



广东省城乡规划设计研究院有限责任公司
GUANGDONG URBAN & RURAL PLANNING AND DESIGN INSTITUTE CO.,LTD.



广东省碳排放量与影响因子间 的关系研究及情景预测

Study on the Relationship Between Carbon Emissions and Impact
Factors and Scenario Prediction in Guangdong Province

广东省城乡规划设计研究院有限责任公司

2023.1

GUANGDONG URBAN & RURAL PLANNING AND DESIGN INSTITUTE CO.LTD

January, 2023

项目名称： 广东省碳排放量与影响因子间的关系研究及情景预测

委托方（甲方）： 能源基金会（美国）北京办事处

承担方（乙方）： 广东省城乡规划设计研究院有限责任公司

城乡规划编制资质证书等级： 甲 级

城乡规划编制资质证书编号： 自资规甲字 21440152

技术审定： 周祥胜 正高级工程师-副所长-硕士 城乡规划

技术审核： 汤燕良 高级工程师-副所长-硕士 城乡规划

项目总负责： 肖百霞 工程师-硕士 城乡规划

专业负责人： 刘文凤 高级工程师-硕士 城乡规划

项目组成员： 范诗彤 工程师-硕士 城乡规划

姚梦汝 工程师-硕士 城乡规划

张亚楠 工程师-硕士 城乡规划

李成悦 工程师-硕士 城乡规划

李禅 工程师-硕士 城乡规划

目 录

执行摘要	1
一、 研究背景	9
(一) 国家政策背景	9
(二) 广东政策响应	9
(三) 研究必要性与研究意义	10
二、 研究目标、内容和技术路线	12
(一) 研究目标和内容	12
(二) 技术路线	12
(三) 研究尺度	14
(四) 研究方法	14
三、 数据采集与获取	16
(一) 广东省碳排放量数据	16
(二) 广东省人口、经济数据	16
(三) 广东省建设用地数据	16
(四) 各地市国土空间总体规划数据	17
四、 广东省各地市近十年碳排放效率特征	18
(一) 广东省碳排放量变化时空特征	18
(二) 广东省碳排放效率评价	20
五、 广东省碳排放量与影响因子间的关系研究	24
(一) 影响因子选取	24
(二) 单影响因子分析	25
1、全省层面单因子分析	25

2、地市层面单因子分析	35
(三) 多影响因子分析	43
1、城市主要影响因子分析	43
2、城市特征分析	44
3、同类城市影响因子分析	45
4、多影响因子分析小结	51
六、 广东省碳排放量多情景预测研究	54
(一) 预测情景设置	54
1、情景一（维持现状水平）	54
2、情景二（发展变化水平）	55
(二) 代表城市选取	56
(三) 不同情景预测结果对比	57
七、 结论与建议	59
(一) 结论	59
(二) 政策建议	62
1、省级层面	62
2、城市层面	64
3、标准层面	67
(三) 后续研究方向建议	68
八、 附录	70
(一) 碳排放影响因子共线性检验	70
(二) 碳排放影响因子与影响关系正负特征	76
(三) 参考文献综述情况	79

执行摘要

应对气候变化，力争碳排放在 2030 年前达峰、2060 年前实现碳中和，是实现我国新时期高质量发展的重要议题。广东省是全国经济大省和能源消耗大省，需在社会经济快速发展的同时找准减排降碳的有效路径。本研究基于省域和城市尺度，开展广东省碳排放量与影响因子的关系研究，总结碳排放量在人口、经济、建设用地等不同影响因子作用下的规律特征，并对广东省碳排放量进行多情景预测，为各城市制定差异化的减碳措施提出政策建议，对于推动广东省实现碳达峰碳中和目标具有参考意义。

本研究结合国土空间规划指标体系，选取三大方面的 22 个因子，以 2009–2017 年广东省各地市历史数据为基础，开展广东省碳排放量与影响因子关系的实证研究，构建全省和 21 个地市的多影响因子与碳排放量关系模型，筛选出全省及各地市与碳排放量具有显著相关性的影响因子，并分析各影响因子水平对碳排放影响作用的规律特征。此外，研究选取惠州、肇庆、中山、揭阳等代表城市，结合在编的国土空间总体规划阶段性方案，开展碳排放量多情景预测。根据不同城市的碳排放量影响因子特征，形成差异化、组合式的城市碳排放管理政策，综合运用结构调整、效率提升等方式，提出对碳排放相关影响因子的管控要点。

一、基本结论

（一）广东省经济发展逐渐摆脱高碳排路径依赖

1、广东省 GDP 增速是碳排放量增速的 5 倍，明显高于人口总量增速比与建设用地总量增速比。2009–2017 年，广东省 GDP 年均增速 11.11%，而碳排放量年均增速仅 1.97%，GDP 增速约为碳排放量增速的 5 倍；人口总量年均增速 2.29%，与碳排放量增速大致持平；建设用地总量年均增速 1.61%，略低于碳排放量增速。珠三角和沿海经济带的 GDP 与碳排放量同步高速增长，其中深圳市和东莞市 GDP 增量高但碳排放增量低，绿色低碳发展水平走在全省前列。

2、城市经济发展水平越高，人均 GDP 与碳排放总量的脱钩程度越明显，需重点提高经济欠发达城市的碳排放效率。2009–2017 年，广东省大部分城市均实

现了人均 GDP 与碳排放量脱钩的状态，其中人均 GDP 超过 10000 美元的发达城市（如深圳、珠海、佛山、东莞）已进入强脱钩状态，随着人均 GDP 的增加，碳排放量呈现减少的趋势。同时，部分欠发达城市（如阳江、潮州、揭阳等）的碳排放量仍保持高位增长，局部年份碳排放量增速逐渐接近甚至超过人均 GDP 增速，经济欠发达城市应着重加强对城市碳排放量的引导与管控。

（二）广东省碳排放影响因子在城市之间呈现出分异特征

依据城市人口总量、人均地区生产总值、国土开发强度，本研究将全省 21 个地级市划分为三个梯队，研究发现省域内部经济社会发展水平的差异性对碳排放产生明显作用，使得处于不同发展梯队的城市，影响碳排放量的主要因子各不相同。对于广东省碳排放量与影响因子关系的规律特征，主要有以下几点研究结论：

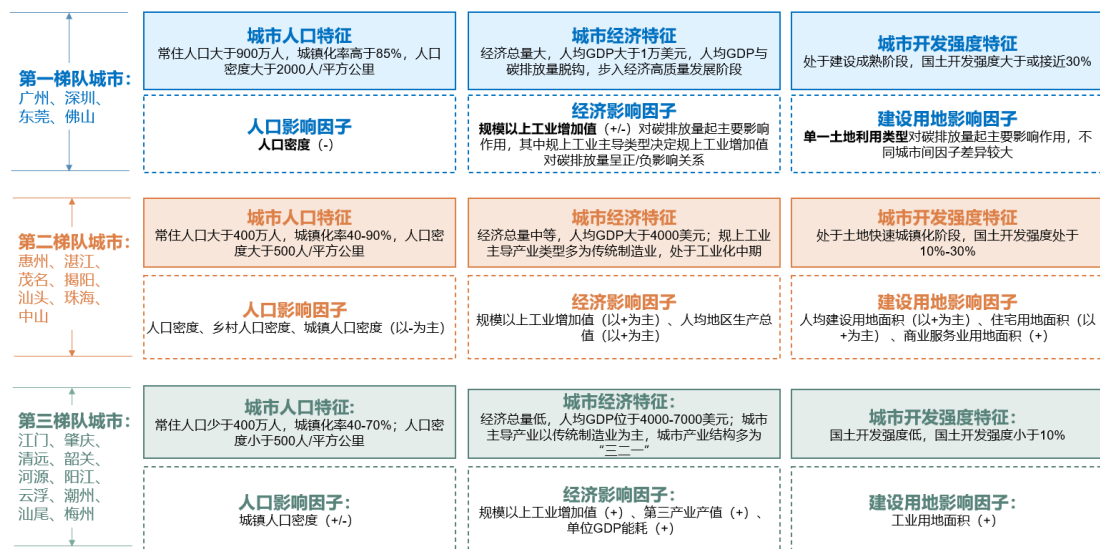


图 1：城市划分结果、特征和影响因子情况

1、建设用地结构对碳排放量的影响作用强于建设用地总量，“双碳”目标下广东省建设用地管控重点应由“控总量”转变为“优结构”。以往研究表明，在全国层面建设用地面积与碳排放量关系显著，当建设用地总量增加 1 倍时，对应碳排放量增加约为 1.7 倍，即建设用地总量的增加推动碳排放量加速增长¹。而本研究发现，在广东省级和市级层面，建设用地总量与碳排放量的相关性均不

¹ 来源：能源基金会于 2021 年 2 月开展的《国土空间用地结构对大气污染物与碳排放的影响研究》，由宇恒可持续交通研究中心、中国国土勘测规划院、生态环境部环境规划院负责。

显著，城市碳排放量主要受一种或几种类型的建设用地面积影响，因此建设用地结构优化是广东自然资源部门支撑实现“双碳”目标的工作重点。

2、不同城市用地结构的差异性导致影响碳排的主导用地类型不同，住宅用地、工业用地、人均建设用地面积对较多城市的碳排放量影响显著。广东省大部分城市的住宅用地和工业用地面积与碳排放量呈现正相关关系；粤东西北外围城市（如江门、汕尾、揭阳、湛江、茂名、阳江）建设用地利用粗放，人均建设用地面积与碳排放量呈现正相关关系。差异化优化各城市建设用地结构有利于实现减碳目标。

3、不同国土开发强度²的城市，影响碳排放量的用地类型存在显著差异。从2009-2017年影响碳排放量的建设用地类型而言，国土开发强度低于10%的城市，碳排放量主要受工业用地面积影响；国土开发强度处于10%至30%的城市，碳排放量主要受住宅用地、商业服务业用地面积影响；国土开发强度高于30%的城市，碳排放量与用地类型关系不紧密。

4、城市人口集聚程度与碳排放量的影响关系呈现出分阶段特征，总体而言人口密度大于1000人/平方公里的城市，碳排放量随人口密度的增加而减少，促进人口向城镇地区集聚有助于控制碳排放量。全省层面而言，城镇人口密度增加、乡村人口密度减少，碳排放量随之减少。城市层面而言，省内常住人口大于900万、城镇化率高于85%、人口密度大于1000人/平方公里的城市，处于城镇人口高度集聚的阶段，人口密度增加，碳排放量随之减少，与现有文献显示超过一定的人均收入水平后，更高密度的城市往往会降低交通、基础设施和住宿方面能源消耗强度，人口密度和人均排放量之间存在着十分显著的负相关关系的结论一致；常住人口位于400-900万之间、城镇化率高于65%的城市，处于城乡差别持续缩小、城镇人口增长速度趋缓的阶段，乡村人口密度增加，碳排放量随之减少；常住人口小于400万、城镇化率低于65%的城市，处于人口规模小、人口向城镇快速集聚的阶段，城镇人口密度增加、乡村人口密度减少，碳排放量随之减少。

² 国土开发强度即城市建设用地总量占行政区域面积的比例。广东国土开发强度低于10%的城市包括汕尾、阳江、云浮、梅州、肇庆、清远、河源和韶关；国土开发强度处于10~30%的城市包括汕头、广州、珠海、揭阳、潮州、湛江、茂名、江门和惠州；国土开发强度高于30%的城市包括东莞、深圳、佛山和中山。

4、全省大部分城市的规上工业增加值与碳排放量呈现正相关关系，而以高新技术产业为规上工业主导产业的深圳、东莞则反之，优化升级规上工业产业结构有助于控制城市碳排放量。全省层面而言，广东省规上工业增加值与碳排放量呈正相关，表明大型工业生产活动是碳排放的主要来源。城市层面而言，粤东西北大部分城市规上工业仍以传统制造业为主，规上工业增加值增加，碳排放量也随之增加；而深圳、东莞通过产业结构高端化有效提升了土地利用和经济产出效率，规上工业以计算机、通信和其他电子设备制造业等高新技术产业为主导，规上工业增加值与碳排放量呈负相关，绿色低碳高质量发展水平领跑全省，表明规上工业产业结构优化升级有助于减缓城市发展客观需求造成的碳排放增长趋势。

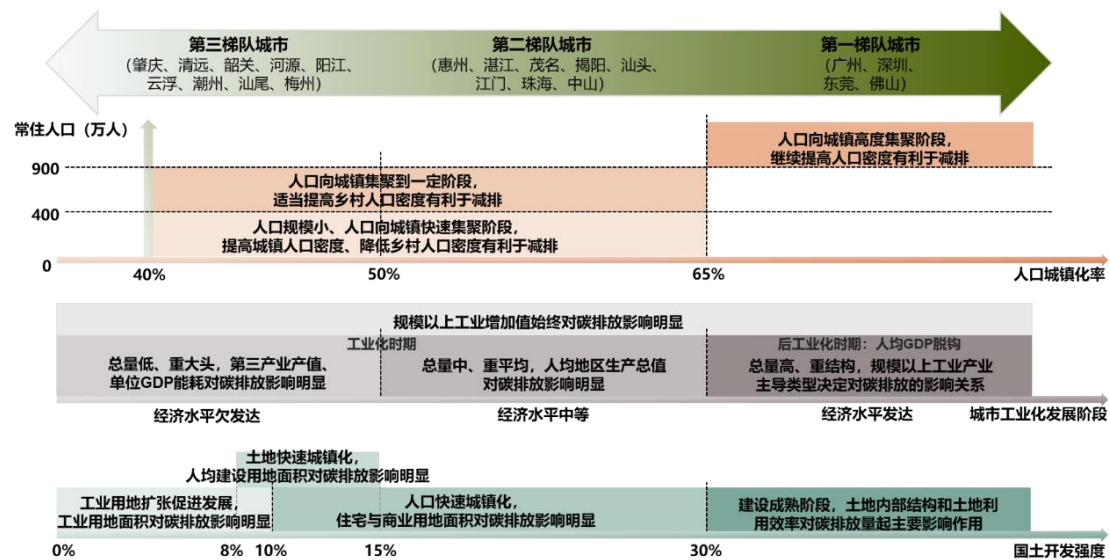


图 2：广东省各城市主要碳排放影响因子与社会经济发展水平的关系图

（三）碳排放量多情景预测结果表明，未来优化建设用地结构是实现广东省双碳目标的有效途径

代表城市 2035 年国土空间总体规划阶段性方案对应的碳排放量情景预测研究显示（见表 1），惠州市与肇庆市 2035 年碳排放情景预测结果远低于相关研究机构的碳排放峰值预测结果，可适当提高对地方碳排放峰值的约束要求；中山市在保持 2020 年土地碳排放强度不变的情况下，碳排放情景预测结果超过达峰预测值，因此需要提升 2035 年土地碳排放效率或者优化用地方案结构（见表 2）。

表 1：代表城市多情景碳排放量预测结果

城市	情景一 2035 年碳排放量预测	情景二 2035 年碳排放量预测	相关研究机构的碳排放峰值与达峰年份预测
惠州市	5396	4082	8585 （2028 年）
肇庆市	1561	1388	2260 （2028 年）
中山市	2433	1887	2332 （2023 年）

注：情景一是考虑建设用地碳排放强度维持现状水平，以 2020 年土地碳排放强度水平为基础，结合各地市阶段性国土空间总体规划土地利用方案进行预测；情景二是考虑人口、经济、建设用地发展水平的变化，基于城市多影响因子与碳排放量实证关系模型进行预测；相关研究机构对比数据是依据《广东省碳排放峰值研究报告》研究结果中对广东省部分城市碳排放峰值与达峰年份预测结果作为情景预测的对比数据。

表 2：代表城市碳排放管理政策建议

代表城市	重点管控用地类型识别	城市碳排放管理政策建议
中山	根据2020年土地碳排放强度测算可得： - 工业用地类型碳排放强度系数最高且现状碳排放总量大，居住用地、公共管理与公共服务用地、商业服务业用地、交通运输用地的碳排放量度较其他城市偏高，因此现状重点管控用地类型为工业用地，同时需提高其他类型建设用地的能源使用效率。 根据2009-2017年广东省多影响因子实证数据碳排放模型： 规模以上工业增加值、交通运输用地、单位GDP能耗与中山市碳排放量呈现正相关关系，其中规模以上工业增加值的正相关影响系数最高； 人口密度与中山市碳排放量呈现负相关关系。	□ 规划工业用地占比高于工业用地结构标准（15-30%），建议在规划用地方案中严控工业用地总量，转变以往分散的工业布局模式，引导工业用地集中布局，发挥规模效应；单位工业用地碳排放强度高，建议加大对工业企业碳排放的监管力度，提高产业准入门槛，大力推行清洁生产，降低工业用地碳排放强度。 □ 规划居住用地、公共管理与公共服务用地、商业服务业用地、交通运输用地的比例均符合用地结构标准，但碳排放强度均偏高，因此建议大力推行绿色生活创建，鼓励发展绿色建筑、绿色社区、绿色学校、绿色商场、绿色出行等，全方位推进经济社会绿色转型。 □ 以规模以上工业碳排放总量控制为重点，鼓励发展高新技术产业；加快建立绿色低碳循环发展的经济体系，持续降低单位GDP能耗水平。 □ 鼓励人口集聚发展，通过提升人口密度、优化人口空间布局，达到抑制碳排放量的效果。
揭阳	根据2020年土地碳排放强度测算可得： 工业用地类型强度系数最高、工业用地现状碳排放总量大，仓储用地碳排放强度较其他城市高；因此现状重点管控用地类型为工业用地、仓储用地。 根据2009-2017年广东省多影响因子实证数据碳排放模型： 城镇人口密度、规模以上工业增加值、商业服务业用地、住宅用地、人均建设用地面积、客运总量、单位GDP能耗与揭阳市碳排放量呈现正相关关系，其中单位GDP能耗的正相关影响系数最高 人口密度与揭阳市碳排放量呈现负相关关系	□ 揭阳规划工业用地占比符合工业用地结构标准（15-30%），工业用地碳排放强度与其他城市相比处于中等水平；规划仓储用地面积较大，围绕揭阳潮汕国际机场打造临空物流园，现状仓储用地的碳排放强度与其他城市相比较，应加强对仓储用地的碳排放强度管控，依托智慧物流等手段，提升物流仓储链条的运转效率，降低过程碳排放。 □ 揭阳提升人口密度，有利于减少碳排放量；揭阳城镇化率处于中游水平，未达到城镇人口集聚提升碳排放效率的拐点，所以城镇人口密度提升仍会促进碳排放量。因此，建议揭阳推动人口向城镇集聚，提升城镇化水平，达到城镇人口集聚提升碳排放效率的拐点；建设用地分配时应向城镇倾斜，为城镇人口提供更多空间城镇。 □ 揭阳的工业仍处于高碳增长模式，应加快推动产业转型，向低碳、高产出产业门类发展。

代表城市	重点管控用地类型识别	城市碳排放管理政策建议
肇庆	根据2020年土地碳排放强度测算可得： 工业用地类型强度系数最高、工业用地现状碳排放总量大，因此 现状重点管控用地类型为工业用地 。	□ 肇庆处于实体经济快速发展阶段，省大型产业集聚区建设对工业用地需求较大，规划工业用地总量上符合用地结构标准（15-30%）。但肇庆的工矿用地碳排放强度比中山、揭阳高，说明肇庆的工业碳排放较粗放。应保证产业发展需求保障工业用地供应总量的同时，强化对工业用地碳排放强度的管控，提升新项目的环保准入门槛，逐步降低存量产业项目的碳排放强度。 □ 肇庆的城镇化水平在全省处于下游阶段，应加快推动人口城镇化，引导人口向城镇地区集聚，有助于减少碳排放量。 □ 肇庆的工业和服务业仍处于高碳增长模式，应加快推动产业转型，向低碳、高产出的产业门类发展。
	根据2009-2017年广东省多影响因子实证数据碳排放模型： 第三产业总产值、规模以上工业增加值、工业用地面积、单位GDP能耗 与肇庆市碳排放量呈现 正相关关系 ，其中工业用地面积的正相关影响系数最高 城镇化率、城镇人口密度 与肇庆市碳排放量呈现 负相关关系 ，其中城镇人口密度的负相关影响系数最高	

代表城市	重点管控用地类型识别	城市碳排放管理政策建议
揭阳	根据2020年土地碳排放强度测算可得： 工业用地类型强度系数最高、工业用地现状碳排放总量大，仓储用地碳排放强度较其他城市高；因此 现状重点管控用地类型为工业用地、仓储用地 。	□ 揭阳规划工业用地占比符合工业用地结构标准（15-30%），工业用地碳排放强度与其他城市相比处于中等水平；规划仓储用地面积较大，围绕揭阳潮汕国际机场打造临空物流园，现状仓储用地的碳排放强度与其他城市相比比较高，应加强对仓储用地的碳排放强度管控，依托智慧物流等手段，提升物流仓储链条的运转效率，降低过程碳排放。 □ 揭阳提升人口密度，有利于减少碳排放量；揭阳城镇化率处于中游水平，未达到城镇人口集聚提升碳排放效率的拐点，所以城镇人口密度提升仍会促进碳排放量。因此，建议揭阳推动人口向城镇集聚，提升城镇化水平，达到城镇人口集聚提升碳排放效率的拐点；建设用地分配时应向城镇倾斜，为城镇人口提供更多空间城镇。 □ 揭阳的工业仍处于高碳增长模式，应加快推动产业转型，向低碳、高产出的产业门类发展。
	根据2009-2017年广东省多影响因子实证数据碳排放模型： 城镇人口密度、规模以上工业增加值、商业服务业用地、住宅用地、人均建设用地面积、客运总量、单位GDP能耗 与揭阳市碳排放量呈现 正相关关系 ，其中单位GDP能耗的正相关影响系数最高 人口密度 与揭阳市碳排放量呈现 负相关关系	

二、主要政策建议

围绕人口、经济、建设用地三个方面，根据省内不同城市的碳排放量影响因子特征，出台差异化、组合式的减碳政策。综合运用总量管控、结构调整、效率提升等方式，加强对碳排放相关影响因子的管控。

（一）识别影响城市碳排放量的主导用地类型，制定针对性的建设用地减碳政策

对于省内国土开发强度低于 10%的城市，应加大对工业企业碳排的监管力度，通过提高产业准入门槛、推广清洁生产技术等方式降低工业用地碳排强度；对于国土开发强度处于 10%至 30%的城市，应重点管控住宅用地和商业服务业用地碳排放强度，通过鼓励发展绿色建筑、绿色社区、绿色商场等，推行绿色低碳生活方式。

（二）重点加强对工业用地的碳排放评价与监管，推动工业绿色低碳高质量发展

在全省高质量发展和“制造业当家”的战略要求下，建议以工业用地控制线内工业企业为管控重点，从用地供给和供后监管两个环节，加强对工业用地的碳

排放评价与监管。一是在用地供给环节，探索与碳排放管控相衔接的工业用地供应政策，针对不同工业行业设定工业用地碳排放强度约束指标并作为土地供应的前置条件。提高工业用地的产业准入门槛，鼓励引进绿色低碳产业，对低碳优质企业入驻给予土地指标优惠政策。二是在供后监管环节，推进自然资源、工信、商务等多部门联合建立工业用地供后监管机制，探索建立高碳排、低产出工业用地退出机制，支持地方与工业企业签订工业用地供后监管协议，将碳排放强度指标纳入供后监管范围，对未达标企业按照监管协议约定追究其违约责任。

（三）开展建设用地碳排放评估，制定与减排降碳成效挂钩的土地激励政策

针对不同用地类型、用地单元，开展建设用地碳排放评估工作，研究制定城市建设用地碳排放强度标准，探索将建设用地碳排放强度（万吨 CO_2/km^2 ）、单位建设用地碳生产力（吨 $\text{CO}_2/（\text{万元} \cdot \text{km}^2）$ ）等土地碳排放效率相关的指标作为新建项目用地审批的参考因素之一。将建设用地碳排放强度、单位建设用地碳排下降率等土地碳排放效率相关指标纳入地市政府管理绩效考核体系，对实现低碳地市给予一定的土地指标奖励，加快形成减排降碳的激励约束机制。

（四）引导广东省人口向超大城市和中小城市聚集，实施差异化的人口与用地资源配套政策

对于广佛深莞等高人口密度的超大城市，促进人口集聚的同时可以实现更高的经济发展碳排放效率，建议保障超大城市的公服设施、基础设施用地供给，提升公共服务设施品质，支撑人口持续集聚；对于常住人口 400-900 万的特大城市、大城市，建议重点关注人口快速城镇化后农村闲置用地多的历史遗留问题，坚决落实“人地挂钩”的用地资源配置思路，通过提高农村闲置土地利用效率提升乡村人口密度；对于常住人口 400 万以下的大城市、中小城市，建议进一步放开放宽落户限制，加快引导农业转移人口落户城镇，并提高农业转移人口市民化质量，倡导绿色低碳生活方式。

（五）优化省市国土空间规划指标体系，增加碳排放管控相关指标

面向广东加快实现“双碳”目标，建议在省级国土空间规划指标体系中增加城镇人口密度、乡村人口密度 2 个指标。根据地市层面碳排放量影响因子筛选结

果和正负影响关系，对各地市国土空间规划指标体系提出差异化的指标增设建议和指标区间值建议。

（六）开展国土空间用途管制方案碳排放量评估，引导形成绿色低碳国土空间布局

结合国土空间规划“一张图”基础信息平台，开展市县国土空间规划用途管制方案碳排放量测算与评估工作，从减少碳排放量的角度提出用地结构优化建议，提升规划用地方案的科学性和可持续性。

一、研究背景

（一）国家政策背景

坚定不移走生态优先、绿色低碳的高质量发展道路，确保如期实现碳达峰、碳中和。改革开放以来，中国经济加速发展，目前已成为全球第二大经济体、绿色经济技术的领导者，全球影响力不断扩大。同时，我国社会主要矛盾已经转化为人民日益增长的美好生活需要和不平衡不充分的发展之间的矛盾，而对优美生态环境的需要则是对美好生活需要的重要组成部分。为此，2020 年第七十五届联合国大会上，中国向世界郑重承诺：力争在 2030 年前实现碳达峰，在 2060 年前实现碳中和。2020 年中央经济工作会议将“做好碳达峰、碳中和工作”作为 2021 年重点任务之一，2021 年中共中央、国务院印发《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》，要求把碳达峰、碳中和纳入经济社会发展全局，以经济社会发展全面绿色转型为引领，以能源绿色低碳发展为核心，加快形成节约资源和保护环境的产业结构、生产方式、生活方式、空间格局，坚定不移走生态优先、绿色低碳的高质量发展道路，确保如期实现碳达峰、碳中和。

采取更加有力的政策和措施，组织实施好“碳达峰十大行动”。为奋力实现“双碳”目标，国家相继出台了相关规划、实施方案和保障措施。2021 年国务院印发《2030 年前碳达峰行动方案》，提出要将碳达峰贯穿于经济社会发展全过程和各方面，重点实施能源绿色低碳转型行动、节能降碳增效行动、工业领域碳达峰行动、城乡建设碳达峰行动、交通运输绿色低碳行动、循环经济助力降碳行动、绿色低碳科技创新行动、碳汇能力巩固提升行动、绿色低碳全民行动、各地区梯次有序碳达峰行动等“碳达峰十大行动”。《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》也进一步提出，要锚定努力争取 2060 年前实现碳中和，采取更加有力的政策和措施。

（二）广东政策响应

广东是全国经济大省和能源消耗大省，需找准减碳的有效路径。近年来，广东省二氧化碳排放量和能源消费量持续增加。2010 年至 2019 年，全省二氧化碳

排放从 47768 万吨增加到 56442 万吨，年均增长 1.9%。2020 年广东能源消费总量达 34502.92 万吨标准煤，单位工业增加值能耗较上年增长 1.2%。《广东省人民政府关于加快建立健全绿色低碳循环发展经济体系的实施意见》提出，到 2025 年全省能源利用效率大幅提高，单位地区生产总值能源消耗和二氧化碳排放水平走在全国前列。为实现这一目标，广东仍需加大节能减排力度，尤其是在工业经济快速发展的同时找准减排降碳的有效路径。

广东省政府出台多项政策，积极响应“双碳”工作部署。《广东省国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》提出，以碳达峰为牵引，持续深化产业、能源、交通等方面结构调整，加快构建绿色技术创新体系，提高全社会资源产出率，有效控制温室气体排放，促进经济社会发展全面绿色转型。

《广东省人民政府关于加快建立健全绿色低碳循环发展经济体系的实施意见》要求，把握生态文明建设以降碳为重点战略方向的关键时期，从供给和需求两端同时发力，全方位全过程推行绿色规划、绿色设计、绿色投资、绿色建设、绿色生产、绿色流通、绿色生活、绿色消费，统筹推进高质量发展和高水平保护，建立健全绿色低碳循环发展的经济体系，确保实现碳达峰、碳中和目标。

（三）研究必要性与研究意义

1. 研究必要性

本研究以广东省为研究区域，综合运用多源数据和数学模型构建，开展广东省碳排放数据实证研究，具备以下两个方面的必要性：**一是弥补现状研究短板。**通过前期文献综述发现，基于广东省数据开展的碳排放实证研究不多，且缺乏对影响因子及关系的定量研究，无法精准指导管控策略的制定。**二是助力广东实现“双碳”目标。**针对广东减碳任务重的现实情况，进一步分析广东省碳排放现状，找准影响碳排放的影响因素，针对性提出减碳措施，助力广东加快实现碳达峰、碳中和目标。

2. 研究意义

本研究总结影响广东省碳排放量的因素特征，预测多情境下广东省碳排放量，输出广东省减排降碳政策建议，具备较强的现实意义和理论意义。**一是分析总结**

影响广东碳排放地域差异的主要因素，研究经济、人口、用地等影响因素对广东省各地市碳排放量的影响，并指导城市在发展基础上实现“减排”，对广东省实现“2030 年碳达峰，2060 年碳中和”目标具有重要的支撑作用。二是以广东省为研究区，基于广东省碳排放量和人口、经济、用地等基础数据，识别影响广东碳排放情况的主要因子，预测未来广东省碳排放趋势，可进一步丰富现有研究，并为广东碳减排政策制定及低碳经济发展提供理论基础。

二、研究目标、内容和技术路线

（一）研究目标和内容

活动一：广东省各地市碳排放量与影响因子的关系研究

基于用地类型的碳排放强度研究结论，进一步细分引入人口、经济、建设用地增长等碳排放量影响因子，通过数据计算研究上述影响因子与城市碳排放量之间的关系。根据广东省各地市的人口、经济、建设用地数据，分别计算各地市不同影响因子与碳排放量的对应关系，总结碳排放强度在人口、经济、建设用地等各影响因子作用下的规律特征。

活动二：广东省碳排放量多情景预测研究

基于广东省各地市碳排放量与影响因子的关系，利用趋势外推法开展广东省各地市碳排放量预测工作。基于广东省现状碳排放量与影响因子之间的规律特征，构建广东省人口、经济、建设用地在高中低发展水平下的多情景模型，计算人口、经济、建设用地在多情景水平下对应的城市碳排放量，同时基于广东省“3060”碳达峰碳中和目标，对广东省人口、经济、建设用地等因素提出控制目标，为国家和省实现碳达峰碳中和目标做出情景预测并给出优化建议。

活动三：后续研究方向建议

基于子活动 1-2 总结得出的广东省碳排强度与影响因子间的规律特征，为广东省国土空间碳排放的长期监测与管理提供研究方向与要点。下一阶段细化研究内容包括：第一，研究不同产业门类的碳排放关系，形成细分到各产业门类的碳排放均值或区间清单；第二，开展基于双碳目标的国土空间规划评估与优化建议研究，评判当前空间规划方案能否实现减碳政策的目标，并对国土空间规划用地结构具体优化建议；第三，开展基于双碳目标的建设用地指标投放管理政策研究，研究规划管理政策手段，促进双碳目标的实现。

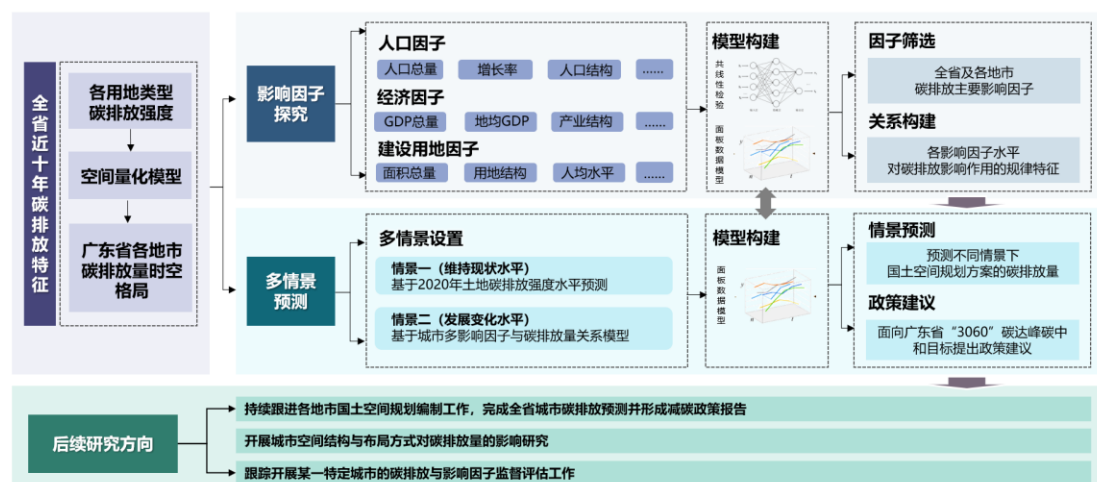
（二）技术路线

技术路线主要分为三大板块。

一是广东省碳排放量的影响因子探究。首先，对 2009-2017 年广东省碳排放量的总体特征进行分析，概括广东省碳排放量变化的特征和空间差异。其次，聚焦与碳排放紧密相关的人口、经济、建设用地三大方面，结合国土空间规划指标体系选取 22 个因子，以 2009-2017 年的历史数据为基础，开展省级和地市级两个尺度的广东省碳排放量与影响因子关系的实证研究，形成 1 个省级和 21 个地市的多影响因子与碳排放量关系模型，分别筛选出与碳排放量具有显著相关性的因子，并分析各影响因子水平对碳排放影响作用的规律特征。

二是广东省碳排放量的多情景预测。结合各地市在编的 2035 年国土空间总体规划阶段性方案，开展广东省碳排放量的多情景预测。情景一是考虑建设用地碳排放强度维持现状水平，以 2020 年土地碳排放强度水平为基础，结合各地市国土空间总体规划的阶段性土地利用方案进行预测；情景二是考虑人口、经济、建设用地发展水平的变化，基于城市多影响因子与碳排放量实证关系模型进行预测。基于前述研究结论，对实现“3060”碳达峰碳中和目标针对性提出各地市在人口、经济、建设用地等方面的政策建议。

三是后续研究的方向与要点。基于广东省碳排放量的影响因素研究和情景预测得出的相关结论，后续研究方向包括持续跟进各地市国土空间规划编制工作，完成全省城市碳排放预测并形成减碳政策报告、开展城市空间结构与布局方式对碳排放量的影响研究、跟踪开展某一特定城市的碳排放与影响因子监督评估工作等内容。



图：项目研究技术路线

（三）研究尺度

本研究从时间、空间两大维度，对广东省的碳排放量影响关系进行分析。

研究空间范围包括广东省全域范围，研究结论输出将分为全省及地级市两个层面。本次课题聚焦从省域和市县层面研究碳排放与影响因子关系，以期发掘碳排放影响因子在广东省的时空差异特征。其中，总结省域层面结论以 21 个地级市数据作为研究基础，总结市县层面结论以 122 个区县数据作为研究基础。

影响因子关系构建的研究时间跨度为 2009–2017 年。碳排放影响因子关系构建由于采用面板岭回归模型，因此需要使用一定时间段的数据训练获得模型，因数据获取限制，广东省各区县的碳排放量数据仅能获取 2009–2017 年的连续数据，因此在研究中对地级市层面的分析统一调整为 2009–2017 年时间段。

碳排放量情景预测的研究时间以 2035 年城市碳排放量为预测目标。碳排放量情景预测建立在国土空间土地类型碳排放强度与碳排放影响因子关系构建的基础上，以 2035 年单一年份为情景预测对象。

表：研究尺度与对应分析基础

输出结论尺度	分析研究基础	数据分析基础	研究时长
全省层面结论	以 21 个地级市为分析对象	地级市的人口、经济、建设用地与碳排放数据	2009–2017 年
地市层面结论	以 122 个区县为分析对象	区县的人口、经济、建设用地与碳排放数据	2009–2017 年

（四）研究方法

1、影响因子指标体系构建：共线性检验、皮尔逊相关性分析

利用 SPSS 软件对未标准化影响因子数据指标进行共线性检验，机器初筛无关影响因子。进一步进行双变量皮尔逊相关性分析和多轮共线性检验，结合 STIRPAT 模型理论关于碳排放影响因子的定义，从人口、富裕度、技术等关键维度出发，根据 $VIF < 10$ 、STIRPAT 模型理论、碳排放量与因子相关性等，剔除无关或紊乱指标，构建符合广东省和 21 地级市的碳排放影响因子指标体系，分别筛

选出全省及各地市与碳排放量具有显著相关性的影响因子。

本次研究选取因子的 VIF 值多数小于 10，另外，岭回归模型能降低模型共线性问题，为增强指标体系与因子可信度，少量模型放宽 VIF 值至 15，指标体系对广东省碳排放有很好解释能力，不存在揭示变量共线性问题。

2、影响因子关系模型构建：自适应岭半径的面板岭回归模型

利用自适应岭半径的面板岭回归模型，通过大量岭半径自适应调整与机器学习，构建碳排放与指标体系各影响因子的数学关系模型。本次研究共形成 1 个省级和 21 个地市的多影响因子与碳排放量关系模型，获得每个影响因子与碳排放关系对应的影响系数与正负相关特征。绝大多数模型 R^2 处于 0.90~0.98，高于 0.8 且高度接近于 1，回归模型可信度高。

3、影响因子脱钩关系分析：Tapio 脱钩模型

本次研究采用 Tapio 脱钩模型分析了 2009-2017 年人均地区生产总值和人均建设用地面积与碳排放量的脱钩关系，脱钩模型表明相关因子数据变化情况与城市碳排放量数据变化情况的协同程度。

三、数据采集与获取

（一）广东省碳排放量数据

县区层面：广东省 2009-2017 年 122 个区县连续 12 年碳排放数据来自 CEADs 中国碳核算数据库。

地级市层面：广东省 2009-2017 年 21 个地级市碳排放数据，来自 CEADs 中国碳核算数据库的区县碳排放数据加和。

（二）广东省人口、经济数据

人口、经济相关指标涉及的基础数据均来源于广东省和各地市 2009-2017 年统计年鉴、统计公报，其中人口相关指标包括：城镇化率、人口总量、人口密度、城镇人口密度和乡村人口密度；经济指标包括：地区生产总值、GDP 增长率、人均地区生产总值、第二产业增加值、第三产业增加值和规模以上工业增加值。

地级市层面：梳理了广东省 21 城市近 12 年人口、经济类数据，共计 2772 条相关数据。

县区层面：梳理了广东省 122 个县区近 12 年人口、经济类数据，共计 13716 条相关数据。

（三）广东省建设用地数据

全省 2009-2017 年连续 12 年土地利用变更调查成果数据库，总数据量达 100G。由于 2009-2017 年变更调查采用第二次全国国土调查数据库标准，建设用地只能划分为城市、建制镇等级别的大类用地。本次研究采用遥感影像解译等技术手段进行地类细分，全部参考第三次国土调查土地利用现状分类标准，将建设用地打开细分为工业用地、居住用地、商业服务业用地、交通运输用地等具体用地类型。

（四）各地市国土空间总体规划数据

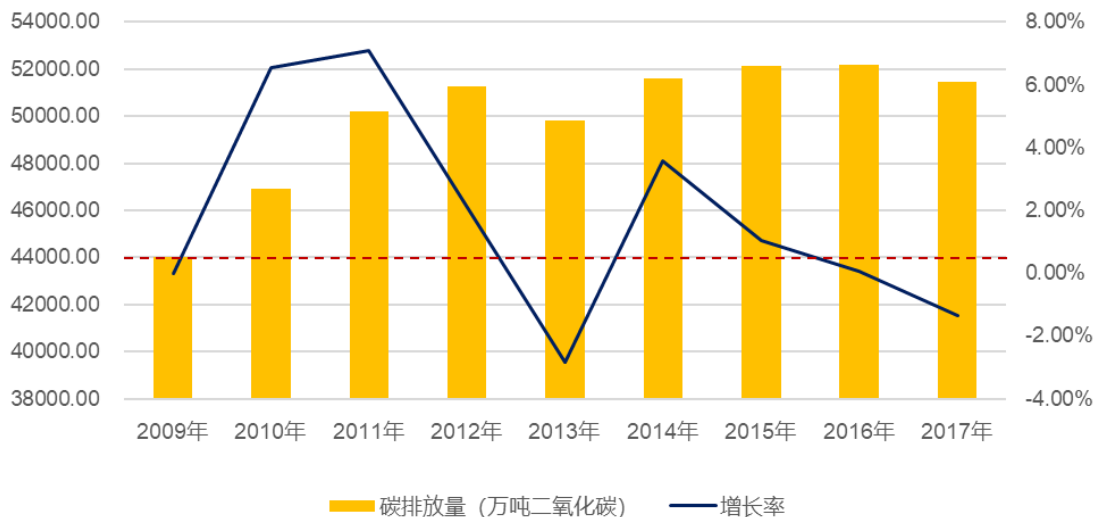
以广东省各地在编的 2035 年国土空间总体规划为基础，选取编制进度较快的惠州、肇庆、中山、揭阳四个代表城市，作为本次碳排放多情景预测工作的研究对象。城市预测相关指标数据来源于在编国土空间总体规划的规划指标、土地利用方案等。

四、广东省各地市近十年碳排放效率特征

（一）广东省碳排放量变化时空特征

1、全省碳排放总量变化情况

全省碳排放总量呈现波动上升态势。从全省碳排放总量来看，2009-2017年间，广东省碳排放总量整体呈现波动上升态势，碳排放总量从44013万吨增长到54560万吨，九年间全省碳排放总量增长1.17倍（7451.66万吨）。从全省碳排放总量增长率来看，碳排放总量增速呈现分段式波动态势，2009-2011年间全省碳排高速增长，增长率保持在6.5%以上；2012-2017年间全省碳排增速放缓，增长率保持在4%以内；其中2013年和2017年增长率小于0，全省碳排放总量环比降低。

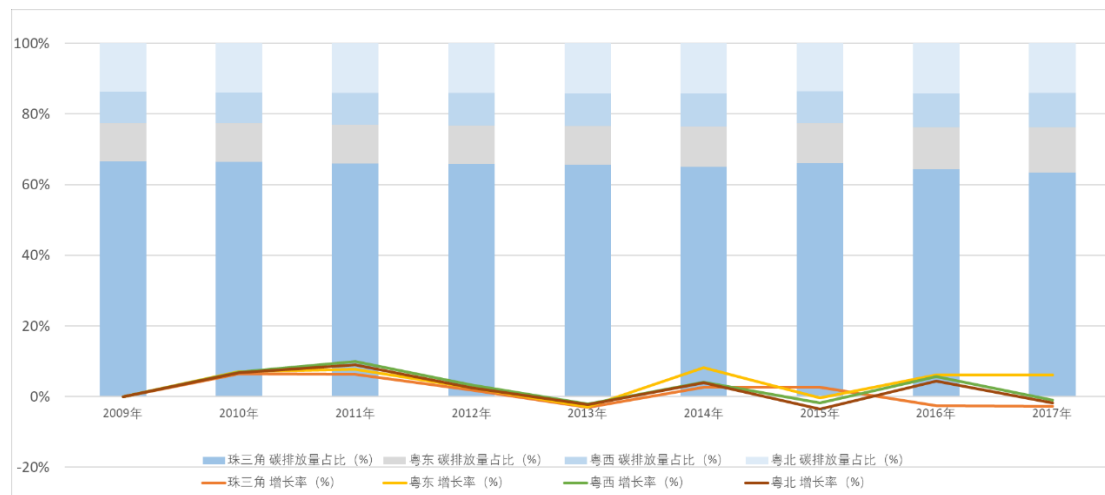


图：2009-2020 年全省碳排放总量及增长率

2、分区域碳排放量变化情况

碳排放量占比呈现出珠三角>粤北>粤东>粤西。根据广东省分区范围，将分析尺度聚合到珠三角、粤东、粤西和粤北四大区域，对各区域碳排放总量占比和增速情况进行统计。从各区域碳排放总量占比情况来看，珠三角占比持续最高，九年间占比均高于60%，但随着时间推移其占比逐渐降低，由2009年的66.6%降低到2017年的63.41%。粤北、粤东、粤西地区占比均呈上升趋势，其中粤北地区占比位列全省第二，九年间占比稳定在13.5%-14.5%区间，是全省九年间占比

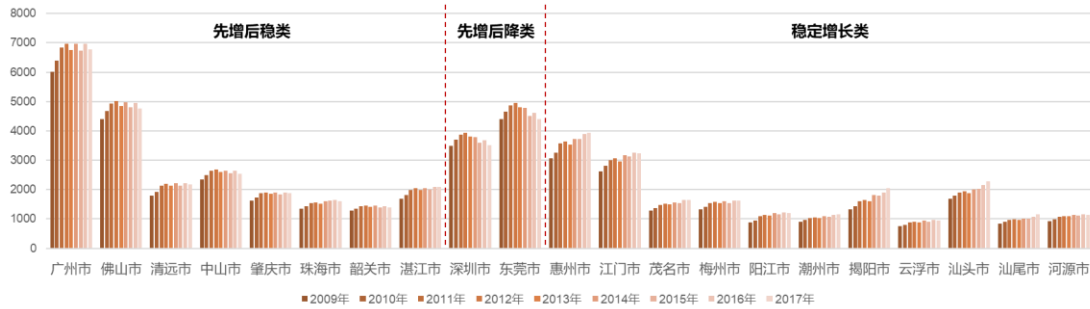
变化程度最小的区域；粤东地区占比位列全省第三，是全省九年间占比增幅最大的区域，由 2009 年的占比 10.84% 升高到 2017 年的 12.9%；粤西地区占比持续最低，九年间占比均低于 10%，由 2009 年的 8.79% 升高到 2017 年的 9.56%。从各区域碳排放总量增速情况来看，2009-2013 年间四大区域碳排放量增长率变化趋势较为一致，而 2014-2017 年区域之间的波动趋势差异较大，其中 2014 年粤东地区增长率超过 8%，其他区域仅为 4% 左右；2015-2017 年，四区域均有出现不同幅度的负增长率。



图：广东省不同区域碳排放占比及增长率

3、各地市碳排放量变化情况

九年间各地市碳排放总量均有所增长，可分为稳定增长类、先增后降类与先增后稳类三种类型。从全省 21 个地级市碳排放总量变化情况来看，惠州市（增量 876.85 万吨）、广州市（增量 763.79 万吨）和揭阳市（增量 717.16 万吨）以超过 700 万吨的增量分列九年间全省碳排增长最多的三座城市，东莞市（增量 12.00 万吨）、深圳市（增量 20.11 万吨）和韶关市（增量 122.35 万吨）分列碳排增长最少的三座城市。从 2009-2017 年城市碳排放总量历年变化情况来看，广州市、佛山市、中山市等城市碳排放总量呈现出先增加后稳定的变化特征，深圳市与东莞市的城市碳排放总量呈现出先增加后降低的变化特征，惠州市、揭阳市、江门市等城市碳排总量呈现出稳定增长的特征。



图：2009-2017 年广东省地市碳排放总量变化情况

（二）广东省碳排放效率评价

1、全省人均碳排放量评价

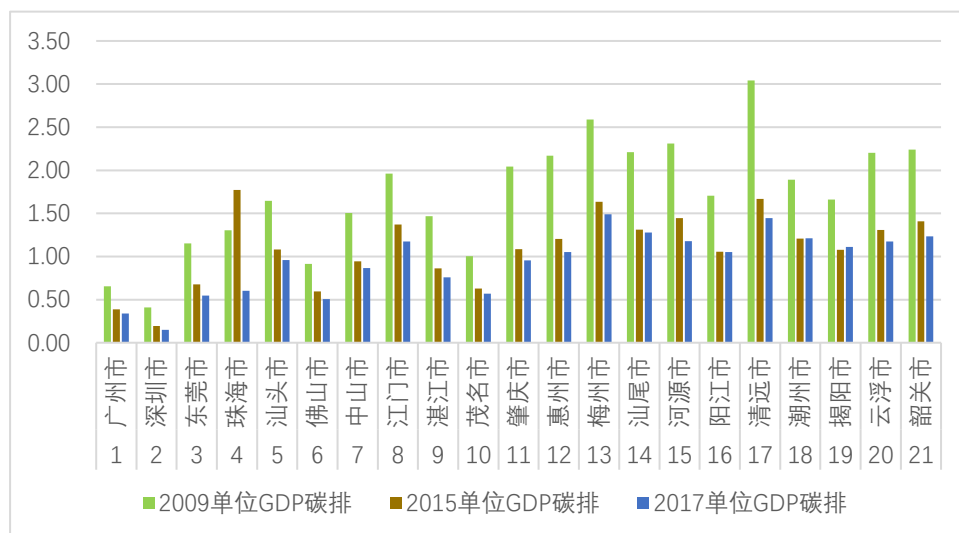
全省人均碳排放量总体呈现降低态势，2011 年出现人均碳排放量的拐点。2009-2011 年间全省人均碳排放量逐年增长，在 2011 年时达到 4.67 吨/人的全省人均碳排放量峰值；2012-2017 年间全省人均碳排放量则波动降低，至 2017 年降至 4.24 吨/人的九年间最低值。

2017 年人均碳排放量呈现出粤北>珠三角>粤东>粤西。10 年间，珠三角人均碳排放量由 5.55 吨/人降低至 4.40 吨/人，成为全省唯一下降地区；粤东由 3.03 吨/人增长为 4.35 吨/人，增幅最大；粤西由 2.71 吨/人增长至 3.37 吨/人；粤北则由 4.03 吨/人增长至 4.86 吨/人。

在大部分城市人均碳排放量逐步降低的情况下，仍有部分城市人均碳排放量呈现增长状态。从各城市的人均碳排放总量来看，珠海市人均碳排放量位居全省首位，深圳市人均碳排放量则为全省最低。珠三角部分城市呈现出人均碳排放量降低的趋势，粤北部分城市呈现出人均碳排放量上升的趋势。

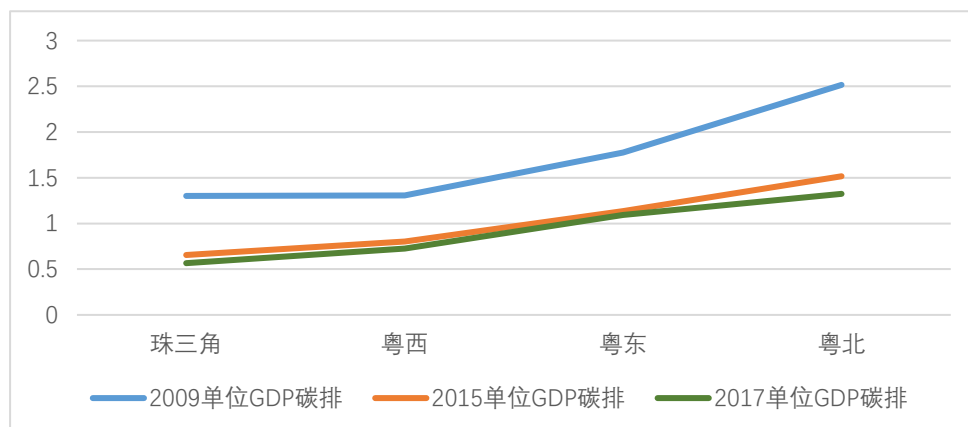
2、全省各地市单位 GDP 碳排放量评价

广东省各地市单位 GDP 碳排放量逐年降低，但整体降幅呈现波动收紧状态。从广东省单位 GDP 碳排放效率来看，2009~2017 年间全省单位 GDP 碳排放量逐年降低，说明广东省逐步实现低碳发展模式；从全省单位 GDP 碳排放增长率来看，整体降幅呈现波动收紧状态，说明单位 GDP 碳排放量存在边际效益递减，虽然全省单位 GDP 碳排放量逐年降低，但当单位 GDP 碳排放量达到某一水平，其增量会无限趋近于 0。



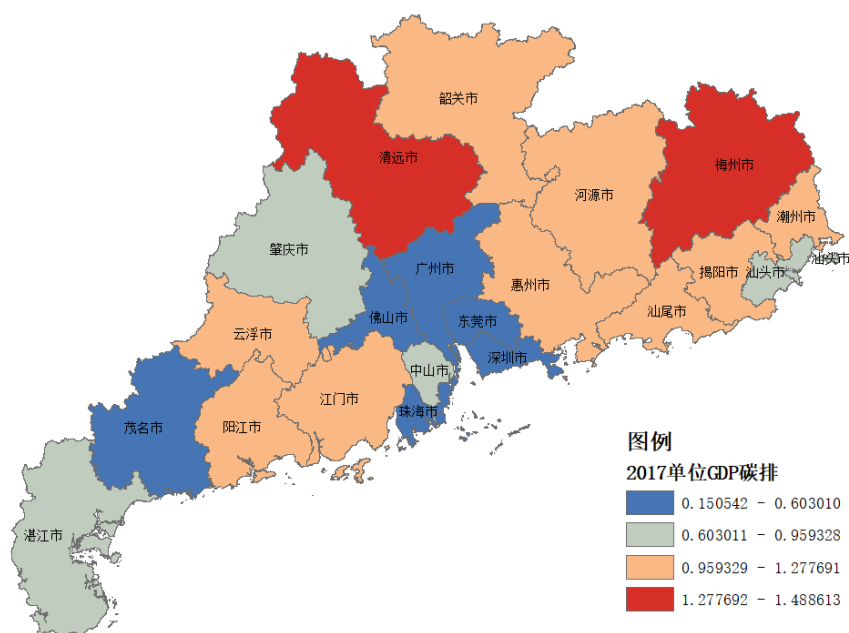
图：2009-2017 年广东省地市单位 GDP 碳排放总量变化情况

单位 GDP 碳排放效率：珠三角>粤西>粤东>粤北。从珠三角、粤东、粤西、粤北四区单位 GDP 碳排放量来看，珠三角的单位 GDP 碳排放效率整体最高，17 年单位 GDP 碳排放量平均值为 0.57 吨/万元，粤西地区的单位 GDP 碳排放效率其次，17 年单位 GDP 碳排放量平均值为 0.73 吨/万元，粤东地区的单位 GDP 碳排放效率排名第三，17 年单位 GDP 碳排放量平均值为 1.09 吨/万元，粤北地区的单位 GDP 碳排放效率最低，17 年单位 GDP 碳排放量平均值为 1.32 吨/万元。



图：2009-2017 年珠三角、粤东、粤西、粤北地区单位 GDP 碳排放变化情况

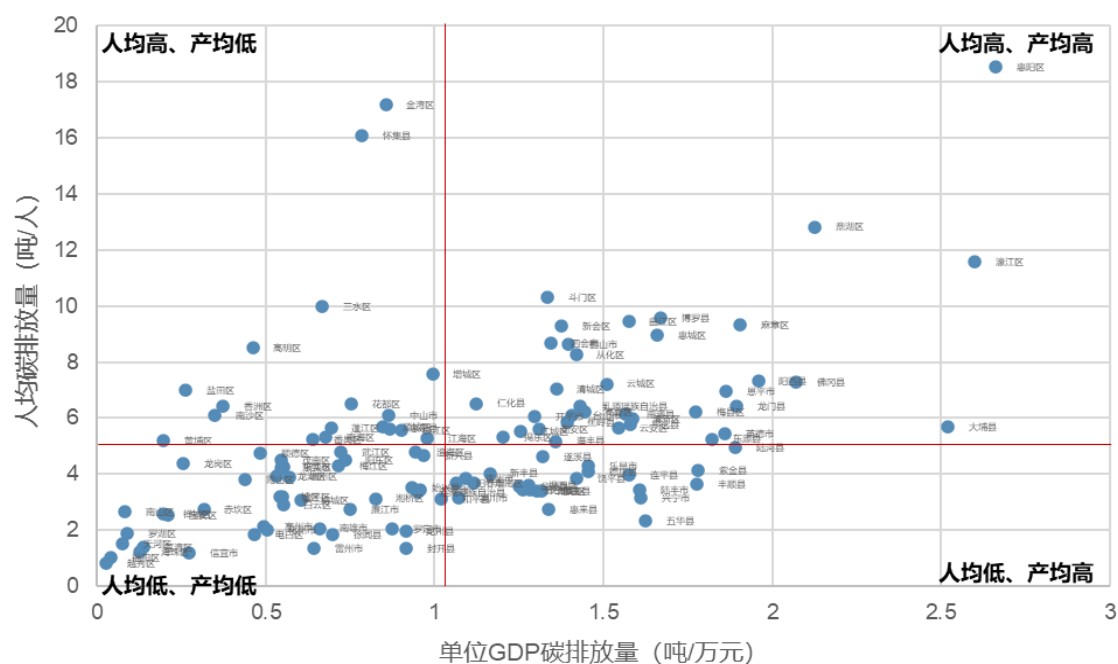
从单个城市看，梅州、清远等粤北城市单位 GDP 碳排高居榜首，不同城市差异巨大。从全省 2017 年单位 GDP 碳排看，广州、佛山、深圳、东莞、珠海等珠三角城市单位 GDP 碳排处于全省低位，表面珠三角大部分城市已逐步摆脱高能耗产业，逐步走向低碳模式。梅州、清远等粤北山区城市，仍处于高能耗高碳排的经济发展模式，需重点研究并提出针对性的策略。



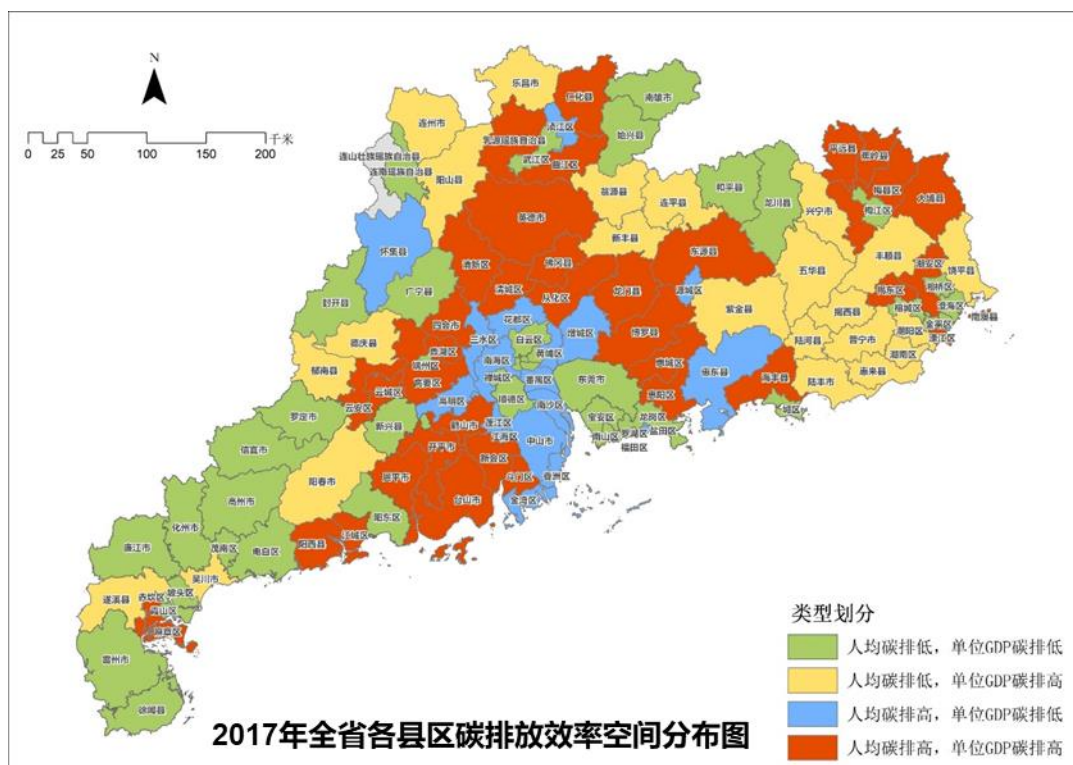
图：2017 年广东省各地级市单位 GDP 碳排空间分布情况

3、全省各区县碳排放效率评价

以人均碳排放量、单位 GDP 碳排放量为评价指标的碳排放效率在县区尺度表现出差异，珠三角和粤西地区的部分县区碳排效率明显高于其他地区。2017 年各县区碳排放效率反映出，城市高密度地区与粤西生态地区的碳排放效率较高，如深圳、广州、茂名、湛江的部分县区；珠三角外围地区与粤东地区的碳排放效率较低，如江门、清远、惠州、梅州的部分县区。



图：2017 年广东省各区县人均碳排放量与单位 GDP 碳排放量关系图



图：2017年广东省各区县碳排放效率空间分布图

五、广东省碳排放量与影响因子间的关系研究

（一）影响因子选取

通过对碳排放影响因子相关论文进行文献综述，从 Kaya 恒等式、IPAT、STIRPAT 等模型理论出发，选取国内外相关文献讨论碳排放影响因素中与人口、经济、建设用地相关的影响指标，同时结合我国《市级国土空间总体规划编制指南（试行）》《市县国土空间开发保护现状评估技术指南（试行）》等省市国土空间规划编制与开发保护评估指南，并结合数据可获取性初步筛选了人口、经济、用地等指标共 22 个，构建广东省碳排放与相关影响因素数据集，将结合广东省历史数据开展广东省碳排放影响因子实证研究。

表：广东省碳排放量影响因子初筛汇总表

序号	类别	影响因子	因子缩写	适用尺度	出处来源	数据基础
1	人口	城镇化率（%）	UR	省域尺度、市县尺度	文献综述，5/48	可获取
2		人口总量（万人）	P	省域尺度、市县尺度	文献综述，8/48	可获取
3		人口密度（人/平方公里）	PDEN	省域尺度、市县尺度	文献综述，1/48	可获取
4		城镇人口密度（人/平方公里）	URPDEN	省域尺度、市县尺度	专家咨询	可测算
5		乡村人口密度（人/平方公里）	RUPDEN	省域尺度、市县尺度	专家咨询	可测算
6	经济	地区生产总值（亿元）	GDP	省域尺度、市县尺度	文献综述，1/48	可获取
7		GDP 增长率（%）	VGDP	省域尺度、市县尺度	文献综述，1/48	可获取
8		人均地区生产总值（元）	PGDP	省域尺度、市县尺度	文献综述，10/48	可获取
9		第二产业增加值（亿元）	VSEC	省域尺度、市县尺度	文献综述，5/48	可获取
10		第三产业增加值（亿元）	VTER	省域尺度、市县尺度	文献综述，2/48	可获取
11		规模以上工业增加值（亿元）	PVIND	省域尺度、市县尺度	文献综述，1/48	可获取
12		单位 GDP 能耗	EI	省域尺度、市县尺度	专家咨询	可获取
13	建设用地	建设用地总量（平方公里）	LAND	省域尺度、市县尺度	文献综述，5/48； 国土空间规划城市体检评估	可获取
14		工业用地面积（平方公里）	IND	省域尺度、市县尺度		可获取

15	商业服务业用地 (平方公里)	COM	省域尺度、市县尺度	国土空间规划主要 用地类型	可获取
16	住宅用地(平方公里)	RES	省域尺度、市县尺度		可获取
17	公共管理与公共服务用地 (平方公里)	PUB	省域尺度、市县尺度		可获取
18	交通运输用地(平方公里)	TRA	省域尺度、市县尺度		可获取
19	人均道路面积(平方米)	PTRA	市县尺度	国土空间规划城市 体检评估	可测算
20	人均建设用地面积 (平方米)	PLAND	市县尺度	文献综述, 1/48	可测算
21	客运总量	PAS	市县尺度	文献综述, 1/48	可获取
22	货运总量	FRE	市县尺度	文献综述, 1/48	可获取

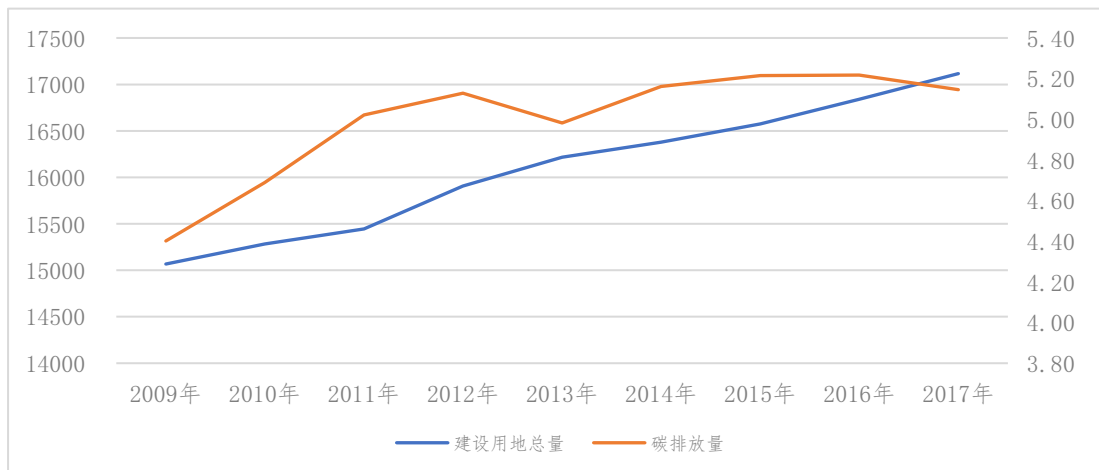
(二) 单影响因子分析

1、全省层面单因子分析

(1) 建设用地因子与碳排放的影响关系分析

1) 全省建设用地与碳排放量的关系

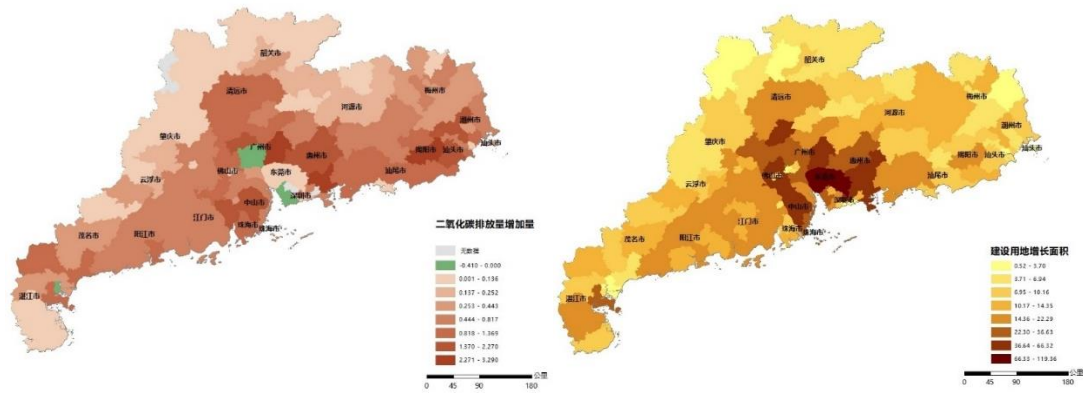
从时间变化趋势来看, 建设用地与碳排放量增长呈现出高度的趋同。2009-2017 年全省建设用地年均增速 1.61%, 碳排放量年均增速 1.97%, 两者高度趋同。



图：广东省建设用地与碳排放量变化分析图

从空间分布特征来看, 碳排放量与建设用地的聚集性有高度趋同性, 且在珠三角地区尤为明显。建设用地面积与碳排放同步增长较大的区域主要为分布

在珠三角，如广州市增城区、惠州市惠城和惠阳区。广东省外围区县建设用地与碳排均增长较少，如清远市连州区、湛江市赤坎区等。



图：2009-2017 年各地市碳排放量增量（左）与建设用地增量（右）空间分布图

单位建设用地碳排放量较高的区域主要集中在粤北和粤东地区。珠三角地区碳排放总量大，但单位建设用地碳排放量一直维持在较低水平，与城市的产业结构及碳减排政策有关。珠三角、粤北和粤西地区 2009~2017 年单位建设用地碳排放量整体呈现下降趋势。粤东地区近三年以来呈现增长趋势，后续研究应重点关注粤东地区碳排放量情况。

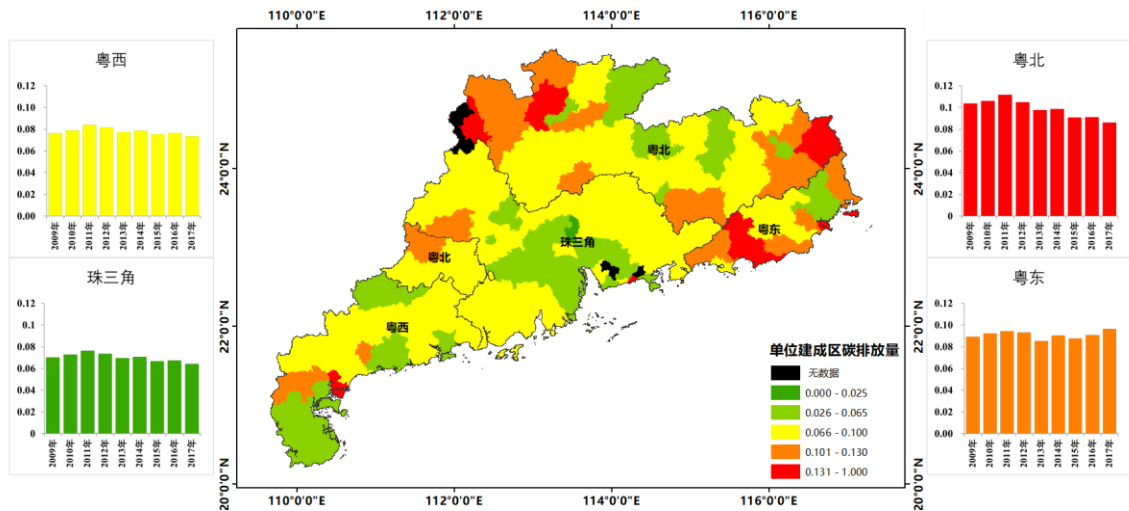
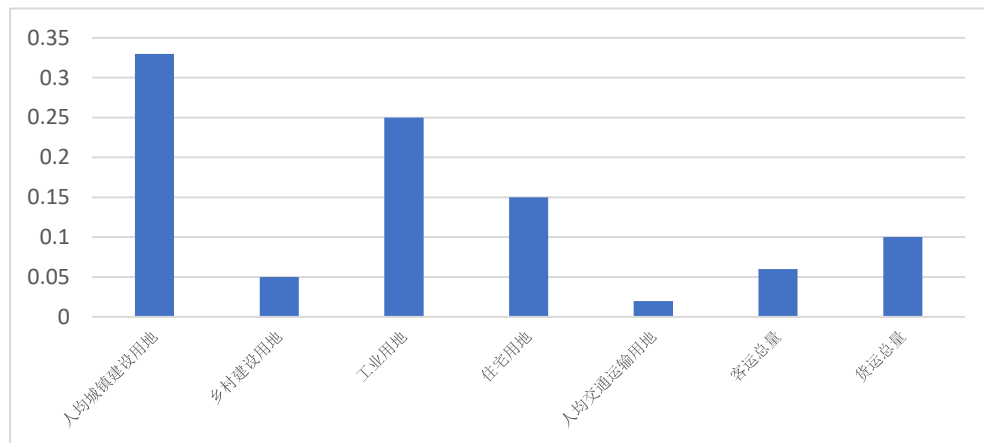


图:2009-2017 年各区县单位建设用地碳排放量变化

2) 全省层面与碳排放量相关的建设用地因子筛选

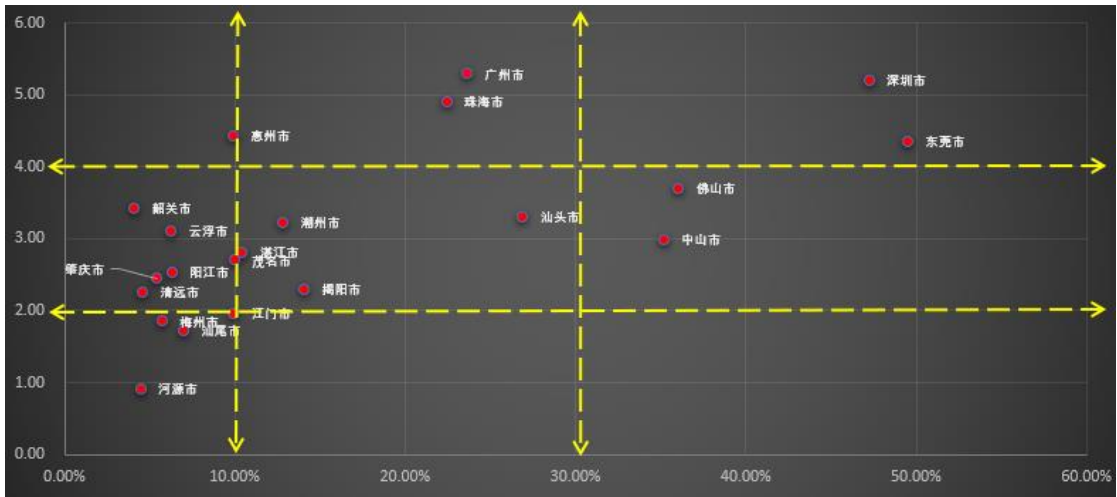
依据岭回归结果，人均城镇建设用地与碳排放量正相关，人均城镇建设用地越小、用地越集约，对应的碳排放量越小；城镇地区，工业和住宅用地是对碳排放量影响最显著的用地类型；工业用地对碳排放量的影响最大，其次是住

宅用地，反映出工业用能和生活用能是能源消耗的重点领域；乡村地区，乡村建设用地与碳排放量正相关，与乡村人口密度对碳排放影响一致，充分暴露了乡村地区高碳排现状，需加强对乡村地区节能减排问题的重视，大力推进绿色低碳村庄和农房建设；人均交通运输用地、客运、货运量与碳排放量正相关，人均交通运输用地、客运总量、货运总量与碳排放量密切相关，反映出交通方面的人均用地面积与人类活动发生频率均对碳排放总量产生贡献。



图：广东省面板岭回归模型（建设用地因子）筛选结果

城市开发强度同等水平下，不同城市的土地碳排放强度差异较大，主要由地类结构、容积率等因素导致。开发强度大于 30%的城市中：东莞市、深圳市属于高城市开发强度，单位建设用地碳排放量水平高；佛山市、中山市属于高城市开发强度，中等单位建设用地碳排放量水平；开发强度 10%-30%的城市中：广州市、珠海市单位建设用地碳排放程度最高，揭阳单位建设用地碳排放程度最低；开发强度<10%的城市中：惠州市单位建设用地碳排放程度全省高等水平。



图：全省各地级市单位建设用地碳排放量与城市开发强度关系图

不同城市因发展阶段差异，建设用地与碳排放脱钩状态不同。建设用地与碳排放脱钩指建设用地变化与碳排放量变化无显著相关性。珠三角城市群中，东莞市、佛山市建设用地与碳排放量正逐渐脱钩；肇庆市是唯一实现建设用地与碳排放量脱钩的珠三角圈层城市；广州市、深圳市仍处于建设用地与碳排放量强相关阶段；河源市、云浮市、韶关市从 2012 年开始已实现建设用地与碳排放量脱钩。

表：脱钩状态解释

状态		定义
负脱钩	扩张负脱钩	碳排放量比 X 以更高速度增长
	强负脱钩	X 负增长，碳排放量却仍趋于上升
	弱负脱钩	二者均为负增长且碳排放量比 X 减速幅度小
	弱脱钩	碳排放增速低于 X 增速
	强脱钩	X 继续增长，碳排放量却减少
脱钩	衰退脱钩	X 与碳排放量同样呈负增长
	增长连结	碳排放量随 X 增长以大致同比例速度上升
连结	衰退连结	碳排放与 X 呈现同比例负增长状态

表：2009—2017 年全省各地级市人均建设用地面积与城市碳排放脱钩状态分析表

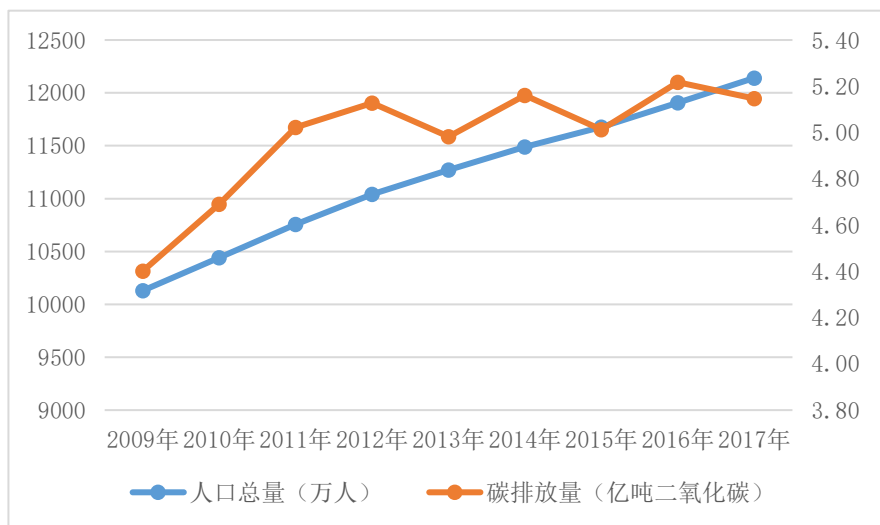
城市	2009—2011 年	2012—2014 年	2015—2017 年
----	-------------	-------------	-------------

	状态	状态	状态
广州	强负脱钩	弱脱钩	强负脱钩
深圳	强负脱钩	弱负脱钩	弱负脱钩
东莞	强负脱钩	弱负脱钩	衰退脱钩
珠海	强负脱钩	强负脱钩	弱负脱钩
汕头	强负脱钩	扩张负脱钩	扩张负脱钩
佛山	强负脱钩	弱负脱钩	衰退连结
中山	强负脱钩	弱负脱钩	弱负脱钩
江门	扩张负脱钩	扩张负脱钩	扩张负脱钩
湛江	扩张负脱钩	弱脱钩	扩张负脱钩
茂名	扩张负脱钩	增长连结	扩张负脱钩
肇庆	强负脱钩	弱脱钩	弱脱钩
惠州	强负脱钩	强负脱钩	强负脱钩
梅州	扩张负脱钩	弱脱钩	增长连结
汕尾	扩张负脱钩	弱脱钩	扩张负脱钩
河源	强负脱钩	弱脱钩	弱脱钩
阳江	强负脱钩	扩张负脱钩	增长连结
清远	扩张负脱钩	扩张负脱钩	弱脱钩
潮州	强负脱钩	增长连结	扩张负脱钩
揭阳	扩张负脱钩	扩张负脱钩	扩张负脱钩
云浮	扩张负脱钩	弱脱钩	弱脱钩
韶关	扩张负脱钩	弱脱钩	弱脱钩

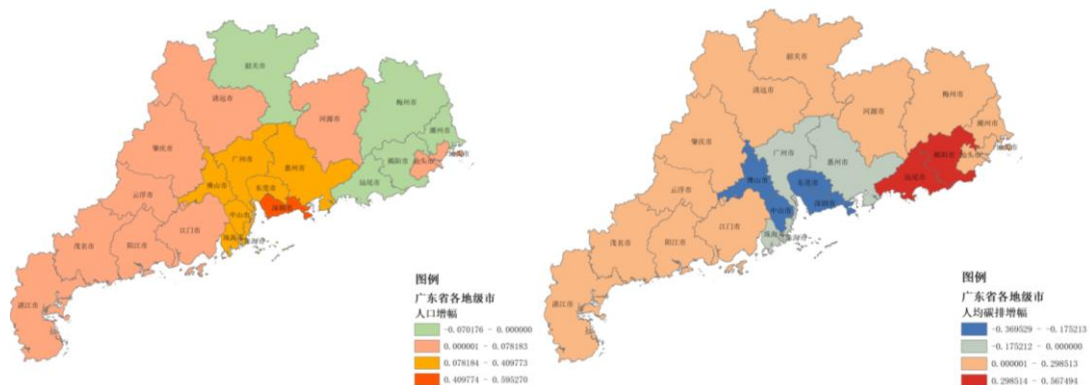
(2) 人口因子与碳排放的影响关系分析

1) 全省人口总量与碳排放量的关系

从全省人口和碳排放量变化趋势来看，两者呈现密切相关的关系。从时间维度看，人口总量与碳排放量增长呈现出高度趋同。从 2009-2017 年全省人口总量和碳排放量的增长趋势图可以看出，人口总量与碳排放量变化趋势基本一致，人口年均增长 2.29%，碳排放量年均增长 1.97%。从空间维度看，人口增幅大的地区，人均碳排放量减少，人口集聚有利于碳排放效率提升。珠三角地区（除肇庆、江门）人口增长幅度较大，人均碳排放减少。粤东（除汕头）、韶关、梅州人口减少，但人均碳排增加，其中汕尾、揭阳人均碳排增幅位居全省前列。粤西、粤北（清远、河源）地区人口稍有增长，人均碳排同步增长。



图：2009-2017 年全省人口总量和碳排放量

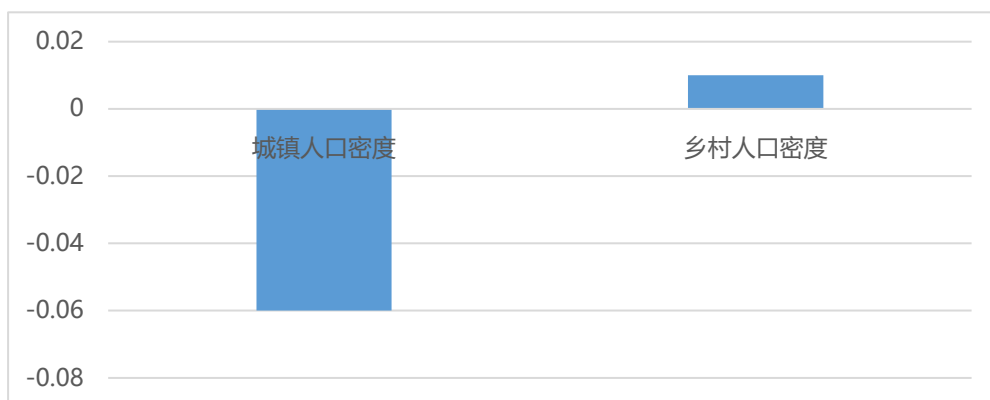


图：2009-2017 年各地市常住人口增幅情况（左）和人均碳排放量增幅情况（右）

2) 全省层面与碳排放量相关的人口因子筛选

从因子模型筛选结果发现，人口的空间分布结构比人口数量更能影响碳排放量。人口部分共输入了五个因子（城镇化率、人口总量、人口密度、城镇人口密

度和乡村人口密度), 筛选结果得出仅“城镇人口密度、乡村人口密度”2个因子影响显著, 说明人口的空间分布结构对碳排放量影响更大。其中, 城镇人口密度与全省碳排放量呈现负相关, 城镇人口密度增加, 碳排放量降低; 乡村人口密度与全省碳排放量呈现正相关, 乡村人口密度减少, 碳排放量降低。

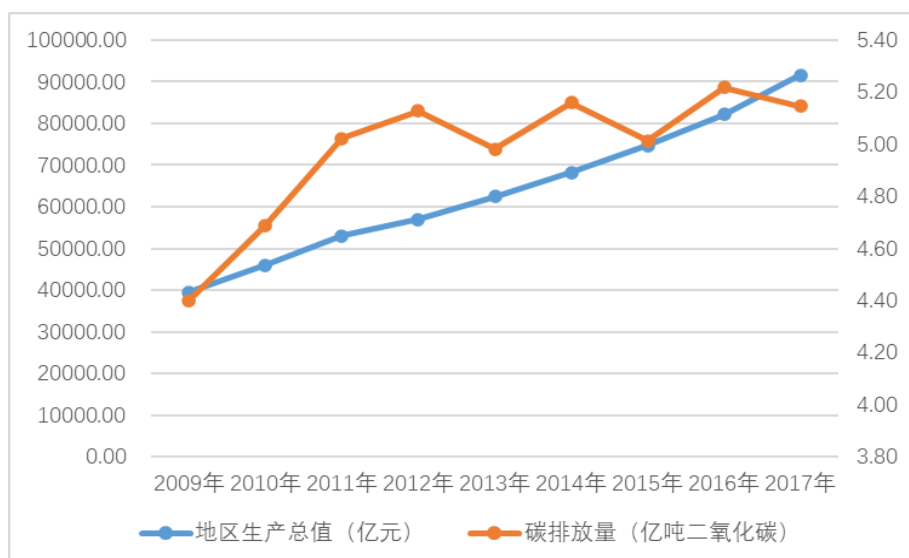


图：广东省面板岭回归模型（人口因子）筛选结果

（3）经济因子与碳排放的影响关系分析

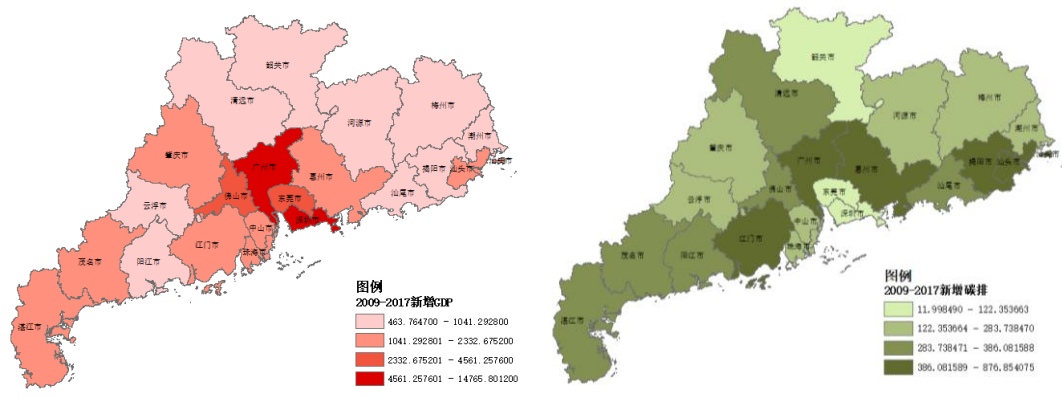
1) 全省地区生产总值与碳排放量的关系

从时间变化趋势来看, 广东省地区生产总值增速是碳排放量增速的 5 倍, 经济发展逐渐摆脱高碳排路径依赖。2009-2017 年全省地区生产总值年均增速达 11.11%, 而碳排放量年均增速仅 1.97%, 地区生产总值与碳排放量增速的比例约为 5: 1。



图：2009-2017 年广东省地区生产总值与碳排放增量变化

从空间分布特征来看，珠三角和沿海经济带的 GDP 与碳排同步高速增长。近年来，珠三角核心区和沿海经济带呈现出地区生产总值和碳排放量同步高速增长的特征，地区生产总值增量最多的区域主要集中在珠三角的广深莞佛等市，碳排放量增量最多的区域主要包括广州、惠州、江门、汕头和揭阳。深圳市和东莞市地区生产总值增量较大，但碳排放增量较低，正在逐步实现低碳发展。

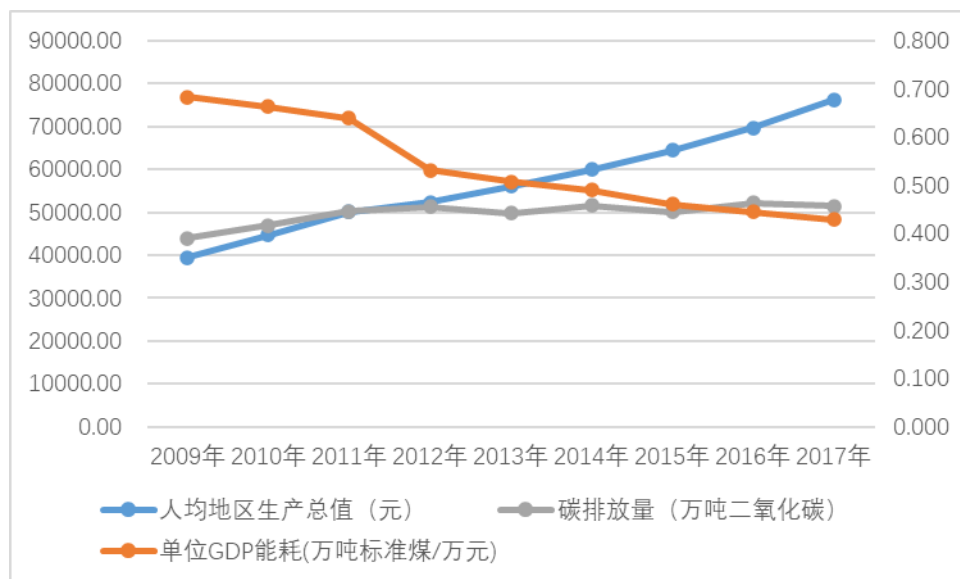


图： 2009-2017 年各地市地区生产总值增量（左）和碳排放增量空间分布图（右）

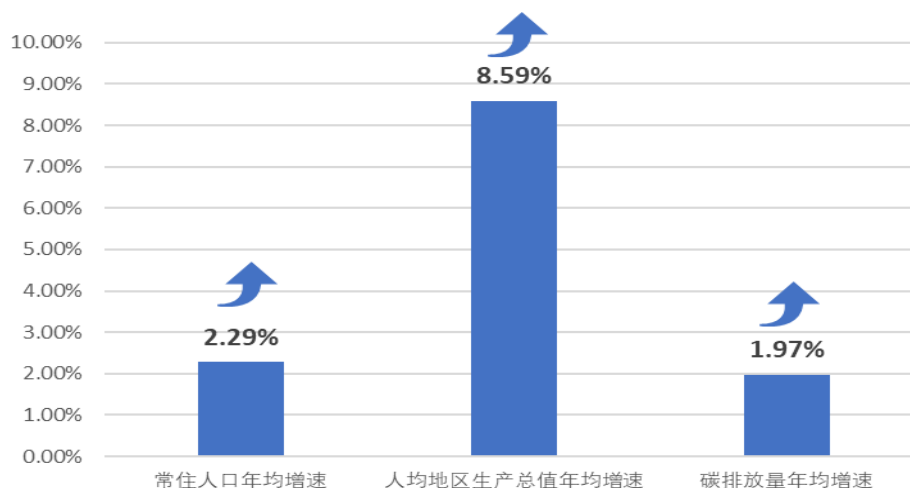
2) 全省层面与碳排放量相关的经济因子筛选

在地区生产总值、GDP 增长率、人均地区生产总值、第二产业增加值、第三产业增加值、规模以上工业增加值 6 项经济因子中，经过面板岭回归模型筛选，得到人均地区生产总值和规模以上工业增加值 2 项因子与全省碳排放量呈现明显的相关关系。

人均地区生产总值与碳排放量呈正相关关系，人均地区生产总值增速是碳排放增速的 4 倍。随着人均地区生产总值的增加，广东省碳排放总量也相应增加。但由于单位 GDP 能耗的不断下降，人均地区生产总值增长带来的碳排放增量并不显著。2009-2017 年全省常住人口年均增速 2.29%，人均地区生产总值年均增速 8.59%，碳排放量年均增速 1.97%，人均地区生产总值与碳排放量增速的比例约为 4:1，在人口规模与经济效益同步高位增长的同时，碳排放量实现低位增长，表明广东省能源利用效率日益提升，绿色低碳经济发展取得良好成效。



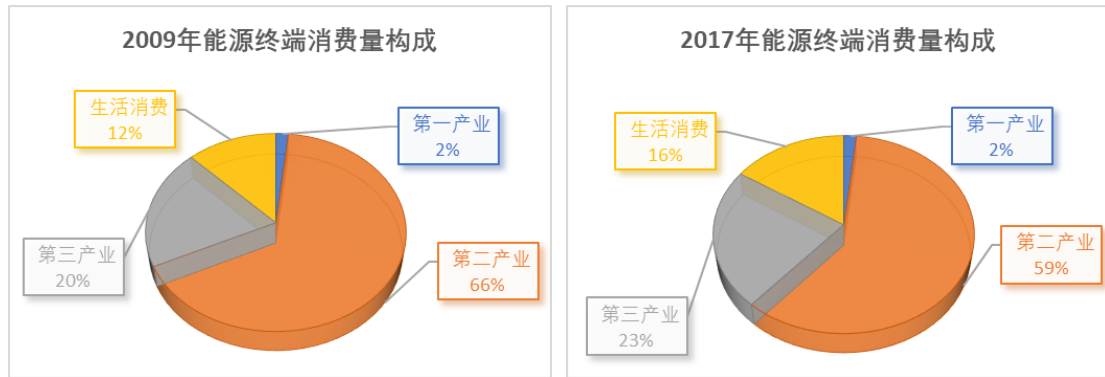
图：2009-2017 年人均地区生产总值、单位 GDP 能耗与碳排放量对比



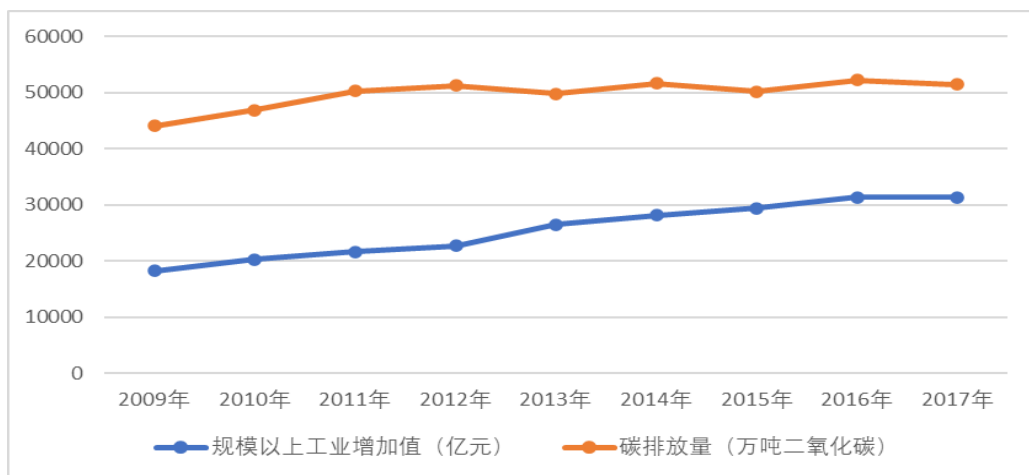
图：2009-2017 年人口、经济、碳排放量增速对比

规模以上工业增加值与碳排放量呈正相关关系，大型工业生产尤其是制造业生产对碳排发挥着显著作用。根据统计年鉴数据，2017 年广东省第二产业增加值占地区总产值比重为 42.05%，但第二产业能源消费量占全省能源消费量的比重达到 59%；第三产业增加值占地区总产值比重为 54.01%，而能源消费量占比仅 23%，表明第二产业仍然是广东省碳排放量的主要来源。但广东省第二产业发展的能源消耗水平正在逐渐降低，2009-2017 年全省第二产业能源消费占比由 66% 下降至 59%，第三产业能源消费占比由 20% 增加至 23%，反映出第二产业能源利用效率逐渐提升。同时，大型工业生产活动对广东省碳排放发挥着显著作用，随着规模以上工业增加值的增加，碳排放量也相应增加。从规上工业类型来看，规

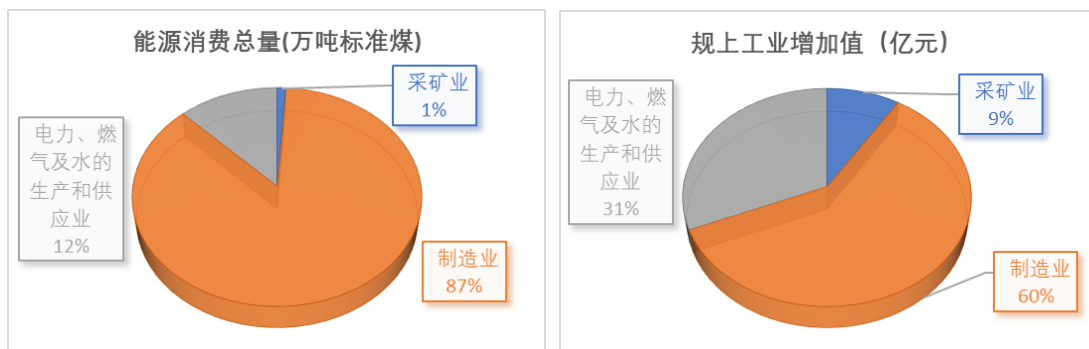
模以上制造业产生的能源消耗最大。2017 年制造业贡献的规上工业增加值占 60%，但产生的能源消耗占规上工业能源消耗总量的 87%，能源利用效率有待提升；电力、燃气及水的生产和供应业以及采矿业贡献的规上工业增加值占比大于能源消耗占比，能源利用效率相对较高。



图：2009、2017 年广东省能源终端消费量构成对比



图：2009-2017 年规模以上工业增加值与碳排放量对比

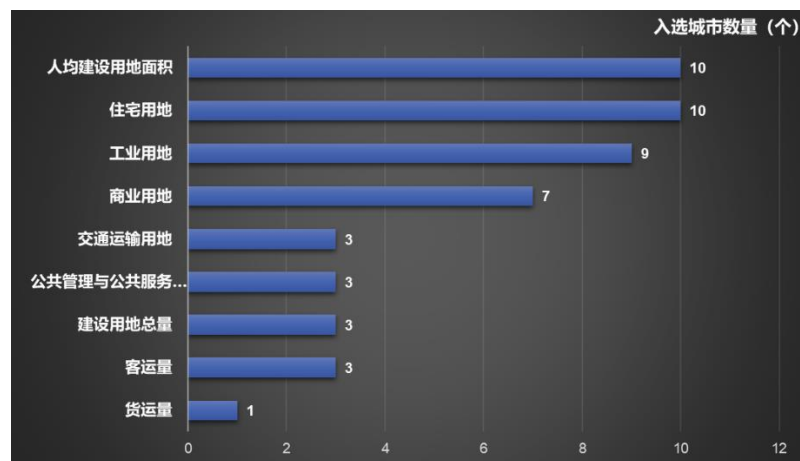


图：2017 年不同类型规模以上工业的能源消耗与工业增加值对比

2、地市层面单因子分析

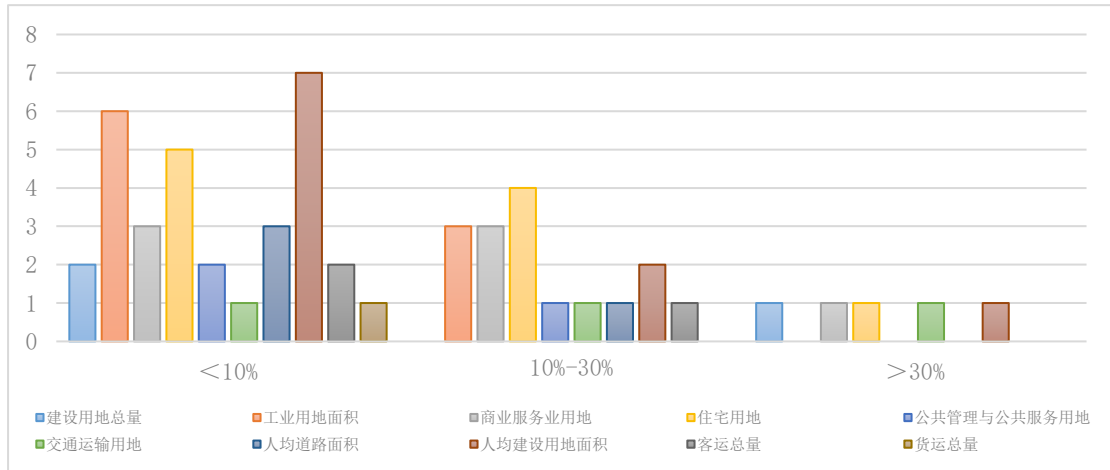
（1）建设用地因子与碳排放的影响关系分析

建设用地方面，根据因子筛选结果在市级层面，人均建设用地面积与碳排放量影响作用有显著相关关系，同时不同城市与碳排放量存在显著相关性的用地类型不同，建设用地结构是碳排放的重要影响因素。21个地市中，从影响因子被筛选出的城市数量上看，与住宅用地相关的城市数量最多（10个），工业用地次之（9个），说明住宅用地、工业用地与较多城市的碳排放量存在显著相关性。



图：21个地级市面板岭回归模型（建设用地因子）筛选结果

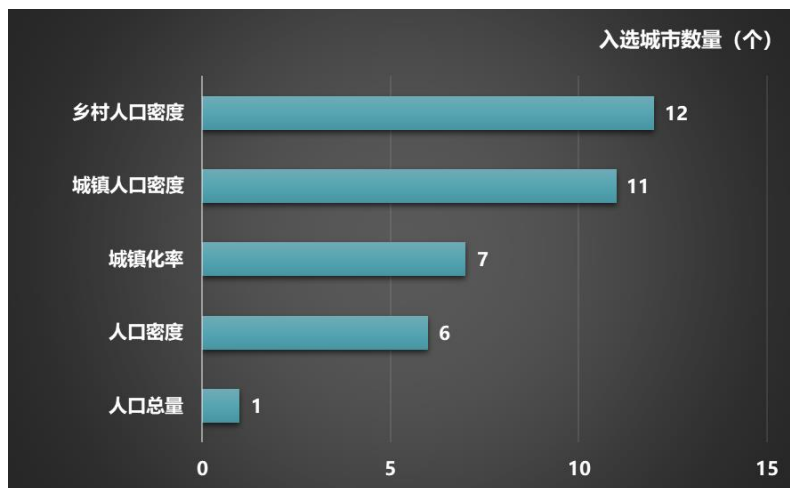
不同开发强度的城市，影响碳排放的用地类型存在显著差异。城市开发强度低于10%的城市，工业用地、人均建设用地面积与碳排放量存在显著相关性；城市开发强度处于10~30%的城市，住宅用地与碳排放量存在较大相关性；城市开发强度高于30%的城市，影响碳排放的用地类型单一且存在较大差异。



图：21个地级市面板岭回归模型（各类建设用地类型）筛选结果

（2）人口因子与碳排放的影响关系分析

在地市层面，城镇化率、人口密度是影响城市碳排放量的主要人口因素，人口的空间分布与碳排放量的相关性更加显著。地市层面的面板岭回归模型中共输入5个与人口相关的因子，其中城镇化率、人口密度、城镇人口密度、乡村人口密度影响显著的城市个数较多，人口总量仅与一个城市（广州）的碳排放量呈现显著关系。

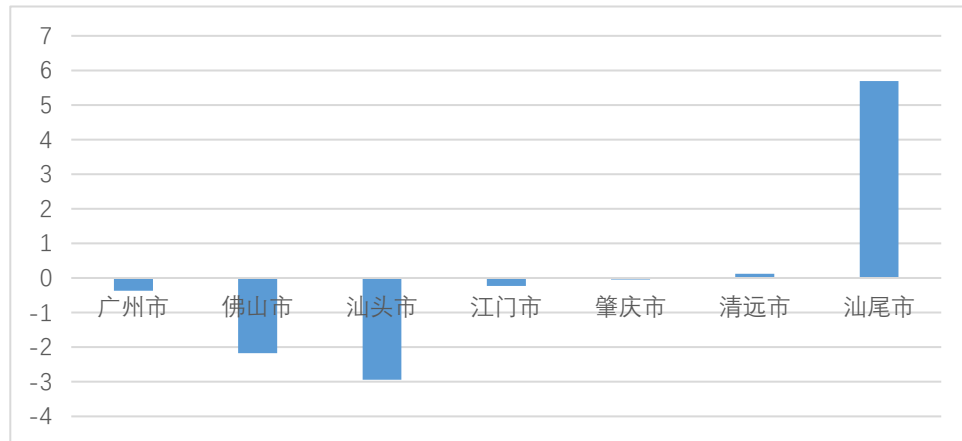


图：21个地级市面板岭回归模型（人口因子）筛选结果

1) 城镇化率

城镇化率与碳排放量存在相关性，人口集聚规模影响相关性的正负特征。全省21个地级市中有7个地级市筛选出城镇化率的因子。其中，广州、佛山、江

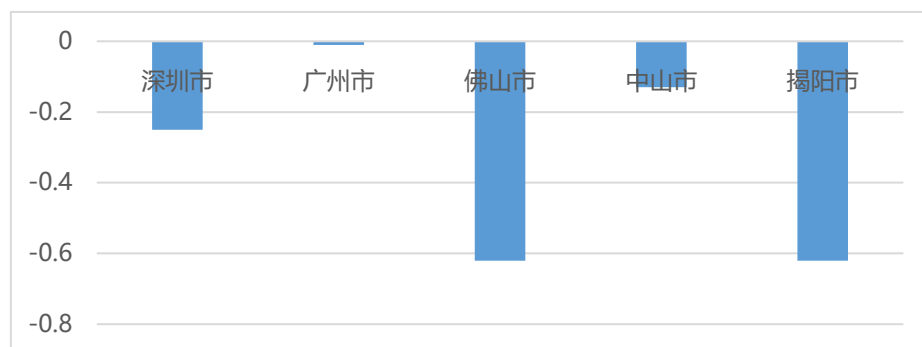
门、肇庆等珠三角城市及汕头的城镇化率与碳排总量呈现负相关，这些城市的常住人口均大于 400 万人。汕尾、清远的城镇化率与碳排总量呈现正相关，这两个城市的常住人口总量少于 400 万人。实证数据呈现出的规律表明，常住人口大于 400 万的城市，促进人口向城镇集聚有助于抑制碳排放量；常住人口小于 400 万的城市，未达到城镇集聚提升碳排放效率的拐点，所以人口向城镇集聚仍会促进碳排放量。



图：21 个地级市面板岭回归模型（城镇化率）筛选结果

2) 人口密度

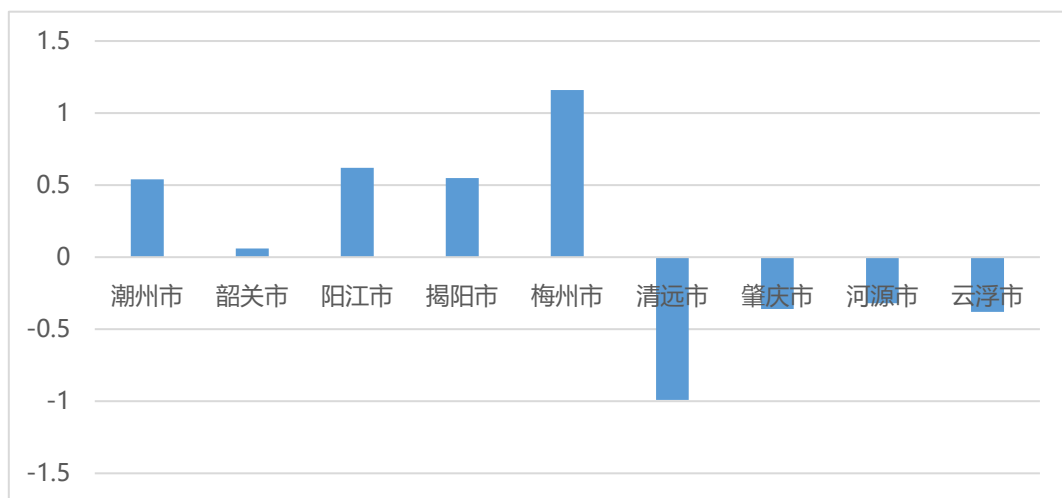
人口集聚达到一定程度后，人口密度与碳排放量存在负相关。深圳、广州、佛山、中山、揭阳的人口密度与碳排总量呈现负相关，这些城市的人口密度均大于 1000 人/平方公里。实证数据呈现出的规律表明，人口集聚度达到 1000 人/平方公里以上的城市，人口集聚有利于抑制碳排放量。



图：21 个地级市面板岭回归模型（人口密度）筛选结果

3) 城镇人口密度

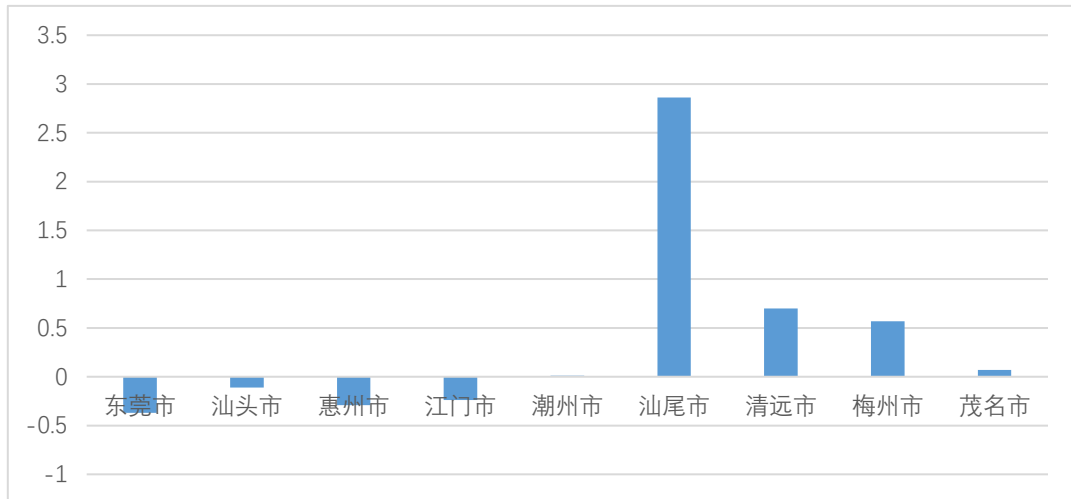
处于城镇化发展中期阶段（城镇化率 30-70%）且城镇人口规模小于 300 万的城市，城镇人口密度与碳排放量存在显著相关性。其中，处于城镇化率 50-70% 阶段的城市，城镇人口密度与碳排呈现正相关；处于城镇化率 30-50% 阶段的城市，城镇人口密度与碳排呈现负相关。全省筛选出城镇人口密度因子的城市，主要是粤东西北城市、珠三角欠发达城市。实证数据呈现出的规律表明，城镇化率 50-70% 阶段的城市未达到城镇人口集聚提升碳排放效率的拐点，城镇人口密度提升仍会促进碳排放量；城镇化率 30-50% 阶段的城市，乡村人口大于城镇人口，乡村的碳排放效率低于城市，而提升城镇人口密度有利于减少碳排总量。



图：21 个地级市面板岭回归模型（城镇人口密度）筛选结果

4) 乡村人口密度

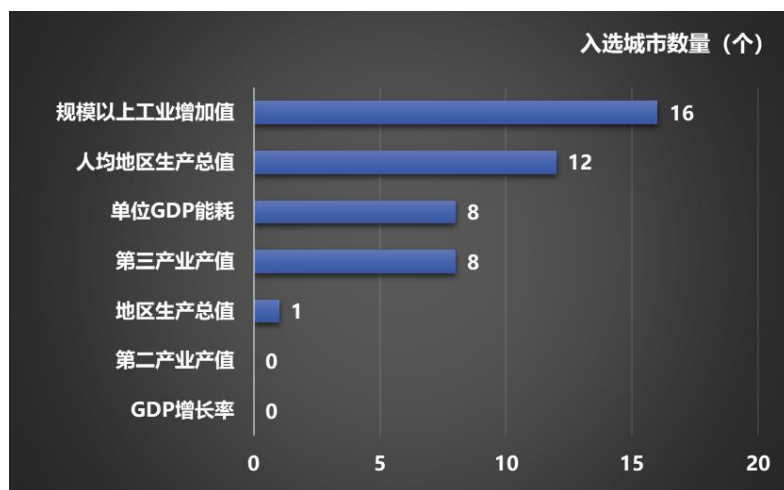
处于城镇化发展中期阶段（城镇化率 30-70%）且乡村人口规模小于 200 万的城市，乡村人口密度与碳排放量存在显著相关性。其中，处于城镇化率 50-65% 阶段的城市，乡村人口密度与碳排呈现正相关；处于城镇化率 65% 以上的城市，乡村人口密度与碳排呈现负相关。全省筛选出乡村人口密度因子的城市，以粤东西北城市居多。实证数据呈现出的规律表明，城镇化率 50-65% 的城市处于城镇人口快速集聚阶段，推动人口向城镇集聚，并按照人地挂钩政策控制乡村建设用地，有利于减少碳排放量；处于城镇化率 65% 以上的城市，接近或者已处于城镇化成熟阶段，乡村人口向城镇转移的速度放缓，这一阶段提升乡村人口密度，有助于减少碳排放量。



图：21 个地级市面板岭回归模型（乡村人口密度）筛选结果

（3）经济因子与碳排放的影响关系分析

在地市层面，人均地区生产总值、第三产业增加值、规模以上工业增加值是影响城市碳排放量的主要经济因素。模型中共输入 7 个与经济相关的因子，其中规模以上工业增加值、人均地区生产总值、第三产业增加值、单位 GDP 能耗影响显著的城市个数较多，地区生产总值仅与一个城市（广州）的碳排放量呈现相关关系。

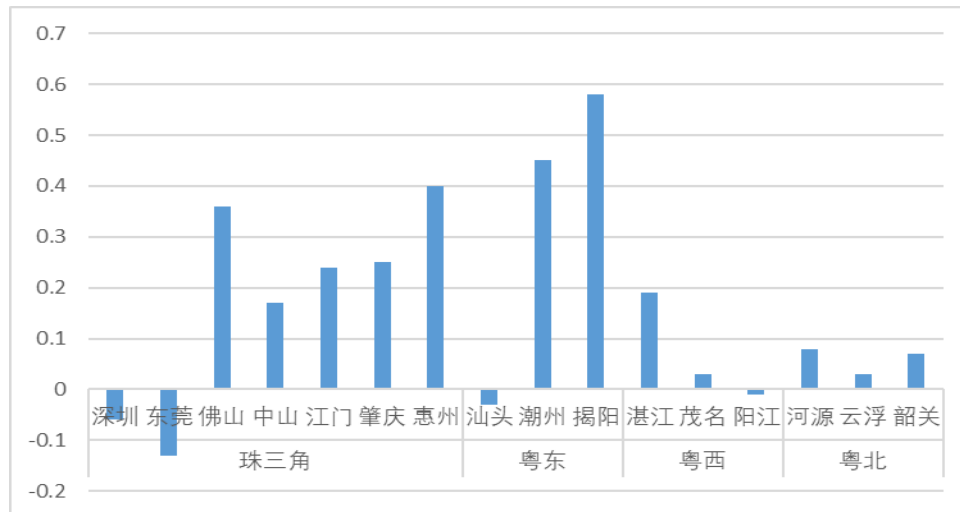


图：21 个地级市面板岭回归模型（经济因子）筛选结果

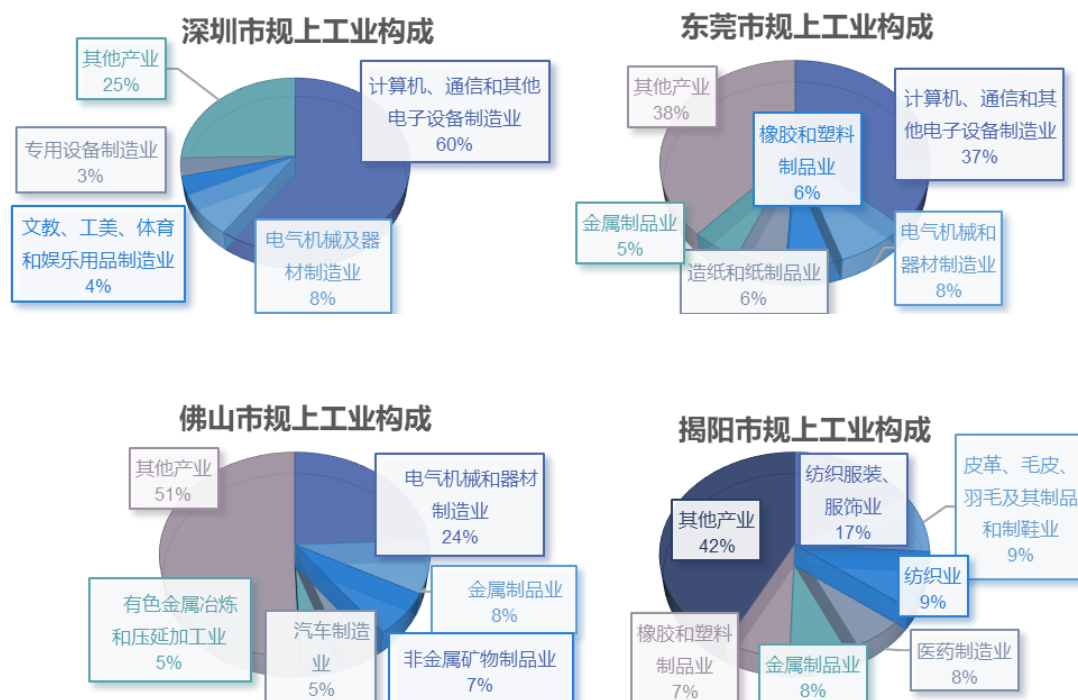
1) 规模以上工业增加值

规模以上工业增加值与碳排放量存在显著相关性，规上工业主导产业类型影响相关性的正负特征。对于深圳、东莞等城市，规上工业由计算机、通信和其

他电子设备制造业等高新技术产业主导，技术更新快，能源利用效率高，规模以上工业增加值与碳排放量呈负相关；对于佛山、揭阳等城市，规上工业由电气机械和器材制造业、金属制品业、纺织业等传统制造业主导，低碳技术应用程度不高，规模以上工业增加值与碳排放量呈正相关。



图：21个地级市面板岭回归模型（规模以上工业增加值）筛选结果



图：代表城市规上工业类型构成

2) 人均地区生产总值

不同经济发展水平的城市，单位 GDP 碳排存在显著差异，整体而言人均 GDP 越高的城市，单位 GDP 碳排放量越低。参照国际上发达国家、发展中国家、贫困国家的人均 GDP 划分标准，以 2 万美元和 8000 美元为界，将广东省 21 个地级市划分为发达、发展中、欠发达三种类型，其中：发达城市包括深圳、珠海 2 个城市，人均 GDP 突破 2 万美元，达到经济发达水平，单位 GDP 碳排则处于低水平；发展中城市包括广州、佛山、东莞等 6 个城市，人均 GDP 处于 8000-20000 美元区间内，属于发展中水平，单位 GDP 碳排以中、低水平为主；欠发达城市包括清远、云浮、梅州等 13 个城市，人均 GDP 不足 8000 美元，属于欠发达水平，单位 GDP 碳排大多呈现中、高水平。整体来看，单位 GDP 碳排放量在人均 GDP 大于 1 万美元的城市形成低值集中区，主要包括广州、深圳、东莞、佛山、珠海 5 个城市。

表：2017 年广东省 21 个地级市单位 GDP 碳排放量

地市	人均地区生产总值 (美元)	人均GDP 分级	规模以上工业增加值 (亿元)	单位GDP 碳排分级
深圳市	> 20000	发达	> 8000	低
珠海市	> 20000	发达	1000-3000	低
广州市	10000-20000	发展中	3000-5000	低
佛山市	10000-20000	发展中	3000-5000	低
东莞市	10000-20000	发展中	3000-5000	低
中山市	8000-10000	发展中	1000-3000	中
惠州市	8000-10000	发展中	1000-3000	中
江门市	8000-10000	发展中	500-1000	高
肇庆市	5000-8000	欠发达	500-1000	中
茂名市	5000-8000	欠发达	500-1000	低
阳江市	5000-8000	欠发达	< 500	中
汕头市	5000-8000	欠发达	500-1000	中
韶关市	5000-8000	欠发达	< 500	高
湛江市	5000-8000	欠发达	500-1000	低
清远市	5000-8000	欠发达	< 500	高
潮州市	5000-8000	欠发达	< 500	高
云浮市	< 4000	欠发达	< 500	中
河源市	< 4000	欠发达	< 500	高
汕尾市	< 4000	欠发达	< 500	高
揭阳市	< 4000	欠发达	< 500	中
梅州市	< 4000	欠发达	< 500	高

备注：人均地区生产总值、第二产业占 GDP 比重、规模以上工业增加值来源于各市统计年鉴；单位 GDP 碳排放量根据碳排放总量除以地区生产总值计算得到；以各城市单位 GDP 碳排放量的最高值和最低值为基础平均划分为三个档次，得到人均碳排“低、中、高”三个等级。

随着经济发展水平的提高，人均 GDP 与碳排放总量的脱钩程度逐渐增强，人均 GDP 超过 8000 美元的城市大多进入强脱钩状态。由负脱钩/弱脱钩转为强脱钩（即人均 GDP 增长的同时碳排放量减少）的城市主要包括深圳、东莞、珠海、佛山、中山，均为发达或发展中城市，人均 GDP 大于 8000 美元；由弱脱钩转为负脱钩或增长连结（即碳排放量增速逐渐接近甚至超过人均 GDP 增速）的城市主要包括阳江、潮州、揭阳，均为欠发达城市，人均 GDP 小于 8000 美元。

表：人均 GDP 与碳排放量脱钩状态定义

状态		定义
负脱钩	扩张负脱钩	碳排放量增速 > 人均GDP增速
	强负脱钩	人均GDP负增长，碳排放量却仍趋于上升
	弱负脱钩	二者均为负增长且碳排放量增速 < 人均GDP增速
脱钩	弱脱钩	碳排放增速 < 人均GDP增速
	强脱钩	人均GDP继续增长，碳排放量却减少
	衰退脱钩	人均GDP与碳排放量同样呈负增长
连结	增长连结	碳排放量随人均GDP增长以大致同比例速度上升
	衰退连结	碳排放与人均GDP呈现同比例负增长状态

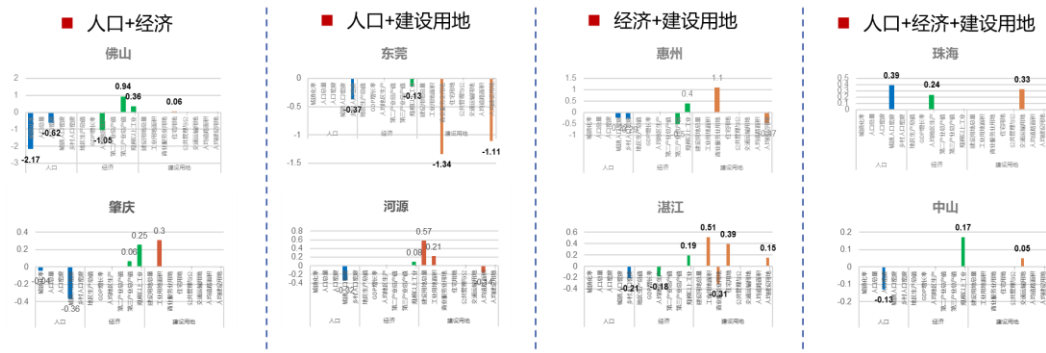
表：2009-2017 年广东省 21 个地级市人均 GDP 与碳排放量脱钩状态表

城市	2009-2011年	2012-2014年	2015-2017年
	状态	状态	状态
广州	弱脱钩	弱脱钩	弱脱钩
深圳	弱脱钩	强脱钩	强脱钩
东莞	弱脱钩	强脱钩	强脱钩
珠海	弱脱钩	弱脱钩	强脱钩
汕头	弱脱钩	弱脱钩	弱脱钩
佛山	扩张负脱钩	强脱钩	强脱钩
中山	弱脱钩	强脱钩	强脱钩
江门	弱脱钩	弱脱钩	弱脱钩
湛江	弱脱钩	弱脱钩	弱脱钩
茂名	弱脱钩	弱脱钩	弱脱钩
肇庆	弱脱钩	弱脱钩	弱脱钩
惠州	弱脱钩	弱脱钩	弱脱钩
梅州	弱脱钩	弱脱钩	弱脱钩
汕尾	弱脱钩	弱脱钩	弱脱钩
河源	弱脱钩	弱脱钩	弱脱钩
阳江	弱脱钩	弱脱钩	扩张负脱钩
清远	弱脱钩	弱脱钩	弱脱钩
潮州	弱脱钩	弱脱钩	增长连结
揭阳	弱脱钩	弱脱钩	增长连结
云浮	弱脱钩	弱脱钩	弱脱钩
韶关	弱脱钩	弱脱钩	弱脱钩

（三）多影响因子分析

1、城市主要影响因子分析

根据面板岭回归模型分析结果，不同城市影响碳排放量的主要因子类型存在差异。例如，佛山、肇庆等城市碳排放量影响因子以人口和经济方面为主，东莞、河源等城市以人口和建设用地方面为主，惠州、湛江等城市以经济和建设用地方为主，珠海、中山等城市则受人口、经济、建设用地三方面因素共同作用。因此，需要针对不同城市的发展特征，制定差异化、组合式的减碳引导政策。



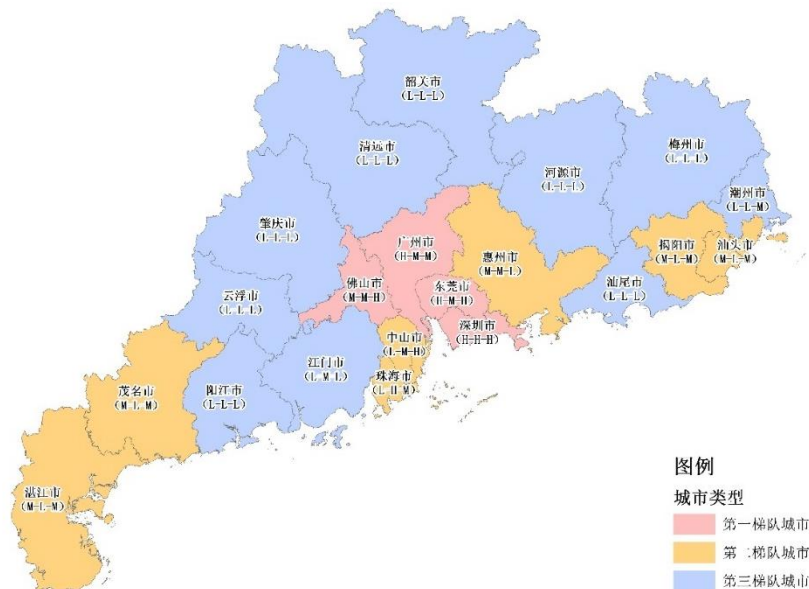
图：不同城市碳排放量影响因子组合

2、城市特征分析

基于人口总量、人均地区生产总值、国土开发强度 3 项单因子数值，对全省 21 个城市进行等级划分。人口方面，划分为超大城市（人口总量 1000 万人以上）、特大城市（人口总量 500~1000 万人）、大城市（人口总量 100~500 万人）；经济方面，划分为发达城市（人均 GDP 大于 20000 美元）、发展中城市（人均 GDP 在 8000~20000 美元）、欠发达城市（人均 GDP 小于 8000 美元）；建设用地方面，划分为高强度城市（国土开发强度大于 30%）、中强度城市（国土开发强度在 10%~30%）、低强度城市（国土开发强度小于 10%）。通过多因子等级组合，形成广东省人口集聚程度、经济发展水平、用地开发强度处于三个梯队的城市分组如下表所示。

表：广东省三个梯队城市分组

城市类型	多因子等级	单因子数值	对应城市
第一梯队城市	双H	H-H-H	深圳
		H-M-H	东莞
	双M—H	H-M-M	广州
		M-M-H	佛山
第二梯队城市	三M	M-M-M	惠州
	双M—L	M-L-M	湛江、茂名、揭阳、汕头
		L-H-M	珠海
	M、H、L各一个	L-M-H	中山
第三梯队城市	双L	L-L-M	潮州
		L-M-L	江门
	三L	L-L-L	肇庆、清远、梅州、韶关、河源、汕尾、阳江、云浮



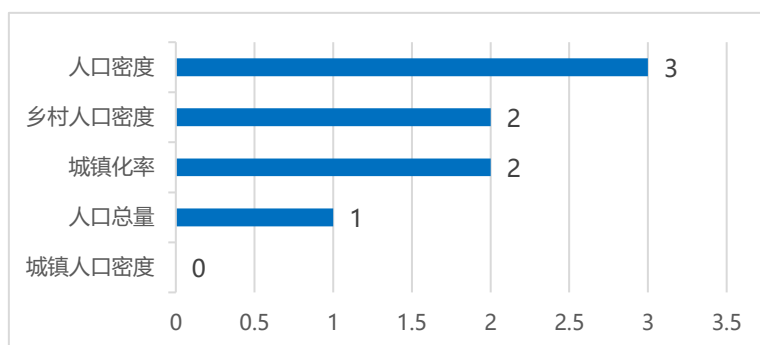
图：广东省三个梯队城市划分

3、同类城市影响因子分析

(1) 第一梯队城市

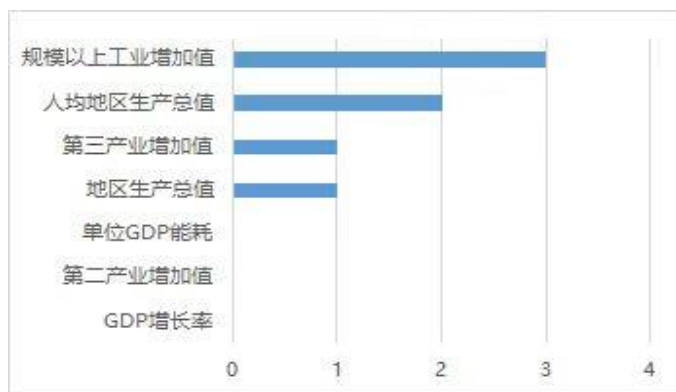
第一梯队城市包括广州、深圳、东莞、佛山。这类城市体现出人口密度高且高度城镇化、经济达到发展中以上水平、国土开发强度整体较高的特征。

人口因子方面，第一梯队城市的常住人口大于 900 万人，城镇化率高于 85%，人口密度达到 2000 人/平方公里，人口密度与碳排放量呈现负相关，体现出第一梯队城市的人口集聚有利于控制碳排放量。



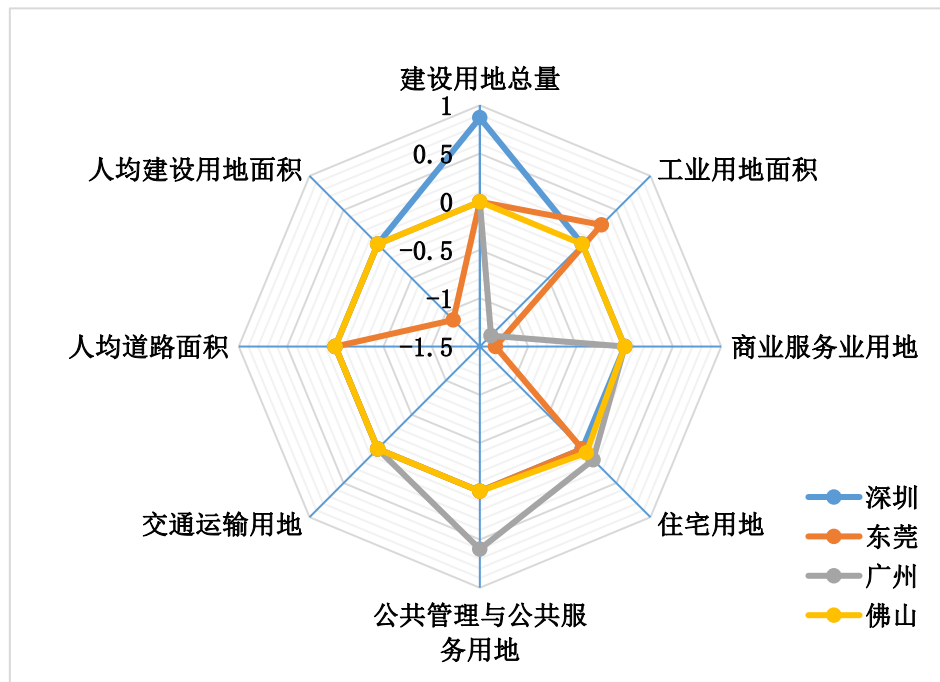
图：第一梯队城市人口因子筛选结果（城市数量）

经济因子方面，第一梯队城市的人均 GDP 大于 1 万美元，达到发展中以上水平，随着人口集聚度和经济水平提升，人均 GDP 与碳排放总量的脱钩程度逐渐增强，由负脱钩或弱脱钩转为强脱钩（即人均 GDP 增长的同时碳排放量减少），步入经济高质量发展阶段。同时，第一梯队城市基本步入后工业化时期，经济方面规模以上工业增加值对碳排放量起主要影响作用。当规上工业主导类型以高新技术产业为主时，规上工业增加值与碳排放量呈现负相关，如深圳、东莞等城市；当规上工业主导类型以传统制造业为主时，规上工业增加值与碳排放量呈现正相关，如佛山等城市。



图：第一梯队城市经济因子筛选结果（城市数量）

建设用地因子方面，第一梯队城市的土地开发强度均已接近饱和，影响碳排放量的主要建设用地因子各不相同。其中，广州市碳排放量主要受工业用地、住宅用地、公共管理与公共服务用地面积的影响，深圳市碳排放量主要受工业用地、住宅用地、公共管理与公共服务用地面积的影响，东莞市碳排放量主要受商业服务业用地和人均建设用地面积的影响，佛山市碳排放量主要受住宅用地面积的影响。深圳、东莞、佛山的规上工业增加值是影响碳排放量的重要因素，但是工业用地面积对碳排放量没有影响关系，表明这三个城市碳排放量的增长不以工业用地面积的扩张为主要原因。

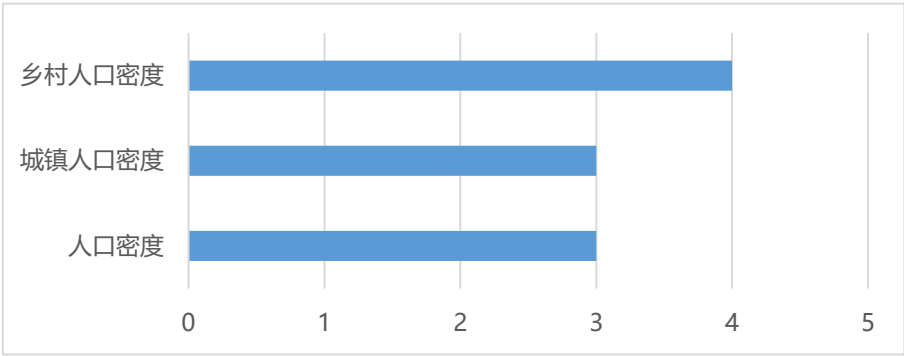


图：第一梯队城市建设用地因子面板岭回归结果

（2）第二梯队城市

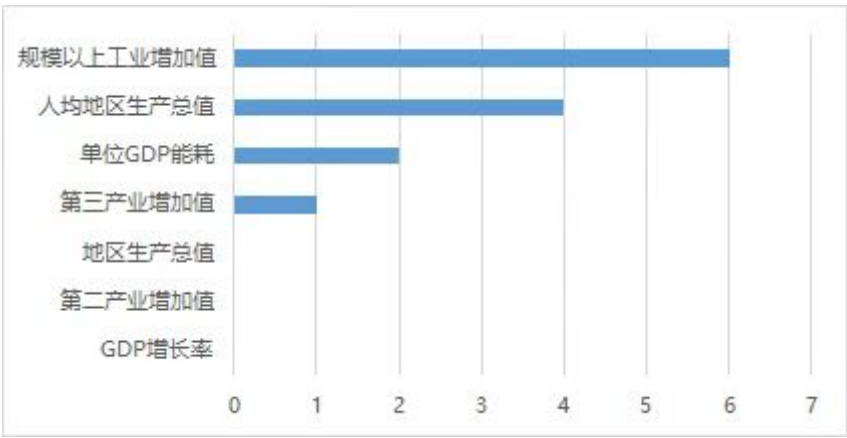
第二梯队城市包括惠州、湛江、茂名、揭阳、汕头、珠海、中山。这类城市体现出人口总量和城镇化处于中等水平、经济总量中等、国土开发强度中等的特征。

人口因子方面，第二梯队城市常住人口总体大于 400 万人，处于城镇化快速发展阶段（50%~65%），人口密度大于 500 人/平方公里，人口密度尤其是乡村人口密度与碳排放量呈现显著相关。大部分城市的乡村人口密度与碳排放量呈现负相关，提升乡村人口密度有利于控制碳排放量。



图：第二梯队城市人口因子筛选结果（城市数量）

经济因子方面，第二梯队城市的人均 GDP 超过 4000 美元，多处于工业化中期阶段，规上工业主导产业类型多为传统制造业，分析结果显示人均地区生产总值、规模以上工业增加值与碳排放量密切相关。湛江规上工业以传统制造业为主导，规上工业增加值、工业用地面积同时与碳排放呈现正相关，应推动规上工业绿色转型和工业用地集约节约利用；汕头规上工业同样以传统制造业为主导，规上工业增加值与碳排放呈负相关，工业用地面积与碳排放呈正相关，工业领域对碳排增长的影响主要来自工业用地面积扩张，应加强工业用地集约节约利用。

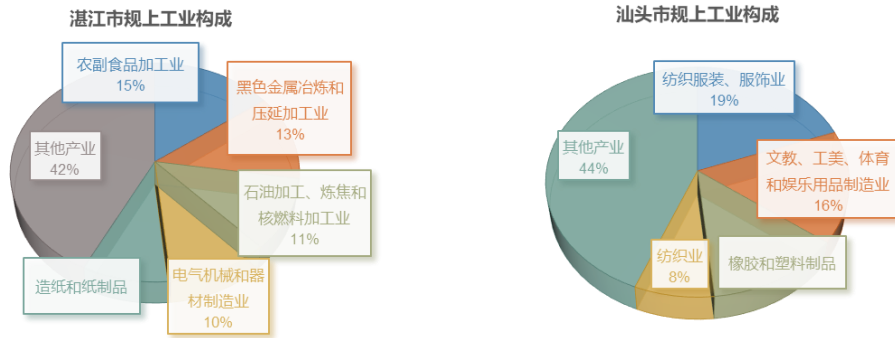


图：第二梯队城市经济因子筛选结果（城市数量）

表：第二梯队城市规上工业主导产业类型

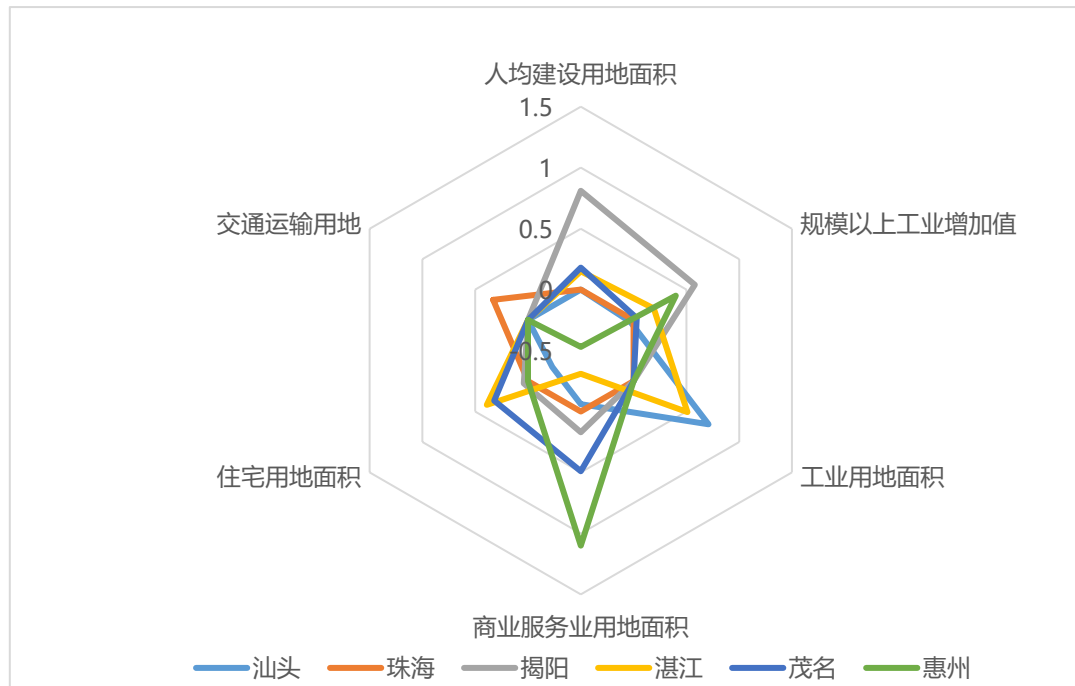
城市	规上工业主导产业类型
惠州	计算机、通信和其他电子设备制造业，化学原料和化学制品制造业，石油加工、炼焦和核燃料加工业，电气机械和器材制造业
湛江	农副食品加工业，黑色金属冶炼和压延加工业，石油加工、炼焦和核燃料加工业，电气机械和器材制造业
茂名	石油加工、炼焦和核燃料加工业，农副食品加工业，化学原料和化学制品制造业，非金属矿物制品业

揭阳	纺织服装、服饰业，皮革、毛皮、羽毛及其制品和制鞋业，纺织业
汕头	纺织服装、服饰业，文教、工美、体育和娱乐用品制造业，橡胶和塑料制品业
珠海	电气机械和器材制造业，计算机、通信和其他电子设备制造业，石油加工、炼焦和核燃料加工业
中山	电气机械和器材制造业，计算机、通信和其他电子设备制造业，通用设备制造业



图：湛江市、汕头市规上工业主导产业构成

建设用地因子方面，第二梯队城市处于土地快速城镇化阶段，国土开发强度基本处于 10%~30%，处于经济快速增长、人口快速集聚的阶段，对商业服务业、住宅用地的需求较大，商业服务业用地和住宅用地面积与碳排放关系密切。对国土开发强度低于 15%的揭阳、湛江、茂名等城市，土地城镇化是城市发展的重要驱动力，土地使用较为粗放，人均建设用地面积与碳排放量多呈现正相关。

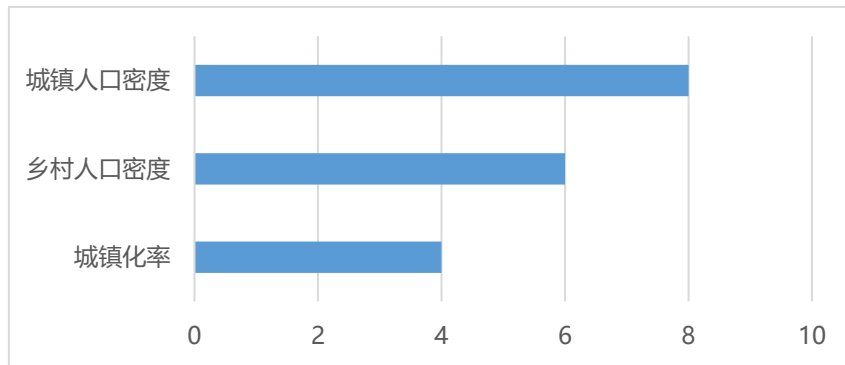


表：第二梯队城市建设用地因子面板岭回归结果

（3）第三梯队城市

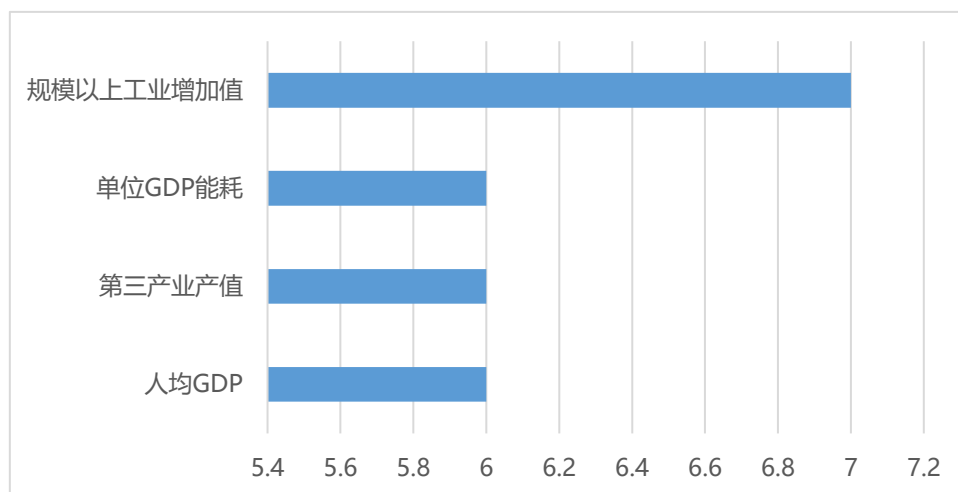
第三梯队涉及城市包括江门、肇庆、清远、韶关、河源、阳江、云浮、潮州、汕尾、梅州。这类城市体现出人口密度较低、位于城镇化中期阶段，经济为欠发达水平，国土开发强度低的特征。

人口因子方面，第三梯队城市乡村人口密度与碳排正相关。这一梯队城市处于城镇化快速发展水平（40%-65%），尤其是城镇化率小于 50%的城市乡村人口大于城镇人口，乡村土地利用较为粗放，推动人口向城镇集聚有利于控制碳排放量。



图：第三梯队城市人口因子筛选结果（城市数量）

经济因子方面，第三梯队城市处于工业化中期，主导产业以金属制品业、非金属矿物制品业、有色金属冶炼和压延加工业等传统制造业为主，规模以上工业增加值与碳排放呈现正相关。第三梯队城市产业结构多为“三二一”，大部分城市（除潮州、肇庆外）三产比重大于二产比重，第三产业增加值整体与碳排放呈现正相关。与此同时，第三梯队城市的经济增长与碳排放关系密切，不同城市呈现差异化脱钩状态，整体呈现出通过高碳排模式换取人口集聚和经济增长的状态。大部分城市 GDP 与碳排放量呈现弱脱钩关系（碳排放增速低于人均 GDP 增速），阳江从弱脱钩转变为扩张负脱钩（碳排放量比人均 GDP 以更高速度增长），潮州从弱脱钩转变为增长连结（碳排放量随人均 GDP 增长以大致同比例速度上升）。说明这些城市依赖于碳排换取经济增长，阳江、潮州的高碳排模式持续加深。

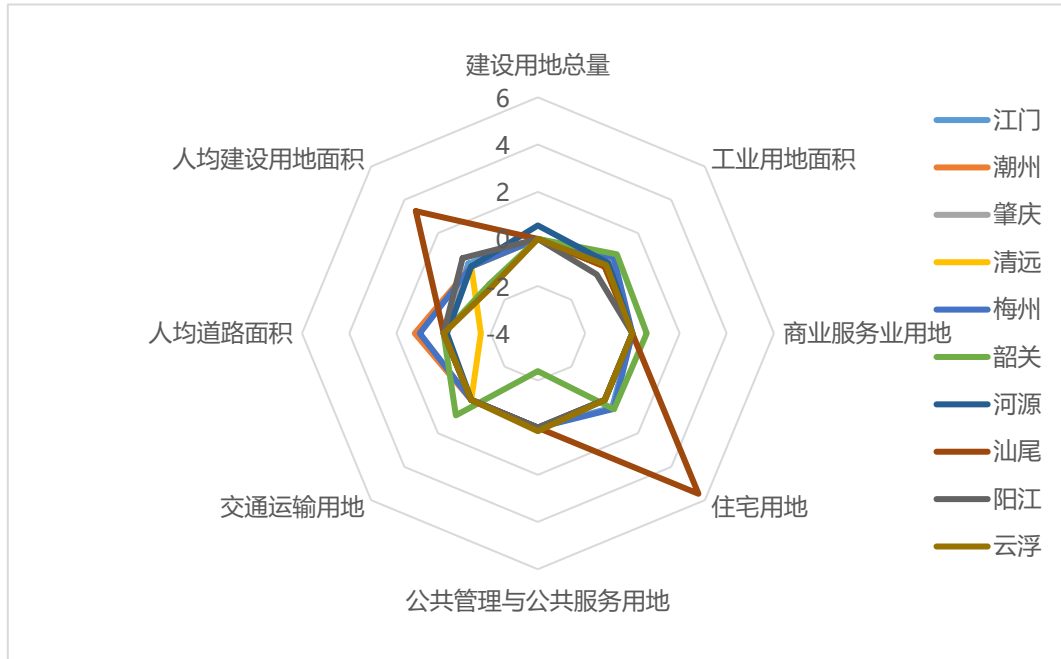


图：第三梯队城市经济因子筛选结果（城市数量）

表：第三梯队城市经济数据特征

城市	主导产业
江门市	食品制造业、金属制品业、电气机械和器材制造业
潮州市	非金属矿物制品业、有色金属冶炼和压延加工业、电力、热力生产和供应业
肇庆市	金属制品业、非金属矿物制品业、有色金属冶炼和压延加工业
清远市	非金属矿物制品业、有色金属冶炼和压延加工业、化学原料制造业
梅州市	非金属矿物制品业、计算机、通信和其他电子设备制造业、电力、热力生产和供应业
韶关市	黑色金属冶炼和压延加工业、非金属矿物制品业、有色金属冶炼和压延加工业
河源市	计算机、通信和其他电子设备制造业、黑色金属冶炼和压延加工业、非金属矿物制品业
汕尾市	计算机、通信和其他电子设备制造业、文教、工美、体育和娱乐用品制造业、橡胶和塑料制品业
阳江市	金属制品业、电力、热力生产和供应业、有色金属冶炼和压延加工业
云浮市	非金属矿物制品业、金属制品业、电力、热力生产和供应业

建设用地因子方面，第三梯队城市多为开发强度低（小于 10%）、处于城镇化中期阶段（低于 65%）的城市，正处于工业用地快速扩张时期，工业用地面积与碳排放量呈现正相关。

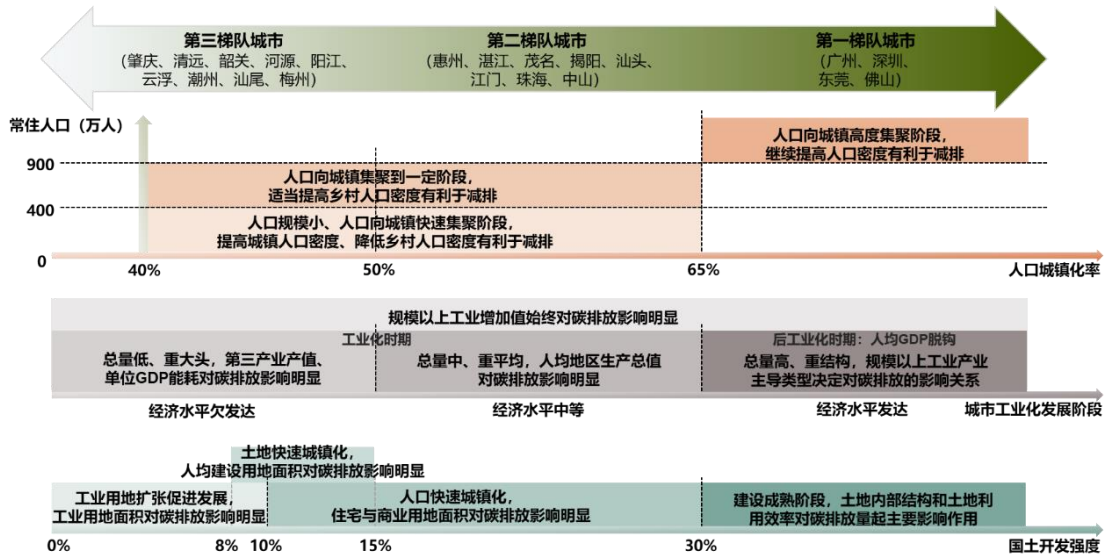


表：第三梯队城市建设用地因子的面板岭回归模型结果情况

4、多影响因子分析小结

21 个地级市碳排放影响因子关系研究表明，城市碳排放影响因子与广东省各地市社会经济发展水平紧密相关。**第一，同类社会经济发展特征的城市，与碳排放量密切相关的影响因子表现出一定共性。**例如，对于经济水平欠发达的城市而言，这一阶段城市的经济总量水平低，经济规模比重较大的部分对整体影响较为明显，碳排放影响因子研究表明，产业规模占比大的规上工业和产业结构占比大的第三产业与碳排放量呈现显著相关；又如国土开发强度处于 10-30%阶段的城市，这一阶段城市人口处于快速城镇化阶段，人口进城的过程中对商业、住宅用地的需求较大，碳排放影响因子研究表明，商业用地和住宅用地与碳排放量关系密切。**第二，在不同社会经济发展特征的城市，同一影响因子与碳排放量的相关关系呈现出差异化特征。**例如，人口影响因子中的“乡村人口密度”，在广东省城镇化率处于 40-65%阶段、且常住人口处于 400-900 万人的城市，乡村人口

密度与碳排放量多呈现出负相关关系；而在城镇化率同处于 40-65%阶段、且常住人口小于 400 万人的城市，乡村人口密度与碳排放量多呈现出正相关关系。



图：广东省各城市主要碳排放影响因子与社会经济发展水平的关系图

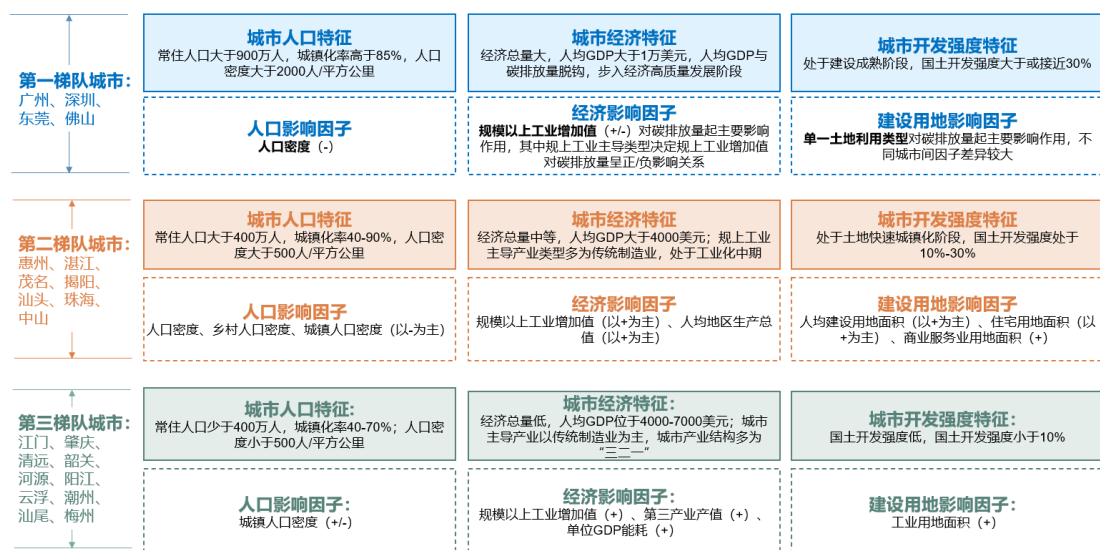
对于上述结论的具体表征，可见三个梯队城市社会经济发展水平特征与碳排放影响因子的关系小结：

第一梯队城市包括广州、深圳、东莞、佛山。人口方面，处于城镇化成熟阶段，常住人口大于 900 万人，城镇化率高于 85%，人口密度达到 2000 人/平方公里以上；人口密度是影响碳排放量的主要因子，并且与碳排放量呈负相关，城市人口集聚有利于抑制碳排。经济方面，处于后工业化时期，人均 GDP 大于 1 万美元，工业发展带来的碳排放量增长不以工业用地的扩张为主要原因，人均 GDP 与碳排放量脱钩，步入经济高质量发展阶段；规模以上工业增加值对碳排放量起主要影响作用，其中规上工业主导类型决定规上工业增加值对碳排放量呈正/负影响关系。建设用地方面，处于建设成熟阶段，国土开发强度大于或接近 30%，单一土地利用类型对碳排放量起主要影响作用，不同城市间因子差异较大。

第二梯队城市包括惠州、湛江、茂名、揭阳、汕头、江门、珠海、中山。人口方面，处于城镇化快速发展阶段，常住人口大于 400 万人，城镇化率高于 40%，人口密度达到 500 人/平方公里以上；乡村人口密度、人口密度、城镇人口密度是影响碳排放量的主要因子，其中乡村人口密度大多与碳排放量呈负相关。经济

方面，处于工业化中期，人均 GDP 大于 4000 美元，规上工业主导产业类型多为传统制造业，规模以上工业增加值和人均地区生产总值大多与碳排放量呈正相关。建设用地方面，处于土地快速城镇化阶段，国土开发强度处于 10%~30%；对住宅、商业用地的需求较大，住宅用地面积、商业服务业用地面积是影响碳排放量的主要因子；当国土开发强度低于 15%时，土地城镇化是城市发展的重要驱动力，人均建设用地面积增长促进碳排放量的增加。

第三梯队城市包括肇庆、清远、韶关、河源、阳江、云浮、潮州、汕尾、梅州。人口方面，处于城镇化中期阶段，城镇化率处于 40-65%水平，总人口小于 400 万人；各城市的人口密度低于 1000 人/平方公里，大部分在 400 人/平方公里以下；城镇人口密度和乡村人口密度为影响碳排放量的主要因子，其中城镇人口密度因城市呈现出正负相关差异，乡村人口密度与碳排放量呈现正相关。经济方面，各城市经济处于欠发达水平，人均 GDP 处于 4000-7000 美元之间；第三产业增加值、规上工业增加值、单位 GDP 能耗为影响碳排放量的主要因子，均呈现正相关；建设用地方面，各城市的开发强度小于 10%，工业用地面积为影响碳排放量的主要因子，呈现正相关。



图：城市划分结果、特征和影响因子情况

六、广东省碳排放量多情景预测研究

（一）预测情景设置

研究设置“维持现状水平”和“发展变化水平”两种情景，以各地在编 2035 年国土空间总体规划为对象，预测各地市 2035 年碳排放量，具体思路如下：

1、情景一（维持现状水平）

基于现状土地碳排放强度的 2035 年城市碳排放总量预测。依据同期课题《国土空间规划助力广东省碳达峰碳中和——基于国土空间规划用地类型碳排放研究》提供的 2020 年广东省各地市主要用地类型碳排放强度，测算各地市 2035 年国土空间总体规划用途管制方案（阶段成果）对应的碳排放量。

碳排放总量= $\sum_{i=1}^n A_i \times K_i$ ，其中 A 为用地类型面积，K 为用地碳排放强度。

表：2020 年广东省各地市主要用地类型碳排放平均强度表

城市	工业用地	交通运输用地	商业/公共管理与公共服务用地	仓储物流用地	城镇居民生活
广州市	8.16	3.290	4.74	4.4	1.12
深圳市	8.59	6.330	8.52	19.75	4.84
珠海市	12.14	3.36	2.41	5.93	2.78
汕头市	5.21	3.30	2.86	5.42	3.47
佛山市	5.69	3.89	3.47	4.49	0.45
韶关市	27.17	0.91	1.02	5.91	2.88
河源市	5.76	0.95	1.31	17.51	1.3
梅州市	14.2	1.19	0.71	8.4	1.27
惠州市	15.08	2.00	2.09	3.96	0.8
汕尾市	5.03	1.34	1.60	8.76	0.92
东莞市	7.39	4.88	4.25	4.08	1.49
中山市	4.83	3.94	3.24	2.54	2.93
江门市	4.96	1.97	1.67	4.5	2.38
阳江市	24.92	1.61	0.78	8.92	0.94
湛江市	25.73	0.89	1.38	4.89	4.21
茂名市	35.63	1.62	1.44	8.98	0.57
肇庆市	10.83	1.59	1.64	3.76	0.54
清远市	17.64	1.49	0.92	6.66	0.45
潮州市	5.14	2.13	1.53	3.22	1.03
揭阳市	6.58	1.78	1.58	4.15	1.72

云浮市	17.47	1.61	0.77	14.12	1.47
-----	-------	------	------	-------	------

2、情景二（发展变化水平）

城市多影响因子与碳排放量实证关系模型的 2035 年碳排放总量预测。依据本课题“广东省碳排放量与影响因子间的关系研究”构建的 21 个地级市碳排放量与影响因子数学关系模型，结合各地市 2035 年国土空间总体规划土地利用方案、空间规划指标体系规划值等（阶段成果），测算代表城市 2035 年国土空间总体规划对应的城市碳排放量。

四个代表城市碳排放预测模型如下：

惠州市预测模型：

$$\ln CE = -0.22 \ln URPDEN - 0.29 \ln RUPDEN - 0.50 \ln VTER + 0.4 \ln PVIND + 1.1 \ln COM - 0.47 \ln PLAND + 11.72$$

其中，CE 代表碳排放量，URPDEN 代表城镇人口密度，RUPDEN 代表乡村人口密度，VTER 代表第三产业增加值，PVIND 代表规模以上工业增加值，COM 代表商业服务业用地，PLAND 代表人均建设用地。

肇庆市预测模型：

$$\ln CE = -0.04 \ln UR - 0.36 \ln URPDEN + 0.60 \ln VTER + 0.25 \ln PVIND + 0.30 \ln IND + 0.13 \ln EI + 7.08$$

其中，CE 代表碳排放量，UR 代表城镇化率，URPDEN 代表城镇人口密度，VTER 代表第三产业增加值，PVIND 代表规模以上工业增加值，IND 代表工业用地面积，EI 代表单位 GDP 能耗。

中山市预测模型：

$$\ln CE = -0.13 \ln PDEN + 0.17 \ln PVIND + 0.05 \ln TRA - 0.25 \ln EI + 7.22$$

其中，CE 代表碳排放量，PDEN 代表城人口密度，PVIND 代表规模以上工业增加值，TRA 代表交通运输用地面积，EI 代表单位 GDP 能耗。

揭阳市预测模型：

$$\ln CE = -0.62 \ln PDEN + 0.55 \ln URPDEN + 0.58 \ln PVIND + 0.17 \ln COM + 0.04 \ln RES + 0.81 \ln PLAND + 0.11 \ln PAS + 1.04 \ln EI - 2.37$$

其中,CE 代表碳排放量,PDEN 代表城人口密度,URPDEN 代表城镇人口密度,PVIND 代表规模以上工业增加值,COM 代表商业服务业用地,RES 代表住宅用地面积,PLAND 代表人均建设用地,PAS 代表客运总量,EI 代表单位 GDP 能耗。

（二）代表城市选取

以广东省各地在编的 2035 年国土空间总体规划为基础,选取整体编制进度较快的惠州、肇庆、中山、揭阳四个代表城市,作为本次碳排放多情景预测工作的研究对象。

惠州市: 2017 年惠州市常住人口总量为 572.22 万人,城镇化率 69.55 %,在人口方面属于特大城市;地区生产总值 3745.75 亿元,人均地区生产总值 66007 元(折合 9068.64 美元),在经济方面属于发展中城市;全市建设用地总面积 1125.35 平方公里,国土开发强度为 9.92%,在建设用地方面,属于低开发强度城市。综合人口、经济和建设用地特征,惠州市属于第二梯队城市。

肇庆市: 2017 年肇庆市常住人口总量为 403.88 万人,城镇化率 46.78 %,在人口方面属于大城市;地区生产总值 1964.97 亿元,人均地区生产总值 48781 元(折合 6701.96 美元),在经济方面属于贫困城市;全市建设用地总面积 806.60 平方公里,国土开发强度为 5.42%,在建设用地方面属于地开发强度城市。综合人口、经济和建设用地特征,肇庆市属于第二梯队城市。

中山市: 2017 年中山市常住人口总量为 418.04 万人,城镇化率 88.28%,在人口方面属于大城市;地区生产总值 2939.52 亿元,人均地区生产总值 71198 元(折合 9781.85 美元),在经济方面属于发展中城市;全市建设用地总面积 627.92 平方公里,国土开发强度为 35.20%,在建设用地方面属于高开发强度城市。综合人口、经济和建设用地特征,中山市属于第二梯队城市。

揭阳市: 2017 年揭阳市常住人口总量为 570.62 万人,城镇化率 51.08 %,在人口方面属于特大城市;地区生产总值 1842.67 亿元,人均地区生产总值 32124 元(折合 4413.49 美元),在经济方面属于贫困城市;全市建设用地总面积 738.16 平方公里,国土开发强度为 14.09%,在建设用地方面属于中等开发强度城市。综合人口、经济和建设用地特征,揭阳市属于第二梯队城市。

（三）不同情景预测结果对比

为了对比验证预测结果的正确性，根据广东省应对气候变化研究中心发布的《广东省碳排放峰值研究报告》研究结果中部分城市碳达峰峰值，作为情景预测结果的对比数据：

表：珠三角城市及区域峰值初步预测结果

城市	预测达峰年份	碳排放峰值（万吨）
肇庆	2028	2260.10
江门	2025	2794.93
惠州	2028	8584.46
东莞	2023	5932.69
中山	2023	2331.92
珠海	2022	2255.68
佛山	2023	5605.26
广州	2022	10339.95
深圳	2022	6052.62
珠三角	2025	44207.30

注：数据来源于《广东省碳排放峰值研究报告》（广东省应对气候变化研究中心，初稿）

四个城市预测结果如下表所示，可以发现惠州、肇庆的两种情景预测结果相近，且情景二（发展变化水平）略低于情景一（维持现状水平）预测量；两种情景碳排放预测量均未超过 2028 年碳达峰峰值，意味着在编的 2035 年国土空间总体规划阶段性方案中建设用地结构较为合理；此外相比预测结果，惠州与肇庆两地碳达峰峰值预留空间较大，可适当提高对地方碳排放量的约束要求；中山市在保持 2020 年土地碳排放强度不变的情况下，按照规划用地面积，碳排放量超过达峰预测值，因此需要提升 2035 年土地碳排放效率或者优化用地方案结构。

表：珠三角城市及区域峰值初步预测结果

单位：万吨

城市	情景一	情景二	碳排放峰值 与达峰年份	结论
惠州市	5396	4082	8585 (2028 年)	两种情景预测结果相近，且情景二（发展变化水平）略低于情景一（维持现状水平）预测量；两种情景碳排放预测量均未超过 2028 年碳达峰峰值。 相比预测结果，地市碳达峰峰值预留空间较大，可适当提高对地方碳排放量的约束要求。
肇庆市	1561	1388	2260 (2028 年)	
中山市	2433	1887	2332 (2023 年)	在保持 2020 年土地碳排放强度不变的情况下，按照规划用地面积，碳排放量超过达峰预测值
揭阳市	1750	2112	暂无	暂无

注：情景一是基于土地碳排放强度的 2035 年城市碳排放总量预测；情景二是基于城市多影响因子与碳排放量实证数学关系式的 2035 年碳排放总量预测；对比数据来源于《广东省碳排放峰值研究报告》（广东省应对气候变化研究中心，初稿）。

七、结论与建议

（一）结论

1、广东省经济发展逐渐摆脱高碳排路径依赖

（1）从全省总量来看，广东省人口总量、地区生产总值、建设用地总量与全省碳排放总量增长呈现出高度趋同的状态。

（2）从全省增速来看，广东省地区生产总值增速是全省碳排放量增速的 5 倍，明显高于人口总量增速比与建设用地总量增速比，反映出广东省经济发展逐渐摆脱高碳排的路径依赖。2009-2017 年，广东省 GDP 年均增速 11.11%，而碳排放量年均增速仅 1.97%，GDP 增速约为碳排放量增速的 5 倍；人口总量年均增速 2.29%，与碳排放量增速大致持平；建设用地总量年均增速 1.61%，略低于碳排放量增速。珠三角和沿海经济带的 GDP 与碳排放量同步高速增长，其中深圳市和东莞市 GDP 增量高但碳排放增量低（见图 1），绿色低碳发展水平走在全省前列。

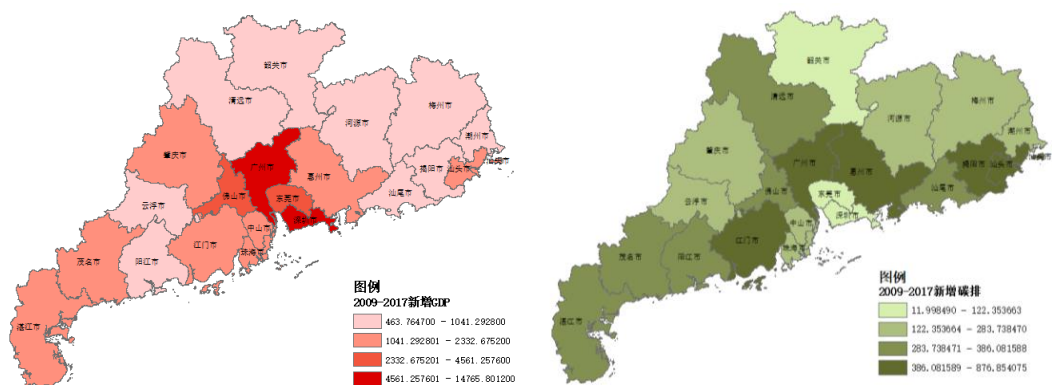


图 1：2009-2017 年广东省 GDP（左）和碳排放量（右）增量空间分布图

（3）从地市脱钩来看，城市经济发展水平越高，人均 GDP 与碳排放总量的脱钩程度越明显。2009-2017 年，广东省大部分城市均实现了人均 GDP 与碳排放量脱钩的状态，其中人均 GDP 超过 10000 美元的发达城市（如深圳、珠海、佛山、东莞）已进入强脱钩状态，随着人均 GDP 的增加，碳排放量呈现减少的趋势。

2、部分影响因子对全省及地市碳排放量均呈现出显著影响作用

（1）“人口密度、规上工业增加值、人均地区生产总值、建设用地结构”是全省层面和地市层面共同的碳排放影响因子。

(2) 人口、经济、建设用地均体现出“结构”而非“总量”对碳排放总量存在更为显著的影响作用，人口的空间分布、城市产业结构和主导产业类型、建设用地结构和开发强度与碳排放量的影响关系显著，说明广东省双碳目标下对人口、经济、建设用地的管控重点应由“控总量”聚焦为“优结构”。

3、广东省碳排放影响因子在城市之间呈现出分异特征

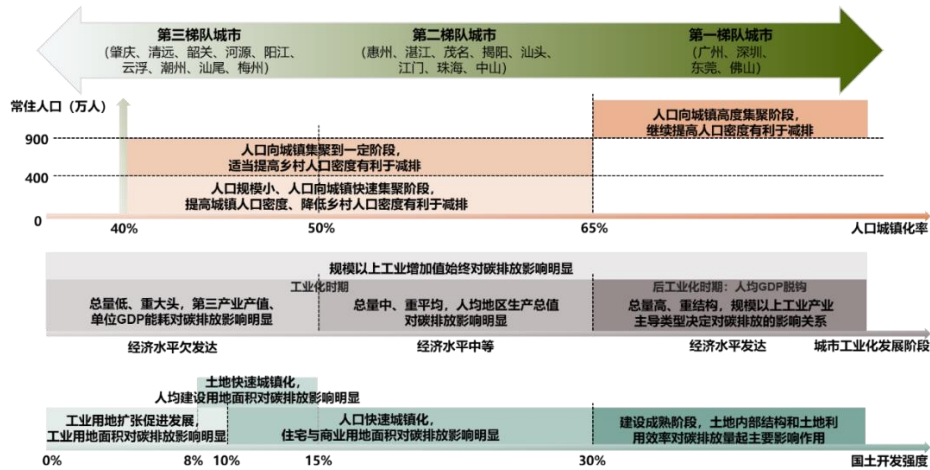
(1) 城市碳排放影响因子与广东省各地市社会经济发展水平紧密相关。一方面，同类社会经济发展特征的城市，与碳排放量密切相关的影响因子表现出一定共性；另一方面，在不同社会经济发展阶段的城市，同一影响因子与碳排放量的相关关系呈现出差异化特征。

(2) 建设用地方面，不同城市用地结构的差异性导致影响碳排的主导用地类型不同，住宅用地、工业用地、人均建设用地面积对较多城市的碳排放量影响显著。建设用地总量对碳排放量影响作用不明显，而建设用地结构与城市碳排放量密切相关。广东省大部分城市的住宅用地和工业用地面积与碳排放量呈现正相关关系；粤东西北外围城市（如江门、汕尾、揭阳、湛江、茂名、阳江）建设用地利用粗放，人均建设用地面积与碳排放量呈现正相关关系。差异化优化各城市建设用地结构有利于实现减碳目标。

(3) 不同开发强度的城市，影响碳排放量的用地类型存在显著差异。城市开发强度低于 10%的城市，工业用地与碳排放量存在较强相关性；城市开发强度处于 10~30%的城市，住宅用地与碳排放量存在较强相关性；城市开发强度高于 30%的城市，影响碳排放的用地类型单一且存在较大差异。

(4) 人口方面，人口集聚达到一定程度时，人口密度与碳排放量呈现负相关关系。在常住人口大于 400 万人或人口密度大于 1000 人/平方公里的城市，促进人口向城镇地区集聚有助于控制碳排放量。

(5) 经济方面，广东省大部分城市的规上工业与碳排放量密切相关，规上工业主导产业类型会影响相关性的正负特征。规上工业以高新技术产业为主导的城市（如深圳、东莞等），规上工业增加值与碳排放量负相关；规上工业以传统制造业为主导的城市（如佛山、揭阳等），规上工业增加值与碳排放量正相关，促进规上工业主导产业类型的绿色升级有利于实现减碳目标。



图：广东省各城市主要碳排放影响因子与社会经济发展水平的关系图

(6) 碳排放影响因子在广东省社会经济发展水平不同的地区体现出差异化特征。

广东省人口集聚程度、经济发展水平、用地开发强度处于第一梯队的城市，人均 GDP 与碳排放量脱钩，“人口密度、规上工业增加值、建设用地结构”与城市碳排放总量呈现显著相关；

广东省人口集聚程度、经济发展水平、用地开发强度处于第二梯队的城市，“人口密度、人均地区生产总值、规模以上工业增加值、商业用地、住宅用地、人均建设用地面积”与城市碳排放总量呈现显著相关；

广东省人口集聚程度、经济发展水平、用地开发强度处于第三梯队的城市，“城镇人口密度、乡村人口密度、规模以上工业增加值、第三产业增加值、工业用地面积、单位 GDP 能耗”与城市碳排放总量呈现显著相关。

第一梯队城市： 广州、深圳、 东莞、佛山	城市人口特征 常住人口大于900万人，城镇化率高于65%，人口密度大于2000人/平方公里	城市经济特征 经济总量大，人均GDP大于1万美元，人均GDP与碳排放量脱钩，步入经济高质量发展阶段	城市开发强度特征 处于建设成熟阶段，国土开发强度大于或接近30%
	人口影响因子 人口密度 (-)	经济影响因子 规模以上工业增加值 (+/-) 对碳排放量起主要影响作用，其中规上工业主导类型决定规上工业增加值对碳排放量呈正/负影响关系	建设用地影响因子 单一土地利用类型对碳排放量起主要影响作用，不同城市间因子差异较大
第二梯队城市： 惠州、湛江、 茂名、揭阳、 汕头、珠海、 中山	城市人口特征 常住人口大于400万人，城镇化率40-90%，人口密度大于500人/平方公里	城市经济特征 经济总量中等，人均GDP大于4000美元；规上工业主导产业类型多为传统制造业，处于工业化中期	城市开发强度特征 处于土地快速城镇化阶段，国土开发强度处于10%-30%
	人口影响因子 人口密度、乡村人口密度、城镇人口密度 (以+为主)	经济影响因子 规模以上工业增加值 (以+为主)、人均地区生产总值 (以+为主)	建设用地影响因子 人均建设用地面积 (以+为主)、住宅用地面积 (以+为主)、商业服务业用地面积 (+)
第三梯队城市： 江门、肇庆、 清远、韶关、 河源、阳江、 云浮、潮州、 汕尾、梅州	城市人口特征 常住人口少于400万人，城镇化率40-70%；人口密度小于500人/平方公里	城市经济特征 经济总量低，人均GDP位于4000-7000美元；城市主导产业以传统制造业为主，城市产业结构多为“二三一”	城市开发强度特征 国土开发强度低，国土开发强度小于10%
	人口影响因子 城镇人口密度 (+/-)	经济影响因子 规模以上工业增加值 (+)、第三产业产值 (+)、单位GDP能耗 (+)	建设用地影响因子 工业用地面积 (+)

图：城市划分结果、特征和影响因子情况

4、碳排放量多情景预测结果表明，未来优化建设用地结构是实现广东省双碳目标的有效途径

代表城市 2035 年国土空间总体规划阶段性方案对应的碳排放量情景预测研究显示，惠州市与肇庆市 2035 年碳排放情景预测结果远低于相关研究机构的碳排放峰值预测结果，可适当提高对地方碳排放峰值的约束要求；中山市在保持 2020 年土地碳排放强度不变的情况下，碳排放情景预测结果超过达峰预测值，因此需要提升 2035 年土地碳排放效率或者优化用地方案结构。

表：代表城市多情景碳排放量预测结果

城市	情景一 2035 年碳排放量预测	情景二 2035 年碳排放量预测	相关研究机构的碳排放峰值与达峰年份预测
惠州市	5396	4082	8585 （2028 年）
肇庆市	1561	1388	2260 （2028 年）
中山市	2433	1887	2332 （2023 年）

注：情景一是考虑建设用地碳排放强度维持现状水平，以 2020 年土地碳排放强度水平为基础，结合各地市国土空间规划的 2035 年土地利用阶段性方案进行预测；情景二是考虑人口、经济、建设用地发展水平的变化，基于城市多影响因子与碳排放量实证关系模型进行预测；相关研究机构对比数据是依据《广东省碳排放峰值研究报告》研究结果中对广东省部分城市碳排放峰值与达峰年份预测结果作为情景预测的对比数据。

（二）政策建议

1、省级层面

（1）基于全省碳排放量特征和影响因子分析结果，对全省碳排放管控的重点城市和重点领域提出建议

人口方面，研究表明“城镇/乡村人口密度”是省市层面重要影响因子，总体而言当人口集聚度达到一定程度后（1000 人/平方公里以上）方与碳排放量存在显著关系，推动人口向城镇地区集聚将有利于控制城市碳排放量。因此，建议

进一步深化户籍制度改革，加快引导农业人口有序向城镇转移，稳步推进农业转移人口落户城镇，引导优质公共服务设施优先在第一、第二梯队城市布局。

经济方面，研究表明“规上工业增加值”是省市层面重要影响因子，总体而言规模以上工业企业对广东省碳排放量发挥着显著的促进作用，未来主导产业类型的绿色升级也将为实现减碳目标带来前景希望。因此，建议鼓励规上工业绿色低碳转型升级，加强对规上工业生产活动的碳排放管控，支持规上工业企业开展绿色低碳循环改造，提高能源利用效率；研究制定与碳排放挂钩的工业企业环境准入标准，重点引进绿色低碳产业优势企业，对绿色低碳企业入驻给予优惠政策。

建设用地方面，研究表明不同城市的建设用地因子筛选结果不同。建议以提高建设用地低碳利用水平为目标，充分考虑不同城市用地结构的差异性，识别影响城市碳排放量的主导用地类型，制定针对性的建设用地减碳政策。将单位 GDP 碳排下降率纳入地市政府管理绩效考核体系，研究出台与减排降碳成效挂钩的土地和财政政策，对实现低碳或零碳排放的地市，给予一定的土地指标和财政资金奖励，加快形成减排降碳的激励约束机制。

（2）根据全省不同梯队城市的碳排放量影响因子特征，出台差异化、组合式的减碳政策

建议第一梯队城市采用“提高人口密度+发展高新技术产业+优化建设用地结构”的方式：促进人口向优势地区集聚，发挥规模效应；加强对规上工业生产活动的碳排管控，鼓励发展高新技术产业，推广绿色节能生产技术；优化市域内部建设用地结构，提升土地利用效率。

建议第二梯队城市采用“鼓励人口集聚+发展先进制造业+合理供应商住用地”的方式：推动乡村人口集聚，通过实行能源集中供应和使用降低乡村碳排放量；促进传统制造业转型升级，鼓励发展高科技、低能耗的先进制造业，加强对产业招引门类的引导；按照产城融合的理念，合理供应商业、住宅用地，提升商住用地的利用效率；重点提升集约节约用地水平，通过降低人均建设用地面积实现减碳目标。

建议第三梯队城市采用“加快城镇化+推动传统产业绿色改造+提升工业用地效率+降低单位 GDP 能耗”的方式：继续推进城镇化发展，推动人口向城镇集聚；

加大第三产业的绿色节能推广力度,鼓励发展绿色交通、绿色物流、绿色装配等,提升第三产业低碳发展水平;引导传统制造业转型升级,鼓励发展先进制造业,提高能源利用效率;加强对新增工业用地的管控,提高工业项目准入门槛,提高工业用地地均产出水平,摆脱工业增长对工业用地面积扩张的路径依赖。

2、城市层面

研究表明,处于不同经济社会发展阶段的城市,影响碳排放量的主要因子类型、影响因子的组合方式以及同类因子的作用方式也各不相同。因此,建议围绕人口、经济、建设用地三个方面,根据不同城市的碳排放量影响因子特征,出台差异化、组合式的减碳政策。充分考虑各类影响因子对碳排放量的影响程度以及因子管控的可操作性,综合运用总量管控、结构调整、效率提升等方式,加强对碳排放相关影响因子的管控。

本研究根据碳排放量影响因子分析结果和碳排放量多情景预测研究,以规划用地方案为切入点,对城市碳排放管理提出整体建议。以中山、肇庆、揭阳、惠州4个城市为例:

(1) 中山市

根据2020年土地碳排放强度测算可得,中山市的工业用地类型碳排强度系数最高且现状碳排放总量大,居住用地、公共管理与公共服务用地、商业服务业用地、交通运输用地的碳排量度较其他城市偏高,因此现状重点管控用地类型为工业用地,同时需提高其他类型建设用地的能源使用效率。根据2009-2017年广东省多影响因子实证数据碳排放模型结果可得,规模以上工业增加值、交通运输用地、单位GDP能耗与中山市碳排放量呈现正相关关系,其中规模以上工业增加值的正相关影响系数最高;人口密度与中山市碳排放量呈现负相关关系。因此提出如下建议:

一是加强工业用地管控。考虑到中山市规划工业用地占比已达32%,高于工业用地结构标准(15-30%),建议在规划用地方案中严控工业用地总量,转变以往分散的工业布局模式,引导工业用地集中布局,发挥规模效应;同时,考虑到中山市单位工业用地碳排强度高,建议加大对工业企业碳排的监管力度,提高产业准入门槛,大力推行清洁生产,降低工业用地碳排强度。

二是大力推行绿色生活创建。中山市规划居住用地（35%）、公共管理与公共服务用地（6%）、商业服务业用地（6%）、交通运输用地（20%）的比例均符合用地结构标准，但碳排放强度均偏高。因此建议大力推行绿色生活创建，鼓励发展绿色建筑、绿色社区、绿色学校、绿色商场、绿色出行等，全方位推进经济社会绿色转型。

三是以规上工业碳排放总量控制为重点，鼓励发展高新技术产业，加快建立绿色低碳循环发展的经济体系，持续降低单位 GDP 能耗水平。

四是鼓励人口集聚发展，通过提升人口密度、优化人口空间布局，达到抑制碳排放量的效果。

（2）肇庆市

根据 2020 年土地碳排放强度测算可得，肇庆的工业用地类型强度系数最高、工业用地现状碳排放总量大，因此现状重点管控用地类型为工业用地。根据 2009-2017 年广东省多影响因子实证数据碳排放模型，肇庆第三产业增加值、规模以上工业增加值、工业用地面积、单位 GDP 能耗与肇庆市碳排放量呈现正相关关系，其中工业用地面积的正相关影响系数最高；城镇化率、城镇人口密度与肇庆市碳排放量呈现负相关关系，其中城镇人口密度的负相关影响系数最高。

因此，对肇庆实现“双碳”目标提出以下建议：肇庆处于实体经济快速发展阶段，省大型产业集聚区建设对工业用地需求较大，规划工业用地占 25%，总量上符合用地结构标准（15-30%）。但肇庆的工矿用地碳排强度比中山、揭阳高，说明肇庆的工业碳排较粗放。应保证产业发展需求保障工业用地供应总量的同时，强化对工业用地碳排强度的管控，提升新项目的环保准入门槛，逐步降低存量产业项目的碳排强度。肇庆的城镇化水平（46.78%）在全省处于下游阶段，应加快推动人口城镇化，引导人口向城镇地区集聚，有助于减少碳排放量。肇庆的工业和服务业仍处于高碳增长模式，应加快推动产业转型，向低碳、高产出的产业门类发展。

（3）揭阳市

根据 2020 年土地碳排放强度测算可得，揭阳的工业用地类型强度系数最高、工业用地现状碳排放总量大，仓储用地碳排强度较其他城市高；因此现状重点管控用地类型为工业用地、仓储用地。根据 2009-2017 年广东省多影响因子实证数据碳排放模型，揭阳的城镇人口密度、规模以上工业增加值、商业服务业用地、住宅用地、人均建设用地面积、客运总量、单位 GDP 能耗与揭阳市碳排放量呈现正相关关系，其中单位 GDP 能耗的正相关影响系数最高，人口密度与揭阳市碳排放量呈现负相关关系。

因此，对揭阳实现“双碳”目标提出以下建议：揭阳规划工业用地占比 15%，工业用地碳排强度与其他城市相比处于中等水平；规划仓储用地面积较大，围绕揭阳潮汕国际机场打造临空物流园，现状仓储用地的碳排强度与其他城市相比较高，应加强对仓储用地的碳排强度管控，依托智慧物流等手段，提升物流仓储链条的运转效率，降低过程碳排。揭阳提升人口密度，有利于减少碳排放量；揭阳城镇化率（51.08%）处于中游水平，未达到城镇人口集聚提升碳排放效率的拐点，所以城镇人口密度提升仍会促进碳排放量。因此，建议揭阳推动人口向城镇集聚，提升城镇化水平，达到城镇人口集聚提升碳排放效率的拐点；建设用地分配时应向城镇倾斜，为城镇人口提供更多空间城镇。揭阳的工业仍处于高碳增长模式，应加快推动产业转型，向低碳、高产出的产业门类发展。

（4）惠州市

根据 2020 年土地碳排放强度测算可得，惠州市的工业用地类型碳排强度系数最高且现状碳排放总量大，两项指标均远大于其他城市，因此现状重点管控用地类型为工业用地。根据 2009-2017 年广东省多影响因子实证数据碳排放模型结果可得，规模以上工业增加值、商业服务业用地面积与惠州市碳排放量呈现正相关关系，其中商业服务业用地面积的正相关影响系数最高；城镇人口密度、乡村人口密度、第三产业增加值、人均建设用地面积与惠州市碳排放量呈现负相关关系。因此提出如下建议：

一是加强工业用地管控。惠州市规划工业用地占比约 31%，略高于工业用地结构标准（15-30%），考虑石化能源新材料、电子信息两大万亿级产业发展需要，

建议在规划用地方案中保持合理的工业用地比重，重点降低工业用地碳排强度。一方面鼓励发展高新技术产业，以技术进步推动产业产值提升；另一方面推广清洁能源和绿色生产技术，提高工业生产的绿色低碳水平。

二是优化商住用地布局。按照产城融合理念优化居住和商业用地结构配比和空间布局，避免商业服务业用地面积大幅扩张；同时注重对商业服务设施的节能监管与考核，鼓励发展绿色建筑、绿色装配、绿色照明等，提高商服设施能源利用效率。

三是鼓励人口集聚，通过提升人口密度、优化人口空间布局，达到抑制碳排放量的效果。

四是鼓励发展第三产业，做强绿色经济，结合自身资源优势，在生态旅游、休闲度假、中医养生、健康服务等领域形成品牌特色。

3、标准层面

建议广东省国土空间规划指标体系增加碳排放管控的指标。基于省级层面碳排放量与影响因子的关系研究，有 5 个指标对广东省的碳排放量存在显著影响，其中与空间管控相关的有 3 个。面向广东加快实现“3060”碳达峰碳中和目标实现，建议广东省国土空间规划指标体系增加城镇人口密度、乡村人口密度的 2 个指标。

表：全省碳排放量的影响因子情况和指标体系建议

序号	影响因子	相关性	加入空间规划指标体系建议
1	人均地区生产总值	正相关	——
2	规模以上工业增加值	正相关	——
3	城镇人口密度	负相关	建议新增
4	乡村人口密度	正相关	建议新增
5	人均城镇建设用地	正相关	现行指标体系已有

建议各地市差异化增设碳排放管控的指标。基于地级市层面碳排放量与影响因子的关系研究，根据因子筛选结果和正负影响关系，对各地市空间规划指标体系提出差异化的指标增设建议，并提出指标目标值的建议区间值。面向

“双碳”目标实现，建议中山结合研究筛选出的交通运输用地因子，加强对“绿色交通出行比例”等指标的管控；建议惠州结合研究筛选出的商业服务业用地面积，强化对商业服务业用地面积的占比和年度供应计划管控。

表：地市碳排放量的影响因子情况和指标体系建议

城市	城市碳排放影响因子	相关性	加入空间规划指标体系建议
中山	工业用地	-	规划工业用地比例、单位工业用地碳生产力
	交通运输用地	正相关	绿色交通出行比例
惠州	工业用地	-	规划工业用地比例、单位工业用地碳生产力
	商业服务业用地面积	正相关	规划商业服务业用地比例、单位商业服务业用地能耗
肇庆	工业用地	正相关	规划工业用地比例、单位工业用地碳生产力
	城镇化率	负相关	城镇化率
揭阳	仓储用地	-	规划仓储用地比例
	单位 GDP 能耗	正相关	单位 GDP 能耗

（三）后续研究方向建议

持续跟进各地市国土空间规划编制工作，完成剩余城市碳排放预测并提出针对性减碳政策建议。持续跟进各地市国土空间规划编制工作，完成除惠州、肇庆等 4 个城市以外地市碳排放多情景预测。根据碳排影响因子分析结果和碳排多情景预测研究结果，从人口、经济、用地多个方面，对城市碳排放管理提出政策建议。

开展城市空间结构与布局方式对碳排放量的影响研究。规划的管控方式可以分为数量指标、布局方式、开发强度等多种形式，本次研究聚焦以数量指标为主要研究对象。后续研究建议开展对于建设用地空间结构与布局方式（如城市形态、组团结构等）与碳排放量关系的探讨，其中微观层面建设用地的布局方式、开发强度等指标也可反映不同生活方式对于碳排放量的影响。

跟踪开展某一特定城市的碳排放与影响因子监督评估工作。选择代表城市，持续收集该城市未来历年人口、经济、用地和碳排放相关实证数据，分析评估各项数据发展变化趋势，检验课题研究的碳排放预测成果和政策建议的正确性。

八、附录

（一）碳排放影响因子共线性检验

表：2009-2017 年广东省碳排放影响因子共线性检验

序号	影响因子	缩写	VIF
1	城镇人口密度	URPDEN	6.324
2	乡村人口密度	RUPDEN	2.389
3	人均地区生产总值	PGDP	2.309
4	规模以上工业增加值	VIND	6.776
5	乡村建设用地	RULAND	2.515
6	工业用地	IND	4.013
7	住宅用地	RES	5.784
8	人均交通运输用地	PTRA	3.228
9	人均城镇建设用地	URPLAND	5.313
10	客运总量	PAS	1.456
11	货运总量	FRE	2.910
12	单位 GDP 能耗	EI	1.276

注：使用原始数据进行模型共线性诊断，下同。

表：2009–2017 年珠三角地级市碳排放影响因子共线性检验

影响因子	缩写	VIF								
		广州	深圳	东莞	珠海	佛山	中山	江门	肇庆	惠州
城镇化率	UR	3.431				2.769		2.163	2.835	
人口总量	P	4.554								
人口密度	PDEN	8.771	1.266			4.274	6.43			
城镇人口密度	URPDEN				8.092				2.627	4.757
乡村人口密度	RUPDEN	2.129		1.086				4.204		3.667
地区生产总值	GDP	3.129								
GDP 增长率	VGDP									
人均地区生产总值	PGDP		3.586		7.709	1.335		2.389		
第二产业增加值	VSEC									
第三产业增加值	VTER					9.663			6.445	9.457
规模以上工业增加值	PVIND		8.825	12.218		10.436	1.79	2.886	2.501	7.242
建设用地总量	LAND		12.365							
工业用地面积	IND	5.822							3.368	
商业服务业用地	COM			12.131						2.951
住宅用地	RES	3.892				6.741		3.292		
公共管理与公共服务用地	PUB	8.828								
交通运输用地	TRA				9.731		14.886			
人均道路面积	PTRA									
人均建设用地面积	PLAND			3.691				2.49		8.064
客运总量	PAS	—	—							
货运总量	FRE	—	—							

单位 GDP 能耗	EI	-	-				7.61		1.398	
城市影响因子总数		8	4	4	3	6	4	6	6	6

表：2009-2017 年粤东地级市碳排放影响因子共线性检验

影响因子	缩写	VIF			
		汕头	汕尾	潮州	揭阳
城镇化率	UR	8.343	5.692		
人口总量	P				
人口密度	PDEN	10.468			2.939
城镇人口密度	URPDEN			6.794	4.858
乡村人口密度	RUPDEN	5.3	2.857	2.204	
地区生产总值	GDP				
GDP 增长率	VGDP				
人均地区生产总值	PGDP	5.808	3.735		
第二产业增加值	VSEC				
第三产业增加值	VTER		5.719	6.781	
规模以上工业增加值	PVIND	4.138		3.492	5.134
建设用地总量	LAND				
工业用地面积	IND	5.043			
商业服务业用地	COM	4.375			2.291
住宅用地	RES	4.269	5.617		9.78
公共管理与公共服务用地	PUB				
交通运输用地	TRA				

人均道路面积	PTRA			3.415	
人均建设用地面积	PLAND		3.315		6.645
客运总量	PAS				2.64
货运总量	FRE				
单位 GDP 能耗	EI		1.935	5.519	3.39
城市影响因子总数		8	7	6	8

表：2009-2017 年粤西地级市碳排放影响因子共线性检验

影响因子	缩写	VIF		
		湛江	茂名	阳江
城镇化率	UR			
人口总量	P			
人口密度	PDEN			
城镇人口密度	URPDEN			9.973
乡村人口密度	RUPDEN	2.953	2.953	
地区生产总值	GDP			
GDP 增长率	VGDP			
人均地区生产总值	PGDP	7.105	7.105	4.776
第二产业增加值	VSEC			
第三产业增加值	VTER			
规模以上工业增加值	PVIND	3.738	3.738	6.724
建设用地总量	LAND		2.452	
工业用地面积	IND	2.452		5.272

商业服务业用地	COM	3.192	3.192	
住宅用地	RES	2.96	2.96	
公共管理与公共服务用地	PUB			
交通运输用地	TRA			
人均道路面积	PTRA			
人均建设用地面积	PLAND	2.943	2.943	7.715
客运总量	PAS			4.345
货运总量	FRE			
单位 GDP 能耗	EI			6.92
城市影响因子总数		7	7	7

表：2009-2017 年粤北地级市碳排放影响因子共线性检验

影响因子	缩写	VIF				
		梅州	河源	清远	云浮	韶关
城镇化率	UR			8.471		
人口总量	P					
人口密度	PDEN					
城镇人口密度	URPDEN	2.744	5.449	4.325	4.606	4.051
乡村人口密度	RUPDEN	3.821		5.036	2.514	
地区生产总值	GDP					
GDP 增长率	VGDP					
人均地区生产总值	PGDP	4.936		7.275		7.131
第二产业增加值	VSEC					

第三产业增加值	VTER	6.384		6.252	3.765	
规模以上工业增加值	PVIND		3.97		1.948	4.584
建设用地总量	LAND		3.232			
工业用地面积	IND	1.95	5.861		4.772	4.825
商业服务业用地	COM					6.342
住宅用地	RES	6.696				8.185
公共管理与公共服务用地	PUB				6.963	9.777
交通运输用地	TRA					5.587
人均道路面积	PTRA	5.602	5.353	7.849		
人均建设用地面积	PLAND				10.736	9.616
客运总量	PAS		5.474			
货运总量	FRE		3.601			
单位 GDP 能耗	EI	2.552		3.183		
城市影响因子总数		8	7	7	7	9

(二) 碳排放影响因子与影响关系正负特征

序号	空间尺度	影响因子个数 (个)	碳排放影响因子	
			正相关关系	负相关关系
广东省		11	乡村人口密度、规模以上工业增加值、乡村建设用地、工业用地、住宅用地、人均交通运输用地、客运总量、货运总量	城镇人口密度、人均城镇建设用地、单位 GDP 能耗
地级市				
1	广州市	8	人口总量、乡村人口密度、工业用地面积、住宅用地面积、公共管理与公共服务用地面积	城镇化率、人口密度、地区生产总值
2	深圳市	4	建设用地总量	人口密度、人均地区生产总值、规模以上工业增加值
3	东莞市	4	—	乡村人口密度、规模以上工业增加值、商业服务业用地面积、人均建设用地面积
4	珠海市	3	城镇人口密度、人均地区生产总值、交通运输用地面积	—
5	佛山市	6	城镇化率、人口密度、人均地区生产总值	第三产业增加值、规模以上工业加值、住宅用地面积

6	中山市	4	规模以上工业增加值、交通运输用地面积	人口密度、单位 GDP 能耗
7	江门市	6	人均地区生产总值、规模以上工业增加值、住宅用地面积、人均建设用地面积	城镇化率、乡村人口密度
8	肇庆市	6	第三产业增加值、规模以上工业增加值、工业用地面积、单位 GDP 能耗	城镇化率、城镇人口密度
9	惠州市	6	城镇人口密度、乡村人口密度、第三产业增加值	规模以上工业增加值、商业服务业用地面积、人均建设用地面积
10	汕头市	8	人口密度、人均地区生产总值、工业用地面积	城镇化率、乡村人口密度、规模以上工业增加值、商业服务业用地面积、住宅用地面积
11	汕尾市	7	城镇化率、乡村人口密度、人均地区生产总值、第三产业增加值、住宅用地面积、人均建设用地面积、单位 GDP 能耗	—
12	潮州市	6	城镇人口密度、乡村人口密度、规模以上工业增加值、人均道路面积、单位 GDP 能耗	第三产业增加值
13	揭阳市	8	城镇人口密度、规模以上工业增加值、商业服务业用地面积、住宅用地面积、人均建设用地面积、客运总量、单位 GDP 能耗	人口密度

14	湛江市	7	规模以上工业增加值、工业用地面积、住宅用地面积、人均建设用地面积	乡村人口密度、人均地区生产总值、商业服务业用地面积
15	茂名市	7	乡村人口密度、人均地区生产总值、规模以上工业增加值、建设用地总量、商业服务业用地面积、住宅用地面积、人均建设用地面积	-
16	阳江市	7	城镇人口密度、人均地区生产总值、人均建设用地面积	规模以上工业增加值、工业用地面积、客运总量、单位 GDP 能耗
17	梅州市	8	城镇人口密度、乡村人口密度、人均地区生产总值、工业用地面积、住宅用地面积、人均道路面积、单位 GDP 能耗	第三产业增加值
18	河源市	7	规模以上工业增加值、建设用地总量、工业用地面积、客运总量	城镇人口密度、人均道路面积、货运总量
19	清远市	7	城镇化率、乡村人口密度、第三产业增加值、单位 GDP 能耗	城镇人口密度、人均地区生产总值、人均道路面积
20	云浮市	7	第三产业增加值、规模以上工业增加值、工业用地面积、公共管理与公共服务用地面积	城镇人口密度、乡村人口密度、人均建设用地面积
21	韶关市	9	城镇人口密度、规模以上工业增加值、工业用地面积、商业服务业用地面积、住宅用地面积、交通运输用地面积	人均地区生产总值、公共管理与公共服务用地面积、人均建设用地面积

（三）参考文献综述情况

文献名称	文献来源	借鉴指数	研究主题	研究对象	研究内容	研究方法	借鉴内容
20 年来广东省土地利用碳排放强度与效率空间分异研究	《生态环境学报》2019 年第 28 卷第 2 期	★★★★★	碳排放强度时空分异	广东省全域	定量分析了广东省 1996—2015 年土地利用碳排放强度和效率时空变化规律： 1. 广东省土地利用碳排放总量变化； 2. 广东省碳排放变化地区差异； 3. 广东省 21 个地级市碳排放-效率组合关系。	碳排放核算： 土地利用地类排放系数法； 碳排放强度和效率： K-mean 聚类法。	影响因素： 关于经济发展因素、能源利用效率、产业结构等因子对碳排放影响的论述； 研究结论： 关于广东省碳排放强度时空分异特征的结论； 对策建议： 对广东省建设低碳示范省提出的建议。
2000—2018 年长三角中心区土地利用碳排放	《河南农业大学学报》2021 年第 55 卷第 1 期	★★★	碳排放强度时空分异	长三角中心区地区	定量分析了 2000—2018 年长三角地区中心区的土地利用转移的碳排放强度及其空间特征： 1. 碳排放总量核算； 2. 碳排放强度分析； 3. 碳排放强度变化空间特征。	碳排放核算： 土地利用地类排放系数法； 空间变化分析： 标准差椭圆，点密度分析，热点分析。	研究结论： 关于碳排放强度及其空间特征的描述和分析； 对策建议： 对不同类型城市提出的建议。

强度的时空特征							
构建低碳国土空间格局体系	中国自然资源报 2021 年 4 月 2 日	☆	低碳国土空间格局体系构建	全国范围	1、土地利用碳源碳汇评估方法分析； 2、国土空间管控支撑碳中和的策略分析。	定性分析为主	
2050 年中国碳排放量的情景预测——碳排放与社会发展Ⅳ	《北京大学学报（自然科学版）》2010 年第 46 卷第 4 期	★★★	碳排放情景预测	全国	基于对我国未来 GDP 和 GDP 碳排放强度的预测，以 2005 年为起始年，在不同情景下对我国 2050 年碳排放进行了预测。	分情景预测： 1. 根据我国 GDP 碳强度历史变化及碳强度五年计划设定； 2. 根据历史上主要发达国家 GDP 碳强度的衰减规律； 3. 基于我国 2050 年碳强度假定情景，即假定到 2050 年时，我国碳强度依指数衰减至主要发达国家 2005 年的碳强度水平； 4. 预测结果比较，提出我国未来碳排放最佳可能范围。	研究方法： 分情景设定

基于 LSTM 模型的中国 CO ₂ 排放量预测影响因素分析	中国 市场, 2021(22):15-16.	★★★★	碳排放影响因子及预测	全国范围	文章构建了基于 LSTM 的 CO ₂ 排放量预测模型, 利用中国 1978—2016 年的数据进行实证检验。为研究影响 CO ₂ 排放量因素中的科技进步、产业结构及能源结构因素的组合效应, 通过设定 7 种情景预测了 2017—2030 年的中国 CO ₂ 排放量, 并计算了 2020 年和 2030 年较 2005 年碳排放强度的降幅。	研究从科技、结构和规模三个宏观方面, 选择人均 GDP、人口、机动车保有量、科技进步、能源强度、城市化率、产业结构和能源结构 8 个因素作为输入变量, 构建 LSTM 模型 (长短期记忆网络模型), 研究各因子与 CO ₂ 排放的关系。	不同情景的假定方法; 基于神经网络的碳排放预测方法
城市空间形态影响碳排放吗? ——基于全国 110 个地级市数据的分析	《生态经济》2016 年第 32 卷第 10 期	★★★★	碳排放影响因子关系研究	全国 110 个地级以上非工业城市	收集 2009 年全国 110 个地级以上非工业城市的能源消耗数据测算人均碳排放强度, 引入城市空间格局、土地利用和城市交通结构变量综合表征城市形态, 利用回归模型检验城市形态对碳排放的影响程度, 最后提出“空间—土地—交通”综合系统的低碳发展框架。	城市空间形态指标: 城市空间形状指数和紧凑度; 影响因子贡献度测算: 回归模型。	文献综述: 对于国内外关于城市空间形态与城市碳排放之间关系研究的综述; 影响因子贡献度: 对城市人口规模、人均地区生产总值、城市绿地比例、客运总量、货运总量及人均道路面积等具体变量与城市碳排放之间关系系数的测算结果; 政策建议: 建立“空间—土地—交通”综合框架的低碳城市发展策略。

C02 排放 峰值分 析：中国 的减排目 标与对策	《中国人口·资源 与环境》2013 年第 23 卷第 12 期	★★	碳排放情 景预测、 政策建议	全国	1. 通过公示推演说明 C02 排放 达峰值的理论与条件； 2. 发达国家 C02 排放达峰值的 规律分析； 3. 中国 2030 年前后 C02 排放达 峰的时间、条件、排放量； 4. 我国 C02 排放达峰值的的不确 定性分析； 5. 促进 C02 排放达峰值的战略 对策。	公式推演、定性分析	对策建议： 促进 C02 排放达 峰值的战略对策。
不同政策 方案下的 南京市土 地利用碳 排放动态 模拟	《地域研究 与 开 发》2021 年第 40 卷 第 3 期	★★★★	碳排放影 响因子关 系研究、 碳排放情 景预测	南京市	对 2000—2035 年南京市土地利 用碳排放现状及未来政策模拟 趋势下的碳排放趋势进行动态 模拟。	碳排放核算： 土地利用地类 排放系数法； 模型构建： 系统动力学模 型。	预测模型： 构建城市土地利 用碳排放系统仿真模型，将 系统分为土地利用、城镇发 展、能源利用、环境规制、 污染治理 5 个模块，每个模 块再细分若干变量。 情景设置： 方案 1：提高城镇化率 方案 2：提高环境污染治理 投资 方案 3：减少建设用地占用 耕地数量 方案 4：减少汽车使用数量 方案 5：增加第三产业占 GDP 比重

							方案 6: 假定以上方案同时调整 影响因子贡献度: 对城镇化率、建设用地占用耕地、产业结构、汽车使用量、环境污染治理投资等因素贡献度的描述。
中国能源碳排放因素分解与情景预测	电力建设第 9 期 第 42 卷	★★★★	碳排放影响因素选取与分类情景预测	全国	采用对数平均迪氏分解法分析我国能源消费碳排放变化影响因素。并采用情景模拟预测 2030 年我国能源碳排放。	1、《IPCC 2006 国家温室气体排放清单指南》推荐预测方法 2. LMDI 分解模型 3. STIRPAT 预测模型	影响因子选取方法。

多尺度视角下的中国碳排放时空格局动态及影响因素研究——基于DMSP-OLS夜间灯光遥感数据的分析	华东师范大学博士学位论文，2017年4月	★★★★★	碳排放强度时空分异、碳排放影响因素研究	全国	1. 碳排放估算研究。首先基于数据的可得性，利用能源统计数据估算我国30个省份1997—2012年的碳排放；然后构建面板数据模型，利用单位根检验和协整检验验证碳排放数据和校正的DMSP-OLS数据之间是否存在“伪回归”关系，接下来采用F检验选择合适的面板数据模型进行碳排放估算；最后利用典型城市的土地利用数据和统计碳排放数据进行碳排放精度验证。 2. 中国碳排放时空格局动态研究。首先利用前面估算得到的碳排放数据计算得出我国省级、地级市和县级三个尺度的碳排放时空分布图；然后基于变异系数、空间自相关模型分别测度三个尺度的碳排放时空格局动态特征，对比三者之间随着尺度降低的变化与关系。 3. 中国碳排放影响因素研究。首先选择合理的碳排放影响因	碳排放核算：土地利用地类排放系数法、面板数据模型； 碳排放时空格局分析：变异系数、探索性空间数据分析方法（全局空间自相关、局部空间自相关）； 影响因子贡献度测算：空间面板数据模型、地理加权回归模型	文献综述：对于国内外关于碳排放测算、碳排放是空格局、碳排放影响因素研究情况的综述； 研究方法：在碳排放测算方面，对基于统计数据和基于面板数据模型的测算结果的对比；在时空格局分析方面，对碳排放演化和空间格局的分析方法；在影响因素分析方面，对于空间面板数据模型和地理加权回归模型的应用； 影响因子贡献度：对省级和市级两种尺度下，人口、GDP、第二产业比例、第三产业比例、使用外资总额（亿元）、固定资产投资总额、城市化率等7个因素回归系数的测算结果。
--	----------------------	-------	---------------------	----	---	--	--

					素指标并进行标准化处理；其次，在考虑空间异质性和依赖性特征的基础上，选择空间面板数据模型在全局尺度对我国省级和地级市尺度的碳排放影响因素进行量化分析；最后，结合GWR模型，在局域尺度上分析不同尺度（省级和地级市尺度）碳排放的主要影响因素。		
国内外碳排放核算方法研究进展	热带地理 2014 年 3 月	★☆☆	碳排放核算方法	文献综述	1、理论上讨论了 IPCC 和中国关于碳排放项目清单； 2、对比分析排放因子法、质量平衡法和实测法 3 种核算方法的优缺点和适用对象； 3、从实践上将核算清单项目与方法细化到国家/省区、城市、住区、单体建筑和家庭 5 个空间尺度单元； 4、在总结现有研究成果的基础	定性研究	文献综述；不同尺度的碳排放核算方法

					上，概括出了碳排放研究的范式与框架。		
共享社会经济路径下中国2020—2100年碳排放预测	生态学报 2021年12月	★★★★☆	碳排放情景预测	全国范围	1、定量评估人口、经济和受教育程度对碳排放的影响，构建碳排放预测模型；2、从历史趋势分析和未来情景模拟对中国碳排放趋势及经济代价进行多情景预测。	影响因子识别：可拓展的随机性环境影响评估模型(STIRPAT)；经济预测模型：Cobb-Douglas生产函数；未来情景模拟：共享社会经济路径(SSPs)设定的未来社会发展的5种情况。	碳排放量预测模型：STIRPAT，采用总人口、人均GDP和受过高等教育人口来表征人口、富裕度和技术水平。数据来源：碳排放量来源于中国碳排放数据库(CEADs)，人口预测来源于现有研究的数据库，经济预测来源于Cobb-Douglas生产函数模型。
河北省碳排放因素分解及实证分析	科技管理研究 2014年	★★★	碳排放影响因子及其贡献程度	河北省省域尺度	对河北省人均碳排放变化的驱动因素进行实证分析，计算1980-2011年各因素(能源碳排放强度、单位GDP能源强度、	影响因子分解模型：基于IPCC碳排放恒等式	影响因子贡献度：采用对数平均权重分解法建立人均碳排放的因素分解模型，得到因变量和自变量之间的关系，带入对应年份的数值计算自变量贡献度。

					经济发展) 对人均碳排放变化的贡献值 (定量分析)。		
湖 南 省 2000 — 2014 年碳 排放效应 及时空格 局	生态学杂 志 2017 年	★★★★	碳排放强 度时空分 异、碳排 放影响因 子关系研 究	湖南省市 域层面	1、定量分析湖南省碳排放效应 (碳排放总量、碳源、碳汇、地 均碳排放强度与地均建设用地 碳排放强度) 的时空格局特征; 2、定量分析碳排放 (碳排放量 和能源消费量) 与经济发展之 间的脱钩弹性关系。	碳排放模型: 分别构建土地 利用方式和能源消费模式 的碳排放模型; 脱钩模型: 碳排放与 GDP 的 脱钩弹性指数 c_g , 能源消费 与 GDP 的脱钩弹性指数 e_g , 碳排放域能源消费的脱钩 弹性指数 c_e 。	赋予不同用地类型和能源 消费模式不同碳排放 (吸 收) 系数。
湖南省土 地利用碳 排放动态 效 率 研 究: 基于 Malmquis	环境科学 与 技 术 2015 年 2 月	★	碳排放效 率	湖南省省 域尺度	1、测算历年土地利用碳排放总 量; 2、建立土地利用碳排放效率评 价指标体系; 3、分析土地利用碳排放效率时 序演变特征。	碳排放核算: 分为农地碳排 和建设用地碳排 土地利用碳排放动态效率 分析: Malmauist 指数模型	构建土地利用碳排放效率 评价指标体系, 分类识别碳 排效率。

t 指数模型							
基于 DMSP/OLS 与 NDVI 的江苏省碳排放空间分布模拟	世界地理研究 2016 年	★★★★☆	碳排放空间分布模拟	江苏省县域尺度	1、碳排放核算得到各区县碳排放量； 2、构建碳排放空间滞后回归模型开展碳排放空间分布模拟，研究各区县碳排放量分布情况。	碳排放核算：分为能源碳排、农田碳排和林地碳排 碳排放空间分布模拟：空间滞后回归模型	空间滞后模型的构建：以格网图层中的碳排放量字段为因变量，以 NDVI 植被指数、DMSP/OLS 夜间灯光、GDP、人口数和工业总产值为自变量。
基于 STIRPAT 模型的山西省能源碳排放影响因素及峰值预测	中国煤炭，2021 年，第 47 卷第 9 期	★★★	碳排放影响因素及峰值预测	山西省	文章运用 IPCC 法测算了山西省 2000-2019 年能源碳排放量，通过 STIRPAT 扩展模型定量分析了山西省能源碳排放影响因素，并研究预测不同情景下山西省 2020-2050 年能源碳排放量及达峰时间。	STIRPAT 模型（Stochastic Impacts by Regression on Population, Affluence, and Technology）：可拓展的随机性的环境影响评估模型	因子选取

基于 STIRPAT 模型的我国碳排放峰值预测研究	中国人口·资源与环境, 2010 年, 第 20 卷, 第 12 期	★★★★	碳排放的峰值出现时间进行预测	全国范围	文章运用 STIRPAT 模型对未来中国碳排放峰值进行相关预测。首先, 通过对中国 30 个省市的面板数据分析展示目前我国各地碳排放的基本情况; 其次, 对中国 1980-2008 年的时间序列数据进行回归, 从中得出我国总体碳排放趋势; 再次, 在先前回归的基础上对今后我国碳排放的峰值出现时间进行预测。	先采用中国 2000 -2007 年 30 个省市的碳排放量、人口、人均 GDP、碳排放强度等面板数据来分析人口、经济、技术等变量对我国地域性碳排放量的影响。	各驱动因素影响度量化分析方法
基于空间面板模型的碳排放影响因素分析	长江流域资源与环境, 2015 年, 第 24 卷第 10 期	★★★★★	碳排放量影响因素	长江经济带	基于空间面板模型定量分析了 1998-2012 年长江经济带二氧化碳的时空格局特征, 并构建碳排放影响因素的空间面板模型, 分析了产业结构、人口总量、经济水平、技术水平与城市化水平对长江经济带碳排放的影响。	研究选择常用的空间面板模型, 即空间滞后面板模型和空间误差面板模型, 以 1998-2012 年碳排放量为被解释变量, 选择 1998-2012 年年末总人口、人均 GDP、碳排放强度、二三产业比重和城镇化率为解释变量, 构建空间滞后面板模型, 研究各因素影响程度。	碳排放时空格局及演变特征分析
基于情景分析法的	硕士论文, 华北电力大学,	★★	碳排放预测	京津冀地区	基于京津冀地区 1995-2015 年的能源消费碳排放相关数据, 从能源消费现状、能源消费碳排放特征、能源消费碳排放影	运用 GFI 模型对京津冀能源消费碳排放量影响因素进行分解, 得出各个影响因素的作用效果; 然后遵循情景	

京津冀能源消费碳排放预测研究					响因素三个方面来全面分析研究京津冀地区能源消费碳排放现状，首先运用 GFI 模型对京津冀能源消费碳排放量影响因素进行分解，得出各个影响因素的作用效果；然后遵循情景分析法的基本思路，运用 IPSO-BP 神经网络模型对碳排放量进行情景预测。	分析法的基本思路，运用 IPSO-BP 神经网络模型对碳排放量进行情景预测。	
基于时空地理加权回归模型的浙江省碳排放时空格局及驱动因素分析	宁波大学学报（理工版），2021年，第34卷第6期	★★★★★	碳排放时空格局变化和影响因素分析	浙江省各市	测算并分析浙江省 1995—2015 年碳排放量的动态变化特征，通过时空地理加权回归模型分析各影响因素对碳排放总量影响的时空异质性。	影响因子：人口，经济和技术三个方面，人口因素选取总人口和人口城市化率，经济因素选取人均 GDP、第二产业比重、第三产业比重、全社会固定资产投资、社会消费品零售总额，技术因素选取万元 GDP 能耗、煤类能源占比。模型：主成分分析、地理加权回归	空间回归方法；主成分分析：多个影响因子相关性去除方法
江苏省区域不同土	农业工程学报 2008 年 9 月第	★★★★★	分析不同土地利用	江苏省省域层面	1、测算全省十年间主要地类碳排放（吸收）量，构建主要地类	碳排核算法：土地利用方式产生的碳排放总量	通过测算不同时期土地利用方式的碳排放量数据，研究土地利用面积变化与碳排放的边际变化。

土地利用方式的碳排放效应分析	24 卷增刊 2		方式的碳排放效应		用地面积变化与总碳排放量的相关性分析。 2、推演碳排总量，提出促碳减排的土地利用方式调整建议。		
基于土地利用视角的多尺度城市碳代谢及“减排”情景模拟研究	浙江大学 博士学位论文	★★★★★	多尺度城市碳代谢、“减排”情景模拟研究	从宏观/微观两个尺度研究城市碳代谢过程及进行减排潜力的情景模拟，宏观尺度关注城市层面，微观尺度则以街道为研究单元	1、宏观/微观尺度城市碳汇、碳排放时空分布特征。2、宏观/微观城市碳代谢过程研究。3、城市形态与城市碳排放的关系研究。4、城市扩张背景下的多尺度“减排”情景模拟。	1、空间分析法：利用 ArcGIS 制作城市碳排放和碳汇空间分布，这是建立城市空间代谢模型的数据基础。2、计量分析法：计量分析一方面利用于 Kleiber's law 生物新陈代谢定律的验证，另一方面有助于量化研究城市形态与碳排放的关系	影响因子：人均 GDP、人口规模、经济增长、能源强度、能源结构；宏观城市形态量化：最大斑块指数（LPI）、周长面积比指数（PARA_MN）、斑块内聚指数（COHESION）、道路与建设用地耦合程度（CF）、建设用地斑块面积（CA）；数据来源：土地利用基础数据及统计数据（能源消费数据、经济社会数据、碳排放系数和其他经验数据）；预测模型：面板数据模型、多项式回归模型和地理加权回归模型。

近 20 年来 中国农业 碳排放强 度区域差 异、时空 格局及动 态演化	长江流域 资源与环 境 2020 年 3 月第 29 卷 3 期	★★★★★	农业碳排 放区域差 异、空间 格局及动 态演化分 析	全国省级 层面	1、研究 1997 -2016 年中国农 业碳排放强度的区域差异， 2、构建农业碳排放强度的空间 格局， 3、采用 R/S 分析对农业碳排 放强度的演化态势进行预测。 4、为各省域实现低碳农业和整 体减排目标提供参考建议。	碳排放核算：农业碳排放强 度； 空间结构：莫兰指数预测全 局碳排放强度； 动态演化特征分析：R/S 分 析碳排放强度的动态演化 特征	通过空间分析模型不同时期 中国农业碳排放的“热— 冷”区，运用 R/S 分析中国 各省域农业碳排放强度区 间及演化趋势。
江苏省碳 排放清单 测算及减 排潜力分 析	地域研究 与 开 发 2013 年 4 月第 2 期 第 32 卷	★★★★★	分析不同 经济消费 方式的碳 排放清单	江苏省省 域层面	1、分析不同经济消费方式碳排 放总量， 2、估算碳排放清单， 3、通过碳排放强度分析测算碳 减排的潜力，提出碳排放减排 建议。	碳排放核算：不同经济消费 结构碳排放测算；	通过测算不同经济消费方 式方式的碳排放量数据，构 建碳排放清单、区域减碳潜 力。
江苏省碳 排放效率	地域研究 与 开 发 2018 年 8	★★★★★	不同县级 市碳排放	江苏省范 围内县域 尺度	1、研究经济、科技、能耗对碳 排放的影响，	碳排放核算：数据包络分析 方法、莫兰指数； 空间结构：地理加权回归模 型；	通过数据包络分析及地理 加权回归模型，识别不同时期 县级市碳排放效率高型；

时空格局及驱动因素	月第 4 期 第 37 卷		效率空间 关联特征 研究		2、根据不同影响因子的碳排放效率的提出降低碳排放的建议。		（热）—低（冷）空间分布特征。
辽宁省碳排放影响因素分析及达峰情景预测	东北财经大学学报 2017 年第 4 期	★★★★★	不同变量因子对碳排放、碳吸收的影响强弱分析	辽宁省省域层面	1、筛选和分析辽宁省碳排放的影响因素， 2、根据模型预测未来碳排放达峰情景。	碳排放核算：STIRPAT 模型； 模型验证：回归系数 K 值验证。	STIRPAT 模型数据筛选：通过城市化率、能源结构、产业结构和开放程度 4 个解释变量评估经济水平不同、企业规模不一的城市的碳排放及碳吸收数值， 并采用回归模型对预测结果进行验证。通过研究变量因子模拟预测城市碳达峰情景预测。
辽宁中部城镇密集区土地利用变化的碳排放及低碳调控对策	应用生态学报 2016 年 2 月第 2 期第 27 卷	★★★★★	辽宁中部城镇密集区土地利用变化的碳排放量	辽宁省中部地级市尺度	1、生成土地利用变化的碳排放强度矩阵，估算综合碳排放量； 2、定量分析土地利用变化与碳排放/吸收之间的映射关系； 3、根据土地利用变化类型碳收支强度，提出了低碳土地利用调控对策。	碳排放核算：保持用地类型的碳排放及变化地类的碳排放； 影响因子关系分析：土地利用变化转移矩阵。	通过计算各个时期土地利用地类的净碳排放量，获取辽宁省中部城镇不同时期净碳排放量主要地类来源，获取不同地类的碳收支情况。

面向低碳生活的县域城镇空间结构优化研究	规划师 2020年第24期第36卷	★★★★★	碳排放影响因子关系研究	全国范围 县域尺度	1、定性搭建县域生活碳排放、规划内容、空间结构之间作用关系的理论框架； 2、定量分析县域空间结构对生活碳排放的影响； 3、归纳了县域低碳空间结构的规划策略。	碳排放核算：排放因子法； 县域空间结构：空间度量指标体系； 影响因子关系分析：双变量相关分析； 社会经济影响描述模型：IPAT 模型。	影响因子数据分析方法：采用双变量最优拟合曲线及局部加权曲线，建立县域空间结构与生活碳排放量之间的数学关系描述模型，通过模型可量化因子的影响程度。
浅谈基于低碳、生态导向的城市规划	建筑·节能 2020/12	★	低碳生态城市规划	无	“生态”和“低碳”的概念应该整合到各个层次规划中，规划的编制者以及城市的管理者要熟悉掌握低碳生态城市的内涵，确立其规划重点，通过有效的手段和工具将生态建设内容纳入专项规划之中，使实施与规划能够密切结合，进一步加快低碳生态城市的建设进程。	无	无
浦东新区总体规划碳排放核算研究	西安建筑科技大学 2020年城市规划硕士学位论文	★★★★★	规划方案碳排放核算方法	浦东新区城市总体规划（2017-2035）	1、梳理城市温室气体排放清单、相关核算方法以及低碳城市规划与温室气体清单的相关研究进展。 2、建立“土地利用——碳排放”关联框架，将人类活动导致的碳排放行为落实到各类用地。本文将规划用地划分为居住、	1. LMDI 分解模型：分析驱动因素对碳排放量的贡献程度； 2. 建立建设用地与碳排放量之间的计算方法：建设用地能源消耗-能源消耗转化为碳排放量-建设用地碳排放强度-规划建设用地面积	下一步工作计划包含对国土空间规划的评估，可参考借鉴本文建立的各类建设用地对应碳排放量的核算方法。

					工业、商业与公共管理、交通、碳汇五大系统模块。通过构建不同模块的碳排放核算模型，量化居住、商业与公共管理、工业、交通、碳汇五类用地的现状碳排放量，进而测度各类用地的平均碳排放强度值。 3、通过上述结果，得到浦东新区总体规划碳排放总量、人均碳排放量和单位 GDP 碳排放量等值。 4、借助 Kaya 恒等式，本文对影响碳排放的空间规划因素进行分解，分析各因素对碳排放的具体影响情况。 5、以量化结果为依据，比较浦东新区总体规划的碳排放值与相应的政策目标值，并以此为基础制定相应的低碳规划指标。	与碳排放量强度乘积-得出规划建设用地碳排放量总量	
陕西省土地利用碳排放影响	水土保持研究 2018 年 2 月第 25 卷第 1 期		土地利用碳排放量、土地利用碳排放的因素	陕西省	1、本文综合土地利用直接碳排放与土地利用间接碳排放核算陕西省土地利用碳排放量； 2、基于 Kaya 恒等式基本原理结合对数均值迪氏指数分解法	1、土地利用碳排放测算模型：直接碳排放系数法测算耕地、园地、林地、草地、水域和未利用地碳排放效应；建设用地则间接核算其	可借鉴土地利用碳排放测算模型（本文计算土地利用碳排放量较为简单）、影响因素分解模型，本文分析方法均采用计算出土地利用

因素及脱钩效应分析			分解、脱钩效应分解		（LMDI）建立土地利用碳排放的因素分解模型对陕西省2001-2014年土地碳排放影响因素进行实证分析； 3、结合因素分解的结果构建脱钩弹性分解量化模型考察各影响因素的脱钩效应，力求深入地全面地反映各影响因素对土地利用碳排放与经济增长脱钩的内在作用机理及其贡献大小； 4、制定全面合理的土地低碳利用战略和低碳经济发展措施、政策。	承载的人类活动如经济建设、城市扩展和能源消耗等活动引起的碳排放； 2、影响因素分解模型：基于扩展的 Kaya 恒等式、利用 LMDI 分析框架建立土地利用碳排放影响因素分解模型； 3、脱钩效应分解量化模型：建立土地利用碳排放与经济增长的脱钩效应分解量化模型，土地利用碳排放与经济增长的脱钩弹性指数可分解为能源碳排放强度脱钩弹性、能源强度脱钩强度、经济规模脱钩弹性、土地规模脱钩弹性以及人口规模脱钩弹性。	碳排放量、影响因素贡献度、脱钩弹性指数等数值后，进行数值在2001-2014年的变化情况分析对比，得出比较结论。
碳达峰情景预测的主要方法及模型	环境保护与循环经济	★★★★★	碳达峰情景预测的主要方法及模型	方法论综述	本文对碳达峰情景预测的不同模拟方法进行对比分析，并对碳排放峰值预测的主要模型及应用情况进行梳理和评述。	1、碳达峰情景预测的主要模拟方法：“自上而下”模拟方法、“自下而上”模拟方法、综合评估模型； 2、碳排放峰值预测主要模型：CGE模型、LEAP模型、MARKAL-MACRO模型。	第二阶段碳排放量预测可参考此文提到的方法，检索本文参考文献获得具体模型算法。

碳排放峰值控制下的建设用地扩展规模研究	中国人口·资源与环境 2019 年第 29 卷第 7 期	★★★★	碳排放量预测模型构建、峰值预测、建设用地扩展反推	合肥市	一是对建设用地碳排放峰值的合理预测，二是基于此峰值控制下的建设用地扩展规模预测，前者包括峰值的大小以及峰值出现的时点，后者是指各时点碳排放量所被承载的建设用地面积。	1、建设用地碳排放量预测模型：Kaya 恒等式，加入科技进步因子，通过 1995–2012 年历史数据，计算碳排放量恒等式系数，构建恒等式预测模型； 2、通过建设用地排放量预测模型，计算合肥市碳排放峰值出现年份； 3、通过 1996–2012 年建设用地扩展与建设用地碳排放之间的回归方程，验证两者有强相关性，并通过回归方程得到建设用地扩展的规模预测。	大体思路与本次研究一致，构建碳排放量预测模型，通过历史数据计算模型系数，再做出碳排放量预测，但整体偏简单。
碳平衡视角下武汉生态控制区碳汇效能演变及调控	中国城市林业第 18 卷第 5 期	★	碳排量估算与对应的碳汇量估算	武汉市	分析作为生态控制区物质载体的生态用地及其碳汇供需水平的动态变化特征，结合目标年需求预测，探讨碳平衡视角下城市生态控制区差异化调控策略，以期为低碳规划与生态控制线实施深化提供参考。		不相关

我国城市群低碳化布局的基本特征及影响因素	宏观经济研究，2017年第5期	★★★★★	碳排放影响因子关系研究，布局特征	城市群，以我国14个城市群为例	从空间、交通、产业和生态四个维度提出城市群低碳化布局的基本特征，通过构建碳排放测算方法和低碳空间布局的评价指标体系，定量分析影响城市群空间布局低碳化的影响因素。	1、城市群碳排放的测算：排放因子法。 2、以城市群紧凑度为视角分析空间、交通、产业布局紧凑度对城市群碳排放的影响。	1. 城市群尺度的研究；2. 空间布局-紧凑度的测算，包括交通紧凑度、空间紧凑度、产业紧凑度和综合紧凑度。3. 低碳城市要求下空间布局对策与形式
武汉城市圈碳排放的时空格局及影响因素分解研究——基于2001~2009年市级面	长江流域资源与环境，2013年11月，第22卷第11期	★★★★★	碳排放强度时空分异，碳排放核算方法，碳排放影响因子关系研究	武汉城市圈	在IPCC清单的基础上，综合对比《2006年IPCC国家温室气体清单指南》中的方法，从能源消费、工业产品、土地利用和废弃处理物4个方面测算了2001~2009年武汉城市圈碳排放总量和碳排放强度的时间规律和空间差异，并运用迪氏对数指标分解模型(LDMI)从效率因素、结构因素、经济水平和劳动力规模等方面进行因素分解。	1. 碳排放核算方法：构建指标体系。2. 碳排放影响因素分解方法：LDMI分解法	武汉城市圈碳排放驱动因素分解结果分为抑制因素和促进因素

板数据的 实证							
中国城市 碳排放强 度的空间 溢出效应 及驱动因 素	地理学报 2019 年第 6 期 第 74 卷	★★★★	城市碳排 放强度的 空间溢出 效应和驱 动因素分 析	全国范围 市域尺度	采用核密度估计、空间自相关、空间马尔科夫链和面板分位数回归等方法对 1992-2013 年全国 283 个城市碳排放强度的空间溢出效应和驱动因素进行了分析。	1. 核密度 2. 空间自相关 Moran's I 指数 3. 空间马尔科夫链 4. 分位数回归模型	碳排放强度的空间分异
浙江省碳 排放时空 格局及影 响因素研 究	长江流域 资源与环 境, 2017 年 9 月, 第 26 卷第 9 期	★★★★	碳排放强 度时空分 异, 碳排 放核算方 法, 碳排 放影响因 子关系研 究	浙江省各 地级市市 辖区、县 级市和县 域	浙江省 2005 ~ 2010 年各县市区碳排放测算的基础上, 采用空间自相关方法、地理加权回归模型对其碳排放总量、人均碳排放量、地均碳排放量进行分析。研究结果有助于深入理解小尺度下县域单元碳排放及其影响因素的空间关联, 揭示人类经济活动与自然系统的交互格局及其空间环境效应。	1. 碳排放测算: 采用标准煤算法测算区域碳排放指标。 2. 空间自相关分析。 3. 地理加权回归模型。	碳排算法, 影响因子分析, 省级碳排空间分析描述方法。

中国 2030 年 CO ₂ 排放 情景预测 与减排潜 力分析	系统工程 学报，第 34 卷第 6 期，2019 年 12 月	★★★★★	碳排测 算，情景 分析	中国，分 区域，分 省评价	在对中国及各生产部门 CO ₂ 排放量进行测算的基础上，对中国 CO ₂ 排放的影响因素进行识别，进而根据我国社会经济发展的现行趋势，设定 CO ₂ 排放的基准情景 (BS)/政策情景 (PS) 和深度能源转型情景 (ETS)。然后分别预测三种情景下中国及各生产部门的一次能源需求以及 CO ₂ 排放量，评估各部门、各影响因素对减排目标实现的贡献率，以求为实现 2030 年 CO ₂ 减排目标与化石能源消耗总量控制目标而提供合理建议。	CO ₂ 排放量的测算方法：情景方法	情景设计方法。基于当前中国社会、经济、资源与环境的现状与历史发展趋势，构建第一种情景，在此基础上，增加相关政策规划，形成第二种情景，再加能源结构的优化，形成第三种情景。
中国超大 城市碳排 放达峰的 影响因素 及组合情 景预测一	环境科学 报。2019 年 12 月，第 39 卷第 12 期	★★★★★	碳排放情 景预测	北京、上 海、广州、 深圳、天 津和重庆 等 6 个 超大城市 为研究对 象	能源强度为门限变量，建立门限-STIRPAT 模型，首先确定 6 个超大城市碳排放的常住人口、居民富裕程度和技术水平这 3 个碳排放驱动因素，然后对 27 种情景下的各城市碳排放达峰进行预测。	碳排放驱动因素对城市碳排放的阶段影响：门限-STIRPAT 模型构建	情景分析方法：将城市碳排放驱动因素变化率设定为 3 种强度（高、中和低）并排列组合，建立 27 种组合情景进行预测。

——基于 门限-STIRPAT 模型的研究							
中国城市 居民生活 能源碳排 放的时空 格局及影 响因素分 析	环 境 科 学 学 报，2016 年 9 月， 第 36 卷 第 9 期	★★★★	时空格局 及影响因 素	以城市居 民直接碳 排放能源 为研究对 象，全国 范 围 和 东、中、 西、北为 分 析 尺 度；	在对中国及各生产部门 CO2 排放量进行测算的基础上，对 中国 CO2 排放的影响因素进行 识别，进而根据我国社会经济 发展的现行趋势，设定 CO2 排放的基准情景(BS)/政策情 景(PS)和深度能源转型情景 (ETS)。然后分别预测三种情 景下中国及各生产部门的一次 能源需求以及 CO2 排放量， 评估各部门、各影响因素对减 排目标实现的贡献率，以求为 实现 2030 年 CO2 减排目标 与化石能源消耗总量控制目标 而提供合理建议。	CO2 排放量的测算方法：排 放系数法	其中对于人口和结构的分 析可以借鉴。结论：城市人 口规模、城市居民可支配收 入、城市居民生活消费支 出、青壮年人口比重对城市 居民生活能源碳排放量具 有加剧作用，而城市居民能 源消费结构对其具有减缓 作用。

中国二氧化碳排放峰值的情景预测及达峰特征——基于粒子群优化算法的BP神经网络分析	东北财经大学学报 2018 年第 5 期	★★★★	碳排放影响因素与总量预测	全国	运用基于粒子群优化算法的 BP 神经网络分析，在 8 种发展模式下对中国二氧化碳排放峰值进行预测	1. 灰色关联分析法 2. 基于粒子群优化算法的 BP 神经网络仿真	模型设计方法及情景假设方法。
中国能源碳排放因素分解与情景预测	电力建设 第 9 期 第 42 卷	★★★★	碳排放影响因素选取与分类情景预测	全国	采用对数平均迪氏分解法分析我国能源消费碳排放变化影响因素。并采用情景模拟预测 2030 年我国能源碳排放。	1、《IPCC 2006 国家温室气体排放清单指南》推荐预测方法 2. LMDI 分解模型 3. STIRPAT 预测模型	影响因子选取方法。

致谢

本研究是能源基金会“国土空间规划助力广东省碳达峰碳中和”工作组下的课题，由广东省城乡规划设计研究院有限责任公司撰写，由能源基金会提供资金支持。

“广东省国土规划助力碳达峰碳中和研究”项目由广东省环境科学研究院和广东省城乡规划设计研究院有限责任公司共同完成。其中，广东省环境科学研究院负责基于国土空间规划用地类型碳排放研究，广东省城乡规划设计研究院有限责任公司负责广东省碳排放量与影响因子间的关系研究及情景预测。

在本项目研究过程中，研究团队得到了广东省环境科学研究院、中山大学的大力支持，同时得到了各阶段评审专家为项目研究过程做出的倾力指导，在此向他们表示诚挚感谢。

-----报告正文-----

免责声明

若无特别声明，报告中陈述的观点仅代表作者个人意见，不代表能源基金会的观点。能源基金会不保证本报告中信息及数据的准确性，不对任何人使用本报告引起的后果承担责任。

凡提及某些公司、产品及服务时，并不意味着它们已为能源基金会所认可或推荐，或优于未提及的其他类似公司、产品及服务。

