



珠三角地区空气质量达到 WHO-III 水平 的中长期战略研究

研究报告

广东省环境科学研究院

2020 年 4 月

目录

图目录.....	V
表目录.....	IX
摘要.....	1
1 研究概述	4
1.1 项目背景.....	4
1.2 研究目标.....	5
2 珠三角地区空气质量与 WHO-III 水平的差距.....	6
2.1 珠三角地区空气质量水平现状.....	6
2.2 珠三角区域空气质量历史变化趋势	8
2.3 珠三角区域及城市与 WHO-III 具体目标的差距.....	10
2.3.1 我国环境空气质量标准与 WHO 空气质量准则的差距 ..	10
2.3.2 空气质量现状与 WHO-III 目标的差距	12
2.3.3 小结	13
3 本地 $PM_{2.5}$ 背景浓度及其演变趋势.....	15
3.1 基于模式情景分析法的区域背景浓度估算方法	15
3.2 模型设置与模拟可行性验证	16
3.3 $PM_{2.5}$ 背景浓度及其演变趋势	18
4 珠三角周边地区 $PM_{2.5}$ 和 O_3 的区域传输特征	20
4.1 $PM_{2.5}$ 区域传输特征	20
4.1.1 珠三角 $PM_{2.5}$ 区域传输路径	20
4.1.2 周边省份对珠三角 $PM_{2.5}$ 的传输贡献	21
4.1.3 广东省内对珠三角 $PM_{2.5}$ 的传输贡献	22
4.1.4 外部传输对珠三角 $PM_{2.5}$ 浓度贡献的变化	23

4.2 O_3 区域传输特征	24
4.2.1 模拟方法及模式设置	24
4.2.2 O_3 来源解析模拟结果	25
4.3 小结	27
5 达到 WHO-III 水平的地区空气质量改善经验及启示.....	29
5.1 相关地区空气质量改善历程	29
5.1.1 相关地区 $PM_{2.5}$ 改善历程	29
5.1.2 相关地区 O_3 改善历程	31
5.2 典型地区空气质量改善历程中结构调整历程	32
5.3 跨区域大气环境监管经验	35
5.3.1 美国臭氧污染区域防控策略	35
5.3.2 国际跨境大气污染协同防控机制体制经验	38
5.4 美国和加州空气质量标准的修订历程	42
5.4.1 美国环境空气质量标准概述	42
5.4.2 美国国家和加州环境空气质量标准现状对比	43
5.4.3 美国国家和加州环境空气质量标准制定历程对比	44
5.5 达到 WHO-III 水平地区的空气质量改善经验对珠三角的启示	49
6 珠三角空气质量达到 WHO-III 水平的综合策略情景研究.....	53
6.1 珠三角大气污染物排放结构分析	53
6.1.1 主要大气污染物排放现状	53
6.1.2 工业制造业排放现状	54
6.2 未来经济社会发展形势预测	55
6.2.1 经济发展形势预测	55
6.2.2 人口及城镇化发展形势预测	57
6.3 未来产业发展定位及结构调整情景	59
6.3.1 产业结构现状	59

6.3.2 现行政策导向下未来产业发展定位	62
6.3.3 产业结构调整情景分析	65
6.4 城市交通运输结构及运作模式的调整情景	66
6.4.1 珠三角地区交通运输结构现状评价	67
6.4.2 珠三角地区交通需求预测分析	74
6.4.3 交通运输结构及运作模式的调整情景分析	77
6.5 满足未来工业及交通发展情景的能源供需情景	78
6.5.1 珠三角地区一次能源供应与消费现状	79
6.5.2 珠三角地区能源消费与结构调整情景分析	82
6.6 珠三角域内污染源排放管控需求及域外联动的减排情景设置	85
6.6.1 珠三角区域内污染源排放管控需求	85
6.6.2 珠三角区域外联动减排情景分析	85
6.7 综合策略情景的构建及可达性分析	87
6.7.1 综合策略情景分析	87
6.7.2 达到 WHO-III 目标的推荐情景	90
6.7.3 达到 WHO-III 目标情景实现难度分析	97
7 达致 WHO-III 目标的健康收益及 CO₂ 协同减排效应	99
7.1 尽早达致 WHO-III 目标的健康收益评估	99
7.1.1 空气污染改善健康收益评估方法与基础数据	99
7.1.2 珠三角地区空气质量改善的健康效益	102
7.2 达致 WHO-III 目标的 CO ₂ 协同减排效应评估	103
7.2.1 二氧化碳排放估算方法	104
7.2.2 二氧化碳协同减排量	105
8 珠三角空气质量达到 WHO-III 水平的策略建议	108
8.1 保障珠三角空气质量先行示范的省际协同减排策略	108
8.2 大湾区优质空气质量下生产生活方式转变策略	108
8.2.1 产业结构重大调整方向	109

8.2.2 交通出行方式革新路径	110
8.2.3 能源结构大幅转变策略	110
8.3 广东省污染源严格管控治理及联防联控策略	111
8.3.1 空气质量地方标准升级策略	111
8.3.2 污染源从严管控和深度治理策略	112
8.3.3 区域及城市联防联控策略	112
8.3.4 粤港澳大气污染防控合作策略	113
8.4 区域空气质量分阶段改善目标策略	113
参考文献	115

图目录

图 2- 1 2018 年珠三角区域大气首要污染物贡献比例	6
图 2- 2 2014-2018 年全国三大区域 $PM_{2.5}$ (上) 和 O_3 (下) 浓度变化趋势 ...	8
图 2- 3 2001 至 2018 年珠三角 SO_2 年均浓度变化趋势	8
图 2- 4 2001 至 2018 年珠三角 NO_2 年均浓度变化趋势	9
图 2- 5 2001 至 2018 年珠三角 PM_{10} 年均浓度变化趋势	9
图 2- 6 广东省和珠三角区域 $PM_{2.5}$ 年均浓度近四年年均改善率	10
图 2- 7 2006 至 2018 年珠三角区域 O_3 年均浓度变化	10
图 2- 8 珠三角区域主要污染物与世界卫生组织空气质量准则中各阶段目标的差距.....	13
图 3- 1 嵌套模拟区域与污染源情况标记示意图	17
图 3- 2 2014 年与 2016 年 $PM_{2.5}$ 年均浓度的现状值与背景值	18
图 4- 1 2015 年珠三角肇庆(ZQ)、从化(CH)、南沙(NS)、东莞(DG)、深圳(SZ)、 荃湾(TW) 6 个站点后向轨迹聚类分析图 (张夏夏, 2018)	21
图 4- 2 珠三角地区 $PM_{2.5}$ 及其主要组分空间来源解析	22
图 4- 3 珠三角地区九市间 $PM_{2.5}$ 传输影响贡献	23
图 4- 4 2006 和 2015 年排放情景下, 本地、珠三角内部和珠三角以外地区对 珠三角 $PM_{2.5}$ 的贡献.....	24
图 4- 5 O_3 源解析模拟范围示意图	25
图 4- 6 广东省内区域对珠三角地区 O_3 贡献情况	26
图 4- 7 广东省外区域对珠三角地区 O_3 贡献情况	26
图 5- 1 世界部分浓度水平在 $25\sim35\mu g/m^3$ 的国家和地区 $PM_{2.5}$ 改善幅度	29
图 5- 2 东京地区 $PM_{2.5}$ 浓度年际变化	30
图 5- 3 旧金山和纽约湾区 $PM_{2.5}$ 浓度历史改善趋势	31
图 5- 4 东京都光化学氧化物年均浓度变化趋势	31
图 5- 5 日本和韩国 $O_3\text{-}8h$ 第 90 百分位数变化趋势	32
图 5- 6 欧美部分国家 $O_3\text{-}8h$ 第 90 百分位数变化趋势	32
图 5- 7 旧金山湾区和纽约湾区臭氧最大 8 小时日均值第 4 极大值变化趋势	32

图 5- 8 2001-2016 年东京人口、GDP 及 PM _{2.5} 的变化情况	33
图 5- 9 2001-2016 年东京产业结构及 PM _{2.5} 的变化情况	34
图 5- 10 2001-2016 年东京终端能源结构及 PM _{2.5} 的变化情况	34
图 5- 11 2001-2016 年机动车保有量和组成及 PM _{2.5} 的变化情况	35
图 5- 12 美国东北部地区 NO _x 管控分区示意图	36
图 5- 13 分区减排政策实施效果（以纽约湾区和马里兰州为例）	37
图 5- 14 针对 NO _x 减排的各相关政策开始实施年份及结束年份时间轴	37
图 5- 15 CAIR 政策下部分州 SO ₂ 、NO _x 的排放限额	38
图 5- 16 美国-加拿大跨界大气污染防控合作框架示意图	39
图 5- 17 北美自由贸易区跨界大气污染防控合作框架示意图	40
图 5- 18 欧盟大气污染防控合作框架示意图	41
图 5- 19 空气质量标准修订历程下美国及部分州 PM _{2.5} 年均浓度变化	48
图 5- 20 空气质量标准修订历程下美国及加州 O ₃ -8h 第四大值变化	49
图 5- 21 珠三角现状及三大湾区空气质量处于 WHO-III 阶段时产业结构对比	50
图 5- 22 珠三角现状及其它湾区空气质量处于 WHO-III 阶段时一次能源消费结构对比	50
图 6- 1 珠三角主要大气污染物排放结构现状	54
图 6- 2 珠三角制造业行业主要大气污染物排放结构现状	55
图 6- 3 2000-2018 年珠三角和广东省地区生产总值变化情况	56
图 6- 4 2000-2018 年珠三角地区生产总值、人均生产总值和 GDP 增速变化情况	56
图 6- 5 2000-2018 年珠三角和广东省人均生产总值对比变化情况	57
图 6- 6 2000-2018 年珠三角年末常住人口变化情况	58
图 6- 7 2000-2018 年珠三角常住人口城镇化率变化情况	59
图 6- 8 珠三角地区产业结构年际变化	60
图 6- 9 2000-2017 年珠三角地区工业增加值和总产值年际变化	61
图 6- 10 2000-2017 年珠三角地区工业增加值和总产值年际变化	61
图 6- 11 2000-2017 年珠三角地区工业增加值和总产值年际变化	62

图 6- 12 2017 年珠三角各行业增加值	62
图 6- 13 1995-2015 年世界主要发达国家第三产业占比 (%)	63
图 6- 14 珠三角产业规划布局示意图	64
图 6- 15 珠三角地区货运量年际变化	67
图 6- 16 珠三角地区货物周转量年际变化	68
图 6- 17 珠三角地区货物运输结构的年际变化	68
图 6- 18 珠三角地区客运量年际变化	69
图 6- 19 珠三角地区旅客周转量年际变化	69
图 6- 20 珠三角地区旅客运输结构的年际变化	70
图 6- 21 珠三角地区居民机动化出行情况	70
图 6- 22 珠三角地区居民机动化出行结构	71
图 6- 23 珠三角地区历年机动车保有量情况	72
图 6- 24 2017 年珠三角地区机动车保有量的车型构成	72
图 6- 25 按排放标准阶段划分的珠三角地区机动车保有量构成	73
图 6- 26 按燃料类型划分的机动车保有量构成	73
图 6- 27 1996—2009 年部分国家和地区人均 GDP 与千人机动车保有量的关系	76
图 6- 28 1996—2010 年部分城市经济发展与千人机动车保有量的关系	76
图 6- 29 交通运输情景组成	77
图 6- 30 珠三角地区能源消费量变化趋势	79
图 6- 31 广东省一次能源供应结构变化趋势 (上) 和 2017 年珠三角地区一次能源供应结构 (下)	80
图 6- 32 2017 年珠三角地区分行业能源消费占比	81
图 6- 33 珠三角地区主要耗能行业能源消费结构	82
图 6- 34 珠三角地区传统行业典型产品能耗水平	83
图 6- 35 基础情景 (上) 和强化情景 (下) 下珠三角区域外部分省份和地区主要污染物协同减排量	87
图 6- 36 综合情景构建和可达性分析的技术路线	88
图 6- 37 本地减排为主的综合策略情景和强化协同减排的综合策略情景下珠	

三角区域 2035 年 PM _{2.5} 浓度预测.....	89
图 6- 38 达到 WHO-III 目标推荐情景下主要污染物相较 2017 年的减排比例 以及各领域的减排贡献.....	90
图 6- 39 新兴产业各行业增加值 2017 年现状和 2035 年预测结果对比	92
图 6- 40 2035 年珠三角地区主要行业能源消费量预测	95
图 6- 41 2035 年珠三角地区一次能源供应结构分布	96
图 6- 42 2035 年珠三角地区终端能源消费结构分布	96
图 6- 43 2035 年珠三角地区电力供应结构	97
图 7- 1 珠三角地区 WHO-III 达标情景下的货币化健康效益	103
图 7- 2 珠三角地区能源消耗 CO ₂ 排放变化.....	107

表目录

表 2- 1 2018 年珠三角主要污染物浓度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	7
表 2- 2 我国空气质量标准与世界卫生组织空气质量准则对比	11
表 5- 1 美国部分州 $\text{PM}_{2.5}$ 改善幅度	30
表 5- 2 现行美国国家环境空气质量标准和加州环境空气质量标准对比	44
表 5- 3 美国国家和加州 SO_2 环境空气质量标准修订历程对比	45
表 5- 4 美国国家和加州 NO_2 环境空气质量标准修订历程对比	46
表 5- 5 美国国家和加州 PM_{10} 环境空气质量标准修订历程对比	46
表 5- 6 美国国家和加州 $\text{PM}_{2.5}$ 环境空气质量标准修订历程对比	47
表 5- 7 美国国家和加州 O_3 环境空气质量标准修订历程对比	48
表 6- 1 已出台规划对珠三角 9 市的发展定位	64
表 6- 2 未来产业结构升级调整的三种情景	66
表 6- 3 珠三角地区民用汽车保有量预测结果	76
表 6- 4 未来城市交通运输结构及运作模式调整的三种情景	78
表 6- 5 未来能源供需结构调整的三种情景	84
表 6- 6 珠三角地区 2035 年交通运输结构组成情景	93
表 6- 7 珠三角地区 2035 年交通工具电气化情景	93
表 7- 1 健康风险基准发生率主要基础参数	100
表 7- 2 广东省空气污染基准风险和暴露-反应关系	100
表 7- 3 主要能源利用行业 CO_2 排放因子估算基础参数	104
表 7- 4 工业生产过程 CO_2 排放因子	105

摘要

近年来，珠三角空气质量逐步改善，空气质量在全国大气污染重点防控区域中率先达到国家空气质量二级标准要求（相当于世界卫生组织过渡时期第一阶段（WHO-I）目标）。随着大气污染综合治理的逐步深化和粤港澳大湾区“宜居宜业宜游优质生活圈”建设目标的提出，珠三角面临着持续改善区域空气质量的新形势和新要求，为继续发挥珠三角地区在国家蓝天保卫中的引领示范作用，为全国各区域持续改善大气环境质量提供经验，在能源基金会的资助下，广东省环境科学研究院开展了珠三角地区空气质量达到 WHO-III 水平的中长期战略研究。

珠三角本地 $PM_{2.5}$ 背景浓度的研究表明，必须在本地实施大量减排且联合周边省份和地区进行协同减排的情况下珠三角才有可能实现 WHO-III 目标。达到 WHO-III 水平的国外相关地区空气质量改善经验则表明，在周边地区空气质量协同改善的背景下，结构减排是空气质量持续改善的重要动力。为此，本研究在对珠三角未来经济社会发展的有关规划进行充分调研，对发展形势进行预测和研判的基础上，提出珠三角未来产业发展方向及结构调整、城市交通运输结构及运作模式调整以及满足上述情景的能源供需的三类情景，结合对珠三角区域内污染源排放管控需求和区域外联动减排情景的研究，分析了区域综合改善策略。

情景模拟分析的结果显示，若以 2035 年作为珠三角达到 WHO-III 水平的目标年，则届时在全国各省份 $PM_{2.5}$ 年均浓度均降至 35 微克/立方米以下、2017 年已达标的省份空气质量持续改善的背景下，对珠三角传输作用较为明显的省份中，江西、湖南、安徽等空气质量尚未达标的省份较 2017 年需减排 25%~65%，空气质量现状水平较优的广西和福建需减排 10%~30%；广东省内非珠三角地区需要以 2035 年空气质量达致 $20\mu g/m^3$ 为目标，主要污染物较 2017 年减排 20~30%，其中重点区域为粤北和粤东。珠三角地区则需以加快空气质量改善为目标，采取变革性的结构调整措施，通过不断提升新兴行业在本地产业结构中的占比、推动交通结构不断向低能耗低排放运输方式转变、加快能源结构不断向无煤化电气化方向调整、以及实施强有力的末端治理减排等手段，实现 SO_2 、 NOx 、 PM 和 VOCs

等主要污染物较 2017 年减排 41%~77%。

为实现上述减排量,珠三角地区需要通过强有力的手段全面推动生产生活方式的转变,其中 PM、VOCs 和 NH₃ 三种污染物减排主要来自于产业结构调整,贡献占比 50%以上,NO_x 和 SO₂ 减排则主要来自于交通结构调整和能源结构调整。具体的推荐策略如下:

(1) 建成以战略性新兴产业、先进制造业为主体,现代服务业相配套的现代产业体系,到 2035 年第三产业的比重提升至 68% (比 2017 年提升 11 个百分点),信息技术、生物医药、高端装备制造等新兴行业工业增加值的占比进一步提高 30~35 个百分点,提升至 95%以上,除个别工艺先进、节能环保水平高的优质企业外,水泥、陶瓷、玻璃等建材行业、造纸、钢铁等基本从珠三角地区淘汰退出。

(2) 大宗货物运输大幅向“公转铁、公转水”方向转移,至 2035 年公路货运量分担率由 2017 年的 69%降至 52%;城际旅客出行“公转铁”发展方向,至 2035 年城际旅客出行选择铁路的比例由 2017 年的 24%快速提升至 50%;城市居民绿色出行习惯基本养成,公共交通机动化出行占比不断提升并达至国际先进水平,至 2035 年城市居民日常出行选择公共交通的比例提升至 70%以上。

(3) 工业领域煤炭用量应进一步减少,争取 2035 年煤炭消费 100%用于发电或集中供热,工业行业全面实现天然气化和电气化;交通工具电气化水平迅速提升,至 2035 年铁路机车、公交车和出租车全部实现电动化,私人小汽车的电动化率达到 60%;在现有电力发展规划的基础上,进一步加快燃煤电厂退役步骤,在 2035 年之前,将燃煤电厂发电量占比降至 6%左右。

在上述综合策略情景下珠三角区域 PM_{2.5} 年均浓度有望从 2017 年的 34 微克/立方米降至 15 微克/立方米以内,在 2035 年实现珠三角地区空气质量达到 WHO-III 水平的目标,区域内空气质量改善避免的早逝人数约为 6550 人,每年实现的综合健康效益约为 167 亿元,同时带来 3840 万吨的本地 CO₂ 协同减排效益。

需要指出的是,尽管模拟研究显示上述综合策略情景能够使珠三角在 2035 年实现 WHO-III 目标,但就珠三角经济社会发展的历史趋势和现状,结构调整的部分策略具有较大的实现难度。在产业领域,个别城市新兴行业的基础薄弱,

要在 2035 年前完成传统行业的大幅淘汰和退出，重新打造以新兴行业为主导的产业体系有较大困难；在交通领域，要实现上述情景，需要解决各式联运中转和末端配送的便利性、公共交通最后一公里等一系列问题，对机动车电气化技术的进步和基础设施的建设也有很高的要求；在能源领域，煤电替代持续快速推进所带来的天然气需求和外购电力供应需求大幅增长，给珠三角乃至广东省的能源供应设施建设和能源供应安全带来很大挑战。

珠三角在 2035 年实现 WHO-III 目标需要开展深度结构减排，且结构减排效果的显现需要一定时间，预计未来五年内空气质量改善幅度将维持现状，之后会有所加快，实现 WHO-III 目标的分阶段改善目标策略为：到 2025 年，珠三角区域 $PM_{2.5}$ 浓度降至 $25\sim26\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，到 2030 年降至 $18\sim20\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，在 2035 年降至 $15\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。同时，考虑到以 2035 年为目标年，珠三角达致 WHO-III 水平的情景与现状差距较大且有相当的实现难度，建议将珠三角达致 WHO-III 水平的目标年适当延后。同时建议，从当前环境管理的角度出发，将珠三角空气质量改善的中长期目标定为：到 2025 年，珠三角区域 $PM_{2.5}$ 浓度降至 $28\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，到 2035 年降至 $20\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

1 研究概述

1.1 项目背景

2018 年, 广东省可吸入颗粒物($PM_{2.5}$)、细颗粒物(PM_{10})、二氧化氮(NO_2)、臭氧(O_3)、二氧化硫(SO_2) 和一氧化碳(CO) 六项污染物指标年评价浓度均达到国家二级标准, 在经济保持快速增长的同时, 实现连续四年全面达标。除了臭氧日最大 8 小时均值(O_3-8h) 指标外, 其他各项污染物浓度全部实现同比下降, $PM_{2.5}$ 年均浓度再创新低。2018 年珠三角地区的六项污染物指标年评价浓度均同比下降, 除 O_3-8h 外都达到国家二级标准, 其中 $PM_{2.5}$ 的年均浓度再创新低(达到 $32\mu g/m^3$), 自 2015 年以来连续四年达标。深圳市 $PM_{2.5}$ 年均浓度仅为 $26\mu g/m^3$, 创历史新高, 广州连续两年达标, 佛山也实现首次达标。至此, 珠三角地区经济体量最大的三个市, 全部实现 $PM_{2.5}$ 达标。

珠三角地区较早开展污染治理, 从 2010 年国内率先启动的清洁空气行动计划, 到《大气污染防治行动计划》, 2013-2017 年《计划》实施的五年以来, 广东省超额完成了国家第一阶段大气污染综合防治的考核任务, 实现了空气质量达标, 达到 WHO-I 阶段过渡水平, 对全省经济总量贡献超过 85% 的珠三角, 在全国三大重点防控区域中率先达标。2018 年 7 月 3 日, 国务院发布《打赢蓝天保卫战三年行动计划》, 标志着全国大气污染综合治理第二阶段工作正式开启, 作为大气污染防治的先行地区, 广东省面临着持续改善区域空气质量的新形势和新要求, 在《广东省打好污染防治攻坚战三年行动计划》中也提出了“开启我省迈向空气质量改善第二阶段目标”的更高要求。

2019 年 2 月 18 日, 中共中央、国务院印发《粤港澳大湾区发展规划纲要》。按照规划纲要, 粤港澳大湾区不仅要建成充满活力的世界级地区、国际科技创新中心、“一带一路”建设的重要支撑、内地与港澳深度合作示范区, 还要打造成宜居宜业宜游的优质生活圈, 成为高质量发展的典范。《规划纲要》在此点题“生态文明”, 指出要“推进生态文明建设”, “像对待生命一样对待生态环境”, “使大湾区天更蓝、山更绿、水更清、环境更优美”。建设宜居宜业宜游的优质生活圈更是《纲要规划》明确的战略定位之一。粤港澳大湾区国家生态文明示范区的建设, 需要以珠三角地区为国家蓝天保卫的引领示范区, 为全国各区域持续改善大气环境质量提供经验。

在能源基金会的资助下，广东省环境科学研究院组织开展“珠三角地区空气质量达到 WHO-III 水平的中长期战略研究”，旨在探索和提出珠三角地区在 2030~2035 年间力争实现 WHO-III 目标的中长期大气污染防控战略。

1.2 研究目标

本研究致力于梳理分析珠三角地区空气质量现状特征及其与国际发达国家和地区的差异，识别珠三角地区空气质量水平及污染防控治理与国际先进水平的差距，以 2030~2035 年间实现 WHO-III 阶段的较高空气质量要求为目标，进行区域大气污染防治和减排的情景设计和模拟分析，通过研究提出珠三角乃至整个广东省推动区域空气质量改善的战略路径，推动区域各级政府和相关管理部门加强大气污染的系统防控，推动区域的可持续绿色发展，改善区域环境空气质量。

2 珠三角地区空气质量与 WHO-III 水平的差距

世界卫生组织空气质量准则中所涉及到的污染物有 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 、 SO_2 、 NO_2 、 O_3 五种，以下就珠三角地区这五种主要污染物的浓度水平与 WHO-III 水平的差距做全面对比分析。

2.1 珠三角地区空气质量水平现状

按照《环境空气质量标准》(GB3095-2012) 评价，2018 年珠三角 9 个城市空气质量指数 (AQI) 达标率在 80.3%~94.5% 之间，平均为 85.4%。珠三角大气污染的首要污染物以 O_3 为主，其次为 NO_2 和 $PM_{2.5}$ 。从城市层面看，珠三角 9 个城市以 O_3 为首要污染物的天数为 113~157 天，以 $PM_{2.5}$ 为首要污染物的天数为 25~90 天，以 NO_2 为首要污染物的天数为 4~126 天。

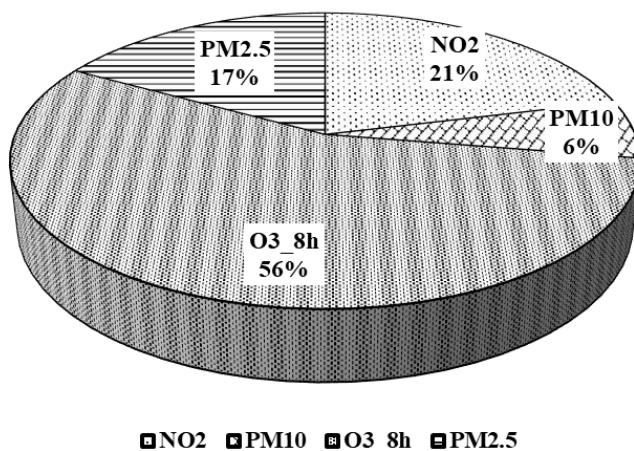


图 2-1 2018 年珠三角区域大气首要污染物贡献比例

2018 年，珠三角地区 SO_2 年平均浓度为 $9\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，达到国家环境质量二级标准。日均浓度在 $5\text{--}19\mu\text{g}/\text{m}^3$ 之间，全年未出现日均浓度超标现象。

2018 年，珠三角地区 NO_2 年平均浓度为 $35\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，达到国家环境质量二级标准。日均浓度在 $8\text{--}103\mu\text{g}/\text{m}^3$ 之间，日均浓度超过国家环境空气质量二级标准的比例为 1.4%。一、四季度的平均值高于二、三季度，日均浓度超标现象仅发生在第一季度。

2018 年，珠三角地区 PM_{10} 年平均浓度为 $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，达到国家环境质量二级标准。日均浓度在 $11\text{--}132\mu\text{g}/\text{m}^3$ 之间，一、四季度的平均值高于二、三季度，全年未出现日均浓度超标现象。

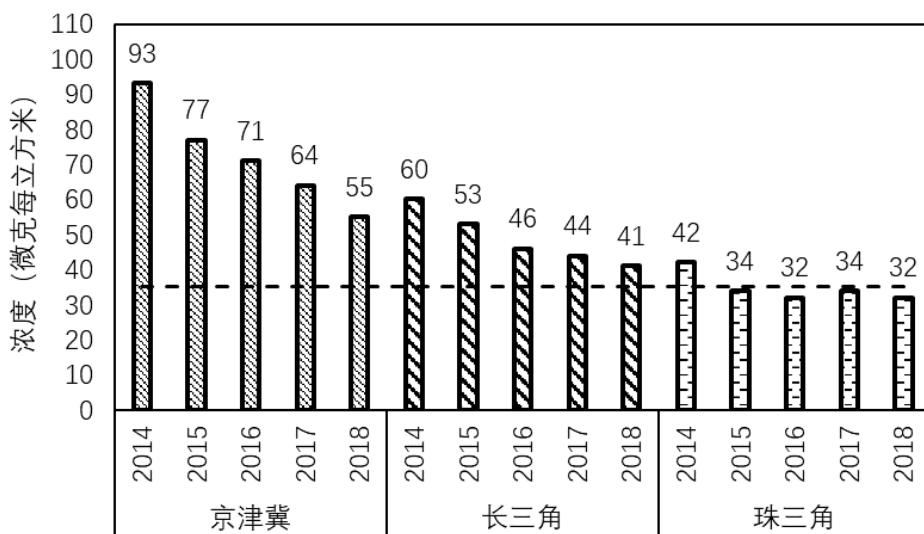
2018 年, 珠三角地区 $PM_{2.5}$ 年平均浓度为 $32\mu\text{g}/\text{m}^3$ (标况状态下), 自 2015 年以来连续四年稳定达标。在全国大气污染防治的“三区十群”¹中, 珠三角是唯一一个 $PM_{2.5}$ 达标的区域。日均浓度在 $9\text{--}108\mu\text{g}/\text{m}^3$ 之间, 日均浓度超过国家环境空气质量二级标准的比例为 2.7%。一、四季度的平均值高于二、三季度, 日均浓度超标现象发生在第一、四季度。

2018 年, 珠三角地区 O_3 -8h 的第 90 百分位数为 $164\mu\text{g}/\text{m}^3$, 广东省 7 个未达标地市中有 6 个位于珠三角地区。珠三角 O_3 评价浓度虽然从浓度水平和升幅都比京津冀和长三角地区较低, 但自 2015 年以来连续四年逐年小幅上升。日最大 8 小时浓度在 $12\text{--}234\mu\text{g}/\text{m}^3$ 之间, 日均浓度超过国家环境空气质量二级标准的比例为 9.3%。日均浓度超标现象, 在四个季度均有发生。

表 2-1 2018 年珠三角主要污染物浓度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

污染物	全年			
	最小值	最大值	评价指标	超标率(%)
SO_2	5	19	9	0
NO_2	8	103	35	1.4
PM_{10}	11	132	50	0
$PM_{2.5}$	9	108	32	2.7
O_3	12	234	164	9.3

注: 除 O_3 的评价指标为日最大 8 小时第 90 百分位数外, 其它污染物均为平均浓度。



¹ 京津冀、长三角、珠三角地区, 辽宁中部、山东、武汉及其周边、长株潭、成渝、海峡西岸、山西中北部、陕甘宁、新疆乌鲁木齐城市群

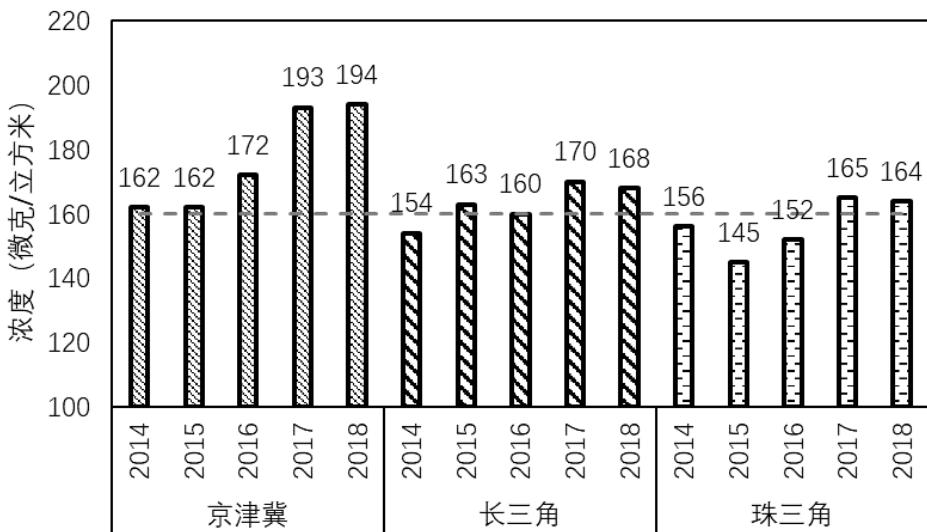


图 2-2 2014-2018 年全国三大区域 PM_{2.5}（上）和 O₃（下）浓度变化趋势

2.2 珠三角区域空气质量历史变化趋势

珠三角地区的 SO₂、PM₁₀ 年均浓度在 2001 至 2018 年间，整体呈不断下降的趋势，NO₂ 年均浓度波动较小，2012 年后略有上升。PM_{2.5} 年均浓度呈波动下降，O₃ 呈总体缓慢上升态势，大气复合污染趋势加剧。以下对主要污染物变化趋势进行分析。

在 SO₂ 方面，从 2001 至 2018 年，珠三角地区 SO₂ 年均浓度在 9~38 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 之间，低于国家空气质量二级标准，珠三角地区 SO₂ 年均浓度整体下降趋势显著。

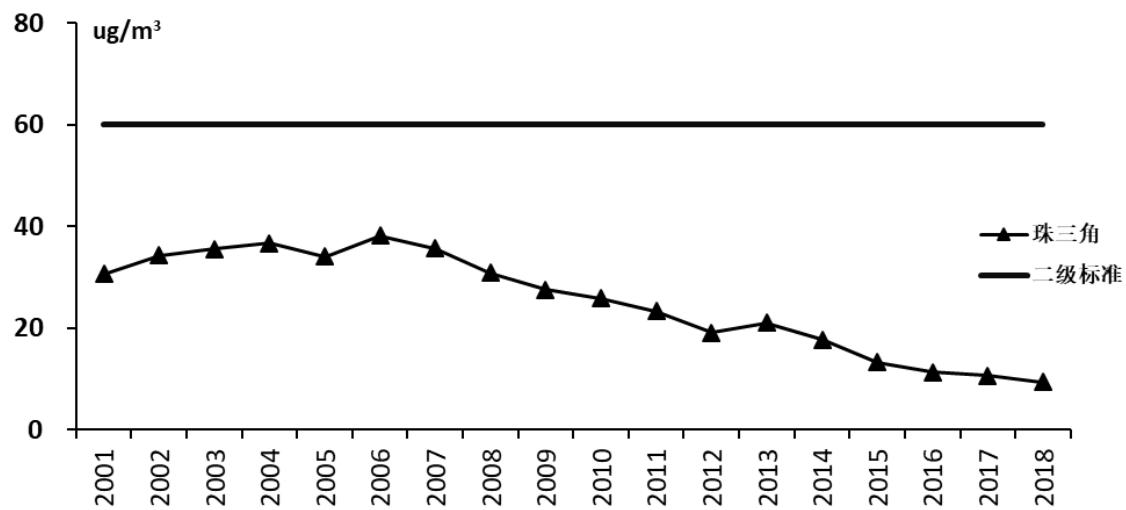


图 2-3 2001 至 2018 年珠三角 SO₂ 年均浓度变化趋势

在 NO₂ 方面，从 2001 至 2018 年，珠三角地区 NO₂ 年均浓度在 33~43 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

之间，整体呈下降趋势；尽管 2001 年以来，珠三角地区年均浓度始终低于国家空气质量二级标准，但自 2014 年国家空气质量新标准实施后， NO_2 年均浓度与二级标准的差距在 $5\mu\text{g}/\text{m}^3$ 左右，年均值保持稳定达标存在压力。

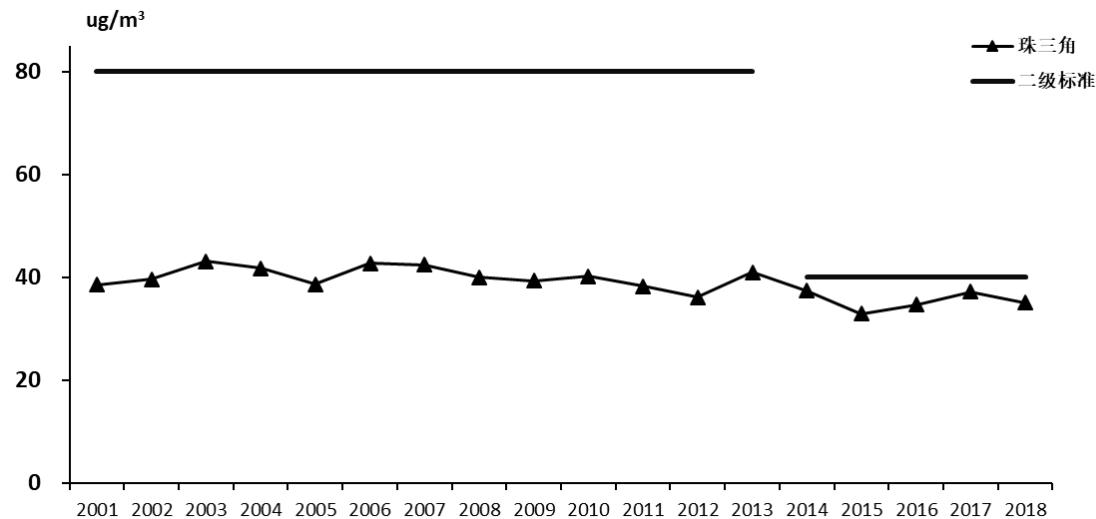


图 2-4 2001 至 2018 年珠三角 NO_2 年均浓度变化趋势

在 PM_{10} 方面，从 2004 至 2018 年，珠三角地区 PM_{10} 年均浓度在 $49\sim74\mu\text{g}/\text{m}^3$ 之间，均低于国家空气质量二级标准，且整体呈改善趋势。

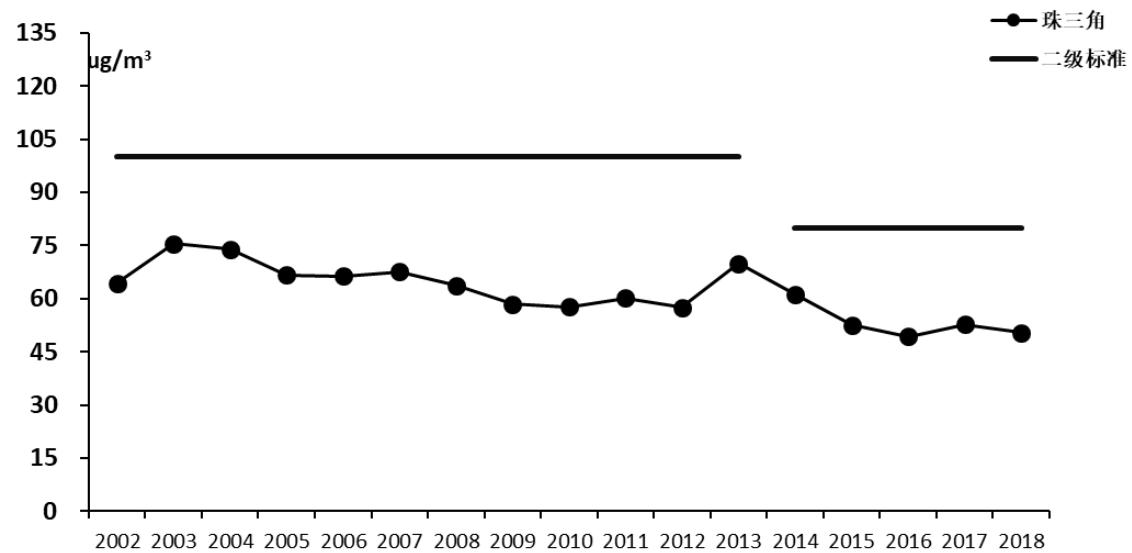


图 2-5 2001 至 2018 年珠三角 PM_{10} 年均浓度变化趋势

在 $\text{PM}_{2.5}$ 方面，2015 至 2018 年，珠三角地区 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度呈波动下降，由 $34\mu\text{g}/\text{m}^3$ 下降至 $32\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，逐年改善幅度为 2.5%，各城市逐年改善幅度的集中在 0~6.5% 之间，其中起始浓度高于 $35\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的城市逐年改善幅度为 3.3%，起始

浓度低于 $35\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的城市逐年改善幅度为 2.6%。

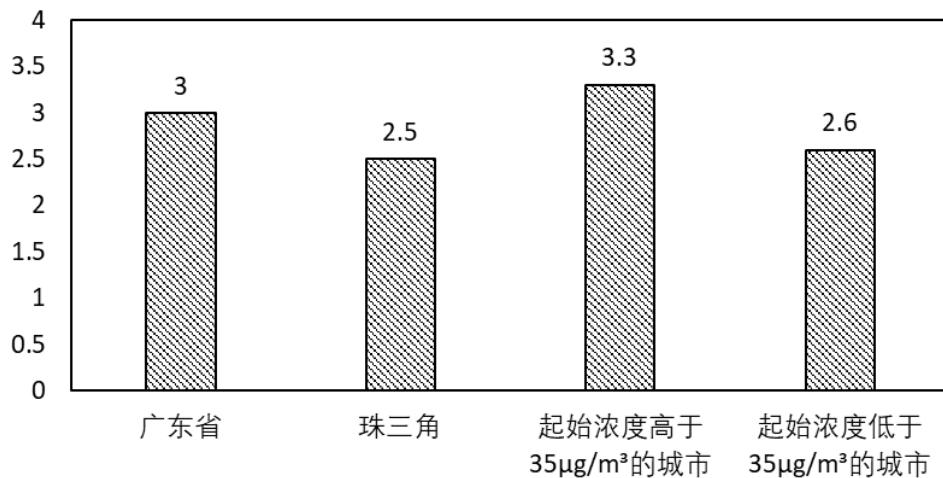


图 2-6 广东省和珠三角区域 PM_{2.5} 年均浓度近四年年均改善率

在 O₃ 方面，采用粤港珠三角区域空气监控网络 2006-2018 年监测结果分析珠三角地区 O₃ 长期变化趋势。从下图可见，珠三角区域 O₃ 年均浓度呈波动上升趋势，年均浓度从 2006 年的 49 上升到 2018 年的 $60\mu\text{g}/\text{m}^3$ ；尤其近两年上升势头较猛，由 2016 年的 $52\mu\text{g}/\text{m}^3$ 上升至 2018 年的 $60\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，升幅达 15%。从广东省国控站点的监测数据看，珠三角 O₃-8h 第 90 百分位数近四年也呈显著上升趋势，从 2015 年的 $145\mu\text{g}/\text{m}^3$ 上升至 2019 年的 $164\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，增幅达 13%。

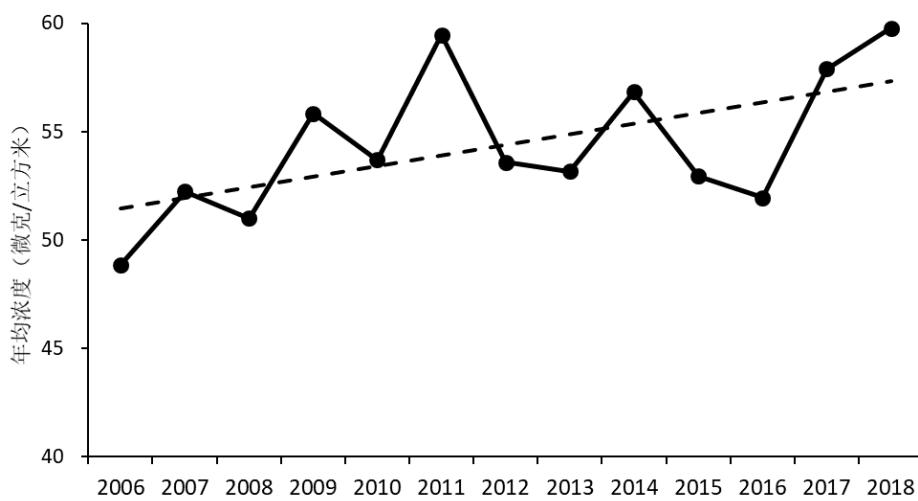


图 2-7 2006 至 2018 年珠三角区域 O₃ 年均浓度变化

2.3 珠三角区域及城市与 WHO-III 具体目标的差距

2.3.1 我国环境空气质量标准与 WHO 空气质量准则的差距

空气质量标准的宽严程度基本反映了各国的空气污染情况，空气质量越好的国家就越有能力制定和实施更为严格的标准。我国的环境空气质量标准 GB3095 首次发布于 1982 年，1996 年和 2000 年经过两次修订。现行的空气质量标准《环境空气质量》(GB3095-2012) 由国家生态环境部于 2012 年 2 月发布，调整了环境空气功能区分类，增设了 PM_{2.5} 浓度限值和臭氧 8 小时平均浓度限值，调整了部分污染物的浓度限值。2018 年生态环境部会同市场监管总局发布了《环境空气质量标准》(GB3095-2012) 修改单，修改了标准中关于监测状态的规定，并修改完善了相应的配套监测方法标准，实现了与国际接轨。

我国现行的空气质量标准中，涉及的污染物包括 SO₂、NO₂、CO、O₃、PM₁₀ 和 PM_{2.5} 六种常规污染物，以及总悬浮颗粒物、氮氧化物、铅和苯并[a]芘，同时针对不同环境空气功能区给出污染物的一级和二级浓度限值。世界卫生组织制定的空气质量准则中，涉及的污染物包括 SO₂、NO₂、O₃、PM₁₀ 和 PM_{2.5} 五种，同时针对不同污染物给出了过渡时期目标值和空气质量准则值。

珠三角区域目前执行我国空气质量标准《环境空气质量标准》(GB3095-2012) (以下简称国家标准)，其与世界卫生组织空气质量准则的对比如下表所示。在 SO₂ 标准方面，国家标准对年均值、24 小时平均值和 1 小时平均值做出了规定，未对 10 分钟平均值做出规定，其中 24 小时平均值的二级标准高于 WHO-I 阶段的目标。在 NO₂ 标准方面，国家标准对年均值、24 小时平均值和 1 小时平均值做出了规定，其中年均值和 1 小时平均值的一、二级标准限值均与 WHO 空气质量准则值一致。在 O₃ 标准方面，国家标准对 8 小时平均值和 1 小时平均值做出了规定，其中 8 小时平均值的二级标准限值与 WHO 过渡阶段目标值一致。在 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 标准方面，国家标准对年均值和 24 小时平均值做出了规定，二级标准限值与 WHO-I 阶段目标值一致。总体而言，珠三角目前执行的空气质量标准中二级标准浓度限值大致为世界卫生组织过渡时期第一阶段的目标要求。

表 2-2 我国空气质量标准与世界卫生组织空气质量准则对比

污染物	平均时间	我国空气质量标准		世界卫生组织空气质量准则			
		浓度限值 (ug/m ³)		浓度限值 (ug/m ³)			
		一级	二级	过渡时期目标-1 (T1)	过渡时期目标-2 (T2)	过渡时期目标-3 (T3)	空气质量准则值 (AQG)
SO ₂	年平均	20	60	—	—	—	—

污染物	平均时间	我国空气质量标准		世界卫生组织空气质量准则			
		浓度限值 (ug/m ³)		浓度限值 (ug/m ³)			
		一级	二级	过渡时期目标-1 (T1)	过渡时期目标-2 (T2)	过渡时期目标-3 (T3)	空气质量准则值 (AQG)
	24 小时平均	50	150	125	50	—	20
	1 小时平均	150	500	—	—	—	—
	10 分钟平均	—	—	—	—	—	500
NO ₂	年平均	40	40	—	—	—	40
	24 小时平均	80	80	—	—	—	—
	1 小时平均	200	200	—	—	—	200
O ₃	8 小时平均	100	160	160			100
	1 小时平均	160	200	—	—	—	—
PM ₁₀	年平均	40	70	70	50	30	20
	24 小时平均	50	150	150	100	75	50
PM _{2.5}	年平均	15	35	35	25	15	10
	24 小时平均	35	75	75	50	37.5	25

2.3.2 空气质量现状与 WHO-III 目标的差距

在 SO₂ 方面, 以 24 小时平均浓度限值为差距对比指标, 2018 年, 珠三角区域 SO₂ 日均浓度的最大值为 19 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 达到 WHO 准则值 (20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)。9 个城市的日均浓度最大值在 13~32 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 均达到 WHO-II 目标 (50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)。

在 NO₂ 方面, 以年平均浓度限值为差距对比指标, 2018 年, 珠三角区域 NO₂ 年平均浓度为 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 低于 WHO 准则值 (40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)。珠三角 9 个地市中, 除广州和佛山外, 其它 7 个地市的年均浓度均低于 WHO 准则值。

在 PM₁₀ 方面, 以年平均浓度限值为差距对比指标, 2018 年, 珠三角区域 PM₁₀ 年平均浓度为 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 与 WHO-II 目标 (50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 一致, 与 WHO-III 目标 (30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 尚有 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的差距。珠三角 9 个地市的年均浓度在 43 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ -60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 之间, 与 WHO-III 目标值的差距在 13-30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。其中东莞、惠州、深圳、中山和珠海五个城市的年均浓度已达致 WHO-II 目标, 佛山、广州、江门和肇庆四个城市的年均浓度仅达致 WHO-I 目标, 尚未达致 WHO-II 目标。

在 PM_{2.5} 方面, 以年平均浓度限值为差距对比指标, 2018 年珠三角区域 PM_{2.5} 年平均浓度为 32 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 已达致 WHO-I 目标 (35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 与 WHO-III 目标设定的浓度限值 (15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 尚有 17 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的差距。珠三角 9 个地市的年均浓度在 26 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ -39 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 之间, 与 WHO-III 目标的差距在 11-25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。其中, 东莞和肇庆三个城市尚未达致 WHO-I 目标, 其它七个城市中惠州、珠海和深圳已接近

WHO-II 目标 ($25\mu\text{g}/\text{m}^3$)。

在 O_3 方面, 以 8 小时平均浓度限值为差距对比指标, 2018 年珠三角区域 O_3 -8h 的第 90 百分位数为 $164\mu\text{g}/\text{m}^3$, 高于 WHO 过渡阶段目标设定的浓度限值 ($160\mu\text{g}/\text{m}^3$)。珠三角 9 个地市的第 90 百分位数在 $137\mu\text{g}/\text{m}^3$ - $184\mu\text{g}/\text{m}^3$, 其中仅惠州、深圳和肇庆三个城市达致 WHO 过渡阶段目标。

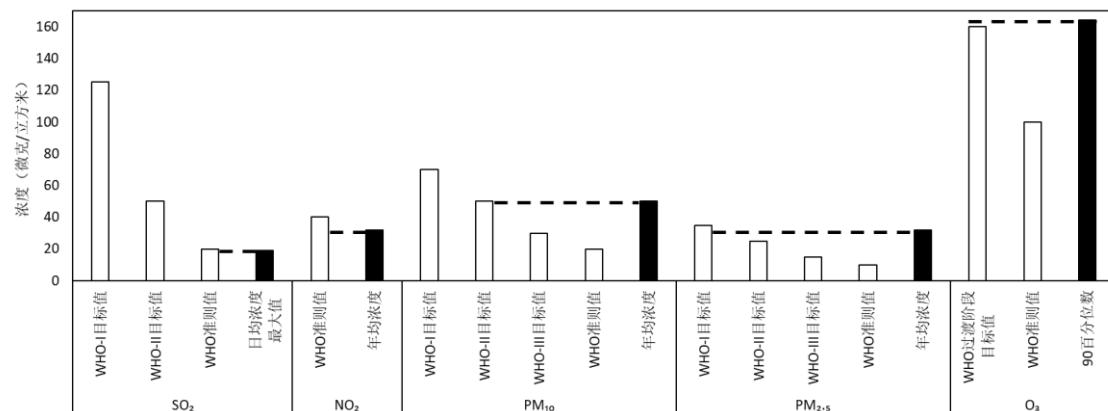


图 2-8 珠三角区域主要污染物与世界卫生组织空气质量准则中各阶段目标的差距

2.3.3 小结

根据世界卫生组织空气质量准则的规定, WHO-III 水平下, SO_2 日平均浓度的限值为 $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ ², NO_2 年均浓度的限值为 $40\mu\text{g}/\text{m}^3$ ³, PM_{10} 年均浓度的限值为 $30\mu\text{g}/\text{m}^3$, $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度的限值为 $15\mu\text{g}/\text{m}^3$, O_3 每日最高 8 小时平均浓度的限值为 $160\mu\text{g}/\text{m}^3$ ⁴。

珠三角区域空气质量现状与 WHO-III 目标对比, SO_2 和 NO_2 的浓度水平已全面达到 WHO-III 的目标要求; 区域 PM_{10} 浓度与 WHO-III 目标尚有 $20\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的差距, 城市尚有 13 - $30\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的差距; 区域 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度与 WHO-III 目标尚有 $17\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的差距, 城市尚有 11 - $25\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的差距; 区域 O_3 -8h 的第 90 百分位数仍高于与 WHO-III 目标尚有 $4\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的差距。

综上所述, 影响珠三角区域达致 WHO-III 目标的主要污染物因子为颗粒物 (PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$) 以及 O_3 。已有多项研究表明, 珠三角地区 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 长期平均比值在 0.6-0.7 范围内 (谢敏等, 2011; 岳玎利, 2015), 以此推算, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度达到 WHO-III 目标 ($15\mu\text{g}/\text{m}^3$) 时, PM_{10} 浓度为 21 - $25\mu\text{g}/\text{m}^3$, 也能达到 WHO-III

² 世卫组织对 SO_2 日平均浓度未设置 WHO-III 目标, 此处以 WHO-II 目标值代替

³ 世卫组织对 NO_2 年均浓度未设置 WHO-III 目标, 此处以 WHO 准则值代替

⁴ 世卫组织对 O_3 每日最高 8 小时平均浓度未设置 WHO-III 目标, 设置了 WHO 过渡阶段目标

目标 (30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)。因此研究关注的重点污染物为 PM_{2.5} 和 O₃。

3 本地 PM_{2.5} 背景浓度及其演变趋势

大气环境的背景浓度指的是未叠加本地污染排放时环境中大气污染物的浓度，代表在区域外围排放结构不变的情况下，仅通过区域本地减排所能达到的最优浓度水平。为探明珠三角的空气质量现状，特别是 PM_{2.5} 浓度现状与 WHO-III 目标尚有较大差距的情况下，通过珠三角本地减排能否实现 WHO-III 目标，需要对本地 PM_{2.5} 的背景浓度进行分析。

3.1 基于模式情景分析法的区域背景浓度估算方法

对区域或城市设定环境空气质量目标前，需要对该区域或城市的背景浓度进行研究，以确保环境空气质量目标任务的可达性。本研究将基于极限减排假设下将珠三角区域人为源排放置零得出本地大气污染源零排放下的区域 PM_{2.5} 的背景浓度值，计算公式如下所示。

$$A_{i, j, k} = \frac{O_{i, j, k}}{Mb_{i, j, k}}$$
$$C_{i, j, k} = Mc_{i, j, k} \times A_{i, j, k}$$

式中： A 表示模拟误差消除系数；

O 表示监测值；

Mb 表示基准情景模拟值；

Mc 表示削减排情景模拟值；

C 表示背景浓度预测值；

i 表示特定城市，此处代表珠三角 9 城市；

j 表示特定年份，此处代表 2014 年和 2016 年；

k 为特定污染物，此处代表 PM_{2.5}。

对 2014 年（气象条件相对不利的年份）、2016 年（气象条件相对有利的年份）的基准情景和本地排放置零情景分别进行全年模拟分析，得出 2014 年和 2016 年珠三角城市群 PM_{2.5} 的背景浓度值。首先，分别采用对应年份的气象输入和排放输入，对 2014 年和 2016 年基准情景进行模拟，得出 2014 年和 2016 年模拟浓度。然后，在保持其他条件不变的情况下，将珠三角区域（包括广州、佛山、深圳、珠海、中山、江门、惠州、东莞、肇庆 9 市）人为源排放设置为零，重新进行模拟计算，得出 2014 年和 2016 年削减排情景下的模拟浓度。此后，提取基准情景模拟结果中珠三角 9 城市 PM_{2.5} 的模拟浓度，并结合 2014 年和 2016 年的监测

值得出模拟误差消除系数。最后,提取削减情景模拟结果中珠三角 9 城市的 $PM_{2.5}$ 的模拟浓度值,乘以误差消除系数,得出 $PM_{2.5}$ 背景浓度预测值,背景浓度受区域内天然源和区域外围传输的影响。

3.2 模型设置与模拟可行性验证

目前,常用的空气质量模式有美国的 Models-3/CMAQ 和 CAMx、德国的 EURAD、法国的 CHIMERE、芬兰的 SILAM、英国的“Your Air”系统和 NAME、西班牙的 EOAQF、瑞典的 MAQS、荷兰的 LOTOS-EUROS、中国的 NAQPMS (嵌套网格空气质量预报模式系统) 和 RegADM 等。其中, Models-3/CMAQ (Community Multiscale Air Quality) 模型目前是我国应用最广泛、最为成熟第三代空气质量模型,由美国 EPA 于 1998 年第一次正式发布。CMAQ 最初设计的目的在于将复杂的空气污染问题如对流层的 O_3 、PM、毒化物、酸沉降及能见度等问题综合处理,为此 Models-3/CMAQ 模式最大的特色即采用了“一个大气”的设计理念,能对多种尺度、各种复杂的大气环境污染问题进行系统模拟, CMAQ 模型目前已成为美国 EPA 应用于环境规划、管理及决策的准法规化模型。本研究将采用 Models-3/CMAQv5.0.2 模式作为模拟研究工具。

气象模式将使用中尺度气象预报模式 WRF (The Weather Research and Forecasting Model) v3.9.0.1。驱动数据使用美国国家环境预报中心 (NCEP) 提供的逐 6 小时的全球气象再分析数据 (FNL),并使用对应时段的探空观测数据和地面站观测数据同化。气象模式区域覆盖 CMAQ 网格,采用兰伯特投影,中心经纬度为 114°E、28.5°N,两条真纬线为 15°N、40°N。

空气质量模式 CMAQ 采用三重嵌套网格模拟,网格分辨率从外至内分别是 27km×27km, 9km×9km, 3km×3km, 外层的模拟结果作为内层的边界条件输入, 提前 5 天开始模拟形成模拟时段的初始场。模型垂直分层设置为 14 层,本次研究取第一层数据,其平均中心高度约为 20m, 气相化学机制采用 CB-05, 气溶胶化学采用 AERO6。

模型模拟的区域如下图所示,三层嵌套模拟的最外层模拟区域范围约从 64°E~162°E, 4°N~52°N, 包括了中国、东南亚以及周边海域等。第二层模拟区域范围约从 103°E~120°E, 18°N~31°N, 主要包括了中国华南地区以及相关海域等。本项目重点模拟研究区域为最内层,即第三层嵌套区域,范围约从

109°E~117°E, 20°N~26°N, 此区域包括广东省各城市以及周边省份临近地区, 外层的模拟结果为最内层模拟提供了边界场。

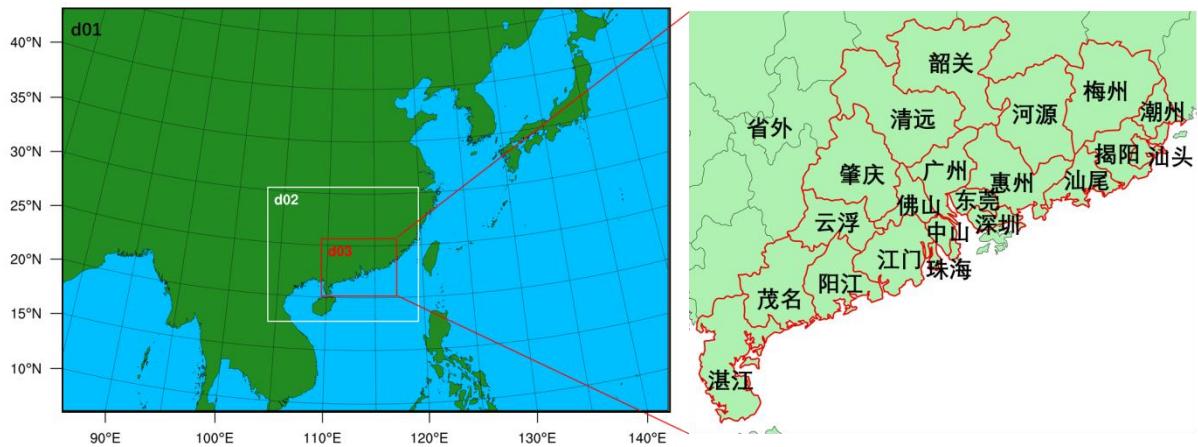


图 3-1 嵌套模拟区域与污染源情况标记示意图

三层模拟区域使用的大气污染物人为源排放清单均为清华大学 MEIC 模型团队开发的 2014 年和 2016 年 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 中国清单 (MEIC, Multi-resolution emission inventory for China) 和欧盟委员会发起的全球清单计划 EDGARv4.2 (The Emissions Database for Global Atmospheric Research) 的 2010 年 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ HTAP (Hemispheric Transport of Air Pollution) 清单组合而成。其中, 中中国大陆部分采用 MEIC 清单, 其它部分采用 EDGAR-HTAP 清单。生物源清单由 CMAQ 内置生物源在线计算模块计算获得。

为确保模型模拟结果的准确性与可信度, 在进行结果讨论之前, 需要结合污染物观测值对模型模拟结果进行验证分析, 此处选取珠三角 9 城市 $PM_{2.5}$ 的年均值的模拟结果进行验证。评价指标使用归一化平均偏差 NMB (Normalized Mean Bias)、均方根误差 RMSE (Root Mean Squared Error) 以及相关性系数 r 作为衡量模拟效果与监测数据之间准确对比的指标, NMB 和 RMSE 的具体计算公式如下。

$$NMB = \frac{\sum (M_i - O_i)}{\sum O_i}$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum (M_i - O_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

式中: M 为模式模拟结果;

O 为观测结果;

N 为样本量。

根据珠三角 9 城市环境空气质量国控监测站点经纬度信息, 提取模拟结果网格中站点对应网格的全年小时浓度数据, 按照《环境空气质量评价技术规范(试行)》(HJ 663-2013) 文件内容要求, 将模型模拟得到的 $PM_{2.5}$ 小时浓度数据进一步处理为 $PM_{2.5}$ 的年均值, 与对应的监测值进行验证分析。模型模拟验证结果表明, $PM_{2.5}$ 的 NMB 值为-37.5%, RMSE 值为 14.6, 相关性 r 为 0.77, $PM_{2.5}$ 模拟存在一定低估, 整体而言, $PM_{2.5}$ 的模拟结果基本可反应不同年份珠三角区域各个城市污染物浓度时空分布水平。此外, 污染物背景浓度计算公式中包含了模拟误差消除过程, 可明显缩减模型模拟误差对研究结果造成的影响。

3.3 $PM_{2.5}$ 背景浓度及其演变趋势

2014 年珠三角 $PM_{2.5}$ 年均浓度监测值为 $42\mu\text{g}/\text{m}^3$, 根据模拟结果计算得出, 当年珠三角背景浓度值为 $21\mu\text{g}/\text{m}^3$, 由于珠三角 $PM_{2.5}$ 背景浓度值接近 WHO-II 标准值, 在仅依靠珠三角区域内部减排的情况下实现 WHO-III 目标的可能性极小。2016 年珠三角 $PM_{2.5}$ 年均浓度监测值为 $32\mu\text{g}/\text{m}^3$, 根据模拟结果计算得出珠三角背景浓度值为 $16\mu\text{g}/\text{m}^3$, 2016 年珠三角大多数城市 $PM_{2.5}$ 背景浓度均处于 WHO-III 目标值以上。

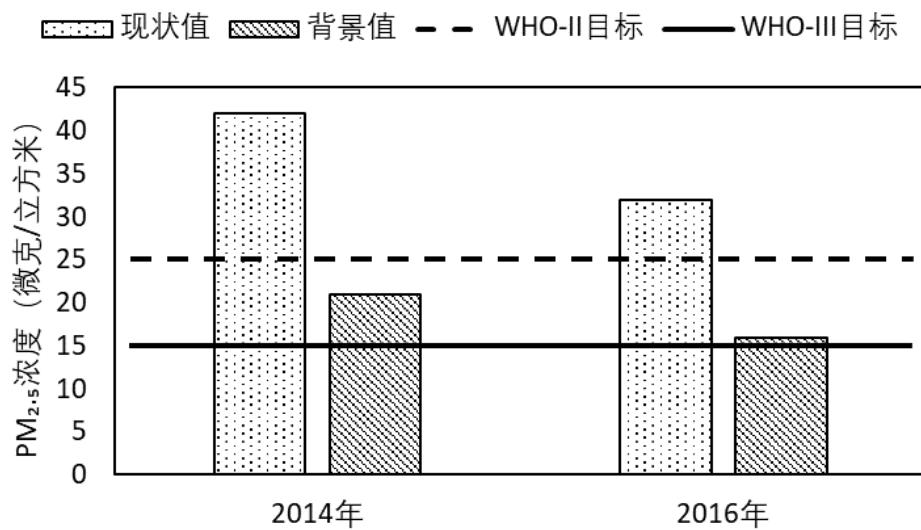


图 3-2 2014 年与 2016 年 $PM_{2.5}$ 年均浓度的现状值与背景值

综合两年模拟结果可知, 珠三角地区 $PM_{2.5}$ 背景浓度介于 WHO-II 与 WHO-III 目标值之间, 因此基于现阶段排放水平, 仅依靠珠三角内部减排时, $PM_{2.5}$ 无法达到 WHO-III 水平。因此, 为实现珠三角 $PM_{2.5}$ 达到 WHO-III, 需要加强珠三角

区域外部城市协同减排，以降低珠三角城市污染物背景浓度值。

由于不同年份污染物浓度现状不同，污染物的背景浓度也会随之改变，为了对比不同年间污染物背景浓度、分析发展规律，需进行归一化处理，得出 2014 年和 2016 年污染物背景浓度所占当年污染物现状浓度的比例，结果显示，2014 年珠三角背景浓度占比的平均值为 50.3%，2016 年为 50.1%，PM_{2.5} 背景浓度占现状值的比例基本保持不变。可见，虽然在人为源排放变化的影响以及气象条件变化的影响，2016 年 PM_{2.5} 浓度现状相比 2014 年均有不同程度的下降，珠三角地区的背景浓度值也随之发生变化，但背景浓度对珠三角污染物浓度现状的贡献占比则基本保持不变。

4 珠三角周边地区 $PM_{2.5}$ 和 O_3 的区域传输特征

本地 $PM_{2.5}$ 和 O_3 背景浓度的研究结果显示，在现有的外部传输条件下，仅通过本地减排，珠三角地区的空气质量无法达致 WHO-III 目标，唯有通过珠三角周边地区的协同减排才有达致 WHO-III 目标的可能。本章的研究目的是通过已有文献调研和模型模拟分析，研究珠三角周边地区 $PM_{2.5}$ 和 O_3 的区域传输特征，从而明确外部协同减排需要控制的重点区域，以此作为达致 WHO-III 目标策略研究中珠三角区域外控制情景的重要设计依据。

4.1 $PM_{2.5}$ 区域传输特征

4.1.1 珠三角 $PM_{2.5}$ 区域传输路径

张夏夏（2018）利用 HYSPLIT 模型分析了肇庆、从化、南沙、东莞、深圳、荃湾 6 个站点 2015 年全年的后向轨迹特征，发现这几个站点后向轨迹来源还是比较相似的，这说明珠三角在大多数时间是处于同一个空气域内，即具有相同的传输特征。将每个站点所得的 365 条轨迹利用进行聚类分析，结果显示，大多数站点气团的传输路径可分为 5 类（图 4-1）。按照聚类轨迹经过的地区和传输的距离，为传输路径进行命名。从西北方向得到的传输路径开始，按顺时针的方向，把从较远的内陆吹来的路径命名为“远境内”，该路径的占比较少，为 5%~15%；途径第二类传输路径的气团移动速度慢，并且主要来自于珠三角较近的一些省份，例如福建、江西等，将该路径命名为“近境内”。该路径的占比最多，为 39%~56%；途径第三类路径的气团起源于海洋上的巴士海峡，将该路径命名为“巴士海峡”，占比为 8%~14%；途径第四类路径的气团起源于离珠三角较近的西南方向的海洋气团，命名为“近西南”，占比为 9%~22%，途径第五类路径的气团来自于西南方向较远的海上气团，命名为“远西南”，占比为 11%~18%。从传输路径的季节特征看，来自于陆地的远境内和近境内气团多发生于冬季、秋季和春季，而来自于海洋的气团多发生于夏季。

从传输路径的特征看，五类路径中，巴士海峡、近西南两类路径的气团主要来自海上，相对较为接近，远西南路径的气团来自东南亚国家，无法成为协同减排的控制对象。来自陆地的远境内和近境内两类路径多发于污染季，其中远境内路径占比较少，因此占比最多的近境内路径所途径的区域和省份（广东省东北部、

福建、江西、浙江、江苏)应成为协同减排需要控制的重点区域。

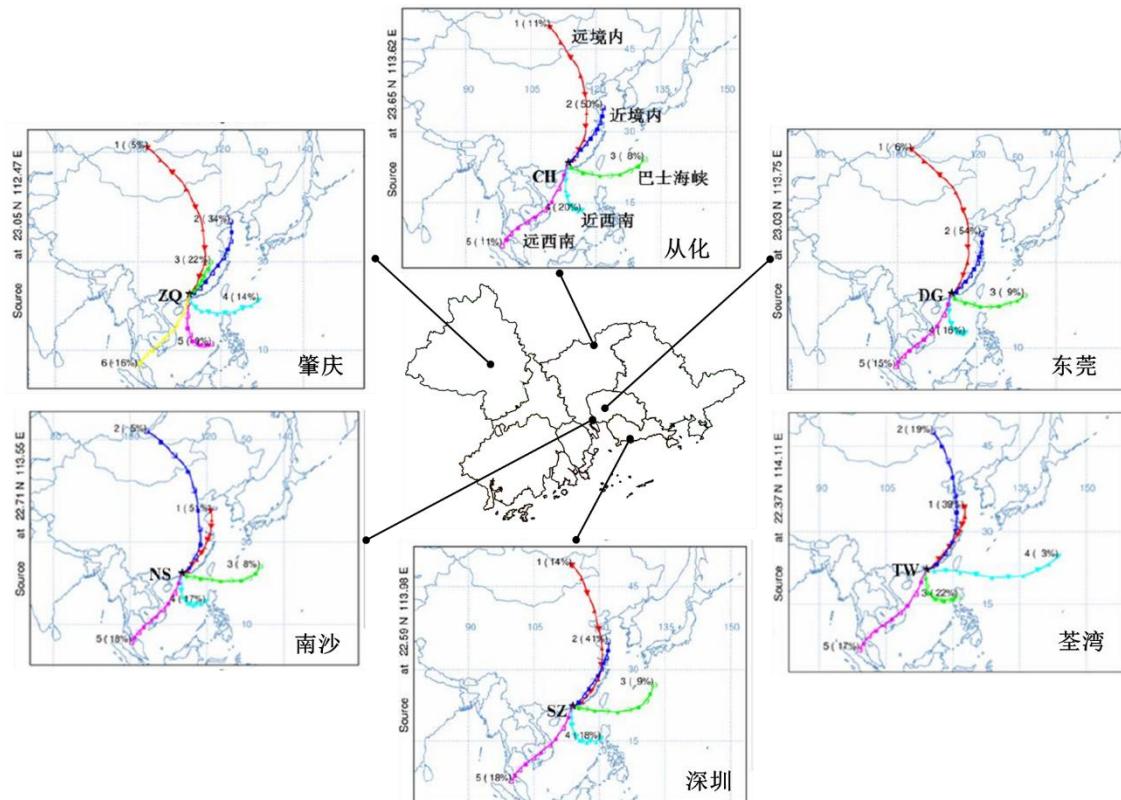


图 4-1 2015 年珠三角肇庆(ZQ)、从化(CH)、南沙(NS)、东莞(DG)、深圳(SZ)、荃湾(TW) 6 个站点后向轨迹聚类分析图 (张夏夏, 2018)

4.1.2 周边省份对珠三角 PM_{2.5} 的传输贡献

薛文博等(2014)基于 CAMx 空气质量模型的颗粒物来源追踪技术(PSAT)定量模拟了全国 $PM_{2.5}$ 及其化学组分的跨区域输送规律, 建立了全国 31 个省市(源)向 333 个地级城市(受体)的 $PM_{2.5}$ 及其化学组分传输矩阵。研究结果表明, 广东省及区域外源对珠三角地区 $PM_{2.5}$ 年均浓度贡献比例分别为 72% 和 28%, 广东省对珠三角一次颗粒物(PPM_{2.5})和 SNA(硫酸盐、硝酸盐、铵盐)的贡献分别为 77% 和 62%, 其余为区域外源贡献。从省份来看, 对珠三角地区 $PM_{2.5}$ 年均浓度贡献比例较大的几个省份依次为江西、福建、安徽、湖南、山东和江苏(图 4-2), 上述省份与上一节中珠三角 $PM_{2.5}$ 主要区域传输路径所经过的省份较为一致, 是珠三角区域空气质量改善需要加强区域协同防控的重点区域。

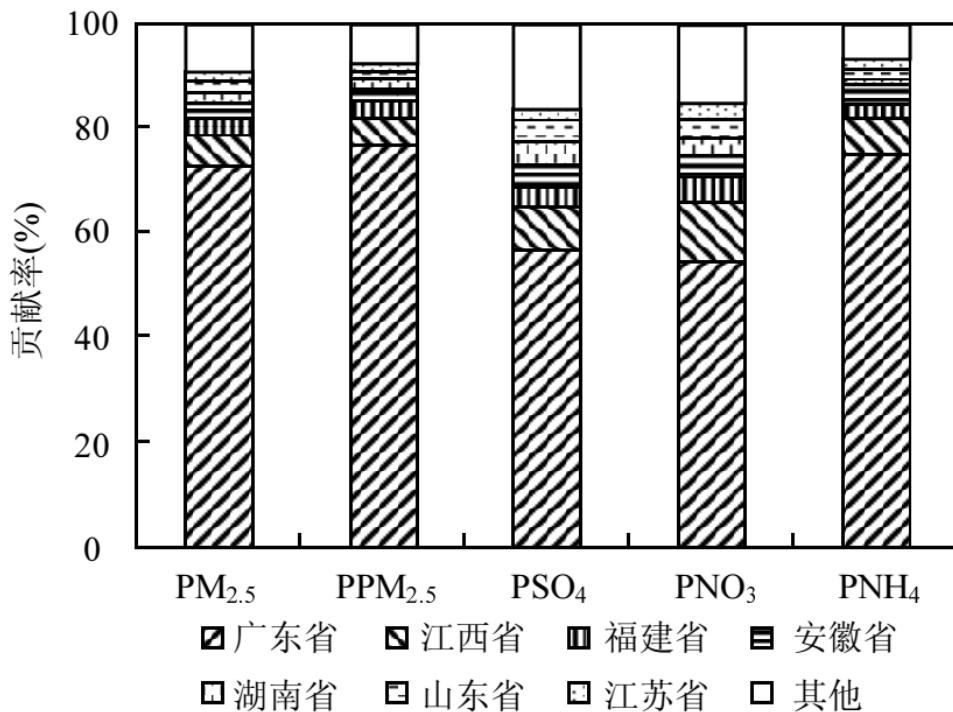


图 4-2 珠三角地区 PM_{2.5} 及其主要组分空间来源解析 (薛文博等, 2014)

4.1.3 广东省内对珠三角 PM_{2.5} 的传输贡献

除了省外区域对珠三角 PM_{2.5} 有传输影响外, 省内的非珠三角地区以及珠三角九市之间都有相互的传输影响。为了确定广东省内不同区域对珠三角 PM_{2.5} 的传输贡献, 项目研究组通过 CMAQ-ISAM, 以 PM_{2.5} 为标识物种, 追踪全省 21 个地级市的区域之间相互传输的状况, 结果表明: 珠三角各城市受珠三角区域内城市相互传输的影响幅度约在 16%~47%, 其中受城市群内传输影响较为明显的城市有广州、肇庆、东莞。非珠三角区域中, 粤北对珠三角九市的平均影响约 4%, 粤东的影响约 2%, 粤西影响约 1.3%; 而省外长距离传输对珠三角的平均影响约占 30%, 与上一节中薛文博等人研究成果一致。由此可见, 珠三角 PM_{2.5} 污染防控首先是要控制珠三角本地的污染物排放, 而广东省内非珠三角地区, 协同减排需要控制的重点区域为粤北地区。

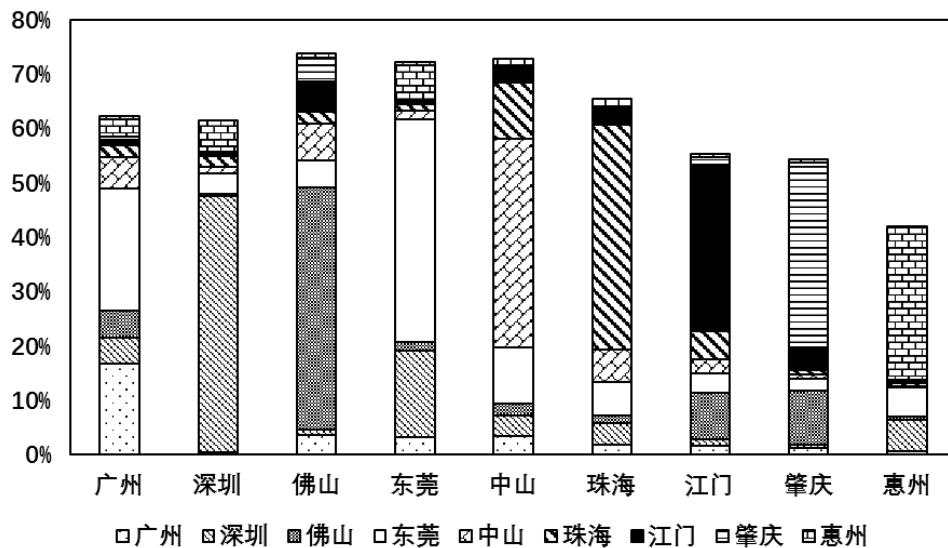


图 4-3 珠三角地区九市间 PM_{2.5} 传输影响贡献

4.1.4 外部传输对珠三角 PM_{2.5} 浓度贡献的变化

在“十一五”和“十二五”规划期间，珠三角地区实施了一系列空气污染控制措施，为确定 2006 年到 2015 年间珠三角地区 PM_{2.5} 来源发生了何种变化，Lu 等 (2019) 利用 WRF-CAMx 模式开展了模拟工作。珠三角地区 9 个主要城市本地、珠三角内部和非珠三角地区对 PM_{2.5} 浓度贡献的变化显示，相比于 2006 年，2015 年本地和珠三角内部对珠三角各城市 PM_{2.5} 浓度贡献逐渐减小，以广州市为例，2015 年广州本地排放和珠三角其他城市对广州的排放贡献较 2006 年减少了 2~8 个百分点；与此相对的，随着来自本地和珠三角内部排放贡献的比例逐渐减少，来自珠三角周边地区（包括省内非珠三角地区和省外地区）排放对珠三角 PM_{2.5} 的贡献变得越来越重要。这也体现了加强省与省之间协同减排的紧迫性。

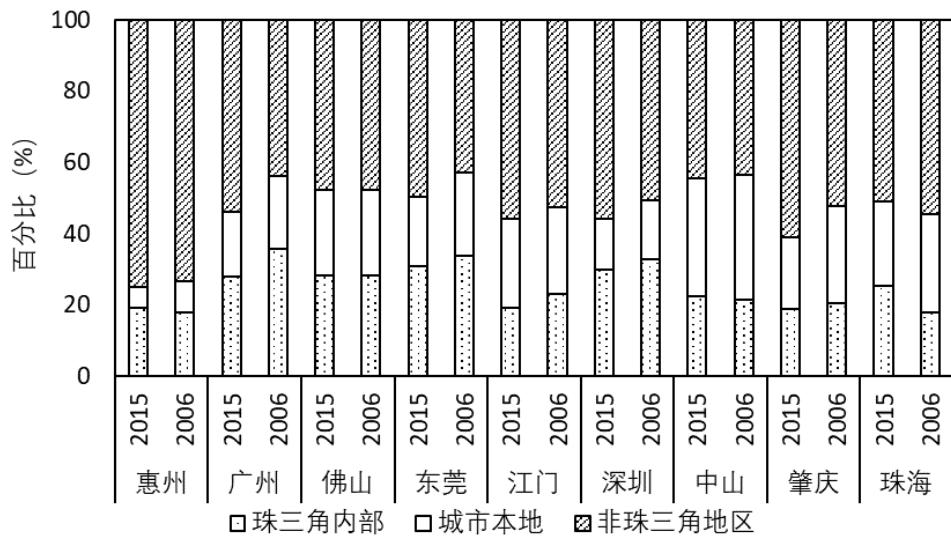


图 4-4 2006 和 2015 年排放情景下，本地、珠三角内部和珠三角以外地区对珠三角 PM_{2.5} 的贡献（数据来源于 Lu et al., 2019）

4.2 O₃ 区域传输特征

4.2.1 模拟方法及模式设置

运用 WRF-CMAQ 模型的污染物来源解析模块 ISAM, 以 2017 年为基准年, 模拟 1 月、4 月、7 月、10 月四个特征月份代表全年。模拟气象驱动数据为 FNL, 模型内层和外层所用清单均为 MEIC+EDGAR 耦合清单 (具体见 3.1 节), 生物源排放清单由 CMAQ 生物源在线计算模块得出。由于 O₃ 污染区域传输作用明显, 来自于省外的贡献比例较大, 为了进一步细化远距离传输来源, 在 O₃ 源解析模拟时扩大了模拟标记范围。模拟区域如下图所示, 此次源解析模拟采用双层嵌套模拟, 在第二层模拟中对不同区域进行标记并计算 O₃ 来源贡献。模型中共标记区域 28 个, 在广东省内范围, 以地市为单位分别标记了珠三角九个城市, 即广州市、深圳市、佛山市、珠海市、东莞市、江门市、中山市、惠州市和肇庆市。省内其他区域, 则以多个相邻地市为单位进行标记, 将粤东四市标记为一个区域, 即潮州市、汕头市、揭阳市和汕尾市标记为一个区域; 将粤西四市标记为一个区域, 即湛江市、茂名市、阳江市和云浮市标记为一个区域; 将粤北四市标记为一个区域, 即清远市、韶关市、河源市和梅州市标记为一个区域。省外区域, 将以省级行政区或特别行政区为单位进行标记, 标记的省份或特别行政区包括: 福建省、江西省、湖南省、广西省、海南省和香港等相邻区域, 江苏省、浙江省、上

海市和山东省等潜在影响较大的区域，以及第二层模拟范围内的其他省份，即安徽省、湖北省、河南省、贵州省、重庆市和台湾。经模拟后，从 ISAM 源解析结果中提取出 28 个标记区的 O_3 浓度的贡献结果分析珠三角地区 O_3 来源。

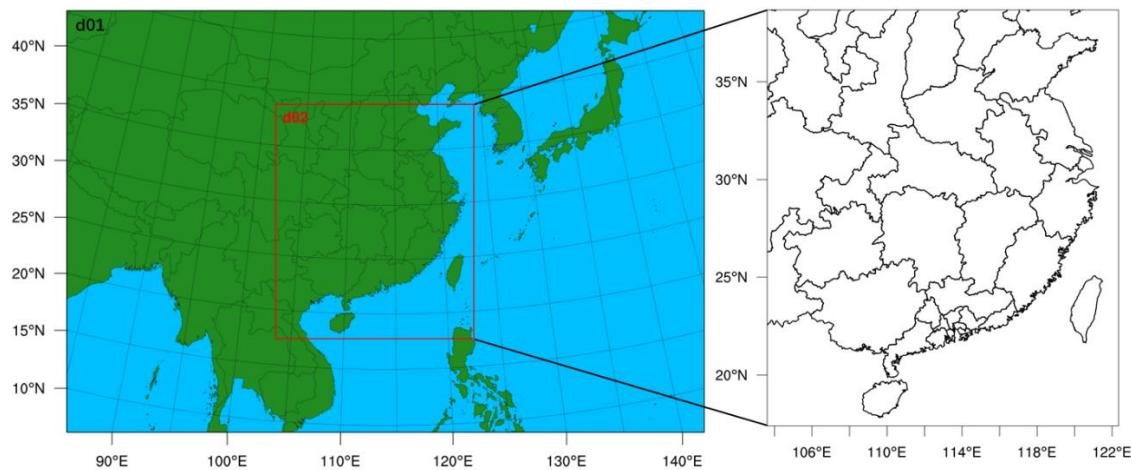


图 4-5 O_3 源解析模拟范围示意图

4.2.2 O_3 来源解析模拟结果

O_3 作为二次污染物，在大气中经过复杂的反应形成，区域贡献作用非常明显。解析结果将分别从广东省内和省外分别讨论珠三角区域 O_3 的来源贡献情况。

就省内来源结果分析可见，珠三角地区本地贡献值约占全省贡献值的 75.0%，粤北地区贡献值约占全省贡献值的 14.6%，粤东地区贡献值约占全省贡献值的 9.8%，粤西地区贡献值则仅占全省贡献值的 0.6%。省内城市层面，对珠三角区域整体 O_3 水平贡献较大的城市为广州市和东莞市，贡献值约占全省贡献值的 18.3% 和 12.2%。江门市、中山市、肇庆市和珠海市等珠三角西侧城市受珠三角城市群影响较大，其中，江门市受影响最大，主要来源于广州市、佛山市、东莞市等城市。而惠州市、深圳市、东莞市等珠三角东侧城市则受珠三角区域影响较小，粤北、粤东以及福建省、江西省等省外地区影响占比偏大。

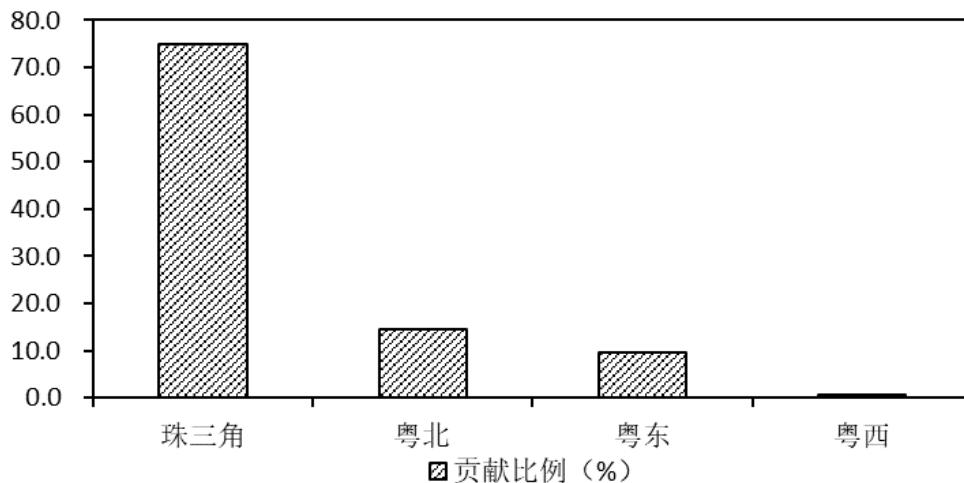


图 4-6 广东省内区域对珠三角地区 O_3 贡献情况

省外来源中，各省份贡献比例从大到小依次为江西省、江苏省、福建省、浙江省、安徽省、山东省、湖北省、河南省和湖南省。此外由于 O_3 及其前体物多为气态，传输作用较强，因此在来自于省外的贡献中有 32.2% 来自于内层模拟区域以外的区域。除以上来源之外，其他来源共贡献两成左右，这部分包括了其余未列出的已标记区域贡献的总和、其余未标记的陆域地区贡献的总和、海上区域来自于船舶、飞机等的排放的贡献以及由于排放清单分辨率较低导致的陆域排放归到海面上的情况，其中对源解析结果影响最大的是排放清单分辨率导致的误差，这可能导致得出的结果中沿海城市贡献比例比实际偏低的情况。

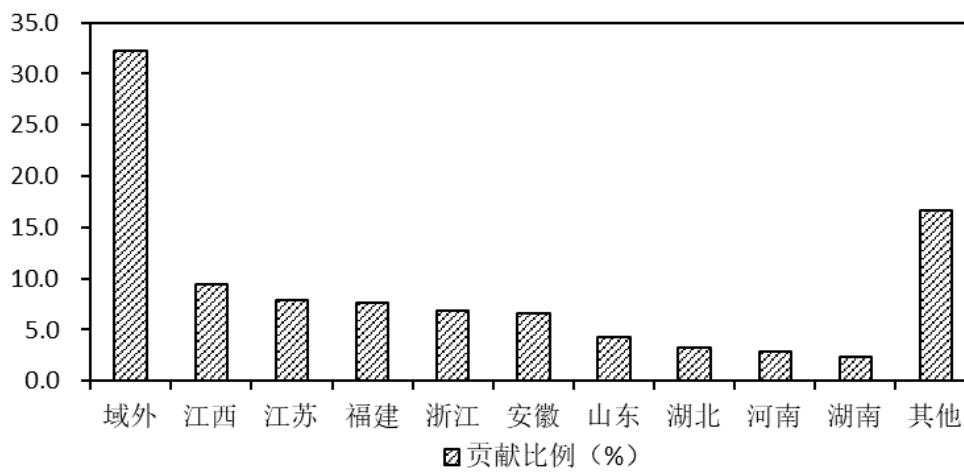


图 4-7 广东省外区域对珠三角地区 O_3 贡献情况

O_3 在传输作用受风速风向、温度、湿度等气象条件影响较大，因此在不同季节 O_3 的来源情况将存在一定的差异性。将模拟结果中每个特征月珠三角地区 O_3 源解析结果单独分析得出：在 1 月和 4 月，气温较低、光照较弱， O_3 形成速

率缓慢, O_3 前体物消耗较慢, 在大气中滞留时间相对较长, 珠三角地区受长距离区域传输作用强, 因此来自于江西省、福建省、江苏省、浙江省等其他上风向省份的影响较大, 受本地影响相对较小。7月气温较高, 光照辐射强, 光化学作用强烈而迅速, O_3 前体物消耗快, 长距离传输作用弱, 珠三角地区受本地及广东省内影响大, 而受省外影响较小。10月为珠三角地区 O_3 重点污染季, 源解析结果表明, 该季节珠三角本地以及广东省内的贡献占比情况与全年平均情况相近, 且江西省、福建省、江苏省、浙江省等上风向区域对珠三角地区的影响不可忽略。因此, 在制定珠三角地区 O_3 重点污染季进行 O_3 重污染防控策略时, 需在加强区域内部污染源控制的基础上, 进一步协调主要贡献区域省份进行联防联控。

4.3 小结

珠三角地区 $PM_{2.5}$ 区域传输的主要路径共有 5 条, 其中 $PM_{2.5}$ 污染季节的两条传输路径均位于珠三角东北方向, 沿途所经的区域和省份有广东省东北部、福建、江西、浙江和江苏。模拟研究显示, 从全年平均情况看, 广东省外其它省份对珠三角地区 $PM_{2.5}$ 年均浓度贡献在三成左右, 贡献比例较大的几个省份为江西、福建、湖南等周边省份以及安徽、山东、江苏等东部省份。在广东省内部, 非珠三角地区对珠三角 $PM_{2.5}$ 的影响主要来自于粤东北地区。另外, 已有研究显示, 得益于珠三角地区严格的减排措施, 本地排放对珠三角 $PM_{2.5}$ 的贡献的比例逐渐减少, 珠三角周边地区(包括省内非珠三角地区和省外地区)的贡献变得越来越重要。

相较于 $PM_{2.5}$, 周边区域和省份对珠三角 O_3 的传输作用更为明显, 且季节差异较为明显, 7月和10月同为臭氧污染高发的季节, 7月由于光化学作用强烈而迅速, O_3 前体物消耗较快, 长距离输送作用相对较弱, 珠三角 O_3 主要受本地排放影响; 而10月江西、江苏、安徽、浙江、福建等省份对珠三角 O_3 的传输作用较为明显。广东省内珠三角地区本地贡献最大, 非珠三角地区中粤北地区的贡献相对较大, 其次为粤北地区。

综上所述, 广东省内对珠三角区域空气质量影响较大的区域为粤北地区, 其次为粤东地区; 广东省外其它省份中, 对珠三角区域空气质量影响较大的省份主要为福建、江西、湖南等周边省份, 以及浙江、江苏、安徽、山东等东部省份。珠三角空气质量若要在 2035 年达致 WHO-III 目标, 上述区域和省份应成为区域

外协同减排的重点。

5 达到 WHO-III 水平的地区空气质量改善经验及启示

5.1 相关地区空气质量改善历程

第二章的分析研究结果显示，目前珠三角的空气质量尚处于 WHO-I 水平，影响珠三角空气质量达致 WHO-III 目标的关键污染物为 $PM_{2.5}$ 和 O_3 。以 $PM_{2.5}$ 和 O_3 为重点，对已达致更低浓度水平的国家和地区的空气质量改善历程进行分析，为珠三角达致 WHO-III 的分阶段改善目标策略制定提供参考。

5.1.1 相关地区 $PM_{2.5}$ 改善历程

对世界 200 多个国家 2010~2017 年的 $PM_{2.5}$ 浓度历史变化进行了分析，当 $PM_{2.5}$ 浓度水平在 $25\sim35\mu g/m^3$ 时，大多数国家 $PM_{2.5}$ 的年均改善幅度在 1.5~4% 之间，平均改善幅度约 2.8%，与广东省和珠三角近年来的改善速率相当（2015 至 2018 年，广东省 $PM_{2.5}$ 的逐年改善幅度为 3%，珠三角为 2.5%）。

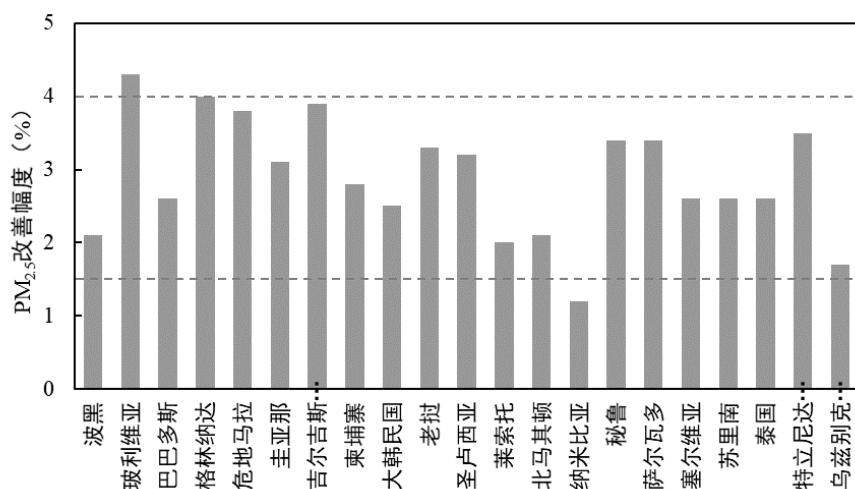
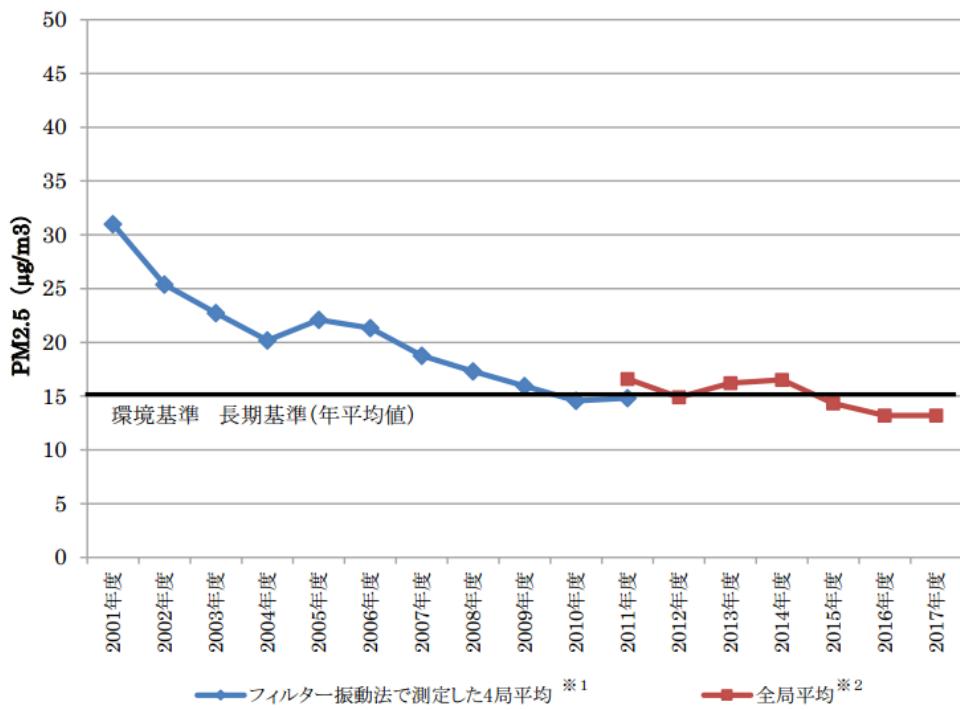


图 5-1 世界部分浓度水平在 $25\sim35\mu g/m^3$ 的国家和地区 $PM_{2.5}$ 改善幅度

已有研究表明，在 $PM_{2.5}$ 浓度较高的时期，更易实现浓度的快速下降，但随着 $PM_{2.5}$ 浓度的降低，污染排放削减的难度逐渐加大， $PM_{2.5}$ 浓度的下降难度也增加。但通过数据收集和分析发现，部分发达国家和地区在较低浓度下依然可以保持较高的逐年改善速率。如东京湾区， $PM_{2.5}$ 浓度从 2002 年的 $25\mu g/m^3$ 降至 2010 年的 $15\mu g/m^3$ ，年均下降 6.2%（图 5-2）；美国 $PM_{2.5}$ 浓度水平在 $15\sim25\mu g/m^3$ 的州， $PM_{2.5}$ 年均浓度的改善幅度在 2.8~10.0%，平均改善幅度为 5.5%（表 5-1）；旧金山和纽约湾区 $PM_{2.5}$ 达致 WHO-III 水平后仍能保持 2.6~3.4% 的年均降幅（图 5-3）。



注：数据来源为《东京都环境白皮书 2018》

图 5-2 东京地区 PM_{2.5} 浓度年际变化

表 5-1 美国部分州 PM_{2.5} 改善幅度

州	年份	PM _{2.5} 年均浓度变化范围 (μg/m ³)	PM _{2.5} 年均改善幅度 (%)
马里兰	1988~2002	26.3~15.0	3.9
纽约	1988~1996	23.0~14.2	5.9
俄勒冈	1988~1996	26.0~13.4	9.1
西弗吉尼亚	1988~2003	24.7~14.9	3.3
佐治亚	1988~1996	24.5~14.3	6.5
北卡罗莱纳	1988~1995	21.3~14.6	5.3
俄亥俄	1989~2003	22.9~14.9	3.1
宾夕法尼亚	1988~1999	20.1~14.8	2.8
罗德岛	1988~1992	17.0~14.8	3.5
弗吉尼亚	1988~1992	19.1~14.5	6.7
威斯康星	1988~1991	19.2~14.0	10.0

注：数据来源为 EPA，其中 1989 年之前的 PM_{2.5} 数据由 PM₁₀ 推算

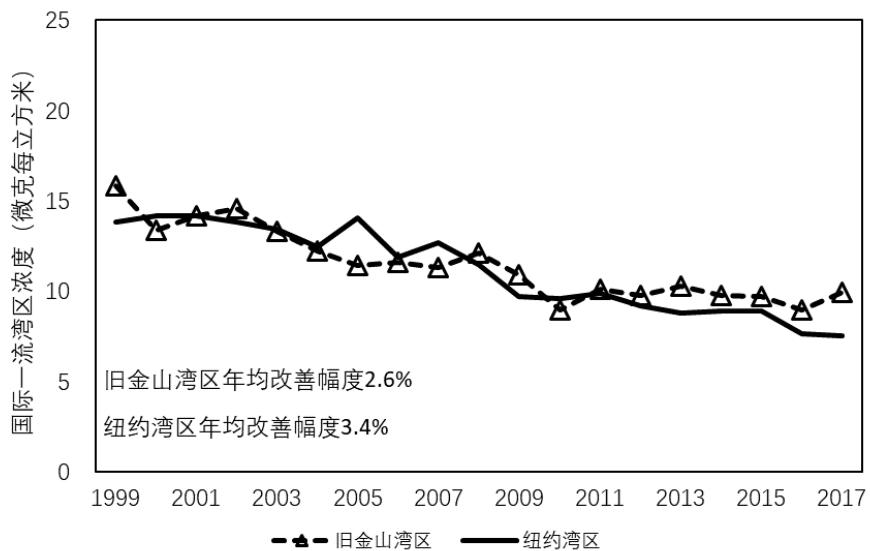
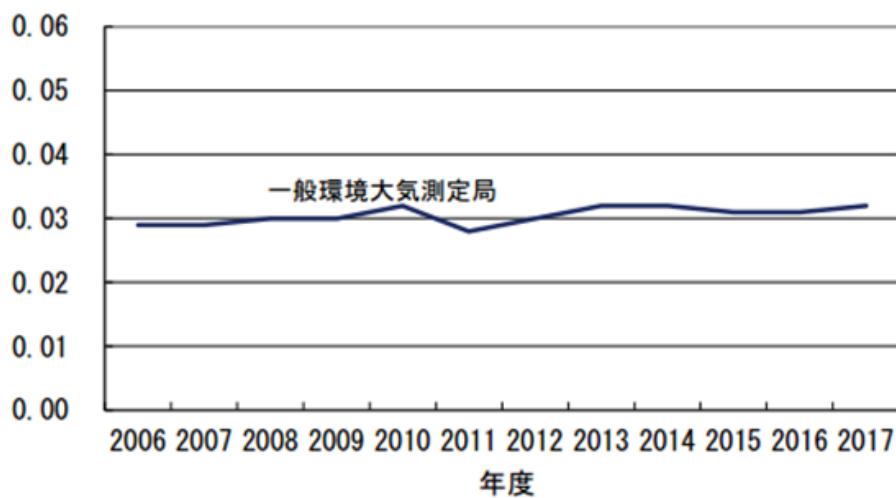


图 5-3 旧金山和纽约湾区 PM_{2.5} 浓度历史改善趋势

5.1.2 相关地区 O₃ 改善历程

相较于 PM_{2.5}, O₃ 的治理历程更为漫长。从国际大气污染防治的历程上看来, O₃ 污染问题是一个比 PM_{2.5} 更早发生且更难解决的大气环境问题, 亚洲的日本和韩国 O₃-8h 第 90 百分位数一直呈缓慢上升态势 (图 5-4 和图 5-5), 欧美的加拿大、德国、法国、英国、西班牙和荷兰近十年 O₃ 也未能得到进一步改善 (图 5-6)。但从美国的治理经验看, 尽管旧金山湾区和纽约湾区的 O₃ 在进入下降通道前用了至少 20 余年 (图 5-7), 但最终 O₃ 的浓度还是得到了控制, 说明这两个地区 O₃ 的治理措施是有效的, 也说明 O₃ 污染是可控的。



注: 数据来源为《东京都环境白皮书 2018》

图 5-4 东京都光化学氧化物年均浓度变化趋势

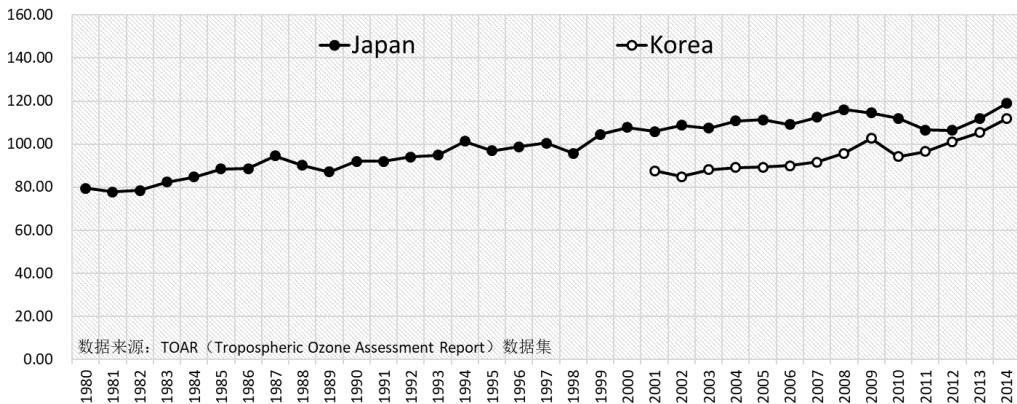


图 5-5 日本和韩国 O₃-8h 第 90 百分位数变化趋势

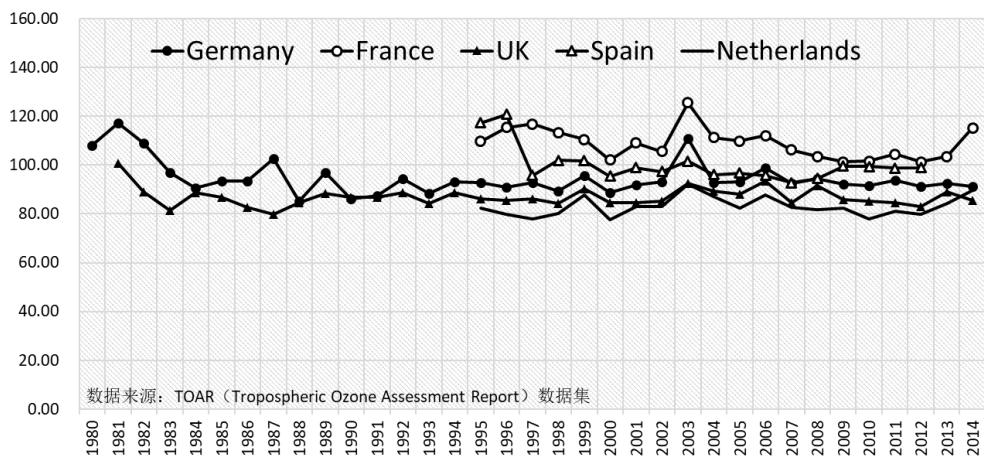


图 5-6 欧美部分国家 O₃-8h 第 90 百分位数变化趋势

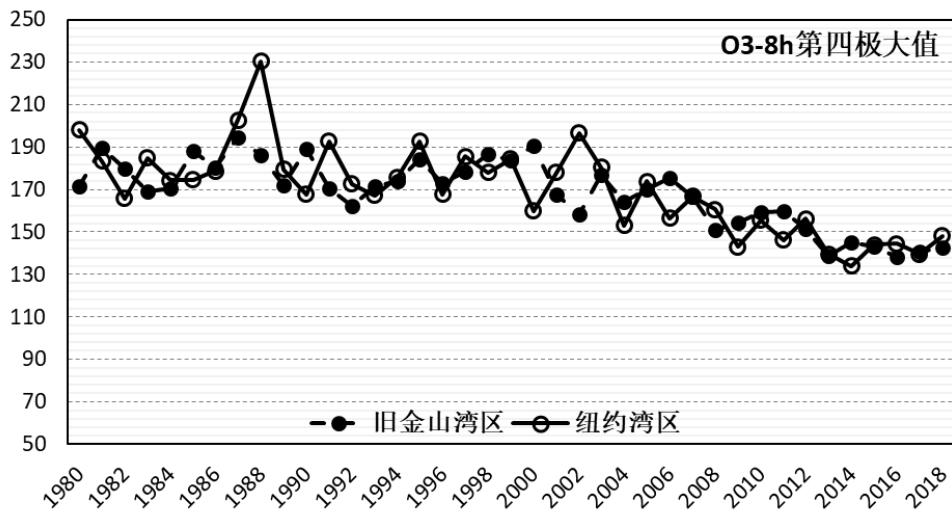


图 5-7 旧金山湾区和纽约湾区臭氧最大 8 小时日均值第 4 极大值变化趋势

5.2 典型地区空气质量改善历程中结构调整历程

从上一节的分析中可以看到, 东京都的 PM_{2.5} 浓度从 2001 年的 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 左右

降至 2011 年的 $15\mu\text{g}/\text{m}^3$ 左右, 即在十年间由珠三角现有的浓度水平达致 WHO-III 目标, 着重对这期间产业、交通和能源等领域结构调整发生的变化进行分析, 以期为珠三角实现 WHO-III 的策略提供参考。

2001-2011 年的十年间, 东京都的人口数量小幅增长, GDP 在 80~88 百亿美元间小幅波动增长, 社会经济形势基本稳定。从产业结构看(图 5-9), 在这阶段东京都的产业结构主要由第二产业和第三产业构成, 第三产业占比超过 80%, 已进入发达国家在经历产业结构调整后的稳定期, 但在期间第三产业的比重仍在进一步上升, 增加了 4 个百分点, 达到了 86%。从终端能源消费结构看(图 5-9), 煤炭由原本占 1.0% 逐步在终端能源消费中退出, 石油的占比下降了 10 个百分点, 化石燃料的使用逐渐由电力和天然气替代。此外, 这一阶段日本和东京出台了一系列法令和非强制性措施来减少机动车尾气造成的大气污染, 同时机动车中货车的保有量有较大幅度的下降, 2011 年货车保有量较 2001 年减少了 28%(图 5-10)。总体来看, 东京都 PM_{2.5} 浓度在从 WHO-II 阶段进一步改善至 WHO-III 阶段的过程中, 产业和能源结构在逐步调整, 同时对机动车排放的管控力度加大。

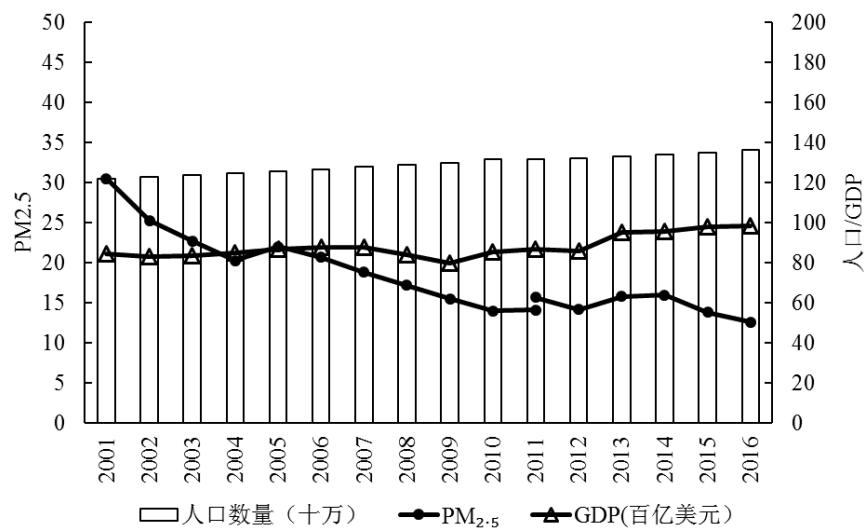


图 5-8 2001-2016 年东京人口、GDP 及 PM_{2.5} 的变化情况

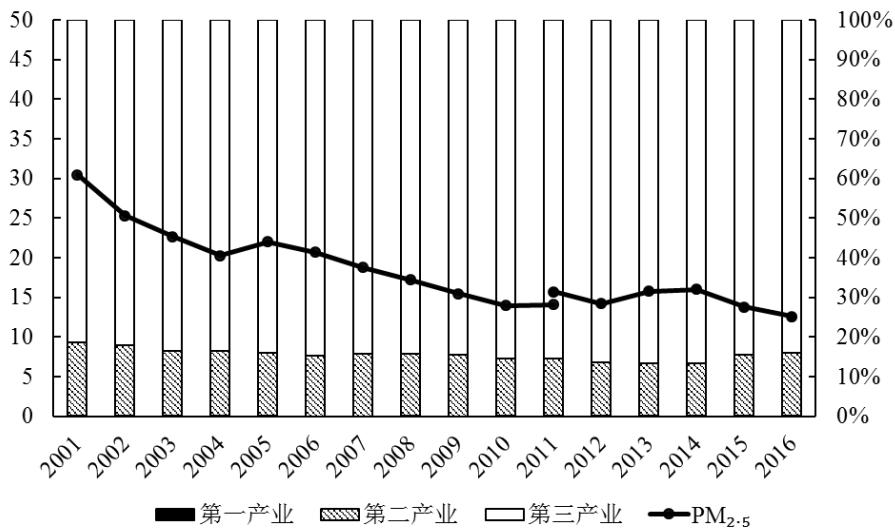


图 5-9 2001-2016 年东京产业结构及 PM_{2.5} 的变化情况

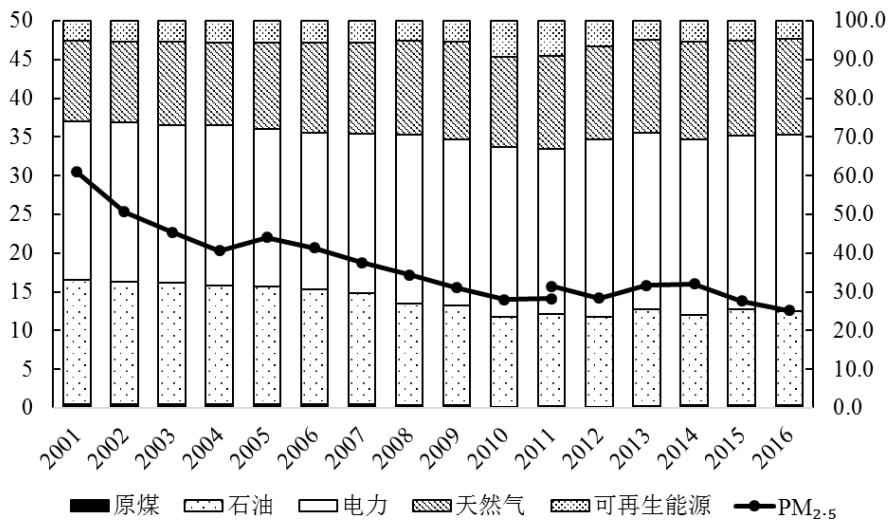


图 5-10 2001-2016 年东京终端能源结构及 PM_{2.5} 的变化情况

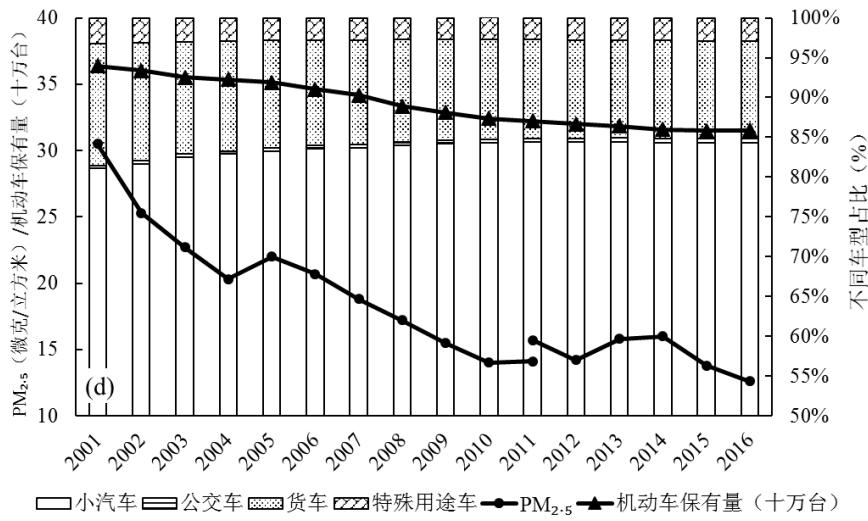
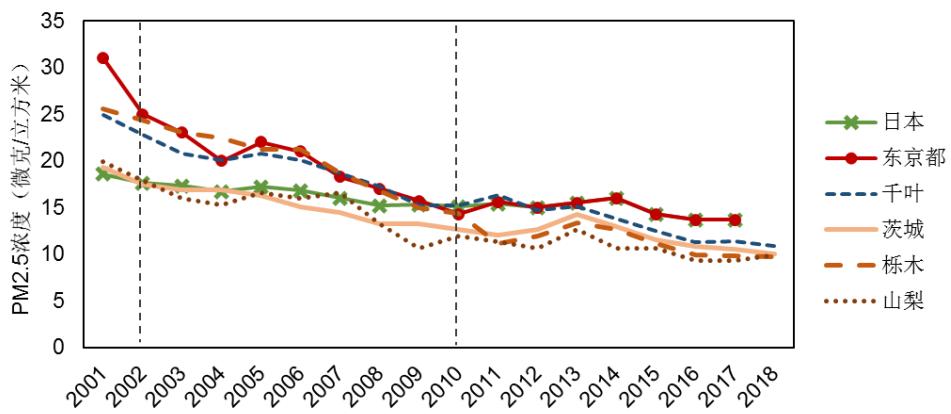


图 5-11 2001-2016 年机动车保有量和组成及 PM_{2.5} 的变化情况

区域空气质量受本地排放和外围传输的共同影响,从下图可以看到,在东京都 PM_{2.5} 浓度逐步改善的过程中,东京都周边地区乃至日本全国的 PM_{2.5} 浓度均呈下降趋势,特别是在 PM_{2.5} 浓度由 WHO-II 水平降至 WHO-III 水平的过程中,东京都及周边地区的改善幅度高于日本全国改善幅度。可见,低浓度水平下,东京都空气质量的改善是在周边区域空气质量同步改善的背景下发生的。



注: 数据来源为日本及各县统计年鉴,部分数据由 PM₁₀ 浓度推算

图 5-11 日本及东京湾区部分县 PM_{2.5} 浓度变化

5.3 跨区域大气环境监管经验

珠三角空气质量问题已呈现区域性特征,从上文的研究中也可以看到,珠三角空气质量实现 WHO-III 的目标必须联合周边地区进行联防联控。在跨区域大气环境监管方面,珠三角亟需解决的两个问题,一是 O₃ 污染作为一种区域性污染问题难以在短时间内迅速改善,在区域协同防控方面也尚无有效对策;二是在全力建设粤港澳大湾区的背景下开展区域协同防控,需要粤港澳三地突破制度和体制的差异性,在大气污染防治的合作机制体制上取得创新。本节着重针对这两个问题开展研究。

5.3.1 美国臭氧污染区域防控策略

美国作为全球少数几个 O₃ 污染防治取得成效的国家,其区域防控策略值得珠三角学习借鉴。在美国大气污染治理的历程中,美国国家环境署 (EPA) 制定的全美空气质量标准只是一个最低标准,各州可根据自身情况制定更加严格的大气质量标准。从 1990 年清洁空气法案出台开始,美国政府分别加强了在产业结

构中针对移动源、工业源、电力行业的减排政策，并根据臭氧传输特性，提出分区域治理的实施方案。

针对臭氧污染制定分区减排政策。随着 1990 年《清洁空气法案》再修订的出台，与 1970 年第一次修订不同的是，提出了臭氧传输的概念，即强调臭氧的区域传输性问题，与此同时，在臭氧污染严重的东北部地区成立了臭氧传输协会 (OTC)，并授权该区域东北部 11 个州和华盛顿特区协调制定区域 NO_x 减排策略并督促实施。同时，将 NO_x 预算中的州划分成三种不同类型：北部分区、外部分区和内部分区，并对不同分区给予不同的目标减排量（图 5- 12）。以纽约湾区及马里兰州为例，这两个地区均属于内部分区，其特点为由非达标区域及人口稠密度这两个指标组成。臭氧传输协会对于该分区实行最严格的减排目标 (EPA, 2003)。这一举措使得 2002 年区域内臭氧季 NO_x 排放量减排效果显著(图 5- 13)，就纽约湾区来说，纽约湾区所在的东北部区域臭氧浓度均在 1991 年前后实现阶段性突破，纽约湾区臭氧浓度在这一阶段达到 1980 年以来最低值，首次低于 200ug/m³ 界限，臭氧浓度波动幅度自第一阶段明显减弱，呈现较规律性波动势态。



图 5- 12 美国东北部地区 NO_x 管控分区示意图

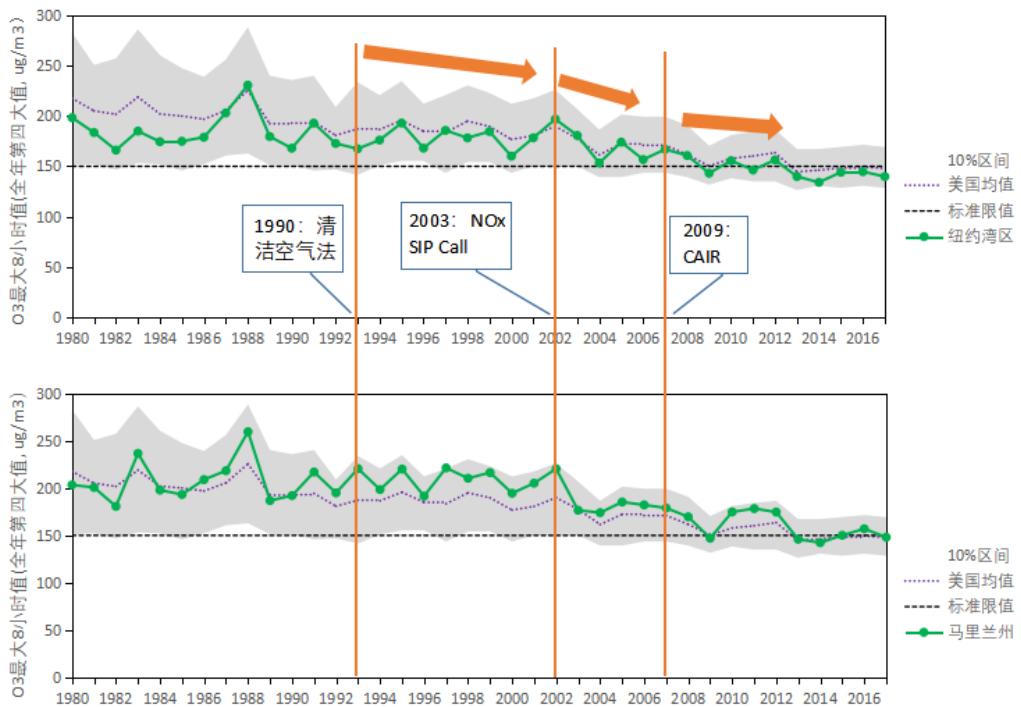


图 5-13 分区减排政策实施效果（以纽约湾区和马里兰州为例）

对臭氧传输区域所在州的污染物主要贡献源实施具有针对性的排放措施。在《清洁空气法案》的大背景下，美国环保署（EPA）更进一步提出了对于臭氧污染的前体物之一的 NO_x 的联防联控，具体主要为出台区域性范围的污染物减排法案，并针对电力行业中的主要贡献源如发电厂和大型工业锅炉进行减排控制（图 5-14）。从 1999 年的 OTC NO_x 控制项目开始，每项法规的出台都在前者的基础上不断更新，并进一步界定了更加严格的标准，对于不同阶段区域内各州臭氧浓度的变化趋势，分区内排放源减排要求也有所不同。除制定区域内各州年度排放限值之外，还设置了季度排放限值，更加有效的针对臭氧季节实施排放控制措施（图 5-15）。与此同时，在每项法案结束后，EPA 会成立专门的小组，小组由各州政府、空气质量专家等组成，对法案实施效果进行评估及总结。

电力行业	实施范围	针对目标	1995 1996 1997 1998 1999 2000 2001 2002 2003 2004 2005 2006 2007 2008 2009 2010 2011 2012 2013 2014 2015 2016 2017 2018 现今
ARP酸雨计划 NO_x 减排项目	全美	发电厂	1996-1999
OTC NO_x 控制项目	东北部11州+华盛顿特区	电力及大型工业锅炉	2004-2014
NBP NO_x 预算交易项目	东部28州	发电厂及工业源	2004-2014
CAIR	东部28州	发电厂	2014-2018
CSAPR	东部28州	发电厂	2018-现今

图 5-14 针对 NO_x 减排的各相关政策开始实施年份及结束年份时间轴

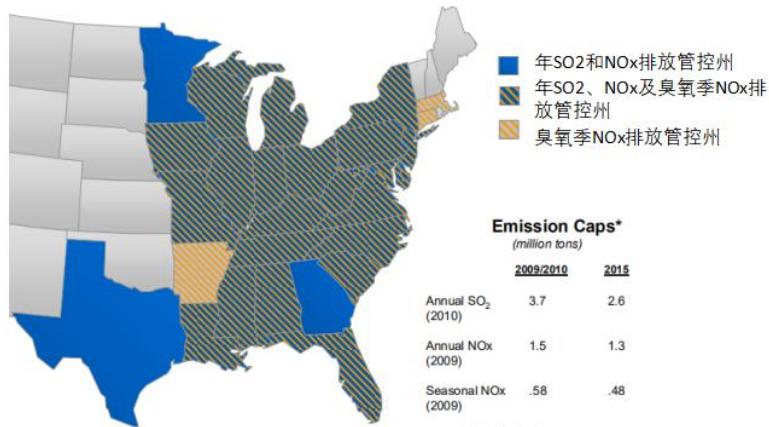


图 5-15 CAIR 政策下部分州 SO₂、NO_x 的排放限额

与美国臭氧污染防治做法类似，欧盟也将目标区域进行分区管辖，并评估臭氧传输影响及贡献来源（EEA, 2013）。欧盟空气质量指令（2008/50/EC）要求欧盟成员国将自己领土划分为不同区、块以达到不同空气质量目标的要求。不同的片区又称空气质量区，是大气污染防治的基本单位，同时也是空气质量评价与管理的基本单位；块的划分则由人口总量或密度决定。各国同时也科学的评估臭氧传输及贡献区域来源（EEA, 2009），确立跨区域传输及自身排放源的影响值占比，有效的评估臭氧传输影响、界定传输区域。这种评估模式跳出传统的以行政单位为界限的区域管理模式，有效的抓住大气污染物传输的特征、一定程度上将社会经济发展水平与大气污染防治紧密的结合在一起。

5.3.2 国际跨境大气污染协同防控机制体制经验

本节重点调研了美-加、北美自由贸易区和欧盟国外跨境大气污染防控合作体制机制，以期为粤港澳大湾区大气污染协同防控体制机制突破创新方面提供经验与启示。

（1）美-加跨境大气污染防控合作体制机制

北美五大湖周边地区由于地理条件和经济活跃等原因，区域大气污染问题较为突出，因此美国和加拿大开展了长期的跨境大气污染防控合作，双方的跨界大气污染防控合作框架图 5-16 所示。

随着北美五大湖周边地区跨境大气污染传输引发的近地面 O₃ 污染问题日益凸显，2000 年 12 月，美国和加拿大共同在原有的《美国—加拿大空气质量协议》中增加了附则《近地面臭氧前体污染物的特别防控目标》，开始了跨境的臭氧、氮氧化物（NO_x）和挥发性有机物（VOCs）的防控合作。基于《美国—加拿大

空气质量协议》，美国和加拿大共同成立并运作了一个双边空气质量委员会，作为开展跨境问题磋商和措施执行的组织机构。双边空气质量委员会由美国和加拿大双方各自委派同等数量的代表组成。为有效推动《美国—加拿大空气质量协议》的执行，双方共同指定美国和加拿大共同建立的国际联合委员会为支撑机构（廖程浩等, 2019）。国际联合委员会相关主要职责包括：组织对双边空气质量委员会所提交进展报告的评估；向美国和加拿大双方提交综合评估分析意见；按要求将综合评估分析意见向公众公开。基于《美国—加拿大空气质量协议》，美国和加拿大共同推动了在工业、机动车、船舶发动机排放的协同管理和油气开采加工领域排放控制的政策研究和实施。此外，基于《美国—加拿大空气质量协议》的要求，每两年定期开展一次协议进展情况的评估并发布评估报告，客观评价了美国和加拿大边境空气质量改善的成效，并向社会公开并征求意见建议，有效推动了第三方和公众的监督。

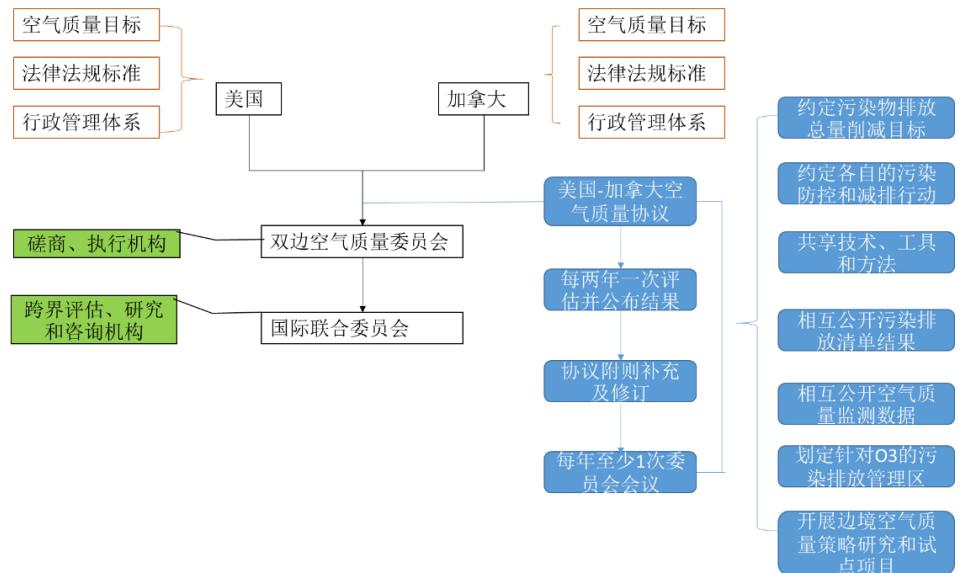


图 5-16 美国-加拿大跨界大气污染防控合作框架示意图

(2) 北美自由贸易区跨境大气污染防控合作体制机制

美国、加拿大和墨西哥是北美的主要国家，在跨境大气污染防控方面也开展了卓有成效的工作。20世纪70年代起，美国、加拿大和墨西哥三个北美主要国家就开始关注以酸雨为代表的跨界大气污染问题。1994年，美国、加拿大和墨西哥三国签订并开始实施了《北美环境合作协定》，主要通过规定环境保护的条约义务，建立专门的环境工作机构和寻求环境争端的妥善解决等方式来实现区域环境保护，三方的跨界大气污染防控合作框架图5-17所示。

根据《北美环境合作协定》，北美自由贸易区内建立了北美环境合作委员会，其职能主要是加强成员国之间的环保合作，通过保护环境、自然生态和健康来推动可持续发展，主要工作包括污染减排、加强环境管理、协调环境等。在跨界大气污染治理方面主要通过协议合作来解决跨界大气争端，主要是促进三国空气质量合作；开发提高北美空气质量的技术和战略工具；制定三国空气质量改善计划。北美环境合作委员会下设三个主要机构，部长级理事会、秘书处和联合公众咨询委员会，理事会作为北美环境合作委员会的管理决策机构，主导着北美环境合作委员会的所有工作；秘书处作为常设机构，负责提供技术、管理和执行等方面的支持，特别强调“独立性”，不得寻求或接受《北美环境合作协议》以外任何政府或任何其他权利机关的指示；联合公众咨询委员会由来自成员国的 15 名公众代表组成，负责向理事会就环境事务提供咨询。成员国还可建立本国的国民咨询委员会和政府咨询委员会，国民咨询委员会是非官方性质的组织，由成员国国内公众组成，政府咨询委员会则是政府性机构，由联邦和州（省）政府代表组成，两者均为合作协议的执行和完善提供意见建议。

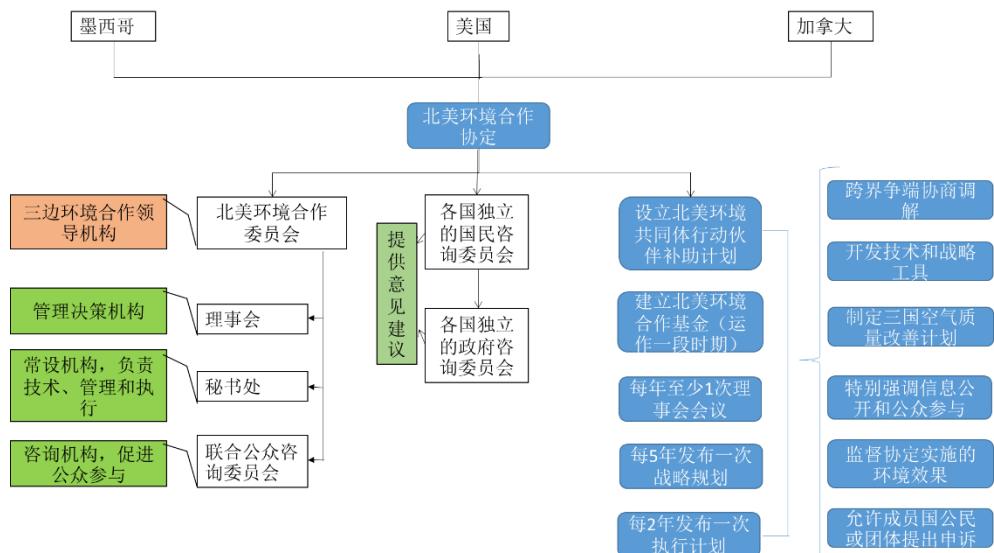


图 5-17 北美自由贸易区跨界大气污染防控合作框架示意图

（3）欧盟跨境大气污染防控合作体制机制

上世纪七十年代以前，欧洲主要以经济发展为主，大气污染的防治管控工作较为欠缺，一些有关的大气污染防治政策基本上以各自为政的管理方式进行，各国的大气治理进度与政策标准为此也存在较大差异（孙瑜颤，2015）。近年来，由于对健康的影响，颗粒物及臭氧污染以及成为欧洲地区亟待解决的问题。为共

同推动解决欧洲大气污染问题，1979年欧洲34国在日内瓦签署了《远距离跨境大气污染公约》，并成立了执行机构、监督和评价机构、委员会等较为完善的组织机构体系，科学的统筹政策安排与跨界大气污染联防联控，为之后欧洲跨地区大气污染改善提供了强有力的保障。欧盟的跨界大气污染防控合作框架图 5- 18 所示。

欧盟中的以下几个机构涉及大气污染防控的相关工作。欧盟委员会负责调查任何违反大气污染防治指令或不履行义务的事件，是主要的执行组织；欧洲议会作为立法监督、决议机构，对大气污染防控享有立法权，欧洲议会于1996至2008年期间先后制定并通过了超过20条欧盟指令，基本完成了欧盟国家大气污染防治体系和评价标准体系（孙瑜颤，2015）；欧洲环境署作为欧盟建立技术支撑机构，主要负责建立大气污染监测站点，搜集、分析和发布大气的信息，为各成员国提供客观的信息，并提供适当的措施方法以及评价标准；欧洲委员会设立的环境空气质量委员会作为监督机构，负责监督空气质量（柴发合等，2013）。

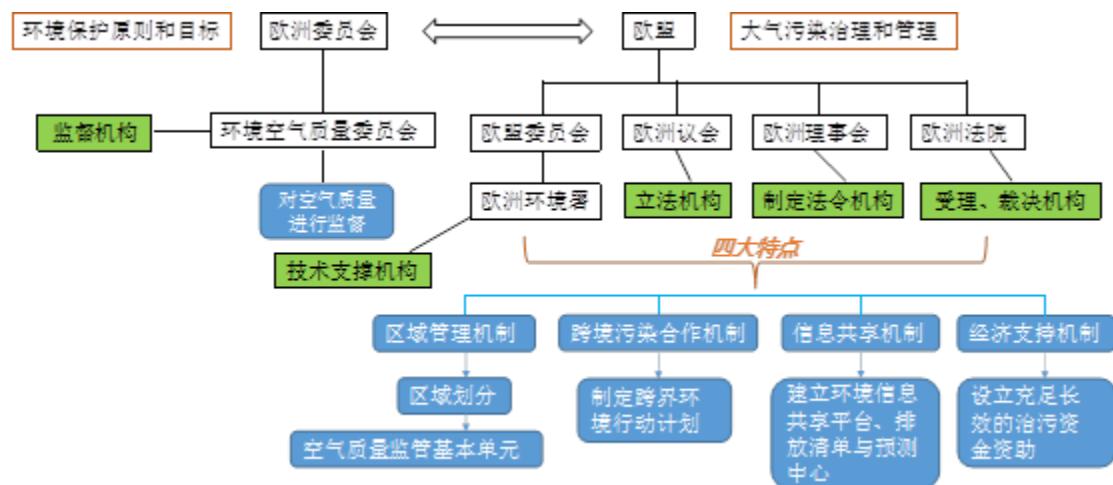


图 5- 18 欧盟大气污染防控合作框架示意图

欧盟的大气污染协同防控有四个重要特点：（1）建立区域管理机制，欧盟空气质量指令要求各成员国将自己领土划分为不同空气质量区以达到不同空气质量目标的要求，区块的划分由人口总量或密度决定，这种划分模式跳出传统的以行政单位为界限的区域管理模式，一定程度上将社会经济发展水平与大气污染防治紧密的结合在一起；（2）建立跨境污染合作机制，该机制要求相关成员国需要共同合作应对跨境的空气污染，并且欧盟委员会也参与其中制定短期的行动计划以应对超标的污染；（3）建立成员国环境信息共享平台、排放清单及预测

中心，及时掌握各成员国环境数据、在《公约》协议下的减排及达标情况，合理统筹分配各国未来污染物允许排放量。（4）采取经济支持措施，随着 2005 年中东欧 10 个国家正式加入欧盟，欧盟各国在内部经济发展水平与产业特征上差异性显现，《日内瓦议定书》作为《公约》下第一个议定书，制定了针对各国经济发展水平与产业特征的不同而带来的污染治理成本间差异性的补贴措施。

5.4 美国和加州空气质量标准的修订历程

环境空气质量标准是空气质量管理体系的重要组成部分，空气质量标准的宽严程度基本反映了各国的空气污染情况，随着大气污染防治工作的不断深入，为适应不同阶段空气污染问题的特征和空气质量管理要求，空气质量标准往往要进行不断的修订。另一方面，不断修订收严空气质量的标准也会推动环境空气质量改善，有效保护公众健康和生态环境。本节将以美国为例，对其空气质量的修订历程进行梳理总结，并从中提炼出对珠三角空气质量管理的启示。

5.4.1 美国环境空气质量标准概述

第二次世界大战后，美国日趋恶化的空气污染问题引起了公众和联邦政府的极大关注。1955 年美国国会通过第一部联邦空气污染法律《1955 年空气污染控制法》，1963 年美国国会颁布了《清洁空气法》，明确加强联邦机构的主导作用，但由于未制定全国统一的空气质量标准，从而使得联邦政府无法对各州的空气污染问题进行管理。1967 年，美国国会制定《1967 年空气质量法》，明确要求制定州环境空气质量标准，但最终并未实施。1970 年，《清洁空气法修正案》出台，规定由国家环境保护局（U.S Environmental Protection Agency, EPA）依据最新的科学研究成果制定国家环境空气质量标准。根据这一法案要求，EPA 于 1971 年 4 月 30 日首次制定发布了《国家环境空气质量标准》(National Ambient Air Quality Standards, NAAQS)。EPA 原则上需每 5 年对空气质量标准进行一次审查，并根据需要修订空气质量标准，该标准自出台以来，至今已经历了 11 次修订。此外，美国环境空气质量标准的另一重要特点是，各州可根据本地区空气质量状况和管理需求，制定本州的空气质量标准。

加利福尼亚州的洛杉矶地区曾是美国空气污染最严重的地区，自 1943 年洛杉矶爆发严重的光化学烟雾污染事件以来，加州的大气污染控制已走过 70 年的

历程，目前已成为拥有全美最严的政策法规标准和管控措施的地区，在空气质量改善方面取得突出成效。在空气质量标准方面，早在 1959 年，加州政府就通过立法，要求公共卫生部制定空气质量标准和必要的机动车排放控制措施；1969 年加州空气资源局制定了加州第一部包括总悬浮颗粒物 (TSP)、光化学氧化剂、SO₂、NO₂ 和 CO 共五项指标的空气质量标准，早于 NAAQS 十多年。之后，加州执行着比 NAAQS 更为严格的加州环境空气质量标准 (California ambient air quality standards, CAAQS)。

5.4.2 美国国家和加州环境空气质量标准现状对比

当前 NAAQS 中的污染物有 7 项：SO₂、PM₁₀、PM_{2.5}、O₃、NO₂、CO 和 Pb，CAAQS 中污染物有 11 项，除上述 7 项污染物外，还包括能见度降低粒子 (Visibility Reducing Particles)、硫酸盐、硫化氢 (H₂S) 和氯乙烯。NAAQS 和 CAAQS 中对 SO₂、PM₁₀、PM_{2.5}、O₃、NO₂、CO 和 Pb 七项污染物浓度限值的规定如下表所示。NAAQS 对不同污染物的给出了一级和二级浓度限值，而 CAAQS 对不同污染物只有一种浓度限值。在 O₃ 标准方面，CAAQS 对 1 小时浓度和 8 小时浓度的限值均作出了规定，而 NAAQS 仅对 8 小时浓度限值有所规定，且两者对 8 小时浓度的限值均为 137 μg/m³。在 PM₁₀ 标准方面，CAAQS 对年浓度和 24 小时浓度限值做出了规定，而 NAAQS 仅对 24 小时浓度限值作出了规定，但两者对 24 小时浓度的达标统计要求不同，CAAQS 采用的达标统计方法为 24 小时浓度的算数平均不超过 50 μg/m³，而 NAAQS 采用的是 24 小时浓度每年超过 150 μg/m³ 次数的三年平均值不超过一年一次。在 PM_{2.5} 标准方面，CAAQS 仅对年浓度限值做出了规定，而 NAAQS 对年浓度和 24 小时浓度限值均作出了规定，CAAQS 对年浓度的限值要求与 NAAQS 的一级标准一致，严于 NAAQS 的二级标准。在 CO 标准方面，两者均对 1 小时浓度和 8 小时浓度限值做出了规定，且统计方法均为平均时段的算数平均；两者对 8 小时浓度限值的要求一致，CAAQS 对 1 小时浓度限值的要求严于 NAAQS。在 NO₂ 标准方面，两者均对 1 小时浓度和年平均浓度限值做出了规定，但 CAAQS 对 1 小时浓度的达标统计方法为算数平均值，而 NAAQS 采用的是 1 小时平均浓度的第 99 百分位数的三年平均；年均浓度限值的要求，CAAQS 严于 NAAQS。在 SO₂ 标准方面，CAAQS 对 1 小时浓度和 24 小时浓度限值做出了规定，NAAQS 对 1 小时、3 小时、24 小时浓度

以及年均浓度都做出了规定，但两者对 1 小时浓度的达标统计方式有所差异。总体来看，就 CAAQS 和 NAAQS 中平均时间要求和达标统计要求相同的污染物而言，CAAQS 更为严格。

表 5-2 现行美国国家环境空气质量标准和加州环境空气质量标准对比

污染物	平均时间	CAAQS	NAAQS	
		浓度限值	一级标准	二级标准
O_3	1 小时	0.09 ppm (180 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	—	同一年级标准
	8 小时	0.070 ppm (137 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0.070 ppm (137 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	
PM_{10}	24 小时	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	同一年级标准
	年平均	20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	—	
$PM_{2.5}$	24 小时	—	35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	同一年级标准
	年平均	12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
CO	1 小时	20 ppm (23 mg/ m^3)	35 ppm (40 mg/ m^3)	—
	8 小时	9 ppm (10 mg/ m^3)	9 ppm (10 mg/ m^3)	—
	8 小时 (Lake Tahoe)	6 ppm (7 mg/ m^3)	—	—
NO_2	1 小时	0.18 ppm (339 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	100 ppb (188 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	—
	年平均	0.030 ppm (57 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0.053 ppm (100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	同一年级标准
SO_2	1 小时	0.25 ppm (655 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	75 ppb (196 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	—
	3 小时	—	—	0.5 ppm (1300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)
	24 小时	0.04 ppm (105 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0.14 ppm (特定地区)	—
	年平均	—	0.030 ppm (特定地区)	—

5.4.3 美国国家和加州环境空气质量标准制定历程对比

1971 年首次发布的 NAAQS 中，涉及的污染物包括 CO、 NO_2 、总悬浮颗粒物、光化学氧化剂、碳氢化合物 (HC) 和 SO_2 共 6 项，后续增加了铅 (Pb)、 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ ，取消了 TSP 和 HC，同时将光化学氧化剂指标调整为 O_3 。1969 年通过正式立法确立的加州空气质量标准中包括总悬浮颗粒物、光化学氧化剂、 SO_2 、 NO_2 和 CO 五项污染物，后续增加了 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 、Pb、硫酸盐、能见度降低粒

子、H₂S 和氯乙烯。下面分别对 SO₂、PM₁₀、PM_{2.5}、O₃ 和 NO₂ 五种污染物在 NAAQS 和 CAAQS 中修订的历程进行详细对比。

(1) SO₂

从制定的时间看,美国于 1971 年首次制定 SO₂ 环境空气质量标准,并于 1973 年和 2010 年进行过两次修订,先后对 1 小时值、3 小时值、24 小时值和年值做出了规定;而加州于 1959 年就首次制定 SO₂ 环境空气质量标准,比美国国家早了十二年,此后经历了六次修订,对 1 小时值和 24 小时值做出了规定。从浓度限值看,加州对 SO₂ 浓度限值的要求始终严于美国国家标准,具体表现在:1971 年 NAAQS 将 3 小时平均浓度限值定为 0.5ppm,这与两年前(1969 年)CAAQS 制定的 1 小时平均浓度限值一致,且 NAAQS 在 2010 年才对 1 小时浓度的限值做出规定;1971 年以来, NAAQS 制定的 24 小时平均浓度限值为 0.14ppm,始终高于 CAAQS 的限值要求。

表 5-3 美国国家和加州 SO₂ 环境空气质量标准修订历程对比⁵

年份		1959	1969	1971	1973	1974	1975	1977	1984	1991	2010
1 小时限值	NAAQS	\								75 ppb ⁶	
	CAAQS	1 ppm	0.5 ppm						0.25 ppm		
3 小时限值	NAAQS	\	0.5 ppm								
	CAAQS	\									
24 小时限值	NAAQS	\	0.14 ppm								
	CAAQS	\	0.04 ppm			0.1 ppm	0.04 ppm	0.05 ppm	0.04 ppm		
年限值	NAAQS	\	0.03 ppm ⁷								
	CAAQS	\									

(2) NO₂

从制定的时间看,加州首次制定 NO₂ 环境空气质量标准的时间比美国提前了九年。CAAQS 和 NAAQS 均对 NO₂ 的 1 小时浓度和年均浓度限值做出了规定,但加州自 1962 年就对 1 小时浓度限值做出了规定,而美国直到 2010 年才首次发布了 NO₂ 的 1 小时浓度限值。从浓度限值看,CAAQS 和 NAAQS 从制定以来均

⁵ 除特殊注明外,各限值的统计方式均为平均时段内的算数平均。

⁶ 达标统计方法为 1h 平均浓度的第 99 百分位数的三年平均。

⁷ 初制订时一、二级标准分别为 0.03ppm 和 0.02ppm,1973 年废除了二级标准的对 24 小时浓度限值的要求。

为对年均浓度限值做出修订,但CAAQS的限值要求较NAAQS更为严格。

表 5-4 美国国家和加州 NO₂环境空气质量标准修订历程对比⁸

年份		1962	1971	2007	2010
1 小时限值	NAAQS		\		100 ppb ⁹
	CAAQS		250 ppb		180 ppb
年限值	NAAQS	\	53 ppb		
	CAAQS		\		30 ppb

(3) PM₁₀

CAAQS 和 NAAQS 均对 PM₁₀ 的 24 小时浓度和年均浓度限值做出了规定。从制定的时间看, 加州首次制定 PM₁₀ 环境空气质量标准的年份为 1983 年, 比美国国家标准提前了 4 年。从浓度限值看, CAAQS 对 PM₁₀ 年均浓度的限值为 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 2002 年降至 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 而 CAAQS 对 PM₁₀ 年均浓度一级和二级标准的限值在 1987~2006 年始终维持在 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, CAAQS 的要求更为严格。

表 5-5 美国国家和加州 PM₁₀ 环境空气质量标准修订历程对比

NAAQS					CAAQS ¹⁰		
修订时间	标准类别	平均时间	浓度限值	达标统计要求	标准类别	平均时间	浓度限值
1983 年			\		不分级	24 小时	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
						1 年	30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
1987 年	一级、二级	24 小时	150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	每年超标次数的三年平均值不超过一年一次		\	
		1 年	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	算数平均值, 三年平均			
1997 年	一级、二级	24 小时	150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	每年超标次数的三年平均值不超过一年一次	不分级	24 小时	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
		1 年	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	算数平均值, 三年平均		1 年	20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
2002 年			\				
2006 年 ¹¹	一级、二级	24 小时	150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	每年超标次数的三年平均值不超过一年一次		\	

⁸ 除特殊注明为, 各限值的统计方式均为平均时段内的算数平均。

⁹ 达标统计方法为 1h 平均浓度的第 98 百分位数的三年平均。

¹⁰ 统计方式为平均时段内的算数平均。

¹¹ 废除对年均浓度的限值要求。

(4) PM_{2.5}

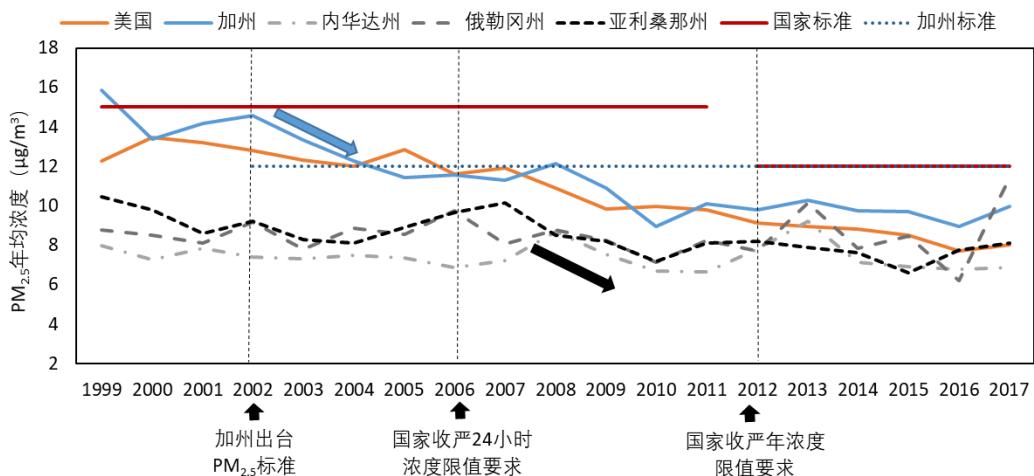
CAAQS 和 NAAQS 均对 PM_{2.5} 的 24 小时浓度和年均浓度限值做出了规定。加州首次制定 PM_{2.5} 环境空气质量标准的年份为 2002 年, 比美国国家标准晚了 5 年, 且此后未对浓度限值做出修订, 始终维持在 12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。美国自 1997 年首次制定 PM_{2.5} 标准以来, 一级年均浓度限值于 2012 年经过一次修订, 由 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 收严至 12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 二级标准始终维持 12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 不变; 一级和二级 24 小时标准于 2006 年经过一次修订, 由 65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 收严至 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 限值水平收严了约 46%。总体来看, 尽管加州制定 PM_{2.5} 标准时间晚于国家标准, 但其严格程度高于国家标准。

表 5-6 美国国家和加州 PM_{2.5} 环境空气质量标准修订历程对比

NAAQS ¹²				CAAQS		
修订时间	标准类别	平均时间	浓度限值	标准类别	平均时间	浓度限值
1997 年	一级、二级	24 小时	65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	\		
		1 年	15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$			
2002 年	\			不分级	1 年	12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
2006 年	一级、二级	24 小时	35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	\		
		1 年	15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$			
2012 年	一级	24 小时	35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	\		
		1 年	12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$			
	二级	24 小时	35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$			
		1 年	15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$			

从 PM_{2.5} 年均浓度的变化趋势看, 加州 PM_{2.5} 浓度出现了两次比较明显的下降, 2002 年加州首次制定 PM_{2.5} 环境空气质量标准后, PM_{2.5} 年均浓度由 2002 年的 14.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 降至 2005 年的 11.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 年均降幅达 7%; 2006 年美国国家标准收严了对 PM_{2.5} 的 24 小时浓度限值要求, 在这之后的一到两年内, 全美、加州以及加州周边更低浓度水平的内华达、俄勒冈和亚利桑那州的 PM_{2.5} 年均浓度均出现了明显下降。从中可以看到, 不仅本地区的空气质量标准能对本地空气质量改善起到促进作用, 国家空气质量标准的收严可以促使大范围区域空气质量改善, 从而使得空气质量相对更优的地区在周边区域空气质量不断改善的背景下可以向更低的浓度目标迈进。

¹² 24 小时浓度的达标统计方法为第 98 百分位数的三年平均, 年均浓度的达标统计方法为年算数平均值的三年平均



(5) O₃

CAAQS 和 NAAQS 均对 O₃ 的 1 小时浓度和 8 小时浓度限值做出了规定, 其中 1 小时浓度的达标统计方法为每年最大小时平均浓度大于限值的天数的三年平均值不超过 1 天, 8 小时浓度的达标统计方法为日最大 8 小时第 4 大值的三年平均。从制定的时间看, 首次对光化学氧化剂的 1 小时浓度限值做出规定的时间, CAAQS 为 1969 年, NAAQS 为 1971 年, CAAQS 早于 NAAQS 两年; 将光化学氧化剂指标调整为 O₃ 的时间, CAAQS 为 1974 年, NAAQS 为 1979 年, CAAQS 提前了五年。从浓度限值看, 自采用 O₃ 作为指标以来, CAAQS 标准始终严于 NAAQS, 直到 2015 年 NAAQS 将 O₃ 的 8 小时浓度限值收严至 0.07ppm, 才与 CAAQS 一致。

表 5-7 美国国家和加州 O₃ 环境空气质量标准修订历程对比

NAAQS				CAAQS		
修订时间	标准类别	平均时间	浓度限值	标准类别	平均时间	浓度限值
1969 年		\		不分级	1 小时	0.1 ppm ¹³
1971 年	一级、二级	1 小时	0.08 ppm ¹³		\	
1974 年		\			1 小时	0.1 ppm
1979 年	一级、二级	1 小时	0.12 ppm		\	
1988 年		\			1 小时	0.09 ppm
1997 年	一级、二级	8 小时	0.08 ppm		\	
2005 年		\			1 小时	0.09 ppm
2008 年	一级、二级	8 小时	0.075 ppm		8 小时	0.07 ppm
					\	

¹³ 针对的污染物为光化学氧化剂

2015 年	一级、二级	8 小时	0.07 ppm	
--------	-------	------	----------	--

结合 O_3 浓度的变化趋势和 O_3 环境空气质量标准修订的几个关键节点可以看到, O_3 浓度限值的不断收严推动着 O_3 浓度不断改善。2005 年加州的的 O_3 降至 0.075ppm, 已连续两年低于美国国家标准的要求 (0.08ppm), 当年加州标准中增加了对 O_3 的 8 小时浓度限值要求 (0.07ppm), 且严于美国国家标准, 此后八年间加州的 O_3 浓度继续下降, 并与 2013 年首次达标。同样, 2008 年美国的 O_3 连续 4 年达到美国国家标准的要求后, 国家标准对 O_3 -8h 的浓度限值收严至 0.075 ppm, 并与 2015 年连续三年达标后再次收严至 0.07ppm。

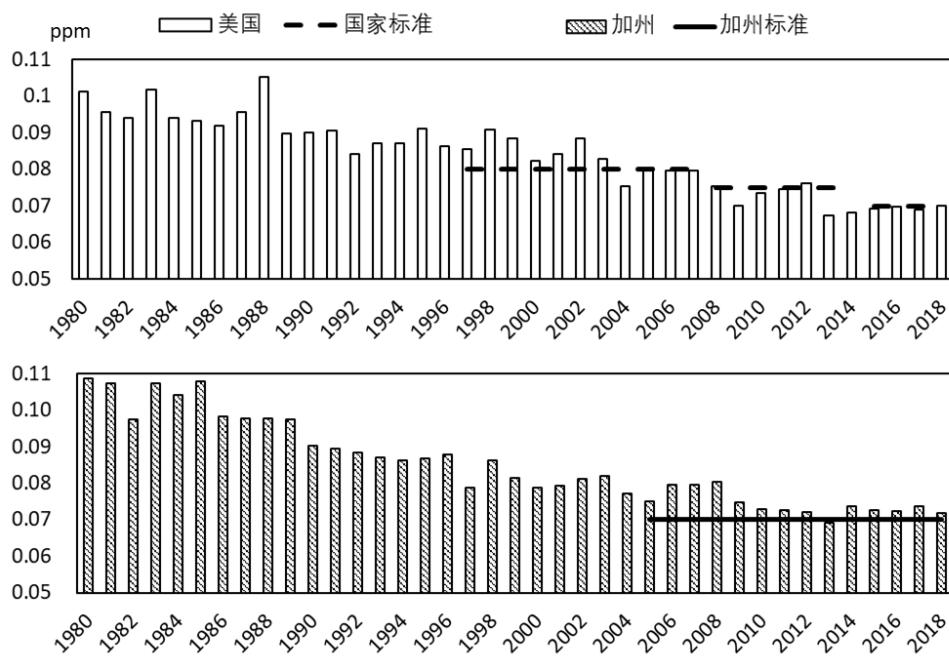


图 5-20 空气质量标准修订历程下美国及加州 O_3 -8h 第四大值变化

5.5 达到 WHO-III 水平地区的空气质量改善经验对珠三角的启示

(1) 对珠三角空气质量改善目标策略制定的启示

从已达到 WHO-III 水平的国家和地区的空气质量改善历程看, 不同浓度水平下空气质量的改善速率存在差异, 在制定珠三角空气质量改善目标策略要分阶段进行考虑。随着污染物浓度的降低, 空气质量进一步改善的难度会加大, 但部分发达国家的经验表明, 在 $PM_{2.5}$ 较低浓度下依然可以保持较高的逐年改善速率。从东京空气质量改善的经验看, 结构调整和针对性的防控措施能够有效推动空气

质量快速改善。通过珠三角 2017 年 (PM_{2.5} 浓度处于 WHO-I 水平) 和三大湾区 PM_{2.5} 浓度处于 WHO-III 水平时 (旧金山和纽约湾区为 2000 年, 东京湾区为 2011 年) 社会发展特征的对比可以看到, 珠三角的能源、产业结构现状与这些地区仍有较大差距。从产业结构上看 (图 5-21), 珠三角第三产业比重三大湾区低 20~30 个百分点; 从一次能源消费结构看 (图 5-22), 珠三角煤炭的使用比例高 30 多个百分点, 而清洁能源的比例低 15~20 个百分点。因此, 在制定珠三角空气质量改善目标策略要充分考虑珠三角所处的社会发展阶段和结构现状。综合考虑珠三角 PM_{2.5} 浓度现状与 WHO-III 目标的差距、达到 WHO-III 水平地区 PM_{2.5} 改善的经验以及珠三角经济社会发展现状与上述地区的差距, 可以预期珠三角 PM_{2.5} 仍有进一步持续改善的潜力。

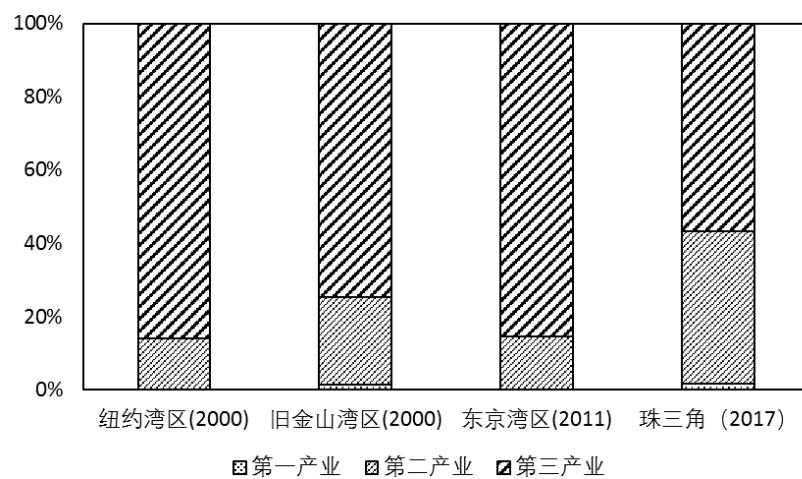


图 5-21 珠三角现状及三大湾区空气质量处于 WHO-III 阶段时产业结构对比

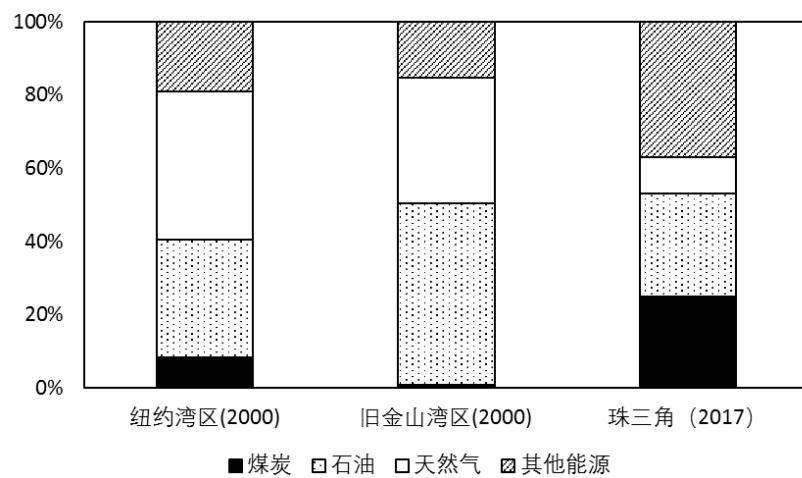


图 5-22 珠三角现状及其它湾区空气质量处于 WHO-III 阶段时一次能源消费结构对比

但就 O₃ 而言, 一方面国际经验表明, 相较于 PM_{2.5}, O₃ 污染问题更难解决,

以美国为例，尽管目前美国的 O_3 浓度已经得到控制，但自 1970 年《清洁空气法》实施至 O_3 浓度进入下降通道前，至少用了二十余年；另一方面，珠三角目前的 O_3 浓度尚处于超标状态，且近几年呈上升态势，珠三角 O_3 的治理工作还处于起步阶段，要想在 2035 年前有大幅改善难度较大。因此，2035 年以前， O_3 的改善仍将以把浓度控制在 $160\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以内为主要目标。

（2）对珠三角跨区域大气环境监管的启示

现阶段珠三角臭氧及 $PM_{2.5}$ 污染防治工作主要围绕地级市层面开展，由于地市内部区县间污染物浓度存在明显差异，存在同一个地级市的区县间污染物浓度在不同目标区间，容易导致地市污染物浓度改善状况不达预期目标效果。可以借鉴美国 O_3 防控的经验，将珠三角各地市内部采用跨区域管理模式，尝试以打破行政区划来管理的方式，划分空气质量达标与非达标区域，针对不同区域提交各自设定的达标目标及实施政策。并要求各地市或分区内部提交污染物减排计划，对已发布的减排规定或政策，成立专门的评估小组，在一定实施阶段后，进行效果评估及意见反馈。

在跨境大气污染协同防控机制体制方面，从调研的三个区域的经验看，较粤港澳的合作机制有以下几点优势：一是都是基于一个合作协议，共同成立一个相对独立的议事监督机构和一套相对固定的运作机制；二是设立了跨境大气环境合作指定的区域型大气环境合作核心支撑机构，从区域利益最大化的角度为区域空气质量改善提供令各方信服的科学决策支撑；三是非常重视跨界大气问题的联合研究及政策评估调控。粤港澳跨界大气协同防控机制可以从以上三点进行突破，包括建立区域性大气问题的权威管理机构、建立客观中立的技术支撑机构、联合开展区域大气问题联合研究等。

（3）对珠三角空气质量地方标准策略制定的启示

环境空气质量标准是环境空气质量管理工作的出发点，旨在保护人体健康和生态环境，具有较强的时效性，需要根据不同阶段的环境空气污染特征和社会经济技术水平的发展适时进行修订。美国和加州都规定每隔一段时间需对空气质量标准进行审查，并根据空气质量的改善状况和大气污染治理的不断深入情况，修订空气质量标准，收严污染物浓度限值、更新污染物浓度的统计方法等。通过不断收严空气质量标准，不仅可以促使本区域空气质量向更低浓度水平改善，国家

空气质量标准的收严可以促使大范围区域空气质量改善，从而使得空气质量相对更优的地区在周边区域空气质量不断改善的背景下可以向更低的浓度目标迈进。

对比美国国家环境空气质量标准和加州环境空气质量标准的修订历程可以看到，加州环境空气质量标准的修订历程中有多次都是领先于美国国家标准收严了对污染物浓度的限值要求。在这种不断地对更严格的空气质量标准的探索中，加州形成了较国家标准更为严格的地方标准体系，空气质量改善取得了突出成效，目前已成为拥有全美最严的政策法规标准和管控措施的地区，成为全美空气质量管理的标杆。

珠三角地区的PM_{2.5}浓度已连续四年稳定达到国家环境空气质量二级标准，在全国已处于标杆地位，但与国际先进水平相比仍有一定差距。随着粤港澳大湾区“宜居宜业宜游的优质生活圈”建设目标的提出，珠三角面临着持续改善区域空气质量的新形势和新要求。珠三角可以考虑以粤港澳大湾区大气污染防治先行示范区的建设为契机和平台，推动局部区域先行先试，参照加州空气质量标准制定的模式，开展制定较国家标准更为严格的区域空气质量标准的探索，促使珠三角区域空气质量持续改善。

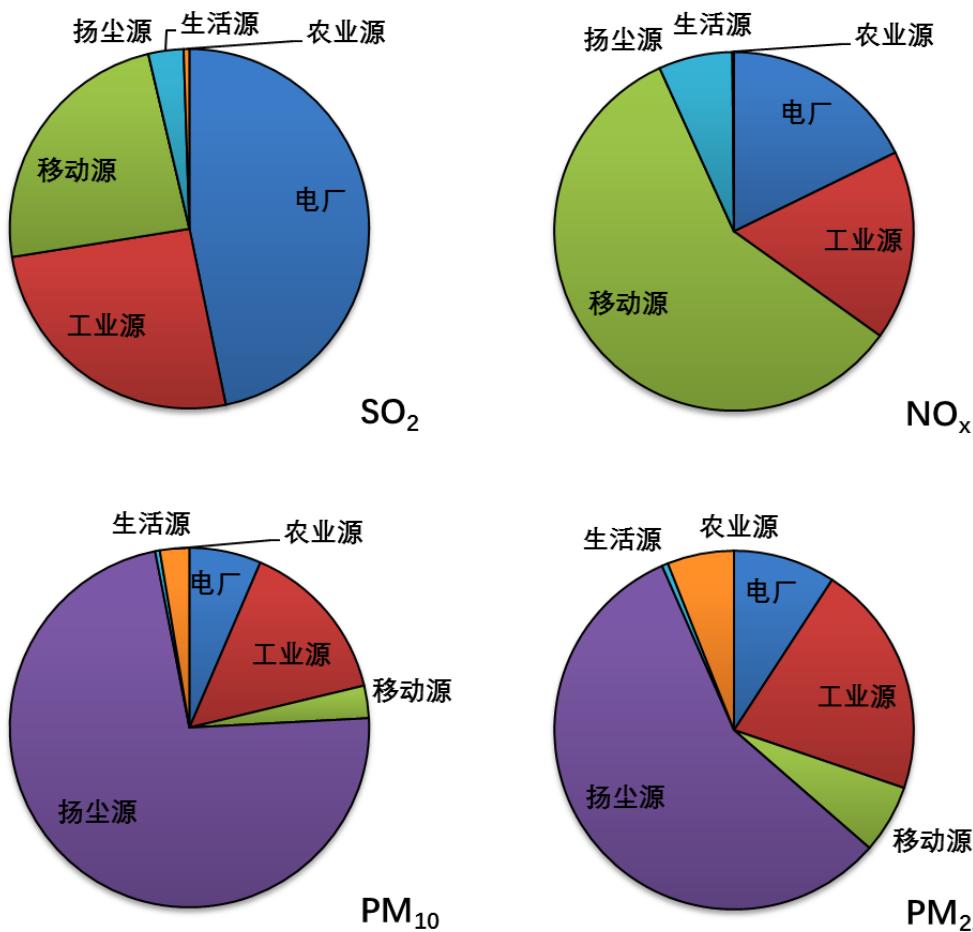
6 珠三角空气质量达到 WHO-III 水平的综合策略情景研究

6.1 珠三角大气污染物排放结构分析

为更有针对性的进行达到 WHO-III 水平的综合策略情景设计，需要对珠三角大气污染物的排放结构现状进行分析，明确珠三角污染物排放的主要来源，污染物排放水平较高的领域和行业将成为未来情景调整的重点。

6.1.1 主要大气污染物排放现状

电厂珠三角 SO_2 排放最主要的贡献源，排放占比接近五成，其次为工业源和移动源，排放占比在 23~26%。 NO_x 的主要排放源为移动源，占比达到 58%，电厂和工业源也有较大贡献，但占比均不足 20%。一次 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的排放结构较为相似，贡献占比最大的均为扬尘源，其次为工业源和电厂。VOCs 排放中工业源的占比达到 80%以上。 NH_3 排放量约 16 万吨，农业源在其中的占比接近八成。



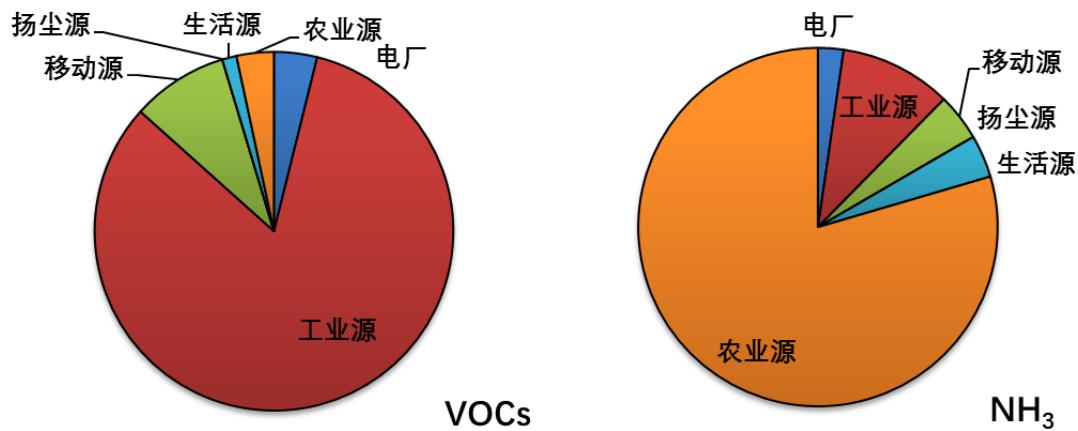


图 6-1 珠三角主要大气污染物排放结构现状

6.1.2 工业制造业排放现状

从上一节分析中可以看到工业制造业是珠三角地区大气污染物的主要来源之一，现有制造业中，大气污染物排放量和排放强度较大的行业，将成为产业结构调整情景研究中，重点关注和进行调整的行业，为此需要对工业制造业的排放现状进行分析。

珠三角主要的 SO₂ 排放行业为非金属矿物制品业、造纸和纸制品业、石油加工业、纺织业、化学原料和化学制品制造业、黑色金属冶炼和压延加工业、食品制造业以及橡胶和塑料制品业，以上 8 个行业的 SO₂ 排放量占工业制造业 SO₂ 排放量的 95%以上；珠三角主要的 NO_x 排放行业为非金属矿物制品业、造纸和纸制品业、纺织业、石油加工业、化学原料和化学制品制造业、黑色金属冶炼和压延加工业、食品制造业以及金属制品业，以上 8 个行业的 NO_x 排放量占工业制造业 NO_x 排放量的 95%以上；珠三角主要 PM 排放行业为非金属矿物制品业、造纸和纸制品业、黑色金属冶炼和压延加工业、纺织业、食品制造业、木材加工及制品业以及化学原料和化学制品制造业，以上 8 个行业的 PM 排放量占工业制造业 PM 排放量的 95%左右。珠三角主要的 VOCs 排放行业为化学原料和化学制品制造业、电子产品制造业、金属制品业、橡胶和塑料制品业、石油加工业、印刷业、交通运输设备制造业以及家具制造业，以上 8 个行业的 VOCs 排放量占工业制造业 VOCs 排放量的 80%左右，其中除电子产品制造业和交通运输设备制造业属于新兴行业。

从以上分析可以看出，构建产业结构调整情景时，大气污染排放量较大传统

行业是需要重点改造升级或转移的对象，而大气污染排放相对较小且对经济贡献较大的新兴行业则是未来需要大力发展的行业。

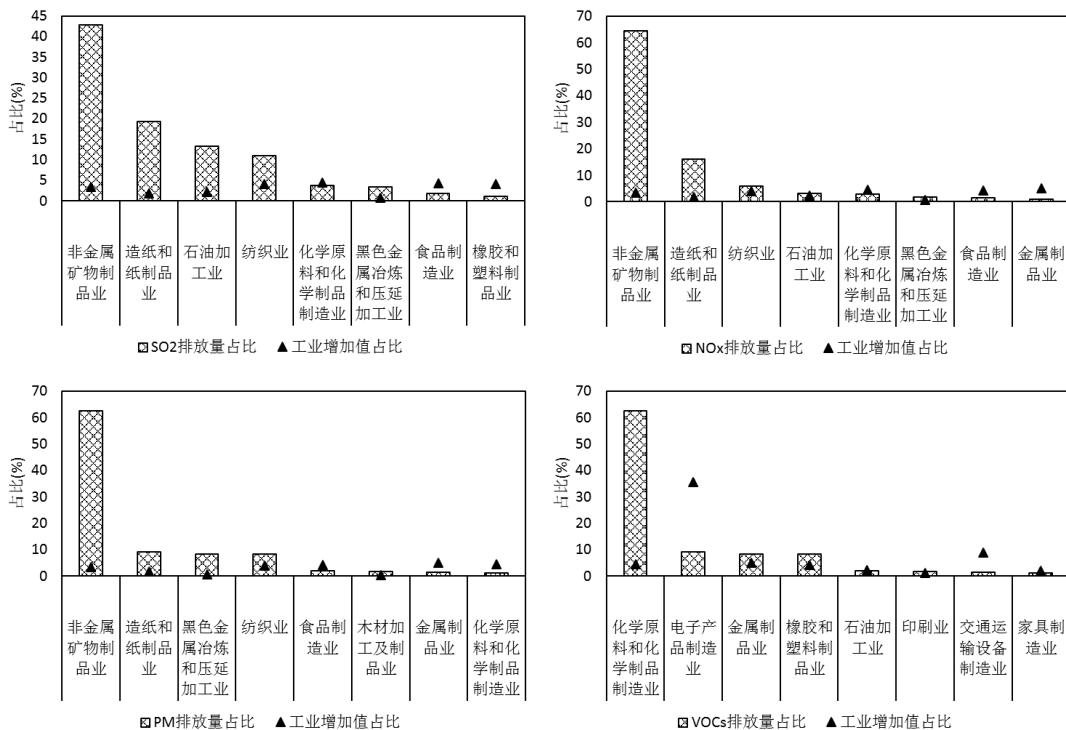


图 6-2 珠三角制造业行业主要大气污染物排放结构现状

6.2 未来经济社会发展形势预测

不同发展阶段对应不同的社会经济发展特征，珠三角空气质量达到 WHO-III 水平的跨区域低排综合情景中，产业、交通和能源情景发展方向应当符合未来社会的经济发展特征。目前，国家的发展规划以及各类研究机构已对中国未来的经济社会发展形势有了一定判断；随着《粤港澳大湾区发展规划纲要》的出台，国家对广东省和珠三角区域的发展定位也更加明确。为使本研究的情景构建更为合理、科学，需要基于现有规划和研究对广东省、珠三角社会经济发展的总体判断，明确珠三角在宏观经济、人口及城镇化等方面关键参数，作为情景构建的重要约束和参考。

6.2.1 经济发展形势预测

从珠三角和广东省历史经济发展的走势看，近五年珠三角地区生产总值占全省比重逐年提高（图 6-3），2014-2018 年珠三角经济总量占比累计提高 0.9 个百分点，珠三角与东翼西北经济总量绝对差距呈不断扩大态势。2018 年，珠三角

地区生产总值同比增长 6.9%，高于全省平均水平 0.1 个百分点。从近五年的情况看，珠三角经济运行较为平稳，与非珠三角地区相比，珠三角地区生产总值增速回落幅度较小，仍是全省经济平稳增长的重要基石（图 6- 4）。对比珠三角和广东省人均 GDP 变化情况可以看到，珠三角人均 GDP 水平领先广东省整体 5~6 年左右（图 6- 5）。

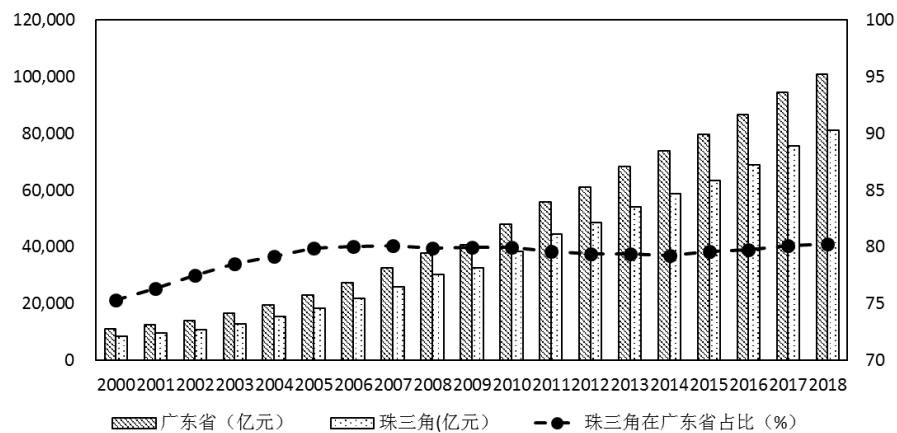


图 6-3 2000-2018 年珠三角和广东省地区生产总值变化情况

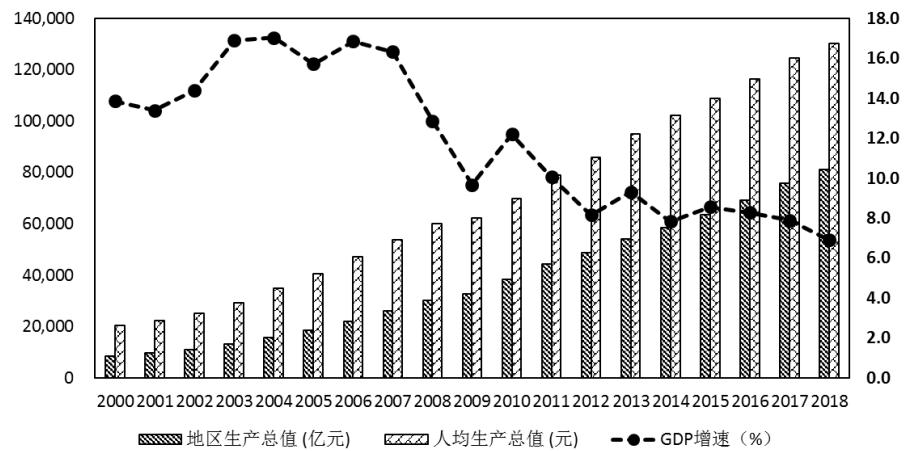


图 6-4 2000-2018 年珠三角地区生产总值、人均生产总值和 GDP 增速变化情况

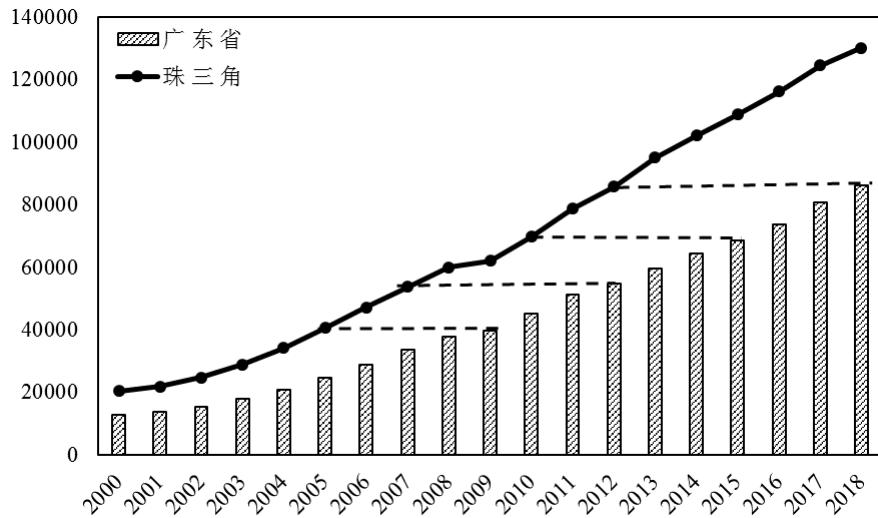


图 6-5 2000-2018 年珠三角和广东省人均生产总值对比变化情况

预计中长期，随着全国经济进入新常态，世界经济缓慢复苏，可预期珠三角地区占广东省经济总量的比重将继续缓慢提升，未来珠三角地区将为广东省和粤港澳大湾区经济的整体增长提供更大发展潜力。广东省社科院的研究表明，随着广东资本存量增长率的下降，2025 年以前广东 GDP 的增长率将逐年下降，2025 年以后稳定在 6%左右，预计广东省 GDP 将在 2035 年达到 26.2 万亿元左右，人均 GDP 达到 20 万元左右。按照珠三角与广东省经济发展的历史规律，结合各地市城市总体规划的目标预测，到 2035 年珠三角 GDP 将达到 23.5 万亿元左右，人均 GDP 将达到 28 万元左右。

6.2.2 人口及城镇化发展形势预测

2000-2018 年珠三角地区人口总量保持稳定增长。珠三角作为广东省经济社会发展的主要核心区，2018 年末珠三角常住人口为 6300 万人，占全省人口总量的 56%；珠三角九市中，广州、深圳两个超级大城市 2018 年的人口分别比 2017 年净增 41 万人和 50 万人，两市常住人口增幅占同期全省以及珠三角地区常住人口增量的 51% 和 60%，珠三角城市群人口集聚度进一步加大。已有研究表明，广东省人口将逐步进入缓增期，并早于全国 5 年，在 2025 年前后达到人口峰值（《国家人口发展规划（2016-2030 年）》，国务院），而随着粤港澳大湾区建设的不断推进，珠三角在新增人口潜力、就业空间、人口吸引力等方面仍具备较强优势，珠三角地区将略早于广东省达到人口规模峰值。综合参考广东省社科院对全省人口的预测以及各地市城市总体规划对人口发展的规划目标，预计到 2035

年，珠三角地区人口将在 7700~8000 万人左右。

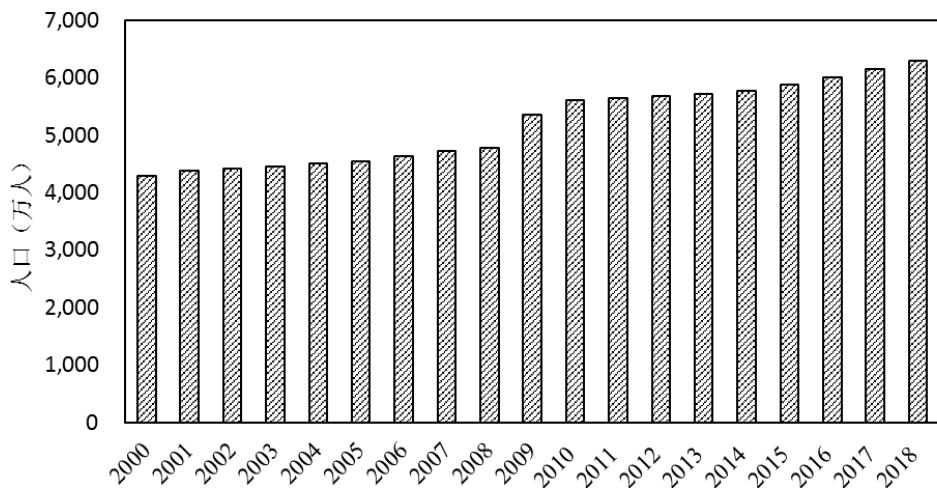


图 6-6 2000-2018 年珠三角年末常住人口变化情况

根据穆利甘提出的相关理论 (Mulligan, 2013)，城镇人口的增长即城镇化发展基本符合“S”型曲线，即可将城镇化发展分为三个阶段：在人口城镇化水平较低，一般认为在 30% 以下时为城镇化发展萌芽阶段，人口城镇化率增长较为平稳；人口城镇化率在 30%-70% 左右为城镇化加速发展阶段，人口城镇化率快速增长；当人口城镇化水平超过 70% 后进入城镇化发展平稳阶段，人口城镇化率增速放缓，稳步提升。2018 年珠三角区域的常住人口城镇化率为 86%，珠三角 9 市中肇庆、江门、惠州常住人口城镇化率较低，仍处于城镇化加速发展阶段，广州、东莞、佛山、中山、珠海已基本达到 85% 以上，处于城镇化平稳发展阶段，深圳达到 100%。综合考虑珠三角 9 市城镇化水平所处阶段和各地市城市总体发展规划对城镇化水平提升的预期，预计到 2035 年，珠三角地区城镇化率将达到 90% 以上。

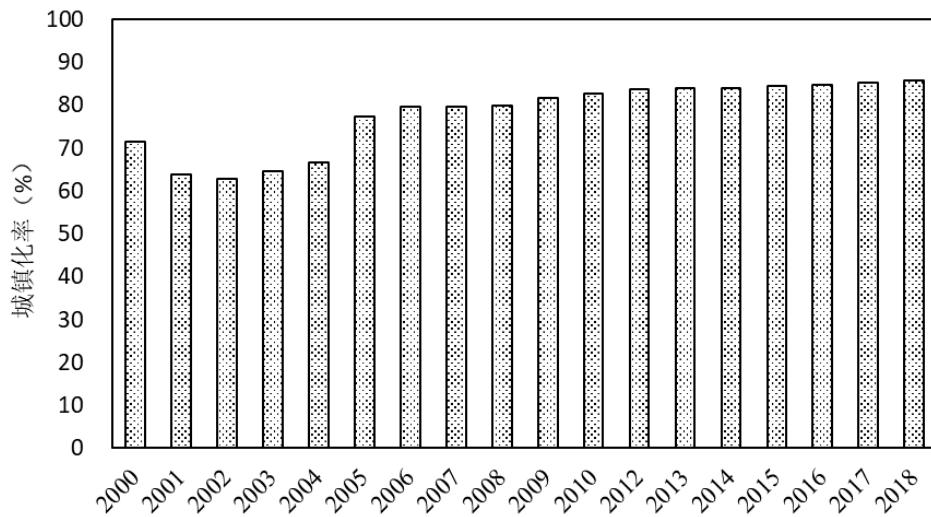


图 6-7 2000-2018 年珠三角常住人口城镇化率变化情况

6.3 未来产业发展定位及结构调整情景

6.3.1 产业结构现状

(1) 三次产业结构

1990 年珠三角地区的三次产业结构比例为 15.3:43.9:40.9, 2017 年调整为 1.6:41.7:56.8, 由原来的“二三一”结构变为“三二一”。近三十年间, 珠三角地区第一产业的比重持续降低; 2000-2006 年第二产业的比重仍呈逐步提升态势, 2006 年比重达致 51.6%, 其后比重逐步降低; 2009 年, 第二产业比重回落至 50%, 而第三产业的比重首次超过第二产业, 其后该比重一直在 49% 以上稳步增加, 经济增长由工业拉动向服务业拉动转变, 呈现“三二一”的产业格局。2017 年珠三角 9 个地市中, 广州、深圳、珠海和东莞已实现产业结构“退二进三”, 珠三角地区整体经济发展正在迈入后工业化阶段, 已初步形成以高新技术产业和服务业为主导产业的现代产业体系。

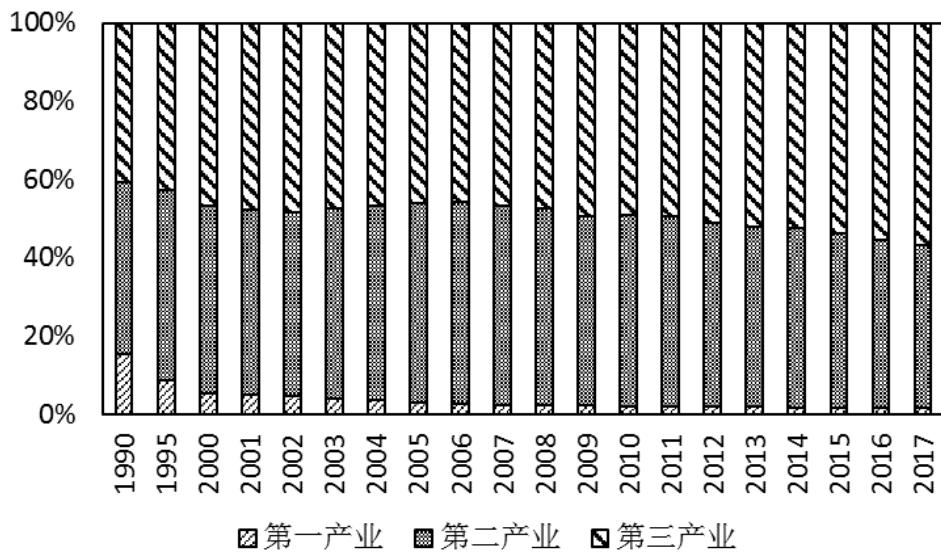


图 6-8 珠三角地区产业结构年际变化

(2) 工业内部结构

珠三角的第二产业以工业为主，工业生产活动所带来的污染物排放也是珠三角空气污染的重要来源，因此有必要对工业内部的结构特征做进一步分析。近二十年来，珠三角地区工业总量连年攀升，规模以上工业总产值连上新台阶，从2000年的1.1万亿元跃升为2017年的11.3万亿元；规上工业增加值持续增加，但增速逐步放缓，2017年规上工业增加值达2.6万亿元，是2000年的9倍。同时，珠三角地区工业内部结构得到不断优化，先进制造业¹⁴和高技术产业¹⁵的发展推动工业结构向适度重型化方向调整，增强了工业经济的整体竞争力。2017年珠三角规模以上高技术制造业增加值9053亿元，占规模以上工业增加值的35%；先进制造业增加值15101亿元，占规模以上工业增加值的59%。

¹⁴ 包括高端电子信息制造业、先进装备制造业、石油化工产业、先进轻纺制造业、新材料制造业、生物医药及高性能医疗器械

¹⁵ 包括医药制造业、电子及通信设备制造业、信息化学品制造业、航空航天制造业、医疗设备及仪器仪表

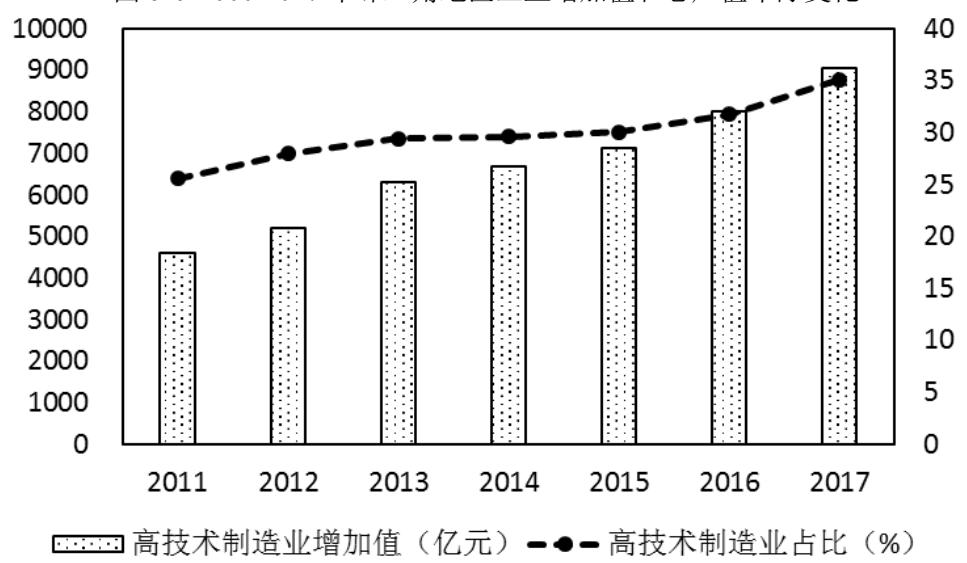
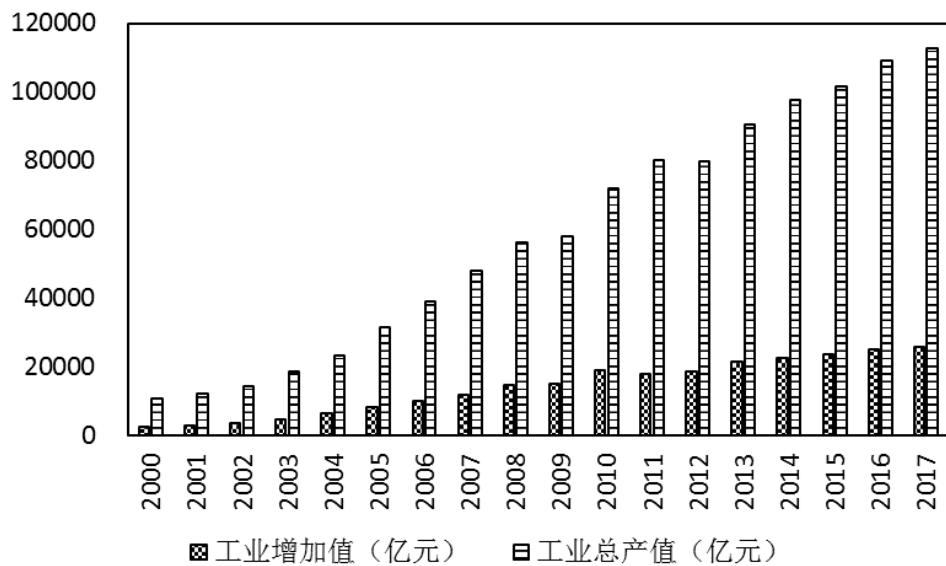


图 6-11 2000-2017 年珠三角地区工业增加值和总产值年际变化

珠三角地区从各行业增加值对规模以上工业增加值的贡献看,目前珠三角地区三大主导行业为计算机、通信和其他电子设备制造业、电气机械和器材制造业、汽车制造业,行业增加值占规模以上工业增加值的占比分别为 31%、11% 和 7%;而纺织服装业、食品饮料业、家具制造业、非金属矿物制造业等优势传统行业的增加值占比均不足 3%。

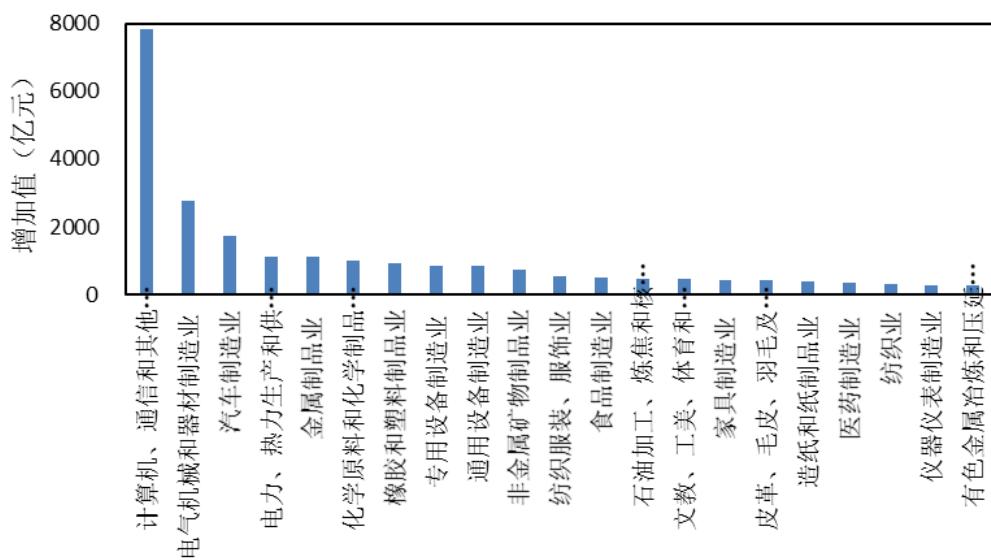


图 6-12 2017 年珠三角各行业增加值

为进一步分析珠三角各市制造业结构的具体变化,参考丁俊和王开泳(2017)的分析方法,计算了珠三角各市 2007-2017 年制造业行业的增长差异,并将行业增加值增长速度快于工业增加值增长速度的定义为增长行业,反之则为衰减行业。从珠三角整体的制造业行业增长变化来看,2007-2017 年间工业增加值比重增加最多的前几位分别是计算机、通信和其他电子设备制造业、通用设备制造业和专用设备制造业,主要是电子信息、高技术产业和先进制造业;而工业增加值比重衰减最多的前几位分别为化学原料及化学制品制造业、石油和天然气开采业、纺织业。从这部分分析同样可以看出,近十年间珠三角的制造业产业结构整体有所优化,并向高级化方向演进,而部分高耗能高污染排放的传统优势行业衰退较为严重。

6.3.2 现行政策导向下未来产业发展定位

与国际先进湾区相比,珠三角的产业结构仍有很大提升空间。从三大湾区的

历史产业结构变迁看,三产业在三大湾区占比均呈现逐年上升趋势,至2017年,三大湾区第三产业的比重均超过80%;从第二和第三产业的比重看,现阶段珠三角的产业结构相当于三大湾区1960年代的水平。从其它发达国家的情况看,世界主要发达国家在经历产业结构调整后进入稳定阶段(第三产业的占比在70~80%的范围)之前,普遍都经历了十五年以上的时间。

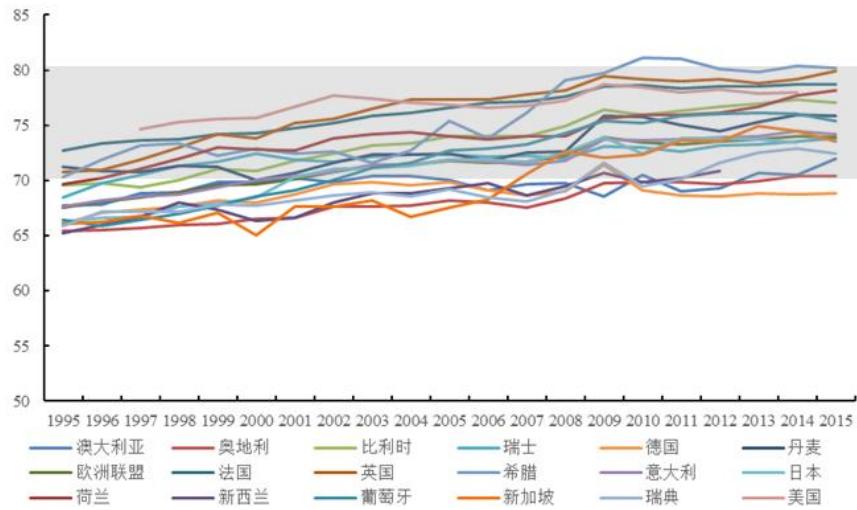


图 6-13 1995-2015 年世界主要发达国家第三产业占比 (%)

已出台的规划方案中,对珠三角未来的产业发展方向也有了一定目标和定位。2017年12月底,广东省政府印发了《广东省沿海经济带综合发展规划(2017-2030)》,提出了珠三角将打造“三带一区”的产业布局。2019年2月,国务院印发了《粤港澳大湾区发展规划纲要》,进一步明确珠三角将继续按“三带一区”的产业布局发展(图6-14),即珠江东岸高端电子信息制造产业带、珠江西岸先进装备制造产业带、沿海石油化工及新材料制造产业带以及环珠江口先进轻纺制造及生物医药产业集聚区。此外,纲要文件中还明确了香港、澳门、广州、深圳四大中心城市作为区域发展的核心引擎,增强对周边区域发展的辐射带动作用,根据四大中心城市的发展,其它城市发展定位也各不相同,但与早期规划基本保持一致(表6-1)。

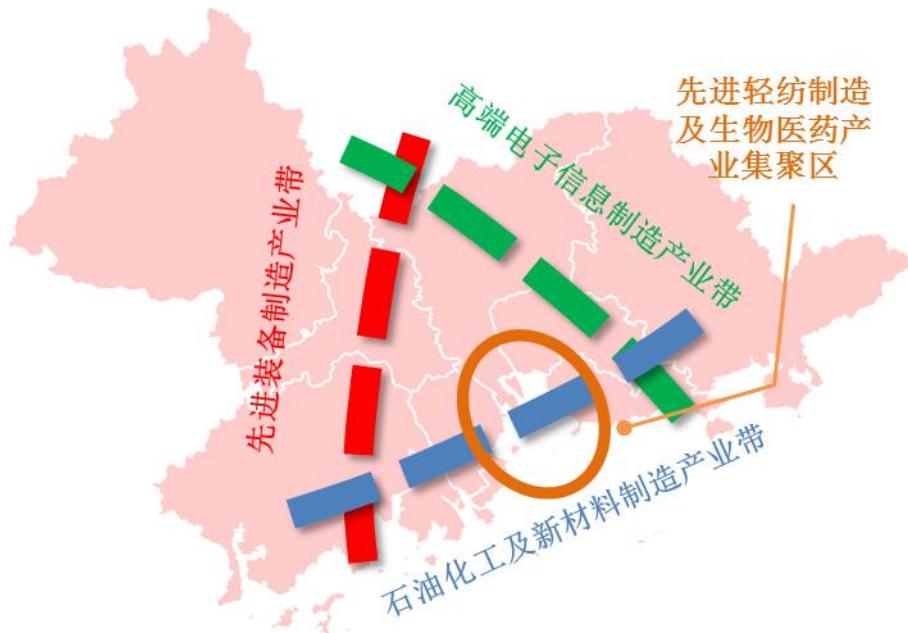


图 6-14 珠三角产业规划布局示意图

表 6-1 已出台规划对珠三角 9 市的发展定位

城市	2008 年出台	2017 年出台	2019 年出台
	《珠江三角洲城镇规划一体化发展规划（2009-2020）》	《广东省沿海经济带综合发展规划（2017-2030）》	《粤港澳大湾区发展规划纲要》
广州	国际产业服务中心	国家中心城市、综合性门户城市、国家创新中心城市、国际性综合交通枢纽、21 世纪海上丝绸之路战略支点	国家中心城市、综合性门户城市、国际商贸中心、综合交通枢纽、科技教育文化中心
深圳	国际产业创新中心	全国经济中心城市、国家创新型城市、国家科技和产业创新中心、21 世纪海上丝绸之路战略支点	中心城市、经济特区、全国性经济中心城市和国家创新型城市
珠海	国际重大装备制造业中心	国际化创新型城市、21 世纪海上丝绸之路战略支点、生态文明新特区	
江门	国家级先进制造业基地	珠江西岸先进装备制造产业基地和综合交通枢纽、全国小微企业创业创新示范市	重要节点城市：特色鲜明、功能互补、具有竞争力
中山	国家级先进制造业基地	世界级现代装备制造业基地、连接珠江两岸和粤西地区的枢纽	
佛山	国际产业制造中心	中国制造业一线城市、珠江西岸先进装备制造业龙头城市	
东莞	国际产业制造中心	国际制造业名城、珠三角创新创业基地	
惠州	世界级石化产业基地	电子信息产业和世界级石化产业基地、	

		国家海洋生态文明建设示范区	
肇庆	传统产业转型升级集聚区 和重大装备制造配套基地		

《粤港澳大湾区构建现代化产业体系规划（2018-2035 年）》（征求意见稿）中提出，要“加快构建以创新为战略支撑、先进制造业为主体，现代金融、人力资源相配套的现代产业体系”，“到 2022 年，战略性新兴产业在现代产业体系中的战略地位显著增强，先进制造业、现代服务业的贡献大幅上升”，“到 2035 年，大湾区现代产业体系全面建成，成为全球重要的先进制造业和现代服务业基地”。同时也指出，大湾区现代产业体系建设要“把发展战略性新兴产业作为推动经济高质量发展的突破口，在战略性新兴产业重点发展领域实现跨越发展”。规划中提到的战略性新兴产业包括：新一代信息技术、高端装备制造业、生物医药产业、新材料产业、节能环保产业、数字创意、新能源产业、新能源汽车产业和卫星及应用产业。九大战略性新兴产业中大部分均为制造业，结合规划对粤港澳大湾区现代产业体系的发展目标，可以推断，2035 年前，制造业特别是先进制造业仍将在珠三角乃至粤港澳大湾区占据重要位置。

综合以上分析，可以预测，2035 年前，珠三角地区的第三产业比重仍将进一步提升，同时先进制造业将在珠三角的产业体系中占据重要位置。这一方面是因为第三产业是随着第一、二产业发展而发展的产业，很难孤立超前发展，对于农业、建筑业和采矿业比重不大的珠三角而言，未来一段时间仍将继续以制造业作为第三产业发展的基石；另一方面，已出台的规划政策已明确珠三角现代产业体系中要以发展战略性新兴产业作为重要的突破口。

6.3.3 产业结构调整情景分析

结合上述珠三角产业结构现状、历史发展趋势、排放结构现状以及现行政策导向下未来产业发展定位，在产业结构调整情景构建时，将现有行业分为新兴行业和传统行业两大类进行考虑，其中新兴行业在目前的制造业结构中排放占比较少而经济贡献较高，包括医药制造业、通用设备制造业、专用设备制造业、汽车制造业、电气机械和器材制造业、铁路、船舶、航空航天和其他运输设备制造业、计算机、通信和其他电子设备制造业；传统行业在目前的制造业结构中排放占比

较高而经济贡献相对较低,包括非金属矿物制品业、化学原料和制品业、纺织业、石油加工业、造纸和纸制品业、金属制品业、黑色金属压延和加工业、橡胶和塑料制品业、食品制造业、家具制造业、印刷业等。

依据上述分析,可以基本明确珠三角产业结构调整的发展情景将遵循的几个原则: (1) 第三产业的比重将继续提升,但制造业尤其是先进制造业在珠三角的产业结构中仍将占据重要地位; (2) 珠三角将以新兴行业为重点打造“三带一区”的产业布局; 3) 传统行业是产业调整升级的重点领域。在上述原则下,分别考虑不同情景下,各行业未来发展速度和规模的差异,构建未来产业结构升级调整的三种情景: 基准情景、调整情景和强化调整情景。其中,基准情景是基于珠三角产业发展的历史趋势和已出台规划的发展目标,即既定政策情景; 调整情景,在基准情景的基础上,基于空气质量改善目标和措施策略的可行性,适度加快了产业结构的调整步伐,提升新兴行业的发展速度、加快传统行业中落后产能的淘汰; 强化调整情景是为加快珠三角空气质量改善,基本淘汰在目前产业结构中有重要经济贡献但大气污染相对较重的传统行业,以排放相对洁净的新兴行业作为社会经济发展的主要支柱。

表 6-2 未来产业结构升级调整的三种情景

情景名称	第三产业占比	新兴行业	传统行业
基准情景	按历史趋势发展	新兴行业增加值增速按各地市产业规划设计	钢铁、原油加工、乙烯生产、造纸、水泥、平板玻璃、除特种陶瓷以外的陶瓷、有色金属冶炼行业不再新增国家规划外的产能,其它传统行业按历史趋势发展
调整情景	较基准情景提升 5 个百分点左右	新兴行业加速发展,在工业中的占比提升至 80%以上,行业增加值增速参考各地市产业发展规划,增速高于基准情景	传统行业落后产能大幅淘汰,除作为传统行业重点建设基地的城市外,其它城市的传统行业逐步退出
强化调整情景	较调整情景提升 5 个百分点左右	新兴行业发展速度进一步加快,在工业中的占比提升至 95%以上,各城市产业均以新兴产业为主导,增加值增速高于调整情景	加快推动传统行业的退出,除个别工艺先进、节能环保水平高的优质企业外,传统行业基本从珠三角退出

6.4 城市交通运输结构及运作模式的调整情景

从货运结构、城际客运结构、城市内居民出行结构三个方面对珠三角地区交通运输结构进行全面分析和评价,通过模型计算、国际经验借鉴、规划文本参考

等方式对未来交通需求进行预测，综合交通运输历史变化趋势、未来规划、国外发达国家和地区发展经验，在能源消费约束和空气质量达到 WHO-III 水平目标约束下，提出未来珠三角地区可能的交通运输结构及运作模式的革新情景。

6.4.1 珠三角地区交通运输结构现状评价

（1）运输结构现状

a. 货物运输现状

2005-2017 年珠三角地区货运量及货物周转量年际变化分别如图 6- 15 和图 6- 16 所示，货运量总体呈持续增长趋势，年均增长率为 9.2%，货运量增速从 2015 年开始有所减缓。2017 年珠三角地区货运量高达 27.9 亿吨，较上年增加 1.9 亿吨，增幅 7.4%。货物周转量自 2010 年后呈上升趋势，年平均增长率达 16.4%，2016 年和 2017 年更有显著增长，增长幅度高达 30% 以上。2017 年货物周转量高达 2.6 万亿吨公里，较上年增加 0.6 万亿吨公里。

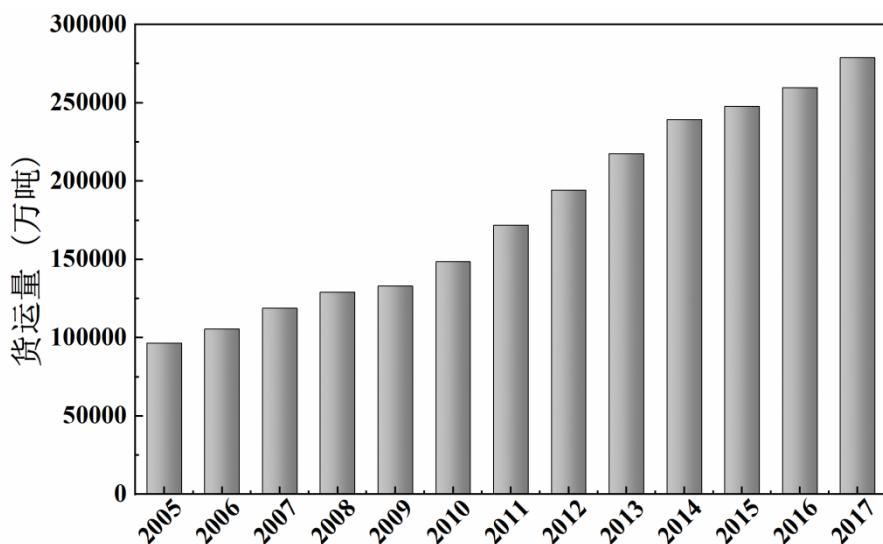


图 6- 15 珠三角地区货运量年际变化

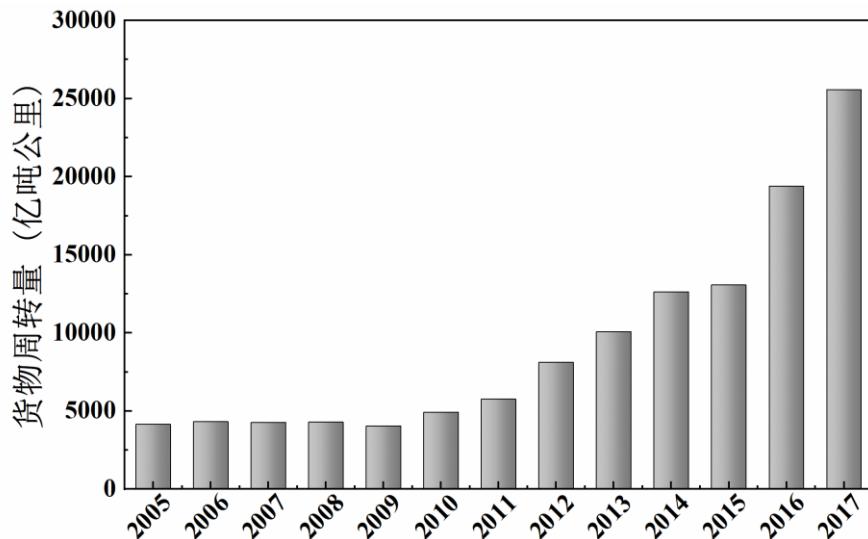


图 6- 16 珠三角地区货物周转量年际变化

2005-2017 年珠三角地区货物运输结构的年际变化如图 6- 17 所示，珠三角地区货物运输结构年际变化较小，各年货物运输以公路运输为主，占比达 65% 以上。近年来，珠三角地区以铁路方式运输货物的占比呈下降趋势，以水路方式运输货物的占比略微上升。2017 年，珠三角货物运输中公路运输占 68.6%，水路运输 28.4%，铁路占 2.2%，管道占 0.7%，民航占 0.1%。除惠州市外，各地市货物运输结构差异较小，公路运输均占其中绝大部分，惠州市的货物运输结构则以水路运输为主。

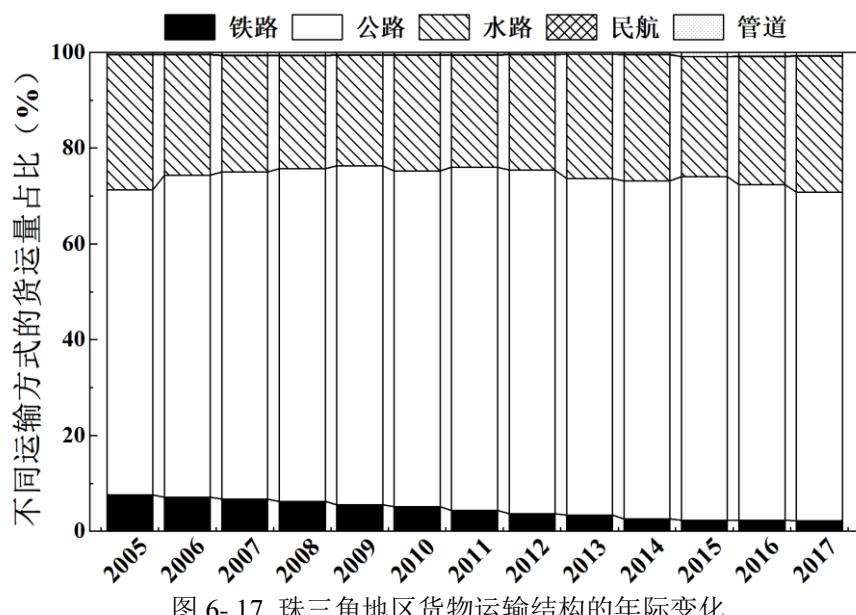


图 6- 17 珠三角地区货物运输结构的年际变化

b. 旅客运输现状

2005-2017 年珠三角地区客运量及旅客周转量年际变化分别如图 6- 18 和图

6- 19 所示, 客运量自 2009 年后呈上升趋势, 年均增长率为 6.7%, 2015 年后客运增长开始有所减缓。2017 年珠三角地区客运量高达 10.4 亿人次, 较上年增加 0.4 亿人次, 增幅 4.0%。旅客周转量呈稳步增长趋势, 年平均增长率达 10.2%, 旅客周转量增速从 2015 年开始有所减缓。2017 年旅客周转量高达 3845.7 亿人公里, 较上年增加 245.7 亿人公里。

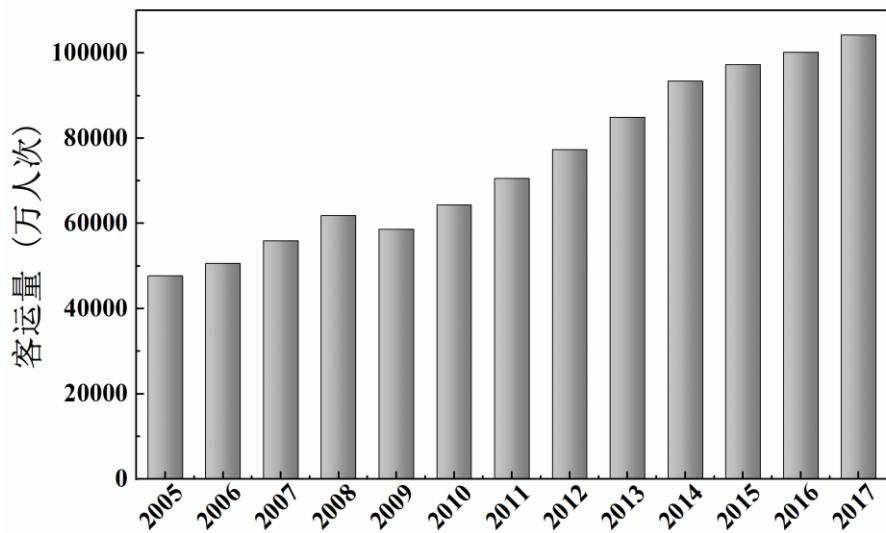


图 6- 18 珠三角地区客运量年际变化

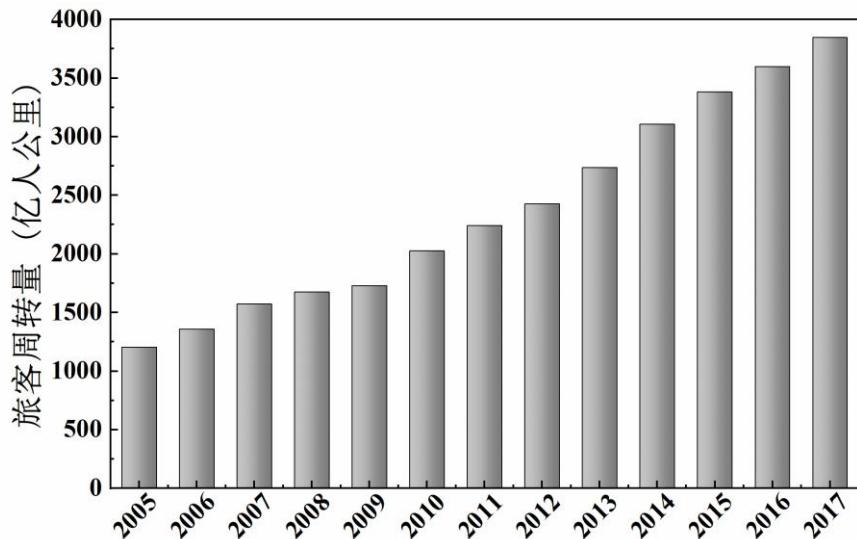


图 6- 19 珠三角地区旅客周转量年际变化

2005-2017 年珠三角地区旅客运输结构的年际变化如图 6- 20 所示, 珠三角地区旅客运输结构年际变化较小, 各年旅客运输以公路运输方式为主, 占比达 60% 以上。近年来, 珠三角地区客运结构中公路运输的占比呈下降趋势, 铁路运输的占比呈上升趋势。2017 年, 珠三角旅客运输中公路运输占 61.5%, 铁路占

24.3%，民航占12.4%，水路运输占1.8%。除深圳市外，各地市旅客运输结构差异较小，均以公路运输为主。

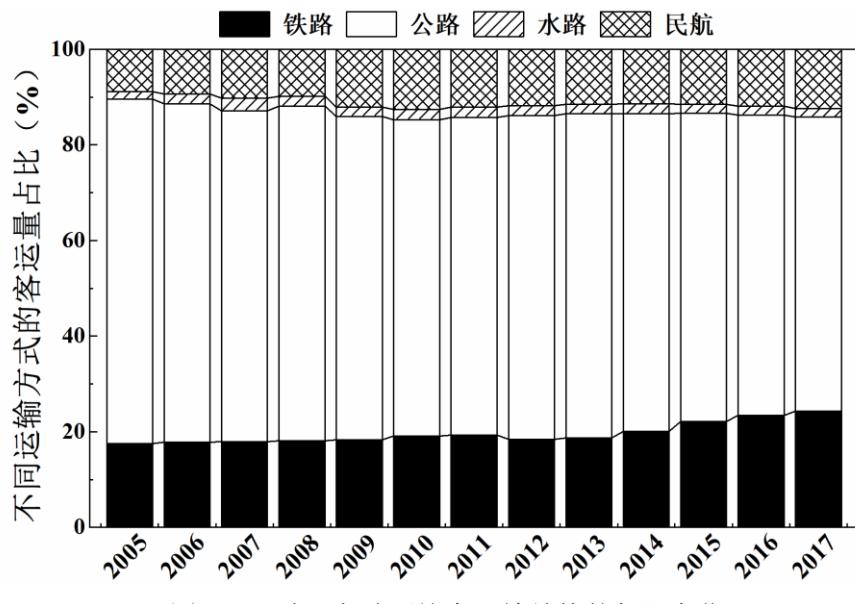


图 6-20 珠三角地区旅客运输结构的年际变化

c. 城市居民机动车化出行组成现状

珠三角地区城市居民机动车化出行情况如图 6-21 所示，珠三角地区日均机动车出行量约 7100 万人次，广州、深圳和佛山市日均机动车出行量显著高于其它地市，反映了城市人口及经济发展是影响居民机动车化出行的重要因素。各地市居民机动车化出行率较为接近，基本达 45%以上。

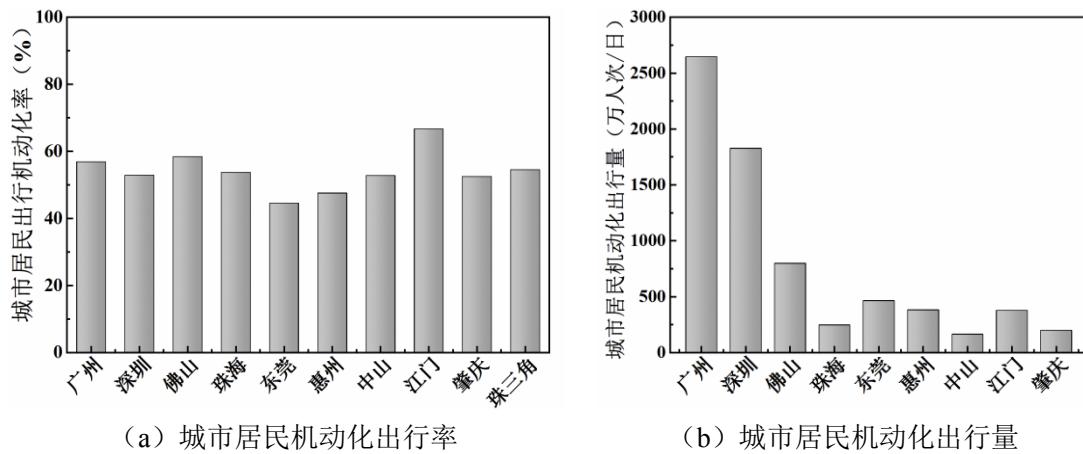


图 6-21 珠三角地区居民机动车化出行情况

珠三角地区城市居民机动车化出行结构如图 6-22 所示，珠三角地区居民机动车化出行以小汽车为主，日均出行量超过 3000 万人次，占比高达 40%以上；公交车占 23%，轨道交通占 17%，出租车占 5%，而摩托车出行量不容忽视，占比达

12%。珠三角地区公共交通机动化出行率为 45%，公共交通出行量仍有待提高。

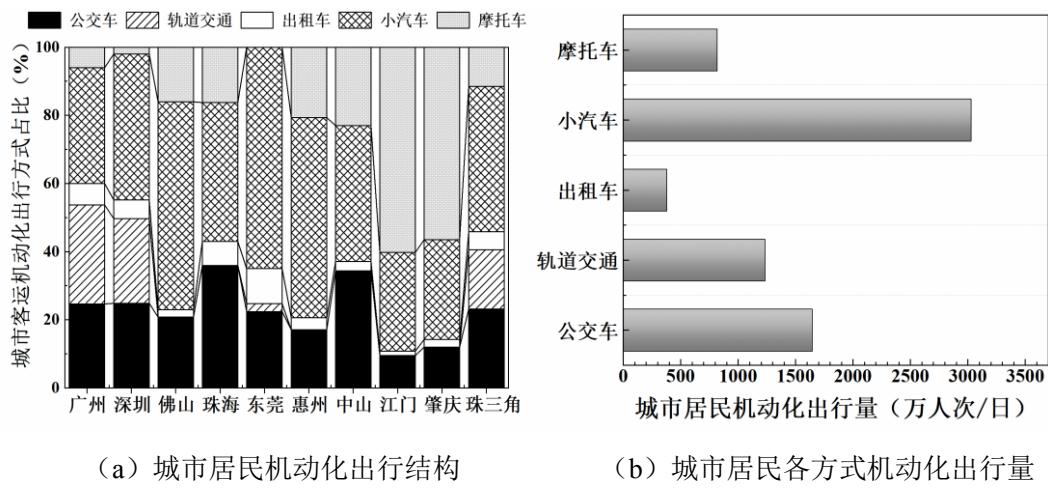


图 6-22 珠三角地区居民机动化出行结构

(2) 运输工具组成现状

就目前珠三角地区运输结构来看，近年来客货运输均以公路运输为主，占比都在 60%以上，运输工具主要为载货汽车和大型载客汽车，城市居民机动化出行也以私人小汽车为主，为此，交通工具主要以机动车为重点进行介绍，统计分析其保有量组成、排放标准组成以及燃料类型和燃料清洁化水平。

2005-2017 年珠三角地区机动车保有量情况如图 6- 23 所示，机动车保有量自 2007 年后呈持续增长趋势，年均增长率约 7.1%，2017 年珠三角地区机动车保有量达 1873.3 万辆，较上年增加 183.8 万辆。载客汽车保有量呈显著增长趋势，年均增长率高达 16.5%，2017 年载客汽车保有量增至 1280.2 万辆，较上年增加 121.3 万辆，占机动车总增量的 66.0%。载货汽车保有量呈平稳增长趋势，年均增长率为 4.2%，2017 年载货汽车保有量 142.3 万辆。摩托车保有量总体呈下降趋势，年均减少 2.0%，2017 年摩托车保有量 446.1 万辆，较 2016 年有反增情况，增加了 51.5 万辆。

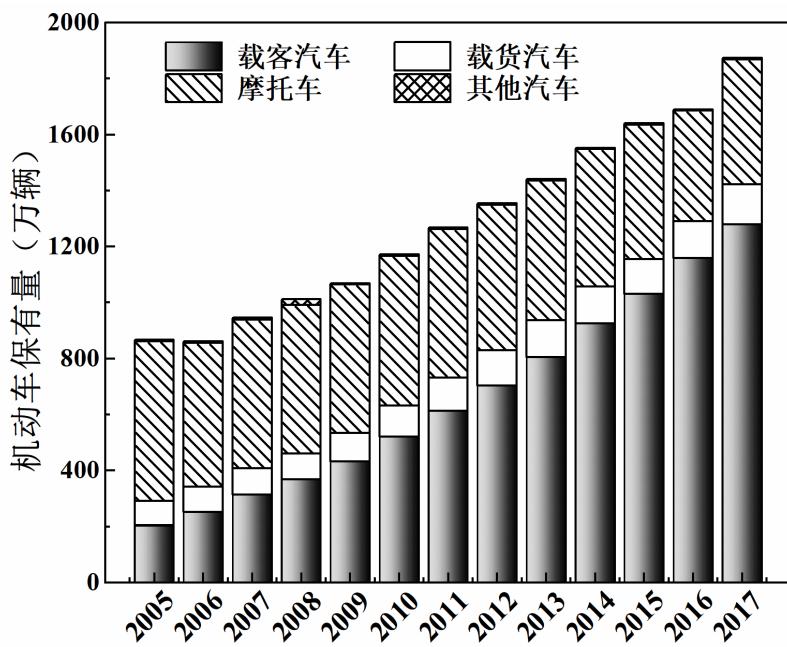


图 6-23 珠三角地区历年机动车保有量情况

2017 年珠三角地区机动车保有量的车型构成如图 6-24 所示, 其中小型客车占比最高, 达 72.0%; 摩托车次之, 占 18.6%; 公交车仅占 0.2%。珠三角各地市中, 除江门市和肇庆市以外, 其余 7 个地市微型和小型客车的占比均达 60%以上, 江门市及肇庆市占比最高的是摩托车。

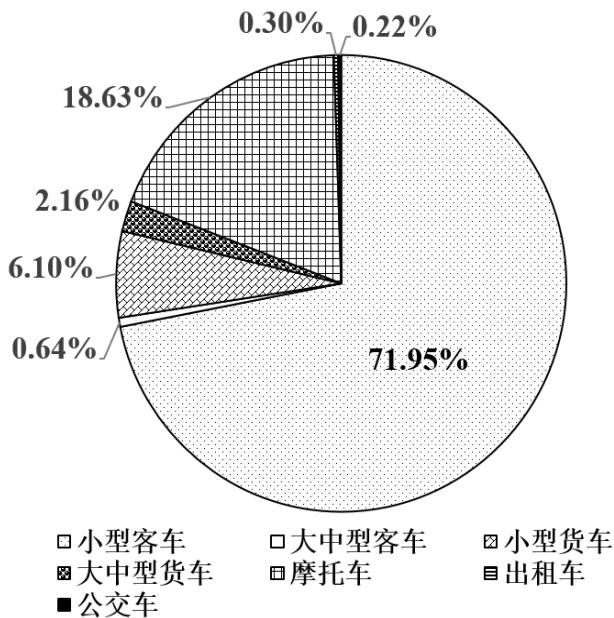


图 6-24 2017 年珠三角地区机动车保有量的车型构成

2017 年珠三角地区按排放标准阶段划分的机动车保有量构成如图 6-25 所示, 国 IV 和国 V 标准占珠三角地区机动车的主要部分, 占比均达 30%以上; 国 III

前机动车保有量仍达 10%以上。对于各地市，江门、肇庆市与其余地市机动车各排放标准的保有量构成差异大，以国 III 标准为主要组成部分，占比超过一半。

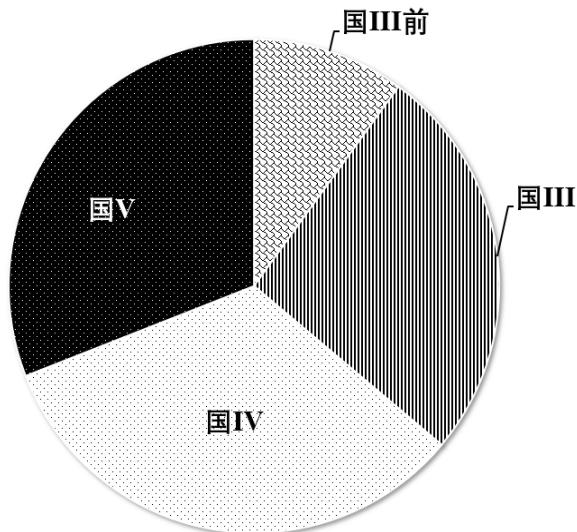


图 6-25 按排放标准阶段划分的珠三角地区机动车保有量构成

2017 年珠三角地区机动车燃料类型分布如图 6-26 所示，小型客车和出租车以汽油为主，占 90%以上；载货汽车的柴油车辆占绝大部分，占 70%以上；公交车则以清洁燃料车辆为主，占比超过 50%以上，柴油车辆次之。

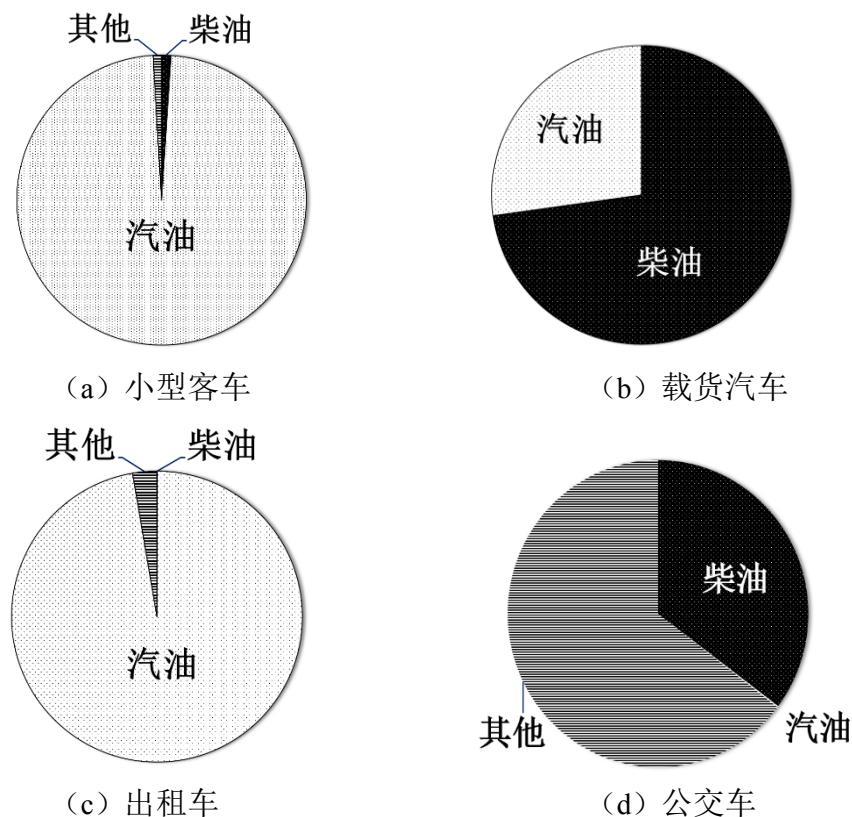


图 6-26 按燃料类型划分的机动车保有量构成

6.4.2 珠三角地区交通需求预测分析

对于珠三角地区交通需求的预测分析，结合经济、人口、城镇化率等发展情况，综合利用弹性系数法、多元线性回归法和 Logistic 模型对未来年的客货运量、客货运输周转量及机动车保有量进行预测，该组合方法能较好对短期未来年进行预测。结合实际意义，各种交通需求会受到能源、产业、环境等客观条件的制约，因此基于上述预测结果，进一步采用国际经验借鉴法、趋势外推法以及相关规划文件，对中长期下各种交通需求的膨胀增长进行限制，以得到中长期情景下更为合理的预测值。由于缺乏城市居民出行的历年数据，主要参考区域有关规划文本数据并借鉴国外发达国家和地区的发展经验进行未来年城市居民机动化出行人次的预测。

（1）货运交通需求预测方法及结果

基于珠三角地区 2005-2017 年货物运输的历史发展趋势，综合弹性系数法、多元线性回归法、趋势外推法的方法，考虑货运需求增长与国民经济增长率的相关关系，结合人均 GDP、人口以及城镇化率等指标，组合预测得到货运需求变化曲线，该方法较单个预测模型具有更强的稳定性，在一定程度上更适应未来预测环境变化的能力（杨新渥,2019）。进一步结合相关规划文件，通过趋势外推法调整上述组合预测方法所得到的货运需求预测值。2035 年，珠三角地区货运量和货物周转量分别达 55 亿吨和 6 万亿吨公里，均较 2017 年增长了 90%以上。

（2）客运交通需求预测方法及结果

珠三角地区 GDP 与客运量、客运周转量存在非线性回归，通过对比分析发现，利用 Logistic 函数预测客运需求更为有效。结合实际意义，客运量及周转量不可能无限膨胀发展，会受到经济、交通、人口、能源、环境等客观条件的制约（李晓晖,2014），因此可选择 Logistic 函数进行回归分析与调整。综合 Logistic 模型、弹性系数法、多元线性回归法的方法，预测珠三角地区客运量与旅客周转量，到 2035 年，珠三角地区客运量和旅客周转量分别达 23 亿人次和 10800 亿人公里，约较 2017 年增长 1.2 倍和 1.8 倍，2017 至 2035 年的年均增长率分别约为 4% 和 6%。

(3) 城市居民机动化出行需求预测方法及结果

经调查, 2017 年珠三角地区居住人口的日均机动化出行量约 7103 万人次, 结合国际发达城市人均机动化出行率的发展和未来年珠三角地区常住人口的预测结果, 参考珠三角各地市相关交通规划资料, 珠三角地区居民机动化出行会继续保持增长趋势。通过规划文本及数据分析, 可由各地市城市交通、经济、人口等的发展规模确定相应地市居民机动化出行量的增长情况, 得到珠三角区域未来年的居民机动化出行总需求。

为此, 本研究通过参考珠三角各地市相关交通规划资料确定增长情况, 结合国际发达城市人均机动化出行率的发展和未来年珠三角地区常住人口的预测结果, 得到居民机动化出行量。据预测, 到 2035 年珠三角地区居民机动化出行量约达到 11000 万人次。

(4) 民用汽车保有量预测方法及结果

根据《广东省国土规划(2016-2035 年)》(广东省国土资源厅,2018), 2035 年广东省人均 GDP 将达到发达国家水平。城市居民千人机动车保有量均与社会经济的发展有很大联系, 可参照国际大城市经验, 确定珠三角地区在未来年的发展情况。

机动车保有量的发展大致可以分为三个阶段: 快速增长期, 如中国现状; 缓慢增长期, 当机动车保有量达到一定水平后, 如千人机动车保有量超过 300 辆/千人, 增长速度将降低; 平稳期, 千人机动车保有量增长缓慢或基本保持不变(李瑞敏,2013)。本报告将结合珠三角地区机动车保有量发展趋势以及其他国家和地区机动车保有量的发展情况, 从机动车发展现状的规律出发对未来珠三角地区机动车保有量的发展趋势进行预测分析。

根据目前国际上部分国家或城市机动车保有量的发展状况, 如图 6- 27 和图 6- 28 所示(李瑞敏,2013;戴帅,2015), 未来珠三角地区机动车保有量的发展趋势更符合中保有量发展情况。中保有量发展情况即按照部分城市(如东京、伦敦等城市)的发展趋势, 千人机动车保有量最终达到约 300~400 辆/千人。由于珠三角地区摩托车保有量较高, 以其汽车千人保有量作为衡量, 2017 年珠三角地区千人汽车保有量约 232 辆/千人, 未来将可能逐步达到东京、伦敦等城市的水平, 千人机动车保有量控制在 300~400 辆/千人比较现实, 同时需要采取鼓励公共交通

通系统发展的相关措施。通过控制人均机动车保有量水平，鼓励公共交通和非机动车的出行方式，东京、伦敦城市的发展模式更为贴切合理。2017 年珠三角地区人均 GDP 约为 1.8 万美元，预计 2030 年可达 3.5 万美元，根据国际经验，珠三角地区千人机动车保有量应进入平稳期缓慢发展。

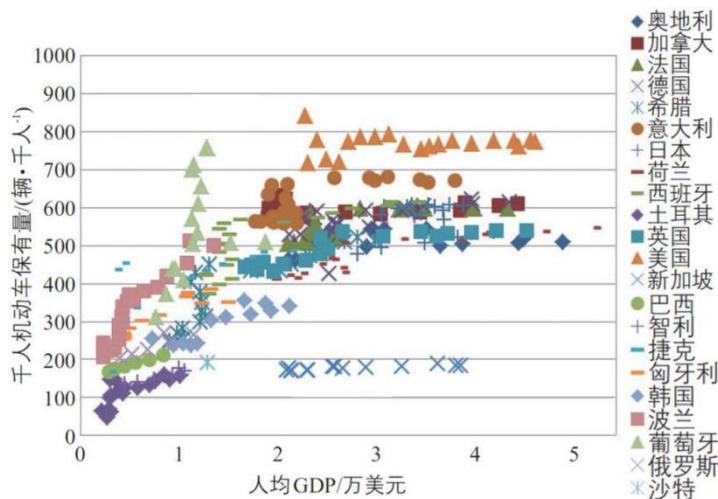


图 6-27 1996—2009 年部分国家和地区人均 GDP 与千人机动车保有量的关系

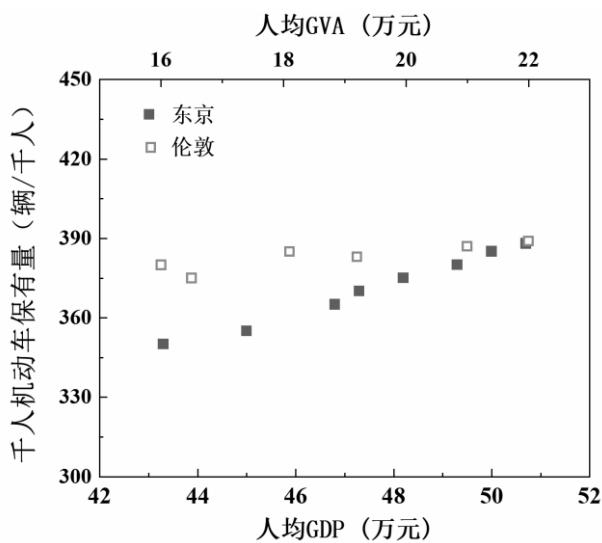


图 6-28 1996—2010 年部分城市发展与千人机动车保有量的关系

综合弹性系数法、国际经验借鉴法，珠三角地区民用汽车保有量预测结果如表 6- 3 所示。2035 年，珠三角地区千人汽车保有量约为 373 辆，民用汽车保有量达 2960 万辆，约为 2017 年的 2 倍，2017 至 2035 年的年均增长率为 4%，其中载客汽车年均增长率约为 4%，载货汽车为 2%。

表 6-3 珠三角地区民用汽车保有量预测结果

年份	民用汽车保有量 (万辆)
----	--------------

		载客汽车（万辆）	载货汽车（万辆）
2035		2960	2740

6.4.3 交通运输结构及运作模式的调整情景分析

分别从交通运输结构组成和交通工具电气化程度两个方面对未来交通运输革新情景进行了设计。其中交通运输结构组成通过货运结构、城际客运结构、城市内居民机动化出行结构来综合进行表述，其中货运结构通过铁路、公路、水路、航空、管道五类运输方式的货运量占比进行表征，城际客运通过铁路、公路、水路、航空四类运输方式的客运量进行表征，城市内居民机动化出行结构通过公交车、出租车、轨道交通、私人小汽车、摩托车五类出行方式的机动化出行人次占比进行表征。电气化发展水平分别针对上述运输方式所需的主要交通工具进行设计，通过研究不同交通工具的清洁燃料使用占比等，来满足中长期情景下大气污染持续减排的发展需求。

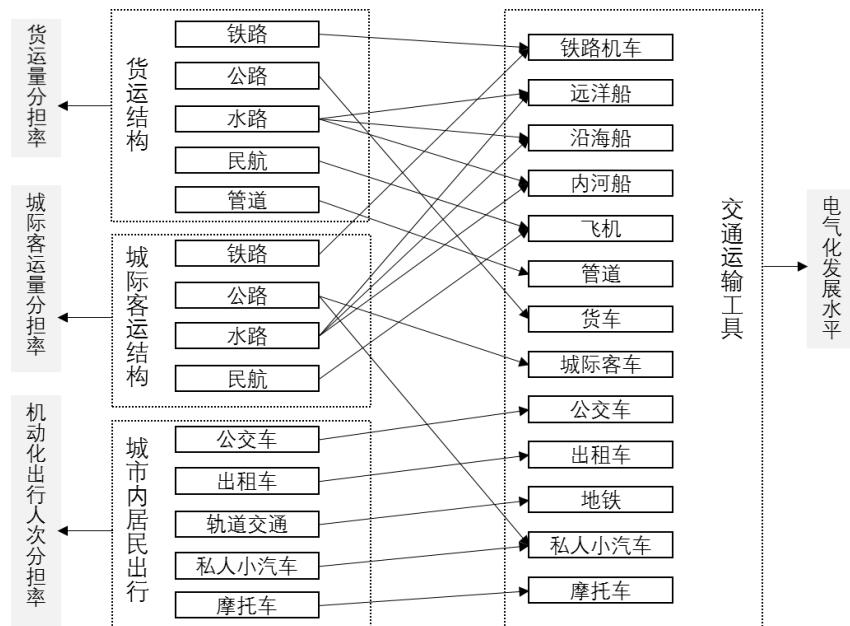


图 6-29 交通运输情景组成

《广东省推进运输结构调整实施方案》提出要通过集中攻坚实现广东省运输结构明显优化，其中水路、铁路承担的大宗货物运输量显著提高，水运优势得到较充分发挥，全社会公路货运分担率呈明显下降态势。《广州市综合交通枢纽总体规划（2018-2035年）》提出未来货物运输将呈现铁路货运需求明显增长、港口货运需求稳步提升、公路长途货运需求下降的发展趋势，未来旅客运输随着高快速铁路建成运营将支撑铁路客运量持续快速增长，预计铁路客运量年均增速将在

10%左右，受铁路客运影响，公路长途客运量将呈现下降趋势。《深圳建设交通强国城市范例行动方案（2019-2035年）》预测未来深圳市在对外交通方面铁路客源量年均增速将超过10%，同时提出到2035年深圳市将建成轨道都市，全市绿色出行分担率超过85%的发展目标。综上，货运方面未来将以提升铁路运能和发展多式联运为重点，着力提高铁路和水路货运量、同步减少公路货运分担率；客运方面，将以完善城际铁路网为重点，着力提高铁路客运量分担率。《广东省公共交通发展规划（2016-2020年）》提出到2020年，环珠江口湾区基本建成以轨道交通系统为骨干、快速公共交通系统和定制公共交通为网络的现代化区域公共交通系统，其中1000万以上人口城市建成国家“公交都市”、300万-1000万人口城市建成全省具有示范作用的“公交城市”，结合各地市轨道交通发展规划，未来将以提高轨道交通出行为主、常规公交发展协同发展的绿色出行模式为发展方向。

以上述各运输方式发展方向为导向，分别设置基准情景、调整情景和强化调整情景三种交通运输结构及运作模式的革新情景，其中基准情景以各有关政策、方案、规划为发展约束研究形成，调整情景和强化调整情景在基准情景的基础上，遵循各运输方式发展方向，提高低耗能、低排放交通运输方式发展速率，分别形成调整情景和强化调整情景。

表 6-4 未来城市交通运输结构及运作模式调整的三种情景

情景名称	情景描述
基准情景	以珠三角区域及各有关地市现有中长期综合交通运输体系规划、运输结构调整规划、重点交通枢纽布局规划等综合交通规划，以及铁路发展战略、港口总体规划、机场总体规划、公共交通规划、轨道交通网络规划等专项规划为发展导向。
调整情景	以各有关政策、方案、规划提出的各运输方式发展方向为导向，在基准情景基础上适当提高低能耗、低排放运输方式发展速率，如铁路、水路运输，以及公共交通运输等。
强化调整情景	在调整情景基础上进一步提升低能耗、低排放运输方式发展速率，如铁路、水路运输，以及公共交通运输等。

6.5 满足未来工业及交通发展情景的能源供需情景

6.5.1 珠三角地区一次能源供应与消费现状

珠三角地区近年来总体能源消费情况如图 6- 30。2017 年, 珠三角地区能源消费总量为 2.4 亿吨标准煤, 人均能耗为 3.7 吨标准煤/人, 单位 GDP 能耗达到 0.3 吨标煤/每万元。从经济和人口变化趋势来看, 2010 年到 2017 年珠三角地区常住人口增长了 9.5%, GDP 增长了近一倍 (97%), 年平均增长率达到 10%, 而能源消费只增长了 24%, 年均增长速度为 3%, 总体上看, 珠三角地区在保持经济快速增长的同时, 能源消费强度不断下降, 2017 年相对 2010 年, 能源强度降低了近 40%。从各区域来看, 广州、深圳、佛山和东莞是珠三角地区能源消费最大的城市, 广州的能源消费量达到 5900 万吨标准煤, 深圳和佛消费量也超过 4000 万吨。

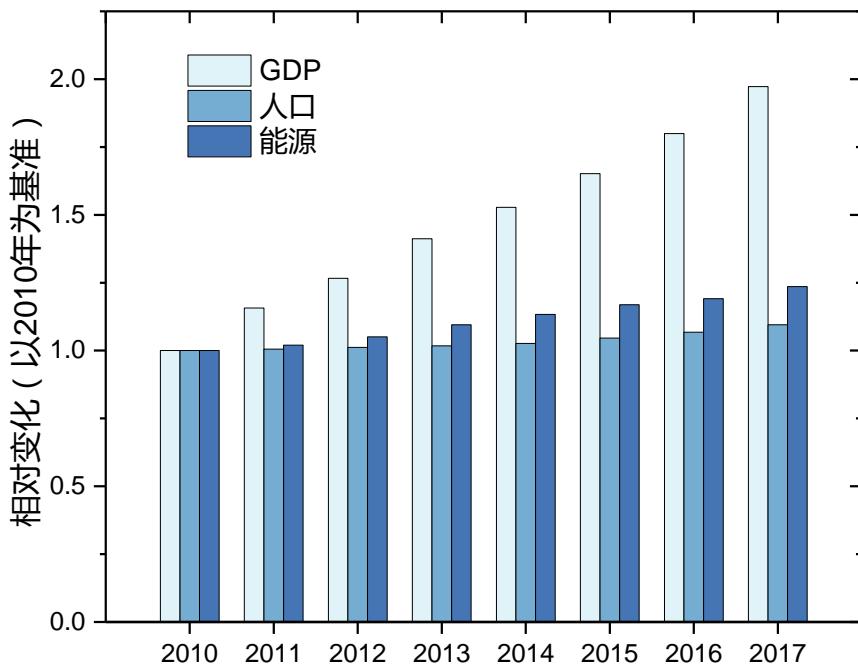


图 6- 30 珠三角地区能源消费量变化趋势

化石能源在珠三角地区一次能源供应中占主导地位, 如图 6- 31 所示, 煤炭消费、油品和天然气等化石能源占总能源消费的 63%, 其中煤炭占 25%, 相对于广东省 40%的煤炭消费比例, 总体上能源更加清洁化; 油品, 包括汽油、煤油和柴油等, 在珠三角能源结构中比例为 28%, 高于广东省 26%的平均水平; 天然气包括气态和液化天然气, 占比为 10%, 是近年来增长最为迅速的能源品种; 其它能源, 主要包括核电、水电、风电、生物质能、太阳能和外购电等一次电力, 占比达到 37%, 外购的电力包括广东省的珠三角地区外围地区和西部地区电力输

入。

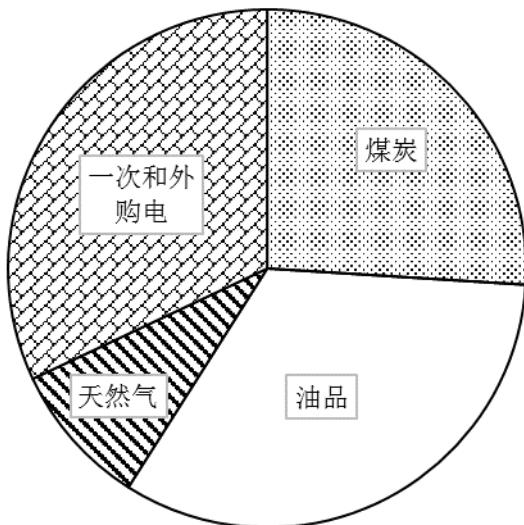
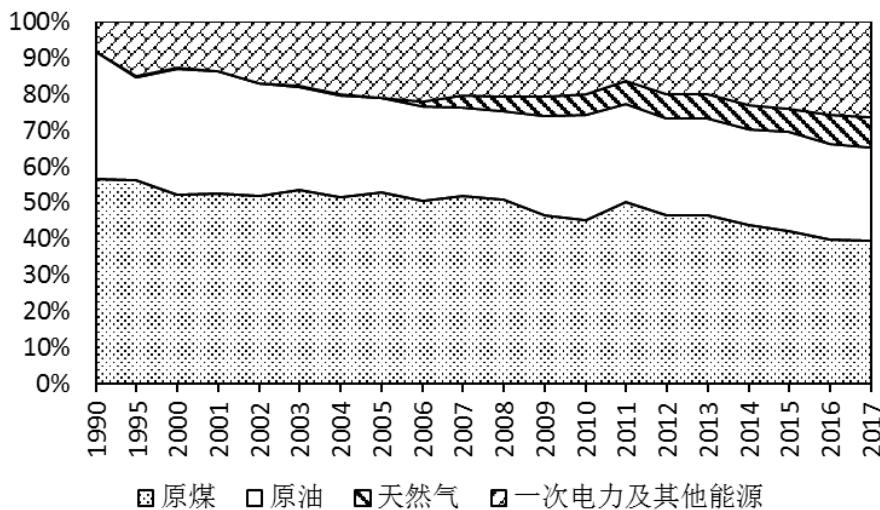


图 6-31 广东省一次能源供应结构变化趋势（上）和 2017 年珠三角地区一次能源供应结构（下）

在珠三角地区，60%以上的煤炭和天然气用于火力发电机组，转化为电力供应到工业、商业等能源消费终端。电力在能源终端消费中占比最大，达到 57%，是珠三角能源安全的关键。2017 年珠三角地区电力装机容量达到 5200 万千瓦，其中燃煤电厂占主导，比例在 50%左右，天然气、核电和可再生能源（包括风能、太阳能、生物质等）机组的占比分别为 31%、12%和 7%，从总消费来看，珠三角地区电力总消费量为 4422 亿千瓦时，本地供应比例为 54%，其中煤炭、天然气、核电和可再生能源在所有电力的占比分别为 28%、13%、9%和 4%，外购的电力占比达到 46%。

珠三角地区能源消费的行业分布如图 6- 32 所示，工业能源消费占比达到 43%，交通行业占比为 32%，能源加工转化（主要指电力、热水、石化等能源相关行业）、民用部门（主要包括民用照明、取暖、热水等）和商业部门（包括零售、餐饮等行业的能源消费）等部门占比为 16%。

在工业行业中，非金属矿物制品业、通信设备、计算机及其他电子设备制造业，造纸和纸制品业、化学原料及化学制品制造业、橡胶和塑料制品业、纺织等行业是重要的耗能行业。非金属矿物制品业包括水泥、陶瓷、玻璃的生产，是耗能大户，占工业总能耗的 14%；电子设备制造占比 12%；化工、钢铁、橡胶生产等行业占比也均在 5%以上。各行业的能源消费结构有很大的差异，能源结构如图 6- 33 所示。造纸、非金属矿物制品、钢铁等行业煤炭使用比例较高，煤炭一般作为原料参与产品的制造过程，部分通过企业的自备电厂、蒸馏等设备转化为需要的能源形态，而计算机与通讯设备、电气机械和器材制造、汽车制造等行业，能源需求以电力为主。重点行业由于能耗大，其能源结构对地区总的能源结构有明显的影响。

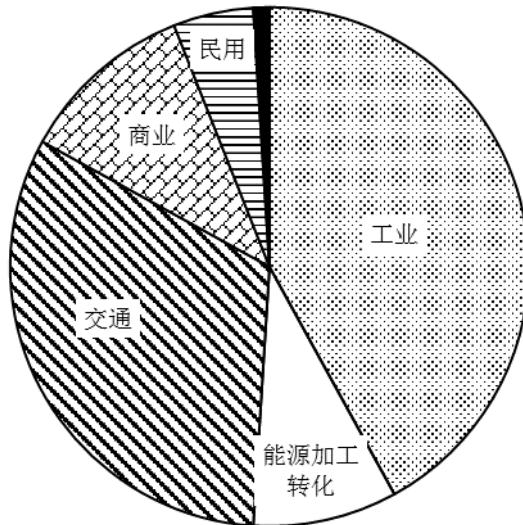


图 6- 32 2017 年珠三角地区分行业能源消费占比

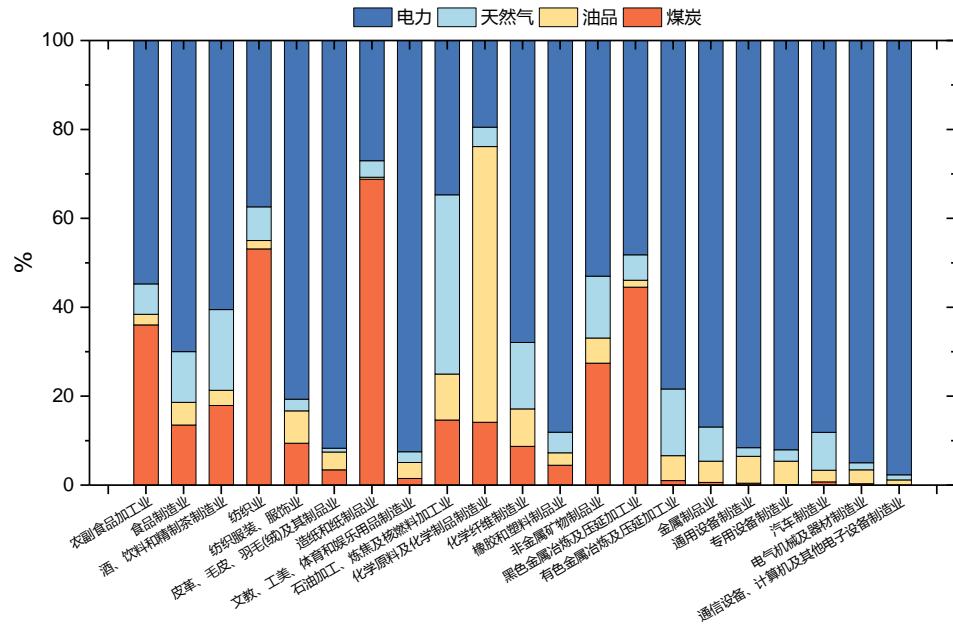


图 6-33 珠三角地区主要耗能行业能源消费结构

6.5.2 珠三角地区能源消费与结构调整情景分析

行业能源消费趋动力变化、能源消费效率、能源消费结构、能源的加工转化等过程，都将导致最终能源消费总量和结构的重大变化，因此能源情景的设置中综合考虑了相关因素。

(1) 能源消费总量预测

本研究能源需求的预测基于自下而上的方法，以不同行业的发展与结构调整为基础进行分析，再进行综合计算。工业行业的能源需求以 6.2 节中的产业结构调整情景中各行业典型产品产量和 GDP 产值为基础，首先考虑产品的单位能耗或单位 GDP 产值的能耗，基于工业行业的能源利用效率，初步估算工业行业的能源需求；交通行业能源估算采用 6.3 节交通运输结构及运作模式调整情景得到能源消费情景；民用、商业部门的能源需求采用与交通行业情景设置相同的基于人口和 GDP 的 Logistic、弹性系数法、单位能耗法等外推方法，2017 年珠三角地区居民平均生活用电量（包括居住和商用公共建筑）约为 1180 千瓦时，欧盟平均、英国和日本的人均生活用电为 1500 千瓦时、1700 千瓦时和 2200 千瓦时，考虑人口增长并对标欧盟平均能耗水平，民用和商业能耗将有大幅增长；综合工业、交通、民用和商业等其它行业的能源消费，综上即可得到初步的 2035 年全社会能源需求情景。

(2) 各部门能源利用效率情景分析

传统耗能行业包括水泥、陶瓷、钢铁、造纸、纺织、石化等，在 2035 年产业情景中，相关行业的规模大幅削减，总体能源需求占比下降，《广东省广东省工业绿色发展实施方案（2016-2020 年）》对这些行业能源下降 5-10%。从各行业单位能耗与国内同行业先进企业和国际先进水平的差距可以看到，乙烯、造纸、水泥以及陶瓷、平板玻璃等行业的能耗与先进水平的差距在 10-15%，仍有进一步的节能潜力，因此在不同情景中均假定传统行业能耗水平在 2017 年的水平上将有所下降。

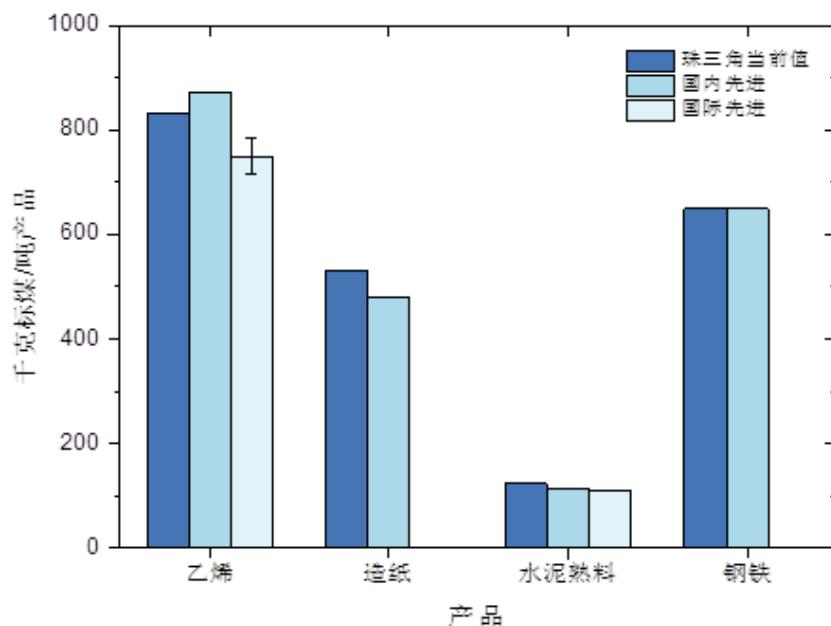


图 6-34 珠三角地区传统行业典型产品能耗水平

以通信设备、计算机及其他电子设备制造业、电气机械及器材制造业、交通设备制造等为代表的新兴制造行业将是工业行业中主要的耗能大户，考虑到随着相关产业的结构升级，能源利用效率会进一步提高，依据能源利用效率提升的历史趋势，对不同情景下新兴行业的单位产值能源消耗设定不同程度的下降比例。商业和民用建筑总体能耗水平下降重点在于公共建筑的节能，同样，依据历史趋势，对不同情景下的能耗水平下降比例进行设定。

（3）能源需求及供应情景分析

工业部门中，非金属矿物制品业是重要用煤大户，水泥、陶瓷和平板玻璃是其中的重点行业。其中，对于水泥、平板玻璃等建材行业，考虑其生产工艺和生产过程，煤炭替代的难度较大，因此在基准情景中此类行业能源的结构保持不变；

对于陶瓷行业，根据《广东省打赢蓝天保卫战实施方案（2018—2020 年）》等文件要求，珠三角地区已开展“煤改气”且要求在 2020 年底之前完成，因此在各类情景中均设定到 2035 年珠三角地区陶瓷行业的能源以天然气为主，比例达到 95%以上；造纸行业的能源消费主要是用于企业自备电厂发电和供热，随着“煤改气”或采用集中供热的政策要求逐步推行，总体上能源结构为天然气的比例大幅上升。基于上述考虑，本研究将构建三种能源需求情景，并据此估算 2035 年珠三角的能源消费结构：（1）基准情景，除已经有明确的政策要求的行业或地区外，主要工业行业的能源结构保持不变；（2）调整情景，加快工业锅炉、窑炉的“煤改气”过程；（3）强化调整情景，进一步增加电气化比例和集中供热能力。

交通部门的能源消费结构按照 6.3.3 节中交通运输结构及运作模式分析情景下交通工具电气化水平设置。

广东省能源发展规划要求加快推动能源升级转型，建立清洁高效的现代能源体系，总体要求是“减煤”、“压油”、“提气”，“增新”。电力供应是珠三角地区能源供应关键，依据《广东省能源发展“十三五”规划》、《广东省海上风电发展规划（2017-2030 年）（修编）》等已出台的规划目标，核电的装机容量将有目前的 950 万千瓦至少增加至 1600 万千瓦，天然气发电项目总装机容量至少增至 1000 万千瓦，海上风电至少增加 240 万千瓦，珠三角区域外围供电能力将由 3000 万千瓦增至 7000 万千瓦以上。基于以上主要能源供应能力的规划，同时考虑全社会能源需求，将设置三类能源供应情景，三种情景下能源的清洁化程度逐步加速：

（1）基准情景，对于燃煤电厂除 2020 年规划目标和已经明确的新建或改建的能源供应项目外，能源供应结构基本保持稳定；（2）调整情景，加快“煤改气”进程，促进部分燃煤电厂加快退役；（3）强化调整情景，进一步增加核能、太阳能和外部电力供应。

表 6-5 未来能源供需结构调整的三种情景

情景名称	能源需求情景		能源供应情景
	工业部门	交通部门	
基准情景	除已经有明确的政策要求的行业或地区外，主要工业行业的能源结构保持不变	按既定政策或规划调整	燃煤电厂除 2020 年规划目标和已经明确的新建或改建的能源供应项目外，能源结构

			基本保持稳定
调整情景	加快工业锅炉、窑炉的“煤改气”过程	机动车、铁路机车的电动化水平进一步提升, LNG 动力船的比例、岸电建设和使用率有所提高	加快“煤改气”进程, 促进部分燃煤电厂加快退役
强化调整情景	进一步增加电气化比例和集中供热能力	电动化水平、LNG 动力船的比例、岸电建设和使用率进一步提升	进一步增加核能、太阳能和外部电力供应

6.6 珠三角域内污染源排放管控需求及域外联动的减排情景设置

6.6.1 珠三角区域内污染源排放管控需求

在 6.3 节未来产业发展定位和结构调整情景和 6.5 节对工业领域能源需求结构设计下, 进一步设置珠三角区域内未来对工业源污染管控的要求。在未来珠三角产业结构中的工业污染源末端排放控制将采取最为严格的控制措施, 全面实施最佳可行控制技术, 包括: 全面淘汰中小锅炉及落后炉型, 工业锅炉排放执行大气污染物特别排放限值; 实施工业挥发性有机物全过程控制, 集装箱制造、汽车制造行业水性涂料的使用比例以及机械制造、运输设备制造、包装印刷等行业低(无)VOCs 含量涂料的使用比例在《“十三五”挥发性有机物污染防治工作方案》要求的基础上进一步提升 10~20 个百分点; 涉 VOCs 重点行业企业的挥发性有机物废气处理大量采用热力燃烧法、催化燃烧法等高效治理技术, VOCs 废气收集效率和处理效率大于 90%。

在 6.3 节城市交通运输结构及运作模式革新情景和 6.4 节对交通领域能源需求结构设计下, 进一步考虑各类交通工具排放水平的不断提升。在 6.4 节满足未来工业及交通发展情景的能源供需情景设计下, 进一步设置珠三角区域内未来对电厂污染管控的要求: 珠三角区域内保留的燃煤电厂均实施超低排放, 燃气电厂全部采用选择性催化还原法与低氮燃烧联用等此类高效治理技术。

6.6.2 珠三角区域外联动减排情景分析

从第三章珠三角本地 PM_{2.5} 和 O₃ 背景浓度的分析中可以看到, 珠三角想要在 2035 年实现 WHO-III 目标必须联合区域外进行协同减排。

基于清华大学贺克斌院士团队的研究成果, 预计到 2035 年, 我国全部城市

有可能实现 $PM_{2.5}$ 达到国家空气质量二级标准 $35\mu g/m^3$ 的目标，要实现此目标，4 种主要污染物二氧化硫、氮氧化物、 $PM_{2.5}$ 、VOC 的排放量必须在 2015 年的基础上下降 60%~70%，这是珠三角实现 WHO-III 目标情景下，区域外联动减排的最低需求。

通过第四章珠三角周边 $PM_{2.5}$ 和 O_3 的区域传输特征分析显示，对珠三角空气质量影响较大的几个省份为江西、福建、安徽、湖南、山东、江苏和浙江。这几个省份中，福建 $PM_{2.5}$ 年均浓度在 2018 年已降至 $27\mu g/m^3$ ，且《福建省打赢蓝天保卫战三年行动计划实施方案》已提出 2020 年 $PM_{2.5}$ 年均浓度降至 $25\mu g/m^3$ 的目标，江西和浙江 2018 年 $PM_{2.5}$ 年均浓度分别为 $38\mu g/m^3$ 和 $33\mu g/m^3$ ，可以预见这些省份的 $PM_{2.5}$ 年均浓度将继续降低，到 2035 年将远低于 $35\mu g/m^3$ 的目标，主要污染物的排放量也将低于我国全部城市达标情景下的减排量。

基于以上考虑，本研究对 2035 年珠三角区域外的联动减排设置了基础减排情景和强化减排情景两种情景。

基础减排情景：对广东省内的非珠三角地区，以各市 2035 年 $PM_{2.5}$ 年均浓度达到 $20\mu g/m^3$ 为目标，设置主要污染物的减排量；省外其他省份的减排量参考生态环境部环境规划院以“全国各省 $PM_{2.5}$ 年均浓度降至 $35\mu g/m^3$ 为目标”的研究成果。

强化减排情景：对广东省内的非珠三角地区，主要污染物的减排量的设置同与基准情景一致；省外其他省份的减排量在基础情景的基础上，适当增加周边省份和对珠三角空气质量影响较大的东部省份的减排量，特别是空气质量现状已达标或接近达标的广西、福建、浙江、江西等省份。

两种情景下，珠三角周边省份与对珠三角空气质量影响较大的东部省份主要污染物的减排量如下图所示。

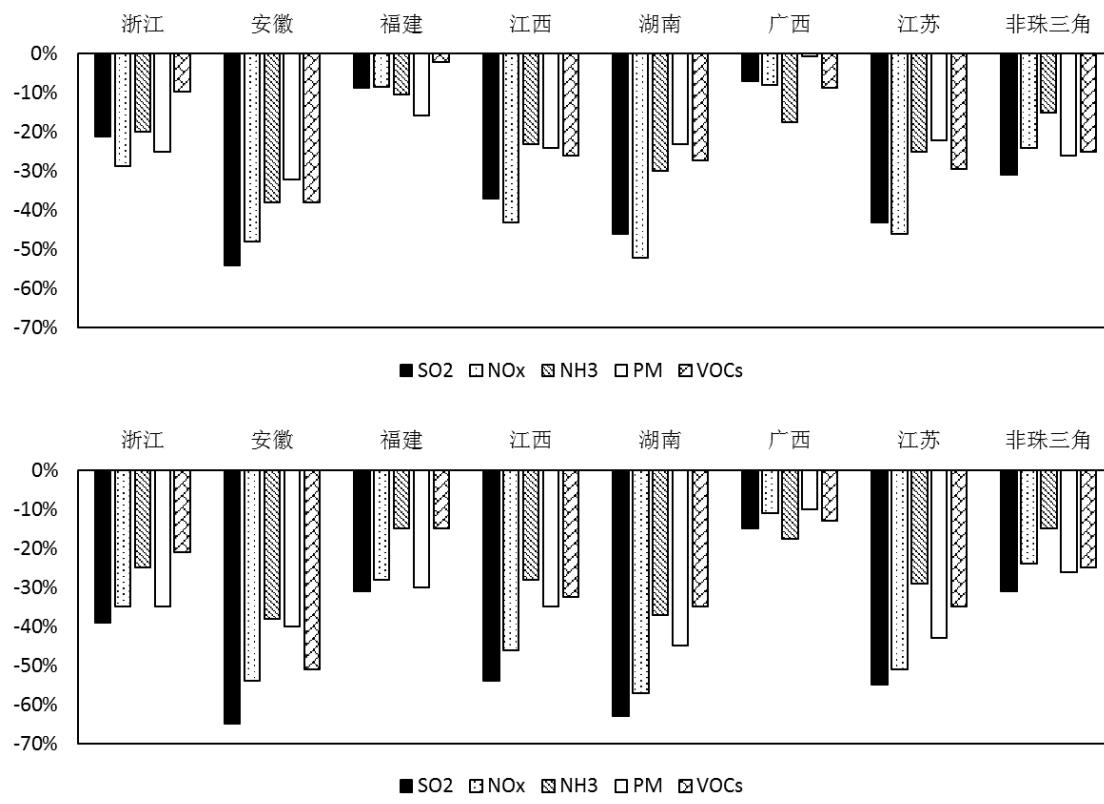


图 6-35 基础情景（上）和强化情景（下）下珠三角区域外部分省份和地区主要污染物协同减排量

6.7 综合策略情景的构建及可达性分析

6.7.1 综合策略情景分析

以上研究在珠三角未来经济社会发展形势预测的基础上，对产业、交通和能源三个领域的结构调整提出了调整力度不同的三类情景（基准情景、调整情景和强化调整情景）；对珠三角区域内污染源管控提出了全面实施最佳可行技术的需求；对珠三角区域外联动减排提出了减排力度不同的两类情景（基础减排情景和强化减排情景）。其中，结构调整的三类情景的研究在未来经济社会发展形势预测的约束下，朝三个方向展开：基准情景，基于珠三角经济社会的历史发展趋势和已出台规划的发展目标，各领域结构调整按既定政策进行；调整情景，在基准情景的基础上，基于空气质量改善目标和措施策略的可行性，适度加快各领域结构调整的步伐，推动形成绿色发展方式和生活方式；强化调整情景，为加快珠三角空气质量改善，促使各领域结构进行大幅度调整、生产和生活方式发生根本性变革。

本章将对上述情景进行组合，构建综合策略情景，并对情景下所能达到空气质量水平进行模式模拟，对情景的目标可达与否做出如下规定：若综合策略情景模拟的 $PM_{2.5}$ 年均浓度高于 WHO-III 目标 ($15\mu g/m^3$)，则说明该情景的减排力度不足，需调整减排力度；若综合策略情景模拟的 $PM_{2.5}$ 年均浓度低于 WHO-III 目标，但两者差距超过 5% (即模拟浓度低于 $14.25\mu g/m^3$)，则说明该情景的减排过于激进，需重新选取情景组合；若综合策略情景模拟的 $PM_{2.5}$ 年均浓度低于 WHO-III 目标，但两者差距在 5% 以内 (即模拟浓度在 $14.25\mu g/m^3 \sim 15\mu g/m^3$)，则该情景可确定为珠三角空气质量达到 WHO-III 水平的综合策略情景。情景构建和可达性分析的技术路线如下图所示。

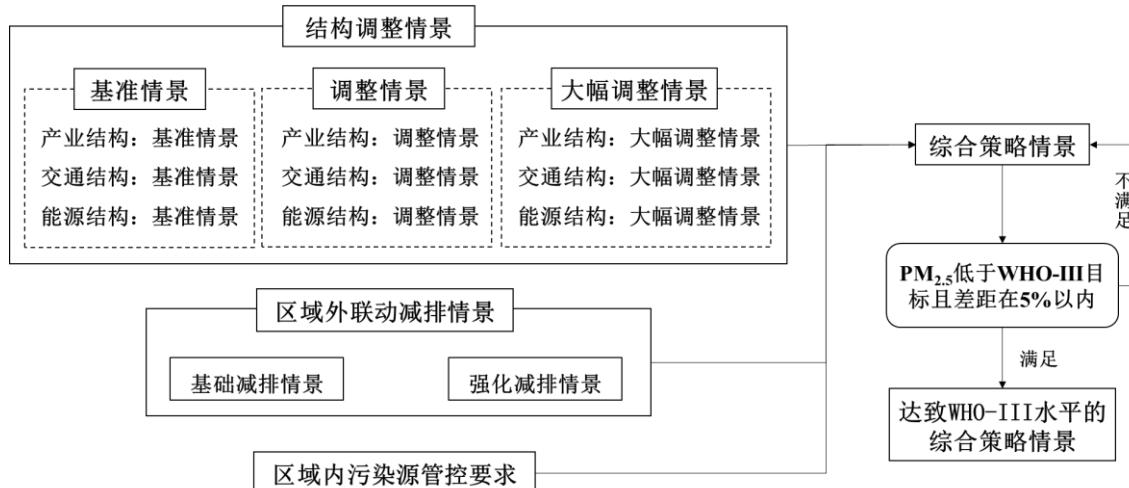


图 6-36 综合情景构建和可达性分析的技术路线

(1) 模型模拟方法

利用空气质量模型 WRF+CMAQ 对综合策略情景组合进行模拟分析，研究在不同情景下珠三角地区 $PM_{2.5}$ 的 WHO-III 目标可达性。以 2017 年为基准年，模拟 1 月、4 月、7 月和 10 月四个特征月份代表全年。模型采用三层嵌套结构，气象输入数据为 2017 年 FNL 全球气象再分析数据，第一、二层人为源排放清单输入数据为 MEIC+EDGAR 耦合清单，生物源排放清单由 CMAQ 生物源在线计算模块得出，最内层排放清单为本课题组自制 $3km \times 3km$ 高分辨率人为源排放清单以及由 MEGAN 生物源模型制作的生物源排放清单，具体模型设置与数据信息见 3.1 节。模拟研究中将设置基准情景和案例情景两套模拟情景，结合基准情景模拟结果和 2017 年 $PM_{2.5}$ 监测数据得出模拟误差修正系数，利用模拟误差修正系数对案例情景模拟结果进行修正后得出在削减案例条件下 $PM_{2.5}$ 浓度预测值

(具体计算公式见 3.1 节), 根据预测结果进行可达性分析。

(2) 可达性分析

根据空气质量监测数据, 珠三角地区 2017 年 PM_{2.5} 年均浓度为 34 微克/立方米, 与 PM_{2.5} 的 WHO-III 目标 (15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 差距较大, 区域年均浓度需至少降低 19 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 达标压力大。城市层面, 所有珠三角城市均未达到 PM_{2.5} 的 WHO-II 目标 (25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 且佛山市、东莞市、江门市、肇庆市等城市年均浓度仍未达到 WHO-I 目标 (35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)。

通过模型计算, 在珠三角区域内产业、交通和能源结构均进行大幅调整, 珠三角区域外的联动减排为基础减排情景时, 珠三角地区 PM_{2.5} 的年均浓度预测值为 17.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 仍高于 WHO-III 目标, 珠三角九个地市 PM_{2.5} 年均浓度范围在 15~20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。说明即便珠三角通过本地的结构调整已经大幅度减排, 但在全国各省 PM_{2.5} 年均浓度降至 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的区域外围排放格局下, 珠三角仍难以实现 WHO-III 目标, 外围协同减排力度需进一步加强。

通过模型计算, 在珠三角区域内产业、交通和能源结构均进行大幅调整, 珠三角区域外的联动减排为强化减排情景时, 珠三角地区 PM_{2.5} 的年均浓度预测值为 14.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 低于 WHO-III 目标, 且与目标的差距在 5% 以内, 满足研究所设定的可达性判定要求。珠三角九个地市 PM_{2.5} 年均浓度范围在 12~16 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。总体而言, 经空气质量模型模拟验证之后表明, 该情景即为珠三角空气质量达致 WHO-III 水平的综合策略情景。

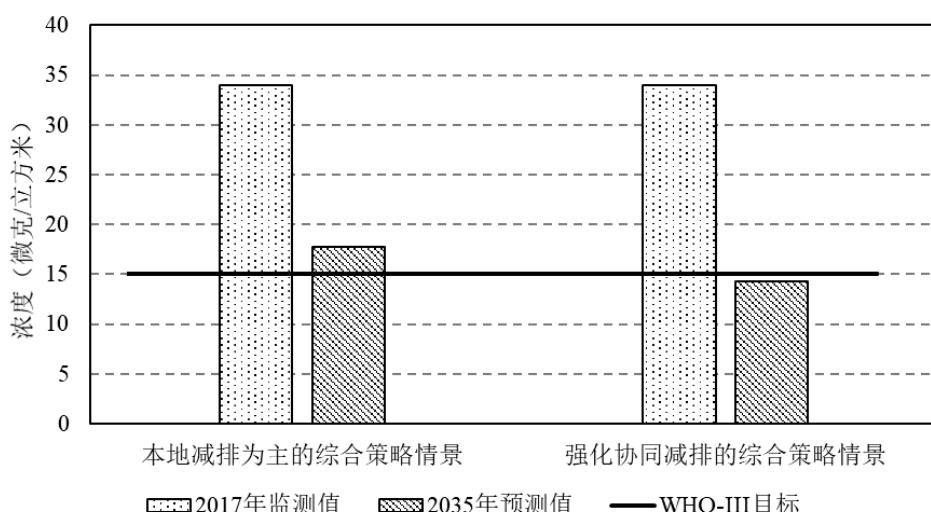


图 6-37 本地减排为主的综合策略情景和强化协同减排的综合策略情景下珠三角区域 2035

年 PM_{2.5} 浓度预测

6.7.2 达到 WHO-III 目标的推荐情景

珠三角 PM_{2.5} 背景浓度、区域传输特征和情景模拟分析的结果显示，本地排放对珠三角浓度有重要贡献，但在本地排放置零的情况下，珠三角仍不能达到 WHO-III 目标，这说明为实现 WHO-III 目标需要联合区域外部协同减排，同时珠三角的本地排放需要大幅度削减。

在达到 WHO-III 目标的推荐情景中，预计到 2035 年，全国各省份 PM_{2.5} 年均浓度均将降至 35 微克/立方米以下，2017 年已达标的省份空气质量持续改善。对珠三角传输作用较为明显的省份中，江西、湖南、安徽等 2017 年空气质量未达标的省份较 2017 年将减排 25%~65%，空气质量现状水平较优的广西和福建将减排 10%~30%。广东省内珠三角以外的粤东西北地区需要以 2035 年空气质量达致 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 为目标、以粤北和粤东地区为重点实施减排，主要污染物较 2017 年需减排 20~30%。

同时，珠三角本地需通过大幅度优化调整产业、能源和交通运输结构、全面深化各类污染源治理措施，实现 SO₂、NO_x、PM、VOCs 和 NH₃ 等主要污染物较 2017 年减排 41%~77%。其中，产业结构调整对 PM、VOCs 和 NH₃ 三种污染物减排贡献较大，贡献占比接近或超过 50%；交通结构调整对 NO_x 减排的贡献较大，贡献占比在 60% 以上；而能源结构调整则对 SO₂ 减排的贡献最为明显。

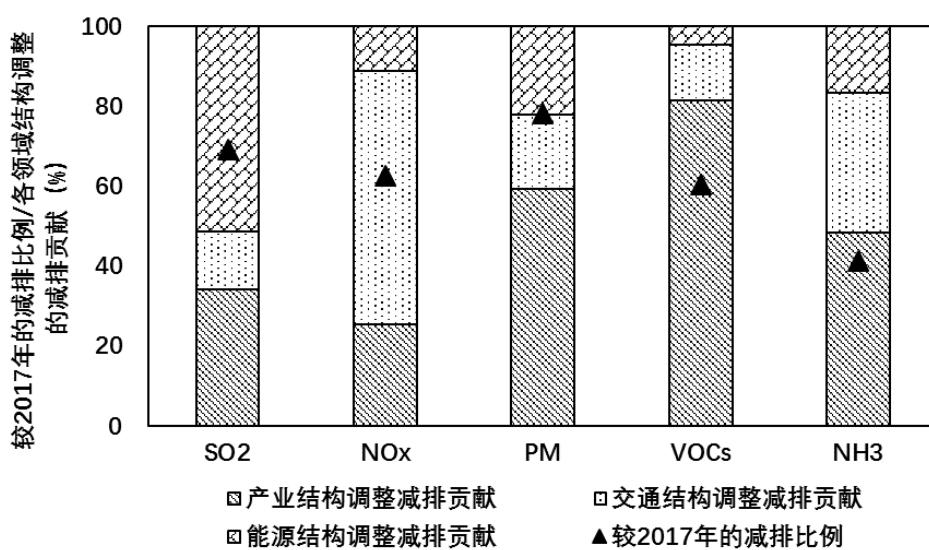


图 6-38 达到 WHO-III 目标推荐情景下主要污染物相较 2017 年的减排比例以及各领域的减排贡献

对比 2017 年, 该情景下珠三角区域产业、交通和能源领域结构将发生大幅度调整。产业领域, 在保障一定经济发展目标的基础上, 推动珠三角打造以新兴行业为主导产业体系, 传统行业基本从珠三角淘汰退出, 新兴行业在工业中的比重提升 20~30 个百分点, 达到 90% 以上; 交通领域, 在客货运输需求仍将不断增长的情况下, 扭转目前以公路为主的运输结构, 铁路货运和客运的比例快速提升 7~26 个百分点, 公共交通机动化出行占比不断提升并达至国际先进水平; 能源领域, 在满足能源消费需求不断增长的情况下, 加快珠三角区域的无煤化和电气化进程, 煤炭在一次能源消费中的占比下降近 20 个百分点, 煤电的占比由 50% 左右降至 6% 左右。区域内污染源管控要求全面实施最佳可行控制技术, 包括: 全面淘汰中小锅炉及落后炉型, 工业锅炉排放执行大气污染物特别排放限值; 实施工业挥发性有机物全过程控制, 重点行业低(无) VOCs 含量涂料的使用比例在现有要求的基础上进一步提升 10~20 个百分点; 挥发性有机物废气处理大量采用高效治理技术, VOCs 废气收集效率和处理效率大于 90%。区域内保留的燃煤电厂均实施超低排放, 燃气电厂全部采用选择性催化还原法与低氮燃烧联用等此类高效治理技术。

产业、交通和能源结构强化调整情景的详细设置如下。

(1) 产业结构强化调整情景

到 2035 年, 珠三角第三产业占比接近 70%; 第二产业中以先进制造业和战略新兴产业为主导, 医药制造业、计算机等电子设备制造业、电气机械和器材制造业、汽车制造业、运输设备制造业、专用和通用设备制造业等新兴行业在工业行业中的占比大幅增长, 新兴行业增加值增速高于各地市现有规划目标; 污染排放较大的水泥、陶瓷、玻璃等建材行业、造纸、钢铁等行业在 2025 年以前不断淘汰不合规和落后产能, 提升行业发展水平, 并逐步从珠三角退出, 2025 年以后加大产能淘汰力度, 到 2035 年上述行业中除个别工艺先进、节能环保水平高的优质建材企业外, 基本从珠三角地区退出; 石化行业中, 惠州作为广东省布局的三大石化基地之一, 未来规模按既定规划发展。

在上述情景下, 到 2035 年, 珠三角地区的三次产业结构调整为 1:31:68, 第三产业比重需较 2017 年提升 10 个百分点左右。图 6-39 给出了该情景下, 新兴行业中各行业增加值较 2017 年的变化情况。到 2035 年, 珠三角地区的新兴行业

增加值增长至 72800 亿元左右, 较 2017 年增长了近五倍; 新兴行业增加值在工业增加值中的占比超过 95%, 较 2017 年需增加约 35 个百分点。

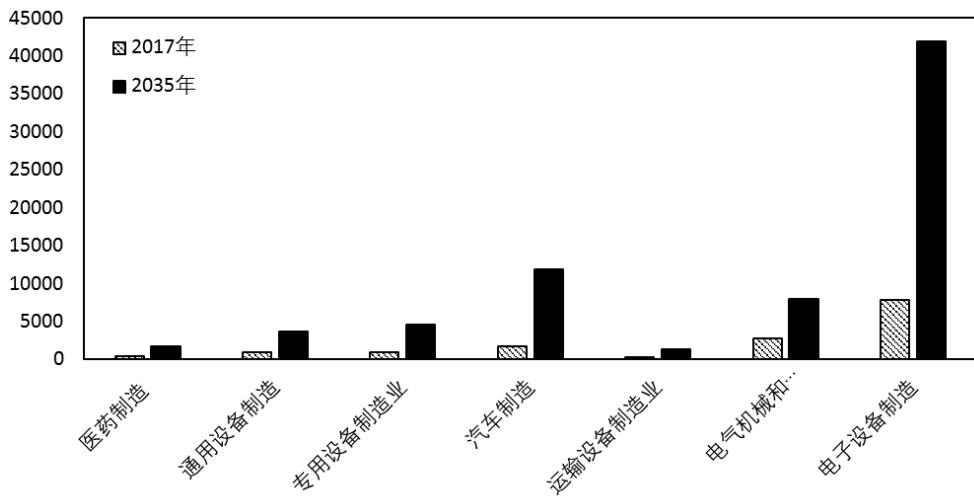


图 6-39 新兴产业各行业增加值 2017 年现状和 2035 年预测结果对比

(2) 交通结构强化调整情景

a. 交通运输结构组成

货运结构。随着珠三角地区产业转型升级、区域内高端高附加值货物运输需求快速增长、多式联运体系逐步完善等, 货运结构将呈现不断优化调整的趋势。其中, 铁路货运需求增速加快, 货运量分担率逐年下降趋势在 2-3 年内得到扭转, 中长期将持续快速增长, 至 2035 年铁路货运量分担率由 2017 年的 2% 增长至 9%; 随着粤港澳大湾区航运枢纽基础设施建设的不断完善, 国际航运中心地位日渐形成, 水路货运能力和需求将得到进一步提升, 至 2035 年水路货运量分担率由 2017 年的 28% 提升至 2035 年的 38%; 民航和管道货运需求将保持持续增长趋势, 货运量分担率略有增长; 受铁路和水路货运运能和需求的提升影响, 公路长途货运需求将呈下降趋势、中短途货运需求持续增长但增速将变缓, 公路货运量分担率总体将呈逐步下降趋势, 至 2035 年公路货运量分担率由 2017 年的 69% 降至 52%。

城际客运结构。随着人均可支配收入的不断增加, 出行者对交通运输效率、服务品质、可持续性、安全性将提出更高的要求, 交通出行需求和出行特征将发生深刻变化。其中, 铁路具有全天候、快速舒适的优点, 随着高铁、动车、城轨等高快速铁路逐步成网和开通运营, 铁路客运量将持续快速增长, 至 2035 年铁路客运量分担率由 2017 年的 24% 快速增至 50%; 随着珠三角地区现有机场的扩

建以及珠三角枢纽（广州新）机场的新建，珠三角世界级机场群逐步形成，国际长途客流将长期保持较高增长速度、中短距离客流受铁路影响需求逐步下降，航空客运量分担率总体将略降低；水运除了维持必要的观光游览等用途，其份额将在城际客运结构中逐渐萎缩；受铁路客运专线项目陆续运营的影响，公路长途客运量将呈快速下降趋势，在城际客运结构中的占比逐步降低，至 2035 年由 2017 年的 61% 降至 38%。

城市内居民出行。随着公共交通基础设施建设的不断完善，公共交通机动化出行占比不断提升并达至国际先进水平，至 2035 年公共交通机动化出行率达到 70% 以上，轨道交通和公交车的机动车出行率分别达到 40% 和 30%，轨道交通成为最主要的机动化出行方式，个人交通机动化出行率大幅下降，私人小汽车和摩托车机动化出行率分别降至 25% 和 2%。

表 6-6 珠三角地区 2035 年交通运输结构组成情景

类别	2035 年
货运结构	铁路 9%
	公路 52%
	水路 38%
	民航 0%
	管道 1%
城际客运结构	铁路 50%
	公路 38%
	水路 1%
	民航 11%
城市内居民机动化出行结构	公交车 30%
	出租车 3%
	轨道交通 40%
	小汽车 25%
	摩托车 2%

b. 交通工具电气化水平

分别针对主要的各类交通工具通过研究不同交通工具的电气化技术发展现状及未来可能的发展水平，研究确定不同交通工具的清洁燃料使用占比，以满足中长期情景下大气污染持续减排的发展需求。

表 6-7 珠三角地区 2035 年交通工具电气化情景

交通工具类型	电气化率	电气化路径
--------	------	-------

交通运输工具类型	电气化率	电气化路径
铁路机车	柴油: 0% 电: 100%	至 2035 年铁路机车全部实现电动化。
远洋船	燃料油: 97% 电: 3%	靠港船舶泊岸期间全部使用岸电。
沿海船	燃料油/柴油: 74% LNG: 20% 电: 6%	靠港船舶泊岸期间全部使用岸电；部分可用于 LNG 改造的船舶完成 LNG 动力改造，同时考虑部分新增 LNG 动力船舶。
内河船	柴油: 50% LNG: 30% 电: 20%	靠港船舶泊岸期间全部使用岸电，同时考虑部分新增电动船舶；部分可用于 LNG 改造的船舶完成 LNG 动力改造，同时考虑部分新增 LNG 动力船舶。
飞机	航空煤油: 95% 生物航油: 5%	仍以航空煤油为主，考虑部分相对绿色低碳的生物航空煤油在飞机中的使用。
管道	燃料油: 100% 电: 100%	运作过程中同时使用燃料油和电力。
货车	汽柴油: 70% 电: 30%	电动化主要以轻型货车为主，至 2035 年电动化率达 30%。
城际客车	汽柴油: 60% 电: 40%	至 2035 年电动化率达 40%。
公交车	柴油: 0% 气: 0% 电: 100%	公交车全部实现电动化。
出租车	汽油: 0% 气: 0% 电: 100%	出租车全部实现电动化。
地铁	电: 100%	/
私人小汽车	汽油: 40% 电: 60%	私人电动小汽车至 2035 年占比达 60%。
摩托车	汽油: 100% 电: 0%	以淘汰为主，暂不考虑电动化。

(3) 能源结构强化调整情景

到 2035 年，珠三角地区总的能源需求为 3.1 亿吨标准煤，各个行业能源需求及其与 2017 年的对比如图 6- 40 所示。2035 年工业和能源加工转化仍是珠三角地区主要的能源消费中占主导地位，相对于 2017 年增长幅度达到 32%，新兴行业特别是计算机、通信和其他电子设备制造业和汽车制造业的预计产值的大幅增长是主要的驱动因素，交通、民用和商业部门的能源消费量增长总体上相对平稳。在能源消费结构方面，煤炭仅作为电力或集中供热行业，工业行业全面实现

天然气化和电气化，总体上煤炭的消费量大幅下降。在电力供应方面，除 2010 年之后新建的超超临界机组，其它燃煤电厂均加快退役，2035 年燃煤机组装机容量约为 1000 万千瓦；核能装机容量增加到 2200 万千瓦，天然气机组增加至约 5500 万千瓦，海上风电、光伏发电的装机分别达到 120 万千瓦和 360 万千瓦，外围向珠三角地区供电能力需达到 8000-9000 万千瓦时。

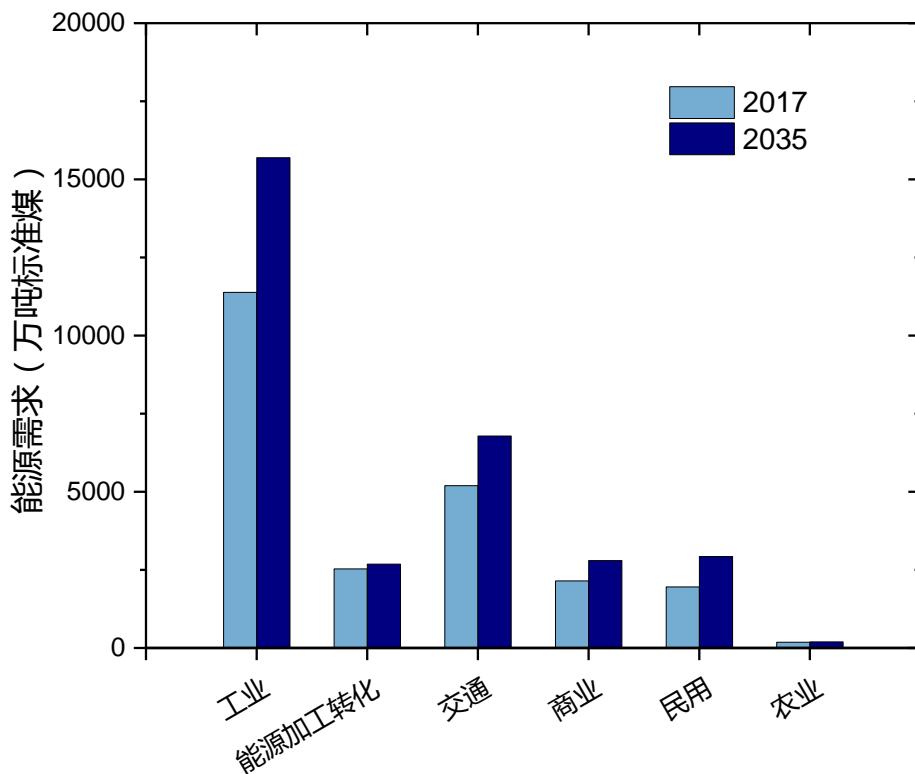


图 6- 40 2035 年珠三角地区主要行业能源消费量预测

一次能源和终端消费的能源结构如图 6- 41 和图 6- 42 所示，可以看到，在 2035 年，煤炭、油品、一次电力和天然气在总能源供应中占比分别为 6%、25%、46% 和 23%，各类能源消费量与 2017 年相比的增长率分别为 -70%、14%、80% 和 175%，天然气和一次电力的增长非常显著，而煤炭的消费量显著下降。从终端消费来看，2035 年电力消费量占比达到 68%，天然气和煤炭消费的分别为 4% 和 2%，与 2017 年相比，终端电力消费增长明显，达到 60%。

电力消费是终端能源消费的主要能源形态，一次能源中天然气和煤炭也主要用作发电用途，电力装机容量增长率接近 100%，达到 10000 万千瓦时左右。预计电力的供应结构如图 6- 43，可以看到，输入电力的占比达到总用电需求的 50%，天然气发电量和核能发电量分别达到的 27% 和 11%。

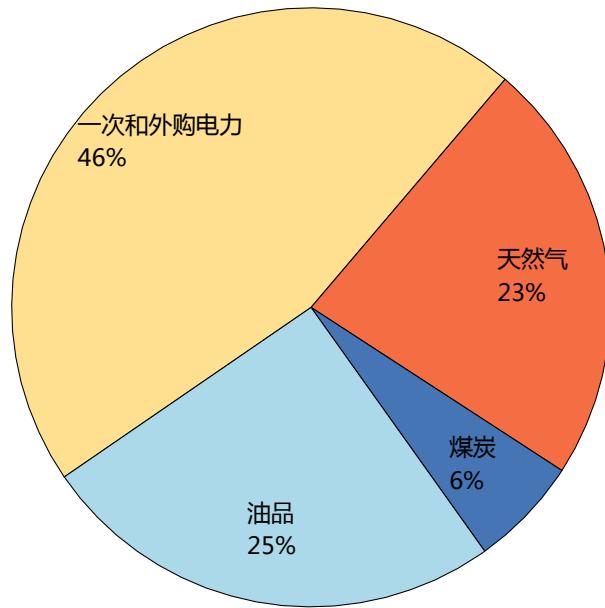


图 6- 41 2035 年珠三角地区一次能源供应结构分布

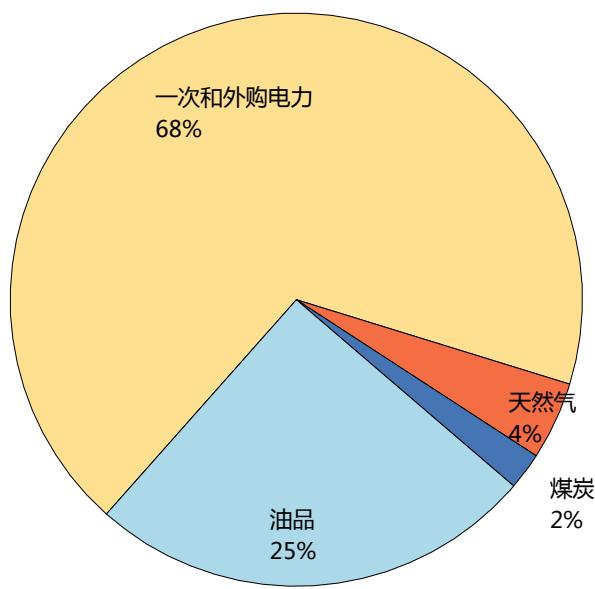


图 6- 42 2035 年珠三角地区终端能源消费结构分布

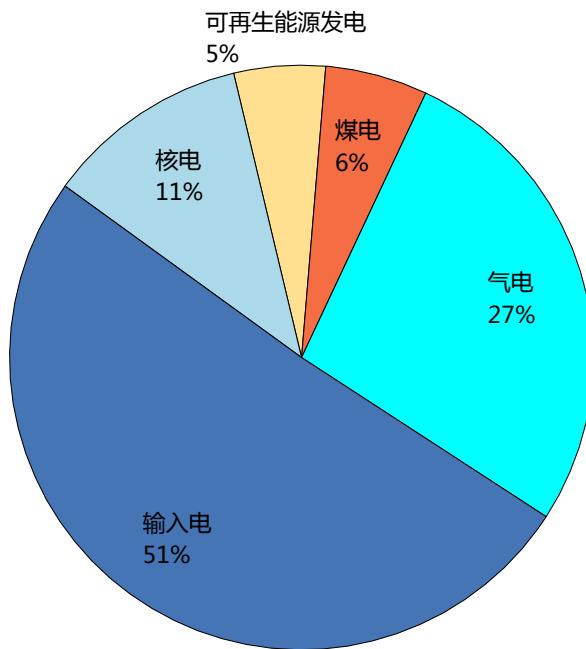


图 6-43 2035 年珠三角地区电力供应结构

6.7.3 达到 WHO-III 目标情景实现难度分析

从上述情景可以看出，珠三角地区若要在 2035 年实现 WHO-III 目标，需要采取强有力手段，大幅度调整现有的经济社会结构，重点在产业、交通、能源等领域推动生产生活方式的转变。

从产业结构看，在维持一定经济增速的前提下，为了实现 WHO-III 目标，珠三角地区第三产业的比重需提升至 68%，较 2017 年提升 11 个百分点；原有的传统行业需大量由信息技术、生物医药、高端装备制造等新兴行业替代，新兴工业增加值需增长至 72800 亿元左右，较 2017 年增长近五倍，在工业中的占比提高 30~35 个百分点，提升至 95% 以上。从珠三角地区新兴行业的历史变化趋势看，2010-2017 年新兴行业的年均增长速度约 7.4%，以此增速预计，到 2035 年珠三角地区新兴行业的增加值仅能达到 53000 亿元；若要实现达致 WHO-III 目标的产业结构情景中的新兴行业的规模，增速需提高至 9% 以上。但就各城市新兴行业的发展现状看，城市间产业发展的差异较大，个别城市仍以水泥、陶瓷等传统行业作为支柱产业，高技术制造业和先进制造业的占比较低，新兴行业发展的基础薄弱，要在 2035 年前完成传统行业的淘汰和退出，重新打造以新兴行业为主导的产业体系有较大困难，珠三角区域新兴行业要 2017-2035 年的十八年间维持在 9% 的较高水平有较大的实现难度。

从交通结构看，为了实现 WHO-III 目标，在客货运输需求仍将不断增长的情况下，珠三角地区的客货运输方式都需向“公转铁”方向转移，尤其是在城际客运方面，铁路客运量分担率需由 2017 年的 24% 快速增至 50%；公共交通机动化出行占比需不断提升，由原先的较国际先进水平偏低 30~50 个百分点，提升至达到国际先进水平。在这种转变过程中，铁路线网基础设施建设及普速铁路运能释放所带来的运输能力能否满足该情景下的运输需求，公铁联运、铁水联运中转设施建设及末端配送服务设施配套能否满足货运便利性需求，公共交通最后一公里问题尤其是在非中心城区能否得到根本性解决，未来机动车电气化技术发展水平及人们的接受程度能否满足该情景下的电气化进程，水上 LNG 加注站布局规划及建设步伐能否满足该情景下 LNG 船舶的改造进程等均为该情景的最终实现需要回答和解决的问题，为该情景的最终实现带来了一定的不确定性。

从能源结构看，为了实现 WHO-III 目标，在产业和交通情景的能源需求不断增长的情况下，保证能源供应的清洁化，燃煤电厂发电量的占比需降至 6% 左右，同时外购电力的占比需达到总用电需求的 50%，天然气的消费量增长一倍以上。这就意味着，除 2010 年之后新建的超超临界机组，其它燃煤电厂均要加快退役，2035 年以前珠三角地区至少需要退役的煤电机组 1300 万千瓦，天然气机组需增加至约 5500 万千瓦，但目前珠三角现有气电和规划待建的天然气机组容量仅有 3800 万千瓦左右，总体上提升煤电替代持续快速推进、天然气机组容量进一步提升的工作压力较大。到 2035 年，外围对珠三角的供电能力需达到 8000-9000 万千瓦，目前粤东西北地区对珠三角的供电能力为 3000 万千瓦，西电的输入能力约 3500 万千瓦，规划内将于 2022 年新增 500 万千瓦的西电供应能力，但仍不足以满足珠三角的用电需求。此外，较大的外购电力占比对珠三角区域的能源供应安全也是很大的挑战。

在污染治理方面，珠三角未来主要是全面实施最佳可行控制技术，在现有控制技术发展已较为成熟的情况下，预计该要求在珠三角是可以实现的。但仍需指出，在工业用煤和煤电全面由天然气接替的情景下，脱硝治理技术能否有进一步提升也对空气质量的改善有重要影响。

7 达致 WHO-III 目标的健康收益及 CO₂ 协同减排效应

7.1 尽早达致 WHO-III 目标的健康收益评估

长期或短期暴露于污染空气中，会造成人体的呼吸、心血管、神经和免疫系统疾病，相关研究显示空气污染与癌症和早逝等健康风险的发生概率显著相关，其中细颗粒物对人体健康的不利影响最为显著，是最具代表的污染物，本章基于 PM_{2.5} 达到 WHO-III 标准的排放情景得到的污染物浓度分布及其相对于 2017 年的下降，初步估算了达标情景的健康收益。

7.1.1 空气污染改善健康收益评估方法与基础数据

(1) 评估方法

环境健康风险评估通过采用流行病学研究得到的污染物浓度与健康风险之间的暴露-响应关系，在主要考虑 PM_{2.5} 的健康风险包括早逝和疾病时，采用泊松回归的相对风险模型，得到基本人群健康风险如下：

$$Y = Y_0 \exp(\beta \Delta PM)$$

式中 Y 为 PM_{2.5} 实际浓度下的人群健康风险； Y_0 为 PM_{2.5} 参考基准浓度下的人群健康风险； β 为暴露-响应系数； ΔPM 实际 PM_{2.5} 浓度与基准 PM_{2.5} 浓度的差值。由此得到的 PM_{2.5} 浓度降低的健康收益为：

$$\Delta Y = Y_0 - Y = Y_0(1 - \exp(\beta \Delta PM))$$

式中 ΔY 为控制政策下健康效益，其它变量同上。

若同时考虑空气污染导致的早逝、呼吸系统疾病和心脑血管疾病等多方面的影响，再结合每例疾病的货币化成本，得到的空气污染控制的货币化总健康收益如下：

$$B = \sum_{i=1}^n C_i \cdot \Delta Y_i \cdot Pop$$

式中， C_i 为每一项健康影响的货币化成本， ΔY_i 为每一项健康影响的发生率减少量， Pop 为研究区域人口分布。

(2) 健康终点的基准发生率和暴露-响应系数

健康效应的基准发生率和暴露-响应关系是研究的关键参数。基准浓度下的暴露-响应系数，需要全国范围内大规模的人群队列研究、个体和人群的暴露途

径研究、暴露量评估以及进一步的污染物对人体健康的影响机制的研究等。健康风险基准发生率由于缺乏各地市的详细数据，项目采用《广东省卫生健康统计年鉴 2017》(对应 2017 年) 的全省平均统计数据，关键参数见表 7-1，包括广东省所有医疗机构门诊和住院人次、不同疾病住院人次的比例、广东省常住人口等统计数据，确定早逝、因心血管疾病和呼吸疾病导致的住院的基准风险为 0.45%、1.99% 和 2.03%，相应参数见表 7-2。

表 7-1 健康风险基准发生率主要基础参数

关键参数	数值	单位
常住人口	11169	万人
死亡率	0.45%	
住院人次	1634.7	万人次
呼吸系统疾病占比	13.2%	
心脑血管疾病占比	13.5%	
内科门诊人次	6518.6	万人次
儿科门诊人次	3164.1	万人次

PM_{2.5} 的暴露-响应系数来自谢鹏等 (2009, 2010)、黄德生等 (2010)、刘晓云等 (2010)、陈仁杰 (2013) 等不同研究者在北京、上海、广州等大中城市开展的队列研究，主要参数如表 7-2，可以看到，项目采用各研究平均值，PM_{2.5} 每增加 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 导致的早逝、呼吸系统和心脑血管疾病住院率分别增加 0.296%(0.076%-0.504%)、0.109%(0.000%-0.221%) 和 0.068%(0.043%-0.096%)。

表 7-2 广东省空气污染基准风险和暴露-反应关系

	健康效应 终点	暴露-反应关系数		95%CI
		(β^*)		
死亡率		0.0045	0.00296	0.00076-0.00504
住院率	呼吸系统疾病	0.0175	0.00109	0.00000-0.00221
	心脑血管疾病	0.0168	0.00068	0.00043-0.00093
门诊率	内科	0.5836	0.00049	0.00027-0.00070
	儿科	0.2833	0.00056	0.00020-0.00090

* β 为 PM_{2.5} 每增加 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 导致的新增发生率

(3) 健康终点损失的货币化方法

在获取不同污染水平下早逝和疾病发生率的变化之后，还需要进一步计算货币化成本。货币化成本的估算通过支付意愿法（WTP）、疾病成本法（COI）和人力资本（HC）等方法得到。支付意愿法主要通过问卷调查，统计公众愿意为保护和改善健康支付的货币，来计算生命和健康价值；疾病成本法和人力资本法一般通过计算生病导致的住院、诊疗成本、误工成本等来估算健康的货币化损失。

因为 WTP 可以较为全面评估研究对象的统计生命价值，在本研究中，对于空气污染导致的早逝，采用 WTP 法进行计算。由于国内相关的调查数据还比较有限，调查对象年龄、教育程度、人均年收入、健康及家庭因素等对统计结果影响较大，结果还有很大的不确定性。曾贤刚等（2010）研究显示的我国空气污染健康损失的统计生命价值为 100 万元/年；徐晓程等（2013）分析了中国 VSL 及其主要影响因素，结果显示平均 VSL 为 86 万元，其中城镇为 159 万元；谢旭轩（2011）采用 WTP 方法估算的北京市空气污染对居民造成早逝损失的统计生命价值（value of statistical life, VSL）为 168 万元；刘帅等（2016）采用“工资-风险”模型得到的 2014 年 VSL 为 590 万元，而采用人力资本法，得到的为 60.7 万元；总体来看，不同研究者在不同年份的研究结果显示的统计生命价值（VSL）有很大的不确定性。综合各研究成果，此处设定 2010 年北京平均的 VSL 为 170 万元。

考虑地区的发展差异和时间差异，使用如下所示的公式计算珠三角地区各城市的统计生命价值。

$$VSL = VSL_{base} \cdot \left(\frac{I}{I_{base}} \right)^e \cdot \frac{CPI}{CPI_{base}}$$

式中， VSL_{base} 为基准统计生命价值， I 和 CPI 分别为用地区人均可支配收入和年度 CPI 指数（1978 年 $CPI=100$ ）， e 为弹性系数，一般取 1。

综合上述方法和基础数据，得到珠三角地区 2017 年的平均统计生命价值（VSL）即空气质量改善避免的早逝的单位健康效益为 232 万元，不确定性达到 $\pm 50\%$ 。

研究对居民空气污染引起的住院与门诊所带来的损失采用疾病成本法计算，计算方法如下所示：

$$C_i = C_{pi} + GDP_p \cdot T_i$$

其中, C_i 为某健康终点 i 的单位经济损失; C_{pi} 为健康终点 i 的单位病例医疗费, 住院成本和门诊费用来源于《广东省卫生健康统计年鉴 2018》, 包括不同疾病的住院和药品等成本, 年鉴结果显示 2017 年广东省平均诊疗成本为 11374 元, 其中广州的住院成本大于 18000 元, 单人次门诊费用各地区在 170-350 元每人次之间, 深圳地区门诊费用最高; GDP_p 为人均日误工成本 (元/ (人·日)), T_i 为因治疗健康终点 i 导致的误工时间, 对于住院的误工天数采用《广东省卫生健康统计年鉴 2018》的统计的不同疾病的平均住院天数, 呼吸道和心脑血管疾病平均住院时间为 7-9 天, 门诊直接采用 1 天来计算, 各市 GDP_p 数据来自《广东省统计年鉴 2018》, 从 140 元/ (人·天) 到 420 元/ (人·天)。

综合上面的各地区的数据, 得到空气污染引起的住院成本, 心血管疾病的成本在 1.9-2.7 万元, 呼吸系统疾病的成本在 1.2-1.6 万元, 每例门诊的成本 300-800 元。

(4) $PM_{2.5}$ 人群暴露

年均 $PM_{2.5}$ 浓度是人群暴露评估的主要参数, 但由于人群暴露途径的多样性, 该方法还有一定的局限性, 交通环境、大点源周边及其室内空气污染与区域平均水平的一致性与差异性是研究者关注的重点之一, 但相关研究的还不充分, 集中于暴露与环境 $PM_{2.5}$ 浓度的相关性或富集因子等参数, 因此本研究采用年均 $PM_{2.5}$ 浓度的变化和区域人口分布作为评估的基础。珠三角 2017 年常住人口达到 6150.54 万人, 其中广州和深圳分别达到 1449.84 万和 1252.83 万。

7.1.2 珠三角地区空气质量改善的健康效益

比较珠三角地区空气质量达到 WHO-III 水平对应的污染物排放情景 (WHO-III 达标情景) 和基准情景模拟得到的年均 $PM_{2.5}$ 浓度, 结合基准发生率和暴露-响应系数, 估算 WHO-III 达标情景下空气质量改善的健康效益。

在 WHO-III 达标情景下, 总的健康效益如图 7-1 所示。对于空气污染引起的早逝, 珠三角地区九市每年因空气质量改善避免的早逝人数为 6550 (1700-11130) 人, 不确定度为 $\pm 70\%$, 广州、深圳、佛山和东莞是其中健康效益最大的四个城市, 占珠三角地区总效益的 74%; 对于空气污染引起的呼吸系统疾病和心脑血管疾病, WHO-III 达标情景下减少的两类疾病住院人次分别为 11040 (500-10341)

和 6080 (3870-8320)，总体上两种疾病分别减少的住院人次的不确定度为 $\pm 95\%$ 和 $\pm 36\%$ 。对于内科和儿科门诊人次，达标情景下的总减少量达到 23.6(11.4-31.4) 万人次，内科和儿科分别为 15.2 (8.4-21.8) 万人次和 8.5 (3.0-13.6) 万人次，从各地市来看，广州、深圳、佛山和东莞占比为 79%。

结合健康损失对应的单位货币化成本，估算得到的珠三角地区每年的综合健康效益为 167 (65-267) 亿元。各健康效应的货币化收益如图 7-1 所示，可以看到，空气质量改善避免的早逝的货币化效益最大，达到 162 亿元，占总健康效益的 97%；住院和门诊减少的货币化效益分别为 3 亿元和 1.4 亿元。考虑综合单位成本估算和避免的损失的估算的不确定，总成本估算的不确定性为 $\pm 60\%$ 。

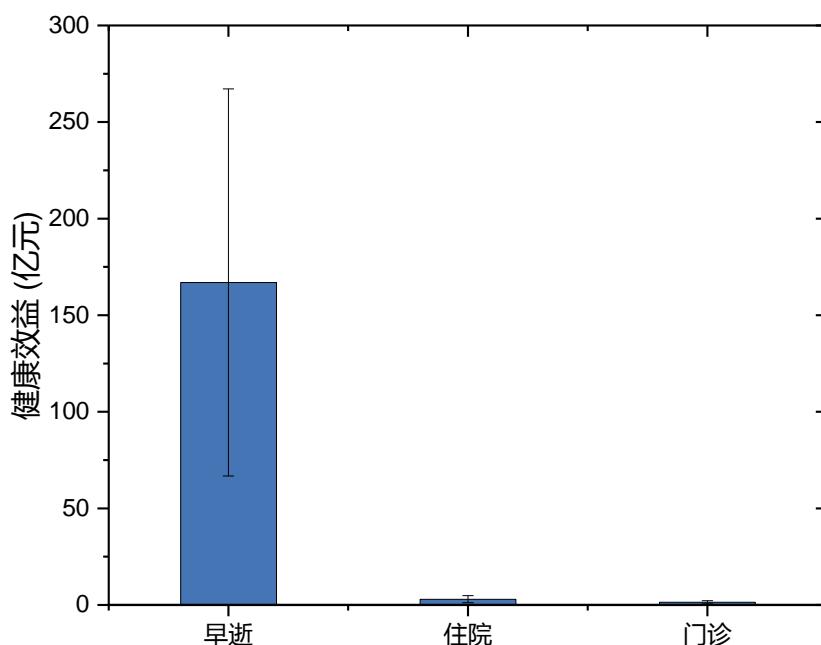


图 7-1 珠三角地区 WHO-III 达标情景下的货币化健康效益

由于年均空气质量模拟、基线发生率、暴露-响应关系、单位货币化成本和人口分布数据等多方面的数据都存在较大的不确定性，特别是对空气污染导致的早逝和疾病的暴露-响应关系的研究还很不充分，本研究还有很大的不确定性，还需要进一步完善。

7.2 达致 WHO-III 目标的 CO₂ 协同减排效应评估

温室气体种类和来源较广，参考《省级温室气体清单编制指南（试行）》（在本节中简称《指南》）相关规定和项目研究基础，分析基准年和 2035 年达标推荐情景下化石燃料燃烧和工业生产过程的二氧化碳的协同减排。

化石能源燃烧主要涉及能源工业（石化和电力等）、农业、工业和建筑业、交通运输、服务业和居民生活等部门；工业生产包括钢铁、有色金属、化工、建材、纺织、造纸及纸制品和其它行业。《指南》中温室气体排放相关行业和国民经济行业分类有很好的对应关系，而本研究的产业结构、交通运输和能源消费情景也是基于国民经济行业分类，因此两者有较好的一致性，可方便进行温室气体排放的估算。

7.2.1 二氧化碳排放估算方法

(1) 化石燃料燃烧

化石燃料燃烧的 CO₂ 排放量采用以详细技术为基础的部门方法。该方法基于分部门、分燃料品种、分设备的燃料消费量等活动水平数据以及相应的排放因子等参数，通过逐层累加综合计算得到 CO₂ 排放量，电力行业、工业锅炉、机动车的 CO₂ 排放均采用此方法。

$$E_{CO_2} = \sum \sum \sum EF_{i,j,k} \times Activity_{i,j,k}$$

式中：

EF：排放因子(kg/TJ)；

Activity：燃料消费量(TJ)；

i、j、k：部门、燃料品种和技术类型。

化石燃料燃烧的排放因子基于行业单位热值含碳量和燃烧过程中的碳氧化率来估算，典型部门的排放因子估算的关键参数如表 7- 3 所示。：

表 7- 3 主要能源利用行业 CO₂ 排放因子估算基础参数

部门	单位热值含碳量(吨碳/TJ)			碳氧化率(%)		
	烟煤	原油	天然气	烟煤	原油	天然气
能源与工业部门	发电锅炉	27.49	20.08	15.32	98.7	98
	工业锅炉	27.49	20.08	15.32	87.8	98
	高炉	25.8	20.08	15.32	90.6	98
	氧化铝回转窑	25.59	20.08	15.32	98	99
	水泥回转窑	26.24	20.08	15.32	99	98
纺织业	26.18	20.08	15.32	86.3	98	99

造纸及纸制品业	26.18	20.08	15.32	86.3	98	99
建筑业	25.77	20.08	15.32	86.3	98	99
航空		20.08	15.32		98	99
公路		20.08	15.32		98	99
铁路		20.08	15.32		98	99
水运		20.08	15.32		98	99
服务业及其他	25.77	20.08	15.32	86.3	98	99
居民生活	25.77	20.08	15.32	86.3	98	99
农、林、牧、渔业	25.77	20.08	15.32	86.3	98	99

(2) 工业生产过程

钢铁和水泥、石灰等建材的生产过程中除能源消耗之外，原料的化学反应也会产生 CO₂ 排放，是珠三角地区另一个重要的 CO₂ 来源。工业生产过程 CO₂ 排放计算的一般方法如下：

$$E_{CO_2} = EF \times AD$$

式中：

E_{CO₂}：工业生产过程二氧化碳排放量；

AD：产品产量或重要原料消耗量；

EF：平均排放因子。

主要产品生产过程的排放因子参数如表 7- 4 所示。

表 7- 4 工业生产过程 CO₂ 排放因子

行业	单位	数值
水泥生产	吨二氧化碳/吨熟料	0.538
石灰生产	吨二氧化碳/吨石灰	0.683
钢铁生产	石灰石	吨二氧化碳/吨石灰石
	白云石	吨二氧化碳/吨白云石
电石	千克二氧化碳/吨电石	1154

7.2.2 二氧化碳协同减排量

区域二氧化碳排放的主要来源包括能源活动、工业生产过程、农业、土地利

用变化和林业、废弃物处理五个方面，珠三角达致 WHO-III 目标的综合策略情景中 CO₂ 排放的变化所涉及的主要是能源活动和工业生产过程。此外，考虑到电力产品的特殊性，还需要评估电力调入所带来的二氧化碳间接排放量。

在不考虑珠三角外围和省外输送电力的间接 CO₂ 排放的情况下，基准年和 2035 年达标情景下的化石能源 CO₂ 排放如图 7-2 所示，可以看到，2017 年能源消费的 CO₂ 排放约 2.55 亿吨，2035 年在化石燃料消费增长 6.7% 的情况下，CO₂ 排放下降 8.4%，降至 2.33 亿吨。从排放结构来看，煤炭 CO₂ 排放占比从 49% 降至 16%，天然气则从 12% 增加到 35%。天然气单位热值 CO₂ 排放仅为煤炭的 55% 左右，“煤改气”在减少空气污染物排放的同时，也降低了 CO₂ 的排放量。

从工业生产方面来看，2017 年，水泥生产是珠三角地区最重要的 CO₂ 排放源，达到 1650 万吨，其它行业的 CO₂ 排放相对较小，其中钢铁和石灰生产的排放分别为 26 万吨和 31 万吨。2035 年达标情景中产业政策调整强度较大，珠三角加快上述行业的退出，会带来明显的 CO₂ 减排效益。

参考《指南》中广东省平均电力 CO₂ 排放指标，2017 年珠三角地区输入电力的间接 CO₂ 排放约为 0.75 亿吨。在 2035 年情景下珠三角地区核能、太阳能等清洁能源发电量将增长 100% 左右，在电力需求增长 60%，本地化石能源发电增长较小的背景下，输入电力约增长 73%，电力消费带来的间接 CO₂ 排放与输入电力的发电结果有很大关系。若考虑输入电力清洁能源的比例维持现状，则电力消费带来的间接 CO₂ 排放将达到 1.31 亿吨；若考虑随着珠三角外围以及西电能源结构改善，清洁能源比例提升至 80% 以上，则电力消费带来的间接 CO₂ 排放将降至 0.35 亿吨。

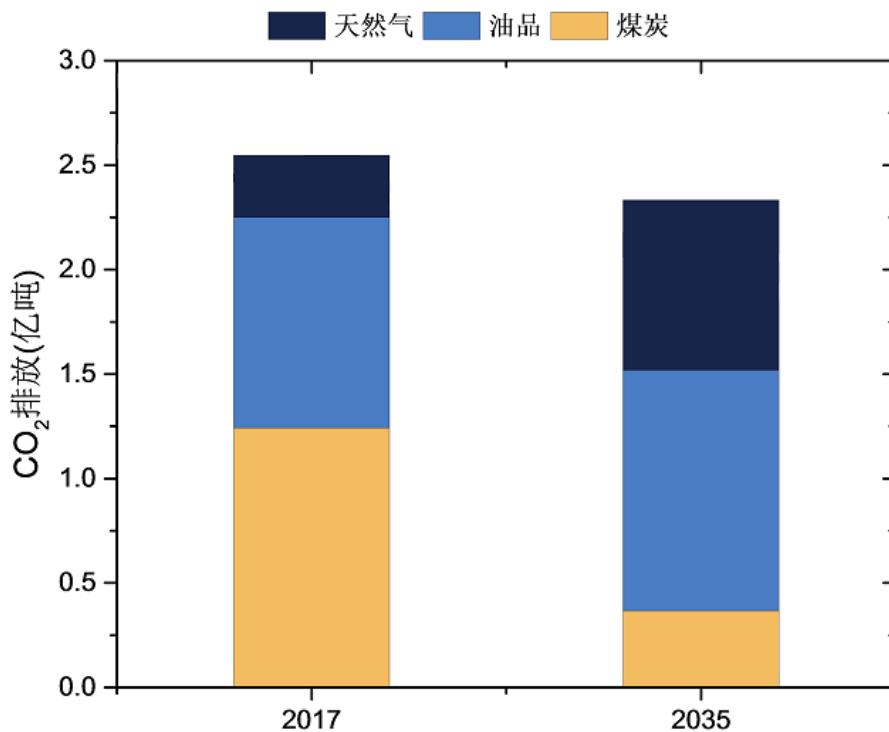


图 7-2 珠三角地区能源消耗 CO₂ 排放变化（不包括电力的间接 CO₂ 排放）

综上，在 2035 年达标情景带来的本地 CO₂ 协同减排量约为 3840 万吨，而电力的间接排放则取决于珠三角外围和西部输入电力的清洁化比例。

8 珠三角空气质量达到 WHO-III 水平的策略建议

从以上研究可以看出，在 2035 年空气质量达到 WHO-III 水平对珠三角而言是一个很高的目标要求。一方面，基于情景模拟分析提出的能够达致 WHO-III 目标的综合策略情景，是所设计的三类情景中与珠三角目前的经济社会发展现状差距最大、调整力度最强的，情景中的部分策略实现难度较大；另一方面，珠三角外围区域能否在国家的统一部署下实现综合策略情景中的减排目标，对珠三角能否实现 WHO-III 目标有重要影响。建议珠三角要积极与周边区域和省份联动开展协同减排和联防联控，并争取国家或多个省市联合提出了推动珠三角空气质量先行示范的省际协同减排策略；珠三角本地则要推动生产生活方式发生转变并不断提升各类污染源的治理水平。鉴于本研究对于产业、能源、交通结构的情景分析和设计还存在一些不足，部分推荐策略在既定的区域经济社会发展目标下难以实现，周边地区的减排力度是否能够实现取决于国家的统一部署，需要考虑对区域空气质量改善的分阶段和最终目标进行适当优化和调整，为此我们也提出了区域空气质量分阶段改善的目标策略。

8.1 保障珠三角空气质量先行示范的省际协同减排策略

珠三角 $PM_{2.5}$ 背景浓度的模拟研究表明，其它省份维持现有的排放水平下，仅依靠珠三角本地减排，区域空气质量无法达致 WHO-III 目标。情景分析的结果显示，在全国各省份 $PM_{2.5}$ 平均浓度降至 $35\mu g/m^3$ 的排放结构下，即便珠三角区域内在一定社会经济发展目标约束下进行了大规模的结构减排，但仍无法实现 WHO-III 目标。由此可见，珠三角要实现 WHO-III 目标必须加强与周边区域的协同减排。

从珠三角周边地区污染传输特征看，跨省协同减排需要联合的重点省份为广东省周边的江西、福建和湖南，以及东部的安徽、浙江和江苏。珠三角需要在大力推动本区域结构减排的基础上，加强与上述省份的大气污染防控交流与合作，合理设定区域联防联控的边界，建立起有效的区域联防联控机制，共同向更低浓度水平的空气质量目标迈进。情景中所述的其它省份的减排需求能否实现，还有赖于国家层面对空气质量持续改善目标的统一部署和规划。

8.2 大湾区优质空气质量下生产生活方式转变策略

8.2.1 产业结构重大调整方向

（1）大力推动产业转型升级，优化产业布局

推动产业高端化、智能化、绿色化、集约化发展。加快发展现代服务业，推动生产性服务业向高端化、专业化发展，到 2035 年第三产业的占比提升至 68%。以新一代信息技术、高端装备制造业、生物医药产业、新材料产业、节能环保产业、数字创意、新能源产业、新能源汽车产业和卫星及应用产业等战略新兴产业为重点，培育壮大战略性新兴产业，新兴行业增加值在工业增加值中的占比提升至 95% 以上。

以粤港澳大湾区创新发展为契机，打造“三带一区”的产业布局，即珠江东岸高端电子信息制造产业带、珠江西岸先进装备制造产业带、沿海石油化工及新材料制造产业带以及环珠江口先进轻纺制造及生物医药产业集聚区。珠三角九市中，广州以汽车制造、新型显示、人工智能等为重点领域发展以高端装备为主的先进制造业；深圳重点发展新一代信息技术、新材料、生物医药等战略新兴产业；珠海以临海装备、智能制造装备和高端医疗器械等为重点逐步扩大智能精密装备产业规模；佛山以装备制造、汽车制造、新材料等为重点着力构建先进制造业产业集群；肇庆重点培育新能源汽车、先进装备制造、节能环保等三个产业集群；东莞以新一代信息技术、高端装备制造、新材料、新能源、生命科学和生物技术等五大领域作为重点新兴领域；惠州在夯实石化、电子两大支柱产业的基础上，推动汽车与装备制造、LED、生物医药等产业成为新的支柱产业；中山以智能家电、生物医药、装备制造等为重点构建以高端制造为主体的产业体系；江门重点在生物医药、新能源新材料、海洋产业等领域谋划发展新兴产业。

（2）加快传统行业提升改造和落后产能的淘汰退出

制定范围更广、标准更高的落后与过剩产能淘汰政策，加大传统行业中落后产品、装备、技术、工艺淘汰力度，加快推动污染产能和过剩产能主动退出。对于优势传统行业，强化技术改造，推广应用信息技术，推进绿色化改造，利用珠三角的技术、管理、营销、资金、创新等优势和粤港澳大湾区建设的契机，促进优势传统产业走上创新型、效益型、集约型的发展道路。到 2035 年，除个别工艺先进、节能环保水平高的优质企业外，水泥、陶瓷、玻璃等建材行业、造纸、钢铁等基本从珠三角地区淘汰退出。

8.2.2 交通出行方式革新路径

(1) 货物运输

加快普速铁路运能释放和珠三角航运枢纽基础设施建设、不断完善多式联运体系，着力推进大宗货物运输“公转铁、公转水”发展方向，至 2035 年铁路和水路货运量分担率分别提高至 9% 和 38%，受铁路和水路货运运能和需求的提升影响，长途货运中公路运输需求下降、中短途货运需求增速放缓，至 2035 年公路货运量分担率降至 52%。

(2) 城际旅客出行

加快高铁、动车、城轨等高快速铁路逐步成网和开通运营，着力推进城际旅客出行“公转铁”发展方向，至 2035 年城际旅客出行选择铁路的比例达到 50%，取代客车、私人小汽车等公路出行成为最主要的出行方式，公路出行分担率降至 38%。

(3) 城市内居民出行

持续推进公共交通基础设施建设并逐步完善，公共交通领域的运能和运量不断增加、不同交通运输方式间的换乘更加便捷，进一步推进智能化技术在交通管理体系中的应用，公共交通组织方式不断优化、单位时间内的运行效率显著提升，公共交通可以很好地满足人们方便、快捷、舒适的出行需求，城市居民绿色出行习惯基本养成，短途一般采用步行或自行车出行，中长途优先考虑地铁、公交车等公共交通出行方式，公共交通机动化出行分担率不断提升并达至国际先进水平，至 2035 年城市居民日常出行选择公共交通的比例达到 70% 以上，其中轨道交通取代私人小汽车成为最主要的机动化出行方式。

8.2.3 能源结构大幅转变策略

产业和交通结构调整，其中传统高耗能行业向新兴行业的转型、铁路、城市轨道交通对道路交通的部分替代，是能源结构和优化结构的关键因素。在此基础上，2035 年能源结构转变主要有以下关键因素。

(1) 加快能源清洁化步伐，控制煤炭消费总量

在现有电力发展规划的基础上，进一步加快燃煤电厂退役步骤，在 2035 年之前，将燃煤电厂发电量占比降至 5-6% 的水平。同时进一步减少传统行业煤炭的使用，争取到 2035 年煤炭 100% 用于发电或集中供热，工业行业全面实现天然

气化和电气化。交通运输工具电气化水平迅速提升，至 2035 年铁路机车、公交车和出租车全部实现电动化，私人小汽车的电动化率达到 60%。

（2）发展节能技术，提高能源利用效率

新兴行业同样也是能源消耗大户，在相关产业不断发展的大背景下，发展更节能的生产技术，提高能源利用效率是下一阶段能源总量保持平稳增长的关键；随着人口增长和经济水平的提高，商业和民用能源增长也比较显著，需提高建筑能源利用效率。

（3）提高核能、可再生能源和其它新型绿色能源比例

核能和风电、光伏发电、水电等清洁能源具有很低的污染物和温室气体排放，各地区资源禀赋，鼓励不同形式的电力能源发展，同时，对氢能等新型能源利用形势，加强产业链相关企业的资助与扶植，根据技术发展及时调整相关能源政策。

（4）提高区域外部电力供应能力

区域外部的电力供应预计在 2035 年将占到珠三角地区电力需求的 50%左右，将区域外电力的供应能力提升到 8000 万千瓦，争取西电、粤东西北地区电力输入，保障珠三角地区能源供应安全。

8.3 广东省污染源严格管控治理及联防联控策略

8.3.1 空气质量地方标准升级策略

科学合理的制定环境空气质量标准可以促进区域空气污染浓度由高到低转变，其最终目的在于保护人民群众的健康。国家/地区的空气质量标准是根据所采用的权衡健康风险的方法、技术可行性、经济方面的考虑以及其他各种政治和社会因素等来制定的，而这些因素反过来又取决于国家/地区的社会经济的发展水平和空气质量管理水平。从美国加州的空气质量标准的制定经验看，通过执行比国家标准更为严格和完善的空气质量标准，有助于推动区域空气质量的持续改善。

珠三角目前的 PM_{2.5} 浓度水平已持续低于国家环境空气质量二级标准的要求，在空气质量管理方面，也提出了以粤港澳大湾区为依托，建设大气污染防治先行示范区的目标。无论是从持续改善空气质量，保障人民身体健康的角度考虑，还是从进一步提升区域空气质量管理水平的角度考虑，珠三角地区都可以将率先出

台环境空气质量的地方标准作为一项重要策略。对珠三角地区浓度水平已稳定达标的污染物，在地方标准中可收严浓度限值要求。对国家标准中尚未关注但对人体健康有害的污染物，在地方标准中可率先对其浓度限值做出规定。

此外，国家标准的适时收严可成为强有力的驱动力，推动大范围区域的空气质量不断改善，从而为珠三角等空气质量水平较优的地区构建更为有利外部排放结构，推动此类地区向更低的浓度水平目标迈进。

8.3.2 污染源从严管控和深度治理策略

全面实施污染源末端排放控制的最佳可行技术，全面淘汰中小锅炉及落后炉型，工业锅炉、石化行业排放执行大气污染物特别排放限值，水泥、陶瓷、玻璃等建材实施超低排放；实施工业挥发性有机物全过程控制，机械制造、运输设备制造、包装印刷行业的低（无）VOCs 含量涂料的使用比例分别提升至 50%、50% 和 70% 以上，力争集装箱制造、汽车制造行业水性涂料的使用比例提升至 100%；涉 VOCs 重点行业的挥发性有机物废气处理大量采用热力燃烧法、催化燃烧法等高效治理技术，VOCs 废气收集效率和处理效率大于 90%。珠三角区域内保留的燃煤电厂均实施超低排放，燃气电厂全部采用选择性催化还原法与低氮燃烧联用等此类高效治理技术。

8.3.3 区域及城市联防联控策略

从珠三角周边地区 PM_{2.5} 和 O₃ 的区域传输特征看，跨省的长距离传输对珠三角地区 PM_{2.5} 的贡献占 30% 左右，省内粤东西北地区对珠三角的贡献占 10% 左右，特别是粤北和粤东地区位于 PM_{2.5} 的主要输送通道上，此外珠三角城市之间的相互传输影响也较为明显；O₃ 区域传输方面，广东省外的长距离传输对珠三角的影响较 PM_{2.5} 更为显著，省内的影响主要来源于粤北和粤东地区。

因此，广东省内联防联控策略的重点仍是珠三角九市之间的联防联控。现阶段珠三角各地市内部区县间污染物浓度存在明显差异，存在同一个地级市的区县间污染物浓度在不同目标区间，容易导致地市污染物浓度改善状况不达预期目标效果，建议参照美国空气质量管理的手段，将珠三角各地市内部采用跨区域管理模式，尝试以细分到区的行政单元空气质量状况为主，划分空气质量达标与非达标区域，针对不同区域提交各自设定的达标目标及实施政策。

珠三角若要在 2035 年实现空气质量达到 WHO-III 水平的目标，非珠三角地区必须以 2035 年空气质量达致 $20\mu\text{g}/\text{m}^3$ 为目标实施减排， SO_2 、 NO_x 、 PM 和 VOCs 等主要污染物较 2017 年需进一步减排 20~30% 协同减排需要控制的重点区域为粤北地区，其次为粤东地区。在污染天气时段，珠三角城市需要联合粤北和粤东地区共同执行应急减排方案，共同分摊减排压力。

8.3.4 粤港澳大气污染防控合作策略

未来珠三角将以粤港澳大湾区为依托建设大气污染防治先行示范区，日益突显的区域污染问题也需要通过加强粤港澳大气污染防控合作来为 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 协同防控提供策略支持和科技支撑。在“一国两制、三个关税区和三种法律体系”背景下，需要研究探索粤港澳大湾区区域大气联防联治体制机制创新。建议由国家推动三地政府共同设立或在区域综合事务管理机构下组建专门的区域大气协同防控委员会，作为区域性跨界大气污染防控的职能机构；推动建设三地共同参与、共同资助、独立运作的实体技术支撑机构，联合开展跨界大气问题的研究；探索建立湾区统一的环境质量标准和评价体系，研究实施粤港澳三地大气污染防治统一规划、统一标准、统一监管、统一评估，在湾区率先试行与国际接轨的跨境大气污染协同管理体系。

8.4 区域空气质量分阶段改善目标策略

珠三角地区若要在 2035 年实现 WHO-III 目标，则 2018-2035 年珠三角 $\text{PM}_{2.5}$ 的年均改善幅度需达到 4.3%，相对 2015~2018 年年均改善 2.5% 的情况，未来珠三角需要在外围协同减排的背景下，实施比国家大气污染防治行动计划期间更大力度的结构调整和治理监管。考虑到珠三角所处的社会发展阶段以及产业、交通、能源结构与先进地区的差距，2025 年以前空气质量达到 WHO-III 水平的结构调整策略尚处于部署阶段，该阶段 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度预计将维持目前的改善幅度，以不低于年均改善 2.5% 的速度在 2025 年降至 $25\sim26\mu\text{g}/\text{m}^3$ 左右；2026-2035 年间，随着结构调整策略减排效果的逐步显现，年均改善幅度可逐步提高至 5% 的水平，到 2030 年 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度降至 $18\sim20\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，在 2035 年实现 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度降至 $15\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

对于 O_3 而言，WHO 空气质量准则中对 WHO 过渡阶段 O_3 目标要求为 O_3 每日最高 8 小时平均浓度不高于 $160\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，与珠三角目前执行的国家空气质量

标准中对 O_3 每日最大 8 小时平均浓度要求一致。WHO 认为 O_3 对人体健康的危害主要源于短期暴露，未对 O_3 年浓度的评价方式和浓度限值作出规定。因此，在制定珠三角空气质量改善目标时，仍沿用我国环境空气质量评价技术规范，将 O_3 日最大 8 小时滑动平均值的第 90 百分位数作为年评价指标。考虑到目前珠三角 O_3 浓度尚未进入下降通道，且治理过程较为漫长且困难，建议将 O_3 的分阶段目标设定为：2025 年进入下降通道，2035 年 O_3 -8h 第 90 百分位数控制在 $160\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以内。

需要指出的是，尽管日本东京湾区、美国纽约州等发达地区的经验显示，在系统推动生产生活方式转变的情况下，持续较大幅度的改善在较低的浓度水平也可能实现，我们的研究中也给出了珠三角实现 WHO-III 目标的 2035 年综合策略情景，但考虑到珠三角经济社会发展的现状，该情景中的部分策略实现难度较大，在 2035 年实现 WHO-III 目标对珠三角来说有相当大的挑战，建议将珠三角达致 WHO-III 水平的目标年适当延后。此外，正如我们在本章的第一点策略所提到的，珠三角周边区域的协同减排力度对珠三角能否实现 WHO-III 目标有着重要影响，因此在国家层面对空气质量目标改善进程的统筹安排和部署下，对珠三角空气质量有重要影响的省份空气质量目标的收严程度也是影响珠三角达致 WHO-III 目标的重要因素，在本研究所需的省际协同减排在国家部署未得以实现的情景下，珠三角也难以在 2035 年实现 WHO-III 目标。基于以上策略实现难度的考虑，我们建议，在国家及周边省份减排力度有限的情况下，从当前环境管理的角度出发，将珠三角空气质量改善的中长期目标定为：到 2025 年，珠三角区域 $PM_{2.5}$ 浓度降至 $28\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，臭氧污染恶化趋势基本得到遏制；到 2035 年，珠三角区域 $PM_{2.5}$ 浓度降至 $20\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，臭氧污染进入下降通道。

参考文献

- [1] 中共中央, 国务院. 粤港澳大湾区发展规划纲要[EB/OL]. http://www.gov.cn/gongbao/content/2019/content_5370836.htm.
- [2] 中共中央, 国务院. 关于支持深圳建设中国特色社会主义先行示范区的意见[EB/OL]. http://www.gov.cn/xinwen/2019-08/18/content_5422183.htm
- [3] 谢敏, 区宇波, 陈斐. 珠三角区域环境 $PM_{2.5}$ 细颗粒物污染特征分析[J]. 环境, 2011(S1):32-34.
- [4] 岳玎利, 钟流举, 张涛, 等. 珠三角地区大气 $PM_{2.5}$ 理化特性季节规律与成因[J]. 环境污染与防治, 2015, 37(4):1-6.
- [5] 张夏夏. 基于长时段多站点组分监测的珠三角颗粒物来源解析研究[D]. 2018. 华南理工大学.
- [6] 薛文博, 付飞, 王金南, 等. 中国 $PM_{2.5}$ 跨区域传输特征数值模拟研究[J]. 中国环境科学, 2014(6):1361-1368.
- [7] Lu X, Chen Y, Huang Y, et al, Differences in concentration and source apportionment of $PM_{2.5}$ between 2006 and 2015 over the PRD region in southern China[J]. Science of the Total Environment, 2019, 673:708-718.
- [8] Government of Canada. Agreement between the government of Canada and the government of the United States of America on Air Quality[EB/OL]. [2019-04-20]. <https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/air-pollution/issues/transboundary/canada-united-states-air-quality-agreement.html>.
- [9] EPA. Ozone Transport Commission-NOx Budget Program 1999-2002 Progress Report[R/OL].(2003-03) .https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-08/documents/otcr_report.pdf
- [10] EEA. Air Implementation Pilot[R/OL].(2013-09-07).<https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/58f6afaf-4c21-4314-831f-58c36957fc60>
- [11] EEA. Assessment of ground-level ozone in EEA member countries, with a focus on long-term-trends[R/OL].(2009-05-14).http://ims.eionet.europa.eu/IMS/ISpecs/ISpecification20081014123013/IAssessment1226322854001/view_content.

- [12] Government of Canada. Canada-US air quality agreement: ozone annex. Amending the“ Agreement between the government of Canada and the government of the United States of America on Air Quality” [EB/OL]. [2019-04-30]. <https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/air-pollution/publications/canada-united-states-quality-agreement-ozone-annex.html>.
- [13] 汪小勇, 万玉秋, 姜文, 等. 美国跨界大气环境监管经验对中国的借鉴[J]. 中国人口·资源与环境, 2012, 22(03):118-123.
- [14] United States Environmental Protection Agency. EPA's Role in the North American Commission for Environmental Cooperation[EB/OL]. [2019-12-25]. <https://www.epa.gov/international-cooperation/epas-role-north-american-commission-environmental-cooperation-cec>.
- [15] 孙瑜颢. 欧盟主要国家大气污染治理经验对我国的启示及案例分析[D]. 2015.
- [16] 柴发合, 王晓, 罗宏, 等. 美国与欧盟关于 PM_{2.5} 和臭氧的监管政策述评[J]. 环境工程技术学报, 2013, 3(1):46-52.
- [17] 廖程浩, 曾武涛, 张永波, et al. 美加跨境大气污染防控合作体制机制对粤港澳大湾区的启示[J]. 中国环境管理, 2019, 11(5):32-35.
- [18] 国务院. 国家人口发展规划(2016-2030 年)[EB/OL]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2017-01/25/content_5163309.htm.
- [19] 广东省社会科学院. 广东 2035: 发展趋势与战略研究[M]. 北京:社会科学文献出版社, 2018.
- [20] Mulligan G F. Reprint of: Revisiting the urbanization curve[J]. Cities, 2013, 32: S58-S67.
- [21] 丁俊, 王开泳. 转型期珠三角工业生产空间与工业产业结构的变化及其耦合特征[J]. 中国科学院大学学报, 2017, 34(5):573-581.
- [22] 广东省人民政府. 广东省沿海经济带综合发展规划 (2017-2030) [EB/OL]. http://zwgk.gd.gov.cn/006939748/201712/t20171205_733883.html.
- [23] 广东省人民政府. 珠江三角洲城镇规划一体化发展规划 (2009-2020) [EB/OL]. http://zwgk.gd.gov.cn/006939748/201801/t20180113_748466.html.
- [24] 广东省发展和改革委员会. 粤港澳大湾区构建现代产业体系规划 (2018-2035 年) [EB/OL].

- [25] 向楠, 尤文晓. 国际大城市机动化交通出行方式结构变化特征研究及应用[J]. 交通运输研究, 2017, 3(06): 15-23.
- [26] 刘宇, 吴迎学, 党文峰. 基于多元线性回归的区域物流需求预测研究[J]. 物流工程与管理, 2014, 36(03): 52-54.
- [27] 李晓晖, 谭清美, 赵爱文. 基于因子分析和 Logistic 模型的中国客运量预测[J]. 系统管理学报, 2014, 23(03): 444-450.
- [28] 广州市人民政府. 广州综合交通枢纽总体规划(2018—2035 年) [EB/OL]. <http://www.gz.gov.cn/gzgov/s2812/201901/3d6607dfdd0c40b89ffb74575fbe2559.shtml>.
- [29] 广东省国土资源厅. 《广东省国土规划(2016-2035 年)》[EB/OL]. <http://www.szpsq.gov.cn/gbmxxgk/tdzbj/jt/tzgg/201803/P020180302496254017892.pdf>
- [30] 佛山市交通运输局. 《佛山市“十三五”交通发展规划》[EB/OL]. <http://www.foshan.gov.cn/zwgk/zdxzjc/zxyj/js/201609/P020160924513743812224.pdf>.
- [31] 李瑞敏, 何群, 李帅. 中国机动车保有量发展趋势分析[J]. 城市交通, 2013, 11(05): 69-75.
- [32] 戴帅, 刘金广, 朱建安, 巩建国. 中国城市机动化发展情况及政策分析[J]. 城市交通, 2015, 13(02): 42-47.
- [33] 杨新渥, 王翩然. 基于组合预测的民航运输量分析——以珠三角地区为例[J]. 数学的实践与认识, 2019, 49(08): 301-310.
- [34] 广东省经济和信息化委员会. 广东省工业绿色发展实施方案(2016-2020 年) [EB/OL]. http://zwgk.gd.gov.cn/696453330/201612/t20161226_687015.html.
- [35] 广东省发展和改革委员会. 广东省能源发展“十三五”规划[EB/OL]. http://zwgk.gd.gov.cn/006939756/201807/t20180727_775247.html.
- [36] 广东省发展和改革委员会. 广东省海上风电发展规划(2017-2030 年)(修编) [EB/OL]. http://zwgk.gd.gov.cn/006939756/201804/t20180423_761918.html.
- [37] 环境保护部, 国家发展和改革委员会, 财政部, 等. “十三五”挥发性有机物污染防治工作方案[EB/OL]. http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bwj/201709/t20170919_421835.htm
- [38] 黄德生, 张世秋. 京津冀地区控制 PM_{2.5} 污染的健康效益评估[J]. 中国环境科学, 2013, 33(01): 166-174.
- [39] 谢鹏, 刘晓云, 刘兆荣, 李湉湉, 白郁华. 我国人群大气颗粒物污染暴露-反应关系的研究[J]. 中国环境科学, 2009, 29(10): 1034-1040.

-
- [40] 谢鹏,刘晓云,刘兆荣,李湉湉,钟流举,向运荣.珠江三角洲地区大气污染对人群健康的影响[J].中国环境科学,2010,30(07):997-1003.
- [41] 刘晓云,谢鹏,刘兆荣,李湉湉,钟流举,向运荣.珠江三角洲可吸入颗粒物污染急性健康效应的经济损失评价[J].北京大学学报(自然科学版),2010,46(05):829-834.
- [42] 陈仁杰.复合型大气污染对我国17城市居民健康效应研究[D].复旦大学,2013.
- [43] 曾贤刚,蒋妍.空气污染健康损失中统计生命价值评估研究[J].中国环境科学,2010(02):142-146.
- [44] 徐晓程,陈仁杰,阚海东等.我国大气污染相关统计生命价值的meta分析[J].中国卫生资源,2013(01):72-75.
- [45] 谢旭轩.健康的价值:环境效益评估方法与城市空气污染控制策略[D].北京:北京大学,2011.
- [46] 刘帅,贾志勇,宋国君.人力资本法在空气污染生命健康损失评估中的应用[J].环境保护科学,2016,42(03):48-52.