，其中对 TVOC 浓度的升高贡献最大的是卤代烃，贡献率分别为 45.3%、31.3%，烯烃的贡献率分别为 34.3%、18.7%，芳香烃的贡献率分别为 15.8%、23.4%。衡水、唐山仅有卤代烃浓度同比下降，其他主要组分浓度同比上升，上升幅度由最大的是烷烃，其次是烯烃。沧州 TVOC 浓度同比下降，但下降幅度较大的是臭氧生成反应活性较低的烷烃，活性较高的烯烃和卤代烃同比下降，造成其 TVOC 臭氧生成潜势反而有所降低。

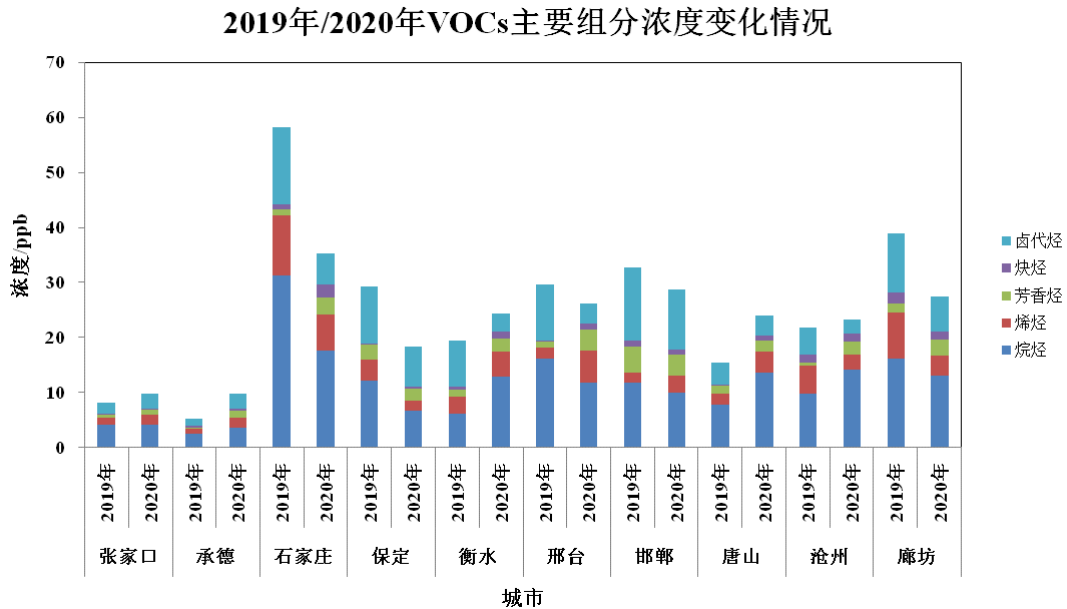


图 4-3 2019 年/2020 年河北省各市 VOCs 主要组分分布情况

图 4-4 为 2019 和 2020 年 VOCs 组分构成比，与 2019 年相比，2020 年河北省大气 VOCs 仍以 C2-C5 组分为主，其中浓度最高的前十位物种分别是：乙烷 2.7ppb、在 TVOC 中占比为 11.8%，丙烷 2.4ppb、占比 10.7%，乙烯 1.7ppb、占比 7.5%，正丁烷 1.2ppb、占比 5.4%，乙炔 1.0ppb、占比 4.5%，四氯化碳 1.0ppb、占比 4.4%，异丁烷 0.8ppb、占比 3.6%，异戊烷 0.8ppb、占比 3.4%，甲苯 0.7ppb、占比 2.9%，丙烯 0.6ppb、占比 2.8%，浓度前十位物种在 TVOC 中总占比 57.0%。

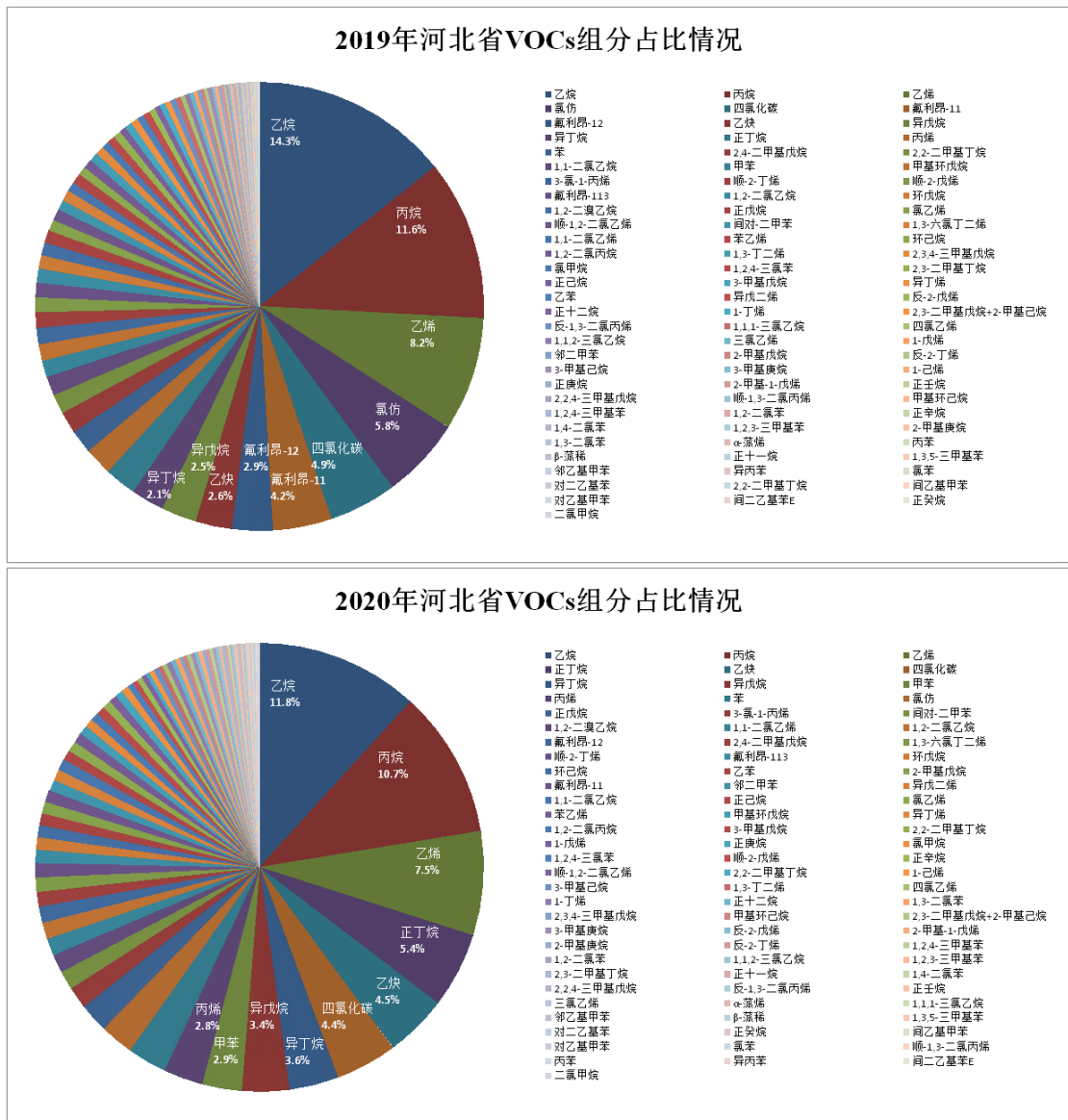


图 4-4 2019 年/2020 年河北省 VOCs 组分占比图

4.1.2 VOCs 臭氧生成潜势时空分布变化特征

(2019 年-2020 年秦皇岛市 VOCs 数据未联网，本项目不含秦皇岛市)

VOCs 作为对流层臭氧的重要前体物，其光化学反应活性和臭氧生成潜势 (maximum ozone formation potential, OFP) 研究受到广泛重视，研究表明苯系物和烯烃的臭氧生成潜势显著高于烷烃、卤代烃。VOCs 的臭氧生成能力取决于含碳链浓度、动力学活性和机理活性，通常采用 VOCs 与·OH 的反应速率作为 VOCs 的动力学活性，采用 VOCs 被氧化为过氧自由基后与 NO 的反应速率来表征其机

制活性。报告采用最大增量活性因子（Maximum incremental reactivity, MIR）来表征 VOCs 的臭氧生成潜力。

臭氧生成潜势的计算方法如下：

$$OFP_i = MIR_i \times [VOCs]_i \quad (4-1)$$

式中， OFP_i 为组分 i 的最大臭氧生成潜势量，单位为 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ； MIR_i 为组分 i 的最大增量反应活性； $[VOCs]_i$ 为各组分 i 的质量浓度，单位为 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

图 4-5 比较了 2019 年/2020 年河北省各市 VOCs 臭氧生成潜势。

2020 年，河北省平均 TVOC 臭氧生成潜势为 $152.6\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，各市 TVOC 平均臭氧生成潜势在 $77.8\mu\text{g}/\text{m}^3$ （张家口）- $232.4\mu\text{g}/\text{m}^3$ （邢台）之间，与浓度分布特征相似，臭氧生成潜势的分布同样呈现偏西北部的张家口、承德、保定较低，分别为 $77.8\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $106.1\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $113.1\mu\text{g}/\text{m}^3$ ；偏东部的唐山、沧州、衡水污染水平居中，分别为 $131.1\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $147.0\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $152.6\mu\text{g}/\text{m}^3$ ；中部的廊坊和南部的石家庄、邢台污染水平最高，分别为 $194.0\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $221.5\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $232.4\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，邯郸 VOCs 主要组分中，臭氧生成反应活性较低的卤代烃、烷烃占比较高，其次是芳香烃，活性较高的烯烃占比仅高于炔烃，因此其臭氧生成潜势相对较低，在河北省重点城市中仅占中等水平，为 $150.2\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

2020 年河北省平均 TVOC 臭氧生成潜势与 2019 年的 $151.0\mu\text{g}/\text{m}^3$ 基本持平，其中保定、廊坊、石家庄、沧州、邯郸 TVOC 臭氧生成潜势较 2019 年同比下降，下降率分别为 34.8%、33.5%、13.7%、7.9%、6.1%，其中保定、廊坊下降率最高；承德、张家口、邢台、唐山、衡水 TVOC 臭氧生成潜势较 2019 年同比上升，上升率分别为 166.6%、60.3%、41.8%、41.7%、23.6%，其中承德、张家口上升率最高。

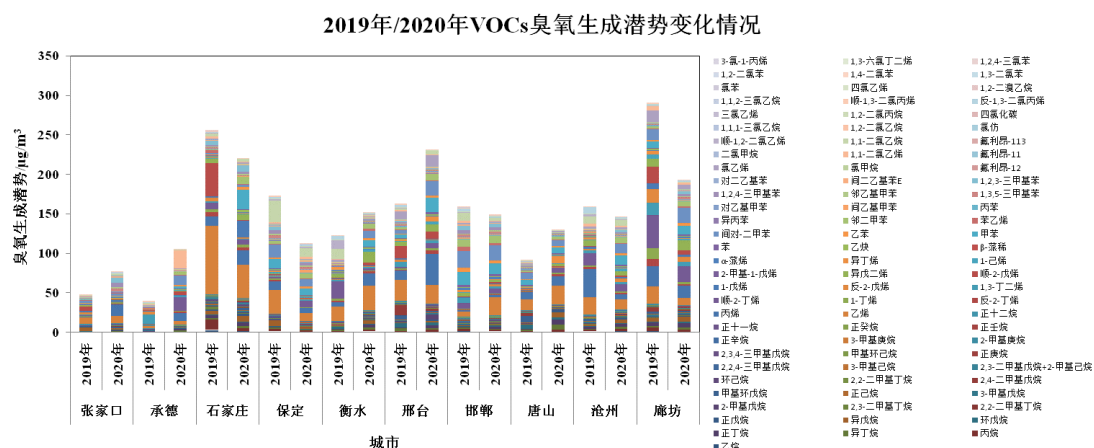


图 4-5 2019 年/2020 年河北省各市 VOCs 臭氧生成潜势对比图

2019 年-2020 年, 各市 VOCs 主要组分臭氧生成潜势占比中, 烯烃占比较高, 炔烃占比最低。张家口、承德、石家庄、衡水、廊坊烯烃在 TVOC 臭氧生成潜势组成中占绝对优势; 邯郸芳香烃在 TVOC 臭氧生成潜势组成中占绝对优势, 保定芳香烃臭氧生成潜势略高于烯烃; 唐山 2019 年烷烃、烯烃、芳香烃臭氧生成潜势相当, 2020 年烯烃臭氧生成潜势占比明显高于烷烃、芳香烃; 沧州 2019 年烯烃臭氧生成潜势占绝对优势, 2020 年烯烃略高于芳香烃; 邢台 2019 年烷烃、烯烃臭氧生成潜势相当, 2020 年烯烃臭氧生成潜势占比明显高于其它组分。

图 4-6 所示 2019 年-2020 年各市 VOCs 主要组分臭氧生成潜势, 结果显示, 在 2020 年 TVOC 臭氧生成潜势同比下降的城市中, 石家庄、沧州、廊坊烯烃浓度及其臭氧生成潜势的下降对 TVOC 臭氧生成潜势的降低贡献最大, 贡献率分别为 189.8%、354.2%、110.8%, 芳香烃浓度及其臭氧生成潜势的升高对 TVOC 臭氧生成潜势的降低产生负贡献, 贡献率分别为 107.4%、302.2%、25.6%。保定除炔烃臭氧生成潜势有 $0.1\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的升高外, 其他主要组分臭氧生成潜势均有不同程度的下降, 烷烃、烯烃、芳香烃、卤代烃对 TVOC 臭氧生成潜势降低的贡献率分别为 15.7%、40.3%、17.4%、26.8%。邯郸芳香烃、卤代烃臭氧生成潜势的下降对 TVOC 臭氧生成潜势的降低贡献最大, 贡献率分别为 120.6%、121.9%, 烷烃、烯烃臭氧生成潜势的升高对 TVOC 臭氧生成潜势的降低产生负贡献, 贡献率分别为 14.8%、129.1%。

2020 年 TVOC 臭氧生成潜势同比上升的城市中, 张家口、承德各类主要组分臭氧生成潜势均有不同程度上升, 其中张家口对 TVOC 臭氧生成潜势的升高

贡献最大的是芳香烃、烯烃，贡献率分别为 61.3%、30.8%；承德对 TVOC 臭氧生成潜势的升高贡献最大的是芳香烃、烯烃、卤代烃，贡献率分别为 32.9%、30.4%、29.9%。衡水、唐山仅有卤代烃臭氧生成潜势有一定的下降，对其 TVOC 臭氧生成潜势的升高产生负贡献，贡献率分别为 95.9%、7.0%，其他主要组分臭氧生成潜势有不同程度升高，其中衡水对 TVOC 臭氧生成潜势的升高贡献最大的是芳香烃、烯烃、烷烃，贡献率分别为 92.0%、56.1%、44.8%，唐山对 TVOC 臭氧生成潜势的升高贡献最大的是烯烃、烷烃，贡献率分别为 79.7%、20.9%。邢台除烷烃臭氧生成潜势下降，对 TVOC 臭氧生成潜势的升高产生 45.1%的负贡献率外，其他主要组分臭氧生成潜势均有不同程度的升高，其中烯烃、芳香烃对 TVOC 臭氧生成潜势的升高贡献率最大，分别为 88.1%、53.1%。

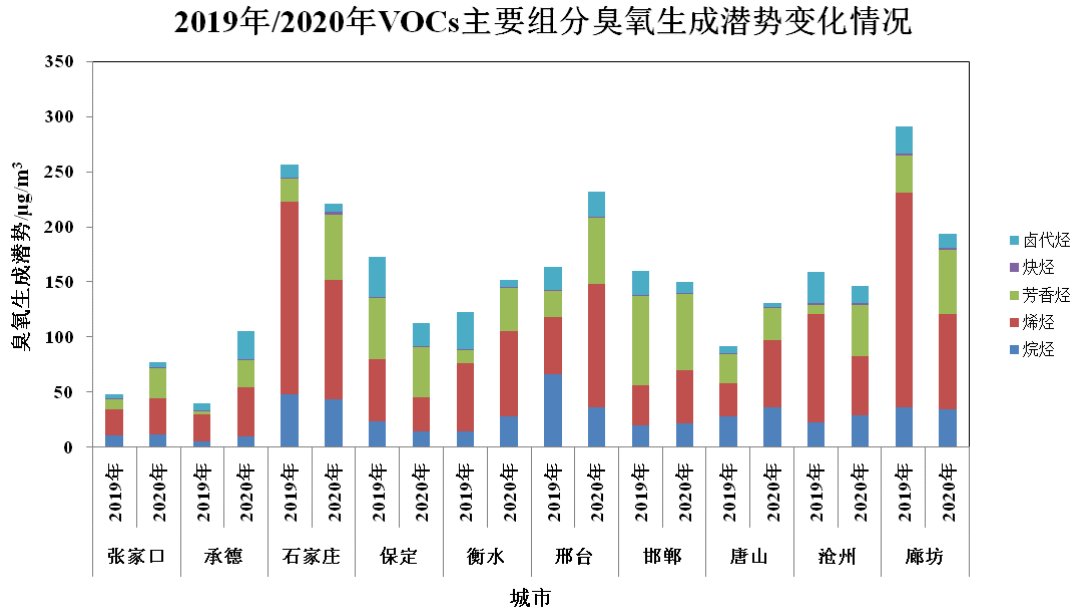
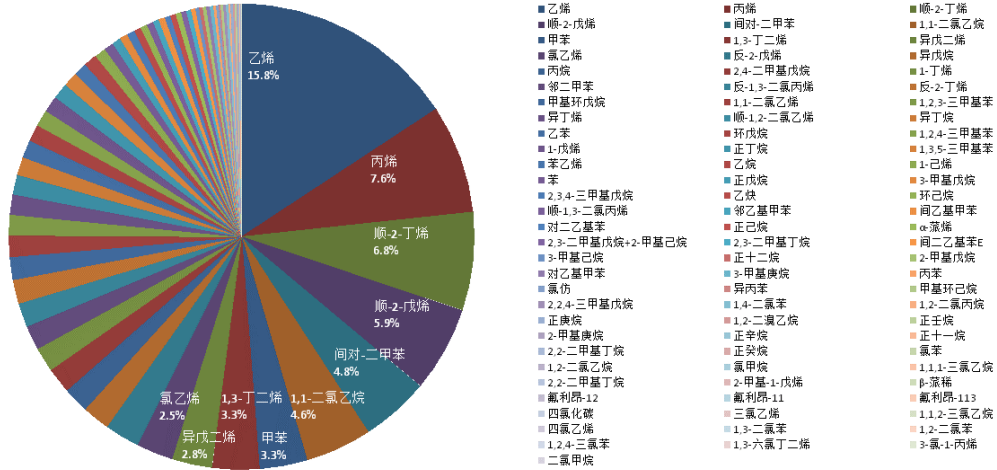


图 4-6 2019 年/2020 年河北省各市 VOCs 主要组分臭氧生成潜势分布情况

2020 年河北省大气 VOCs 中臭氧生成潜势最高的前十位物种分别是：乙烯 $18.9\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、在 TVOC 臭氧生成潜势中占比为 12.4%，丙烯 $14.0\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、占比 9.2%，间对-二甲苯 $11.4\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、占比 7.5%，甲苯 $10.6\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、占比 6.9%，顺-2-丁烯 $8.4\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、占比 5.5%，邻二甲苯 $6.6\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、占比 4.3%，异戊二烯 $5.8\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、占比 3.8%，正丁烷 $3.5\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、占比 2.3%，1,1-二氯乙烷 $3.5\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、占比 2.3%，1,1-二氯乙烯

3.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、占比 2.3%，臭氧生成潜势前十位物种在 TVOC 臭氧生成潜势中总占比 56.5%，减少优势物种的源排放对于控制臭氧污染具有关键作用，详见图 4-7。

2019年河北省VOCs组分臭氧生成潜势占比情况



2020年河北省VOCs组分臭氧生成潜势占比情况

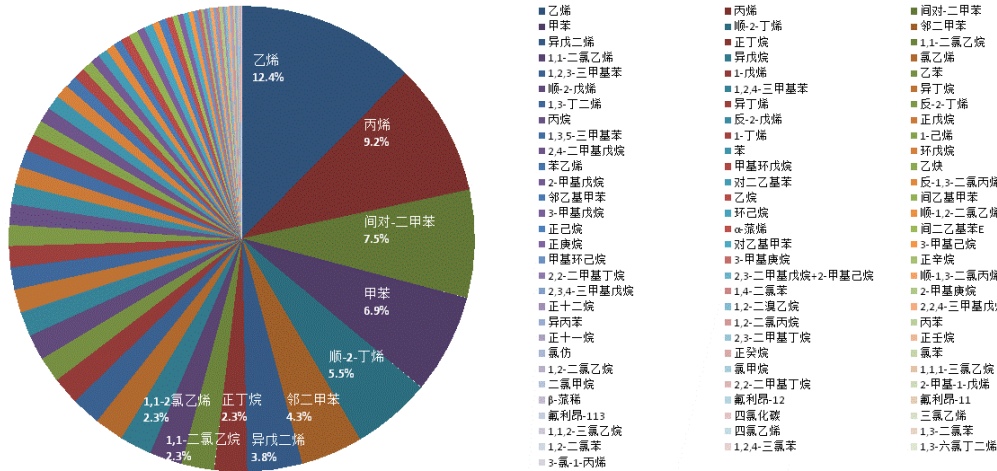


图 4-7 2019 年/2020 年河北省 VOCs 组分臭氧生成潜势占比图

4.2 2019 年/2020 年重点城市 VOCs 污染水平及臭氧生成潜势变化特征

4.2.1 石家庄市

图 4-8 给出了 2019 年/2020 年石家庄市 VOCs 组分浓度季节变化情况。

石家庄 2020 年平均 TVOC 浓度为 35.4ppb, 较 2019 年的 58.4ppb 下降 39.3%。其中春季 (1-3 月) 平均 TVOC 浓度为 46.2ppb; 夏季 (4-6 月) 平均 TVOC 浓度为 27.9ppb, 与 2019 年同期的 27.7ppb 基本持平; 秋季 (7-9 月) 平均 TVOC 浓度为 29.6ppb, 较 2019 年同期的 61.5ppb 下降 52.0%; 冬季 (10-12 月) 平均 TVOC 浓度为 38.1ppb, 较 2019 年同期的 75.7ppb 下降 49.7%。

2020 年石家庄大气 VOCs 浓度最高的前十位物种分别是: 乙烷 4.9ppb、四氯化碳 3.9ppb、乙烯 3.8ppb、丙烷 3.6ppb、乙炔 2.3ppb、正丁烷 1.8ppb、异戊烷 1.7ppb、甲苯 1.5ppb、异丁烷 1.0ppb、1-戊烯 1.0ppb, 浓度前十位物种在 TVOC 中总占比 71.6%

2020 年春季石家庄大气 VOCs 浓度最高的前十位物种分别是: 四氯化碳 12.2ppb、乙烷 8.2ppb、乙烯 5.5ppb、丙烷 3.9ppb、乙炔 3.4ppb、正丁烷 1.6ppb、甲苯 1.5ppb、异戊烷 0.9ppb、丙烯 0.9ppb、异丁烷 0.8ppb, 浓度前十位物种在 TVOC 中总占比 84.2%。

2020 年夏季石家庄大气 VOCs 浓度最高的前十位物种分别是: 四氯化碳 3.2ppb、乙烷 2.9ppb、乙烯 2.0ppb、丙烷 1.7ppb、异戊烷 1.4ppb、乙炔 1.3ppb、正丁烷 1.3ppb、甲基环戊烷 1.1ppb、甲苯 1.1ppb、1-戊烯 0.9ppb, 浓度前十位物种在 TVOC 中总占比 60.6%。

2020 年秋季石家庄大气 VOCs 浓度最高的前十位物种分别是: 乙烯 3.1ppb、乙烷 2.8ppb、丙烷 2.8ppb、异戊烷 2.5ppb、乙炔 2.1ppb、正丁烷 2.1ppb、1-戊烯 1.5ppb、甲苯 1.3ppb、环己烷 1.1ppb、异丁烷 1.1ppb, 浓度前十位物种在 TVOC 中总占比 69.2%。

2020 年冬季石家庄大气 VOCs 浓度最高的前十位物种分别是: 丙烷 5.9ppb、乙烷 5.7ppb、乙烯 4.5ppb、乙炔 2.5ppb、正丁烷 2.2ppb、甲苯 2.1ppb、异戊烷

1.9ppb、异丁烷 1.3ppb、苯 1.2ppb、正戊烷 1.1ppb，浓度前十位物种在 TVOC 中总占比 75.1%。

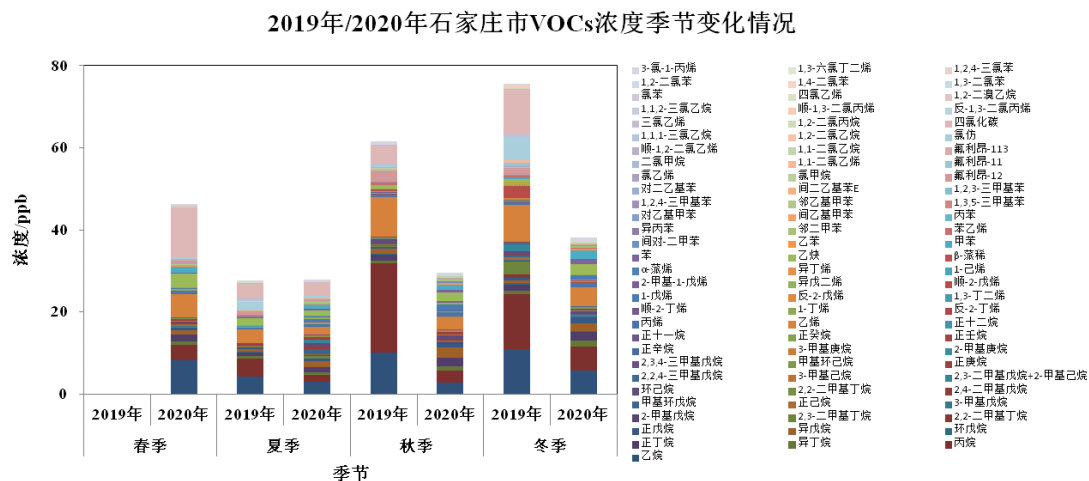


图 4-8 2019 年/2020 年石家庄市 VOCs 组分浓度季节变化情况

石家庄 2020 年平均 TVOC 浓度下降主要发生在秋季和冬季，其中烷烃、烯烃、卤代烃平均浓度在秋季和冬季同比下降率分别为 58.6%、42.6%、85.9%和 42.2%、46.5%、92.3%，其浓度下降对秋季和冬季 TVOC 浓度降低的贡献率分别为 70.2%、15.8%、26.2%和 41.7%、17.8%、54.4%；芳香烃、炔烃浓度同比上升，对 TVOC 浓度下降产生负影响，详见图 4-9 所示。

石家庄市 TVOC1-12 月平均浓度分别为 69.0ppb、38.9ppb、30.7ppb、20.9ppb、25.2ppb、37.5ppb、28.9ppb、31.2ppb、28.5ppb、32.0ppb、41.0ppb、41.2ppb，呈现夏秋低、春冬高的分布规律，2020 年 TVOC 月度平均浓度出现显著下降主要发生在 7 月份以后，其中主要是由烷烃中的乙烷和丙烷、烯烃中的乙烯、卤代烃中的四氯化碳和氯仿的显著下降引起，如图 4-10 所示。

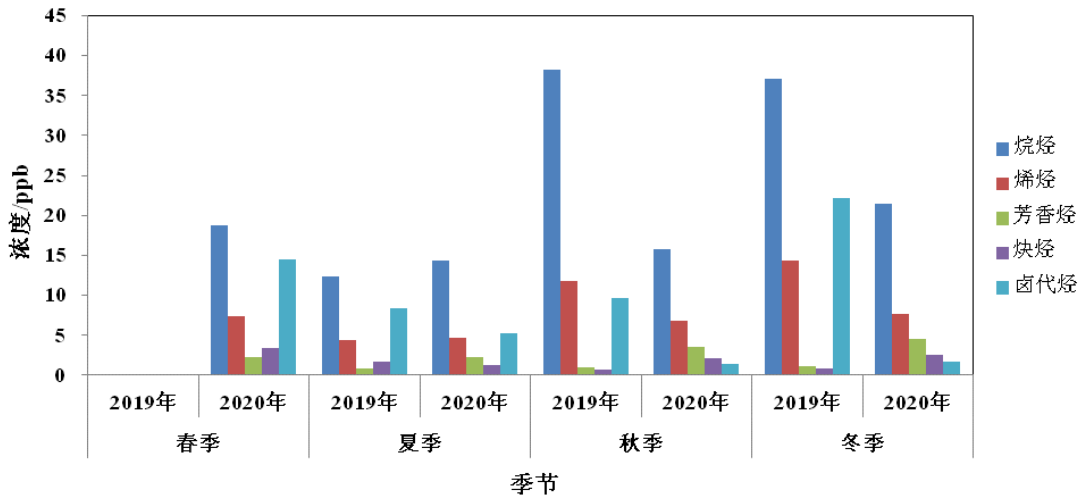


图 4-9 2019 年/2020 年石家庄市 VOCs 主要组分浓度季节变化情况

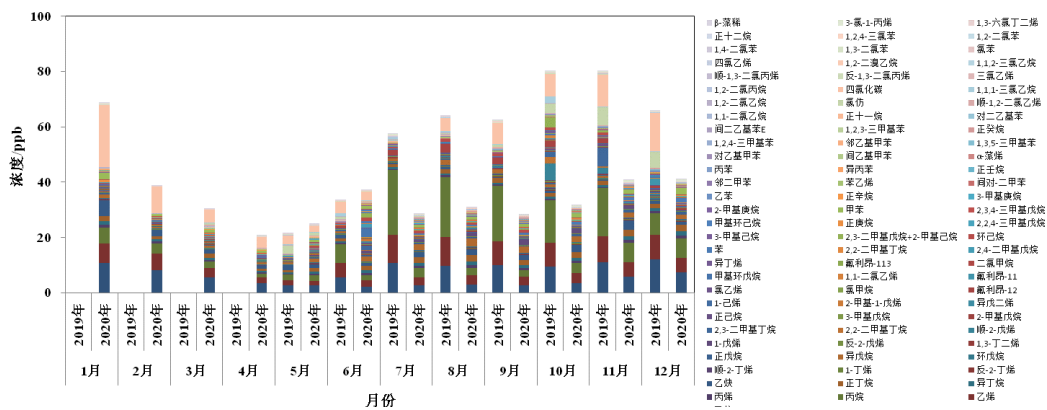


图 4-10 2019 年/2020 年石家庄市 VOCs 组分浓度月变化情况

4.2.2 衡水市

图 4-11 显示出 2019 年/2020 年衡水市 VOCs 组分浓度季节变化。

衡水 2020 年平均 TVOC 浓度为 24.4ppb，较 2019 年同期的 19.6ppb 上升 24.7%。其中春季（1-3 月）平均 TVOC 浓度为 22.7ppb，较 2019 年同期的 37.1ppb 下降 38.9%；夏季（4-6 月）平均 TVOC 浓度为 21.7ppb，较 2019 年同期的 11.0ppb 上升 98.1%；秋季（7-9 月）平均 TVOC 浓度为 24.8ppb，较 2019 年同期的 10.8ppb 上升 128.9%；冬季（10-12 月）平均 TVOC 浓度为 28.4ppb，较 2019 年同期的 19.4ppb 上升 46.6%。

2020 年衡水大气 VOCs 浓度最高的前十位物种分别是：乙烷 4.4ppb、乙烯 2.8ppb、丙烷 2.6ppb、乙炔 1.4ppb、四氯化碳 1.4ppb、正丁烷 1.3ppb、异戊烷 1.1ppb、异丁烷 0.7ppb、丙烯 0.7ppb、正戊烷 0.6ppb，浓度前十位物种在 TVOC 中总占比 69.7%。

2020 年春季衡水大气 VOCs 浓度最高的前十位物种分别是：乙烷 4.7ppb、丙烷 3.4ppb、乙烯 2.6ppb、氟利昂-11 1.5ppb、正丁烷 1.1ppb、苯 1.1ppb、甲基环戊烷 0.7ppb、异丁烷 0.6ppb、甲苯 0.5ppb、乙炔 0.4ppb，浓度前十位物种在 TVOC 中总占比 73.3%。

2020 年夏季衡水大气 VOCs 浓度最高的前十位物种分别是：四氯化碳 3.8ppb、乙烷 3.1ppb、乙烯 1.7ppb、丙烷 1.6ppb、异戊二烯 1.2ppb、丙烯 1.0ppb、正丁烷 0.9ppb、异丁烷 0.6ppb、乙炔 0.5ppb、异戊烷 0.5ppb，浓度前十位物种在 TVOC 中总占比 68.9%。

2020 年秋季衡水大气 VOCs 浓度最高的前十位物种分别是：乙烷 4.5ppb、乙烯 2.7ppb、异戊烷 2.5ppb、丙烷 2.1ppb、乙炔 2.1ppb、正丁烷 1.5ppb、四氯化碳 1.2ppb、丙烯 1.0ppb、异丁烷 0.9ppb、正戊烷 0.8ppb，浓度前十位物种在 TVOC 中总占比 77.8%。

2020 年冬季衡水大气 VOCs 浓度最高的前十位物种分别是：乙烷 5.5ppb、乙烯 4.1ppb、丙烷 3.3ppb、乙炔 2.6ppb、正丁烷 1.6ppb、异戊烷 0.9ppb、异丁烷 0.9ppb、正戊烷 0.7ppb、苯乙烯 0.7ppb、苯 0.7ppb，浓度前十位物种在 TVOC 中总占比 74.5%。

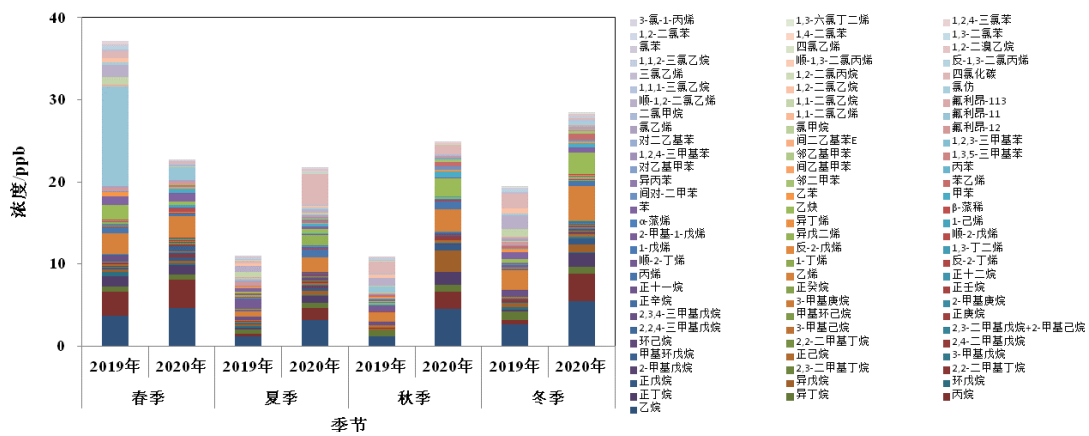


图 4-11 2019 年/2020 年衡水市 VOCs 组分浓度季节变化情况

衡水 VOCs 平均浓度的季节变化如图 4-12 所示，其 VOCs 浓度下降主要发生在春季，夏季、秋季和冬季持续反弹。其中卤代烃春季平均浓度下降幅度最大，较 2019 年同比下降 83.9%，对春季 TVOC 浓度降低的贡献率为 105.9%；卤代烃在冬季有一定程度下降，较 2019 年同比下降 72.2%，对冬季 TVOC 浓度的反弹产生 56.8%的负影响。烷烃浓度在夏季、秋季、冬季均有不同程度的升高，且在 VOCs 各主要组分中上升幅度最大，较 2019 年同比上升率分别为 150.7%、350.3%、120.5%，对夏季、秋季、冬季 TVOC 浓度升高的贡献率分别为 50.6%、77.4%、92.9%。

衡水市 VOCs 浓度的月均变化如图 4-13 所示，TVOC1-12 月平均浓度分别为 36.7ppb、16.8ppb、14.5ppb、10.8ppb、31.4ppb、23.0ppb、28.5ppb、23.4ppb、22.6ppb、20.5ppb、27.8ppb、36.8ppb。1-4 月 TVOC 月均浓度逐月下降，其中氟利昂-11 的大幅下降对春季平均 TVOC 浓度下降贡献最大，另外丙烯、乙炔、2,3,4-三甲基戊烷、1,1-二氯乙烷、顺-1,2-二氯乙烯、1,2-二氯乙烷、四氯化碳等在春季也有明显下降。5-12 月 TVOC 月均浓度逐月上升，其中烷烃中的乙烷、丙烷、正丁烷、正戊烷、异戊烷、2,4-二甲基戊烷，烯烃中的乙烯、丙烯、异戊二烯，以及乙炔、四氯化碳等组分对 TVOC 月均浓度升高贡献较大。

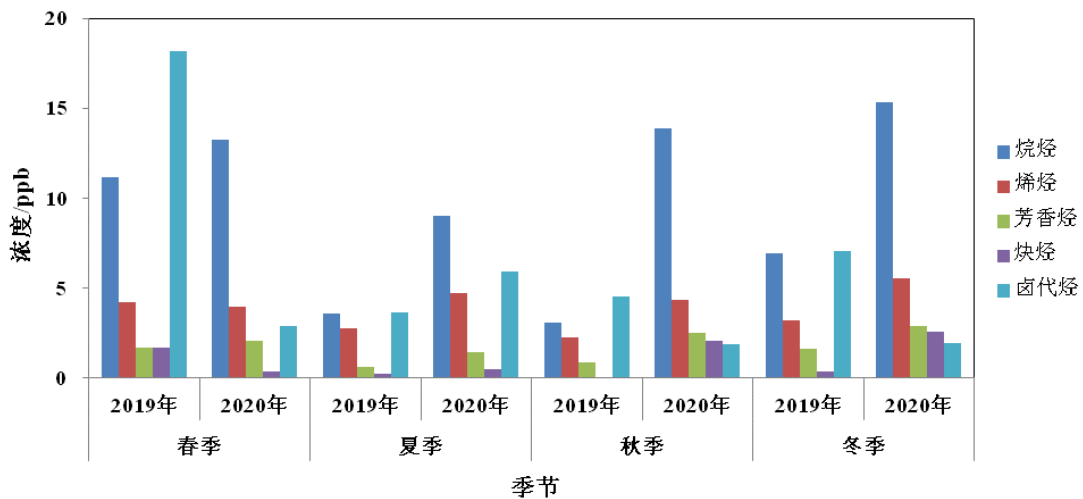


图 4-12 2019 年/2020 年衡水市 VOCs 主要组分浓度季节变化情况

2019年/2020年衡水市VOCs浓度变化情况

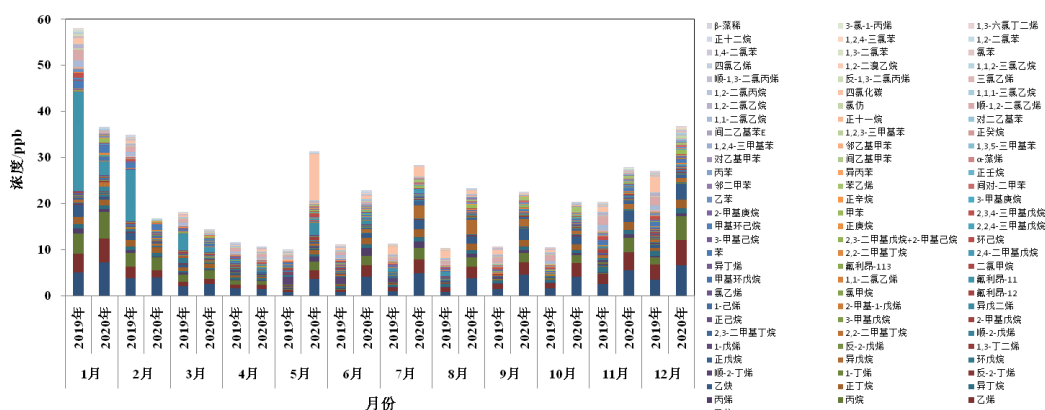


图 4-13 2019 年/2020 年衡水市 VOCs 组分浓度月变化情况

4.2.3 邯郸市

邯郸 2020 年平均 TVOC 浓度为 28.7ppb，较 2019 年同期的 32.8ppb 下降 12.6%。其中春季(1-3 月)平均 TVOC 浓度为 27.8ppb，与 2019 年同期的 27.5ppb 基本持平；夏季(4-6 月)平均 TVOC 浓度为 25.6ppb，较 2019 年同期的 17.2ppb 上升 49.1%；秋季(7-9 月)平均 TVOC 浓度为 25.1ppb，较 2019 年同期的 35.1ppb 下降 28.5%；冬季(10-12 月)平均 TVOC 浓度为 36.2ppb，较 2019 年同期的 55.0ppb 下降 34.2%，见图 4-14 所示。

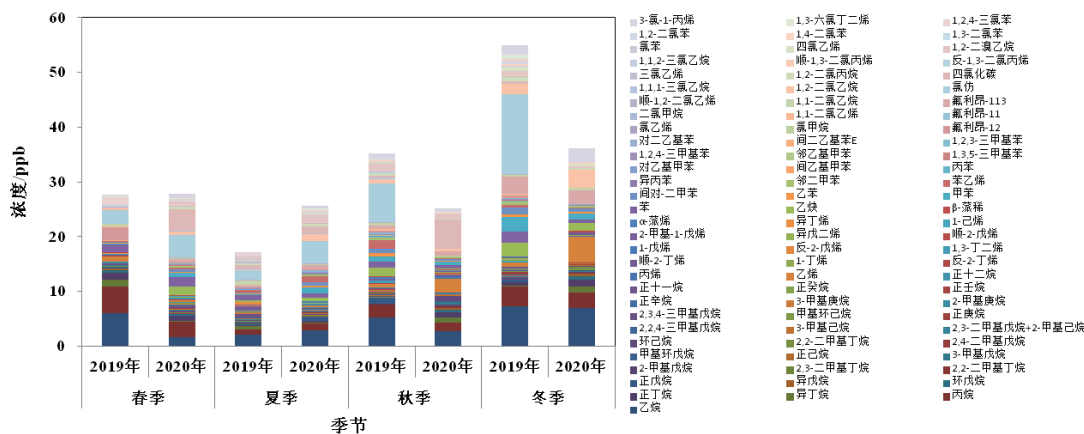


图 4-14 2019 年/2020 年邯郸市 VOCs 组分浓度季节变化情况

图 4-15 给出 2019 年/2020 年邯郸市 VOCs 主要组分浓度的季节变化。

2020 年邯郸大气 VOCs 浓度最高的前十位物种分别是：乙烷 3.5ppb、四氯化碳 2.7ppb、丙烷 2.1ppb、乙烯 2.0ppb、氯仿 2.0ppb、1,2-二氯乙烷 1.4ppb、氟利昂-113 1.1ppb、3-氯-1-丙烯 1.1ppb、苯 0.9ppb、乙炔 0.9ppb，浓度前十位物种在 TVOC 中总占比 62.4%。

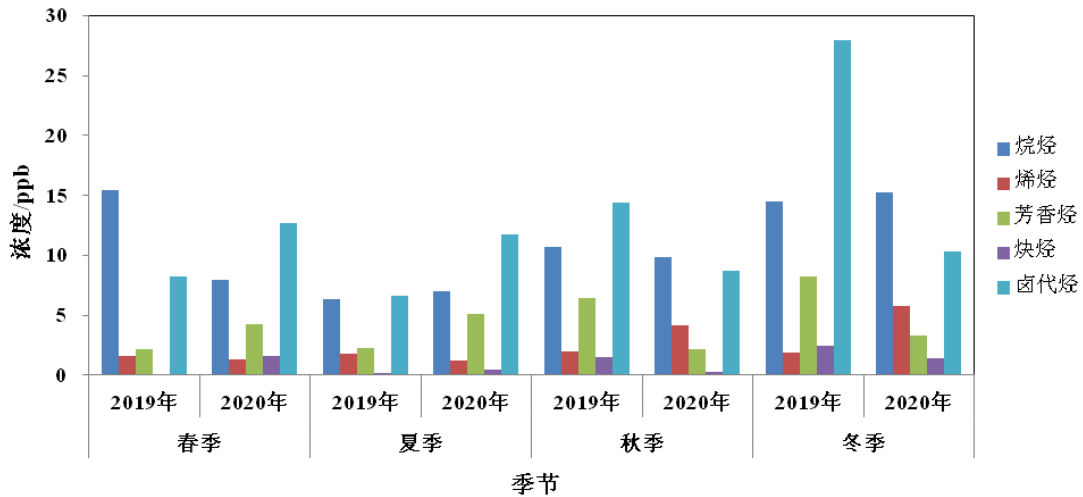


图 4-15 2019 年/2020 年邯郸市 VOCs 主要组分浓度季节变化情况

2020 年春季邯郸大气 VOCs 浓度最高的前十位物种分别是：四氯化碳 4.0ppb、氯仿 3.9ppb、丙烷 2.8ppb、苯 1.7ppb、乙烷 1.6ppb、乙炔 1.6ppb、正丁烷 0.8ppb、甲苯 0.8ppb、3-氯-1-丙烯 0.7ppb、1,2-二氯乙烷 0.7ppb，浓度前十位物种在 TVOC 中总占比 67.2%。

2020 年夏季邯郸大气 VOCs 浓度最高的前十位物种分别是：氯仿 4.1ppb、乙烷 2.8ppb、1,2-二溴乙烷 1.5ppb、四氯化碳 1.3ppb、丙烷 1.3ppb、1,2-二氯乙烷 1.3ppb、苯乙烯 1.1ppb、甲苯 1.0ppb、苯 0.9ppb、氟利昂-113 0.7ppb，浓度前十位物种在 TVOC 中总占比 61.8%。

2020 年秋季邯郸大气 VOCs 浓度最高的前十位物种分别是：四氯化碳 5.3ppb、乙烷 2.7ppb、乙烯 2.5ppb、丙烷 1.6ppb、正丁烷 1.0ppb、异丁烷 1.0ppb、1,2-二溴乙烷 1.0ppb、环己烷 0.9ppb、甲苯 0.7ppb、氟利昂-113 0.7ppb，浓度前十位物种在 TVOC 中总占比 69.0%。

2020 年冬季邯郸大气 VOCs 浓度最高的前十位物种分别是：乙烷 6.9ppb、乙烯 4.7ppb、1,2-二氯乙烷 3.3ppb、丙烷 2.9ppb、3-氯-1-丙烯 2.6ppb、氟利昂-113 2.4ppb、乙炔 1.4ppb、正丁烷 1.3ppb、异丁烷 1.1ppb、甲苯 1.0ppb，浓度前十位物种在 TVOC 中总占比 76.4%。

2020 年春季平均烯烃浓度同比基本持平，烷烃浓度的同比下降幅度与芳香烃、炔烃和卤代烃浓度的同比上升幅度基本抵消。夏季除烯烃浓度同比略有下降之外，其他 VOCs 主要组分均同比上升，对夏季平均 TVOC 浓度升高的贡献率依次为卤代烃 61.3%、芳香烃 33.7%、烷烃 8.5%、炔烃 3.2%。秋季平均 TVOC 浓度同比下降，除烯烃同比上升对 TVOC 浓度的降低产生 21.4%的负贡献率之外，其他 VOCs 主要组分均同比下降，对 TVOC 浓度降低的贡献率依次为卤代烃 56.7%、芳香烃 42.5%、炔烃 12.9%、烷烃 9.2%。冬季平均 TVOC 浓度同比下降，烷烃、烯烃浓度同比上升，对 TVOC 浓度的降低分别产生 3.9%、20.7%的负贡献，其他 VOCs 主要组分同比下降，对 TVOC 浓度降低的贡献率依次为卤代烃 93.5%、芳香烃 25.9%、炔烃 5.2%。

邯郸市 TVOC1-12 月平均浓度分别为 40.9ppb、12.8ppb、29.8ppb、19.2ppb、31.3ppb、26.2ppb、25.9ppb、29.7ppb、19.0ppb、43.6ppb、31.6ppb、33.4ppb，其中乙烷、丙烷、正丁烷、2,3,4-三甲烷、苯、甲苯、乙苯、乙炔、氟利昂-12、氯仿、1,2-二氯乙烷、1,1,1-三氯乙烷、3-氯-1-丙烯等组分逐月平均浓度变化幅度较大，如图 4-16 所示。

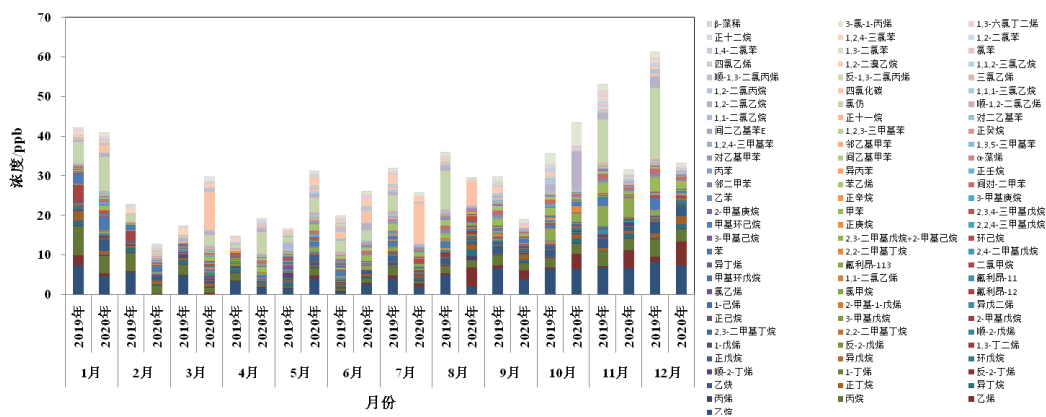


图 4-16 2019 年/2020 年邯郸市 VOCs 组分浓度月变化情况

4.3 臭氧高发季 VOCs 日变化特征

5-9 月臭氧高发季，河北省北部及东部城市 VOCs 浓度日变化曲线主要呈双峰形分布，中南部城市 5-8 月份 VOCs 浓度日变化曲线主要呈单峰形分布，9 月份部分城市呈双峰形分布。

4.3.1 石家庄市 VOCs 日变化特征

如图 4-17 所示的 5 月份 TVOC 及其主要组分浓度日变化曲线呈单峰形分布。TVOC 峰值出现在 7 时约 30ppb，5 时-9 时 TVOC 浓度水平持续处于高位 29-30ppb，最低值出现在 15-19 时约 17ppb；烷烃峰值出现在 6-7 时约 15ppb，2 时-8 时浓度水平持续处于高位 14-15ppb；烯烃早峰值出现在 8-10 时约 3ppb 以上，晚峰值出现在 2 时约 4ppb；芳香烃早峰值出现在 7-8 时约 3ppb 以上。

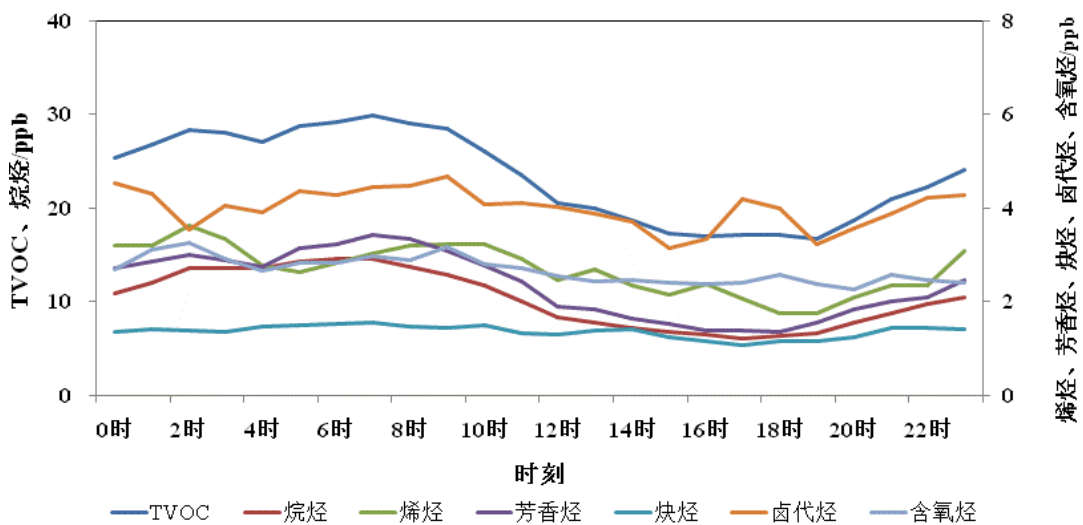


图 4-17 5 月石家庄市 VOCs 日变化曲线

图 4-18 所的的 6 月份 TVOC、烷烃浓度日变化曲线呈双峰形分布，其他主要组分呈单峰形分布。TVOC 早峰值出现在 3-5 时约 29ppb，次峰值出现在 21-22 时约 26ppb，21 时-次日 7 时 TVOC 浓度水平持续处于高位 25-29ppb，最低值出现在 14-16 时约 20-21ppb；烷烃早峰值出现在 3-7 时约 11ppb，晚峰值出现在 21-22 时约 10ppb。

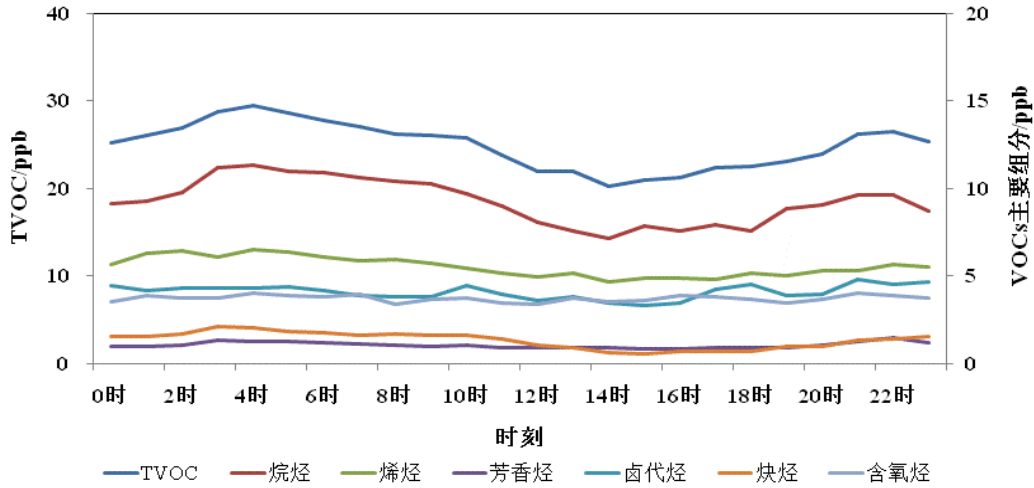


图 4-18 6月石家庄市 VOCs 日变化曲线

图 4-19 所示的 7 月份 TVOC 及其主要组分浓度日变化曲线呈单峰形分布。TVOC 峰值出现 5-8 时约 28-29ppb，最低值出现在 16-17 时约 18-19ppb；烷烃峰值出现在 5-8 时约 14ppb；烯烃峰值出现在 7-11 时约 3ppb；芳香烃峰值出现在 5-8 时约 3ppb 以上。

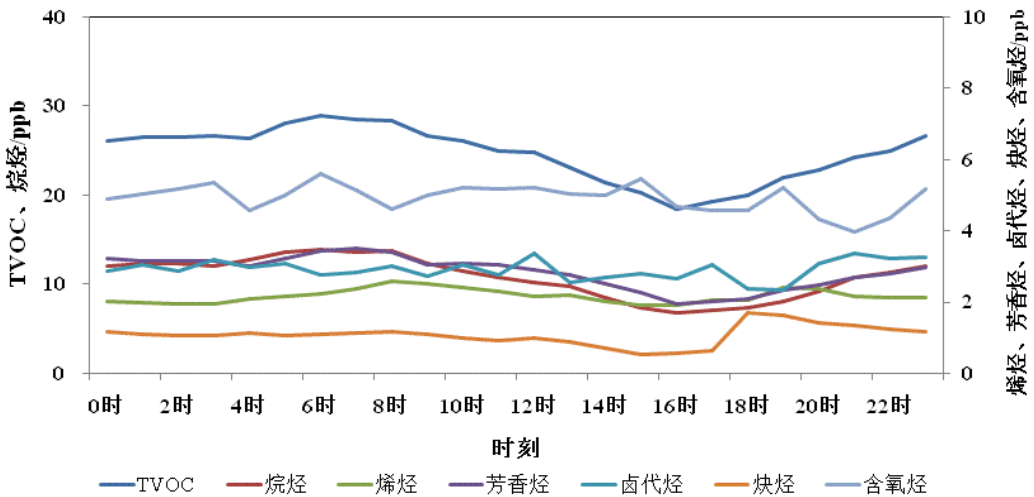


图 4-19 7月石家庄市 VOCs 日变化曲线

图 4-20 所示的 8 月份 TVOC 及其主要组分浓度日变化曲线呈单峰形分布。TVOC 峰值出现在 4-7 时约 35ppb，1 时-10 时 TVOC 浓度水平持续处于高位 31-35ppb，最低值出现在 16-18 时约 23ppb；烷烃峰值出现在 4-5 时约 15ppb 以上，

1时-9时浓度水平持续处于高位 14-15ppb；烯烃峰值出现在 11-12 时约 3ppb 以上；芳香烃峰值出现在 4-6 时约 5ppb 以上。

图 4-21 所示的 9 月份 TVOC、烷烃、芳香烃浓度日变化曲线呈双峰形分布，烯烃、含氧烃呈单峰形分布。TVOC 早峰值出现在 10 时约 36ppb，晚峰值出现在 0 时月 36ppb，21 时-次日 11 时 TVOC 浓度水平持续处于高位 34-36ppb，最低值出现在 15-18 时约 26-27ppb；烷烃早峰值出现在 9-10 时约 16ppb，晚峰值出现在 1-2ppb；芳香烃早峰值、晚峰值分别出现在 9-10 时、0-1 时约 4ppb 以上；烯烃峰值出现在 9-10 时约 4ppb 以上；含氧烃峰值出现在 1-3 时约 6ppb 以上。

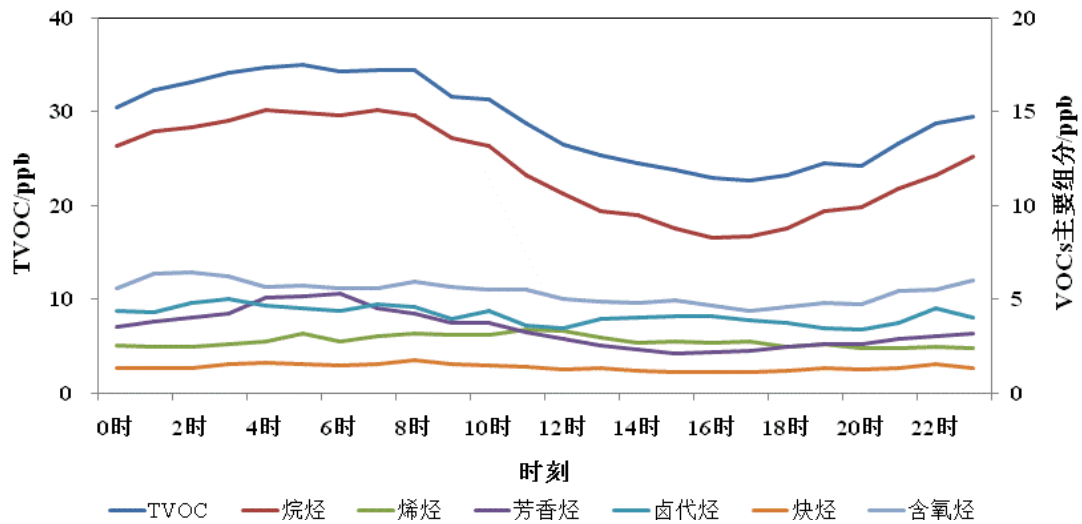


图 4-20 8 月石家庄市 VOCs 日变化曲线

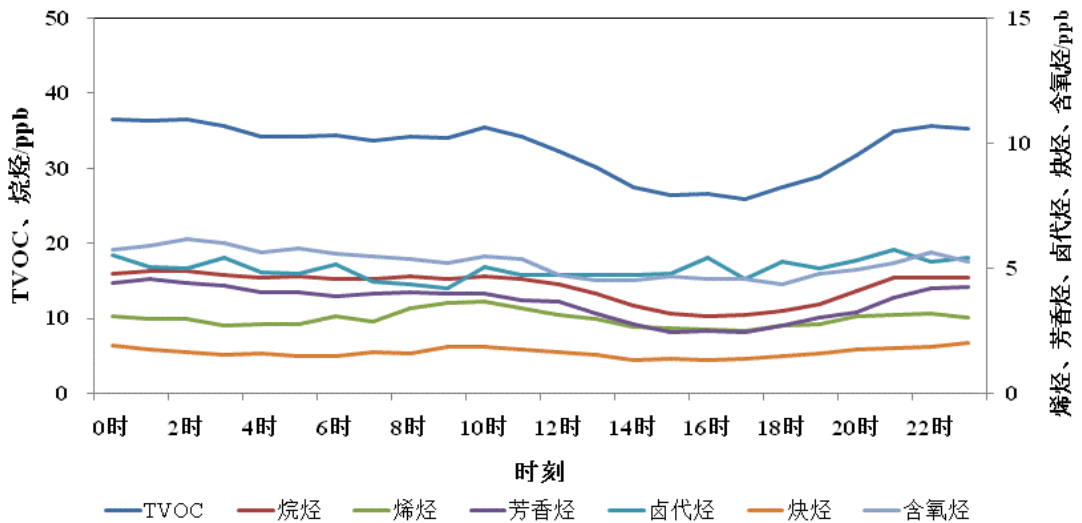


图 4-21 9 月石家庄市 VOCs 日变化曲线

4.3.2 衡水市 VOCs 日变化特征

图 4-22 所示的 5 月份 TVOC 及其主要组分浓度日变化曲线呈单峰形分布。TVOC 早峰值出现在 8 时约 18ppb 以上，最低值出现在 13-19 时约 10ppb；烷烃峰值出现在 7-9 时约 11ppb 以上；烯烃峰值出现在 8-9 时约 3ppb；芳香烃峰值出现在 7-8 时约 1ppb 以上；卤代烃峰值出现在 6 时约 2ppb；含氧烃峰值出现在 7-9 时约 1ppb；炔烃峰值出现在 6-7 时约 1ppb 以上。

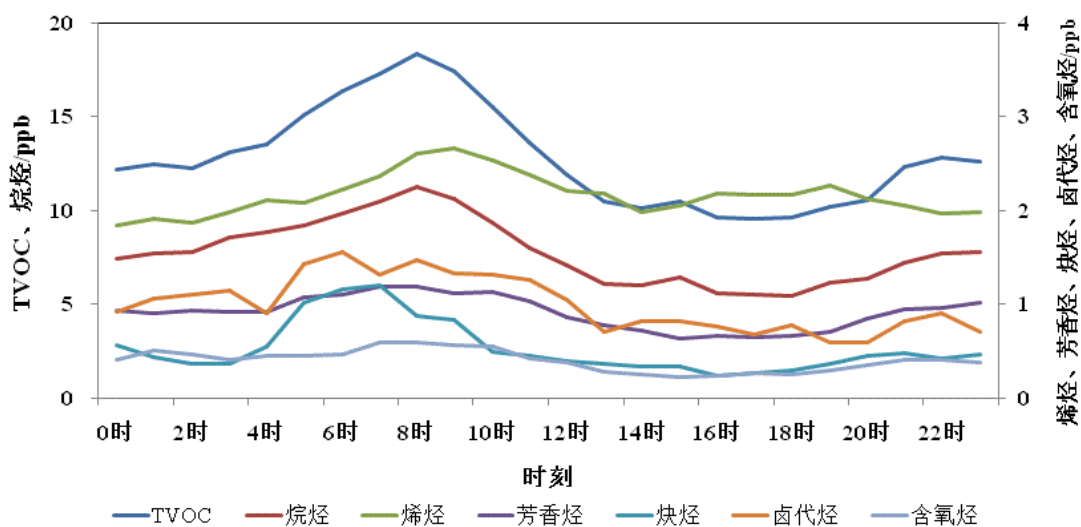


图 4-22 5 月衡水市 VOCs 日变化曲线

图 4-23 所示的 6 月份 TVOC 及其主要组分浓度日变化曲线呈单峰形分布。TVOC 早峰值出现在 7-8 时约 21ppb 以上，5-10 时 TVOC 浓度持续处于高位约 19-21ppb，最低值出现在 17-19 时约 11-12ppb；烷烃早峰值出现在 7-8 时约 12ppb，4-10 时持续处于高位约 10-12ppb；烯烃峰值出现在 7-9 时 4ppb 以上；芳香烃峰值出现在 8-10 时 2ppb；卤代烃峰值出现在 16 时 2ppb；炔烃峰值出现在 7-9 时约 1-2ppb。

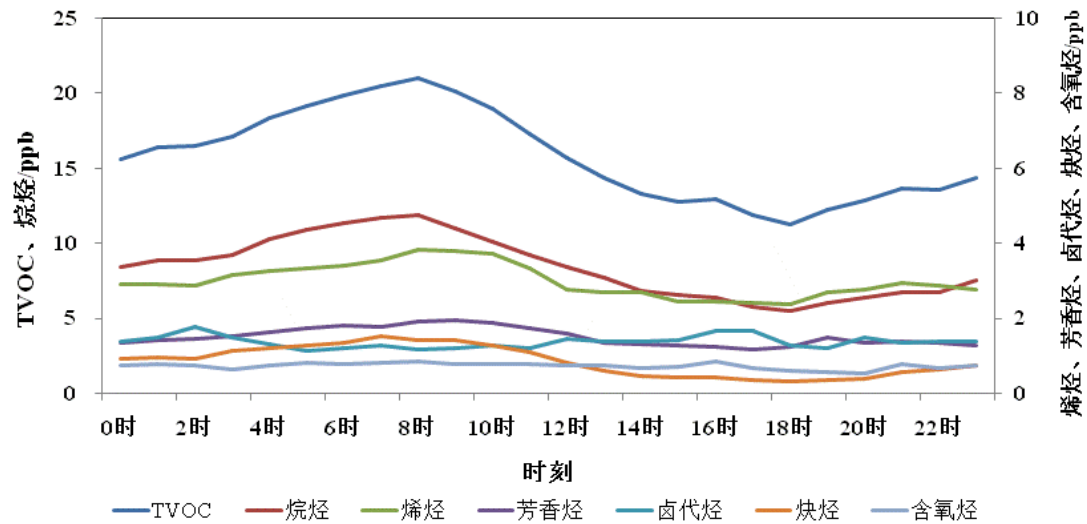


图 4-23 6月衡水市 VOCs 日变化曲线

图 4-24 所示的 7 月份 TVOC 及其主要组分浓度日变化曲线呈单峰形分布。TVOC 早峰值出现在 6-9 时约 15ppb，最低值出现在 16-17 时约 10ppb；烷烃早峰值出现在 6-9 时约 7ppb 以上；烯烃峰值出现在 6-11 时约 3ppb 以上；炔烃峰值出现在 0 时约 2 以上 ppb。

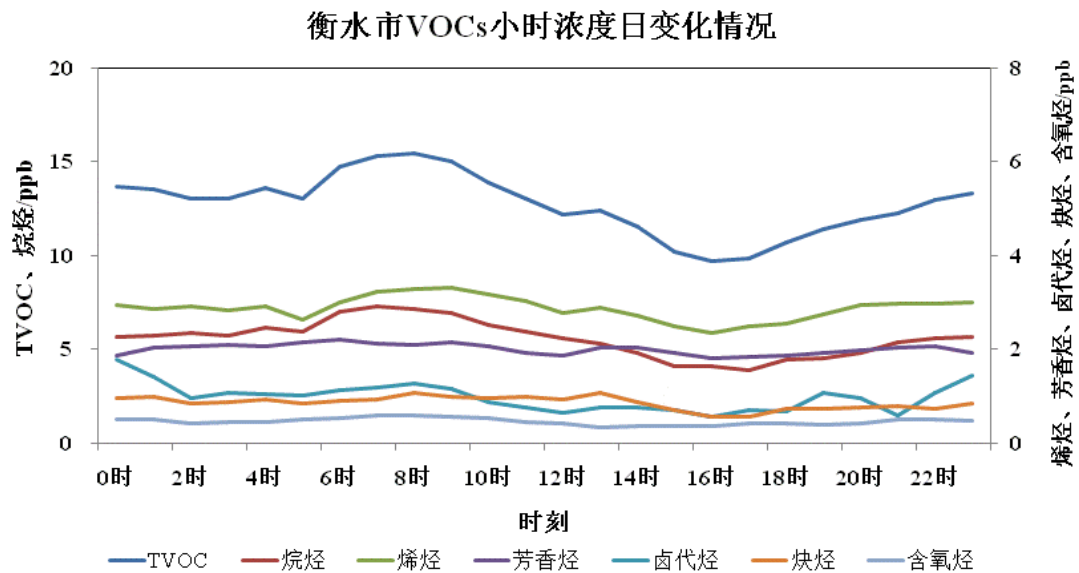


图 4-24 7月衡水市 VOCs 日变化曲线

图 4-25 所示的 8 月份 TVOC 及其主要组分浓度日变化曲线呈单峰形分布。TVOC 峰值出现在 10-12 时约 34-35ppb；烷烃峰值出现在 9-13 时约 15-16ppb；烯炔峰值出现在 12-17 时 6ppb；炔炔峰值出现在 11-13 时约 3ppb。

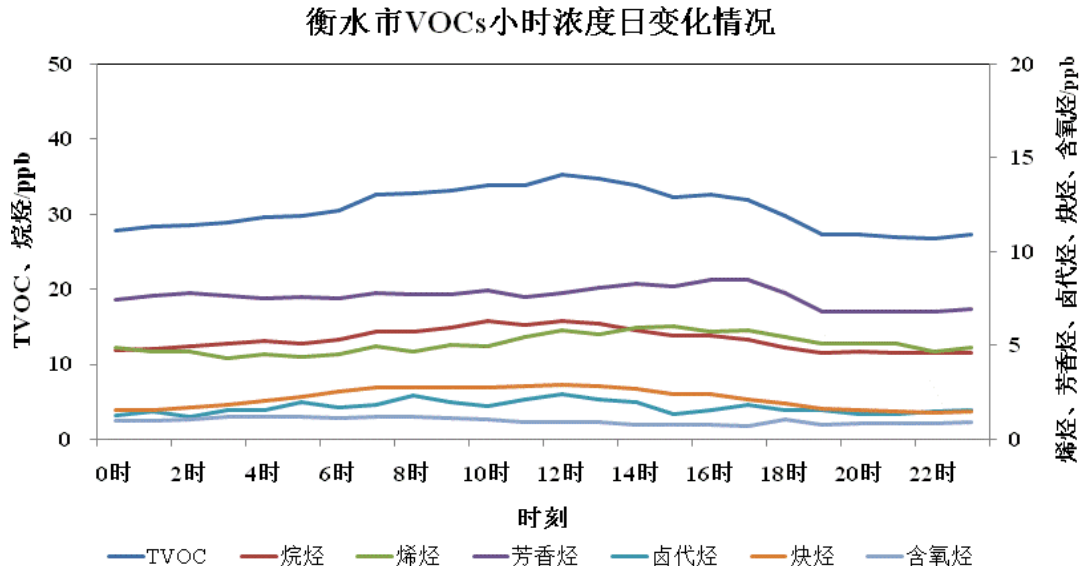


图 4-25 8 月衡水市 VOCs 日变化曲线

4.3.3 邯郸市 VOCs 日变化特征

图 4-26 所示的 6 月份 TVOC、烷烃、烯炔、炔炔、卤代烃浓度日变化曲线呈单峰形分布，芳香烃、含氧烃呈双峰形分布。TVOC 早峰值出现在 7 时约 45ppb，4-10 时 TVOC 浓度持续处于高位约 41-45ppb，最低值出现在 17 时约 29ppb；烷烃早峰值出现在 7-8 时约 14ppb，3-9 时持续处于高位约 12-14ppb；烯炔早峰值出现在 9-10 时约 5ppb；卤代烃早峰值出现在 6-7 时约 15ppb；炔炔峰值出现在 7 时约 2ppb；芳香烃早峰值和晚峰值分别出现在 6-8 时和 22 时在 4ppb 以上；含氧烃早峰值和晚峰值分别出现在 9 时和 23 时在 8ppb 以上。

图 4-27 所示的 7 月份 TVOC、烷烃、烯炔、卤代烃浓度日变化曲线呈单峰形分布，芳香烃呈双峰形分布。TVOC 早峰值出现在 7-11 时约 28-29ppb，最低值出现在 15-18 时约 22ppb；烷烃早峰值出现在 6-11 时约 8ppb；烯炔早峰值出现在 6-12 时约 4-5ppb；卤代烃早峰值出现在 8-9 时约 6ppb 以上；芳香烃早峰值和晚峰值分别出现在 7-8 时和 2 时在 4ppb 以上。

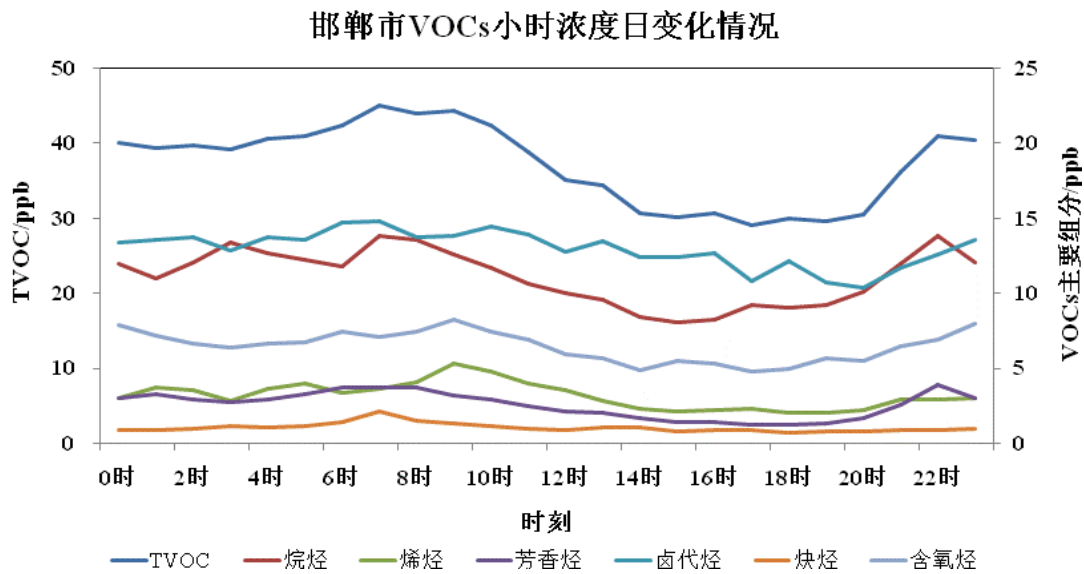


图 4-26 6月邯郸市 VOCs 日变化曲线

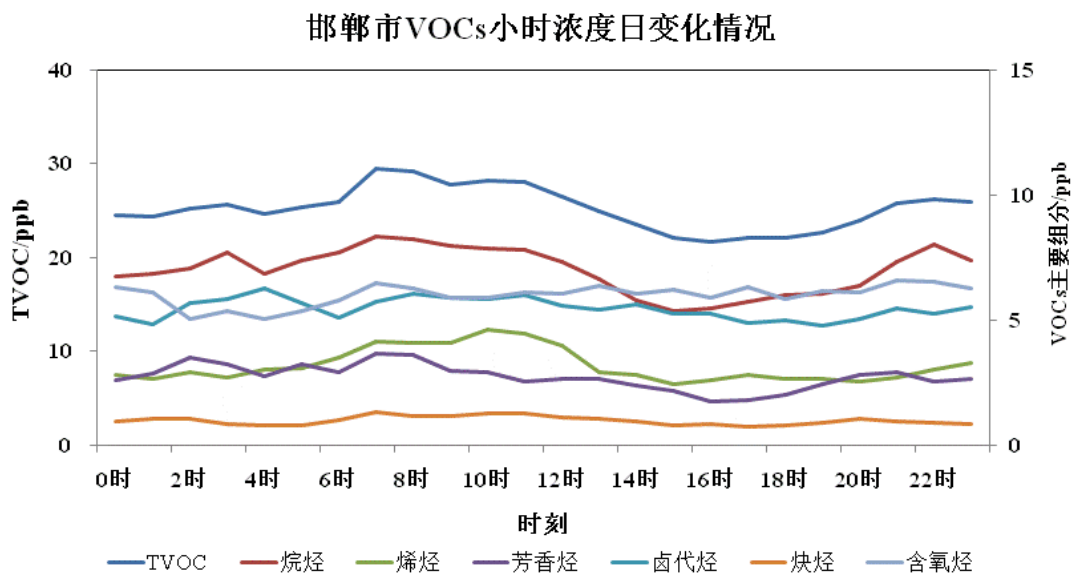


图 4-27 7月邯郸市 VOCs 日变化曲线

图 4-28 所示的 8 月份 TVOC、烷烃、烯烃、炔烃、芳香烃浓度日变化曲线呈单峰形分布，含氧烃呈双峰形分布。TVOC 早峰值出现在 7-8 时约 30-31ppb，最低值出现在 15-17 时约 18-19ppb；烷烃早峰值出现在 5-7 时约 13ppb，2-8 时持续处于高位约 12-13ppb；烯烃早峰值出现在 6-9 时约 5-6ppb；芳香烃峰值出现在 4-9 时约 4ppb；炔烃早峰值出现在 8-10 时约 2ppb；含氧烃早峰值和晚峰值分别出现在 8-9 时 3ppb 以上和 19-20 时在 4ppb。

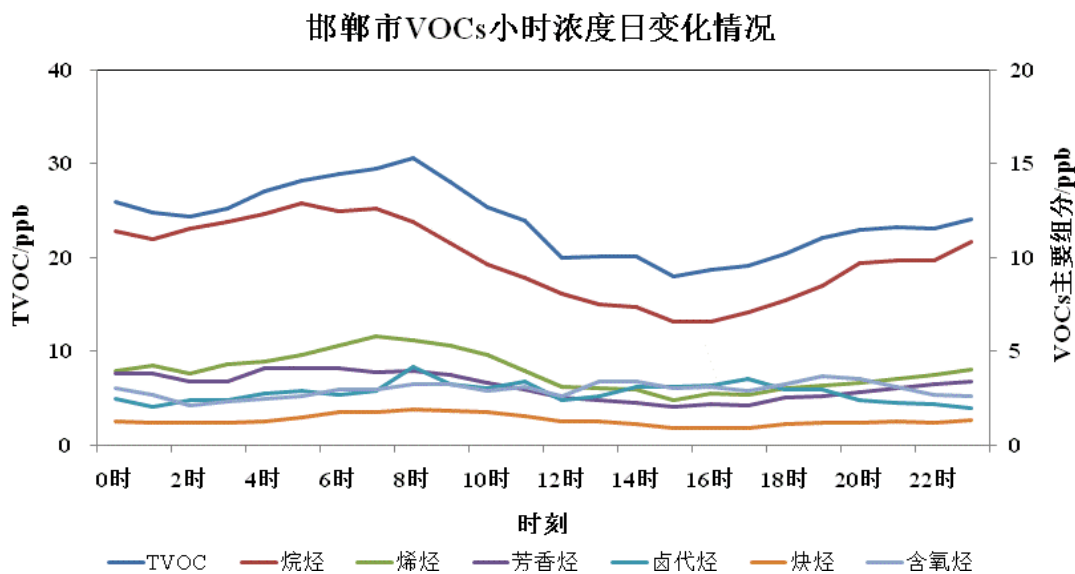


图 4-28 8月邯郸市 VOCs 日变化曲线

图 4-29 所示的 9 月份 TVOC、烷烃、烯烃、芳香烃浓度日变化曲线呈单峰形分布，含氧烃呈双峰形分布。TVOC 早峰值出现在 8 时约 35ppb，22 时-次日 10 时 TVOC 浓度持续处于高位约 31-35ppb，最低值出现在 16-18 时约 23ppb；烷烃早峰值出现在 5-6 时约 17ppb；烯烃峰值出现在 9-11 时约 5ppb；芳香烃峰值出现在 7-11 时约 5ppb；含氧烃早峰值和晚峰值分别出现在 7-10 时 7ppb 和 23 时 8ppb 以上。

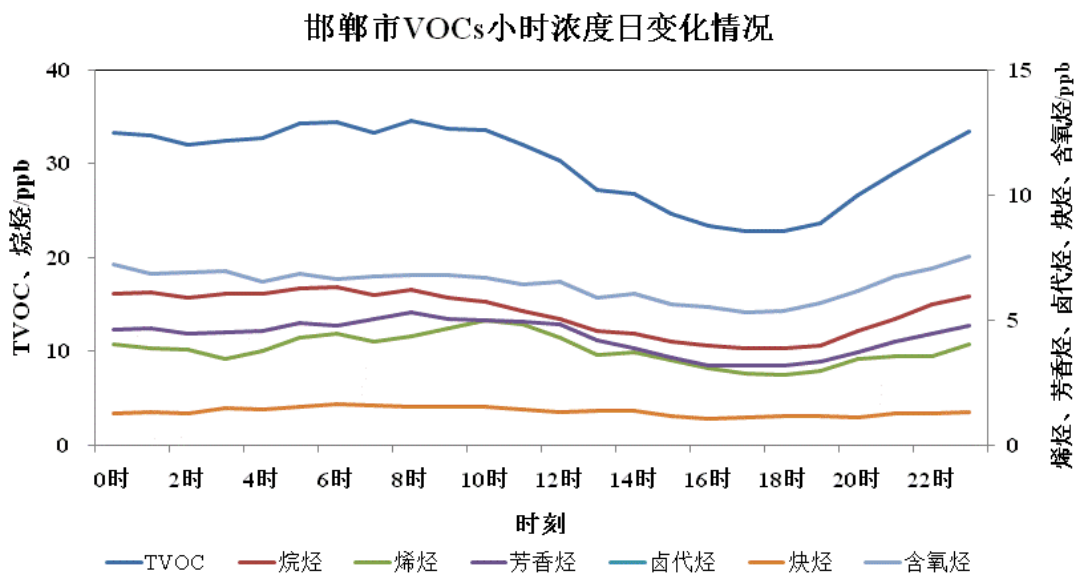


图 4-29 9月邯郸市 VOCs 日变化曲线

第5章 “十四五”河北省臭氧控制目标与减排方案

5.1 “十四五”臭氧污染控制目标设计

5.1.1 “十三五”河北省空气质量优良率变化与现状

“十三五”末，河北全省细颗粒物（PM_{2.5}）浓度 44.8μg/m³，未达标地级城市 PM_{2.5}浓度 47μg/m³，分别比 2015 年下降 40%和 40.5%；地级及以上城市空气质量优良天数比率 69.9%，较 2015 年提高 12.6 个百分点，见表 5-1 所示；地级城市重度及以上污染天数 11 天，较 2015 年减少 24 天；二氧化硫、氮氧化物排放总量较 2015 年分别削减 47.5%、32.7%。

表 5-1 可见，2020 年环境空气质量优良率超过 80%的有秦皇岛、承德和张家口，优良率还未达到 70%的城市有邯郸、衡水、保定、沧州、廊坊、唐山，不到 60%的还有石家庄和邢台；O₃ 8 小时超标天数超过 70 天的有石家庄和邢台，而邯郸、衡水、保定、沧州、廊坊、唐山的超标天数均超过 60 天。

图 5-1 给出了 2020 年河北省各市环境空气质量超标天数统计结果，由图可见，O₃ 和 PM_{2.5} 超标天数相当，超标时都为当日的的首要污染物；PM_{2.5} 超标日中，PM₁₀ 同时超标天数占 50%以上（除张家口和承德以外）；所有 NO₂ 超标都与 PM_{2.5} 超标同时发生；O₃ 几乎没有和其他污染物同时出现超标的情况。

图 5-2 为河北省各市 2020 年 O₃-8h 和 PM_{2.5} 日均浓度及其 IAQI 分布图。从图 4-2 可以看出，河北省中度污染以上的污染日以 PM_{2.5} 污染为主，O₃ 还未出现重度以上的污染；轻度污染日中 O₃ 污染天数普遍大于 PM_{2.5} 污染的天数。因此，实现河北省 O₃ 轻度污染转良好天气是实现优良天数提升的关键。

O₃ 8 小时 90 百分位浓度超标段位于 160-180 μg/m³ 的轻度污染天数，通过对 O₃ 前体物的控制应该容易实现轻度为良好天气，图 5-3 给出了 2020 年 O₃ 8 小时浓度和 PM_{2.5} 日均浓度不同浓度范围出现天数。

由图 5-3 可以看出，2020 年石家庄 O₃ 8 小时 90 百分位浓度位于 160-180 μg/m³ 的轻度污染天数为 36 天、邯郸和衡水均为 25 天，承德也有 13 天，其它城市大多 25 天左右。也就是说实现 25 天 O₃ 8 小时 90 百分位轻度污染转良好天气

是比较容易的，这样就可以提高优良天数大约 6.8%，接近 7 个百分点，进而达到“十四五”规划的目标。

表 5-1 2015 和 2020 年河北省各市空气质量优良率与超标天数统计

城市名称	年份	优良天比率	超标天数	各污染物超标天数			
				PM2.5	PM10	SO ₂	O ₃ 8 小时
石家庄	2015	49.3%	185	170	129	51	13
	2020	56.6%	159	79	63	18	72
邢台	2015	38.1%	226	203	190	52	14
	2020	58.5%	152	74	49	6	73
邯郸	2015	42.5%	210	189	180	24	4
	2020	60.1%	146	77	60	6	63
衡水	2015	34.8%	238	199	174	31	46
	2020	65.6%	126	63	33	4	62
保定	2015	38.4%	225	205	183	55	44
	2020	65.8%	125	62	44	11	61
沧州	2015	59.7%	147	124	99	14	27
	2020	67.8%	118	56	36	6	61
廊坊	2015	52.3%	174	156	126	33	35
	2020	68.6%	115	45	27	7	69
唐山	2015	46.3%	196	177	141	54	45
	2020	68.6%	115	50	36	10	62
秦皇岛	2015	74.2%	94	77	73	19	1
	2020	81.1%	69	28	15	4	43
承德	2015	72.6%	100	48	48	4	46
	2020	88.0%	44	12	5	0	30
张家口	2015	83.6%	60	21	33	2	27
	2020	89.6%	38	6	8	0	25
全省平均	2015	53.8%	169				
	2020	70	110				

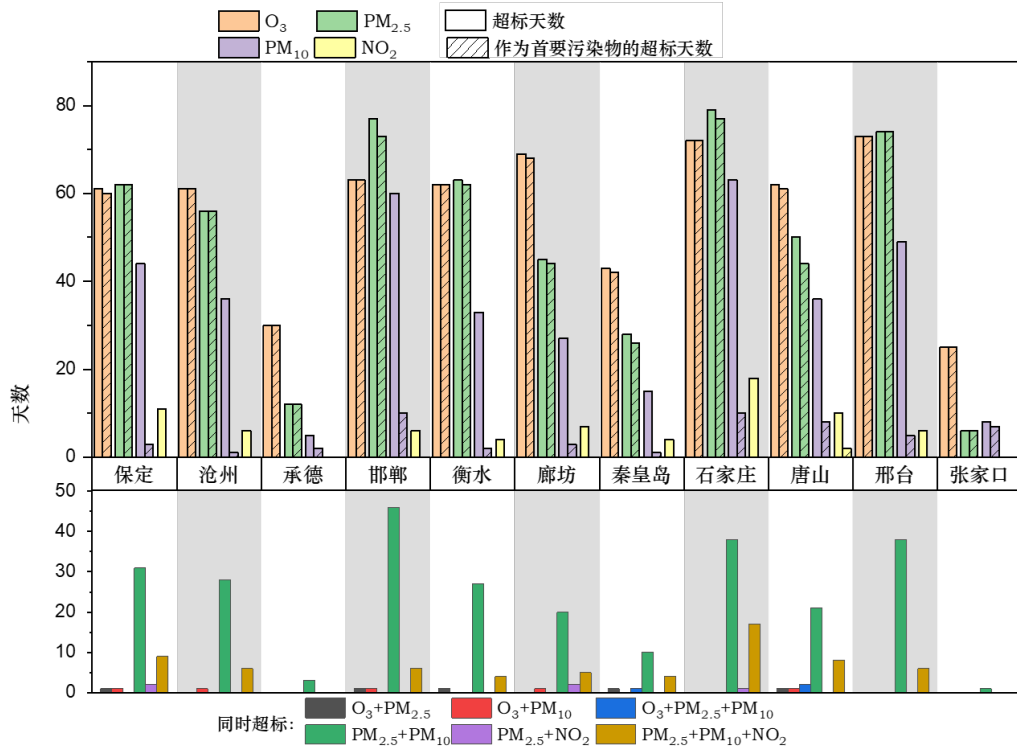


图 5-1 2020 年河北省各市环境空气质量超标天数统计结果

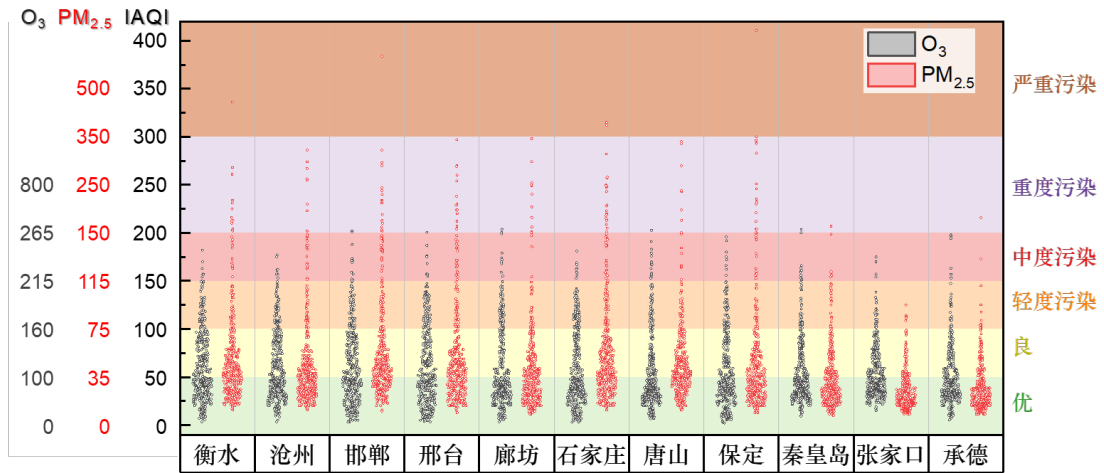


图 5-2 2020 年 O₃-8h 和 PM_{2.5} 日均浓度及其 IAQI 分布

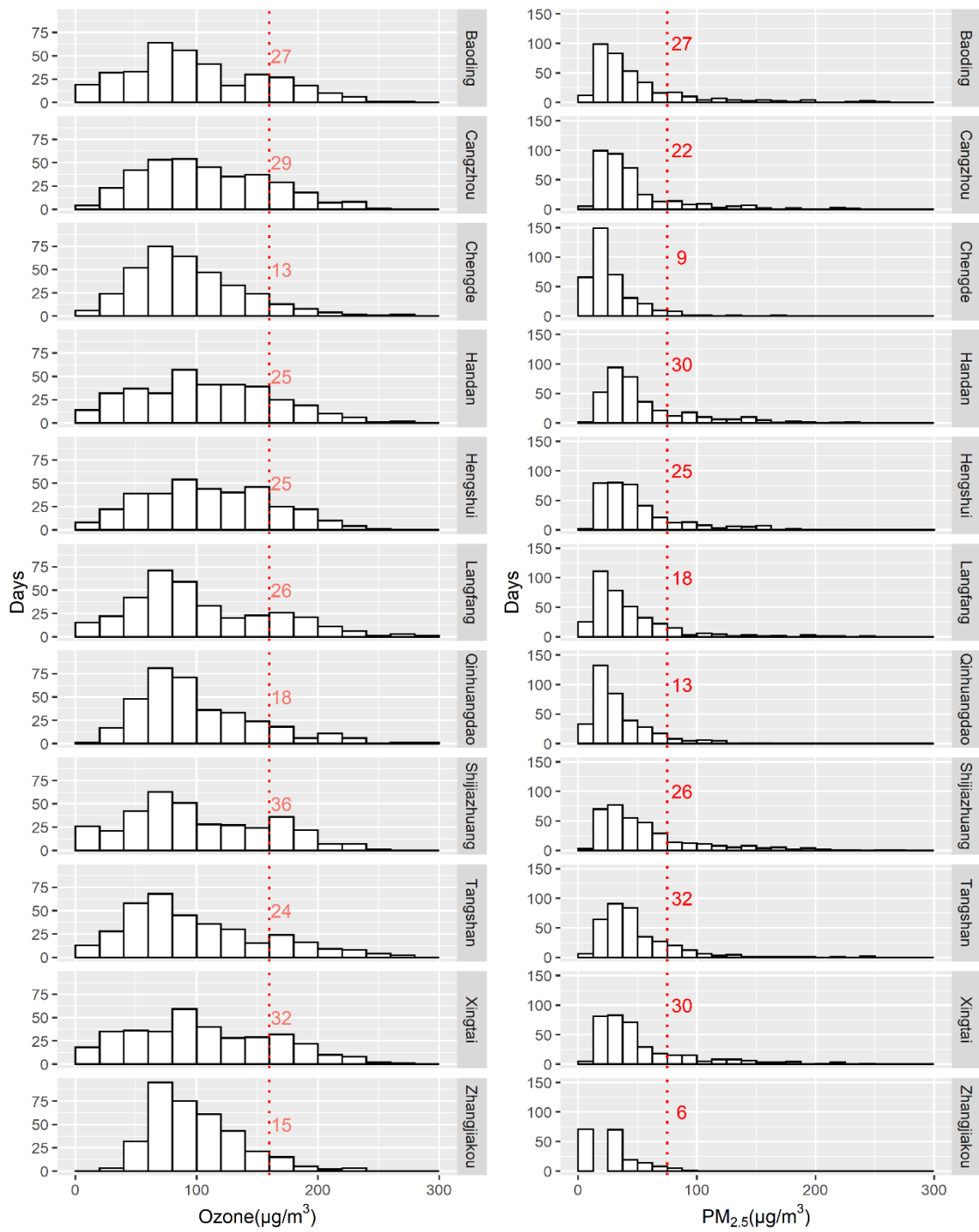


图 5-3 2020 年河北省各市 O₃ 和 PM_{2.5} 浓度频数分布直方图

图中红色数字表示 O₃ 超标 20 µg/m³ 或 PM_{2.5} 超标 25 µg/m³ 以内的天数

5.1.2 “十四五” O₃ 控制目标的确定

在《中共中央国务院关于深入打好污染防治攻坚战的意见》明确提出到 2025 年，生态环境持续改善，主要污染物排放总量持续下降，单位国内生产总值二氧化碳排放比 2020 年下降 18%，地级及以上城市细颗粒物（PM_{2.5}）浓度下降 10%，空气质量优良天数比率达到 87.5%。《河北省生态环境保护“十四五”规划》中提出，2025 年地级及以上城市细颗粒物（PM_{2.5}）浓度由 2020 年的 46.3 μg/m³ 下降到 35 μg/m³，地级及以上城市空气质量优良天数比率（%）由 2020 年的 68.8% 提高到 75%，大约提高了 6 个百分点。

在充分考虑上述文件的基础上，提出 2025 年河北省年地面 O₃ 的改善目标，包括基本改善、加强改善和强化目标。基本改善目标主要是基于《河北省生态环境保护“十四五”规划》，强化目标是考虑《中共中央国务院关于深入打好污染防治攻坚战的意见》提出的优良天数达标率。O₃ 控制目标确定的基本思路和路线见图 5-4 所示。

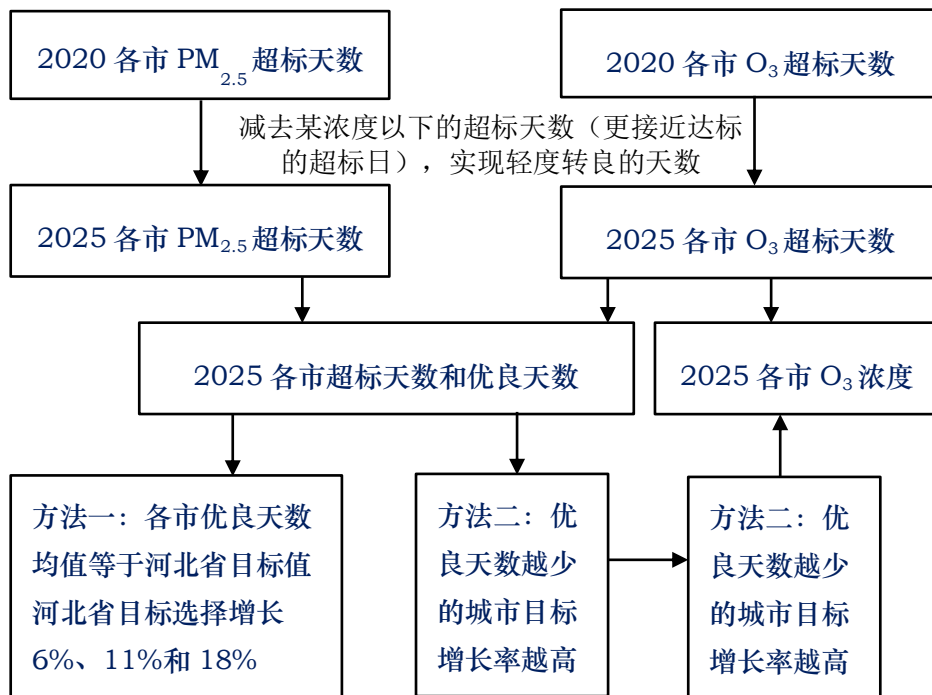


图 5-4 “十四五”O₃ 8 小时 90 百分浓度控制目标确定路线图

如图 5-4 所示的方法一。首先，2025 年河北省优良天数比率提高 6%、11% 和 18% 三个目标。其次，以 2025 年河北省超标天数为约束，设置各市 PM_{2.5} 和

O₃ 的超标天数目标，二者之和即为总超标天数，得到各地级市优良天数比例目标。然后，在 2020 年 O₃ 和 PM_{2.5} 达标天数的基础上，分别将 2020 年 O₃ 日最大 8h 浓度在 160~168, 160~176, 160~186 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的超标日控制为达标，将 PM_{2.5} 日小时平均浓度在 75~82, 75~92, 75~106 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的超标日控制为达标，得到 2025 年 PM_{2.5} 和 O₃ 的超标天数目标。最后，利用近五年臭氧超标天数和 MDA8-90 百分位浓度的线性拟合关系，设置 2025 年 O₃ 浓度目标。

表 5-2 便是基于方法一得到的 2025 年河北省各市三个优良天数比例 O₃ 8 小时 90 百分位控制目标。

表 5-2 方法一获得的 2025 年河北省各市 O₃ 污染控制目标

城市名称	优良率较 2020 提高 6%			优良率较 2020 提高 11%			优良率较 2020 提高 19%		
	优良天数	O ₃ 超标天	O ₃ -90 百分位数	优良天数	O ₃ 超标天	O ₃ -90 百分位数	优良天数	O ₃ 超标天	O ₃ -90 百分位数
保定	266	44	166	284	38	161	304	29	153
沧州	265	51	172	287	38	161	313	23	148
承德	335	25	150	344	18	143	346	17	143
邯郸	246	48	170	265	41	163	291	32	156
衡水	257	54	175	282	42	164	302	33	156
廊坊	271	60	180	288	52	173	310	33	156
秦皇岛	310	33	156	320	27	151	331	22	147
石家庄	238	60	180	258	47	169	291	30	154
唐山	276	50	171	292	44	166	316	31	155
邢台	238	60	180	266	47	169	286	36	159
张家口	340	19	144	348	16	142	357	8	135
省均	277 (76%)			295 (80%)			314 (86%)		

利用图 5-4 所示的方法二。首先，2025 年河北省优良天数比率提高 6%、11% 和 18% 三个目标。其次，依据 2020 年各地级市的优良天数越少则目标增长率越高的原则建立函数，设置 2025 年各市的优良天数比例，即其超标天数要求。然后，对于每个城市，根据其总超标天数目标，按相同比例设置 PM_{2.5} 和 O₃ 的超标天数目标。最后，利用近五年臭氧超标天数和 MDA8-90 百分位浓度的线性拟合关系，设置 2025 年 O₃ 浓度目标。获得的结果见表 5-3。

结合各地近年臭氧浓度变化趋势，到 2025 年河北省 O₃ 浓度升高趋势应得到遏制，各城市 O₃-90 百分位数基本达到国家空气质量二级标准。对比表 5-2 和表 5-3 的结果，考虑达标的可行性，基础目标和加强目标选择表 4-3 达标率提高 6% 和 11% 目标，强化目标则选择方法一确定表 5-2 中优良天数百分率提高 18% 的目标，于是得到所示三种臭氧污染控制目标。

表 5-3 方法二获得的 2025 年河北省各市 O₃ 污染控制目标

城市名称	优良率较 2020 年提高 6%			优良率较 2020 年提高 11%			优良率较 2020 年提高 19%		
	优良天数	O ₃ 超标天	O ₃ -90 百分位数	优良天数	O ₃ 超标天	O ₃ -90 百分位数	优良天数	O ₃ 超标天	O ₃ -90 百分位数
保定	266	49	170	286	39	161	307	28	152
沧州	270	49	171	288	40	163	307	30	154
承德	325	27	152	327	26	150	330	24	149
邯郸	254	48	170	281	36	159	310	24	148
衡水	265	49	171	285	39	162	307	28	153
廊坊	272	56	176	289	46	168	307	35	158
秦皇岛	304	38	161	310	34	157	317	30	154
石家庄	247	53	174	279	39	161	314	23	148
唐山	272	50	171	289	41	164	307	31	155
邢台	250	55	176	280	41	163	312	25	150
张家口	330	23	148	332	22	147	334	20	146
省均	277 (76%)			295 (81%)			314 (86%)		

根据《河北省生态环境保护“十四五”规划》提出的 2025 年全省优良天数达到 75%，因此各地市 2025 年控制目标可选择表 5-4 所示中的基础目标。

对于重点城市石家庄、邯郸和衡水市，同时考虑河北省空气质量改善的艰巨性，2025 年选择表 5-4 中加强目标比较合适，亦即：

2025 年邯郸臭氧超标天 36 天， O₃-90 百分位数浓度 159 μg/m³；

2025 年衡水市臭氧超标天 39 天， O₃-90 百分位数 162 μg/m³；

2025 年石家庄市臭氧超标天 39 天， O₃-90 百分位数 161 μg/m³。

表 5-4 “十四五”河北省 O₃ 污染控制目标

城市名称	2020年 O ₃ -90 百分位	基础目标			加强目标			强化目标		
		优良天数	O ₃ 超标天	O ₃ -90 百分位数	优良天数	O ₃ 超标天	O ₃ -90 百分位数	优良天数	O ₃ 超标天	O ₃ -90 百分位数
保定	182	266	49	170	286	39	161	304	29	153
沧州	179	270	49	171	288	40	163	313	23	148
承德	155	325	27	152	327	26	150	346	17	143
邯郸	182	254	48	170	281	36	159	291	32	156
衡水	181	265	49	171	285	39	162	302	33	156
廊坊	184	272	56	176	289	46	168	310	33	156
秦皇岛	165	304	38	161	310	34	157	331	22	147
石家庄	181	247	53	174	279	39	161	291	30	154
唐山	185	272	50	171	289	41	164	316	31	155
邢台	186	250	55	176	280	41	163	286	36	159
张家口	151	330	23	148	332	22	147	357	8	135
省均		277 (76%)			295 (81%)			314 (86%)		

5.1.3 臭氧前体物减排目标

已有研究结果指出，全国范围单独消减氮氧化物，大部分地区有助于减轻 O₃ 污染 2-10 μg/m³，但是京津冀、长三角、珠三角城市群部分城市以及东部城市群部分区域 O₃ 浓度反而会增加 1-5 ppb (2-10 μg/m³)。单独消减 VOCs 排放可以在全国绝大部分地区降低 O₃ 浓度，但如果不消减 VOCs 排放量将出现大范围 O₃ 浓度升高趋势。考虑到因 NO₂ 和 PM_{2.5} 控制，NO_x 排放一定会持续消减，因此必须考虑 NO_x 和 VOCs 协同控制。

基于国内外现有控制经验和珠江三角洲地区、长江三角洲地区、成渝地区和全国臭氧控制情景模拟研究结果，减排路径的基本思路是 NO_x 消减的同时大幅度消减 VOCs 排放量，NO_x/VOCs 比应控制在 1:2 以上，近期以 VOCs 减排为重点同时联合考虑 NO_x 削减，短期内主要减排 VOCs，臭氧达标长期则需要 NO_x 的大力减排，同时强化区域联防联控，削减区域背景臭氧浓度。

多种空气质量模型情景模拟表明，至 2030 年各种区域 VOCs 排放量消减至 2015 年排放量的 40%，NO_x 减排至 40%；2030 年 VOCs 减排 60%后加大 NO_x 的减排力度至 80%，至 2035 年 VOCs 排放量减排至 2015 年的 30%，NO_x 排放量减排至 2015 年的 20%，地面臭氧浓度将明显改善且臭氧 8 小时最大值能够达到现有空气质量标准。因此，本研究考虑河北省 2025 年 VOCs 排放量在 2020 年排放量的基础上下降 30%，2025 年 NO_x 排放量在 2020 年排放量 20%，如表 5-5 所示。

表 5-5 2025 年 O₃ 前体物排放量控制目标

河北省各市	NO _x 排放控制目标	VOCs 排放控制目标
石家庄市、衡水市 邯郸市、唐山市 廊坊市、保定市 沧州市、邢台市	基于 2020 年排放量， 2025 年下降 20%。	基于 2020 年排放量， 2025 年下降 30%。
张家口、秦皇岛 承德	基于 2020 年排放量， 2025 年下降 10%。	基于 2020 年排放量， 2020 年下降 20%。

5.2 河北省臭氧污染回溯模拟

5.2.1 模拟范围和模拟网格的构建

在确定臭氧前体物总的减排目标的前提下，为了进一步确定各细分人为源的减排比例，需要对河北省臭氧季展开回溯模拟。

回溯模拟的网格设计为双重嵌套网格，水平格距分别为 12km 和 4km。为协调气象场与空气质量场的关系，每一重气象模拟网格比对应的空气质量模拟网格稍大。模拟网格的地图投影坐标系具体定义如下：水平投影坐标系采用 Lambert Conformal Conic 投影（兰伯特正形投影），三个投影参数分别取为北纬 25 度、北纬 47 度、以及东经 108 度 55 分；坐标系原点取为中国大地坐标原点，即东经 108 度 55 分、北纬 34 度 32 分。在此坐标系平面上气象和空气质量模拟网格的具体定义如表 5-6 所示。模拟网格在垂直方向采用 σ -p 坐标，模式层顶定义

为 50mb, 气象模式取 35 个 σ 层进行计算, 空气质量模式取其中的 14 个 σ 层, 构建为垂直方向的 13 层格子, 用于模拟每个格子内的空气污染物浓度数值。12km 和 4km 网络的模拟范围和地形高度如图 5-5 和图 5-6 所示。4km 网络覆盖了河北省大部分地区(秦皇岛主城区除外), 模拟结果的分析展示将以 4km 网络结果为主。

表 5-6 模拟网格设计

网格	格距	左下角坐标 (km)	行数	列数
12km 气象网格	12km	(-3420, -2340)	391	571
12km 空气质量网格	12km	(-3060, -2232)	372	426
4km 气象网格	4km	(-192, -36)	199	178
4km 空气质量网格	4km	(204, -24)	192	171

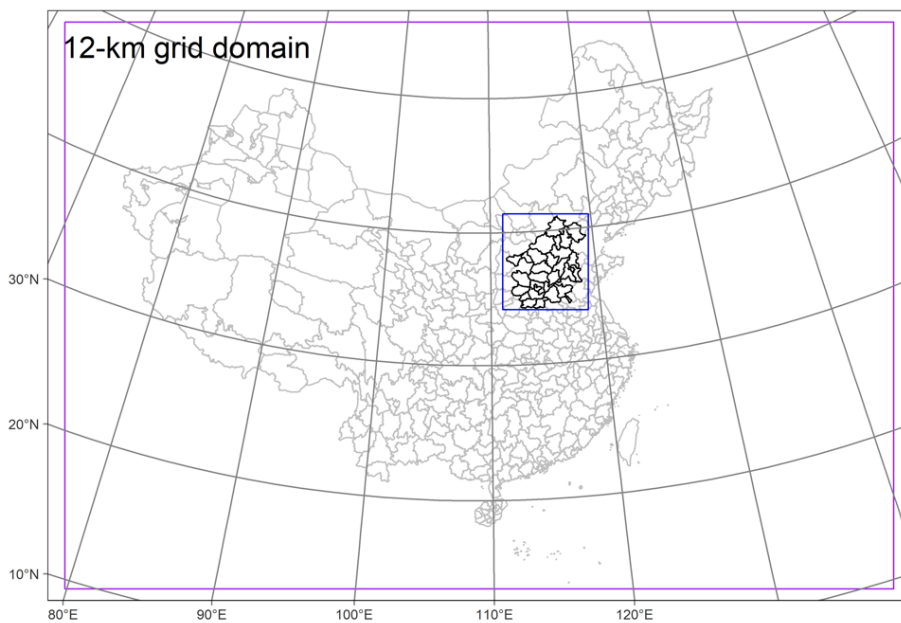


图 5-5 12km 网格模拟范围

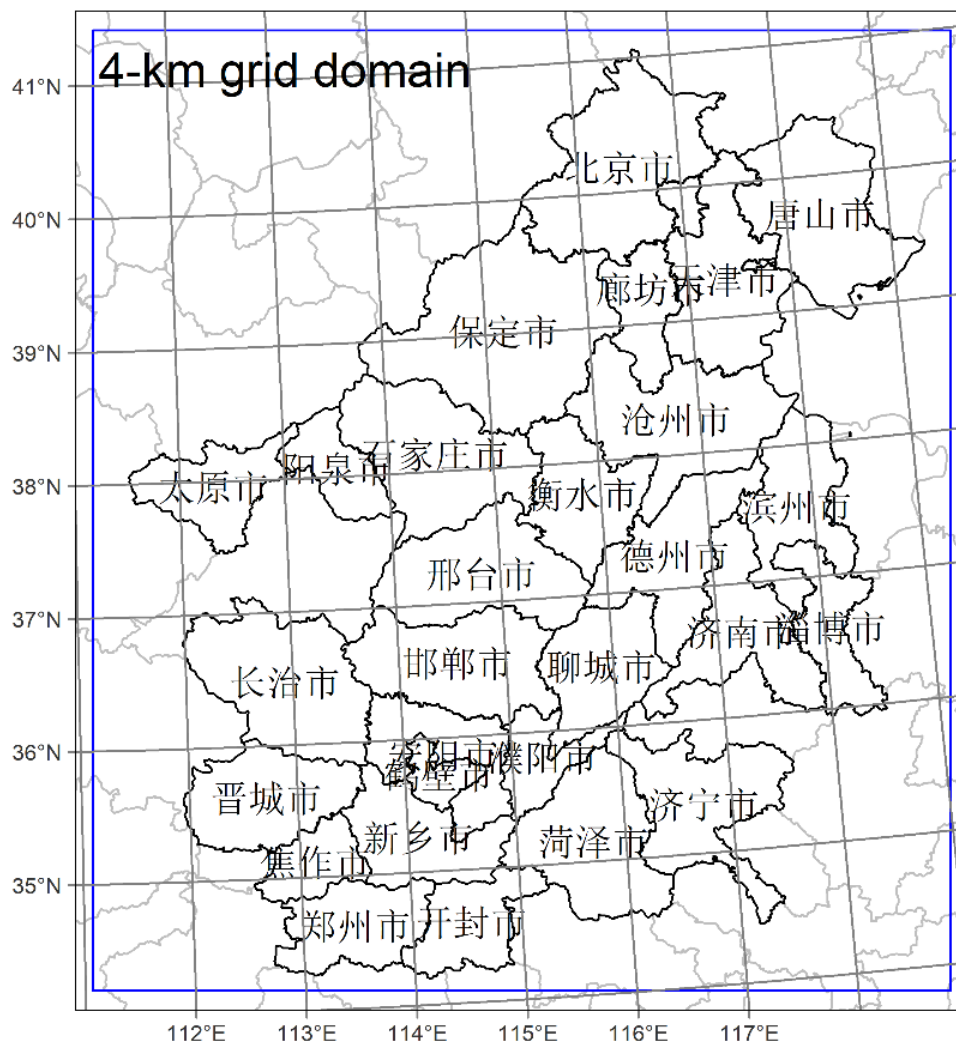


图 5-6 4km 网格模拟范围

5.2.2 模拟时段的选择

已有研究表明，2019 年气象条件是近年来比较稳定的一年，同时相比 2020 年排放可能受疫情影响短期发生明显变化，2019 年排放处于常规水平，因此选取 2019 年臭氧季（4-9 月）进行常规回溯模拟，再选取两段臭氧典型污染时段开展敏感性模拟，两段时间分别是 2019 年 6 月 7 日-2019 年 6 月 18 日、2019 年 7 月 15 日-2019 年 7 月 28 日，这两段时间都发生了较为严重的区域污染，尤其 6 月中旬个别城市臭氧达到了重度污染，分别见表 5-7 和表 5-8。

表 5-7 河北省 2019 年 6 月 7 日~2019 年 6 月 18 日臭氧观测浓度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

日期	沧州	承德	邯郸	衡水	廊坊	秦皇岛	石家庄	唐山	邢台	张家口
2019/6/7	189	152	214	193	162	189	196	185	213	117
2019/6/8	149	96	201	188	133	205	206	132	219	98
2019/6/9	127	101	177	134	104	122	149	123	169	107
2019/6/10	185	119	184	175	170	141	205	163	203	132
2019/6/11	214	193	209	216	227	127	264	157	209	189
2019/6/12	211	211	220	212	238	154	244	263	228	183
2019/6/13	188	145	242	209	186	121	167	171	235	145
2019/6/14	236	105	254	231	152	137	193	162	248	128
2019/6/15	140	144	292	264	171	102	259	125	275	201
2019/6/16	78	69	163	118	58	72	113	48	139	143
2019/6/17	161	124	218	193	186	118	207	164	215	134
2019/6/18	221	181	243	236	240	141	267	254	266	162

表 5-8 河北省 2019 年 7 月 15 日~2019 年 7 月 28 日臭氧观测浓度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

日期	保定	沧州	承德	邯郸	衡水	廊坊	秦皇岛	石家庄	唐山	邢台	张家口
2019/7/14	205	172	112	246	212	201	143	217	177	244	139
2019/7/15	220	185	144	237	192	229	140	219	214	235	193
2019/7/16	188	159	163	201	203	197	100	155	122	202	172
2019/7/17	176	136	100	162	160	81	108	191	139	187	127
2019/7/18	201	202	164	198	189	180	96	208	136	207	171
2019/7/19	191	151	153	199	150	174	106	204	141	205	167
2019/7/20	117	101	108	133	118	85	103	111	83	88	159
2019/7/21	192	162	151	199	198	186	215	192	200	223	165
2019/7/22	134	177	142	162	149	143	219	91	181	127	97
2019/7/23	156	110	132	178	142	164	141	199	141	192	142
2019/7/24	205	134	142	181	165	205	188	218	210	229	138
2019/7/25	193	134	136	216	171	187	136	195	172	211	159
2019/7/26	215	149	154	198	195	215	176	253	202	243	190
2019/7/27	200	197	181	125	143	240	132	158	182	126	177
2019/7/28	161	192	139	151	136	162	113	198	129	156	178

5.2.3 源排放清单的调整和处理

空气质量模式模拟使用的源清单来源于河北省排放清单（河北省 2020 年大气污染物排放源清单报告 2021.11.17）和北大挥发性有机物（VOCs）清单，同

时参考人口、工业热源和道路交通等数据源进行时空调整。通过模拟 2019 年臭氧季空气质量状况，并使用同期观测数据对模拟区域内各城市的 O₃ 和 NO₂ 模拟效果进行评估，并根据评估结果对排放量进行多次调整，最后一次调整后的排放清单用于本次数值模拟，见表 5-9。NO_x 和 VOCs 人为源主要包括工业源、电厂源、居民源、移动源、生物质燃烧源和溶剂使用源，其中移动源和工业源 NO_x 和 VOCs 排放量占比较高，溶剂使用源排放的 VOCs 在 VOCs 排放总量中也占有较大比例。

表 5-9 模式系统输入的河北省各城市各类源排放量（吨/年）

城市	源排放种类	CO	NO _x	VOCs	SO ₂	PM _{2.5}	PMC	NH ₃
石家庄市	农业源	0	0	0	0	12224.13	48896.53	153017.84
	工业源	1975479.5	54689.98	155101.38	24876.39	37546.75	20262.59	7049.88
	电厂源	37457.64	3890.04	1066.71	2172.99	449.26	46.34	0
	居民源	187735.64	4871.48	34355.72	7918.18	9573.11	2480.7	5447.21
	移动源	71889.9	105337.4 3	87545.2	2074.48	2406.62	170.03	3426.45
	生物质燃烧源	34091.18	3278.87	25448.9	548	3622.06	118.7	812.55
	扬尘源	0	0	0	0	27163.26	87782.15	0
	溶剂使用源	0	0	34572.18	0	0	0	0
	总量	2306654	172067.8	338090.09	37590.05	92985.2	159757.0	169753.92
唐山市	农业源	0	0	0	0	10681.17	42724.69	137181.94
	工业源	2377309.25	65896.29	135560.48	29986.21	45192.21	24377.79	8487.84
	电厂源	39400.25	3934.71	1123.71	2637.89	373.83	39.24	0
	居民源	137228.47	3530.64	24823.18	5688.6	7065.23	1813.25	3940.07
	移动源	84982.88	121282.0 5	71481.14	9860.96	4899.55	282.36	2285.52
	生物质燃烧源	26069.62	3034.63	14647.75	462.67	2251.38	88.84	769.57
	扬尘源	0	0	0	0	25456.69	76169.4	0
	溶剂使用源	0	0	119315.84	0	0	0	0
	总量	2664990.5	197678.3	366952.09	48636.32	95920.06	145495.6	152664.94
秦皇岛	农业源	0	0	0	0	4510.04	18040.16	43570.49
	工业源	575315.5	15944.65	45889.8	7503	11000.12	5903.57	2047.23
	电厂源	11151.34	1091	321.43	436.74	57.9	7.81	0
	居民源	50332.81	1306.12	9033.91	2132.14	2578.1	659.98	1507.89
	移动源	21652.8	34739.97	24251.35	4402.91	1783.62	75.38	809
	生物质燃烧源	6674.28	739.67	14317.5	114.29	597.35	26.74	215.75
	扬尘源	0	0	0	0	7303.15	22037.81	0
	溶剂使用源	0	0	14642.99	0	0	0	0

城市	源排放种类	CO	NO _x	VOCs	SO ₂	PM _{2.5}	PMC	NH ₃
邯 郸	总量	665126.69	53821.42	108456.98	14589.09	27830.28	46751.46	48150.36
	农业源	0	0	0	0	12025.64	48102.57	128505.84
	工业源	1299971.75	35952.5	76691.8	17891.41	25345.13	13458.98	4617.29
	电厂源	26383.65	3697.05	749.46	2198.43	220.04	22.84	0
	居民源	189132.25	4598.32	30734.26	7153.99	9058.13	2164.94	5299.64
	移动源	46036.95	66818.65	46556.16	1393.25	1476.87	82.33	2193.77
	生物质燃烧源	31853.52	2644.74	28523.64	463.36	3898	123.05	672.55
	扬尘源	0	0	0	0	23465.03	67658.23	0
	溶剂使用源	0	0	56495.04	0	0	0	0
总量	1593378.12	113711.3	239750.38	29100.44	75488.84	131613	141289.08	
邢 台	农业源	0	0	0	0	10213.59	40854.36	81112.08
	工业源	780212.75	21533.25	67606.11	9843.84	14843.22	8000.44	2786.24
	电厂源	12499.86	1251.75	355.95	1057.8	123.43	14.29	0
	居民源	126377.03	3272.15	23012.72	5307.66	6485.72	1674.43	4204.96
	移动源	33839.58	55396.92	40802.59	1206.15	1271.54	72.92	1436.64
	生物质燃烧源	26213.22	2010.58	22004.04	367.06	3443.1	101.68	509.66
	扬尘源	0	0	0	0	18000.22	51355.71	0
	溶剂使用源	0	0	21992.54	0	0	0	0
	总量	979142.44	83464.66	175773.95	17782.51	54380.82	102073.8	90049.59
保 定	农业源	0	0	0	0	13363.29	53453.16	129595.99
	工业源	1329713.25	37008.27	63548.17	16797.09	25304.58	13642.23	4743.44
	电厂源	23184.99	4484.29	662.13	1768.04	174.3	19.26	0
	居民源	199214.59	5169.05	36106.88	8350.22	10311.21	2659.98	6645.7
	移动源	65406.84	81198.98	67282.33	1758.63	2050.96	114.3	2608.99
	生物质燃烧源	34526.48	2841.06	28811.13	505.82	4236.53	139	780.55
	扬尘源	0	0	0	0	27832.73	90844.13	0
	溶剂使用源	0	0	27470.19	0	0	0	0
	总量	1652046.25	130701.7	223880.83	29179.79	83273.59	160872.1	144374.69
张 家 口	农业源	0	0	0	0	9908.76	39635.04	60320.39
	工业源	545306.38	15885.82	38224.55	7139.13	10489.34	5616.48	1984.73
	电厂源	28771.96	5126.13	819.05	3924.1	325.71	35.17	0
	居民源	80739.52	2079.34	14103.72	3386.49	4037.75	1028.87	2421.61
	移动源	26319.96	33125.98	20264.36	733.54	686.14	54.45	1293.08
	生物质燃烧源	8977.79	877.16	16444.01	135.66	1039.66	40.68	268.49
	扬尘源	0	0	0	0	22236.72	63510.07	0
	溶剂使用源	0	0	15229.56	0	0	0	0
	总量	690115.56	57094.43	105085.25	15318.92	48724.09	109920.8	66288.3
农业源	0	0	0	0	6491.77	25967.08	70420.73	

城市	源排放种类	CO	NO _x	VOCs	SO ₂	PM _{2.5}	PMC	NH ₃
承德	工业源	523287.31	14485.12	37111.14	6591.41	9946.74	5365.01	1867.63
	电厂源	10223.95	975.96	290.58	605.49	84.84	9.13	0
	居民源	63577.24	1631.89	11131.11	2623.38	3161.45	802.84	2051.97
	移动源	15915.81	20707.41	22788.54	493.84	471.25	21.1	775.44
	生物质燃烧源	8122.17	808.74	20570.52	125.47	920.1	36.35	246.77
	扬尘源	0	0	0	0	13714.41	41145.97	0
	溶剂使用源	0	0	19348.03	0	0	0	0
	总量	621126.5	38609.12	111239.92	10439.59	34790.56	73347.47	75362.55
沧州	农业源	0	0	0	0	11287.98	45151.92	87127.64
	工业源	1195624.5	32590.9	102037.27	15081.26	22759.98	12263.46	4273.73
	电厂源	22113.29	2794.83	646.66	1551.25	384.72	51.69	0
	居民源	131837.17	3416.53	23993.34	5520.17	6686.28	1726.57	4348.29
	移动源	69851.45	103395.5 5	50591.47	6791.28	3574.3	186.49	1531.14
	生物质燃烧源	27911.65	2439.89	22455.08	416.43	3383.29	104.44	611.71
	扬尘源	0	0	0	0	17951.35	51455.6	0
	溶剂使用源	0	0	37115.98	0	0	0	0
总量	1447338	144637.7	236839.81	29360.4	66027.91	110940.2	97892.5	
廊坊	农业源	0	0	0	0	6554.39	26217.55	41603.12
	工业源	1045243.31	28805.4	59327.3	13292.8	19953.22	10755.43	3722.73
	电厂源	8811.36	897.86	250.88	524.58	74.05	6.93	0
	居民源	84525.18	2188.02	14975.48	3479.53	4273.91	1095.51	2497.28
	移动源	31260.64	30320.06	47158.76	774.41	721.21	39.87	1014.49
	生物质燃烧源	13315.86	1502.95	6351.68	229.96	1231.6	48.62	396.21
	扬尘源	0	0	0	0	14527.56	45490.88	0
	溶剂使用源	0	0	39425.2	0	0	0	0
总量	1183156.25	63714.29	167489.3	18301.27	47335.95	83654.8	49233.83	
衡水	农业源	0	0	0	0	8591.38	34365.52	88395.66
	工业源	538296.31	16099.7	33208.43	9769.76	11265.01	5547.03	1744.75
	电厂源	8549.63	1998.59	319.86	2018.91	463.6	149.88	0
	居民源	97566.54	2533.39	14919.21	3608.19	4472.61	1040.84	2662.2
	移动源	29328.78	32127.77	23682.53	715.53	948.23	25.48	971.89
	生物质燃烧源	16384.8	1198.86	18275.48	252.22	1744.26	58.5	307.44
	扬尘源	0	0	0	0	16984.44	46026.84	0
	溶剂使用源	0	0	16757.13	0	0	0	0
总量	690126.06	53958.31	107162.65	16364.62	44469.53	87214.09	94081.93	
河北省	农业源	0	0	0	0	105852.32	423409.3	1020855.12
	工业源	12185729	338892.7	814307.06	158772.3	233645.7	125193.6	43325.63
	电厂源	228548.3	30142.25	6606.3	18896.18	2731.65	402.58	0

城市	源排放种类	CO	NO _x	VOCs	SO ₂	PM _{2.5}	PMC	NH ₃
	居民源	1348268.75	34597.01	237189.27	55168.73	67703.44	17147.95	41026.78
	移动源	496485.84	684449.88	502404.47	30204.97	20290.29	1124.72	18346.38
	生物质燃烧源	234140.53	21377.17	217849.22	3620.93	26367.21	886.61	5591.26
	扬尘源	0	0	0	0	214635.25	643477.1	0
	溶剂使用源	0	0	402364.62	0	0	0	0
	总量	14493173	1109459	2180721	266663.1	671225.88	1211642	1129145.12

5.2.4 气象模拟结果评估

图 5-7~图 5-12 为 2019 年 4-9 月湿度、温度、风向、风速的模拟值与观测值的对比情况,从图中可见,模式能够较好地模拟出各气象要素的时间变化趋势,二者具有较高的一致性。

表 5-10 为各气象要素模拟效果统计指标。可以看到, WRF 模式能够较合理地除湿度以外的各气象要素进行模拟:对湿度而言,其在 4-9 月 Bias 均为负值,且超出推荐值(附表 1)范围较多,说明其在 4-9 月模拟低估较为显著;4-9 月地面气温、风向的 Bias 和 RMSE 均处于推荐值范围,模拟效果较好;各月风速的 RMSE 均满足推荐值范围,但 Bias 较推荐值稍大,说明风速模拟高估较显著。总的来说,气象回溯模拟效果基本满足推荐值范围。

表 5-10 2019 年臭氧季 WRF 回溯模拟评估结果

Time	Hmd Bias	Hmd GE	TMP Bias	TMP RMSE	WD Bias	WD GE	WS Bias	WS RMSE
4 月	-6.57	7.16	0.24	1.07	-2.49	14.16	0.82	0.97
5 月	-8.15	8.29	0.44	1.35	5.68	11.87	0.87	1.04
6 月	-8.12	8.17	0.71	1.27	-2.23	12.59	0.79	0.89
7 月	-9.93	9.93	0.8	1.29	-3.2	10.83	0.62	0.72
8 月	-3.21	5.21	-0.22	0.98	-4.2	15.23	0.68	0.8
9 月	-9.64	9.77	0.1	1.08	-9.15	14.72	0.75	0.86
平均	-7.6	8.08	0.34	1.18	-2.57	13.22	0.75	0.89

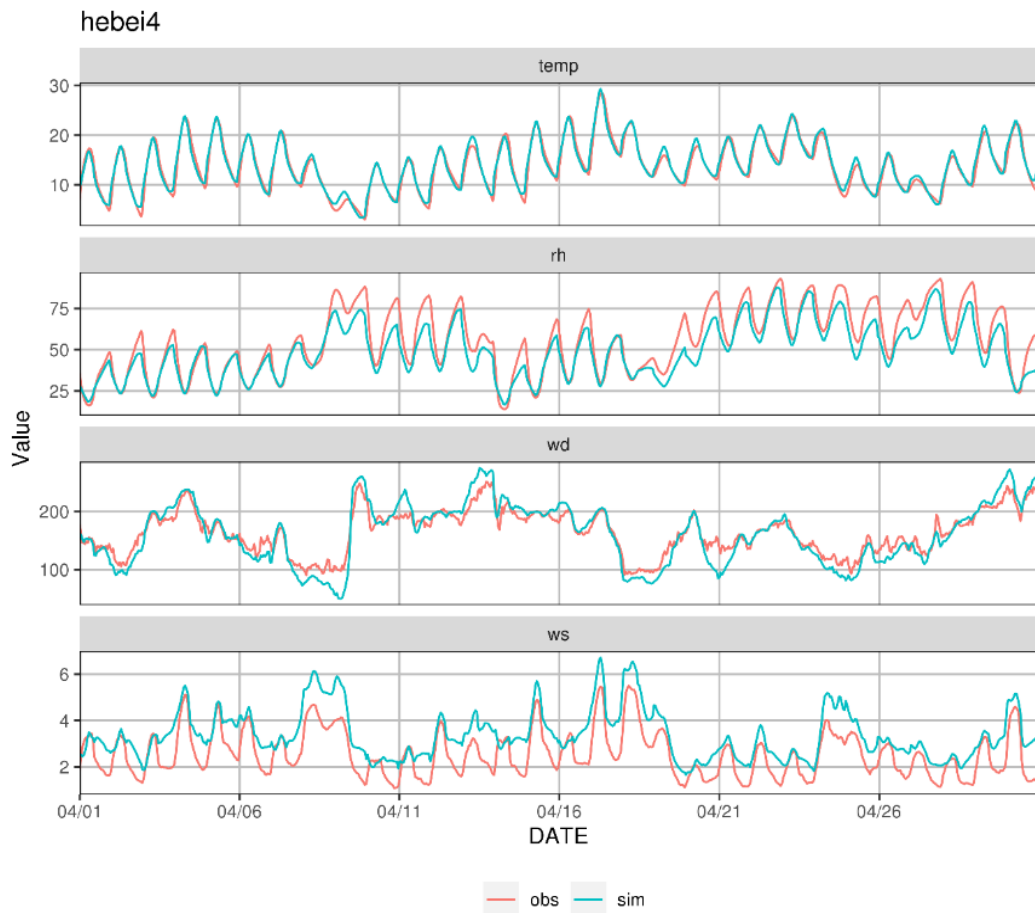


图 5-7 2019 年 4 月湿度、温度、风向、风速模拟值及观测值时间序列

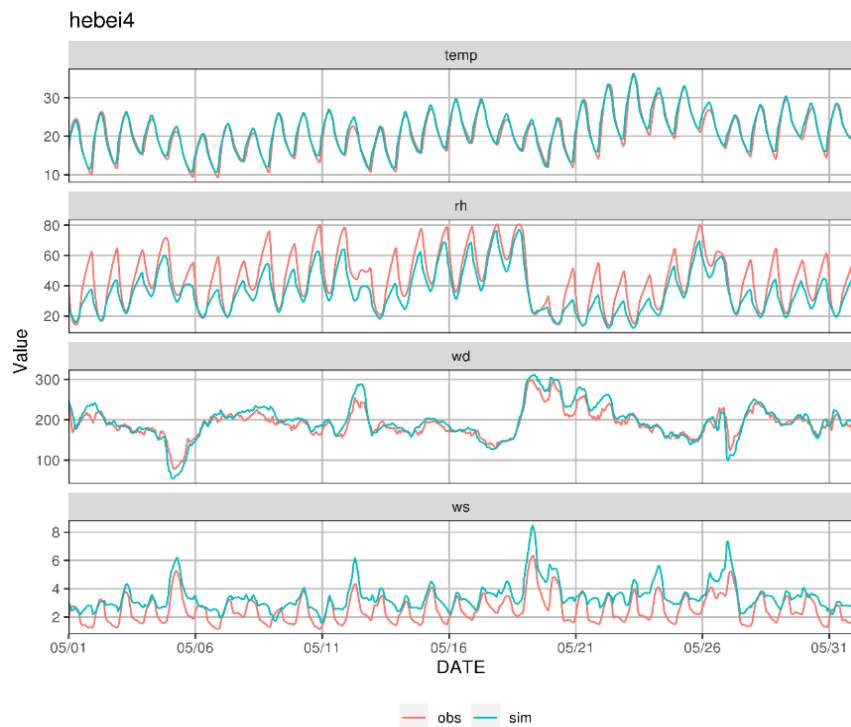


图 5-8 2019 年 5 月湿度、温度、风向、风速模拟值及观测值时间序列

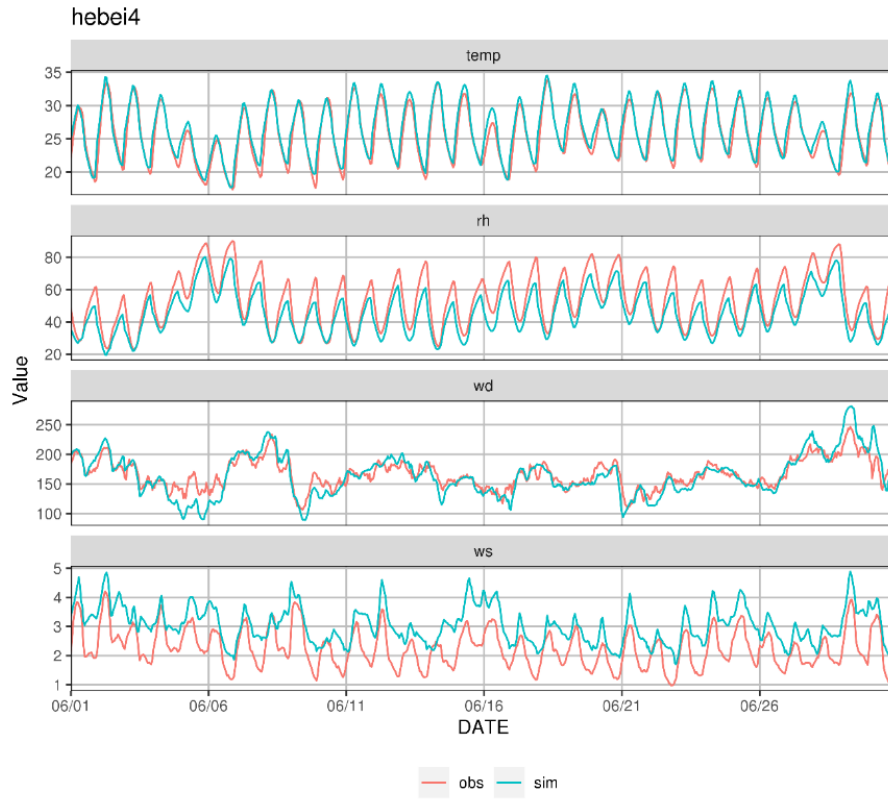


图 5-9 2019 年 6 月湿度、温度、风向、风速模拟值及观测值时间序列

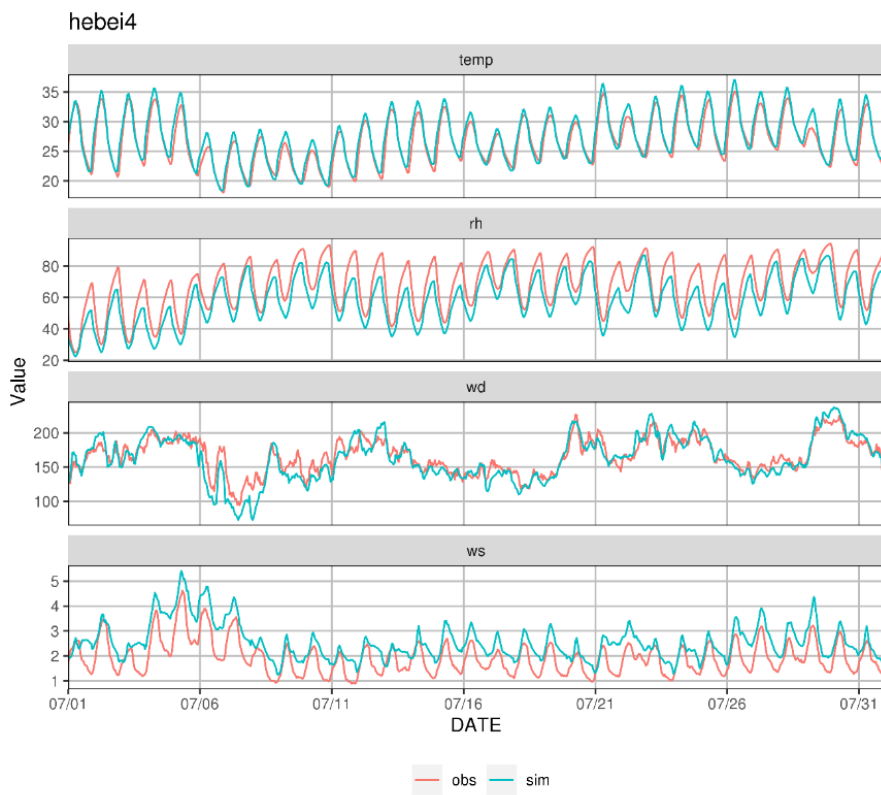


图 5-10 2019 年 7 月湿度、温度、风向、风速模拟值及观测值时间序列

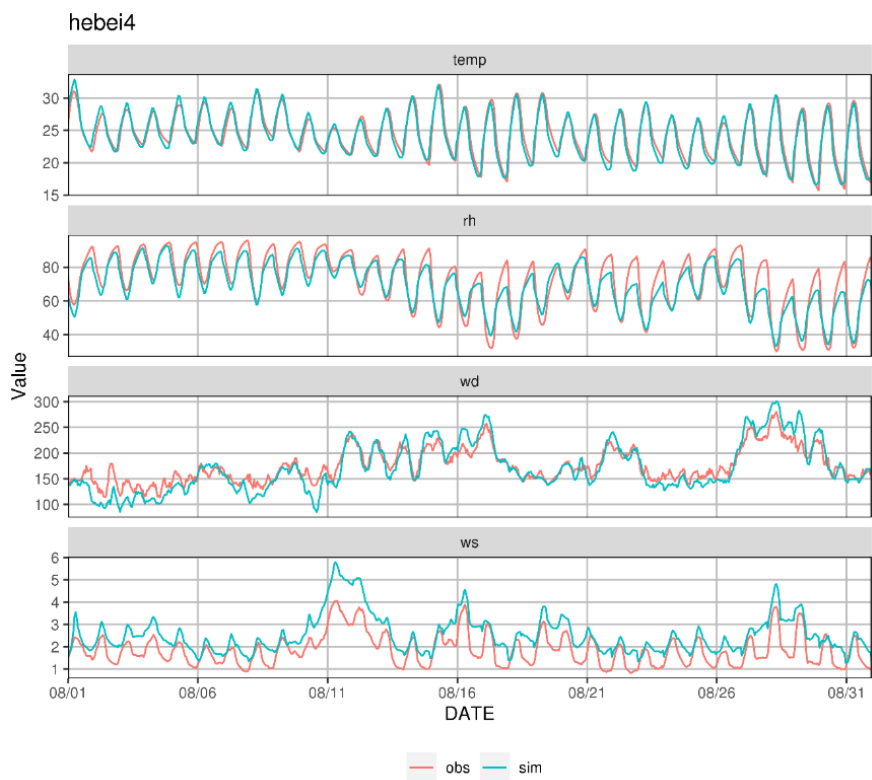


图 5-11 2019 年 8 月湿度、温度、风向、风速模拟值及观测值时间序列

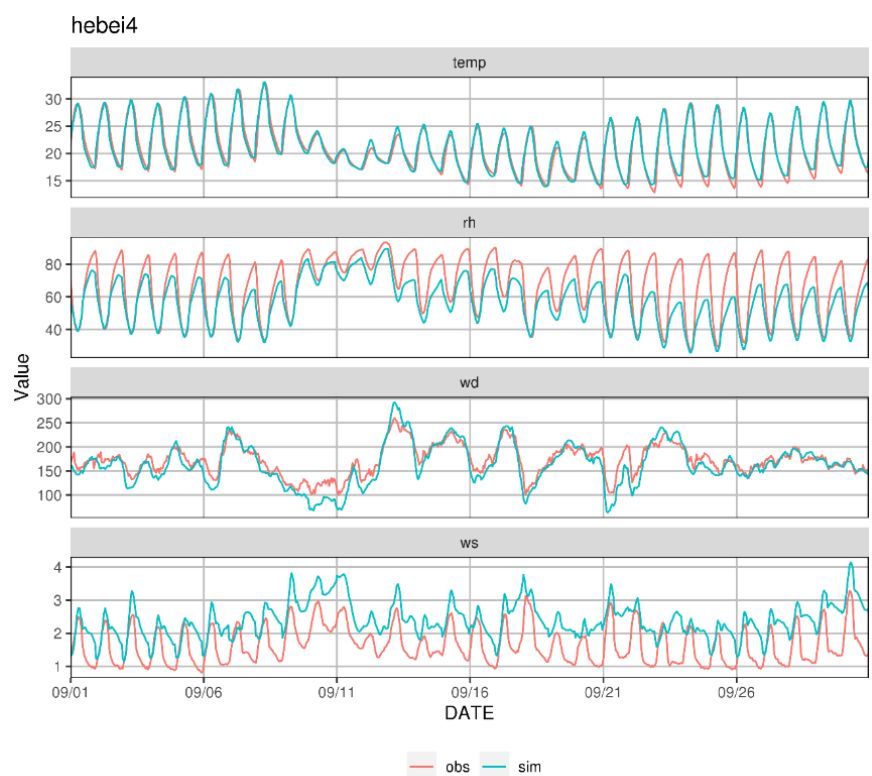


图 5-12 2019 年 9 月湿度、温度、风向、风速模拟值及观测值时间序列

5.2.5 空气质量模拟结果评估

使用 4 公里模拟区域内所有国控站逐日观测数据对空气质量模拟结果进行评估。国控站的数据也被用来计算城市平均观测浓度(剔除相应的城市对照点),与相应的模拟值对比,用于评估区域空气质量的整体模拟状况。

臭氧是最常用来衡量空气质量模式模拟能力表现的物种之一,因为它的生成经历了多种前体物复杂的物理化学反应和传输过程,最能反映空气质量模式系统对排放速率、气象场、各物理化学过程模拟的准确程度。由于本研究重点是臭氧,因此评估也将更侧重臭氧及其前体物 NO_2 。

污染物浓度评估所用观测数据为 2019 年 4~9 月保定、沧州、承德、邯郸、衡水、廊坊、石家庄、唐山、邢台、张家口等 10 个城市逐日的 NO_2 和日最大 8 小时 O_3 浓度。使用下列统计指标评估模拟效果,各指标计算公式如下:

$$\text{NMB} = \frac{\sum(c_i^p - c_i^o)}{\sum c_i^o} \quad (5-1)$$

$$\text{NME} = \frac{\sum |c_i^p - c_i^o|}{\sum c_i^o} \quad (5-2)$$

$$\text{MNB} = \frac{1}{N} \sum \frac{c_i^p - c_i^o}{c_i^o} \quad (5-3)$$

$$\text{MNE} = \frac{1}{N} \sum \frac{|c_i^p - c_i^o|}{c_i^o} \quad (5-4)$$

$$\text{FB} = \frac{1}{N} \sum \frac{c_i^p - c_i^o}{(c_i^p + c_i^o)/2} \quad (5-5)$$

$$\text{FE} = \frac{1}{N} \sum \frac{|c_i^p - c_i^o|}{(c_i^p + c_i^o)/2} \quad (5-6)$$

$$\text{COR} = \frac{\sum(c_i^p - \bar{c}^p)(c_i^o - \bar{c}^o)}{\sqrt{\sum(c_i^p - \bar{c}^p)^2 \cdot \sum(c_i^o - \bar{c}^o)^2}} \quad (5-7)$$

式中 N 表示样本数, C 为浓度,上标 p 代表模拟值、 o 代表观测值。其中, NMB 、 MNB 、 FB 是反映模拟值和观测值的偏离程度的统计量, NME 、 MNE 、 FE 是反映模拟值和观测值之间绝对误差的统计量,这些指标越接近于零,表明模拟值越接近于观测值; COR 反映的是模拟值和观测值变化趋势的吻合程度,该值越接近于 1,表明模拟效果越好。

图 5-13 和表 5-11 是 10 个城市日最大 8 小时 O₃ 浓度模拟值与观测值的对比评估结果。可以看出，回溯模拟较合理地模拟了 2019 年臭氧季大部分城市日最大 8 小时 O₃ 浓度情况和相关性变化。部分臭氧浓度高值低估较为显著，主要是由于排放时空分布的误差以及气象误差共同造成。大部分城市模拟值与观测值的逐日变化相关性良好，相关系数在 0.6-0.8 之间，平均为 0.61。总的来说，几乎所有城市的标准化平均偏差、标准化平均误差这两个统计量均在推荐范围内（阈值分别为±15%和 25%，EPA 2007）。

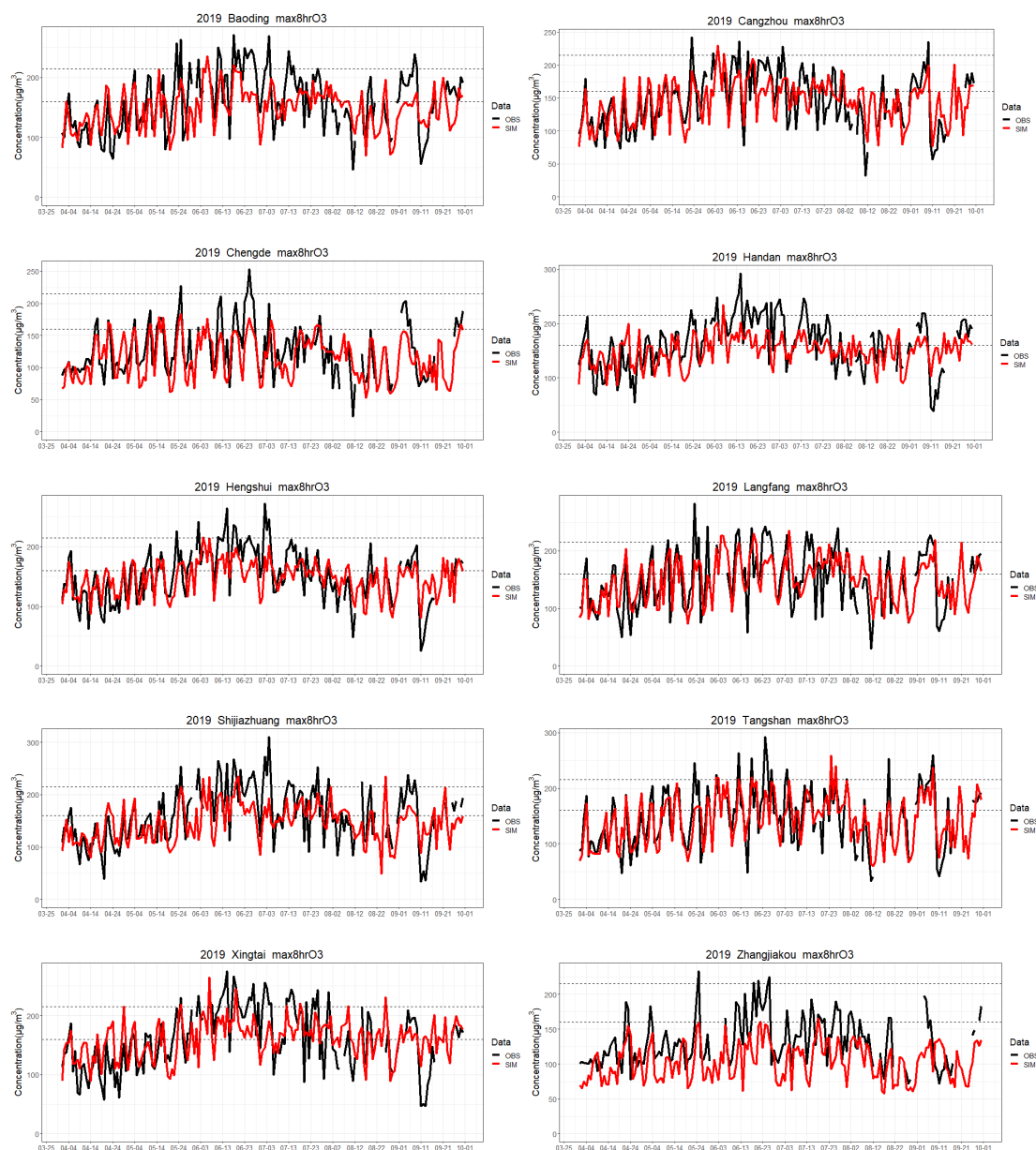


图 5-13 2019 年 4~9 月河北省 10 个城市日最大 8 小时臭氧浓度评估结果

重点城市石家庄、邯郸和衡水臭氧模拟效果良好。从图 5-13 可以看出，重点城市的臭氧模拟值有一定的低估，主要是实测浓度较高的污染日，尤其是石家庄和邯郸较其他城市低估更明显，但统计量 NMB 和 NME 分别是-12~-5%和 18~24%，均在推荐的参考值范围内（Boylan and Russell, 2006）。石家庄、邯郸和衡水代表性站点的日最大 8 小时 O₃ 浓度模拟结果也表明（图 5-14 和表 5-12），模拟值有一定的低估，但误差可以接受，NMB 和 NME 皆在推荐的参考值范围，相关性表现良好。模型对站点的良好模拟效果也表明模型能够反映出城市内部不同地区臭氧浓度的差异，这对于分析城市内部站点臭氧浓度对前体物的敏感性，制定针对性和有效性更强的污染控制方案具有重要意义。

表 5-11 2019 年 4~9 月河北省 10 个城市日最大 8 小时臭氧浓度评估结果

城市	平均百分比偏差 (FB)	平均百分比误差 (FE)	平均标准化偏差 (MNB)	平均标准化误差 (MNE)	标准化平均偏差 (NMB)	标准化平均误差 (NME)	相关性 (R)
保定	-0.05	0.24	0	0.25	-0.07	0.22	0.56
沧州	0.01	0.19	0.05	0.21	-0.01	0.18	0.67
承德	-0.07	0.24	-0.01	0.25	-0.07	0.22	0.65
邯郸	-0.1	0.24	-0.05	0.25	-0.12	0.22	0.57
衡水	-0.01	0.2	0.03	0.22	-0.05	0.18	0.65
廊坊	0.02	0.22	0.09	0.27	0	0.21	0.62
石家庄	-0.05	0.26	0.02	0.29	-0.08	0.24	0.54
唐山	-0.01	0.22	0.04	0.24	-0.03	0.2	0.75
邢台	0.04	0.23	0.11	0.28	0	0.22	0.53
张家口	-0.19	0.27	-0.15	0.24	-0.18	0.25	0.58

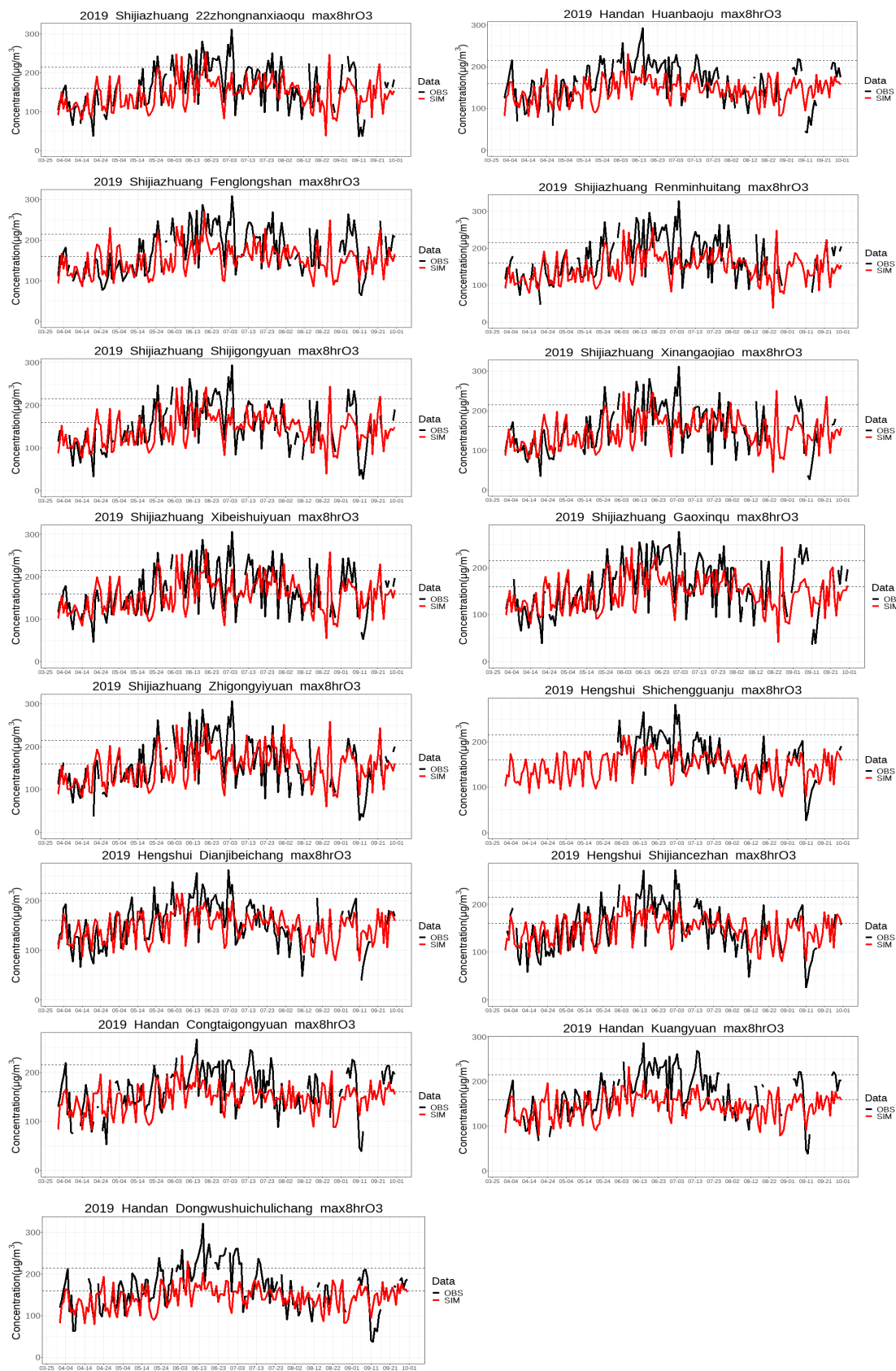


图 5-14 2019 年 4~9 月石家庄、邯郸及衡水代表性站点日最大 8 小时臭氧模拟值观测值时间序列

表 5-12 2019 年 4~9 月石家庄、邯郸及衡水代表性站点日最大 8 小时臭氧评估结果

城市	站点	平均百分比偏差 (FB)	平均百分比误差 (FE)	平均标准化偏差 (MNB)	平均标准化误差 (MNE)	标准化平均偏差 (NMB)	标准化平均误差 (NME)	相关性 (R)
石家庄	职工医院	0	0.26	0.1	0.32	-0.03	0.24	0.5
	高新区	-0.05	0.25	0.01	0.27	-0.08	0.23	0.58
	西北水源	-0.03	0.24	0.03	0.26	-0.05	0.22	0.52
	西南高教	-0.01	0.27	0.1	0.34	-0.05	0.25	0.51
	世纪公园	-0.02	0.27	0.06	0.31	-0.06	0.24	0.55
	人民会堂	-0.13	0.27	-0.07	0.27	-0.14	0.25	0.53
	封龙山	-0.09	0.24	-0.05	0.23	-0.11	0.23	0.53
	22 中南校区	-0.06	0.27	0.01	0.29	-0.1	0.24	0.57
邯郸	环保局	-0.09	0.24	-0.04	0.25	-0.11	0.22	0.56
	东污水处理厂	-0.11	0.25	-0.06	0.26	-0.14	0.23	0.57
	矿院	-0.13	0.25	-0.08	0.25	-0.15	0.23	0.6
	丛台公园	-0.08	0.23	-0.03	0.24	-0.1	0.21	0.54
衡水	电机北厂	0	0.19	0.04	0.21	-0.03	0.18	0.63
	市监测站	0.02	0.21	0.07	0.24	-0.02	0.19	0.65
	市城管局	-0.06	0.2	-0.02	0.22	-0.09	0.18	0.67

从城市 NO_2 平均浓度模拟结果来看（图 5-15、表 5-13），绝大部分城市 NO_2 模拟值有所偏低，仅邯郸和石家庄有所高估，城市 NO_2 相关系数在 0.30-0.59 之间，平均为 0.44。另外，城市之间、同一个城市的站点之间的模拟表现差异较大，以石家庄为例（图 5-16、表 5-14），除了西北水源站点 NO_2 有所低估以外，其余站点皆高估，而相关性方面，封龙山站点相关性远远差于其余站点，主要是排放的空间误差导致。

总体来说，数值模式系统能够较好地回溯再现河北省 2019 年臭氧季的臭氧污染水平和逐日变化。上述空气质量模式模拟利用城市实测数据进行评估的较好结果，表明本研究模式模拟的空气质量场符合进一步进行控制决策方案制定的相关计算的要求。

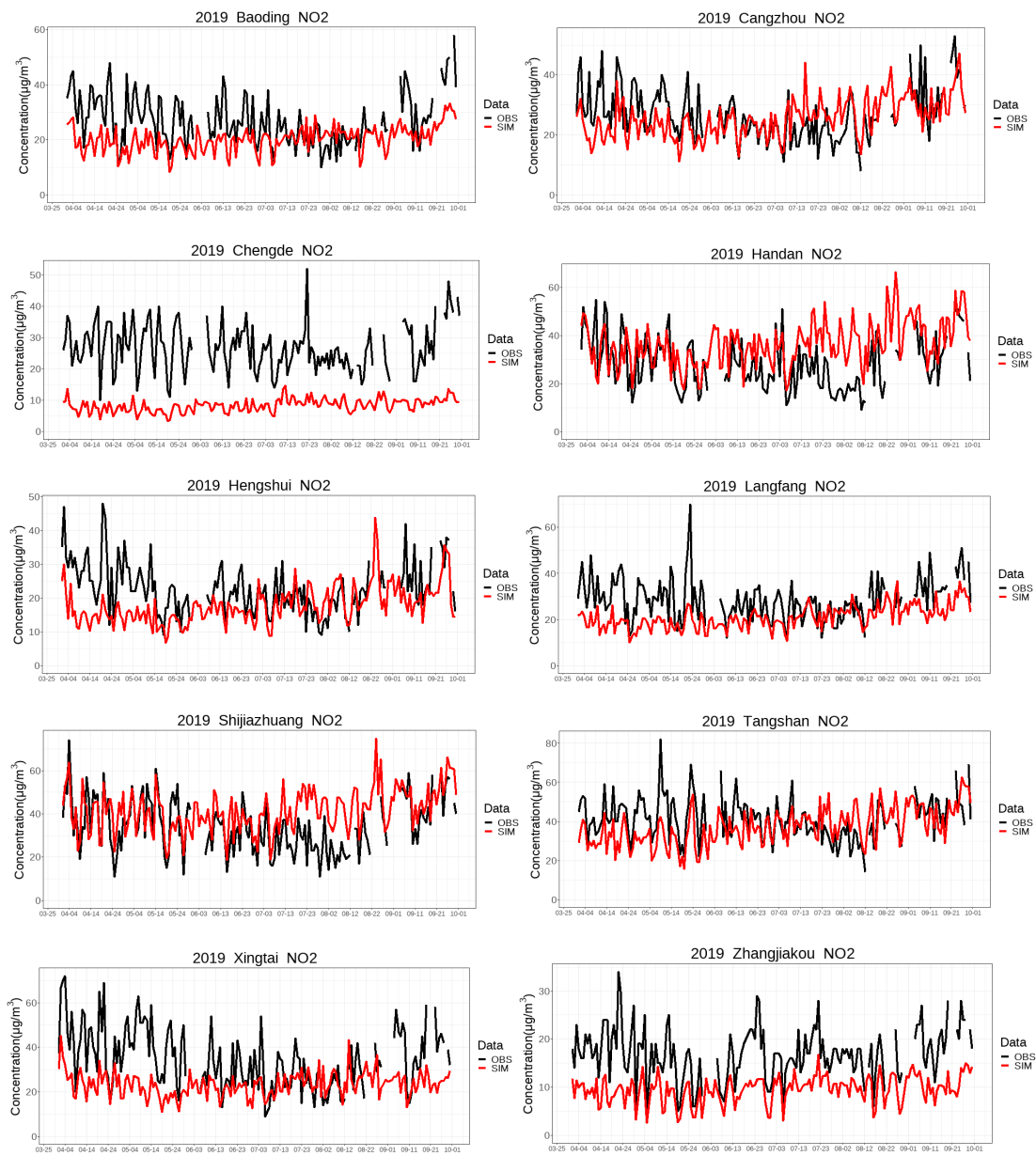


图 5-15 2019 年 4~9 月河北省 10 个城市 NO₂ 日均模拟值和观测值时间序列

表 5-13 2019 年 4~9 月河北省 10 个城市 NO₂ 日均评估结果

城市	平均百分比偏差 (FB)	平均百分比误差 (FE)	平均标准化偏差 (MNB)	平均标准化误差 (MNE)	标准化平均偏差 (NMB)	标准化平均误差 (NME)	相关性 (R)
保定	-0.14	0.32	-0.06	0.3	-0.15	0.3	0.44
沧州	-0.01	0.28	0.05	0.3	-0.03	0.27	0.4
承德	-1.05	1.05	-0.67	0.68	-0.69	0.69	0.3
邯郸	0.52	0.55	0.88	0.9	0.69	0.72	0.46
衡水	-0.2	0.34	-0.12	0.3	-0.19	0.31	0.39
廊坊	-0.3	0.37	-0.22	0.32	-0.28	0.33	0.47
石家庄	0.19	0.35	0.33	0.46	0.21	0.37	0.56
唐山	0	0.24	0.06	0.26	0	0.24	0.43
邢台	-0.35	0.48	-0.22	0.4	-0.33	0.42	0.35
张家口	-0.59	0.62	-0.4	0.43	-0.43	0.44	0.59

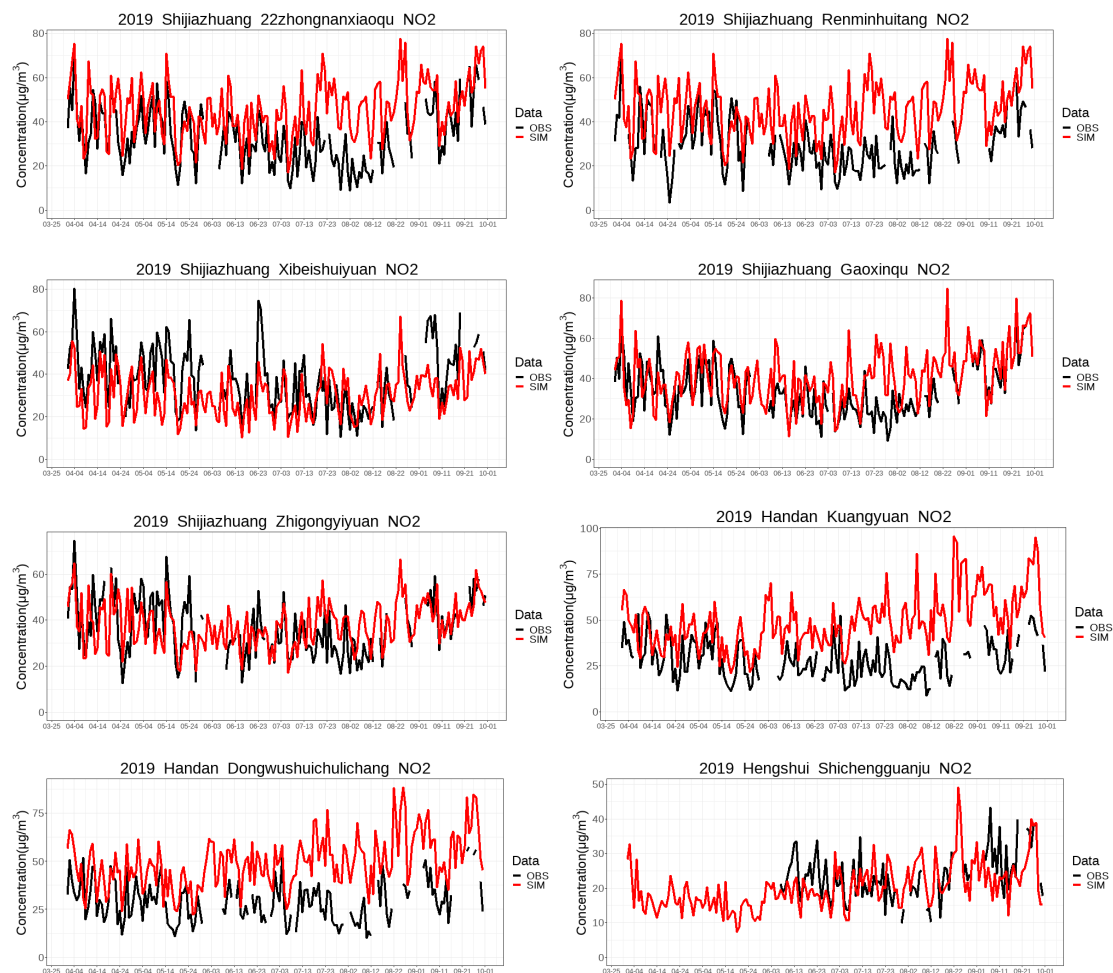


图 5-16 2019 年 4~9 月石家庄、邯郸及衡水代表性站点日均 NO₂ 模拟值观测值时间序列

表 5-14 2019 年 4~9 月石家庄、邯郸及衡水代表性站点日均 NO₂ 评估结果

城市	站点	平均百分比偏差 (FB)	平均百分比误差 (FE)	平均标准化偏差 (MNB)	平均标准化误差 (MNE)	标准化平均偏差 (NMB)	标准化平均误差 (NME)	相关性 (R)
石家庄	职工医院	0.05	0.24	0.1	0.27	0.03	0.23	0.6
	高新区	0.2	0.28	0.3	0.37	0.21	0.29	0.64
	西北水源	-0.21	0.32	-0.14	0.29	-0.2	0.29	0.65
	西南高教	0.25	0.32	0.38	0.44	0.24	0.33	0.55
	世纪公园	0.42	0.44	0.65	0.66	0.51	0.54	0.48
	人民会堂	0.43	0.46	0.68	0.7	0.51	0.54	0.6
	封龙山	0.01	0.34	0.14	0.41	-0.01	0.34	0.29
	22 中南校区	0.34	0.37	0.51	0.53	0.36	0.4	0.65
邯郸	环保局	0.66	0.67	1.22	1.23	0.92	0.93	0.4
	东污水处理厂	0.5	0.51	0.79	0.8	0.64	0.65	0.59
	矿院	0.53	0.55	0.87	0.88	0.68	0.71	0.5
	丛台公园	0.41	0.47	0.66	0.71	0.51	0.58	0.36
衡水	电机北厂	-0.08	0.29	-0.01	0.29	-0.11	0.28	0.47
	市监测站	-0.44	0.49	-0.32	0.37	-0.37	0.41	0.19
	市城管局	-0.08	0.24	-0.04	0.23	-0.09	0.23	0.52

5.2.6 模拟的臭氧污染区域特征

选取模式模拟的部分污染日绘制臭氧日最大 8 小时平均浓度的空间分布，如图 5-17 所示，空间分布图严格按国标的臭氧等级分割模拟浓度并按国家标准的等级颜色着色。8 个污染日均为典型的臭氧污染日，整个区域地面气温高、云覆盖小、地面风速小、相对湿度低、天然源 VOCs 排放量高，给臭氧的生成和积聚提供了有利条件。其中 2019 年 6 月 15 日邯郸、邢台皆出现了重度污染，保定、衡水、廊坊、石家庄和张家口分别出现了轻度或中度污染，但模式模拟区域上稍有偏差，张家口并未在污染范围内，邯郸、邢台模拟到中度污染。总体模拟可以反应区域污染，但是具体的城市以及污染程度会稍有偏差。

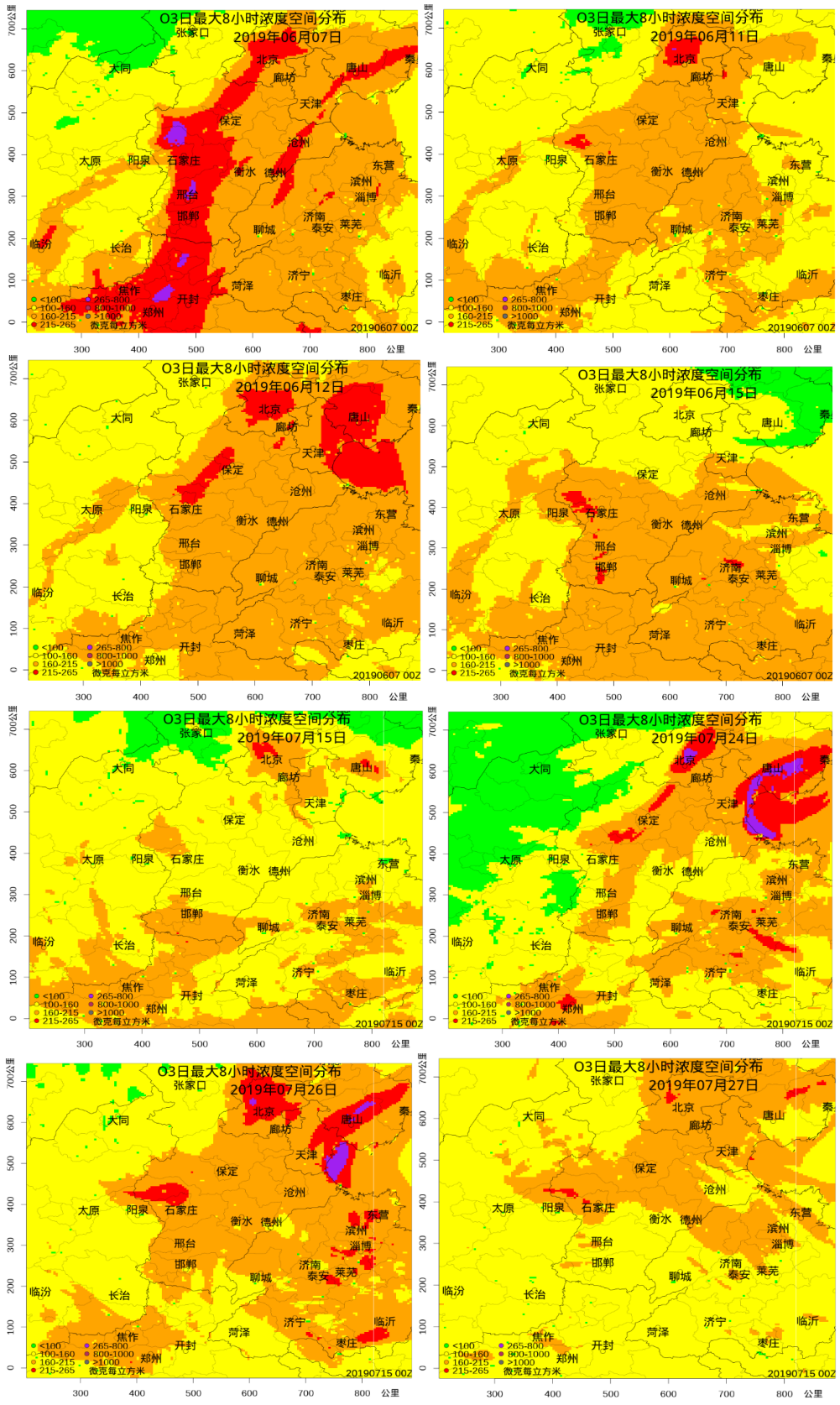


图 5-17 臭氧污染较严重日的臭氧日最大 8 小时平均浓度的空间分布图

5.3 臭氧浓度敏感性回溯模拟分析

根据对模拟时段逐日污染气象条件和空气质量场空间分布特征以及河北省各城市各国控站点实测臭氧浓度数据的分析，对如表 5-15 所列的 DDM 参数进行了 CMAQ-DDM-3D 的模拟计算。分别计算了 4-km 模拟域范围内臭氧浓度对七类污染源（生物质燃烧、移动源、电厂、工业、居民、溶剂使用、天然源）排放的 NO_x 和 VOCs 的一阶敏感性系数，确定臭氧浓度对这 13 个排放源的响应情况。本节重点展示石家庄、邯郸和衡水等城市的敏感性相关结果。

表 5-15 CMAQ-DDM-3D 臭氧敏感性计算的 DDM 参数设置

源分类	NO_x 排放	VOCs 排放
工业源	IN	IV
电厂源	PN	PV
民用源	RN	RV
移动源	TN	TV
生物质燃烧源	FN	FV
溶剂使用	-	SV
天然源	BN	BV

5.3.1 DDM-3D 模拟的敏感性系数的日变化特征

图 5-18 展示的是 2019 年 6 月 7 日~6 月 18 日石家庄、邯郸和衡水城市国控站点平均（对照点未计算在内）臭氧 8 小时滑动平均浓度对各 DDM 参数的敏感性系数的时间序列（逐时），显示了臭氧浓度对各源排放种类的敏感程度日变化特征。

由图可见，臭氧浓度对 VOCs 源的敏感性系数总是正值，其数值随着日出开始增加，中午前后即在太阳辐射最强时达到峰值，然后敏感性开始减弱，日落时敏感性变得微弱。在各类源中，石家庄臭氧对工业源 VOCs 和 NO_x 以及移动源 VOCs 和 NO_x 更为敏感。臭氧浓度对工业源和移动源 NO_x 的敏感性系数在一天中的大部分时间都是负值，即消耗臭氧，尤其是夜间，在夜间午夜左右，敏感性系数的负值达到最低，即对臭氧的滴定作用最大，随着日出其对臭氧的滴定作用开始逐渐减弱，部分天在中午前后敏感性开始变为正值，并在臭

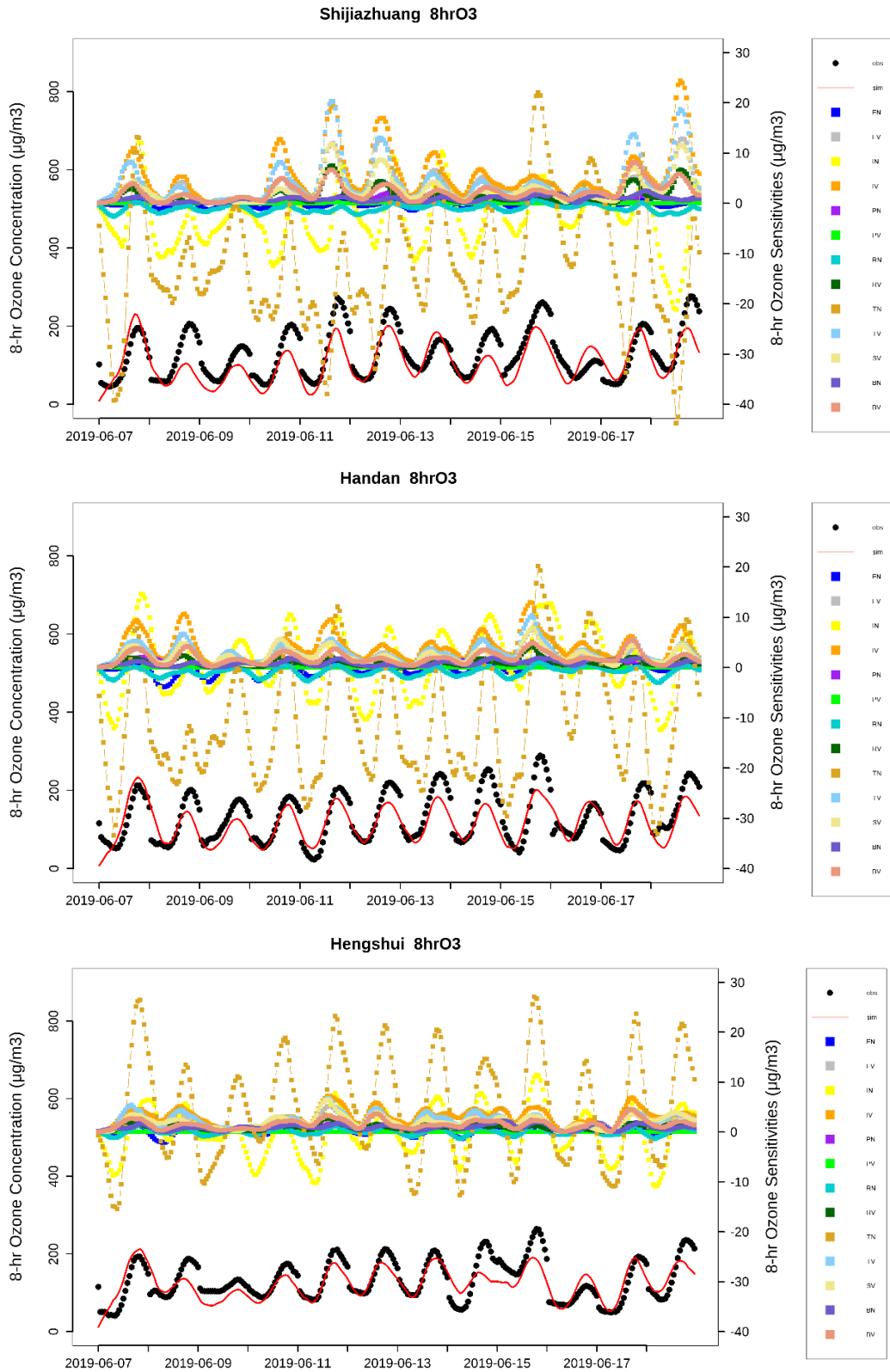


图 5-18 由 CMAQ-DDM-3D 计算的 2019 年 6 月 7 日~6 月 18 日石家庄、邯郸和衡水城市平均臭氧滑动 8 小时平均浓度对各个 DDM 源排放参数的敏感性系数与模拟和实测浓度的时间序列对比

氧 8 小时浓度峰值（一般在下午 4、5 点钟）前后表现出显著的正敏感性，随后又开始下降，并在日落前后变为负值，即重新开始消耗臭氧。从逐时敏感性系数的时间序列图来看。邯郸和衡水也有类似日变化特征，但石家庄的移动源滴定作用持续时间更长，敏感性影响更显著。

上面总结的是 NO_x 和 VOCs 敏感性系数日变化的典型特征，具体到不同的气象条件以及不同的源项这些特征会发生一些变化。例如，在臭氧污染不明显的日子，较强的 NO_x 排放也可能在臭氧峰值出现的时候仍然对臭氧生成发生滴定作用，即消耗臭氧。

对石家庄、邯郸和衡水三个城市臭氧对 NO_x 和 VOCs 源排放敏感性系数日变化的典型特征分析表明：（1）控制本地 VOCs 排放有助于在太阳辐射强的白天时段持续降低臭氧生成，不仅有利于抑制臭氧日最大 8 小时平均浓度的超标情况，也可有效抑制臭氧浓度超标时数；（2）控制 NO_x 排放在某些情况下可能导致臭氧浓度上升。

5.3.2 臭氧日最大 8 小时均值对前体物排放敏感度的定量分析

图 5-19 展示的是 2019 年 6 月 7 日~6 月 18 日石家庄、邯郸和衡水臭氧日最大 8 小时平均浓度和各个 DDM 源排放参数的敏感性系数的日累积柱状图，显示了削减相应的臭氧前体物源排放能够降低的相应臭氧日最大 8 小时平均浓度数值。由图可见，在污染天，各市臭氧日最大 8 小时平均浓度对区域内 NO_x 和 VOCs 排放都敏感，特别是对工业源的 NO_x 、移动源的 NO_x ，以及工业源的 VOCs ，移动源的 VOCs 、溶剂使用的 VOCs 和天然源 VOCs 排放最为敏感。以石家庄 2019 年 6 月 11 日为例，臭氧日最大 8 小时平均浓度（观测值为 $264\mu\text{g}/\text{m}^3$ ）对上述 2 个 NO_x 排放和 4 个 VOCs 排放的敏感性系数都在 $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上，显著高于其他排放 NO_x 和 VOCs 的敏感性系数。另外，在相对清洁天以及个别污染天，由于气象条件的变化（差异），重点城市的臭氧日最大 8 小时平均浓度对移动源和工业源的 NO_x 会表现出较高的负值敏感性，尤其是石家庄。比如，2019 年 6 月 11 日石家庄臭氧日最大 8 小时平均浓度对工业源的 NO_x 敏感性低于 $-7\mu\text{g}/\text{m}^3$ ；2019 年 6 月 8 日邯郸臭氧日最大 8 小时平均浓度对移动源的 NO_x 敏感性低于 $-12\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。这将引起制定控制方案时需要对移动源、工业源的 NO_x 排放的削减进行周到细致的考虑。

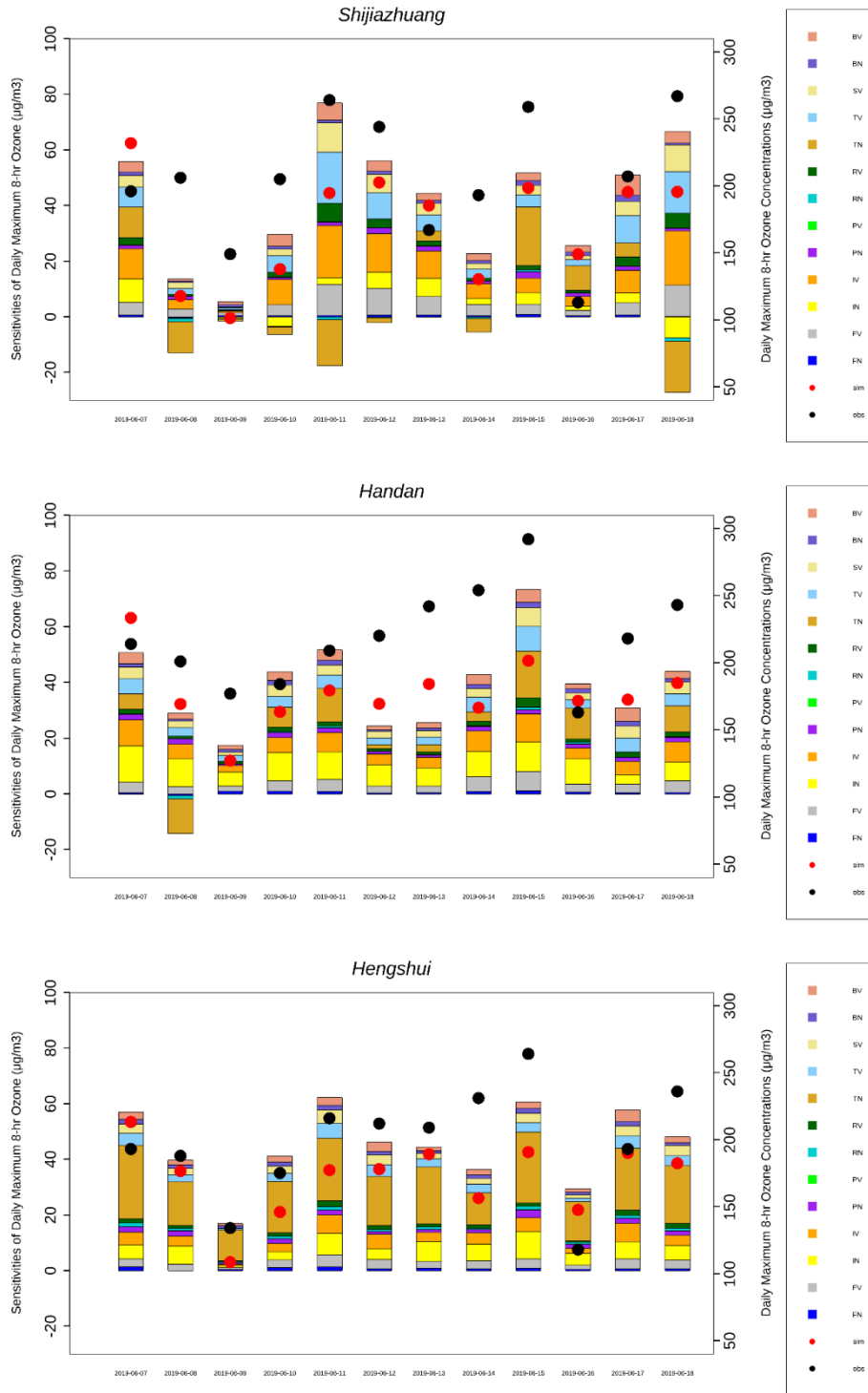


图 5-19 由 CMAQ-DDM-3D 计算的 2019 年 6 月 7 日~6 月 18 日石家庄、邯郸和衡水城市臭氧日最大 8 小时平均浓度对各个 DDM 源排放参数的敏感性系数与模拟和实测浓度的逐日累积柱状图

以上总结的是石家庄、邯郸和衡水等重点城市臭氧污染时段的共同特征，在讨论臭氧对区域内 NO_x 敏感性的较大日间变化时已指出，随着气象条件的不同，敏感性数值的日间变化显著，差异明显，因此针对每天的臭氧浓度利用其敏感性系数得到的达标控制策略即排放削减方案很可能不能满足其他天的达标需求，因此需要对削减方案进行多天的多目标优化处理或者在制定削减方案时首先对多天的浓度观测值和模拟值等进行平均处理（EPA2007）。

5.3.3 臭氧日最大 8 小时浓度对各类源前体物排放敏感性的空间分布

选取臭氧日最大 8 小时平均浓度的敏感性系数（即 CMAQ-DDM-3D 的敏感性计算结果）进行其空间分布特征的分析。图 5-21 展示了 2019 年 7 月 24 日 13 个 DDM 参数的臭氧日最大 8 小时平均浓度的敏感性系数空间分布，并与臭氧日最大 8 小时平均浓度本身的分布进行对比（图 5-20）。

7 月 24 日，石家庄、邯郸、衡水日最大 8 小时臭氧浓度分别是 218、181、165 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，臭氧高值区主要分布河北省中东部及西部。

在各细分源类别中，天然源 VOCs 对城市影响显著且影响大于天然源 NO_x ，大部分地区的 NO_x 敏感性系数都在 -2~5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 左右，而天然源 VOCs 的敏感性系数可达到 5~10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。工业源 NO_x 和 VOCs 排放对城市臭氧浓度有重要影响。其中臭氧对工业源 NO_x 的敏感性系数在城市主城区的中心地带为 -20~-5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的较低水平，而在其他大部分地区都在 5~20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。工业源 VOCs 对臭氧浓度的影响在臭氧的高值区比较大，在 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上，最高可达 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上。电厂源、居民源和生物质燃烧源 NO_x 和 VOCs 排放对臭氧影响均较小，小于 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。移动源 NO_x 的敏感性系数在城市主城区的中心地带为负值，表明移动源 NO_x 排放量较大，其体现出的滴定作用能够在局地抑制臭氧的生成，臭氧浓度对移动源 VOCs 的敏感性较强（普遍大于 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ）。溶剂使用 VOCs 排放对臭氧的影响范围与移动源 VOCs 的影响接近，影响普遍大于 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

总结臭氧生成敏感程度和敏感性系数空间分布的分析结果，可以得到河北省臭氧污染控制策略制定具有指导意义的信息：（1）主城区是臭氧高值区，臭氧生成对本地 VOCs 源排放最为敏感，敏感程度最高的三个 VOCs 排放种类分别是移动源、工业源和溶剂使用。因此，控制这三类源 VOCs 排放是城市主城区臭

氧污染控制的关键；（2）臭氧生成对移动源、工业源 NO_x 排放敏感性在主城区可能为负值，因此臭氧污染控制需要同时考虑控制地区，尤其是针对 NO_x 排放的协同控制。

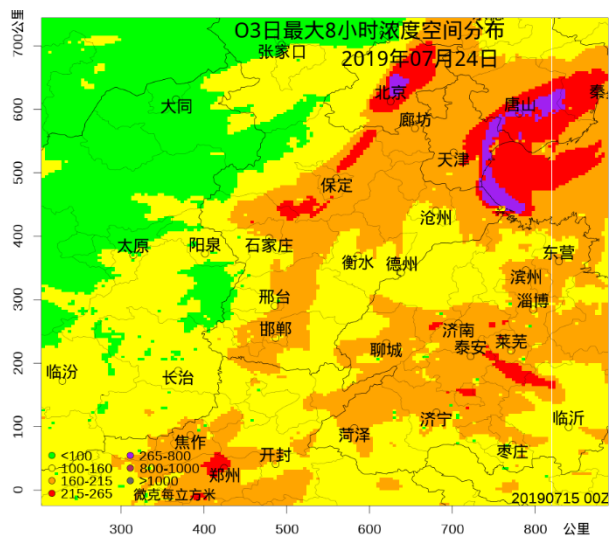
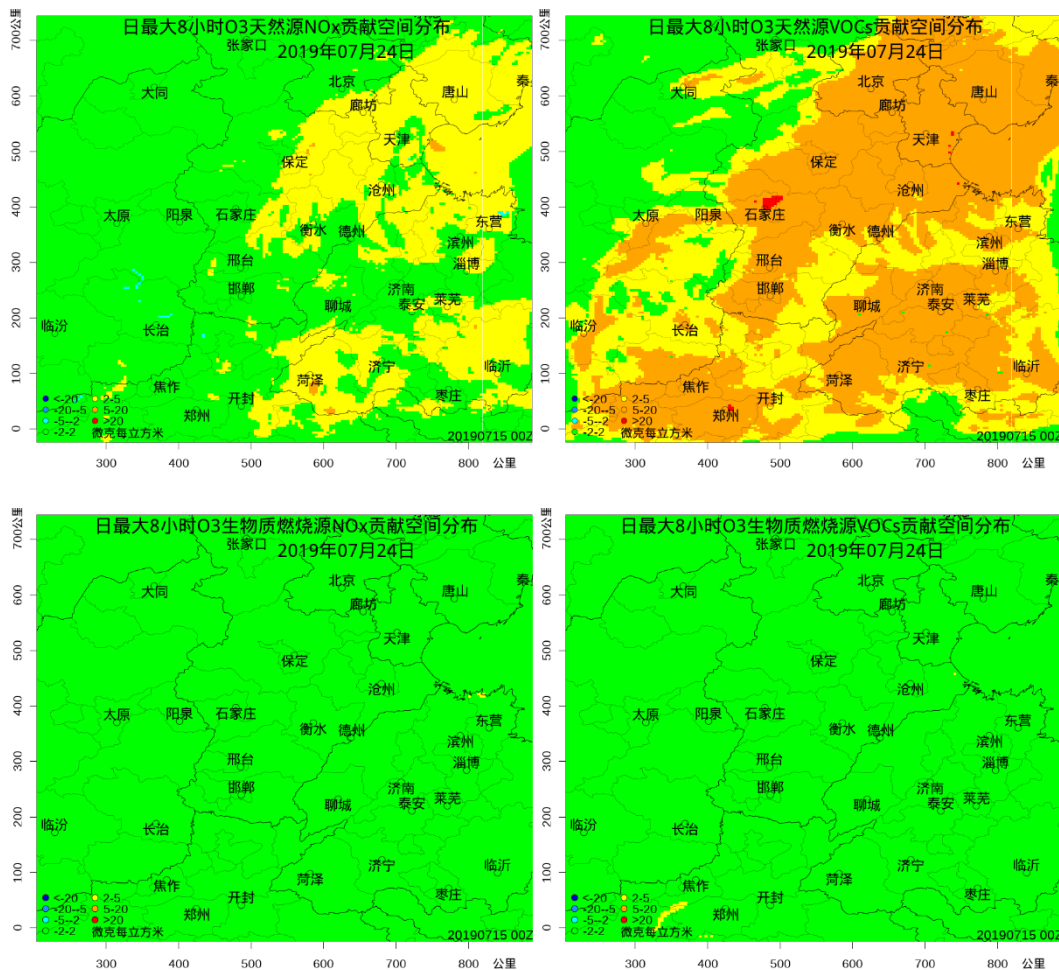
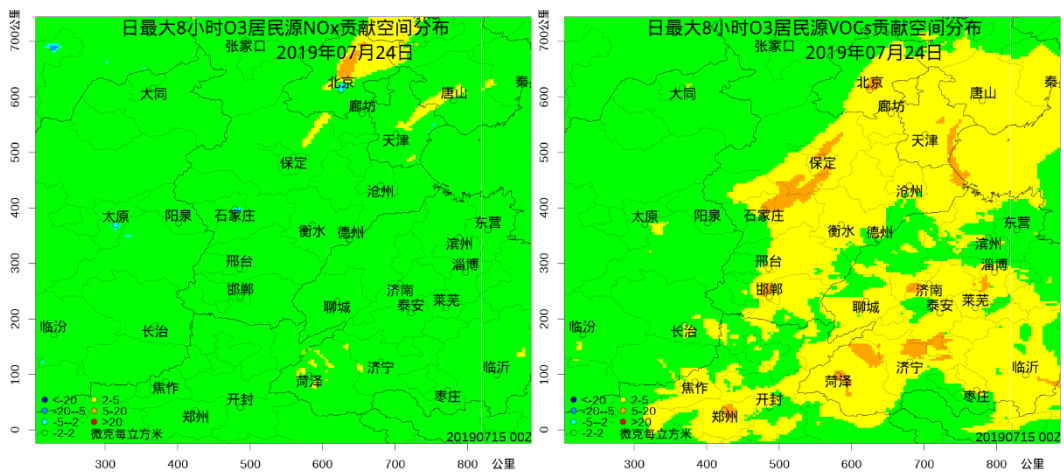
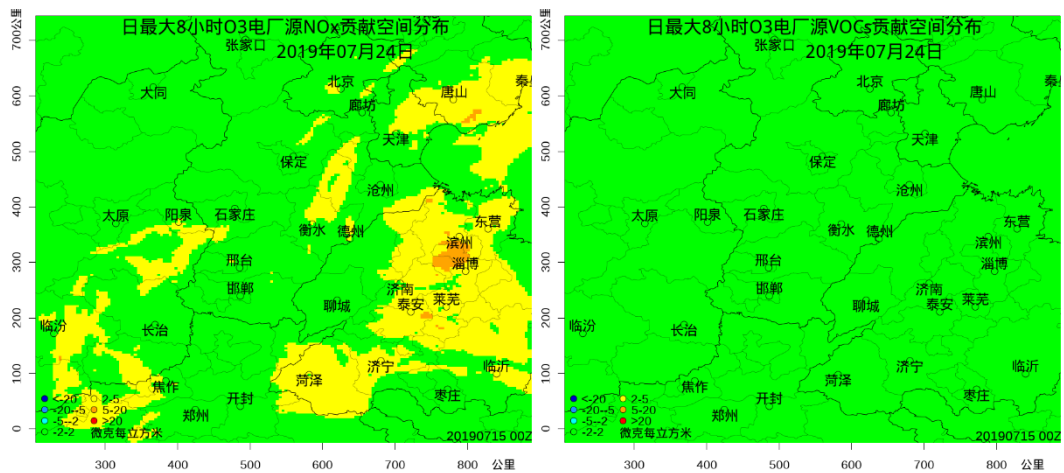
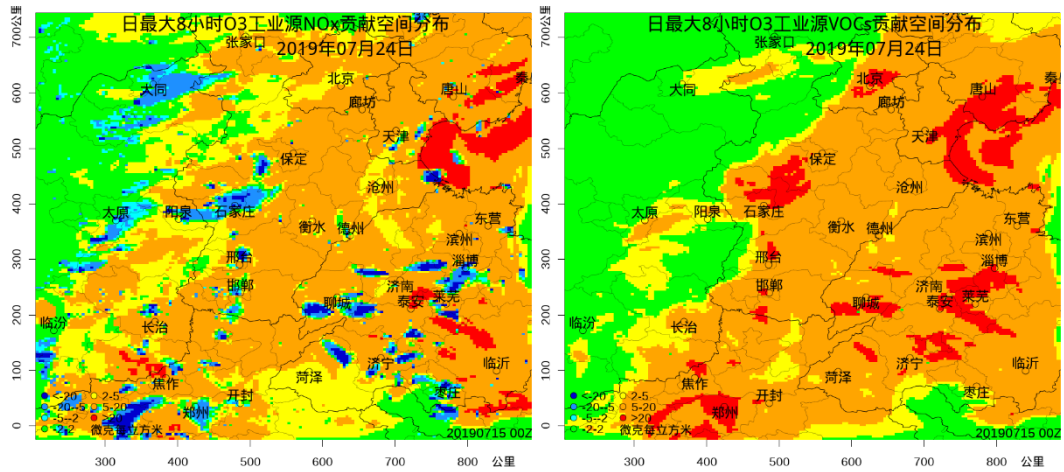


图 5-20 2019 年 7 月 24 日最大 8 小时臭氧浓度空间分布





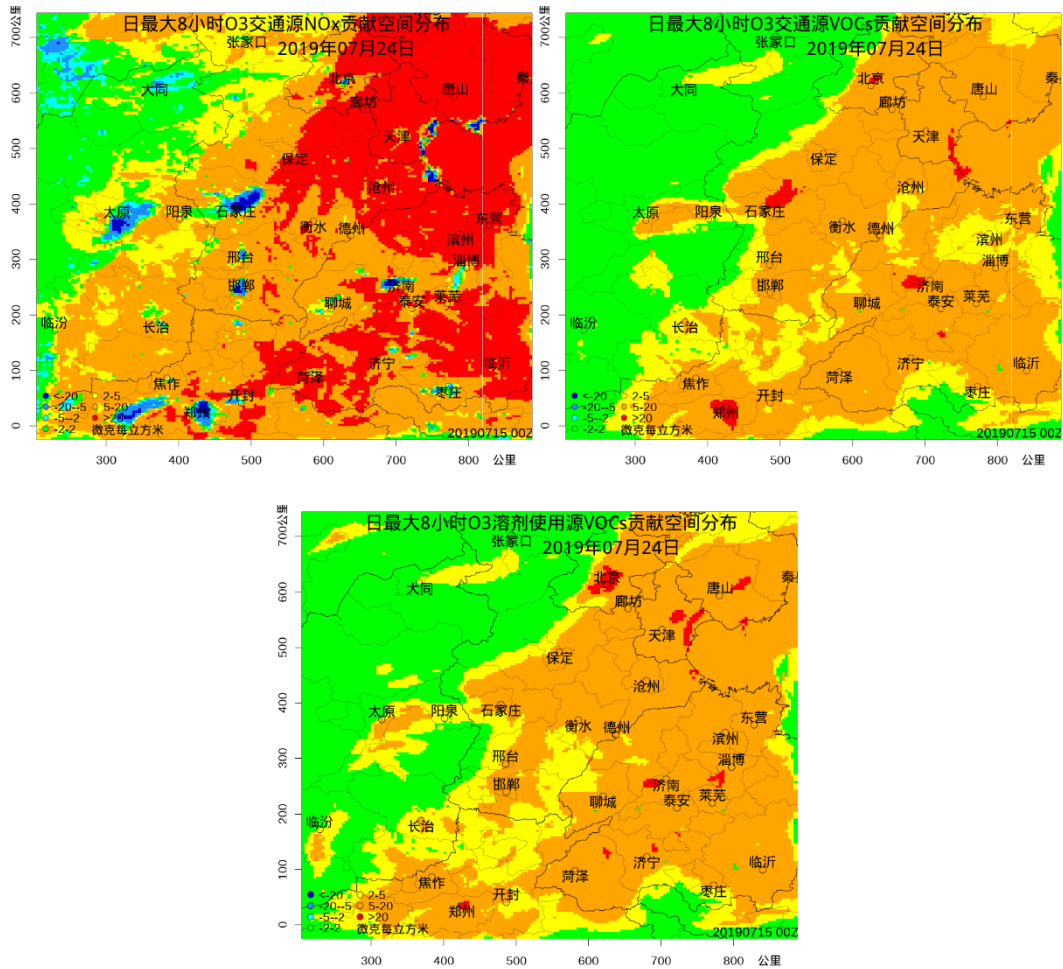


图 5-21 由 CMAQ-DDM-3D 计算的 2019 年 7 月 24 日最大 8 小时臭氧浓度对模拟 4-公里模拟域各类源排放的敏感性空间分布

5.4 基于回溯模拟 EKMA 曲线的控制方案情景分析

EKMA (Empirical Kinetic Modeling Approach) 曲线能够直观地反映臭氧生成与其前体物 NO_x 和 VOCs 排放削减情况之间的非线性关系，帮助政策制定者直接认识和评估不同排放控制政策对于减少 O_3 污染的有效性，被广泛用于设计臭氧污染控制的有效减排途径。通过绘制不同 NO_x 和 VOCs 减排控制情景下的臭氧等浓度曲线图，即可得到 EKMA 曲线。EKMA 曲线随气象条件和空间地点的不同而变化，并没有普适的 EKMA 曲线，而需要因时因地绘制。由于 EKMA 曲线的绘制需要足够多的情景计算以得到足够密集的、与 VOCs 和 NO_x 排放情景相对应的臭氧生成浓度数值，因此制作 EKMA 曲线的过程就是臭氧生成前体

物控制的情景分析计算过程。由于计算量大，如前所述，可以采用 RFM 模式的办法来实现。

5.4.1 EKMA 曲线绘制方法

我们首先利用表 5-16 所列的五个 DDM 参数分别进行 100%人为源排放和 1%人为源排放条件下的 DDM 模拟，即排放条件 *ecase* 分别为 *basecase* 或 *1pctcase*，从而生成两套 DDM 模拟结果。然后分别利用 *basecase* 和 *1pctcase* 的 DDM 系数，构建区域内人为源 NO_x 和 VOCs 排放的臭氧生成浓度的 RFM 模式：

$$C_{RFM,ecase} = C_{ecase,0} + \sum_{j=1}^J \Delta \varepsilon_j S_{ecase,j}^{(1)} + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^J \Delta \varepsilon_j^2 S_{ecase,j,j}^{(2)} + \sum_{j \neq k} \Delta \varepsilon_j \Delta \varepsilon_k S_{ecase,j,k}^{(2)} \quad (5-8)$$

表 5-16 构建用于制作 EKMA 曲线的 RFM 模式的 DDM 参数

代码	DDM 参数
EN	NO _x 排放
EV	VOCs 排放
NN	NO _x 排放二阶
VV	VOCs 排放二阶
NV	NO _x 和 VOCs 排放交叉

100%人为源排放条件下 2019 年 7 月 24 日 O₃ 日最大 8 小时浓度及其对前体物的 5 个一阶和二阶敏感性系数空间分布举例见图 5-22。其中各 DDM 参数的源排放定义为 4 公里模拟域范围的总排放。

然后，基于实测数据，我们计算相对响应因子 RRF (relative response factor, RRF=观测值和模拟值的比值)，并用 RRF 对 RFM 的计算结果进行“修订”： $C'_{RFM} = C_{RFM} * RRF$ 。同时对利用 *basecase* 和 *1pctcase* 的 DDM 系数计算得到并修订后的 RFM 浓度结果进行加权平均（使用削减后的排放比例到 100%或者 1%的距离进行加权平均）。这是一个对 DDM 的模拟采取 *stepwise* 的模拟方法来构筑 RFM 模式的简单应用，据此制作的 EKMA 曲线，将大大减少源削减力度加大时的误差 (Huang et.al., 2017, ES&T)。

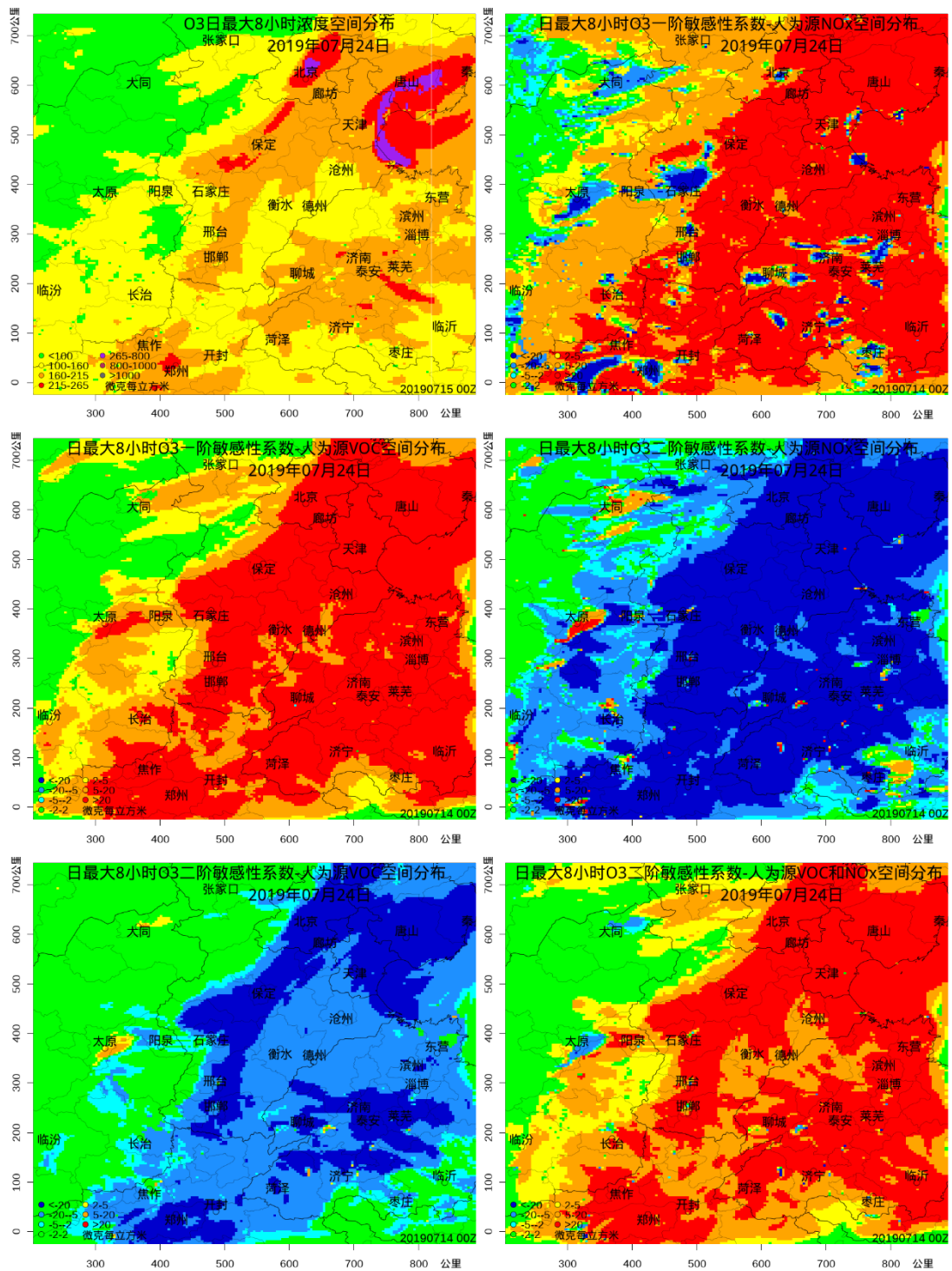


图 5-22 100%人为源排放条件下 2019 年 7 月 24 日 O₃ 日最大 8 小时浓度及其对前体物的敏感性系数空间分布

最后，用经加权平均的 RFM 修订结果绘制 EKMA 曲线。具体过程是通过选取足够小间隔（每次差距选为 0.01）的一组相应 NO_x 和 VOCs 排放削减量，通过 RFM 模式计算并“修订”对应的臭氧浓度预测值最后再加权平均，得到足够密

集的以 VOCs 减排量和 NO_x 减排量分别为横、纵轴的平面空间上的代表臭氧浓度数值的点，然后用这些点连线画出臭氧等浓度曲线图，即为 EKMA 曲线图。

EKMA 曲线可以针对每个站点每天或每小时的臭氧浓度绘制，也可以针对多站点的平均浓度或区域最大浓度进行绘制，分别对应于不同的控制目标。我们绘制逐日的国控站、城市国控站平均的日最大臭氧 8 小时浓度的 EKMA 曲线，用以探讨不同时间、不同污染程度、不同减排目标下的减排途径和措施。我们制作的 EKMA 曲线，对应整个模拟区域（主要包括成都和盆地内各地市）的 NO_x 和 VOCs 减排情景，基本体现了受点的所有前体物影响情况。

5.4.2 重点城市 EKMA 曲线及控制方案情景分析

为了深入探究不同时段的臭氧污染对减排措施的响应，下面选取部分典型臭氧污染日，根据 EKMA 曲线以及细分人为源敏感性结果，对减排方案进行具体分析。

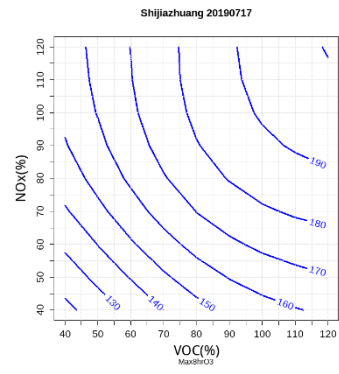
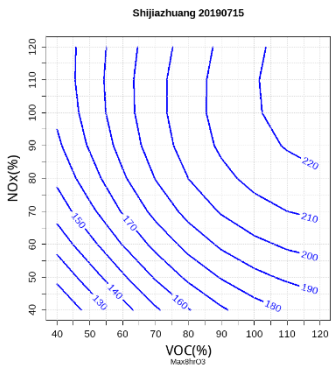
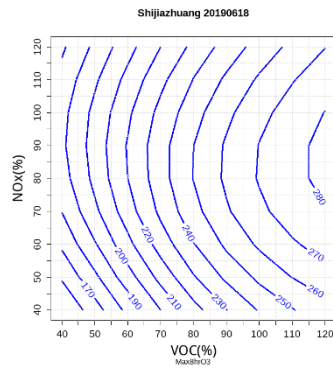
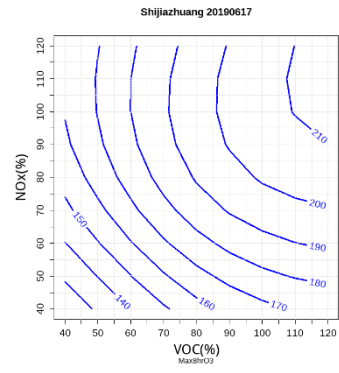
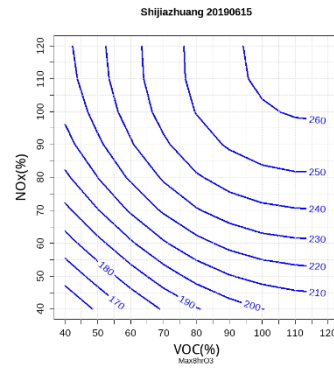
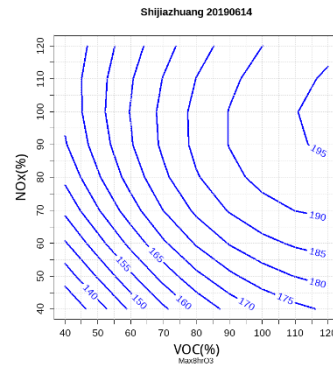
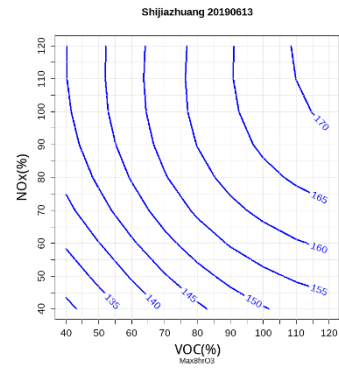
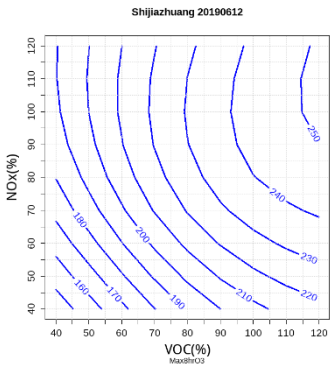
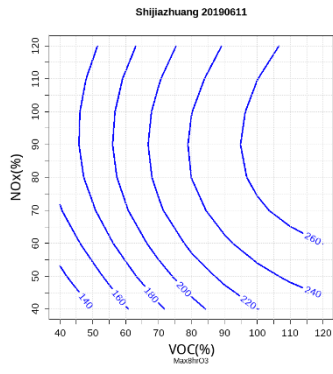
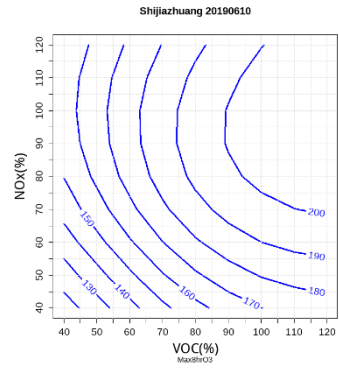
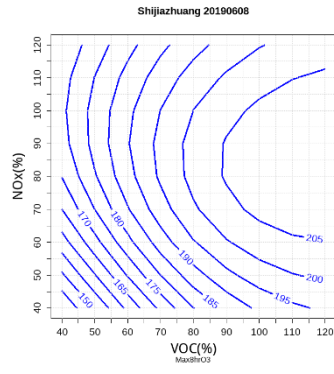
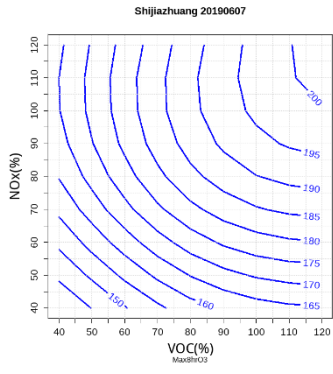
2019 年 6 月 7 日~18 日、2019 年 7 月 15 日~28 日石家庄共出现 13 天轻度污染、5 天中度污染和 1 天重度污染，邯郸共出现 15 天轻度污染、7 天中度污染和 1 天重度污染，衡水共出现 13 天轻度污染、4 天中度污染（表 5-17）；从 EKMA 曲线（图 5-23~图 5-25）读取的建议 NO_x 和 VOCs 最优减排路径如表 5-17 所示：石家庄的绝大部分污染天的减排路径都需要同时减排 NO_x 和 VOCs，且着重减排 VOCs，部分污染天例如 7 月 21 日、23 日、24 日则需要重点加强减排 VOCs；邯郸的 NO_x 和 VOCs 减排路径与石家庄较为相似，大部分天 NO_x 和 VOCs 的减排比例比较接近，部分天需要侧重对 VOCs 的控制，例如 7 月 22 日、23 日和 24 日；衡水与石家庄和邯郸不同，NO_x 和 VOCs 减排路径更侧重于对 NO_x 的减排控制，大部分天在同时减排 NO_x 和 VOCs 的基础上需要更加专注对 NO_x 的控制。

表 5-17 重点城市石家庄、邯郸和衡水 2019 年 6 月 7 日~18 日、2019 年 7 月 15 日~28

日臭氧污染日 NO_x 和 VOCs 建议减排路径

日期	石家庄			邯郸			衡水		
	OBS*	NO _x	VOCs	OBS*	NO _x	VOCs	OBS*	NO _x	VOCs
2019/6/7	196	45%	40%	214	45%	50%	193	50%	20%
2019/6/8	206	45%	53%	201	42%	55%	188	45%	23%
2019/6/9	149			177	30%	25%	134		
2019/6/10	205	25%	49%	184	30%	25%	175	25%	15%
2019/6/11	264	5%	65%	209	43%	35%	216	40%	35%
2019/6/12	244	50%	55%	220	55%	53%	212	48%	40%
2019/6/13	167	5%	22%	242	70%	60%	209	55%	43%
2019/6/14	193	36%	45%	254	55%	45%	231	60%	40%
2019/6/15	259	60%	50%	292	55%	48%	264	60%	50%
2019/6/16	113			163	8%	5%	118		
2019/6/17	207	35%	43%	218	53%	45%	193	39%	25%
2019/6/18	267	40%	68%	243	55%	53%	236	56%	45%
2019/7/15	219	30%	48%	237	40%	42%	192	33%	25%
2019/7/16	155			201	40%	54%	203	40%	42%
2019/7/17	191	30%	35%	162	5%	8%	160		
2019/7/18	208	33%	45%	198	45%	40%	189	30%	25%
2019/7/19	204	15%	46%	199	35%	35%	150		
2019/7/20	111			133			118		
2019/7/21	192	0%	32%	199	35%	35%	198	35%	28%
2019/7/22	91			162	0%	12%	149		
2019/7/23	199	0%	57%	178	0%	30%	142		
2019/7/24	218	0%	47%	181	5%	33%	165	7%	7%
2019/7/25	195	30%	33%	216	30%	45%	171	5%	18%
2019/7/26	253	15%	61%	198	35%	35%	195	33%	25%
2019/7/27	158			125			143		
2019/7/28	198	25%	35%	151			136		

*OBS: 日最大 8 小时臭氧观测浓度 (μg/m³)



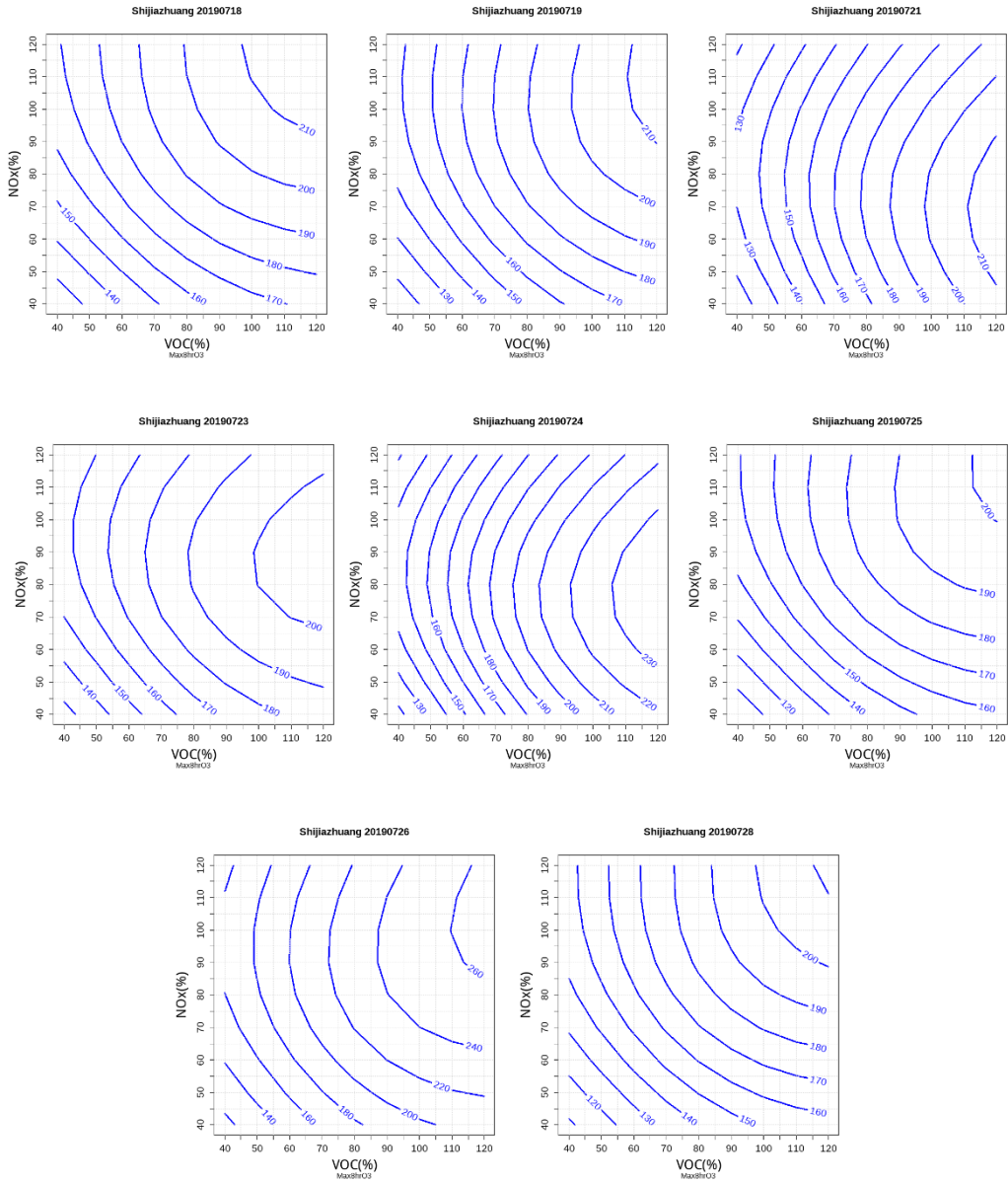
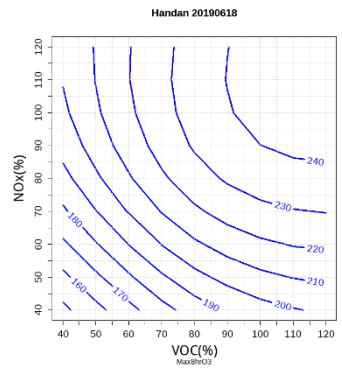
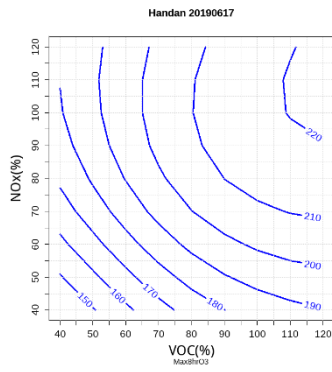
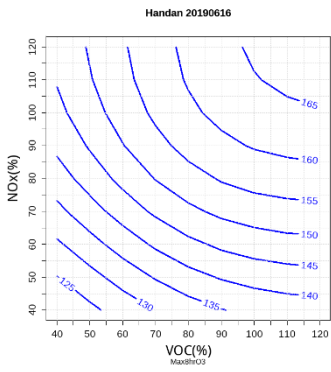
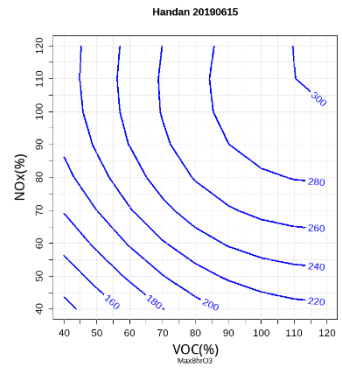
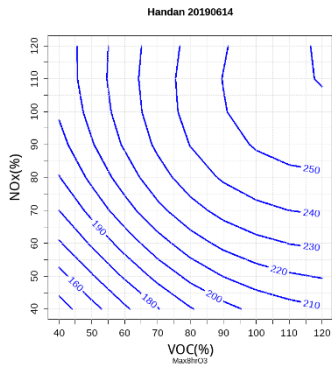
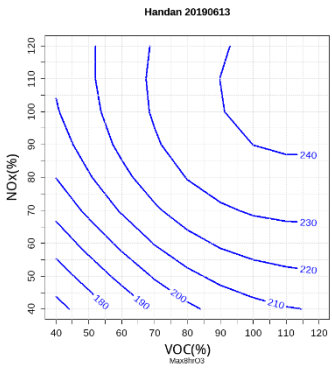
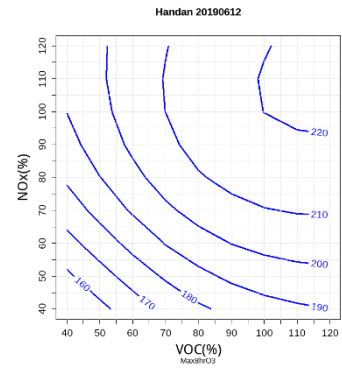
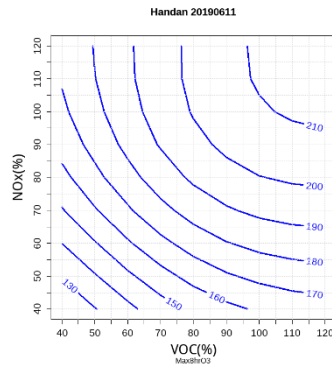
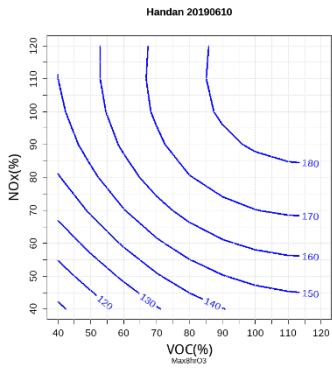
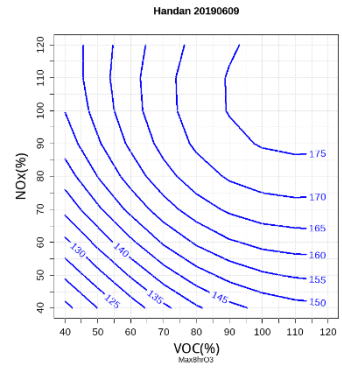
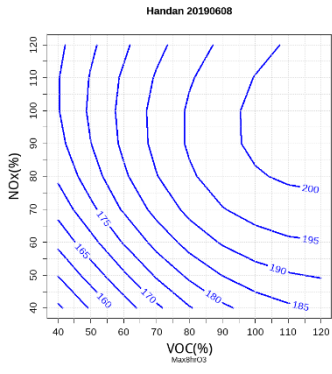
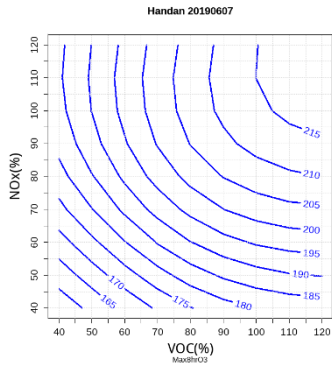


图 5-23 模拟区域人为源 NO_x 和 VOCs 减排对应的石家庄日最大 8 小时臭氧城市平均浓度

EKMA 曲线



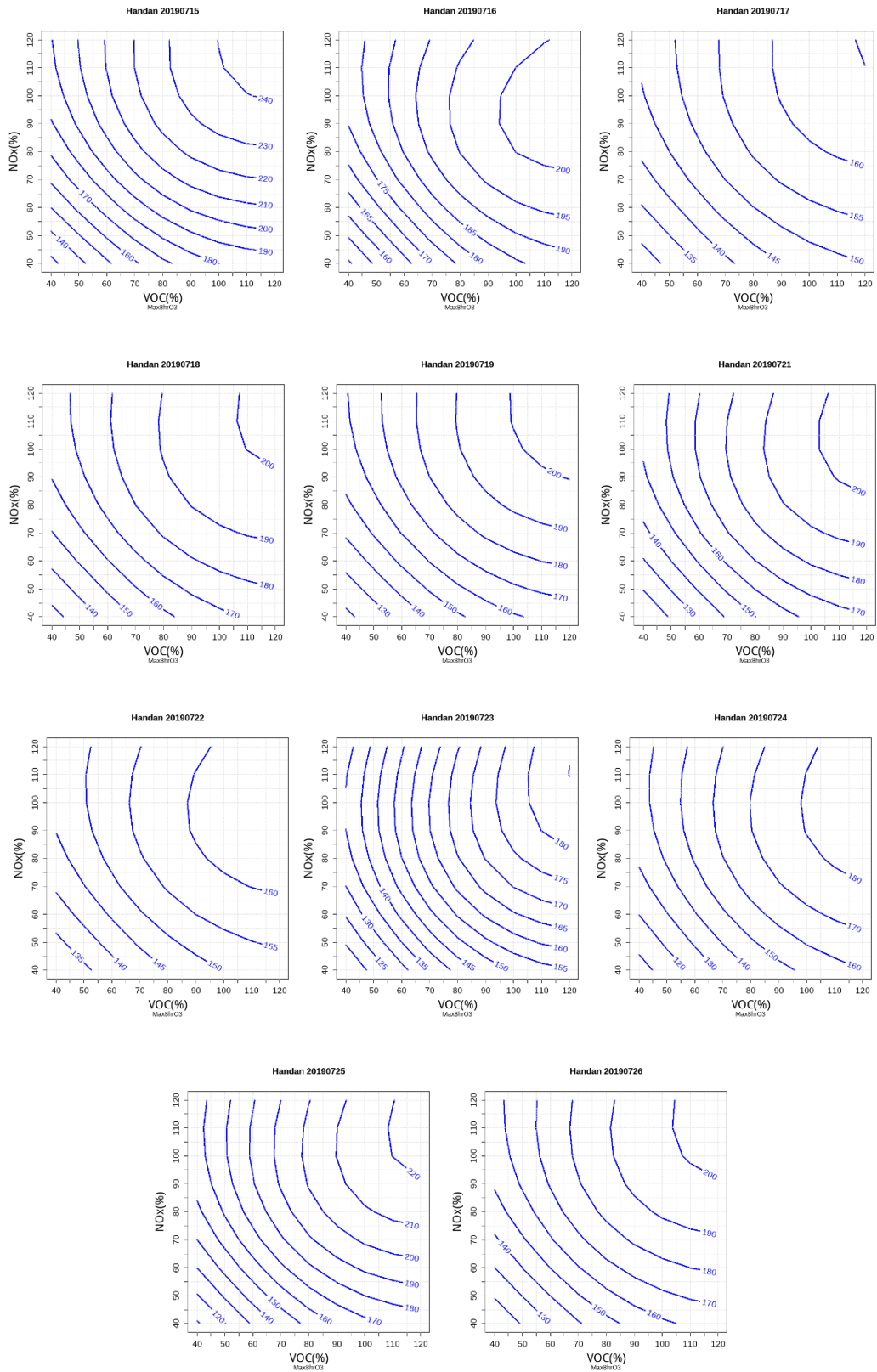


图 5-24 模拟区域人为源 NO_x 和 VOCs 减排对应的邯郸日最大 8 小时臭氧城市平均浓度

EKMA 曲线

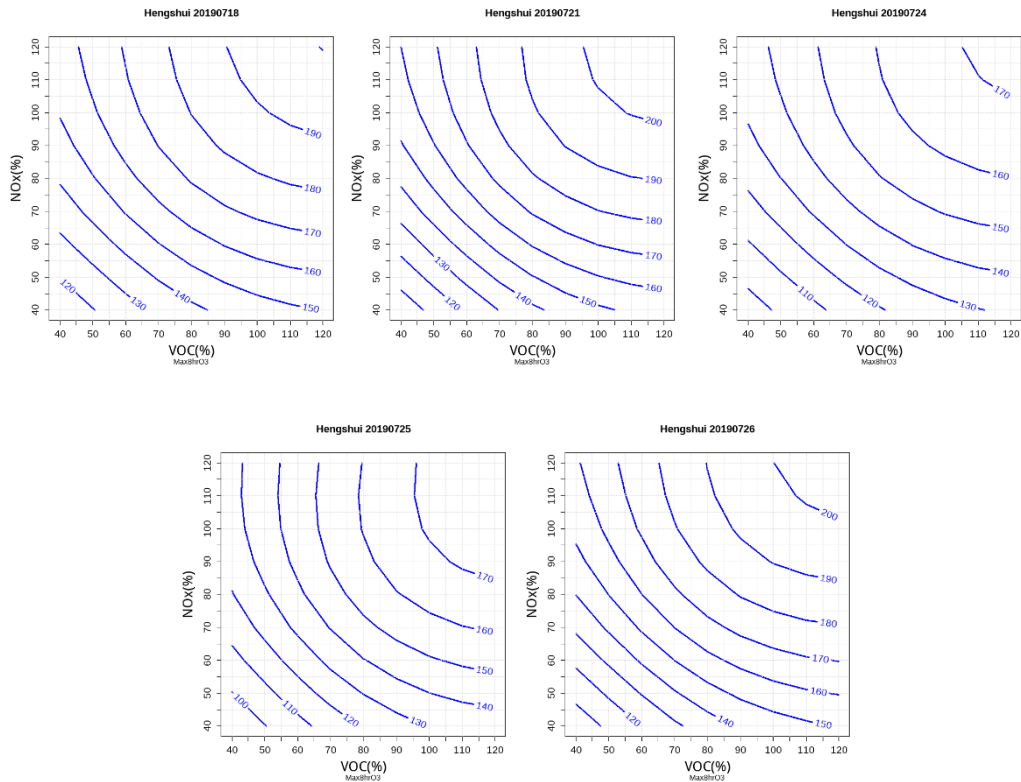


图 5-25 模拟区域人为源 NO_x 和 VOCs 减排对应的衡水日最大 8 小时臭氧城市平均浓度 EKMA 曲线

前文提到，实现河北省 O₃ 轻度污染转良好天气是实现河北省优良天数提升的关键，但是轻度污染的范围是 161~215 μg/m³，考虑到各细分人为源的贡献，实际能够考虑争取的轻度污染转良好天气基本上在 161~200 μg/m³，基于此以重点城市典型站点为例，结合 EKMA 建议最优减排路径，提出对应各细分人为源的减排比例建议。

2019 年 6 月 13 日石家庄西北水厂观测臭氧浓度为 174 μg/m³，污染主要来源于工业源 NO_x、移动源 NO_x 和工业源 VOCs，贡献占比分别为 26%、19%和 15%；根据 EKMA 曲线（图 5-26），控制 NO_x 总减排比例≥25%，VOCs 总减排比例≥23%，可实现臭氧浓度达到 160 μg/m³，具体到各主要人为细分源减排比例参考表 5-18，考虑到居民源和生物质燃烧源的控制难度，以及工业源、移动源的敏感性更强，需要适当加强工业源、移动源的控制力度。

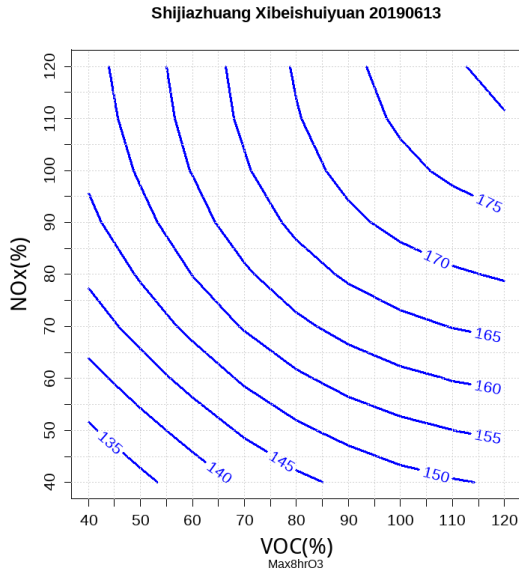


图 5-26 2019 年 6 月 13 日石家庄市西北水源站点 EKMA 曲线

2019 年 7 月 23 日邯郸市丛台公园站点观测臭氧浓度为 $182 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，污染主要来源于工业源 VOCs、移动源 VOCs 和天然源 VOCs，贡献占比分别为 35%、24%和 18%；根据 EKMA 曲线（图 5-27），该日需集中减排 VOCs，VOCs 总减排比例 $\geq 30\%$ ，可实现臭氧浓度达到 $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，具体到各主要人为细分源减排比例参考表 5-19，考虑到该天臭氧生成对移动源 NO_x 负敏感性即发生较为显著的滴定作用，因此尽量避免控制移动源，转而控制工业源、溶剂使用源；尤其该天对 VOCs 源排放更为敏感，因此需要加大对主要源 VOCs 排放的控制。

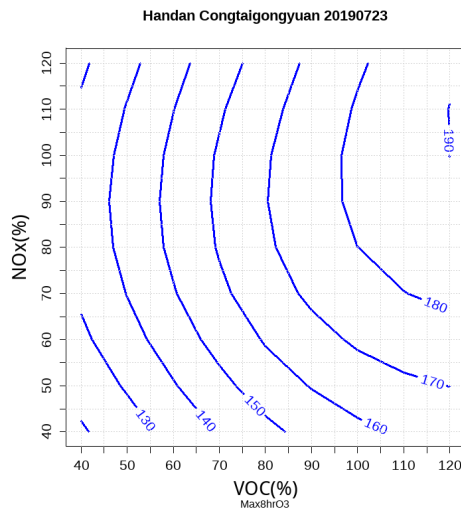


图 5-27 2019 年 7 月 23 日邯郸市丛台公园站点 EKMA 曲线

表 5-18 2019 年 6 月 13 日石家庄市西北水源站点 NOx 和 VOCs 减排控制方案

	减排目标 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	减排比例	工业源 NO _x (IV)	工业源 VOCs (IV)	电厂源 NO _x (PN)	电厂源 VOCs (PV)	居民源 NO _x (RN)	居民源 VOC (RV)	移动源 NO _x (TN)	移动源 VOCs (TV)	生物质燃烧源 NO _x (FN)	生物质燃烧源 VOCs (FV)	溶剂使用源 VOCs (SV)	天然源 NO _x (BN)	天然源 VOC (BV)	敏感性系数总和	观测 O ₃ 浓度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
2019/6/13	14	26%	13.6 26%	8 15%	1.7 3%	0.1 0%	0.6 1%	1.3 2%	10.1 19%	4.3 8%	1 2%	2.4 5%	3.3 6%	0.8 2%	5.5 10%	53	174
方案	NO _x 减排比例	VOCS 减排比例	工业源 NO _x 削减浓度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	工业源 VOCs _削减浓度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	电厂源 NO _x _削减浓度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	电厂源 VOCs _削减浓度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	居民源 NO _x _削减浓度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	居民源 VOCs _削减浓度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	移动源 NO _x _削减浓度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	移动源 VOCs _削减浓度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	生物质燃烧 NO _x _削减浓度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	生物质燃烧 VOCs _削减浓度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	溶剂使用 VOCs _削减浓度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	天然源 NO _x (BN)	天然源 VOC(BV)	削减总和 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	方案实施后 O ₃ 浓度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Q1	25%	23%	-4.76 -35%	-2.8 -35%	-0.09 -5%	-0.01 -5%	-0.09 -15%	-0.2 -15%	-3.03 -30%	-1.29 -30%	-0.2 -20%	-0.48 -20%	-0.83 -25%	—	—	-14	160

表 5-19 2019 年 7 月 23 日邯郸市丛台公园站点 NOx 和 VOCs 减排控制方案

	减排目标 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	减排比例	工业源 NO _x (IV)	工业源 VOCs (IV)	电厂源 NO _x (PN)	电厂源 VOCs (PV)	居民源 NO _x (RN)	居民源 VOC (RV)	移动源 NO _x (TN)	移动源 VOCs (TV)	生物质燃烧源 NO _x (FN)	生物质燃烧源 VOCs (FV)	溶剂使用源 VOCs (SV)	天然源 NO _x (BN)	天然源 VOC (BV)	敏感性系数总和	观测 O ₃ 浓度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
2019/7/23	22	41%	8.1 15%	19.2 35%	1.3 2%	0.1 0%	-0.1 0%	4.4 8%	-13.3 -25%	13.2 24%	0.3 1%	1 2%	9 17%	1.6 3%	9.6 18%	54	182
方案	NO _x 减排比例	VOCS 减排比例	工业源 NO _x 削减浓度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	工业源 VOCs _削减浓度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	电厂源 NO _x _削减浓度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	电厂源 VOCs _削减浓度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	居民源 NO _x _削减浓度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	居民源 VOCs _削减浓度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	移动源 NO _x _削减浓度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	移动源 VOCs _削减浓度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	生物质燃烧 NO _x _削减浓度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	生物质燃烧 VOCs _削减浓度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	溶剂使用 VOCs _削减浓度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	天然源 NO _x (BN)	天然源 VOC(BV)	削减总和 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	方案实施后 O ₃ 浓度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Q1	0%	30%	-4.46 -55%	- 11.52 -60%	-0.26 -20%	-0.02 -20%	0.02 -20%	-0.88 -20%	0 0%	0 0%	-0.06 -20%	-0.2 -20%	-4.95 -55%	—	—	-22	160

2019年6月10日衡水市监测站观测臭氧浓度为 $173\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，污染主要来源于移动源 NO_x ，贡献占比为47%；根据EKMA曲线（图5-28），控制 NO_x 总减排比例 $\geq 24\%$ ，VOCs总减排比例 $\geq 5\%$ ，可实现臭氧浓度达到 $160\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，具体到各主要人为细分源减排比例参考表5-20，考虑到该天臭氧生成对移动源 NO_x 最为敏感，因此需要集中减排移动源，但同时工业源、生物质燃烧源也需要加强控制。

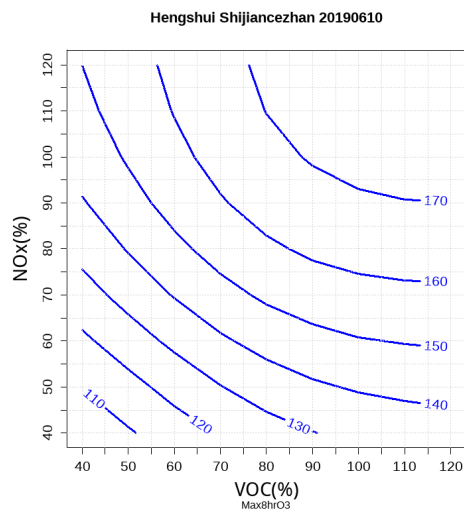


图 5-28 2019 年 6 月 10 日衡水市市监测站站点 EKMA 曲线

表 5-20 2019 年 6 月 10 日衡水市市监测站站点 NOx 和 VOCs 减排控制方案

	减排目标 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	减排比例	工业源 NO _x (IV)	工业源 VOCs (IV)	电厂源 NO _x (PN)	电厂源 VOCs (PV)	居民源 NO _x (RN)	居民源 VOC (RV)	移动源 NO _x (TN)	移动源 VOCs (TV)	生物质燃烧源 NO _x (FN)	生物质燃烧源 VOCs (FV)	溶剂使用源 VOCs (SV)	天然源 NO _x (BN)	天然源 VOC (BV)	敏感性系数总和	观测 O ₃ 浓度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
2019/6/10	13	25%	4.7 9%	3.3 6%	2.1 4%	0 0%	1.4 3%	1.3 2%	24.3 47%	3.2 6%	1.6 3%	2.5 5%	3 6%	1.2 2%	3 6%	52	173
方案	NO _x 减排比例	VOCS 减排比例	工业源 NO _x _削减 浓度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	工业源 VOCs _削减 浓度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	电厂源 NO _x _削减 浓度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	电厂源 VOCs _削减 浓度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	居民源 NO _x _削减 浓度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	居民源 VOCs _削减 浓度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	移动源 NO _x _削减 浓度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	移动源 VOCs _削减 浓度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	生物质燃烧 NO _x _削减 浓度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	生物质燃烧 VOCs _削减 浓度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	溶剂使用 VOCs _削减 浓度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	天然源 NO _x (BN)	天然源 VOC(BV)	削减总和 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	方案实施后 O ₃ 浓度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Q1	24%	5%	-1.41 -30%	-0.99 -30%	-0.21 -10%	0 -10%	-0.28 -20%	-0.26 -20%	-7.29 -30%	-0.96 -30%	-0.4 -25%	-0.63 -25%	-0.3 -10%	—	—	-13	160

在对重点城市站点控制方案分析过程中发现，同一天、同一城市内不同站点的减排路径也可能出现不同。以石家庄西北水源和西南高教两个站点为例，2019年6月10日两个站点臭氧观测浓度较为接近，分别是204和211 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，两个站点相距大约20公里，西南高教站点在西北水源站点的正南方，且西南高教站点更接近主城区；从EKMA曲线（图5-29）分别读取建议减排路径，2019年6月10日西北水源站点需控制 NO_x 总减排比例 $\geq 38\%$ ，VOCs总减排比例 $\geq 35\%$ ， NO_x 和VOCs的减排比例接近1:1，而西南高教站点需控制 NO_x 总减排比例 $\geq 25\%$ ，VOCs总减排比例 $\geq 56\%$ ， NO_x 和VOCs的减排比例接近1:2；且从细分人为源敏感系数（表5-21）来看，西南高教站点臭氧对移动源 NO_x 是显著负敏感性，西北水源站点对移动源 NO_x 是显著正敏感性，假设同时对移动源展开严格控制，可能只能改善西北水源站点区域的臭氧污染状况。

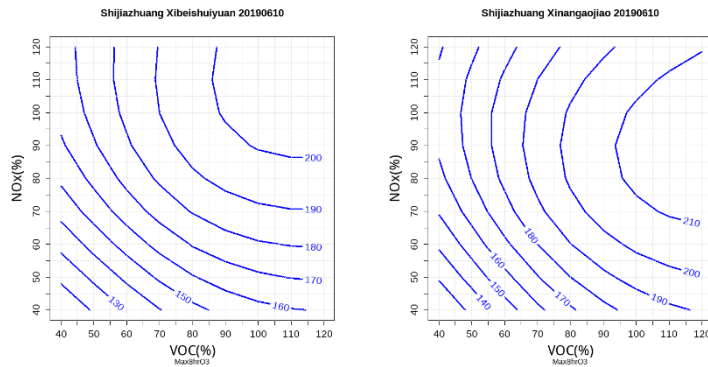


图 5-29 2019年6月10日石家庄西北水源、西南高教站点EKMA曲线

表 5-21 2019 年 6 月 10 日衡水市西北水源、西南高教站点细分人为源敏感性系数 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

站点	观测 O ₃ 浓度	工业 源 NOx(IV)	工业源 VOCs(IV)	电厂 源 NOx(PN)	电厂源 VOCs(PV)	居民 源 NOx(RN)	居民源 VOC(RV)	移动 源 NOx(TN)	移动源 VOCs(TV)	生物 质燃 烧源 NOx(FN)	生物质 燃烧源 VOCs(FV)	溶剂使 用源 VOCs(SV)	天然 源 NOx(BN)	天然 源 VOC(BV)	敏感 性系 数总 和
2019 /6/10 西北水 源	204	4.3	6.5	1.4	0.1	0.9	1.5	15.5	4.7	2	4.5	1.8	0.9	3.5	47.6
西南高 教	211	-5.8	16.6	1.1	0.1	-2.8	3.2	-25.9	10.1	1.6	7.1	3.9	0.5	8.7	18.4

利用基于回溯模拟 EKMA 曲线进行的臭氧控制方案情景分析结果显示：

(1) 在臭氧污染较为严重时，需要同时对 NO_x 和 VOCs 排放进行控制，但是不同城市会各有侧重，即在此基础上侧重加强对 NO_x 或者 VOCs 的控制；例如石家庄和邯郸是比较典型的 VOCs 控制城市，而衡水则是偏 NO_x 控制城市。而在污染相对较轻时，可能会出现需要重点控制某一类重点源排放的情况。

(2) 具体到细分人为源上，工业源、移动源和溶剂使用源都是贡献较为显著的源，对这些源的控制是是否能降低臭氧浓度完成达标目标的关键，同时其余人为源如居民源、生物质燃烧源等尽管贡献不如工业源等显著，但是也需要加强控制。尤其是在污染较重的情况之下，仅控制主要贡献源是很难大幅降低臭氧浓度到完成达标任务的。

(3) 重点需要指出的是对移动源的控制，通过细分人为源敏感性空间分布图可以看到较多城市在主城区的臭氧生成对移动源 NO_x 是较为显著的负敏感性，即发生滴定作用，减排移动源 NO_x 反而会使臭氧浓度出现较大幅度上升，出现这样情况时需要慎重移动源的控制，尤其是控制的区域。

(4) 基于 EKMA 曲线和细分人为源敏感性结果的控制方案情景分析再一次表明每天的臭氧浓度利用其敏感性系数得到的达标控制策略即排放削减方案很可能不能满足其他天的达标需求，同一个城市不同区域的减排策略也可能出现不同，这给臭氧污染的精细化管控带来了挑战。

5.4.3 “十四五”臭氧污染控制情景模拟方法

利用两个模拟时段（2019 年 6 月 7 日~2019 年 6 月 18 日、2019 年 7 月 15 日~2019 年 7 月 28 日）的 DDM 敏感性模拟结果，开展臭氧污染控制减排情景设计。首先，对石家庄、邯郸、衡水三个城市 2020 年臭氧 90 百分位浓度观测值由高到低进行排序，统计超标天数；结合表 5-22 设定的石家庄、邯郸、衡水三城市超标天数的基础目标、加强目标和强化目标，计算 2020 年超标天数减少到目标天数臭氧浓度的下降值。以石家庄为例，2020 年超标 73 天，基础目标超标天数为 53 天，找到 2020 年浓度由高到低排序的第 53 天的臭氧 90 百分位浓度观测值（分别记为 $\text{O}_3\text{-53}^{\text{rd}}$ ），争取将超标但低于 $\text{O}_3\text{-53}^{\text{rd}}$ 的这部分浓度相对较低的超标天控制到良，是达到表 5-22 目标的最经济简便的途径， $\text{O}_3\text{-53}^{\text{rd}}$ 即为轻

转良浓度上限。第二，根据 O₃-53rd 和标准值（160μg/m³）计算浓度改善和浓度降幅，从上述两个模拟时段中选择臭氧 90 百分位浓度模拟值与轻转良浓度上线相对接近的日期，将计算的浓度降幅应用到该日期的臭氧 90 百分位模拟值上，得出与模拟值相对应的目标浓度值和浓度改善值，见表 5-22。

表 5-22 三个情景臭氧控制目标

		超标 天数	轻转良 浓度上 限	浓度 改善	浓度降 幅	对应模拟日 期	臭氧模 拟浓度	目标浓 度	浓度 改善
基础 目标	石家庄	53	172	12	7.0%	2019/7/17	172.1	160.1	12.0
	邯郸	48	172	12	7.0%	2019/7/19	170.5	158.6	11.9
	衡水	49	171	11	6.4%	2019/7/18	180.0	168.4	11.6
加强 目标	石家庄	39	179	19	10.6%	2019/7/28	179.9	160.8	19.1
	邯郸	36	181	21	11.6%	2019/7/25	171.4	151.5	19.9
	衡水	39	177	17	9.6%	2019/7/18	180.0	162.7	17.3
强化 目标	石家庄	30	185	25	13.5%	2019/7/18	191.1	165.2	25.8
	邯郸	32	186	26	14.0%	2019/7/25	171.4	147.5	24.0
	衡水	33	184	24	13.0%	2019/7/25	184.0	160.0	24.0

最后，根据选出的模拟日期的 DDM 各类源 NO_x 和 VOCs 敏感性模拟结果，以达到表 5-22 最后一列浓度改善值为目标，兼顾三个情景的减排比例梯度以及不同类别源控制的难易程度和减排潜力，初步设计各类源 NO_x 和 VOCs 减排比例，详见表 5-23，具体减排量见表 5-24。其中除石家庄、邯郸、衡水以外的其他城市的减排比例采用三个城市平均值并进行微调。

表 5-23 3 个控制情景减排比例 (%)

情景	城市	电厂		生物质燃烧		工业		溶剂使用	居民		移动	
		NO _x	VOCs	NO _x	VOCs	NO _x	VOCs	VOCs	NO _x	VOCs	NO _x	VOCs
基础目标 L case	石家庄	0.15	0.1	0.35	0.35	0.3	0.35	0.32	0.1	0.1	0.25	0.25
	邯郸	0.15	0.1	0.35	0.35	0.32	0.36	0.32	0.15	0.15	0.25	0.25
	衡水	0.15	0.1	0.35	0.35	0.25	0.28	0.25	0.08	0.08	0.18	0.18
	其他城市	0.15	0.1	0.35	0.35	0.32	0.34	0.3	0.11	0.11	0.25	0.25
加强目标 M case	石家庄	0.23	0.2	0.4	0.4	0.37	0.42	0.42	0.15	0.15	0.28	0.28
	邯郸	0.23	0.2	0.45	0.45	0.5	0.52	0.52	0.3	0.3	0.4	0.4
	衡水	0.23	0.2	0.4	0.4	0.33	0.35	0.35	0.15	0.15	0.25	0.25
	其他城市	0.23	0.2	0.45	0.45	0.42	0.45	0.45	0.2	0.2	0.32	0.32
强化目标 H case	石家庄	0.33	0.3	0.5	0.5	0.6	0.65	0.67	0.3	0.3	0.42	0.42
	邯郸	0.33	0.3	0.55	0.55	0.63	0.68	0.7	0.35	0.35	0.45	0.45
	衡水	0.33	0.3	0.5	0.5	0.6	0.65	0.67	0.3	0.3	0.42	0.42
	其他城市	0.33	0.3	0.55	0.55	0.63	0.68	0.7	0.33	0.33	0.45	0.45

表 5-24 3 个控制情景相对 2020 年清单各细分人为源 NOx 和 VOCs 排放减排量（吨/年）

城市	源排放种类	2020 年清单		基础目标 L case 清单		加强目标 M case 清单		强化目标 H case 清单	
		NO _x	VOCs	NO _x	VOCs	NO _x	VOCs	NO _x	VOCs
石家庄	农业源	0	0	0	0	0	0	0	0
	工业源	54689.98	155101.4	-16407	-54285.5	-20235.3	-65142.7	-32814	-100816
	电厂源	3890.04	1066.71	-583.51	-106.67	-894.71	-213.34	-1283.72	-320.01
	生活源	4871.48	34355.72	-487.15	-3435.59	-730.73	-5153.36	-1461.45	-10306.7
	交通源	105337.4	87545.2	-26334.4	-21886.3	-29494.5	-24512.7	-44241.8	-36769
	生物质燃烧源	3278.87	25448.9	-1147.6	-8907.13	-1311.55	-10179.6	-1639.43	-12724.5
	扬尘源	0	0	0	0	0	0	0	0
	溶剂使用源	0	34572.18	0	-11063.1	0	-14520.3	0	-23163.4
	总量	172067.8	338090.1	-44959.6	-99684.3	-52666.8	-119722	-81440.3	-184099
唐山	农业源	0	0	0	0	0	0	0	0
	工业源	65896.29	135560.5	-21086.8	-46090.6	-27676.4	-61002.2	-41514.7	-92181.1
	电厂源	3934.71	1123.71	-590.21	-112.37	-904.98	-224.74	-1298.46	-337.11
	生活源	3530.64	24823.18	-388.37	-2730.57	-706.13	-4964.65	-1165.11	-8191.65
	交通源	121282.1	71481.14	-30320.5	-17870.2	-38810.2	-22874	-54576.9	-32166.5
	生物质燃烧源	3034.63	14647.75	-1062.12	-5126.72	-1365.58	-6591.49	-1669.05	-8056.26
	扬尘源	0	0	0	0	0	0	0	0
	溶剂使用源	0	119315.8	0	-35794.8	0	-53692.1	0	-83521.1
	总量	197678.3	366952.1	-53448	-107725	-69463.4	-149349	-100224	-224454
秦皇岛	农业源	0	0	0	0	0	0	0	0
	工业源	15944.65	45889.8	-5102.29	-15602.6	-6696.76	-20650.4	-10045.1	-31205.1
	电厂源	1091	321.43	-163.65	-32.14	-250.93	-64.28	-360.03	-96.43

城市	源排放种类	2020年清单		基础目标 L case 清单		加强目标 M case 清单		强化目标 H case 清单	
		NO _x	VOCs	NO _x	VOCs	NO _x	VOCs	NO _x	VOCs
城市	生活源	1306.12	9033.91	-143.67	-993.73	-261.22	-1806.78	-431.02	-2981.19
	交通源	34739.97	24251.35	-8685	-6062.84	-11116.8	-7760.43	-15633	-10913.1
	生物质燃烧源	739.67	14317.5	-258.88	-5011.13	-332.85	-6442.88	-406.82	-7874.63
	扬尘源	0	0	0	0	0	0	0	0
	溶剂使用源	0	14642.99	0	-4392.9	0	-6589.35	0	-10250.1
	总量	53821.42	108457	-14353.5	-32095.3	-18658.6	-43314.2	-26876	-63320.5
	邯郸	农业源	0	0	0	0	0	0	0
工业源		35952.5	76691.8	-11504.8	-27609	-17976.3	-39879.8	-22650.1	-52150.4
电厂源		3697.05	749.46	-554.56	-74.94	-850.32	-149.89	-1220.03	-224.84
生活源		4598.32	30734.26	-689.75	-4610.1	-1379.5	-9220.27	-1609.42	-10757
交通源		66818.65	46556.16	-16704.7	-11639	-26727.5	-18622.5	-30068.4	-20950.3
生物质燃烧源		2644.74	28523.64	-925.66	-9983.28	-1190.13	-12835.7	-1454.61	-15688
扬尘源		0	0	0	0	0	0	0	0
溶剂使用源		0	56495.04	0	-18078.5	0	-29377.4	0	-39546.5
总量	113711.3	239750.4	-30379.5	-71994.9	-48123.7	-110085	-57002.5	-139317	
邢台	农业源	0	0	0	0	0	0	0	0
	工业源	21533.25	67606.11	-6890.65	-22986.1	-9043.95	-30422.8	-13565.9	-45972.2
	电厂源	1251.75	355.95	-187.76	-35.59	-287.9	-71.19	-413.08	-106.78
	生活源	3272.15	23012.72	-359.94	-2531.41	-654.43	-4602.56	-1079.81	-7594.21
	交通源	55396.92	40802.59	-13849.3	-10200.6	-17727	-13056.8	-24928.6	-18361.2
	生物质燃烧源	2010.58	22004.04	-703.7	-7701.43	-904.76	-9901.82	-1105.82	-12102.2
	扬尘源	0	0	0	0	0	0	0	0

城市	源排放种类	2020年清单		基础目标 L case 清单		加强目标 M case 清单		强化目标 H case 清单	
		NO _x	VOCs	NO _x	VOCs	NO _x	VOCs	NO _x	VOCs
保定	溶剂使用源	0	21992.54	0	-6597.78	0	-9896.64	0	-15394.8
	总量	83464.66	175774	-21991.3	-50052.9	-28618.1	-67951.8	-41093.3	-99531.3
	农业源	0	0	0	0	0	0	0	0
	工业源	37008.27	63548.17	-11842.6	-21606.4	-15543.4	-28596.7	-23315.2	-43212.8
	电厂源	4484.29	662.13	-672.64	-66.21	-1031.38	-132.42	-1479.82	-198.64
	生活源	5169.05	36106.88	-568.59	-3971.72	-1033.81	-7221.34	-1705.79	-11915.3
	交通源	81198.98	67282.33	-20299.8	-16820.6	-25983.7	-21530.4	-36539.6	-30277
	生物质燃烧源	2841.06	28811.13	-994.37	-10083.9	-1278.48	-12965	-1562.58	-15846.1
	扬尘源	0	0	0	0	0	0	0	0
	溶剂使用源	0	27470.19	0	-8241.07	0	-12361.6	0	-19229.1
总量	130701.7	223880.8	-34378	-60789.9	-44870.8	-82807.5	-64603	-120679	
张家口	农业源	0	0	0	0	0	0	0	0
	工业源	15885.82	38224.55	-5083.47	-12996.4	-6672.05	-17201	-10008.1	-25992.7
	电厂源	5126.13	819.05	-768.92	-81.91	-1179.01	-163.81	-1691.62	-245.72
	生活源	2079.34	14103.72	-228.73	-1551.43	-415.87	-2820.74	-686.18	-4654.24
	交通源	33125.98	20264.36	-8281.46	-5066.08	-10600.3	-6484.59	-14906.6	-9118.95
	生物质燃烧源	877.16	16444.01	-307	-5755.41	-394.72	-7399.81	-482.44	-9044.2
	扬尘源	0	0	0	0	0	0	0	0
	溶剂使用源	0	15229.56	0	-4568.86	0	-6853.29	0	-10660.7
	总量	57094.43	105085.3	-14669.6	-30020	-19261.9	-40923.3	-27775	-59716.5
承德	农业源	0	0	0	0	0	0	0	0
	工业源	14485.12	37111.14	-4635.24	-12617.8	-6083.75	-16700	-9125.63	-25235.6

城市	源排放种类	2020年清单		基础目标 L case 清单		加强目标 M case 清单		强化目标 H case 清单	
		NO _x	VOCs	NO _x	VOCs	NO _x	VOCs	NO _x	VOCs
城市	电厂源	975.96	290.58	-146.39	-29.05	-224.47	-58.11	-322.07	-87.17
	生活源	1631.89	11131.11	-179.51	-1224.41	-326.38	-2226.22	-538.53	-3673.26
	交通源	20707.41	22788.54	-5176.87	-5697.15	-6626.39	-7292.35	-9318.34	-10254.9
	生物质燃烧源	808.74	20570.52	-283.06	-7199.68	-363.93	-9256.73	-444.81	-11313.8
	扬尘源	0	0	0	0	0	0	0	0
	溶剂使用源	0	19348.03	0	-5804.41	0	-8706.61	0	-13543.6
	总量	38609.12	111239.9	-10421.1	-32572.5	-13624.9	-44240	-19749.4	-64108.3
沧州	农业源	0	0	0	0	0	0	0	0
	工业源	32590.9	102037.3	-10429.1	-34692.7	-13688.2	-45916.8	-20532.3	-69385.4
	电厂源	2794.83	646.66	-419.22	-64.66	-642.81	-129.33	-922.29	-194
	生活源	3416.53	23993.34	-375.82	-2639.27	-683.3	-4798.66	-1127.45	-7917.81
	交通源	103395.6	50591.47	-25848.9	-12647.8	-33086.5	-16189.2	-46527.9	-22766.2
	生物质燃烧源	2439.89	22455.08	-853.96	-7859.28	-1097.95	-10104.8	-1341.94	-12350.3
	扬尘源	0	0	0	0	0	0	0	0
	溶剂使用源	0	37115.98	0	-11134.8	0	-16702.2	0	-25981.2
总量	144637.7	236839.8	-37927	-69038.5	-49198.8	-93841	-70451.9	-138595	
廊坊	农业源	0	0	0	0	0	0	0	0
	工业源	28805.4	59327.3	-9217.73	-20171.3	-12098.3	-26697.3	-18147.4	-40342.6
	电厂源	897.86	250.88	-134.68	-25.09	-206.51	-50.18	-296.3	-75.27
	生活源	2188.02	14975.48	-240.69	-1647.31	-437.61	-2995.1	-722.05	-4941.91
	交通源	30320.06	47158.76	-7580.03	-11789.7	-9702.42	-15090.8	-13644	-21221.4
	生物质燃烧源	1502.95	6351.68	-526.03	-2223.09	-676.33	-2858.26	-826.62	-3493.43

城市	源排放种类	2020 年清单		基础目标 L case 清单		加强目标 M case 清单		强化目标 H case 清单	
		NO _x	VOCs	NO _x	VOCs	NO _x	VOCs	NO _x	VOCs
河北省	农业源	0	0	0	0	0	0	0	0
	工业源	338892.7	814307.1	-106225	-277957	-141027	-363833	-211378	-548079
	电厂源	30142.25	6606.3	-4521.33	-660.62	-6932.7	-1321.26	-9946.96	-1981.93
	生活源	34597.01	237189.3	-3864.89	-26529.1	-7008.99	-48047.6	-11286.8	-77409
	交通源	684449.9	502404.5	-168864	-123943	-217907	-159334	-303879	-222745
	生物质燃烧源	21377.17	217849.2	-7481.98	-76247.5	-9395.82	-95846.2	-11533.6	-117631
	扬尘源	0	0	0	0	0	0	0	0
	溶剂使用源	0	402364.6	0	-121693	0	-182306	0	-280115
	总量	1109459	2180721	-290957	-627030	-382272	-850688	-548024	-1247962

利用空气质量数值模型系统 WRF+CMAQ，开展 2019 年空气质量现状情景（basecase）的模拟（2019 气象+wryb2020hb 源排放）。然后，对应基础、加强和强化减排目标，模拟表 5-23 所示 L case、M case、H case 三个控制情景，控制情景与 2019 年现状情景之间的差值即各情景减排（变化）对空气质量改善（变化）的贡献。

5.5 基于情景模拟结果的达标分析

5.5.1 分析方法

研究表明空气质量模式模拟结果和实际观测之间总是存在一定的误差，但是模式因输入条件的变化计算得到的模拟浓度的相对差异却较为准确，因此排放变化的情景模拟结果和基准情景模拟结果的相对变化比例可以较为准确地用于估算未来情景相对基准年份的基于观测浓度的设计值变化。美国环保局针对臭氧和细颗粒物的达标分析推荐了基于相对响应因子概念（Relative Response Factor: RRF）的测试方法，即将 RRF 应用于基准年的设计值（design value，即以基准年为中心的 3-5 年的观测值的平均值，从而剔除年际气象差异对污染物浓度的影响），从而求取未来的达标设计值，以此来预测未来的达标状况（U.S. Environmental Protection Agency, 2018）。其中 RRF 是未来情景模拟结果和基准模拟结果之间的比值，即模式模拟结果计算出来的因排放变化导致的污染物浓度的相对变化比例。美国环保局的推荐方法对臭氧和细颗粒物的处理是不同的，其中臭氧的 RRF 计算需要用到未来情景模拟结果前 10 高值和基准模拟结果前 10 高值之间的比值，而细颗粒物的 RRF 计算以及基准年达标设计值的估算则都要按季度对各组分分开进行处理。美国环保局的臭氧和细颗粒物达标测试方法本质上是将基于多年观测平均值的基准年设计值利用模式模拟结果的相对变化比例来做外推处理，从而更为准确地预估未来的达标设计值。

考虑到国内的具体情况，参考美国环保局的达标测试方法，同样利用现状及未来情景模拟结果和基准年模拟结果之间的相对变化比例，即 RRF 值，对基准年的观测数据进行外推处理，来估算未来情景的达标情况。在应用过程中，选取 2020 年作为分析基准年；利用 3 个未来控制情景模拟结果和 2019 年臭氧季回溯模拟结果（2019 气象条件+wryb2020hb 源排放），计算各城市各污染物浓度

的情景模拟平均值与基准模拟平均值的比值，得到相对响应因子（RRF），并将相对响应因子乘以基准年（2020）的观测数据，从而估算各情景的污染物浓度水平，并进行达标情况分析。

针对臭氧，按日计算未来情景和 2019 年臭氧季回溯模拟日值浓度的比值作为相对响应因子 RRF（公式 1），然后分别应用到对应的基准年（2020 年）污染物观测浓度（公式 2）求取各情景的未来设计值；

$$RRF_{sp}^i = \frac{SIM_{sp}^i}{SIM_{2019sp}^i} \quad (5-9)$$

$$[C^*]_{sp}^j = RRF_{sp}^i \times [C_{2020}]_{sp}^j \quad (5-10)$$

式中， SIM_i 表示现状情景及未来情景的污染物日值浓度模拟值， SIM_{2019} 表示污染物 2019 年日值浓度模拟值， sp 表示 O_3 ， i 表示 2019 年的臭氧季每日， j 表示 2020 年的臭氧季每日，对臭氧按照从高到低浓度排序对应利用 2019 年气象模拟得到的 RRF 和 2020 年观测浓度。 $[C]$ 对应各污染物当天观测浓度， $[C^*]$ 表示应用相对响应因子 RRF 之后的现状情景与未来情景对应的污染物浓度预估值，即预测的未来设计值。

和美国环保局的做法的不同之处在于，我们这里使用了基于基准年观测数据对未来设计值的预估和分析，主要原因是自 2013 年以来，全国各地包括河北省在大气十条政策的执行推动下，每年的污染物排放削减都较为显著，各项污染物观测浓度也都有显著降低，排放的年际变化对污染浓度的影响往往大于年际气象条件差异对污染物浓度的影响，因此多年观测平均可能并不能准确地代表现状的污染物浓度水平。未来也可以采取剔除年际气象条件差异影响的办法来重新估算现状浓度。

考虑到回溯模拟只针对臭氧季，但是情景减排控制是针对全年的，所以在计算优良率时假设其他月份尤其是秋冬细颗粒物重污染季节细颗粒物超标天的改善情况与臭氧季臭氧超标天改善情况相似。另外，由于模拟区域未包括整个秦皇岛，因此对其超标天改善情况参照全省平均改善比例。

5.5.2 基于基准年（2020）观测值的城市达标分析

基于基准年 2020 年 O₃ 观测值和应用公式（5-9）和（5-10），计算得到基础目标、加强目标和强化目标下河北省各城市 O₃ 超标天和 O₃-90 百分位数的结果列于表 5-25，各情景 O₃ 轻度、中度、重度污染天数结果列于表 5-26。由表 5-25 和表 5-26 可以得到下述认识：

（1）基础目标情景下全省优良天率为 78%，相较于 2020 年实际观测升高 8%，达成 76% 设定目标；全省臭氧超标天数 455 天，其中轻度污染天 409 天，比 2020 年减少 114 天，中度污染天 46 天，比 2020 年减少 52 天，无重度污染天。邯郸、衡水、石家庄臭氧分别超标 48、46 和 54 天，O₃-90 百分位数分别是 169、170 和 168 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，与设定的基础目标接近。基础目标情景下，全省仅有承德、张家口达标，但大部分城市超标天数在 40 天上下，且 O₃-90 百分位数浓度普遍低于 170 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，距离达标差距不大。

（2）加强目标情景下全省优良天率为 81%，相较于 2020 年实际观测升高 11%，达成 81% 设定目标；全省臭氧超标天数 390 天，其中轻度污染天 361 天，比 2020 年减少 162 天，中度污染天 29 天，比 2020 年减少 69 天，无重度污染天。邯郸、衡水、石家庄臭氧分别超标 42、42 和 43 天，O₃-90 百分位数分别是 166、166 和 164 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，略高于设定的加强目标。加强目标情景下，全省仅有承德、秦皇岛、张家口达标，大部分城市超标天数在 40 天左右，且 O₃-90 百分位数浓度小于 170 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

（3）强化目标情景下全省优良天率为 87%，相较于 2020 年实际观测升高 17%，达成 86% 设定目标；全省臭氧超标天数 268 天，其中轻度污染天 256 天，比 2020 年减少 267 天，中度污染天 12 天，比 2020 年减少 86 天，无重度污染天。邯郸、衡水、石家庄臭氧分别超标 32、30 和 29 天，O₃-90 百分位数分别是 159、158 和 155 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，与设定的强化目标接近。强化目标情景下，全省所有城市臭氧皆达标，大部分城市超标天数低于 30 天。

表 5-25 基于基准年观测值预测的各情景优良天数、O₃超标天和 O₃-90 百分位数

城市名称	2020 年观测			基础目标			加强目标			强化目标		
	优良 天数	O ₃ 超标 天	O ₃ - 90 百分 位数	优良 天数	O ₃ 超标 天	O ₃ - 90 百分 位数	优良 天数	O ₃ 超 标 天	O ₃ - 90 百 分位 数	优良 天数	O ₃ 超标 天	O ₃ - 90 百分 位数
保定	207	61	180	286	40	165	293	36	161	320	22	150
沧州	214	61	179	286	43	166	295	38	162	312	29	155
承德	220	30	155	335	21	146	337	19	142	346	13	134
邯郸	240	63	182	253	48	169	267	42	166	289	32	159
衡水	241	62	181	274	46	170	282	42	166	306	30	158
廊坊	248	69	186	279	53	169	294	43	164	328	22	154
秦皇岛	251	43	168	318	31	156	325	27	152	339	18	144
石家庄	251	72	182	248	54	168	270	43	164	300	29	155
唐山	297	62	184	274	50	174	283	45	168	308	31	158
邢台	322	73	187	261	51	173	281	41	167	296	33	159
张家口	328	25	149	336	18	142	341	14	140	347	9	134
省均	256 70%	621	176	286 78%	455	163	297 81%	390	159	317 87%	268	151

表 5-26 基于基准年观测值预测的各情景 O₃ 轻度、中度、重度污染天数

城市名称	2020 年观测			基础目标			加强目标			强化目标		
	轻度 污染	中度 污染	重度 污染	轻度 污染	中 度 污 染	重度 污染	轻度 污染	中度 污染	重度 污染	轻度 污染	中度 污染	重度 污染
保定	55	8	0	36	4	0	33	3	0	21	1	0
沧州	53	10	0	39	4	0	36	2	0	29	0	0
承德	23	7	0	18	3	0	16	3	0	11	2	0
邯郸	52	9	2	43	5	0	39	3	0	29	3	0
衡水	57	5	0	45	1	0	41	1	0	30	0	0
廊坊	57	10	2	47	6	0	38	5	0	19	3	0
秦皇岛	31	11	1	24	7	0	24	3	0	17	1	0
石家庄	64	9	0	53	1	0	43	0	0	29	0	0
唐山	47	14	2	42	8	0	40	5	0	29	2	0
邢台	63	11	1	46	5	0	39	2	0	33	0	0
张家口	21	4	0	16	2	0	12	2	0	9	0	0
省均	523	98	8	409	46	0	361	29	0	256	12	0

5.6 臭氧改善目标的化石能源削减目标和碳减排分析

5.6.1 化石能源削减目标与碳减排分析

2030 年实现碳达峰，2060 年实现碳中和，是我国政府向全世界的庄严承诺，也是建设现代化强国的重要目标。河北省是能源消费和碳排放大省，碳达峰、碳中和的压力巨大，如不能按期实现“双碳”目标，将会拉全国的后腿。

(1) 河北省能源消费及碳排放的基本情况

河北省能源消费总量大，且结构以化石能源为主。一次能源消费以煤炭为主，呈现“三高”现象，即煤炭消费比重、人均煤炭消费量、万元 GDP 能耗均高于全国水平。

2020 年河北省能源消费总量 3.27 亿吨标准煤。其中，煤炭消费 2.82 亿吨，石油消费 1710 万吨，天然气消费 80 亿立方米；全省用电量 3934 亿千瓦时。

“十三五”以来，能源消费总量和强度“双控”有效实施，能源消费总量保持低速增长，“十三五”以来年均增长 2.15%；能源消费结构加快优化，煤炭消费总量、占比双下降，煤炭消费占比由“十三五”初期的 86.6%降至 2020 年的 73.3%；清洁能源利用快速增长，天然气消费增加到 2020 年的 180 亿立方米；新能源发电量增加至 2020 年的 504 亿千瓦时。

分化石能源品种消费来看，2020 年原煤消费总量 28200 万吨，较 2015 年减少 2.57%， “十三五”年均增速-0.52%；2020 年原油消费总量 1710 万吨，较 2015 年增加 4.01%， “十三五”年均增速 0.79%；2020 年天然气消费 180 亿立方米，较 2015 年增加 111.76%， “十三五”年均增速 16.19%。

从省内化石能源消费的二氧化碳直接排放看，2010 年以来，河北省化石能源(煤炭、石油、天然气)二氧化碳排放持续震荡，见图 5-30。天然气消费的快速增长已成为河北省化石能源二氧化碳排放的主要影响因素之一。

近年来，河北省不断加大产业结构调整力度，但第二产业仍以高耗能、高排放的重工业为主，2019 年河北省单位 GDP 能耗 0.93 吨标煤/万元，单位 GDP

二氧化碳排放强度为 2.34 吨/万元,居全国第五位,是全国平均水平(1.09 吨/万元)的 2.15 倍,仅低于宁夏、山西、新疆和内蒙古。

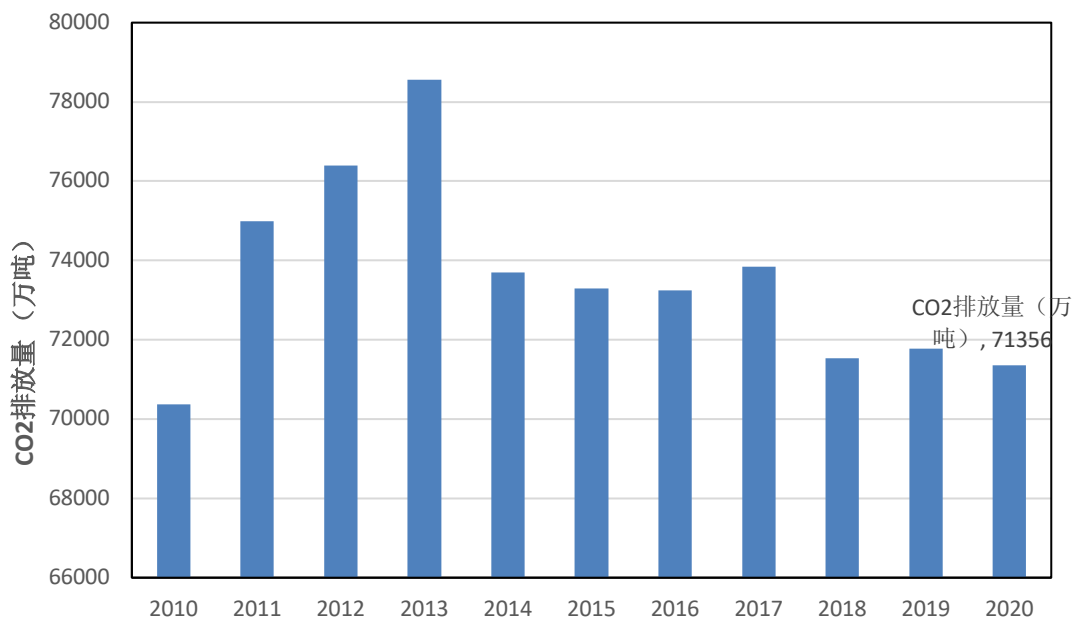


图 5-30 近十年河北省化石能源二氧化碳排放(煤炭、石油、天然气)

(2) 化石能源消减目标和碳减排分析

表 5-27 是基于河北省臭氧基础情景目标给出了 2025 年河北省需要在 2020 年基础上减排的比例,在基于 2020 年源清单可以计算出 NO_x 和 VOCs 需要减排的消减量分别为 29 万吨和 63 万吨,现有“十四五”规划的 VOCs 和 NO_x 减排量远不能达到该目标。若单纯考虑降碳减污而不提高末端治理实现这些目标,各排放源需要消减的 O₃ 前体物的排放量和相应化石能源消减目标列表 5-27 所示,可见煤炭和天然气能源需要在 2020 年基础上消减 21%,燃油需要消减 25%。

表 5-28 给出了河北省 2000-2020 年能源消费总量及其结构的年际变化,可见河北省煤炭消费量的占比相当大,2020 年仍为 80.51%,非化石能源占比仅仅为 6.82%。“十三五”以来,能源消费总量和强度“双控”有效实施,能源消费总量保持低速增长,“十三五”以来年均增长 2.15%;能源消费结构加快优化,煤炭消费总量、占比双下降,煤炭消费占比由“十三五”初期的 86.6%降至 2020 年的

73.3%；清洁能源利用快速增长，天然气消费增加到 2020 年的 180 亿立方米；新能源发电量增加至 2020 年的 504 亿千瓦时。

表 5-27 2025 年河北省臭氧基础改善目标下其前体物、化石能源与碳减排量（吨）

排放源	NO _x	VOCs	基于 2020 年 化石能源消减 比例 (%)	需下降的煤或油 消费总量 (万吨 标煤)	CO ₂ 减排量 (万 吨)
煤炭和天 然气能源 燃烧	21447	36878	21%	6884	15834
生物质燃 烧	7482	76247			
工艺过程 源	93164	268269			
溶剂使用 源		121693			
移动源 (燃油)	168864	122953	25%	466	1071
油品储运 销		990			
总计	290957	627030			16905

2020 年河北省能源消费总量 3.27 亿吨标准煤。其中，煤炭消费 2.82 亿吨，石油消费 1710 万吨，天然气消费 180 亿立方米；全省用电量 3934 亿千瓦时。如果石油消耗按 1.4714 折换成标煤，则 2020 年石油消费总量为 2516 万吨标准煤；天然气按万立方米 13.3 折换成标煤，2020 年天然气消费标煤为 2394 万吨标煤；电力（万千瓦时）按 1.229 折换成标煤，2020 年电力消费 4835 万吨标煤。

分化石能源品种消费来看，2020 年原煤消费总量 28200 万吨，较 2015 年减少 2.57%，“十三五”年均增速-0.52%；2020 年原油消费总量 1710 万吨，较

2015 年增加 4.01%，“十三五”年均增速 0.79%；2020 年天然气消费 180 亿立方米，较 2015 年增加 111.76%，“十三五”年均增速 16.19%。

天然气消费的快速增长已成为河北省化石能源二氧化碳排放的主要影响因素之一。

表 5-28 2000-2019 年河北省能源消费总量及其构成的年际变化

年	能源消费总量 (万吨标煤)	占能源消费总量比重 (%)			
		煤	石油	天然气	一次电力及其 能源
2000	11195.71	90.94	8.17	0.84	0.05
2001	12114.29	91.84	7.42	0.7	0.04
2002	13404.53	91.12	8.15	0.7	0.03
2003	15297.89	92.78	6.49	0.66	0.07
2004	17347.79	91.14	8.01	0.75	0.10
2005	19835.99	91.82	7.45	0.61	0.12
2006	21794.09	91.59	7.64	0.67	0.10
2007	23585.13	92.36	6.87	0.68	0.09
2008	24321.87	92.31	6.67	0.94	0.08
2009	25418.79	92.51	6.21	1.21	0.07
2010	26201.41	89.71	7.75	1.51	1.03
2011	28075.03	89.09	8.12	1.66	1.13
2012	28762.47	88.86	7.48	2.04	1.62
2013	29664.38	88.69	7.22	2.23	1.86
2014	29320.21	88.46	6.98	2.54	2.02
2015	31036.73	88.83	5.99	3.13	2.05
2016	31458.05	87.33	6.23	3.42	3.02
2017	32082.56	86.05	6.14	3.94	3.87
2018	32185.24	83.61	6.47	5.49	4.43
2019	32545.43	81.96	5.86	6.61	5.57
2020	32782.76	80.51	5.67	7.00	6.82

基于 2020 年河北省能源消费总量 3.27 亿吨标煤估算，在臭氧基础改善目标约束下如果天然气消费量不变时，单纯考虑降碳减污需要消减的煤炭消费总量大约 6884 万吨标煤，消减的燃油消费总量为 466 万吨标煤。碳排放系数选取 1 吨标准煤将排放 2.30 吨二氧化碳计算，其臭氧基础改善目标下的二氧化碳减排量见表 5-27，其减排的二氧化碳排放总量大约 16905 万吨。碳排放较 2020 年下降 22.4%。如果能源消费总量控制在 3.27 万吨标煤，则 2025 年河北省能源消费结构为煤炭占比为 59.5%、石油占比为 4.3%、天然气占比为 7.0%、非化石能源占比为 29.2%。

表 5-29 和表 5-30 分别给出了单纯考虑降碳减污实现臭氧加强改善目标和强化改善目标下，O₃ 前体物、化石能源与碳减排量。

表 5-29 2025 年河北省臭氧加强改善目标下其前体物、化石能源与碳减排量（吨）

排放源	NO _x	VOCs	基于 2020 年 化石能源消减 比例 (%)	需下降的煤或油 消费总量 (万吨 标煤)	CO ₂ 减排量 (万 吨)
煤炭和天 然气能源 燃烧	31282	62050	39.5%	12949	29783
生物质燃 烧	9396	95846			
工艺过程 源	123687	351152			
溶剂使用 源		182306			
移动源 (燃油)	217907	158344	32%	595	1368
油品储运 销		990			
总计	382272	850688			31151

由表 5-29 可见，O₃ 加强改善目标下河北省空气质量优良率可以达到 81%、O₃-90 百分位数为 159 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，需要消减的煤炭消费总量大约 12949 万吨标煤，消减的燃油消费总量为 595 万吨标煤，可以实现二氧化碳减排总量大约 31151 万吨，碳排放较 2020 年下降 41.3%。如果能源消费总量控制在 3.27 万吨标煤，则河北省能源消费结构为煤炭占比为 41%、石油占比为 3.9%、天然气占比为 7.0%、非化石能源占比为 48.1%。

表 5-30 2025 年河北省臭氧强化改善目标下其前体物、化石能源与碳减排量（吨）

排放源	NO _x	VOCs	基于 2020 年 化石能源消减 比例 (%)	需下降的煤或油 消费总量 (万吨 标煤)	CO ₂ 减排量 (万 吨)
煤炭和天 然气能源 燃烧	47224	98494	46%	15080	34684
生物质燃 烧	11534	117631			
工艺过程 源	185387	528976			
溶剂使用 源		280115			
移动源 (燃油)	303879	221095	44.5%	827	1902
油品储运 销		1650			
总计	548024	1247963			36586

由表 5-30 可见，O₃ 强化改善目标下河北省空气质量优良率可以达到 87%、O₃-90 百分位数为 151 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，需要消减的煤炭消费总量大约 15080 万吨标煤，消减的燃油消费总量为 827 万吨标煤，可以实现二氧化碳减排总量大约 36586 万吨，碳排放较 2020 年下降 48.5%。如果能源消费总量控制在 3.27 万吨标煤，

则河北省能源消费结构为煤炭占比为 34.5%、石油占比为 3.2%、天然气占比为 7.0%、非化石能源占比为 55.3%。

5.6.2 “十四五”空气质量改善与碳减排目标建议

河北省生态环境保护“十四五”规划提出地级及以上城市细颗粒物（PM_{2.5}）年日均浓度为 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，地级及以上城市空气质量优良天数比率为 75%，氮氧化物重点工程减排量 14.05 万吨，挥发性有机物重点工程减排量为 5.64 万吨，单位地区生产总值二氧化碳排放量降低 20.5%，单位地区生产总值能源消耗降低 15%，非化石能源占能源消费总量比例为 11%，见表 5-31。

表 5-31 还给出了国家在“十四五”期间的相关要求，可见河北省在城市空气质量优良率指标方面低于国家的要求，其他指标均满足国家要求。同时，表 5-31 还可给出了本研究三种 O3 改善情景下环境空气质量和单纯考虑降碳减污实现这些目标，其应对气候变化各项指标数据。

表 5-31 河北省和国家“十四五”环境空气质量改善与碳减排目标

类别	指标	河北		国家要 求	本研究 2025 三种情 景结果		
		2020	2025	2025	基础 改善	加强 改善	强化 改善
环境 空气 质量 改善	地级及以上城市细颗粒物（PM _{2.5} ）浓度（ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ）	46.3	35	下降 10%	35		
	地级及以上城市空气质量优良天数比率（%）	68.8	75	87.5	78	81	87
相关 目标	氮氧化物重点工程减排量(万吨)	--	14.05	11	29	38	55
	挥发性有机物重点工程减排量(万吨)	--	5.64	10	63	85	125
应对 气候 变化	单位地区生产总值二氧化碳排放量降低（%）	--	20.5	18			
	单位地区生产总值能源消耗降低（%）	--	15	13.5			
	非化石能源占能源消费总量比例（%）	--	11	20	29.2	48.1	55.3

十四五”时期，生态环境保护进入减污降碳协同增效的新阶段，河北省实施钢铁、火电、水泥、焦化等重点行业减污降碳行动，构建绿色清洁能源生产供应体系，推广低碳技术的研发应用，实现绿色制造技术突破，将从根本上减少污染物排放，同时也推动生态环境治理模式从末端向源头、从单因子控制向协同控制转变。

调整优化能源供给结构。建设清洁低碳、安全高效的能源体系，控制化石能源消费总量，推动非化石能源成为能源消费增量的主体，到 2025 年，非化石能源消费占能源消费比重提高到 20.6%，单位地区生产总值能源消耗降低 15%。推动工业生产领域电能替代，实施港口岸电、空港陆电改造。碳排放较 2020 年下降 16%。

在“中共中央国务院关于深入打好污染防治攻坚战的意见”中明确指出，聚焦夏秋季臭氧污染，大力推进挥发性有机物和氮氧化物协同减排。以石化、化工、涂装、医药、包装印刷、油品储运销等行业领域为重点，安全高效推进挥发性有机物综合治理，实施原辅材料和产品源头替代工程。完善挥发性有机物产品标准体系，建立低挥发性有机物含量产品标识制度。完善挥发性有机物监测技术和排放量计算方法，在相关条件成熟后，研究适时将挥发性有机物纳入环境保护税征收范围。推进钢铁、水泥、焦化行业企业超低排放改造，重点区域钢铁、燃煤机组、燃煤锅炉实现超低排放。开展涉气产业集群排查及分类治理，推进企业升级改造和区域环境综合整治。到 2025 年，挥发性有机物、氮氧化物排放总量比 2020 年分别下降 10%以上，臭氧浓度增长趋势得到有效遏制，实现细颗粒物和臭氧协同控制。基于这个要求，2025 年河北省 VOCs 和 NOx 排放量在不考虑增量的情况下分别应减排 10.2 万吨和 11 万吨。对比表 4-6 可见，河北省现有“十四”规划挥发性有机物的减排量远未达到国家相关要求，应加大力度减排。若要达到本研究提出的臭氧改善目标，VOCs 减排量至少应减少大约 30 万吨，非化石能源占能源的消费总量的比例应为 20.6%，煤炭消费总量应由 2020 年的 2.82 亿吨标煤下降到 2.23 亿吨标煤，燃油消费总量应由 2020 年的 1934 万吨标煤下降到 1632 万吨标煤。单纯考虑降碳减污实现臭氧改善目标下，2025 年河北省的能源结构变化为煤炭占比为 67.8%、燃油占比为 4.9%、燃气占比为 6.61%和非化石能源占比将达到 20.6%。

5.6.3 气候协同的减排措施

坚持标本兼治、系统施治，以精细化防治为方向，突出区域协同、措施协同、污染因子协同，以有效提升优良天数比率为主线，协同控制 $PM_{2.5}$ 与臭氧污染，深入打好蓝天保卫战，努力实现蓝天白云、繁星闪烁。

实施温室气体和污染物协同控制。开展工业、农业温室气体和污染减排协同控制，减少温室气体和污染物排放。加强污水、垃圾等集中处置设施温室气体排放协同控制。推动城市开展二氧化碳达峰和空气质量达标试点示范，打造“双达”典范城市。

控制工业二氧化碳排放。升级钢铁、建材、石化化工领域工艺技术，严控工业二氧化碳排放。推广水泥生产原料替代技术，鼓励利用转炉渣等非碳酸盐工业固体废物作为原辅料生产水泥。推动煤电、煤化工、钢铁、石化化工等行业开展全流程二氧化碳减排示范工程。在传统行业实施重大节能低碳技术改造，开展碳捕集利用与封存重大项目示范。

控制交通领域二氧化碳排放。大力发展低碳交通，不断提高营运车辆和船舶的新能源和清洁能源应用比例，到 2025 年，营运车辆和船舶单位运输周转量二氧化碳排放强度比 2020 年分别下降 4% 和 3.5%。加大交通领域节能低碳技术研发与应用，推广智能交通以及节能低碳型交通工具，持续降低新生产汽车的燃料消耗及二氧化碳排放量。

控制建筑领域二氧化碳排放。持续提高新建建筑和基础设施节能标准，加快推进低碳建筑发展，对城镇既有建筑和基础设施实施节能改造。开展建筑屋顶光伏行动，提高建筑采暖、生活热水、炊事等电气化普及率。加快推进热电联产集中供暖，因地制宜推进清洁低碳供暖。逐步开展公共建筑能耗限额管理，强化用能监测和低碳运营管理。实施全过程绿色低碳建造，大力推广绿色建材，推行装配式建筑、钢结构建筑及装配化装修。

推动重点行业达峰。推进电力、钢铁、建材等重点排放行业尽早实现二氧化碳排放达峰。鼓励电网企业加大非化石电力跨省区输送。推动大型企业特别是大型国有企业制定二氧化碳达峰行动方案，实施碳减排工程。加大对企业低碳技术创新的支持力度，鼓励减排创新行动。

推进低碳示范建设。持续开展省级低碳试点建设，扩大试点范围。推进低碳示范城市创建，以张家口可再生能源示范区建设为契机，打造张家口赛区低碳奥运专区。鼓励各地开展近零碳排放示范工程建设，探索建立碳中和示范区。开展气候投融资试点。

5.7 臭氧前体物减排路径与措施

基于臭氧前体物可能的来源，提出图 5-31 所示臭氧前体物减排路径与控制措施。

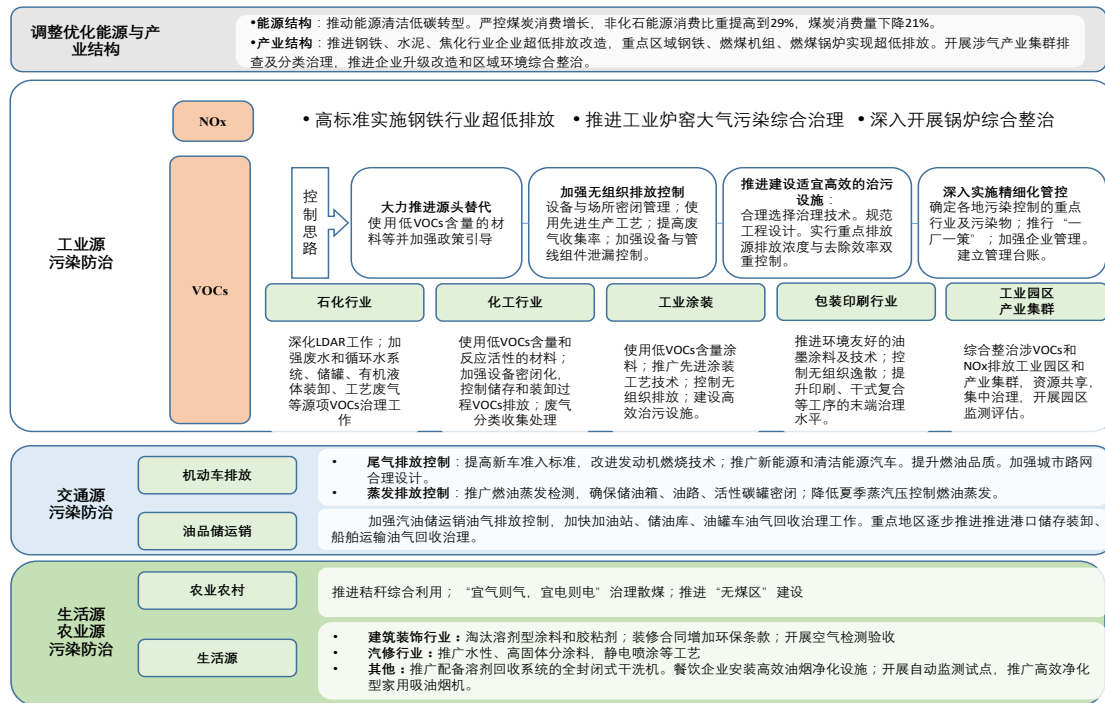


图 5-31 臭氧前体物减排路径与控制措施

协同控制臭氧和细颗粒物污染。制定加强 PM_{2.5} 和臭氧协同控制持续改善空气质量行动方案，推动全省和地级及以上城市 PM_{2.5} 浓度持续下降，臭氧浓度稳定下降。加强重点区域、重点时段、重点领域、重点行业治理，实行差异化、精细化协同管控。加强重点企业控制，对活性强的臭氧前体物排放企业实行重点控制。到 2025 年，重点工程氮氧化物、挥发性有机物排放量分别减少 14.05 万吨和 5.64 万吨。

5.7.1 调整优化能源与产业结构

推动能源清洁低碳转型。在保障能源安全的前提下，加快煤炭减量步伐，实施可再生能源替代行动。严格控制化石能源消费，“十四五”严控煤炭消费增长，煤炭消费量分别下降 10%。积极发展非化石能源，非化石能源消费比重提高到 11%左右。实施可再生能源替代行动，大力发展风能、太阳能、生物质能、海洋能、地热能等，不断提高非化石能源消费比重。原则上不再新增自备燃煤机组，支持自备燃煤机组实施清洁能源替代，鼓励自备电厂转为公用电厂。坚持“增气减煤”同步，新增天然气优先保障居民生活和清洁取暖需求。提高电能占终端能源消费比重。

推进张家口、承德百万千瓦风电基地和外送通道建设，大力发展光电、风电、抽水蓄能，推进氢能在交通、工业、电力等行业多元应用。安全有序发展核电，合理配置天然气调峰电站，因地制宜推进生物质热电联产，加快建设垃圾焚烧发电项目，优化电力生产和输送通道布局，提升清洁能源消纳和储存能力。推广“政府+电网+发电企业+用户侧”四方协作机制，积极推动可再生能源电力在供暖、制氢和大数据等领域消纳应用。探索分布式能源供给网络。到 2025 年，可再生能源装机占全部电力装机比重达到 60%左右，其中风电、光伏发电装机分别达到 4300 万千瓦、5400 万千瓦。

控制煤炭消费总量。加快淘汰落后煤电产能，稳定电煤利用水平，新（改、扩）建项目实施煤炭减量替代。合理控制煤电建设规模和发展节奏，鼓励已有燃煤自备电厂转为应急备用和调峰电源。审慎发展炼油、煤化工等高耗能项目。到 2025 年，完成国家下达消减煤炭消费任务，力争电煤占煤炭消费比重提高到 45%。

有效推进清洁取暖。2025 年采暖期前重点地区全面完成生活和冬季取暖散煤替代。因地制宜，合理确定改造技术路线。充分利用电厂供热潜能，加快供热管网建设，加大散煤替代力度。严防已完成替代地区散煤复烧。

实施终端用能清洁化替代。建设产业集群集中供汽供热或清洁低碳能源中心，推动以煤碳、石油焦、渣油、重油等为燃料的锅炉和工业炉窑使用清洁低碳能源或利用工厂余热、电厂热力等进行替代。加强煤炭等化石能源清洁高效利用。有序推进清洁取暖，加强农村散煤复燃管控，强化散煤治理监督体系建设，推进劣质煤清洁替代，到 2025 年，清洁取暖率提高到 95%以上，基本完成种养殖业及

农副产品加工业燃煤设施清洁能源替代。探索煤炭绿色开采新模式，提升煤矿洗选技术水平，保持煤矿原煤入选率 90%以上。

深度调整产业结构，推动产业结构优化升级，坚决遏制高耗能高排放项目盲目发展，大力发展绿色低碳产业，加快发展战略新兴产业。严格落实污染物排放区域削减要求，对不符合规定的项目坚决停批停建。依法依规淘汰落后产能和化解过剩产能。推动高炉—转炉长流程炼钢转型为电炉短流程炼钢。严禁新增钢铁、焦化、水泥熟料、平板玻璃、电解铝、氧化铝、煤化工产能，合理控制煤制油气产能规模，严控新增炼油产能。

推进清洁生产和能源资源节约高效利用。引导重点行业深入实施清洁生产改造，依法开展自愿性清洁生产评价认证。大力推行绿色制造，构建资源循环利用体系。推动煤炭等化石能源清洁高效利用。加强重点领域节能，提高能源使用效率。实施国家节水行动，强化农业节水增效、工业节水减排、城镇节水降损。推进污水资源化利用和海水淡化规模化利用。

5.7.2 推进工业领域污染减排

推动重点行业深度治理和超低排放。持续开展煤电、钢铁、焦化等行业超低排放改造，实施工艺全流程深度治理。推进水泥、平板玻璃、陶瓷、砖瓦、石灰、铸造、铁合金、耐火材料、有色金属冶炼等重点行业深度治理。以工业炉窑污染综合治理为重点，深化工业氮氧化物减排。以石化、化工、工业涂装、包装印刷、工业炉窑等行业为重点，全面推进产业集群整合升级。

（1）氮氧化物减排

高标准实施钢铁行业超低排放。推动现有钢铁企业超低排放改造，改造企业全面实施有组织排放、无组织排放治理和大宗物料产品清洁运输，因厂制宜选择成熟适用的环保改造技术。同时加强评估监督，对评估确认全面达到超低排放要求的企业执行税收、电价等激励政策，在重污染预警期间执行差别化应急减排措施。**2025**年底前钢铁企业超低排放改造基本完成，力争**80%**以上产能完成改造。

推进工业炉窑大气污染综合治理。加快淘汰落后产能和不达标工业炉窑，实施燃料清洁低碳化替代。深入推进工业炉窑污染深度治理，全面加强有组织和无组织排放管控。全面执行大气污染物特别排放限值，暂未制订行业排放标准的工

业炉窑，原则上按照氮氧化物排放不高于 $300\text{mg}/\text{m}^3$ 进行改造，其中日用玻璃、玻璃棉氮氧化物排放不高于 $400\text{mg}/\text{m}^3$ 。2025 年工业炉窑装备和污染治理水平明显提高，实现工业行业氮氧化物等污染物排放进一步下降。

深入开展锅炉综合整治。依法依规加大燃煤小锅炉淘汰力度，加快农业大棚、畜禽舍燃煤设施淘汰。2025 年前，基本淘汰每小时 35 蒸吨以下燃煤锅炉。加大生物质锅炉治理力度。生物质锅炉应采用专用锅炉，配套高效除尘设施。积极推进城市建成区生物质锅炉超低排放改造。加快推进燃气锅炉低氮改造，暂未制定地方排放标准的，原则上按照氮氧化物排放浓度不高于 $50\text{mg}/\text{m}^3$ 进行改造。

开展砖瓦、石灰、耐火材料、电石等行业污染治理设施提升改造。

（2）深化重点行业 VOCs 治理。

强化全流程治理，建立重点行业源头、过程、末端 VOCs 全过程控制体系。家具制造、钢铁结构制造、包装印刷、工程机械制造行业基本完成低 VOCs 原辅材料替代。开展石化、化工、包装印刷、工业涂装、制药（原料药）、油品储运销等行业典型企业清洁生产审核示范。取消非必要的 VOCs 废气排放系统旁路，必须保留的加强监管与治理。强化涉 VOCs 物质储运销监管，开展原油、成品油、有机化学品等涉 VOCs 物质储罐排查。开展加油站夏季高温时段错时装卸油，提倡城市主城区和县城建筑墙体涂刷、建筑装饰以及道路划线、栏杆喷涂、沥青铺装等户外工程错时作业。扩大低（无）VOCs 产品标准的覆盖范围。加强汽修行业 VOCs 综合治理，加大餐饮油烟污染治理力度。开展工业园区和产业集群 VOCs 综合治理，建立健全监测预警监控体系，强化 VOCs 无组织排放超标报警自动留样监测执法。园区建设统一的泄漏检测与修复（LDAR）管理系统。在工业园区和企业集群推广建设涉 VOCs “绿岛”项目，规划建设一批集中涂装中心、活性炭集中处理中心、溶剂回收中心等。

实施含 VOCs 产品源头替代工程，到 2025 年，溶剂型工业涂料、溶剂型油墨使用比例分别下降 20%、10%，溶剂型胶粘剂使用量下降 20%。推进重点行业综合治理工程，针对石化、化工行业装卸、污水和工艺过程等环节废气，工业涂装行业电泳、喷涂、干燥等环节废气，医药行业生产环节废气，包装印刷行业印刷烘干废气，建设适宜高效 VOCs 治理设施。

1) 石化行业 VOCs 综合治理

石油炼制、石油化工、合成树脂等行业全面加强精细化管理，确保稳定达标排放。

全面开展泄漏检测与修复（LDAR），建立台账。强化质量控制，将 VOCs 治理设施和储罐的密封点纳入检测计划中。

加强废水、循环水系统等逸散废气收集治理。涉及废水过程中的高浓度 VOCs 逸散环节，采用密闭化工艺或收集措施回收利用，难以利用的应配套高效治污设施。

强化中间储罐 VOCs 治理力度，优先采用压力罐、低温罐、高效密封的浮顶罐；进一步加大有机液体装卸 VOCs 治理力度，采取全密闭底部装载、顶部浸没式装载等方式，配合高效油气回收措施，推进船舶装卸采用油气回收系统，试点开展火车运输底部装载工作。确保储罐和有机液体装卸末端治理措施稳定运行。

加强有组织工艺废气治理，有效实施催化剂再生废气、氧化尾气 VOCs 治理，工艺废气优先回收利用，难以利用的采用销毁措施。推行全密闭生产工艺，加大无组织排放收集。合成橡胶、合成树脂、合成纤维等推广使用密闭脱水、脱气、掺混等工艺和设备，配套建设高效治污设施。

加强非正常工况排放控制。非正常工况排放的有机废气严禁直接排放，应采用适当处理措施。加强操作管理，减少非计划停车及事故工况发生频次。

2) 加快推进化工行业 VOCs 综合治理

加大制药、农药、煤化工、涂料、油墨、胶粘剂、染料、橡胶和塑料制品、日用化工等化工行业 VOCs 治理力度。

积极推广使用低（无）VOCs 含量或低反应活性的原辅材料和产品。制药、农药行业加快替代卤代烃和非芳香烃类溶剂，推广水基化类农药制剂。橡胶行业推广使用新型偶联剂、粘合剂以及石蜡油等。优化生产工艺，农药行业推广水相法、生物酶法合成等；制药行业推广生物酶法合成技术；橡胶制品行业推广采用串联法混炼、常压连续脱硫工艺。

全面推进生产设备密闭化改造。现代煤化工行业全面实施 LDAR，制药、农药、炼焦、涂料、油墨、胶粘剂、染料等行业逐步推广 LDAR 工作。加强无组织废气排放控制。有机液体进料鼓励采用底部、浸入管给料方式，淘汰喷溅式给料；固体物料投加逐步推进密闭式投料装置。

严格控制储存和装卸过程 VOCs 排放，鼓励采用压力罐、浮顶罐等替代固定顶罐。实施废气分类收集处理。

加强非正常工况（退料、吹扫、清洗等过程）废气排放控制。开车阶段产生的易挥发性不合格产品应收集至中间储罐等装置。

3) 加大工业涂装 VOCs 治理力度

加大集装箱、汽车、木质家具、船舶、工程机械、钢结构、卷材制造等行业工业涂装 VOCs 治理力度。

强化源头控制，全面推广使用粉末、水性、高固体分、辐射固化等低 VOCs 含量的涂料替代溶剂型涂料。

推广紧凑式涂装工艺、先进涂装技术和设备。汽车制造推广“三涂一烘”“两涂一烘”或免中涂等紧凑型工艺、静电喷涂技术、自动化喷涂设备。汽车金属零配件企业鼓励采用粉末静电喷涂技术。集装箱制造一次打砂工序、卷材制造推广采用辊涂涂装工艺。木质家具制造推广使用自动喷涂或辊涂等先进工艺技术。钢结构制造大力推广高压无气喷涂、空气辅助无气喷涂、热喷涂等涂装技术，限制空气喷涂使用。船舶制造、工程机械制造要提高室内涂装比例，鼓励采用自动喷涂、静电喷涂等技术。

有效控制无组织排放。采用密闭设备或在密闭空间内操作。逐步淘汰露天喷涂。排放工序应配置密闭废气收集系统。

推进建设适宜高效的治污设施。喷涂废气设置高效漆雾处理装置。调配、流平等废气可与喷涂、风干废气一并处理。

4) 深入推进包装印刷行业 VOCs 综合治理

重点推进塑料软包装印刷、印铁制罐等 VOCs 治理。

强化源头控制。大力推广使用低（无）VOCs 含量的油墨以及胶粘剂、清洗剂、润版液、洗车水、涂布液。对塑料软包装、纸制品包装等，推广使用水醇性油墨、单一组分溶剂油墨，鼓励使用水性油墨、辐射固化油墨、紫外光固化光油等，推广应用无溶剂、水性胶等环境友好型复合技术。鼓励包装印刷企业实施胶印、柔印等低（无）VOCs 排放的印刷工艺。

加强无组织排放控制。加强含 VOCs 有机原辅材料储存、调配、输送、使用等工艺环节 VOCs 无组织逸散控制，转运和储存过程采取密闭措施；对于调配过

程要采取车间环境负压改造、安装高效集气装置等措施；涂布、印刷、覆膜、清洗等含 VOCs 物料使用过程应采用密闭操作，无法密闭的应采取局部气体收集措施；凹版、柔版印刷机宜采用封闭刮刀，或通过安装盖板、改变墨槽开口形状等措施减少墨槽无组织逸散。对烘干过程，要采取循环风烘干技术以减少废气排放。

提升末端治理水平。包装印刷企业宜采用吸附浓缩+冷凝回收、吸附浓缩+燃烧、减风增浓+燃烧等高效治理设施，确保达标排放。

5) 加大工业园区和产业集群 VOCs 综合治理

加强资源共享,实施集中治理,开展园区监测评估,建立环境信息共享平台。

强化工业园区和产业集群统一管理。引导产业集群整体升级。建立健全档案管理制度,明确企业 VOCs 源谱,识别特征污染物,载明企业废气收集与治理设施情况、重污染天气应急预案等环保信息。开展园区和产业集群监测、排查、环保设施建设运营等一体化服务。

对石化、化工类园区,推行泄漏检测统一监管,鼓励建立 LDAR 信息管理平台。对涂装类工业园区,鼓励建设集中涂装中心,配备废气治理设施。对有机溶剂用量大的工业园区,如包装印刷、合成橡胶及制品等,推进有机溶剂集中回收。对活性炭用量大的工业园区,建立活性炭统一回收、集中再生的管理模式,妥善处置脱附的污染物。

加快推进重点工业园区和产业集群环境 VOCs 监测工作。建设监测预警监控体系,鼓励开展走航监测、网格化监测以及溯源分析等工作。

5.7.3 强化交通污染源减排与推进低碳交通运输体系建设

(1) 推动汽油车尾气排放和蒸发排放为重点的 VOCs 治理

逐步实施更严格的机动车排放标准。全面实施轻型汽车第六阶段排放标准,引入车载油气回收技术(ORVR);实施摩托车第四阶段排放标准,并适时将相关标准纳入强制性产品认证实施。对于在用车,严格实施机动车强制报废标准,淘汰到期的老旧轻型汽车和摩托车。全面提升燃油品质。适时实施和更新汽油标准,显著降低烯烃、芳烃含量和夏季蒸汽压。加强监督管理。加大新车生产环保一致性、在用车环保符合性、在用车环保检验、油品质量等监管力度,加快推进

机动车遥感监测建设和联网。推广新能源和清洁能源汽车，倡导绿色出行和环保驾驶，加强城市路网合理设计，减少机动车使用频率和怠速时间。2025 年新能源和清洁能源汽车销量占比达 20%以上。

(2) 全面加强油品储运销油气回收治理

加强汽油储运销油气排放控制。减少油品周转次数。加快完成加油站、储油库、油罐车油气回收治理工作，重点地区全面推进行政区域内所有加油站油气回收治理。建设油气回收自动监测系统平台，大型加油站加快安装油气回收自动监测设备。制定加油站、储油库油气回收自动监测系统技术规范，企业要加强对油气回收系统外观检测和仪器检测，确保油气回收系统正常运转。

推进港口储存装卸、船舶运输油气回收治理。修订储油库大气污染物排放标准，增加港口储存装卸过程油气回收要求；修订汽油运输大气污染物排放标准，修订船舶法定检验规则，提出船舶油气回收要求。

(3) 强化汽柴油货车治理监管

健全燃油和车用尿素管理制度，全面供应符合第六阶段强制性国家标准 VI B 车用汽油（含乙醇汽油），到 2025 年，年销售汽油量大于 3000 吨的加油站全部安装油气回收自动监控设备。全面建立重型柴油车污染防治责任制度和环保达标保障体系，强化重点用车单位进出场车辆电子台账动态管理。增设黑烟抓拍设备，建设重型柴油货车远程排放监控系统，完善覆盖全省主要交通干线的遥感监测网络，到 2025 年，建成完备的机动车排放“污染检验和维护”制度。开展生产、进口、销售机动车和发动机、非道路移动机械等监督检查，生产（进口）的主要车（机）型系族年度抽检率达到 80%以上。

(4) 加强非道路移动机械污染管控

全面实施非道路移动机械第四阶段排放标准。加快老旧工程机械淘汰，基本淘汰国一及以下排放标准或使用 15 年以上的工程机械，具备条件的更换国三及以上排放标准的发动机。地级及以上城市（含定州、辛集）调整完善并公布禁止使用高排放非道路移动机械的区域。实施船舶发动机第二阶段标准和油船油气回收标准。港口、机场、铁路货场、物流园区等新增或更换作业车辆中新能源汽车比例达到 100%，推进非道路移动机械低排放控制区建设，推动机场、港口、铁

路货场、物流园区非道路移动机械零排放或近零排放。落实非道路移动机械使用登记管理制度，开展排放抽查，消除工程机械冒黑烟现象。

（5）持续优化交通运输结构

优化交通运输结构，持续降低运输能耗和二氧化碳排放强度，推进节能低碳型交通工具，积极引导低碳出行。

完善公路网状交通格局，畅通拥堵路段，提高公路通行能力。进一步完善与周边省市干线铁路联系。完善集疏港铁路和大型工矿企业、物流园区铁路专用线网络，提高铁路货物运输能力。到 2025 年，铁路货运占比提升至 15.4%，公路货运下降至 82.7%。具有铁路专用线的大型企业，大宗货物采用绿色运输的比例达到 90%以上。煤炭、矿石等大宗货物集疏港绿色运输方式占比达到 80%以上。火电、钢铁、石化、化工、煤炭、焦化等行业大宗货物通过铁路、水路、管道、新能源或国六货车等清洁方式运输比例达到 70%以上。建材（含砂石骨料）清洁方式运输比例达到 50%以上。

（6）构建高效集约的绿色流通体系

深入实施多式联运示范工程，开展集装箱运输、商品车滚装运输、全程冷链运输、电商快递班列等多式联运试点示范创建，到 2025 年，港口集装箱铁水联运量达到 40 万标箱，打造 45 条以上多式联运线路。鼓励构建“外集内配、绿色联运”的公铁联运城市配送新体系。发展绿色仓储，鼓励和支持在物流园区、大型仓储设施应用绿色建筑材料、节能技术与装备以及能源合同管理等节能管理模式。推进城市绿色货运配送示范工程建设。加强快递包装绿色治理，推进大型电商和寄递企业包装物回收循环利用共享，2025 年，邮件快递包装绿色化率达到 100%。推进服务首都的区域性物流产业基地建设。加快建设一批智慧物流园区，推进国家优秀和示范物流园区功能改造提升，推进航空快件基地和国家骨干冷链物流基地建设。

（7）推动车船升级优化

推进国四及以下标准的营运重型柴油货车和老旧燃气车辆淘汰。加快新能源或清洁能源车辆推广使用，到 2025 年，新能源汽车新车销量占比达 20%左右。支持车用 LNG 加气站、充电桩建设，在交通枢纽、批发市场、快递转运中心、

物流园区等建设充换电基础设施，形成 200 万辆电动汽车充电服务能力，建设一批加氢示范站。除严寒地区外，到 2025 年，城市公交车基本实现新能源和清洁能源化；新增或更新的轻型物流车、中短途客运车、环卫清扫车、3 吨以下叉车、市政园林机械使用新能源比例达到 90% 以上；新增或更新的公务用车使用新能源比例达到 60%，重点区域达到 80%，鼓励租用新能源车。建设绿色港口，实施船舶大气污染排放控制区制度，推动船舶发动机升级或尾气处理，降低港口船舶 NO_x、VOCs 排放。到 2025 年，秦皇岛港、唐山港、黄骅港 80% 的 5 万吨级以上泊位（除油气码头外）具备岸电供应能力，推动入港船舶安装岸电受电设施。加快沿海、内河老旧船舶更新改造。支持机场开展电动化设备建设和应用，大中型机场飞机辅助动力装置替代设施基本实现“应装尽装”“应用尽用”，机场新增作业车辆和机械基本实现电动化。

5.7.4 有序开展生活源农业源污染防治

为切实降低 O₃ 污染，应同时加强建筑装饰、汽修、干洗、餐饮等生活源和农业农村源 VOCs 和 NO_x 治理。

（1）推进建筑装饰行业综合治理

严格控制装饰材料市场准入，逐步淘汰溶剂型涂料和胶粘剂，推广使用符合环保要求的产品。实施区域统一标准，推广和制定区域统一的建筑类涂料 VOCs 含量限值标准。完善装修标准合同，增加环保条款，培育扶持绿色装修企业。鼓励开展装修监理和装修后室内空气质量检测验收。

（2）推动汽修行业治理

大力推广使用水性、高固体分涂料，汽修行业要率先推进底色漆使用水性、高固体分涂料。推广静电喷涂等高效涂装工艺，喷漆、流平和烘干等工艺操作应置于喷烤漆房内，使用溶剂型涂料的喷枪应密闭清洗，废气集中收集并导入治理设施，实现达标排放。

(3) 开展其他生活源 VOCs 治理

推广使用配备溶剂回收制冷系统、不直接外排废气的全封闭式干洗机，淘汰开启式干洗机。定期进行干洗机及干洗剂管道阀门的检查。城市建成区餐饮企业安装高效油烟净化设施。开展规模以上餐饮企业污染物排放自动监测试点，推广使用高效净化型家用吸油烟机。

(4) 积极推进农业农村源污染防治

大力推进秸秆综合利用。在人口集中区域、机场周边和交通干线沿线以及地方政府划定的区域内，基本消除露天焚烧秸秆现象，秸秆综合利用率达到 85%，2025 年达到 90%。有效推进北方地区冬季清洁取暖，控制散煤燃烧排放，积极推进“无煤区”建设。

5.8 小结

利用 WRF+CMAQ 数值模型，结合敏感性分析方法，对河北省臭氧污染现状尤其是理论最佳改善途径展开研究，并在此基础上针对《河北省生态环境保护“十四五”规划》中提出的优良天数达标率设计多个实际的臭氧控制情景方案。

以 2019 年河北臭氧季为研究时段，回溯数值模拟结果表明气象和空气质量场的模拟结果基本在合理范围之内，符合进行空气污染控制决策计算分析对模式性能评估的要求。利用 DDM-3D 敏感性分析技术分析了重点城市臭氧对模拟域内 NO_x 和 VOCs 源排放参数的敏感性，结果表明控制本地 VOCs 排放有助于在太阳辐射强的白天时段持续降低臭氧生成，不仅有利于抑制臭氧日最大 8 小时平均浓度的超标情况，也可有效抑制臭氧浓度超标时数；但控制 NO_x 排在某些情况下可能导致臭氧浓度上升。总结臭氧生成敏感程度和敏感性系数空间分布的分析结果表明主城区是臭氧高值区，臭氧生成对本地 VOCs 源排放最为敏感，敏感程度最高的三个人为 VOCs 排放种类分别是移动源、工业源和溶剂使用。因此，控制这三类源 VOCs 排放是城市主城区臭氧污染控制的关键；同时，臭氧生成对移动源、工业源 NO_x 排放敏感性在主城区可能为负值，因此臭氧污染控制需要同时考虑控制地区，尤其是针对 NO_x 排放的协同控制。

利用 DDM-3D 敏感性分析技术以及 RFM 简化模式，针对臭氧典型污染时段，构建重点城市基于 VOCs 和 NO_x 源排放削减的臭氧浓度 EKMA 曲线，同时提出对应减排路径，选取重点城市代表站点进行控制方案情景分析。结果表明，石家庄的绝大部分污染天的减排路径都需要同时减排 NO_x 和 VOCs，且着重减排 VOCs，邯郸的 NO_x 和 VOCs 减排路径与石家庄较为相似，大部分天 NO_x 和 VOCs 的减排比例比较接近，部分天需要侧重对 VOCs 的控制，而衡水与石家庄和邯郸不同，NO_x 和 VOCs 减排路径更侧重于对 NO_x 的减排控制，大部分天在同时减排 NO_x 和 VOCs 的基础上需要更加专注对 NO_x 的控制。总的来说，在臭氧污染较为严重时，需要同时对 NO_x 和 VOCs 排放进行控制，但是不同城市会各有侧重，即在此基础上侧重加强对 NO_x 或者 VOCs 的控制；具体到细分人为源上，工业源、移动源和溶剂使用源都是贡献较为显著的源，对这些源的控制是否能降低臭氧浓度完成达标目标的关键，同时其余人为源如居民源、生物质燃烧源等尽管贡献不如工业源等显著，但是也需要加强控制。尤其是在污染较重的情况之下，仅控制主要贡献源是很难大幅降低臭氧浓度到完成达标任务的。基于 EKMA 曲线和细分人为源敏感性结果的控制方案情景分析表明每天的臭氧浓度利用其敏感性系数得到的达标控制策略即排放削减方案很可能不能满足其他天的达标需求，同一个城市不同区域的减排策略也可能出现不同，这给臭氧污染的精细化管控带来了挑战。

基于以上臭氧回溯模拟和敏感性分析结果，采用 WRF+CMAQ 数值模型系统，围绕“十四五”河北 O₃ 控制目标设计三种情景方案，模拟并评估各情景减排条件下空气质量相对 2020 年现状的改善效果。将 2020 年作为基准年，利用 2019 年气象和 2020 年排放清单的回溯模拟结果，结合各污染物 2020 年观测值，引进相对响应因子，针对三个情景源排放变化条件下的各污染物浓度水平进行估算，并对河北省各城市进行臭氧达标分析。基于基准年观测值的预测结果表明，按照分阶段目标的控制路径，“十四五”期间河北省臭氧浓度持续下降，优良天数比例持续提高，空气质量进一步改善。臭氧污染方面，基础目标情景总体达成“十四五”目标，但具体到城市层面臭氧达标较少，加强目标情景下达标城市增加，强化目标情景下全省所有城市皆达标，但是强化目标的减排方案本身较为严苛，短期内达成难度较大。

需要注意的是，各控制情景仅特别针对河北省设计了理想的减排比例，虽然考虑了最内模拟网格内周边邻近省外其他城市的减排，但未考虑周边省市如河南、山西、山东等全面减排变化对河北的影响。在本项研究中我们基于前期的研究成果选取了 2020 年作为基准年，但情景模拟全都采用了 2019 年的气象条件，主要是前期研究成果表明 2019 年的污染气象条件在 2016-2020 的五年间，是最接近五年平均的污染气象状况的。相对于 2016-2020 的五年平均状况 2019 年的污染气象条件稍差，属于略微不利于污染改善的一年。因此“十四五”期间，在周边省市全面同步采取理想减排措施且气象条件不差于 2019 年的前提下，河北省空气质量将更加好于上述情景预测结果。

第6章 臭氧污染管控政策建议

6.1 建立健全臭氧前体物控制监督管理体系

6.1.1 VOCs 地方排放标准制修订建议

通过比较评估我国与国外石化行业 VOCs 排放标准发现，我国 VOCs 排放控制虽然起步晚，但对 VOCs 排放控制力度相当大，接连发布的国家新标准及地方标准对石化企业的 VOCs 排放标准要求高，对 VOCs 污染排放管控的严格程度已经不亚于发达国家。因此，建议重点考虑这些标准的实施和落地。北京、天津等城市工业涂装“行业+综合”的 VOCs 排放标准体系已逐步形成。针对印刷行业，国家《印刷包装工业大气污染物排放标准》正在制定过程中，但部分省市已发布实施相关标准。

河北省已经制定的 VOCs 排放标准有：

DB 13/ 2208-2015 青霉素类制药挥发性有机物和恶臭特征污染物排放标准

DB 13/ 2322-2016 工业企业 VOCs 排放标准：医药制造工业、石油炼制工业、石油化学工业、有机化工业、炼焦工业、钢铁冶炼和压延加工业、木材加工业、家具制造业、交通运输设备制造业、表面涂装业、印刷工业、其他行业共 12 类污染源。

基于美国、欧盟、日本、台湾地区和我国国家与地方现行 VOCs 排放标准体系的对比分析及所识别的问题，针对河北省 VOCs 排放标准制修订提出如下建议：

一是工业企业 VOCs 排放节点和 VOCs 排放物种存在较大差异，包含的产品和工艺太多，实际执行起来较为困难，因此需进一步细化。建议将目前的工业企业 VOCs 排放标准分门别类给出各自工业企业的地方排放标准，如医药制造工业 VOCs 排放标准等。

二是为提高标准管控的精准性、针对性和有效性，在制修订 VOCs 排放标准时，可结合行业污染排放特征，围绕 VOCs 物种的光化学反应活性等内容提出相关规定。

三是强化源头 VOCs 排放控制，制定高固分涂料、水性涂料（油墨）各类涂料产品的 VOCs 含量限值，并配以相关分析方法；同时加强 VOCs 工艺过程控制，在强调密闭要求的基础上，制定吸风罩捕集效率的统一判断标准。

四是标准体系中针对有组织排放选用 TOC(有机碳)代替 NMHC 作为 VOCs 的表征指标，针对无组织排放借鉴欧盟的逸散率作为控制指标。当前，NMHC 是我国工业企业表征 VOCs 的常用指标，2017 年颁布了新的 NMHC 分析方法《固定污染源废气总烃、甲烷和非甲烷总烃的测定气相色谱法 HJ38—2017》代替原来的《固定污染源排气中非甲烷总烃的测定气相色谱法 HJT38—1999》，分析方法与美国 Method 25 相似。但根据目前的测试方法，NMHC 已经不再局限于碳氢化合物，而是在 FID 上能响应的除甲烷外有机化合物的总称。NMHC 值通常为总烃和甲烷之差，使用不同方法分离甲烷和非甲烷总烃的效率、灵敏度也不同，导致误差较大，同时考虑到工业过程中甲烷排放量极少，因此选用 TOC 或 THC（总碳氢）代替 NMHC 作 VOCs 的有组织排放控制指标更为合理。另外，以厂界和厂区质量浓度限值作为无组织排放指标，不能准确地反映无组织逸散情况，因此可以考虑借鉴欧盟使用的逸散率来制定排放绩效值，以强化总量控制。

五是因 VOCs 治理技术体系复杂且缺乏相关的治理经验，在技术和工艺选择时感到无从下手，往往由于技术选择不当，难以实现达标排放，造成重复治理的现象较普遍。从国外的经验来看，针对 VOCs 的治理，在一个排放标准颁布后，相关的治理技术指导一定要尽快跟进，以指导相关行业的治理工作。虽然目前个别地区发布了相关治理技术指导，但因 VOCs 治理技术的复杂性，缺乏针对不同技术的选择原则，实际上很难起到具体的指导作用。《重点行业 VOCs 污染控制技术指南》的制定工作已成为目前 VOCs 治理的当务之急，建议河北省组织制定并颁布实施，以规范 VOCs 治理市场，为业主单位和管理部门提高技术指导。

6.1.2 建立健全监测监控体系

目前，我国国家空气质量监测站点的监测项目包括 SO₂、NO₂、PM₁₀、CO、O₃ 和 PM_{2.5} 等污染物，VOCs 的监测数据仍然不足。未来需要加强环境质量和污染源排放 VOCs 自动监测工作，全面提升 VOCs 环保监管能力。将石化、化工、包装印刷、工业涂装等 VOCs 排放重点源纳入重点排污单位名录，主要排污口安

装自动监测设备，并与生态环境部联网，其他企业逐步配备自动监测设备或便携式 VOCs 检测仪。推进 VOCs 重点排放源厂界 VOCs 监测。加快制定和完善家具、人造板、电子工业、包装印刷、涂料油墨颜料及类似产品、橡胶制品、塑料制品等重点行业自行监测技术指南。工业园区应结合园区排放特征，配置 VOCs 连续自动采样体系或符合园区排放特征的 VOCs 监测监控体系。建立与排放标准相适应的 VOCs 监测分析方法标准、监测仪器技术要求，加快制定固定污染源 VOCs 排放连续自动监测系统、便携式监测技术规范。

6.1.3 全面实施排污许可制度

建立健全涉 VOCs 和 NO_x 工业行业排污许可证相关技术规范及监督管理要求。逐步在石化行业，制药、农药行业，电子、包装印刷、汽车制造等重点行业全面推行排污许可制度。通过排污许可管理，落实企业污染物源头削减、过程控制和末端治理措施要求，逐步规范涉 VOCs 和 NO_x 工业企业自行监测、台账记录和定期报告的具体规定，推进企业持证、按证排污。

6.1.4 加强统计与调查

我国目前还没有官方的 VOCs 排放统计。为了有效掌握 VOCs 排放情况并制定相关政策，需要将 VOCs 排放纳入污染源普统计与调查工作并完善其科学性，结合排污许可证实施情况和城市污染源排放清单编制工作。加强 VOCs 减排核查核算。出台重点行业环境影响评价源强核算技术指南。探索引入第三方核算机制。

6.1.5 加强监督执法

全面加强执法能力建设和技术培训。制定执法人员培训计划，围绕 VOCs 管理的法规标准体系、污染防治政策、综合治理任务，重点行业主要排放环节、排放特征、控制措施等要求、废气收集与治理技术，监测监控技术规范、现场执法检查要点等，系统开展培训工作。

加大污染物排放监管执法力度，对 VOCs 和 NO_x 污染治理设施、台账记录情况进行监督检查，推动企业加强治污设施建设和运行管理。严厉打击违法排污

行为，综合运用连续计罚、查封扣押、限产停产等手段，依法依规严格处罚，并定期向社会公开。开展重点行业专项执法行动，重点对 VOCs 和 NO_x 无组织排放、废气收集以及污染治理设施运行等情况进行检查，监控企业综合控制效果。

整顿和规范环保服务市场秩序，加强对第三方运维机构监管。探索实施“黑名单”制度，将技术服务能力差、运营管理水平低、存在弄虚作假行为、综合信用差的环保公司和运维机构列入“黑名单”，纳入全国信用信息共享平台，定期向社会公布，接受公众监督。

6.2 “十四五” VOCs 重点行业管控建议方案

2013 年实施“大气十条”以来，国家相关部委颁布了多项文件明确提出了对 VOCs 的减排与控制要求，但由于涉及到 VOCs 污染控制的相关政策、法规和管理制度体系不健全，大部分涉 VOCs 污染企业处于观望状态；2017 年全面启动督查行动后，大量涉及 VOCs 排放的企业被关停并转，VOCs 治理市场也开始爆发。因此，2013 至 2016 年“2+26”城市 VOCs 排放量仍然呈现增长趋势，2017 年至今呈现缓慢下降趋势。然而，涉 VOCs 企业大多采用一次性活性炭吸附装置、简易的光催化/光氧化装置等低端末端治理技术，因种种因素导致 VOCs 治理的效果较差。归纳起来存在这样的问题，排放标准体系制定进展迟缓制约了 VOCs 治理；《重点行业 VOCs 污染控制技术指南》未出台，导致技术选择无依据和治理设施重复建设；VOCs 检/监测市场管理混乱；VOCs 的排放监管困难，治理设施运行率低；VOCs 治理设施安全问题突出，含 VOCs 废气易燃、易爆，应强化治理设备的安全性。综合课题主要成果，提出下述管理方案。

(1) 强化 VOCs 活性物种的控制，2025 年这些物种在环境空气中的年日均浓度应下降 20%。夏季控制 VOCs 的关键物种为烯烃、苯系物和醛类物种，重点控制的源小客车、轻型货车、炼焦、秸秆燃烧、塑料制造；冬季为苯系物和烷烃类物种，重点控制的源为小客车、炼焦、轻型货车、建筑材料制造、沥青铺路、泡沫塑料、建筑表面涂装、炼铁、重型货车和加油站。

(2) 制定、修订重点行业 VOCs 排放地方标准，包括移动源油气蒸发、制药、农药、汽车涂装、集装箱制造、印刷包装、家具制造、人造板、涂料油墨、

纺织印染、船舶制造、储油库、汽油运输、干洗、油烟等 VOCs 排放标准。完善涂料、油墨、胶粘剂等产品挥发性有机物限值标准。

(3) 重点控制汽油车蒸发排放和汽油车与非道路移动源尾气排放，推进移动源 VOCs 减排。

(4) 强化 VOCs 源头控制，推行清洁生产。

对含 VOCs 原料应采用环保、清洁原料替代和密闭输送原料、储存和封闭加料口。

推广使用水性涂料、油墨、胶粘剂，鼓励生产、销售和使用低毒、低挥发性有机溶剂。2025 年前逐步淘汰溶剂型涂料、油墨和胶粘剂的生产及使用。

2023 年底前全面使用符合国家有关低 VOCs 含量产品规定的木器涂料、车辆涂料、船舶涂料、机械设备涂料、集装箱涂料等。2025 年底前含 VOCs 原辅料用量在 10 吨以下的小型企业全面完成源头替代措施。

2023 年开始不再新增使用溶剂型油墨、溶剂型胶黏剂的纸包装印刷企业。2025 年完成所有使用溶剂型油墨印刷企业的清洁生产审核和后评估工作。

(5) 全面加强 VOCs 无组织排放管控。

2022 年底前既有化工园区实现园区整体封闭管理，基本完成无组织排放管控、废气收集、治污设施建设等减排工作，2025 年底全面完成化工行业 VOCs 综合治理。

2022 年底前基本完成含 VOCs 物料储存、转移、输送、生产和使用过程密闭化改造。加快推广紧凑式涂装工艺、先进涂装技术和设备。

(6) 加强废气收集，推进建设适宜高效的治污设施。

2025 年前，涉 VOCs 企业应采用集气罩收集 VOCs 产生环节 VOCs 排放量的 95% 以上加以回收利用或采用燃烧氧化、吸附吸收、吸附浓缩+燃烧处理方式、或吸附+冷凝回收技术等高效末端净化技术集中处理。

(7) 加强监测监控。VOCs 排放重点源，纳入重点排污单位名录，主要排污口安装自动监控设施，并与生态环境部门联网，2025 年底全部完成。

6.3 臭氧污染监测预警体系

目前河北省已逐步建立了完善的 PM_{2.5} 及其化学组分监测网络，已在颗粒物污染预报预警和重污染应急中发挥重要作用，但没有针对臭氧污染控制的监测网络，不能及时支撑对一个城市和区域臭氧形成机制和来源认识的基础数据。建立和完善臭氧及其前体物监测网络，提升臭氧预报预警技术水平是十分必要的，因应加快推进光化学监测网建设。。

气象条件在臭氧形成和区域传输过程中非常重要，因此臭氧监测点的确定必须依据当地的气象条件，必须识别有利于臭氧形成期间一次污染物排放源的下风区域，重要的是考虑风、与臭氧形成相关的时间长度、反应物主要源的位置，这些因子在确定城市区域最大臭氧浓度出现在什么位置是有用的。由于臭氧前体物的混合将在较大范围内混合，因此不需要监测臭氧微尺度的变化。

为了开发和评价 O₃ 的控制策略，需要监测臭氧和臭氧前体物。为了确定输入到城市区域的臭氧和臭氧前体物的浓度，监测仪器应放置在城市地区的上风向，这将帮助确定多大部分区域臭氧问题是因局地排放所致和多大部分是由于传输的臭氧和臭氧前体物所致。为了制定符合当地的臭氧控制策略，测量 NO 和 VOC 浓度也是相当重要的。特别是 NO 和 VOC 监测设备应放置于靠近主要的 NO 和 VOC 排放源的地区，这些地区通常是最高车辆交通的城市化部分的地区。

目前应针对当前城市与区域近地面 O₃ 浓度持续升高趋势，建立 O₃ 污染预报预警和重污染应急响应体系，指导并实施科学的 NO_x 和 VOCs 减排工作，提示公众应对 O₃ 污染所采取的减排和保护措施，以控制 O₃ 污染和缓解 O₃ 污染所造成的危害。

由于臭氧生成机制的复杂性和前体物来源的多样性，且目前臭氧背景浓度已相当高，其污染的区域性特征十分显著，使得臭氧污染防控比煤烟型污染治理显得更加困难，区域联防联控更加必要。

同时，应加强省、市两级环境空气质量预报能力建设。构建“省-市-县”污染天气应对三级预案体系，完善 PM_{2.5} 和臭氧重污染天气预警应急响应机制。探索轻、中度污染天气应对措施。逐步扩大重污染天气重点行业绩效分级和应急减排

的实施范围。推进重点行业企业绩效分级管理规范化、标准化，完善差异化管控机制。强化重污染天气应急响应执法检查，畅通应急减排信息公开和公众监督渠道。提升 PM_{2.5} 和臭氧协同监测与预警能力，加快推进固定污染源和环境 VOCs 监测纳入全省大气环境监管大数据平台。

6.4 VOCs 监督管理体系

VOCs 监管体系的内容主要包括以下八项内容：排放量估算方法学管理、重点企业全过程精细化控制与管理、VOCs 减排监督管理、以污染源分类为基础的 VOCs 排放量削减考核与管理、VOCs 监测监控管理、第三方 VOCs 环境服务试点、环境经济政策、信息公开和公众参与。

（1）排放量估算方法学管理

不同行业 VOCs 排放差异明显，同一行业不同工艺 VOCs 排放也有较大差异。建议建立 VOCs 排放量估算方法学管理制度，由企业或第三方环境服务机构申报 VOCs 排放量估算方法，由园区管理委员会依托环境工程评估机构，组织专家审核估算方法，并建立符合规范的方法学清单。允许企业从实测法、排放因子法、公式法等多种符合规范的估算方法中选择适合企业实际生产与排放情况方法估算 VOCs 排放量。企业初次申报或变更排放量估算方法时，化工区管理委员会应组织专家审核估算方法。

（2）重点企业全过程精细化控制与管理

针对重点企业，从源头控制、过程管理、末端治理等环节提出全过程精细化控制要求，主要包括：优化空间布局，推动产业升级；严把建设项目环境影响评价准入关；大力推进清洁生产；加强有组织工艺废气治理；严格控制无组织排放，包括设备动、静密封点泄漏、储存与调和过程的挥发、装卸过程的挥发、污水收集系统逸散等；制定开停车、检维修、生产异常等非正常工况操作规程和污染控制措施等。

(3) VOCs 减排监督管理

为推动园区 VOCs 治理工作，引导企业自发开展 VOCs 综合整治，在总量控制实施前，应开展 VOCs 减排工作。对已实施 VOCs 排放治理的企业，在核定其 VOCs 减排量的基础上监督减排情况。企业申报已实施的减排措施与已达到的减排效果，化工区管理委员会依托环境评估机构组织减排量核定，对经核定的 VOCs 减排量予以奖励。开展 VOCs 减排监督管理工作可加快搜集与整合化工区内各企业 VOCs 减排措施、减排效果、监测方法、排放量估算方法等关键资料与基础数据，为逐步建立基于准确数据的总量控制和空气质量管理工作的奠定基础。

(4) 以污染源分类为基础的 VOCs 排放量削减考核与管理

明确污染源分类，按年度估算各类污染源排放量。园区管理委员会应定期考核各企业各污染源的 VOCs 排放量削减情况，并向当地环境保护主管部门报送园区 VOCs 排放和削减情况，并附有毒有害物质清单。有组织排放应明确排气筒（烟囱）数量、位置，污染物种类、排放量、浓度、排放规律和估算方法、达标排放情况等基本信息；无组织排放应明确排放位置、排放规律、排放量估算方法、厂界监测数据及达标排放情况等基本信息。VOCs 污染治理设施应明确年度运行情况、处理效率、排放浓度和削减量等。

此外，应建立一套基于过程管理的污染源管理体系，针对不同排放源的特点，对污染物排放进行分类管理。对有组织排放源，通过严格控制污染物排放浓度和排放速率来管理；对无组织排放源，按照过程控制的原则，通过建立无组织排放污染控制标准，针对生产和运行过程提出控制 VOCs 排放的技术要求和管理体系标准。对非正常排放，提前确定开停车、检维修、故障处理等非正常工况时的工作程序、预计污染物排放源强、拟采取的污染控制措施，在日常监管中建立企业非正常排放报告或备案制度。

(5) VOCs 监测监控管理

建立 VOCs 监测监控管理政策体系，加大对高毒性或高危害性 VOCs 物种的监测与监控力度。向社会公布企业 VOCs 监测体系的运行情况与监测结果，接受社会监督，构建企业-社会-政府三级 VOCs 监测监控管理机制。建立重点监控企业名单，将工艺落后、污染扰民严重、环境风险大、跑冒滴漏严重、环保管理

差、生产使用重点环境管理危险化学品的企业作为重点整治和监管对象；生产装置、控制措施不符合产业政策和清洁生产要求的企业，也应纳入重点监控名单，限期淘汰不符合要求的装置和设备；将长期超标排放 VOCs 的企业列入黑名单，并逐步建立市场退出机制。各名单分类管理，并不断完善。此外，化工区应建立 VOCs 污染源档案，并结合园区企业布局、气象和地理条件建立重点 VOCs 物种监测监控体系。

（6）第三方 VOCs 环境服务试点

鉴于 VOCs 管理工作相对复杂，一些小型企业在 VOCs 排放管理中技术力量较为薄弱，应鼓励企业选择第三方环境服务机构参与企业 VOCs 污染防治工作，包括监测企业 VOCs 排放、核算 VOCs 排放量、申报排放量估算方法，并为企业制定 VOCs 治理方案。应引导企业在权责清晰的前提下将环境保护工作分解到环保市场。

（7）环境经济政策

充分发挥市场机制作用，建立政府、企业、社会的多元化投入机制，拓宽融资渠道。推行激励与约束并举的减排新机制，采取“以奖代补”、“以奖促防”、“以奖促治”等方式，对企业的 VOCs 减排工作予以支持。

（8）信息公开和公众参与

建立重点企业环境信息强制公开制度，发布企业的相关排放数据、治理措施与减排效果。将虚报数据或管理督查考核中不达标的企业在环境保护部门网站上予以公开。加强人民群众监督力度，全面提升全民环境意识，不断增强公众参与环境监督与保护的能力。

6.5 NO_x 和 VOCs 非线性协同减排策略

6.6 加强省域大气污染联防联控和大气污染综合治理

加强区域大气污染联防联控，强化区域大气污染综合治理。设立省域内协调领导小组和轮席会议制度。建立省域大气污染联防联控区域协调小组和轮席会

议制度，通过定期召开大气污染联防联控联席会议，统筹确立跨区域大气污染联防联控工作方案，并跟踪评估实施进展，确保污染联防联控工作落到实处。推进统一规划、统一标准、统一环评、统一监测、统一执法、统一污染防治措施，探索建立交界区域大气环境管理共建共管机制，强化重大项目环境影响评价区域会商。石家庄、唐山、邢台、邯郸重点开展 PM_{2.5} 和臭氧协同治理；沧州、衡水、廊坊、保定及雄安新区重点开展挥发性有机物及氮氧化物协同治理，到 2025 年，沧州、衡水、廊坊 PM_{2.5} 达标；张家口、承德、秦皇岛，加强臭氧污染控制，到 2025 年，张家口、承德 PM_{2.5} 稳定达到世卫组织第二阶段标准。将开发区和港口纳入省级环境空气质量监测网络统一管理，健全完善市、县空气质量财政奖惩、市场化补偿等机制。

从治理战略上来说，大气污染治理的重点已经从控制局地污染向区域联防联控拓展，从控制一次污染物向同时控制一次污染和二次污染物延伸，从单独控制个别污染物向多污染物协同控制转变，单个城市的管控策略往往起不到良好的大气污染治理效果。因此，在京津冀及其周边地区大气污染联防联控的背景下，应积极推进京津冀及其周边地区大气污染联防联控协调机制，深化推进跨区域大气污染联防联控合作。积极推动建立跨区域大气污染联防联控联合会商机制。按照统筹协商、责任共担、利益共享和区别对待的原则，建立以省为主导、各城市参加、多部门联动的协调沟通和工作会商机制，针对区域内对空气质量有重大影响的建设项、重大产业布局和举措、各市大气污染物减排核定、空气质量改善评估等重大主题进行充分的论证与协商，并协调解决跨省市行政区域的大气污染传输问题。

免责声明

- 若无特别声明，报告中陈述的观点仅代表作者个人意见，不代表能源基金会的观点。能源基金会不保证本报告中信息及数据的准确性，不对任何人使用本报告引起的后果承担责任。
- 凡提及某些公司、产品及服务时，并不意味着它们已为能源基金会所认可或推荐，或优于未提及的其他类似公司、产品及服务。

Disclaimer

- Unless otherwise specified, the views expressed in this report are those of the authors and do not necessarily represent the views of Energy Foundation China. Energy Foundation China does not guarantee the accuracy of the information and data included in this report and will not be responsible for any liabilities resulting from or related to using this report by any third party.
- The mention of specific companies, products and services does not imply that they are endorsed or recommended by Energy Foundation China in preference to others of a similar nature that are not mentioned.