

广东省国土规划助力碳达峰碳中和—— 基于国土空间规划用地类型碳排放研究

Promoting Carbon Emissions Peak and Carbon Neutrality of Guangdong -

Study on Carbon Emission of Land Type based on Territory Spatial Planning

广东省环境科学研究院

2023 年 2 月

Guangdong Academy of Environmental Science

February, 2023

项目名称： 广东省国土规划助力碳达峰碳中和——基于国土空间规划用地类型碳排放研究

支持单位： 能源基金会

承担单位： 广东省环境科学研究院

技术组成员

项目负责人： 廖程浩

技术负责人： 李易熹

主要参与人员： 熊雪晖、王霄、向男、许鸿伟、罗银萍、李敏辉、董凯辉、黄宝莹、王明旭

审 核： 张永波

目录

摘要	1
第一章 项目概述	4
1.1 项目研究背景	4
1.2 项目研究目标与内容	5
1.3 研究思路和技术路线	6
1.4 研究范围和基础数据	8
第二章 广东省建设用地碳排放情况	10
2.1 广东省碳排放现状	10
2.2 广东省建设用地与碳排放耦合分析	11
2.3 广东省建设用地碳排放强度与国内其他区域水平总体相近	15
2.4 城市开发强度对广东城市建设用地碳排放强度影响显著 ...	16
2.5 广东省建设用地碳排放强度与单位用地生产总值、人口密度正相关	17
2.6 广东省建设用地碳排放强度与地区生产总值规模、现代产业规模等指标呈现倒“U”型曲线关系	18
第三章 广东省主要领域“用地-碳排放”关联分析	20
3.1 行业领域“用地-碳排放”耦合关联	20
3.2 省内工业用地碳排放强度关联特征	20
3.3 道路交通运输用地碳排放强度关联特征	25
3.4 居民生活用地碳排放强度关联特征	26
3.5 服务业用地碳排放强度关联特征	32

3.6 农业、建筑业用地等地类碳排放强度关联特征	35
3.7 广东不同用地类型碳排放强度略高于国内其他地区	36
第四章 典型行业“用地-碳排放”耦合关联分析	38
4.1 典型行业工业用地数据 POI (Point of Interest)	38
4.2 典型行业点源碳排放网格清单	41
4.3 广东“两高”行业用地碳排放强度显著高于其他行业企业	42
4.4 典型行业工业用地碳排放强度均值呈现 $M3 > M1 > M2$ 特征	43
4.5 产业结构升级有助于降低工业用地碳排放强度，工业用地分 类标准和管控措施仍有完善空间	44
4.6 省内重点行业企业单位用地碳生产力水平差异较大	46
第五章 广东省土地利用绿色低碳发展水平评估	48
5.1 土地利用绿色低碳发展指数评估体系	48
5.2 土地利用绿色低碳发展指标评估结果	50
第六章 结论与建议	52
6.1 结论	52
6.2 政策建议	54
参考文献	57

摘要

党的二十大报告强调，实现碳达峰碳中和是一场广泛而深刻的经济社会系统性变革。土地作为人类碳排放活动的重要载体，探索碳排放空间特征对积极稳妥推进碳达峰碳中和具有重要意义。

本研究以 2020 年为基准年，关联耦合广东省 2020 年能源消费与建设土地利用情况，对广东省国土空间规划格局下的土地利用碳排放空间特征展开了分析。研究从不同单元、行业尺度探讨广东省“土地利用-经济活动-碳排放”的相互关系，探索提出了工业企业用地碳生产力的概念，以广东各城市为例构建了土地利用绿色低碳发展评估体系。研究成果可为国内对不同空间尺度、不同用地类型的土地利用碳排放强度和空间特征基础研究提供支撑，能够为国土空间规划支持碳达峰、碳中和目标的实现提供理论和技术支持。

广东省各级行政单元建设用地碳排放差异较大，省内区域发展的不平衡和不协调现象在碳排放方面同样突出。广东城市建设用地碳排放强度与地区生产总值、现代产业发展水平等指标呈现倒“U”型曲线关系，表明随着工业化、城镇化进程的推进，城市建设用地碳排放强度增速将逐步放缓。产业结构高端化有效提升了深圳土地利用和经济产出效率，推动深圳进入倒“U”型曲线的右上侧，绿色低碳高质量发展水平领跑全省；而粤东西北大部分城市仍处于经济总量规模偏小、现代产业集聚能力偏弱、城镇化进程相对滞后的发展阶段，处于倒“U”型曲线左下侧。

建设用地类型对广东碳排放影响显著，城市间不同建设用地碳排放强度差异较大。产业结构和区域综合发展水平均处于领先水

平的珠三角城市工业用地碳排放强度显著优于产业层次偏低、工业发展模式较粗放的粤西和粤北城市；而在道路交通、商业服务业和公共服务业、城乡居民生活等领域，珠三角城市的用地碳排放强度总体高于粤东西北地区。

现行工业用地分类标准未能精准识别广东工业节能降碳潜力，本研究在企业单位用地碳排放和碳强度基础上提出的工业企业用地碳生产力概念能更综合评判企业用地的碳排放和产出效率水平。省内工业行业用地碳排放强度均值呈现 $M3 > M1 > M2$ 特征，表明仅定性从是否对居住和公共设施等环境产生影响进行划分不足以系统全面反映省内行业企业用地碳排放特征。研究将不同行业单位用地产出碳排放强度前 20% 的高值水平划定为判断行业企业用地碳生产力水平的指示值，钢铁、石化化工、水泥、陶瓷、造纸等重点行业企业的用地碳生产力水平的建议指示值分布在 26~240 吨 CO_2 /(万元· km^2)。

深圳、广州已初步形成有利于“碳达峰碳中和”的国土空间开发格局，土地利用绿色低碳发展水平全省领先。深圳、广州、东莞、佛山、珠海是土地利用绿色低碳发展水平评分前五位的城市，云浮、韶关、河源、梅州、阳江是后五位的城市，省内区域间和区域内部土地利用绿色低碳发展水平不均衡现象显著。

研究提出如下政策建议：**一是**开展建设用地碳排放评估，建立完善系统统筹碳达峰、碳中和目标要求的建设用地指标体系。**二是**探索将工业重点行业碳达峰行动目标要求纳入工业用地“标准地”制度，分行业提出工业用地碳排放强度、单位用地碳生产力等指标值和管理要求。**三是**开展工业用地分类标准的更新完善工作，探索定期开展重点工业行业企业用地碳生产力水平评估。**四是在**建设项目碳排放环境

影响评价中增加土地利用碳排放效率相关评价指标,提高建设项目土地利用的绿色集约水平。**五是**构建国土空间碳核算体系,建立全国、省、市、县尺度的建设用地碳排放强度数据库。

第一章 项目概述

1.1 项目研究背景

力争 2030 年前实现碳达峰、2060 年前实现碳中和，是中国对国际社会的庄严承诺，也是推动高质量发展的内在要求。气候变化是全人类面临的共同挑战，事关人类可持续发展。党的二十大报告强调“积极稳妥推进碳达峰碳中和”。近年来，我国将应对气候变化摆在国家治理更加突出的位置，实施积极应对气候变化国家战略，将碳达峰碳中和纳入生态文明建设整体布局 and 经济社会发展全局，坚持降碳、减污、扩绿、增长，推进生态优先、节约集约、绿色低碳发展，应对气候变化工作不断取得新进展。

广东积极稳妥推进碳达峰碳中和工作，2011~2020 年期间碳强度累计下降超 44%。广东作为国家首批低碳试点省份，持续扎实推进应对气候变化工作，经济增长对碳排放的驱动程度逐步降低。全省单位 GDP 能耗、单位 GDP 二氧化碳排放水平继续保持全国先进行列，“十二五”期间，广东省碳强度累计下降 23.9%，“十三五”期间碳强度累计下降约 22.35%，均超额完成国家下达任务，绿色低碳发展已经成为广东产业转型升级的内生动力^[1]。

土地作为人类碳排放活动的重要载体，探索碳排放空间特征对于引导广东省区域内部产业、交通、居民生活等领域的绿色低碳高质量发展有重要意义。当前国土空间规划编制对于绿色低碳转型发展主要以指导性政策、原则性要求为主，对国土空间规模、结构、布局等与

碳排放之间的关系仍有待研究。目前碳达峰、碳中和路径研究多按照行业、领域进行分类，并没有充分考虑空间因素，常常忽略了国土空间是所有人类活动的载体；另一方面。目前对广东省土地利用碳排放的特征分析的针对性仍然有待提升，部分研究忽略了区域排放差异，或较为简单对土地利用进行分类，得出的研究结果不能支撑面向碳减排的国土空间规划和用途管制的精准需求。有必要对广东省国土空间规划格局下的土地利用碳排放进行深入分析，剖析不同区域尺度变化下的空间格局与碳排放的关系，为推进广东省经济社会高质量绿色低碳发展建言献策。

本研究旨在“自下而上”分析涵盖省内工业、交通、居民生活、商业等主要碳源的排放情况，理清省内主要用地类型的碳排放情况，从不同单元、行业尺度探讨广东省“土地利用-经济活动-碳排放”的相互关系，分析省内主要用地类型的碳排放强度，研究区域、用地类型的土地利用碳排放效率差异，支撑主管部门识别土地利用碳排放的管控潜势。

1.2 项目研究目标与内容

1.2.1 研究目标

“自下而上”构建广东省 2020 年涵盖工业、交通、商业服务业、居民生活等主要能源消费领域的碳排放网格清单，基于广东省国土空间用地现状，建立一套不同建设用地地类二氧化碳排放强度数据集。并进一步从纵向维度识别省内区域、城市建设用地与土地利用碳排放

的关系和特征，横向维度分析不同行业用地碳排放强度，挖掘不同尺度国土空间用地结构对碳排放强度的影响规律，为广东省国土规划助力碳达峰碳中和研究提供基础支撑。

1.2.2 研究内容

一是对广东省 2020 年主要领域、区域的碳排放进行“自下而上”的调查分析；二是针对主要用地类型，以 2020 年碳排放情况为基准，对省内各片区的主要用地类型碳排放强度进行精细到区县尺度的研究；三是针对工业行业，通过重点行业和典型企业碳排放调查，将点源排放情况落到地块，分析典型行业企业的用地碳排放情况。四是构建土地利用绿色低碳发展水平评估体系，并以广东为例分析 21 地市土地利用绿色低碳发展水平。最后总结提出政策建议，为构建绿色低碳的国土空间用地结构提供基础数据支撑和决策支撑。

1.3 研究思路和技术路线

广东省国土空间碳排放相关研究^{[2][3][4]}认为广东省的碳排放主要源自于城镇经济社会活动产生的化石能源消费排放，土地利用作为人类经济社会活动的载体承载了该用地类型上人类活动所产生的排放量。由于当前能源活动二氧化碳排放清单对行业领域的分类标准主要基于国民经济行业分类，分类口径、范围与常见土地利用分类存在显著差异，许多对广东省城镇绿色低碳发展路径和广东省重点领域、行业二氧化碳排放的研究主要采取独立研究的方式，对碳排放的空间特

*按照国民经济行业分类目录，本研究建筑业碳排放空间网格清单针对的建筑业(Construction Business)指国民经济中从事建筑安装工程的勘察、设计、施工以及对原有建筑物进行维修活动的物质生产部门，由以下四个大类组成：房屋建筑业，土木工程建筑业，建筑安装业，建筑装饰、装修和其他建筑业。

征和土地利用的碳排放缺乏系统关联。

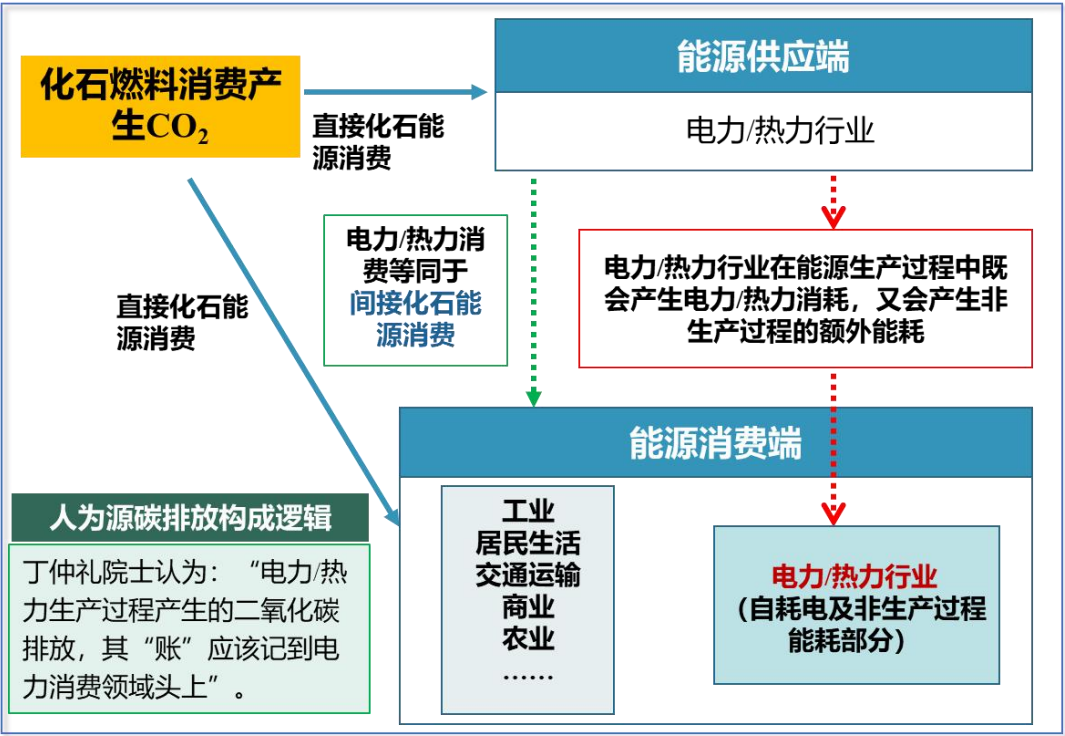


图 1 能源消费端碳排放分解逻辑

为了将分部门碳排放清单数据与广东省主要土地利用类型进行耦合关联，本研究建立了消费端视角的广东省 2020 年碳排放清单。本报告采用有关研究观点^[5]，将电力、热力等能源供应行业生产过程产生的碳排放分摊到终端消费领域，即终端碳排放中的间接排放部分。如图 1 所示，研究团队对电力行业生命周期碳排放进行拆解，将企业自耗电以及非生产过程能耗产生的碳排放作为企业的“消费侧碳排放”，将能源企业作为生产原料消耗的化石能源产生的“生产侧排放”视作已经分摊到各行各业用电产生的间接排放中。这样既能够避免在“自下而上”核算行业碳排放时重复计算发电碳排放，又能够将电力行业与其他行业、部门共同作为消费端进行排放强度分析。

基于前人对广东国土空间碳排放规律的探索和研究，为更好对广

东省区县、城市、区域尺度碳排放的空间特征开展精细化分析，本研究将研究重点聚焦在主要建设用地类型的碳排放强度上，构建了一套广东省土地利用碳排放强度数据集，重点关注广东省城镇经济社会活动中不同环节能源消费活动与土地利用之间的关联特征，并根据研究结果提出政策建议。其中，本项目的技术路线如图 2 所示。

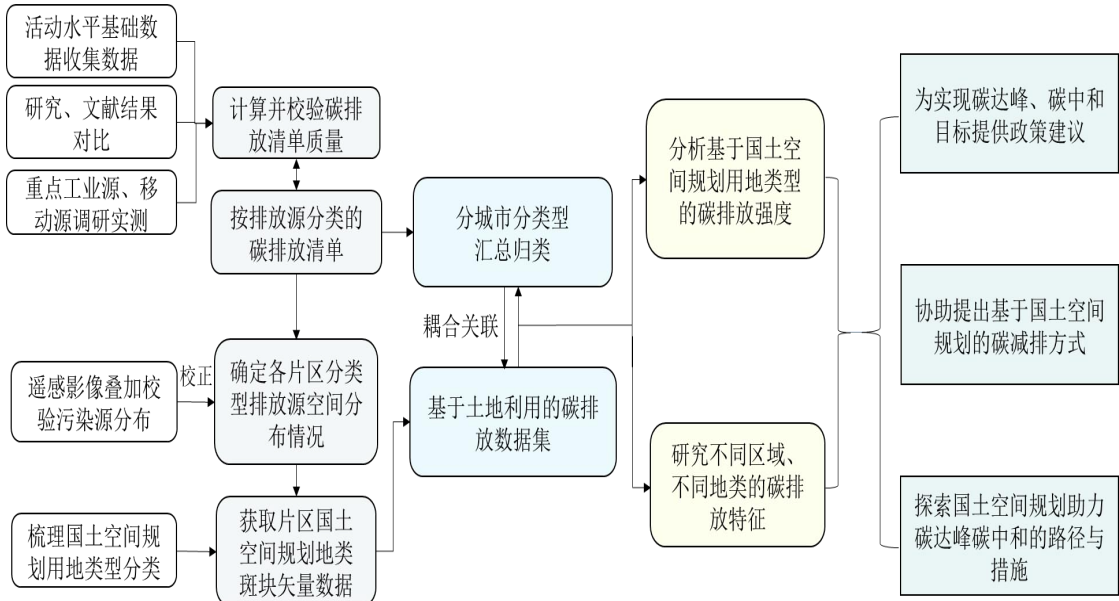


图 2 项目技术路线图

1.4 研究范围和基础数据

本项目研究以 2020 年作为基准年，通过调查并关联广东省主要人为源二氧化碳排放与国土空间用地情况，对广东省区域、城市土地利用碳排放以及工业、交通、居民生活、服务业、农业、建筑业等主要领域用地碳排放情况进行分析，探索二氧化碳与区域用地结构、细分用地类型之间的关系与规律。

其中，二氧化碳排放网格清单的基础数据主要来源于《广东省统计年鉴（2021 年）》、《广东省农村统计年鉴（2021 年）》、广东省 21 地市的统计年鉴，以及项目研究团队通过现场调研、专家咨询等途径

收集整理的人为碳排放源活动水平数据。国土空间用地数据来源于研究团队利用遥感影像以及百度地图等地理信息编译处理后获得。

第二章 广东省建设用地碳排放情况

2.1 广东省碳排放现状

本次研究重点关注广东省城镇经济社会活动中不同环节能源消费产生的二氧化碳，根据广东的实际情况和统计数据特点，依据《广东省碳达峰核算指南（征求意见稿）》、《广东省市县（区）级温室气体清单编制指南（试行）》等核算方法学推荐的排放因子法对各部门、地区的碳排放进行核算，建立了基于重点排放源的 2020 年广东省化石能源消费二氧化碳排放数据库。二氧化碳排放网格清单进一步结合省内点排放源（工业企业等）、线排放源（道路交通源等）、面源（居民生活、服务业、建筑业、农业等）化石能源消费活动水平与重点排放源空间数据，形成空间分辨率为 10km，其中局部重点区域、行业的排放清单分辨率达到 1km 的广东省高空间分辨率化石能源消费二氧化碳排放网格清单数据库。

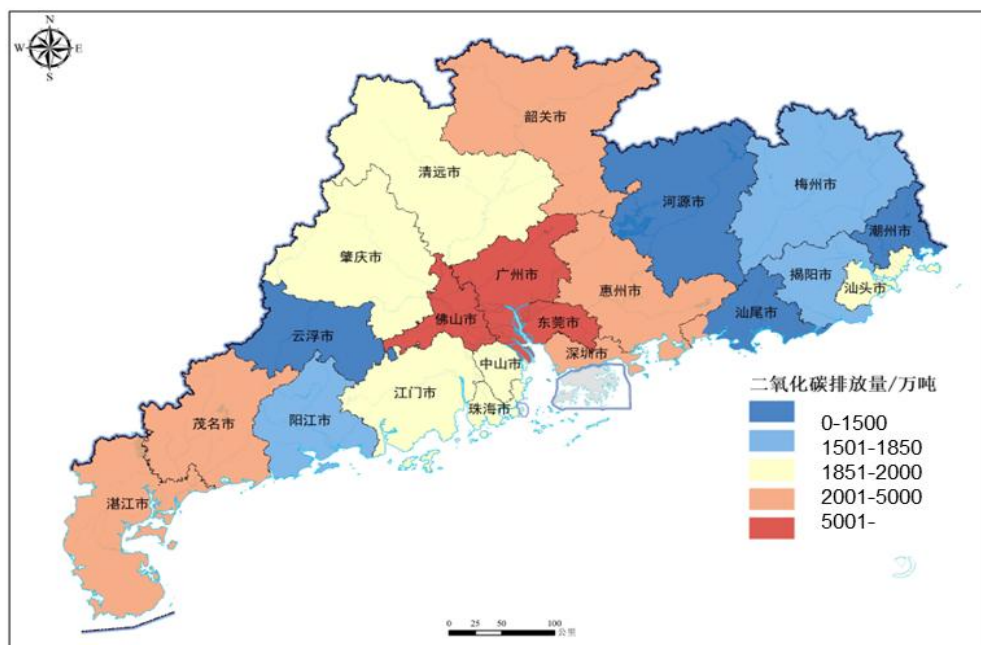


图 3 广东省 2020 年碳排放分布情况

广东省的碳排放主要集中在珠三角核心城区，全省碳排放总体呈现环珠江口核心区向外围城市群递减的趋势。珠三角城市碳排放主要集中在核心城区；粤东西北城市碳排放主要集中在工业集聚县区，区域的排放热点县区与区域高耗能行业规模和分布情况高度相关；此外，广东省东部城市片区碳排放总体处于省内较低水平，与东部城市经济发展总体处于省内落后水平有关。

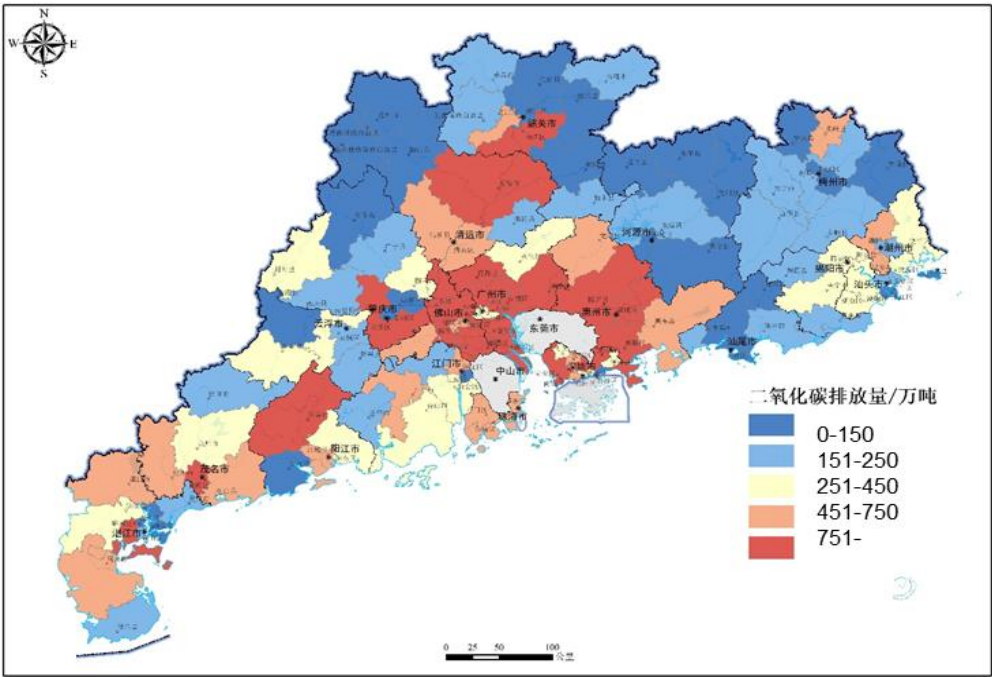


图 4 广东省 2020 年区县碳排放分布*

2.2 广东省建设用地与碳排放耦合分析

2.2.1 广东各区域间建设用地碳排放差异大

2020 年，广东省内珠三角和粤东西北地区建设用地碳排放强度因子分布呈现珠三角>粤西>粤东>粤北的特征，其中仅珠三角地区建设用地碳排放强度均值高于全省水平，约为全省均值的 123%，粤

* 东莞、中山行政区划不设县区，固不将其纳入区县碳排放分布统计。

西、粤东、粤北的强度均值分别约为全省的 86%、81%和 66%。省内 122 个县级行政区建设用地碳排放强度因子分布情况如图 5 所示。

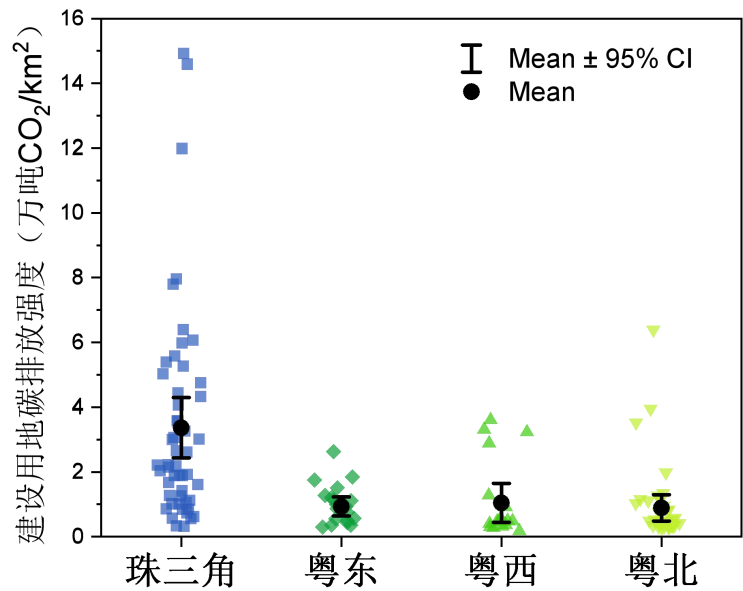


图 5 2020 年广东省分区域各区县建设用地碳排放强度

在县区尺度，珠三角建设用地碳排放强度高的县区主要集中分布在广深等核心城市的中心城区，且珠三角区域内建设用地强度分布水平存在较大差异。提示珠三角应加大低效用地盘活，引导存量土地结构和布局优化，推动产业结构绿色低碳高质量发展，不断提升国土空间开发品质。

粤东西北地区的建设用地碳排放强度高值区均主要分布在区内工业集聚区，表明粤东西北发展方式仍处于较为粗放阶段，工业领域降碳潜力大。一方面应继续强化对“两高”行业的管控，同时也应结合区域发展规划继续优化产业结构和产业布局，推进区内工业节能降碳提质增效，提升区内绿色低碳高质量发展水平。

2.2.2 广东地市间建设用地碳排放强度分布差异大

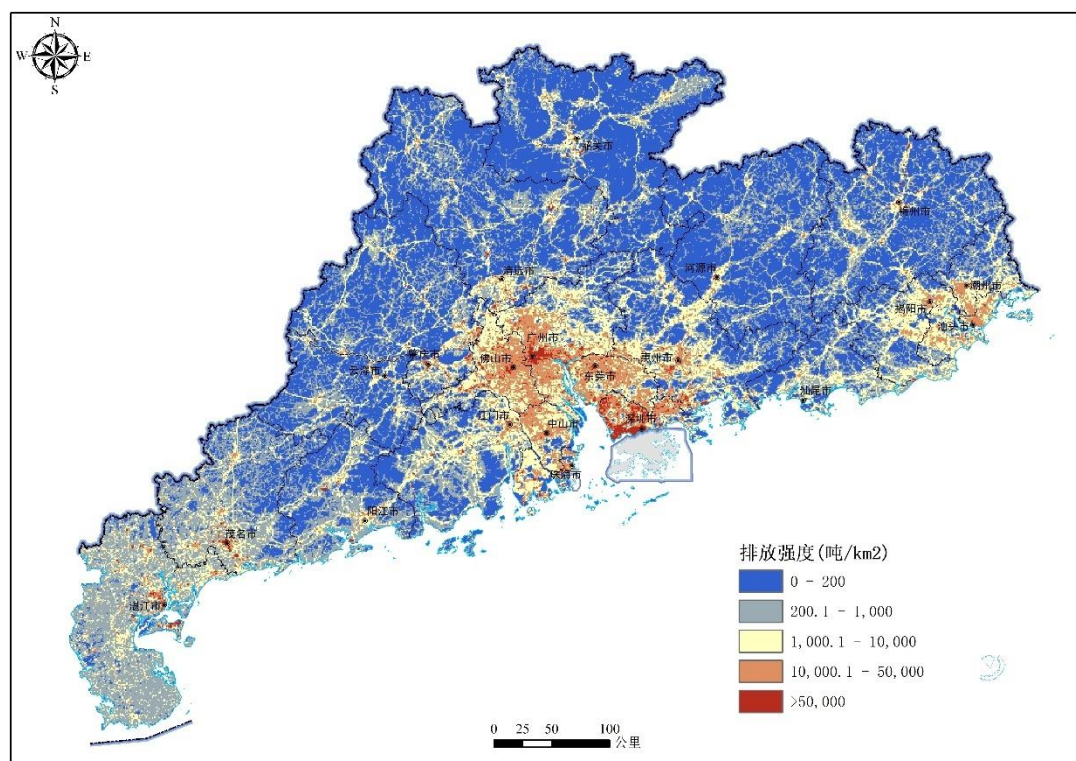


图 6 2020 年广东城市建设用地碳排放强度分布图

如图 6 所示，2020 年广东省建设用地碳排放强度分布呈现出省内四大区域中心区碳排放强度高，且碳排放强度逐步由中心区向外围降低的趋势。经济较为发达的珠三角“领头羊”县区的建设用地碳排放位于全省高位；而粤东西北发展模式相对粗放、工业节能减排潜力较大的高耗能行业集聚县区的建设用地碳排放强度同样处于省内高值。

2.2.3 地区碳排放直接影响建设用地碳排放强度高低

从图 7 可以看出，广东省各城市总体呈现出建设用地碳排放强度随着碳排放的增大而增高的特点。其中，湛江、茂名等粤西工业集聚城市呈现出碳排放总量较高，建设用地碳排放强度较低的特征，表明

湛江、茂名等地用地碳排放效率相对较低。

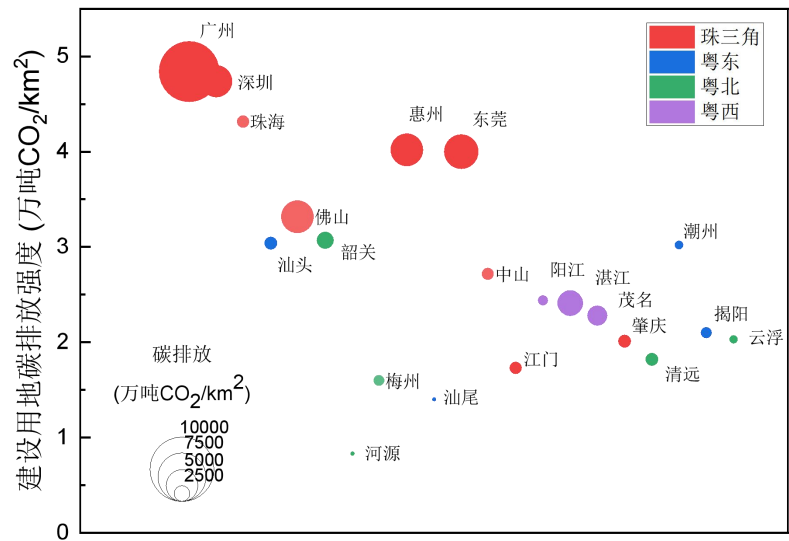


图 7 2020 年广东城市碳排放与建设用地碳排放强度分布情况

从图 8 进一步来看，县区的建设用地碳排放强度同样总体呈现出随着县区碳排放的增加而提高的趋势，其中粤西主要工业县区呈现出碳排放和建设用地碳排放强度双高的特征，有必要通过对产业结构的提质增效以及对区域用地结构的优化来放缓由于工业和经济较强劲增长带来的碳排放增速；粤北主要工业县区则呈现出建设用地碳排放强度高而碳排放总量相对较低的特征，结合区域产业布局和经济发发展现状，对钢铁、建材、煤电等“两高”行业的管控仍有强化空间，区域工业降碳潜力较大；此外，珠三角核心城市中心城区则表现出碳排放总量较低，建设用地碳排放强度较高的特征，表明随着城市化的发展，城镇的碳排放会逐渐聚集在建设用地上的人为活动中产生，提示此类城镇化水平高的城市可以通过优化既有建设用地开发格局，减少低效用地，通过打造集约高效的绿色城镇空间来进一步降低城镇碳排放水平。

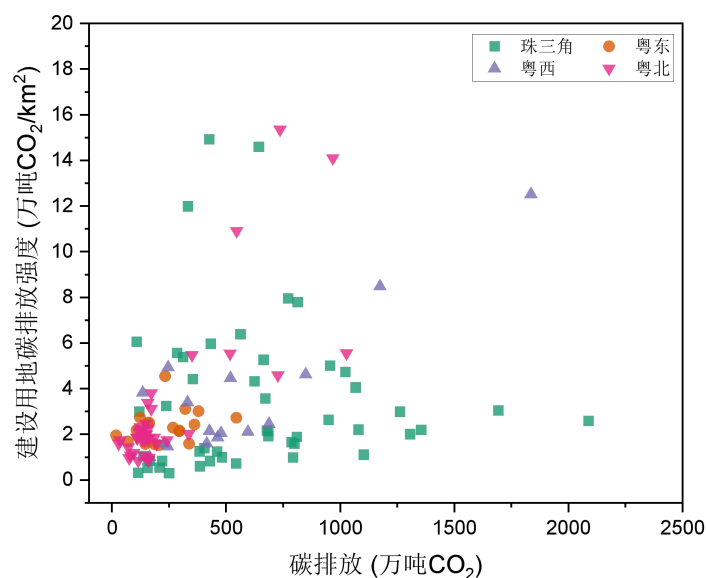


图 8 2020 年广东县（区）碳排放与建设用地碳排放强度关联情况

2.3 广东省建设用地碳排放强度与国内其他区域水平总体相近

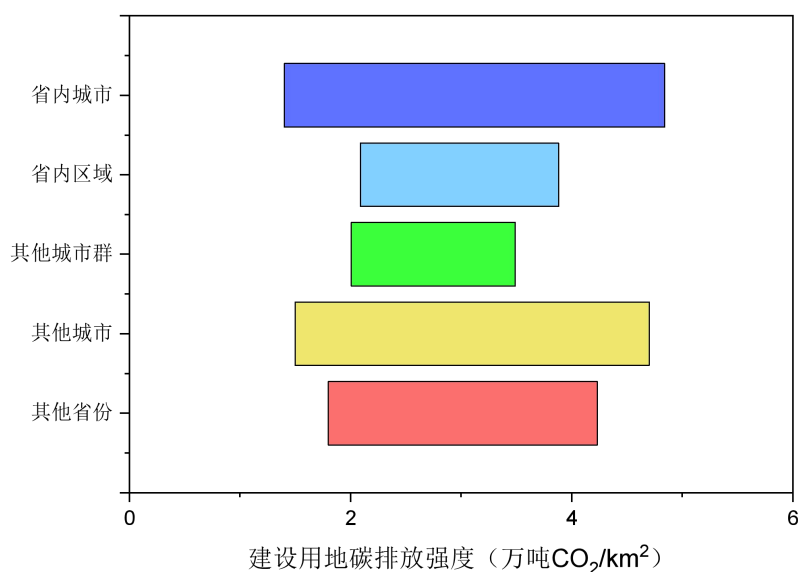


图 9 广东建设用地碳排放强度与国内其他地区对比

为了更好的对广东省建设用地碳排放强度水平进行分析，研究团队通过文献收集了一系列国内其他地区的建设用地碳排放因子分布情况^{[6][7][8][9]}，对比结果如图 9 所示。总体而言，省内城市建设用地碳排放强度水平与国内其他主要城市的分布水平相近；但省内四大区域的 2020 年建设用地碳排放水平则相对高于国内长三角、京津冀、长

江中游、成渝等主要城市群 2015 年的建设用地碳排放强度分布水平；而从省级层面来看，广东省建设用地碳排放强度低于福建省，同时高于江苏省，表明全省以及省内四大区域建设用地绿色集约效率仍有进一步提升空间。

值得注意的是，由于部分研究所使用的碳排放活动水平数据时序较为久远，此处收集的因子与国内其他地区现阶段分布水平可能存在一定偏差，针对国内建设用地碳排放的研究未来仍有待进一步开展。

2.4 城市开发强度对广东城市建设用地碳排放强度影响显著

结合城市开发强度来看，全省总体随着城镇开发强度的上升，建设用地碳排放强度也呈现上升趋势。如图 10，东莞、深圳等城市为代表的开发强度和建设用地碳排放强度均处于省内较高水平的珠三角核心城市，在未来的城市发展中需着重改善和提升已开发国土空间的能源和资源利用效率，不断优化既有国土空间用地结构的绿色发展水平；广州、珠海、佛山、中山、汕头、惠州为代表的建设用地碳排放强度或城市开发强度二者之一处于省内较高水平的城市，在未来的城市发展中，这类城市既要通过优化已开发利用国土空间用地效率来不断优化城市建设用地低碳发展水平以外，又要采取更高效集约的方式开发和利用城市国土空间，双轮推进城市国土空间用地结构的高质量绿色发展。而对于省内其他 14 个地市，由于城市开发强度均处于较低水平，且城市建设用地碳排放强度也相对较低，在未来的城市发展过程中，则可更加侧重于对未开发国土空间的保护和新开发和待开发国土空间绿色低碳高效集约发展的规划，通过城市开发建设来进一

步优化城市整体空间结构绿色低碳发展水平。

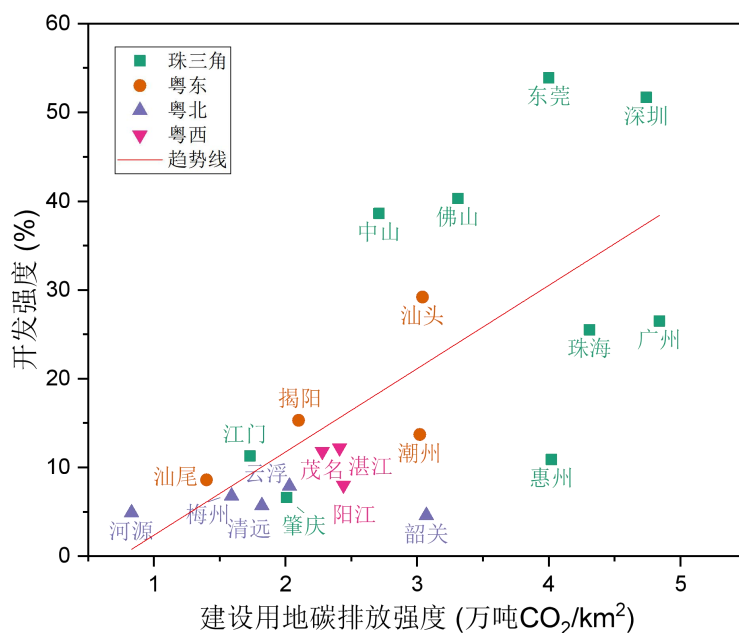


图 10 2020 年广东城市建设用地碳排放强度与城镇开发强度分布

2.5 广东省建设用地碳排放强度与单位用地生产总值、人口密度正相关

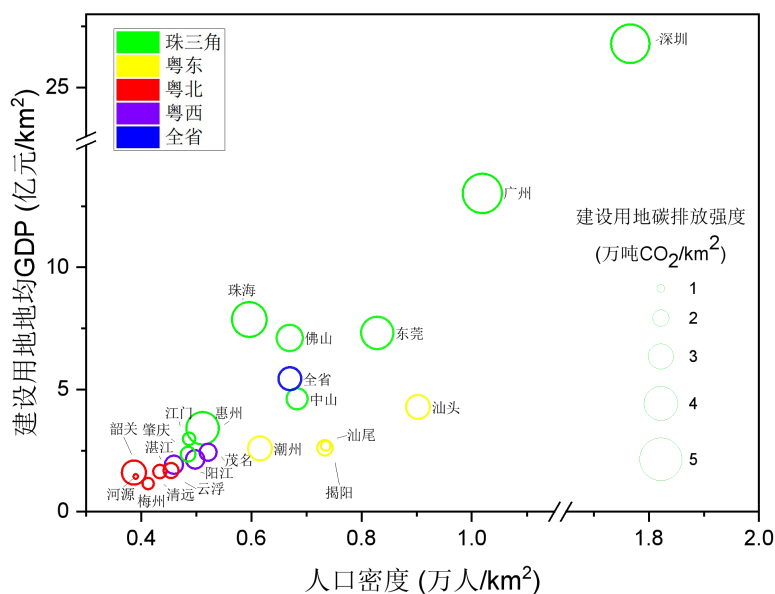


图 11 广东城市单位建设用地生产总值、人口密度与碳排放强度分布

从发达国家的发展经验来看,减碳与产业结构及城市化水平密切相关,如图 11 所示,随着建设用地地均生产总值和人口密度的上升,

广东城市用地碳排放强度总体呈现上升趋势。

深圳、广州、东莞、佛山等城市分别以全省平均水平的 1.7、1.6、1.4 和 1.1 倍建设用地碳排放强度承载了全省平均水平的 2.4、5、1.3 和 1.3 倍地均生产总值和 1.5、2.6、1.2 和 1 倍人口密度，建设用地利用相对更为集约；珠海、汕头等城市分别以全省平均水平的 1.5 和 1.1 倍建设用地碳排放强度承载了全省平均水平的 1.5 和 0.8 倍地均生产总值和 0.9 和 1.4 倍人口密度，建设用地利用集约水平和用地碳排放效率仍有一定提升空间；惠州、韶关、潮州等城市建设用地碳排放强度高于全省水平，同时建设用地经济生产效率和人口效率均低于全省水平，建设用地开发利用的集约程度有待提升；中山、揭阳、汕尾等城市建设用地碳排放强度和建设用地经济效率低于全省水平，同时用地人口密度高于全省平均，提示在未来的国土空间规划和建设过程中应更加着重经济建设效率；江门、肇庆、河源、梅州、清远、云浮、阳江、茂名、湛江等城市的建设用地碳排放强度、经济生产效率和人口密度均低于全省平均水平，提示未来应更加注重国土空间开发利用的提质增效，确保城市的高质量发展。

2.6 广东省建设用地碳排放强度与地区生产总值规模、现代产业规模等指标呈现倒“U”型曲线关系

广东省建设用地碳排放强度与地区生产总值规模、现代产业规模等指标呈现倒“U”型曲线关系，表明随着工业化、城镇化进程的推进，城市建设用地碳排放强度增速将逐步放缓。省内城市的建设用地碳排放强度增幅随着地区生产总值和先进制造业增加值等衡量城市

产业结构高端化发展水平的关联指标的增长而显著放缓，产业结构优化升级能够有效放缓由于城市发展需求客观造成的碳排放增长趋势，推动经济社会高质量绿色发展有助于积极稳妥推进碳达峰、碳中和目标实现（见图 12）。

深圳现代产业规模遥遥领先，产业结构高端化有效提升了深圳土地利用和经济产出效率，推动深圳进入倒“U”型曲线的右上侧，绿色低碳发展水平在省内领先；广州、东莞、佛山、珠海、惠州等珠三角核心城市先进制造业和绿色产业整体水平较高，建设用地开发利用的绿色低碳水平仍有提质增效的空间；省内其余城市仍主要集中分布在倒“U”型曲线的左下方，表明广东省提高发展平衡性与协调性的担子仍然很重，需因地制宜引导各地兼顾发展阶段、资源禀赋、产业结构和减排潜力差异，强化国土空间规划对地区产业规划布局的引导和约束作用，扎实推进全省高质量发展。

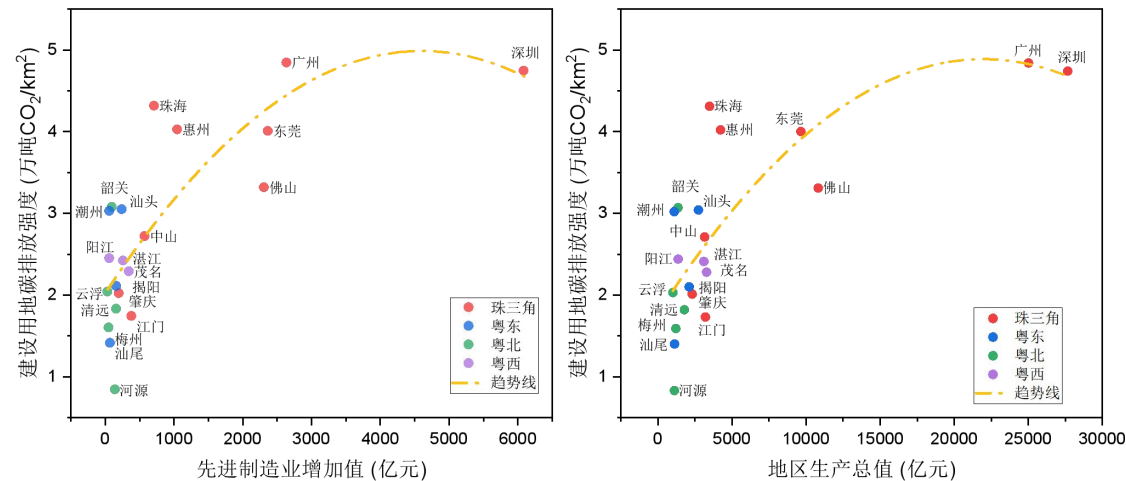


图 12 广东建设用地碳排放强度与现代产业规模(左)和地区生产总值规模（右）关联

第三章 广东省主要领域“用地-碳排放”关联分析

3.1 行业领域“用地-碳排放”耦合关联

基于消费端视角的广东省 2020 年碳排放清单与广东省土地利用分类后的各类地类进行关联耦合，得到碳排放源类型与用地类型相对应的关联逻辑及关联框架如图 13 所示。

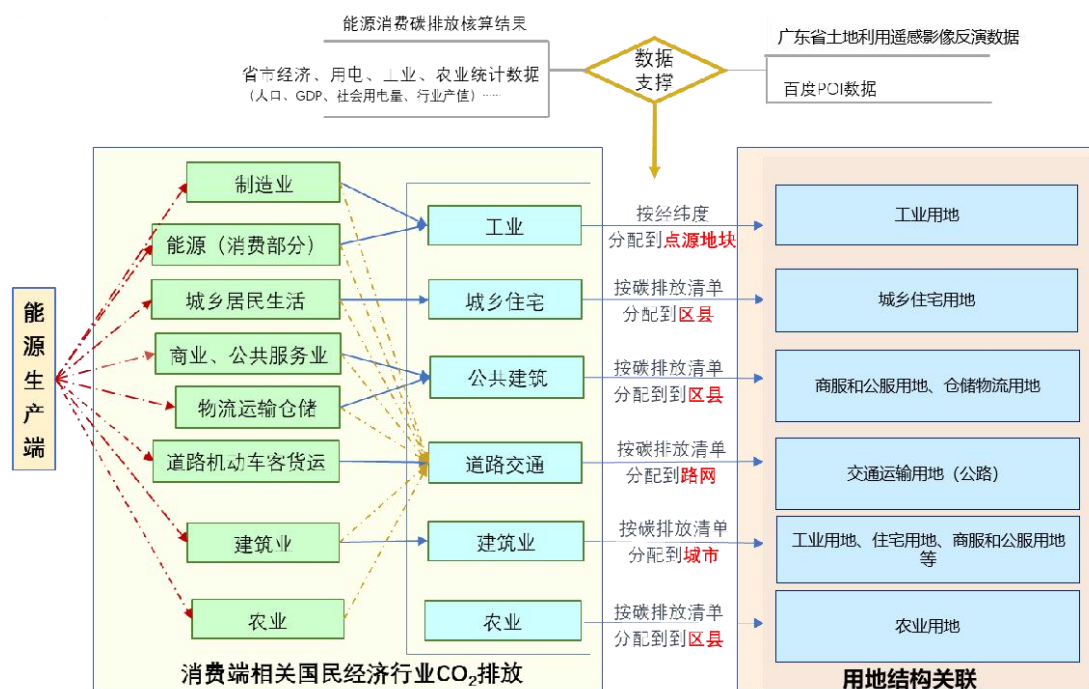


图 13 用地结构与碳排放关联逻辑梳理

3.2 省内工业用地碳排放强度关联特征

3.2.1 珠三角工业地块分布密集，粤西、粤北工业地块分布稀疏但县区单元工业用地碳排放强度整体偏大

如图 14，珠三角和粤东地区的工业地块相对粤西和粤北片区的工业用地分布更为密集，工业地块主要集中在珠三角地区，整体呈现分布密集、用地碳排放强度偏高的特征。粤西和粤北地区的工业地块分布稀疏，但韶关、清远、阳江、茂名、湛江等城市存在较多用地碳

排放强度高的分散工业地块。粤东地区工业地块的用地碳排放强度处于较高水平的整体较少。由于研究团队收集整理的涵盖企业样本点数与实际企业数量的样本容量存在偏差问题，研究团队通过对清单的企业样本及行业碳排放进行统计学分析，得到省内未被清单覆盖的工业地块所分布的工业行业、企业的碳排放平均水平，并据此核算出全省各县区的工业用地碳排放强度水平，结果显示，韶关武江区、梅州蕉岭县、肇庆封开县、韶关曲江區、惠州龙门县、茂名茂南区等县区工业用地碳排放强度位于全省前列，汕头南澳县、江门鹤山市、汕尾陆河县、江门台山市、河源龙川县等县区工业用地碳排放强度则处于省内最低水平。

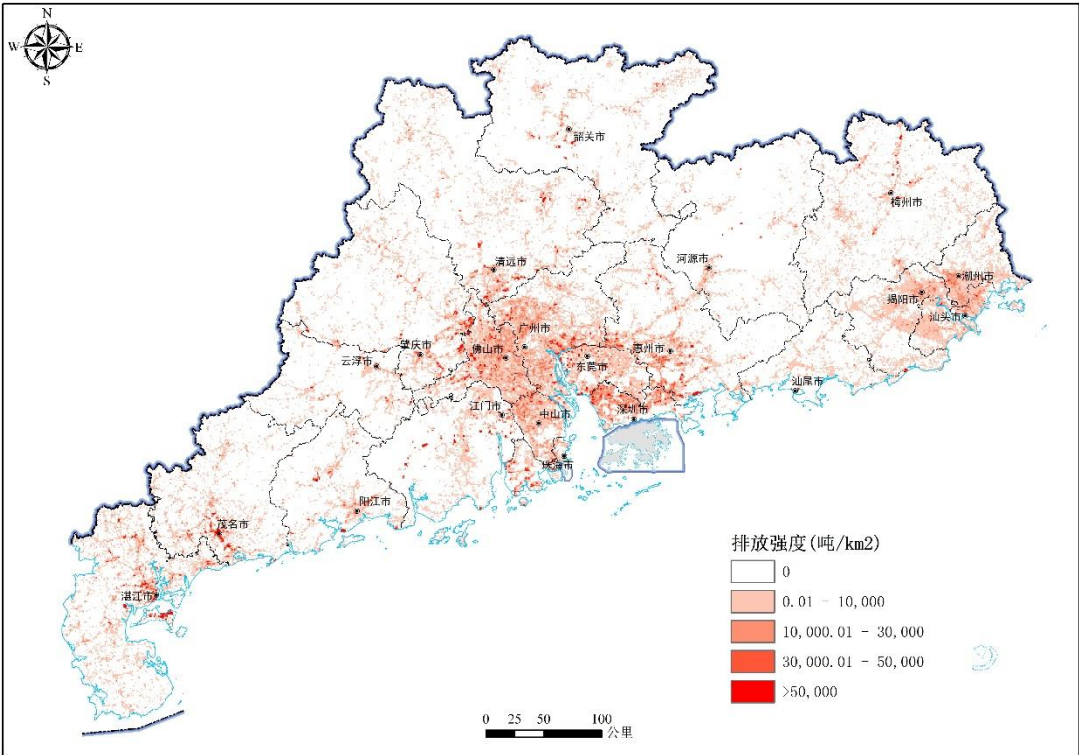


图 14 2020 年广东工业用地碳排放强度分布

3.2.2 省内工业用地碳排放强度总体随单位工业增加值增加而降低

从图 15 可以看出，全省工业用地单位工业增加值两极分化严重，

深圳市的工业用地工业增加值遥遥领先排在第二梯队的广州和珠海，同时，深圳、广州作为广东省经济发展的核心城市，不仅工业用地单位工业增加值高，工业用地碳排放强度均略低于全省平均水平，表明其产业结构在省内处于较为先进水平，而珠海的工业用地碳排放强度高于全省平均水平，产业用地碳排放效率有待向深圳、广州进一步优化靠拢；粤西城市和粤北主要城市以及惠州和肇庆等珠三角城市的工业用碳排放强度显著高于全省平均水平，且用地工业增加值水平低于全省平均水平。

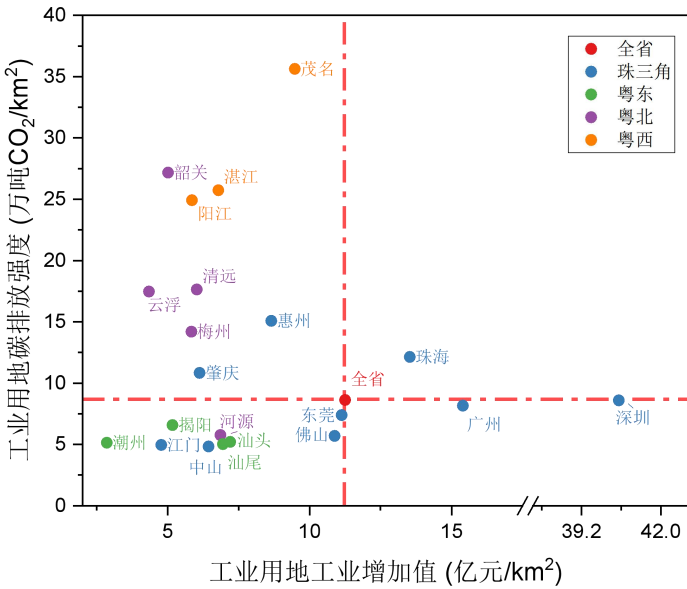


图 15 2020 年广东工业用地碳排放强度与单位工业增加值值分布

基于广东省“双碳”“1+N”政策体系提出要推动产业结构优化升级和要深入实施制造业高质量发展“六大工程”等任务要求，研究进一步通过先进制造业占规模以上工业比重情况与工业用地碳排放强度水平共同进行比较。图 16 显示，以绿色石化为制造业发展重心的茂名市虽然先进制造业占规模以上工业占比全省最高，但其工业用地的单位工业增加值水平和用地碳排放效率表现均差于全省平均水

平，表明未来茂名市需要大幅提升工业能源和资源利用效率，节能优先；广州、深圳、珠海相对产业结构和发展水平都处于省内领先水平，同时对标广州、深圳，珠海的产业结构和工业能效水平也仍有提升空间；惠州的制造业高质量发展水平在省内也处于较高水平，但是较高的工业用地碳排放强度和较低的单位用地工业增加值表明惠州仍需大力推动产业发展；粤西和粤北的主要城市总体来看产业结构仍然较为传统，能效水平和产业发展模式均较为粗放，需要严格执行产业政策和规划布局，推动产业结构优化升级的同时必须严控“两高”产业规模；粤东地区的工业用地总体处于低排放、低产值、低先进制造业占比的情况，考虑到“十四五”粤东地区重点耗能项目投产，工业用地碳排放强度可能增势强劲，有必要强化区域和市县规划的支撑保障，提前强化能效管控和产业规划布局，避免走先污染再治理的老路。

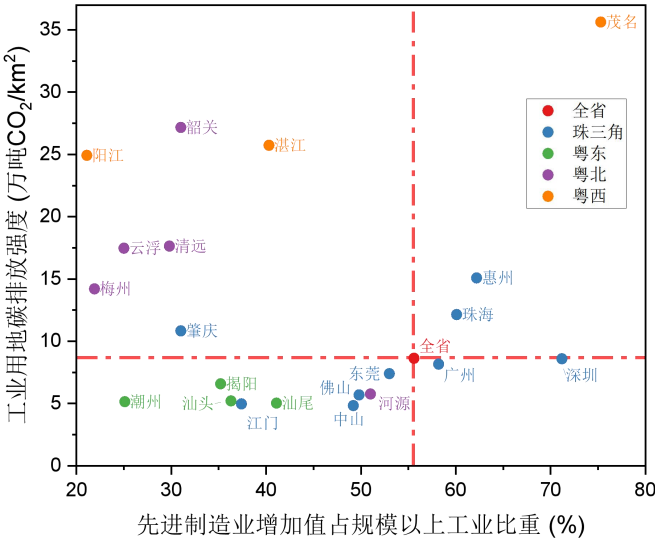


图 16 2020 年广东工业用地碳排放强度与先进制造业增加值占规模以上工业比重分布

进一步从区域角度对省内各县区的工业用地碳排放强度和用地工业增加值情况进行比较，可以看出，珠三角的惠州、肇庆、江门等

市所在部分县区、粤东的潮州、揭阳等市以及汕头的部分县区、粤西的阳江和湛江，尤其是阳春市和麻章区，以及粤北的清远英德市、清新区、韶关新丰县和云浮云安区，工业用地绿色发展水平仍存在较大提升空间，在未来的产业规划中，不仅要大力推动节能增效，还需更加注重产业结构调整和产业空间布局，推动以上县区在实现工业用地的产值不断提升的碳排放强度向区域内相对先进水平靠拢，达到提质增效的目的。

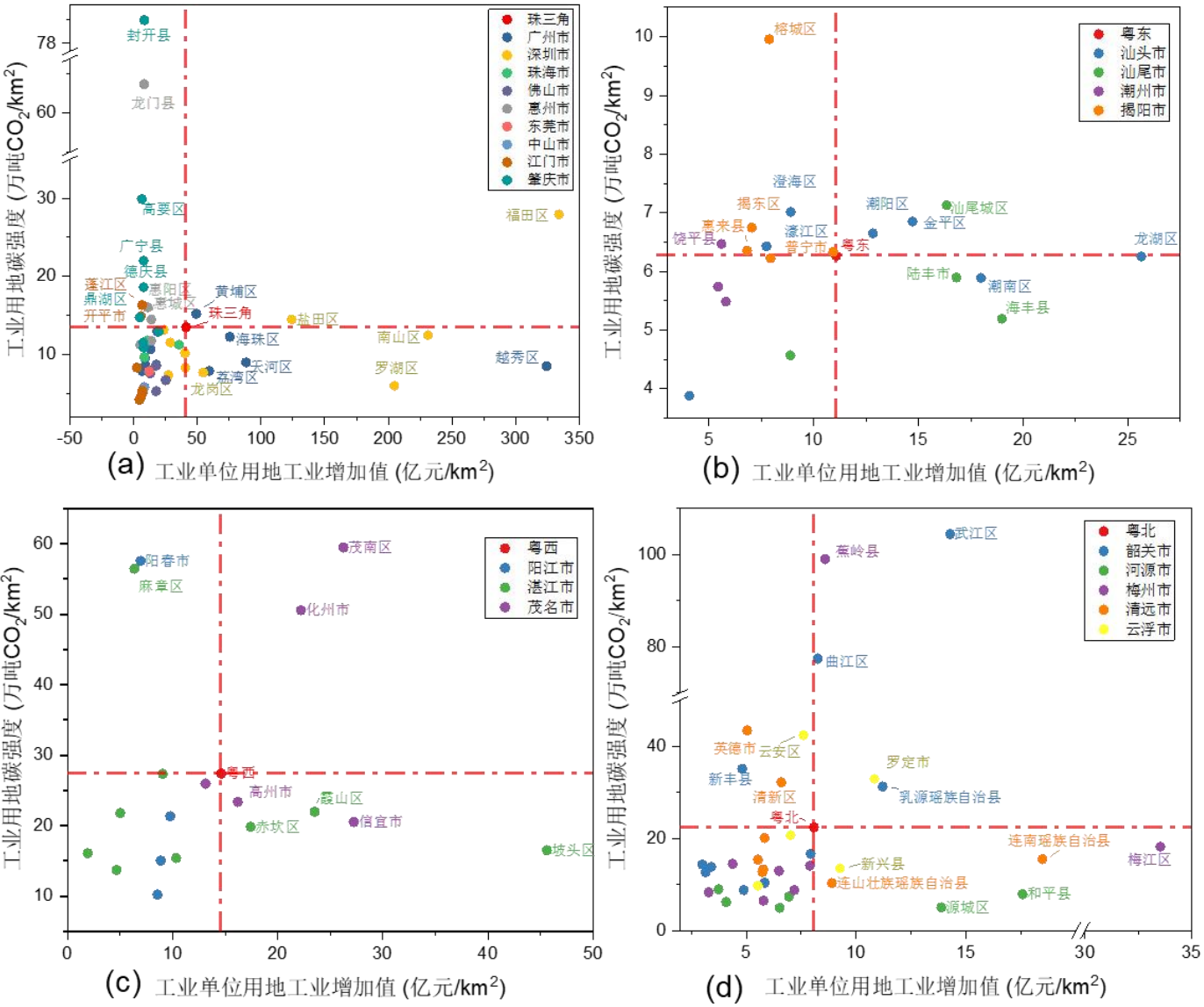


图 17 广东 2020 年工业用地碳排放强度与单位工业增加值值分布
(a)珠三角; (b)粤东; (c)粤西; (d)粤北)

3.3 道路交通运输用地碳排放强度关联特征

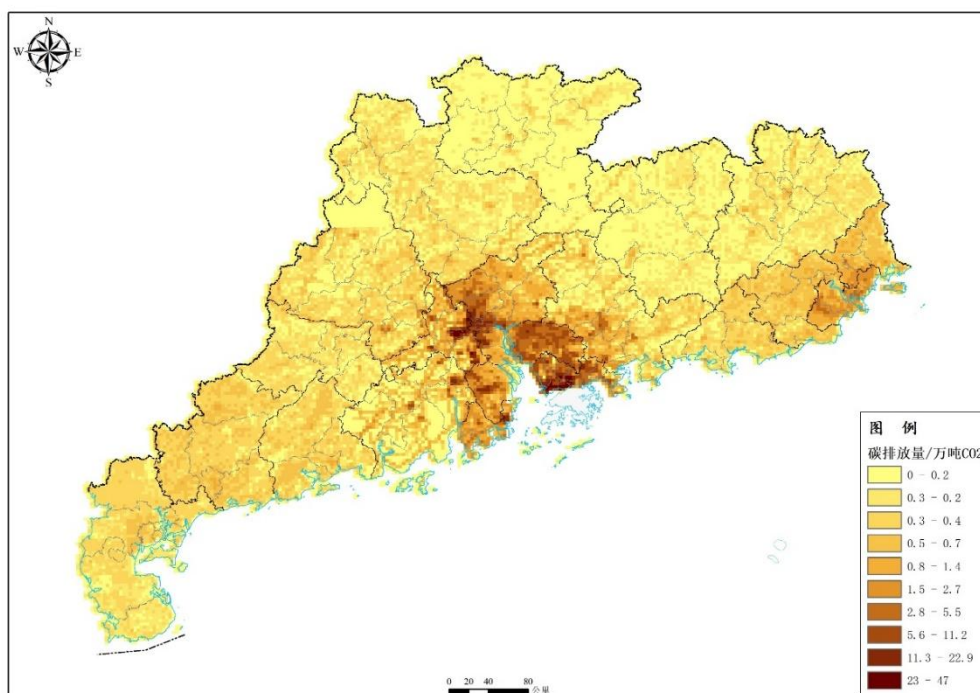


图 18 2020 年广东省路网碳排放空间分布（万吨 CO₂）

在道路交通运输方面，图 18 显示省内交通路网碳排放主要集中在环珠江口城市群，呈现以珠江口为核心向外围区域递减趋势，同时潮汕揭地区呈现区域排放次热点，道路交通结构优化潜力较大。图 19 可以看出，广佛、深莞、珠中都市圈碳排放强度显著高于其他地区，汕头是唯一排放强度处于全省前列的非珠三角城市；湛江、韶关、河源、梅州等城市的道路交通碳排放强度水平较低。

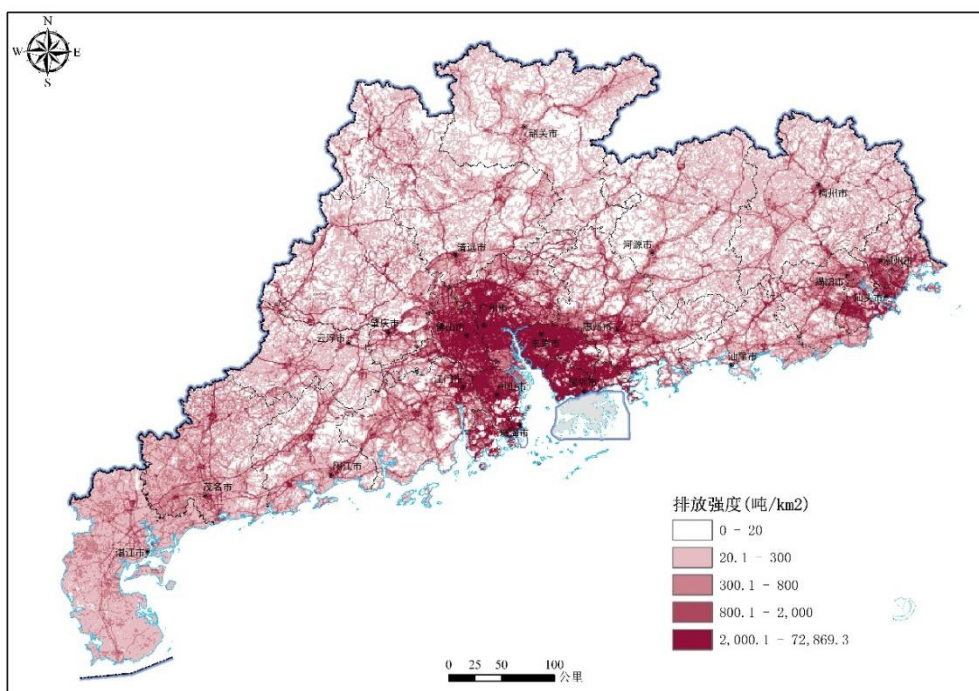


图 19 2020 年广东道路交通用地碳排放强度分布

3.4 居民生活用地碳排放强度关联特征

4.4.1 居民生活用地碳排放强度呈现环珠江口区域向外围递减趋势

对于居民生活领域，从图 20 可以看出环珠江口区域住宅用地碳排放强度显著高于外围区域，整体上呈现环珠江口区域向外围递减趋势，在粤东出现住宅用地碳排放强度次热点区域，粤西、粤北的区县总体与居民生活相关的住宅用地碳排放强度较低。对于居民生活住宅用地碳排放强度，深圳的福田区、宝安区、罗湖区和广州的越秀区、天河区、海珠区的强度均处于省内的高值水平，河源的东源县、龙川县、紫金县和云浮的云安区的强度则处于省内的低值水平。

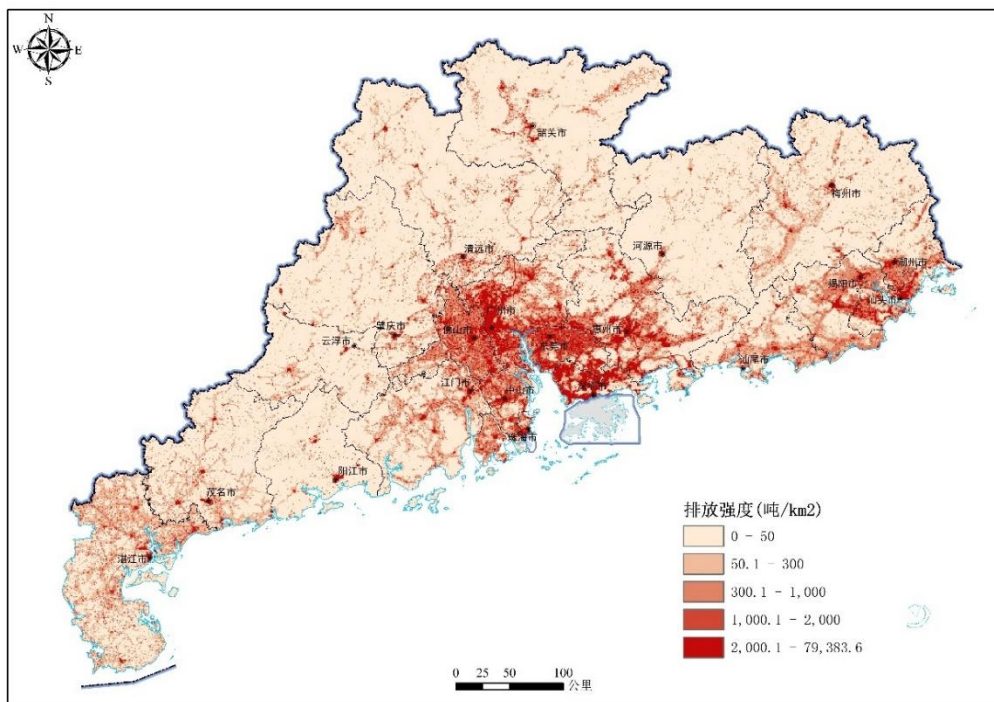


图 20 2020 年广东居民生活用地碳排放强度分布

通过图 21 和图 22 进一步细分来看：在城镇居民生活方面，城镇住宅用地碳排放强度高值区集中在深圳和广州，惠州惠城区、汕头金平区、东莞和佛山禅城区的城镇住宅用地碳排放强度也处于较高水平，而河源东源县、湛江徐闻县、麻章区、雷州市、云浮云安区、韶关仁化县等地的城镇住宅用地碳排放强度则在省内低位；在农村居民生活方面，农村宅基地碳排放强度最高值分布在珠海金湾区、广州白云区、番禺区、花都区、佛山三水区等地，而广州越秀区、天河区、荔湾区、海珠区、深圳全域、佛山禅城区、珠海香洲区、江门江海区、肇庆端州区、湛江赤坎区则由于完成了城镇化，认为以上区域没有农村居民生活碳排放。

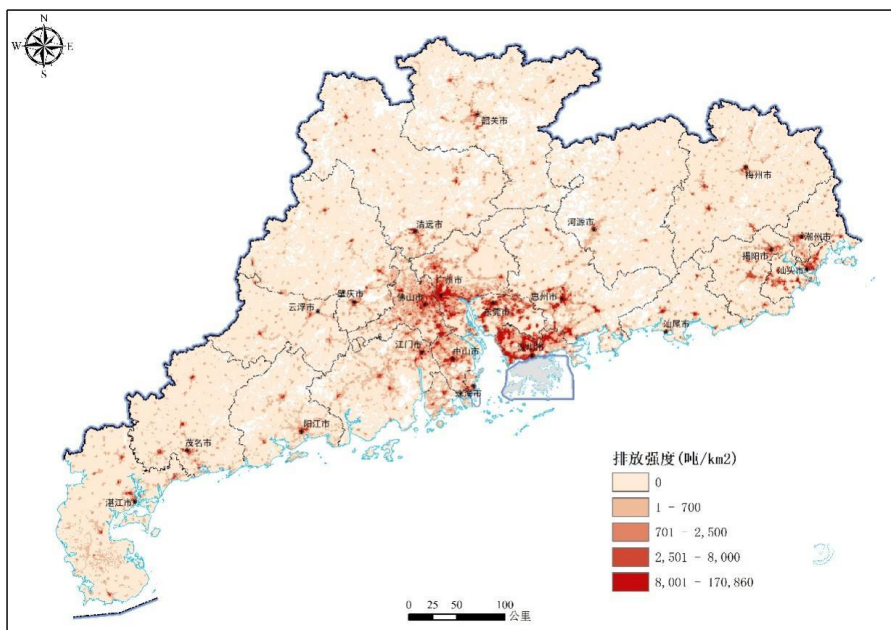


图 21 2020 年广东城镇居民生活用地碳排放强度分布

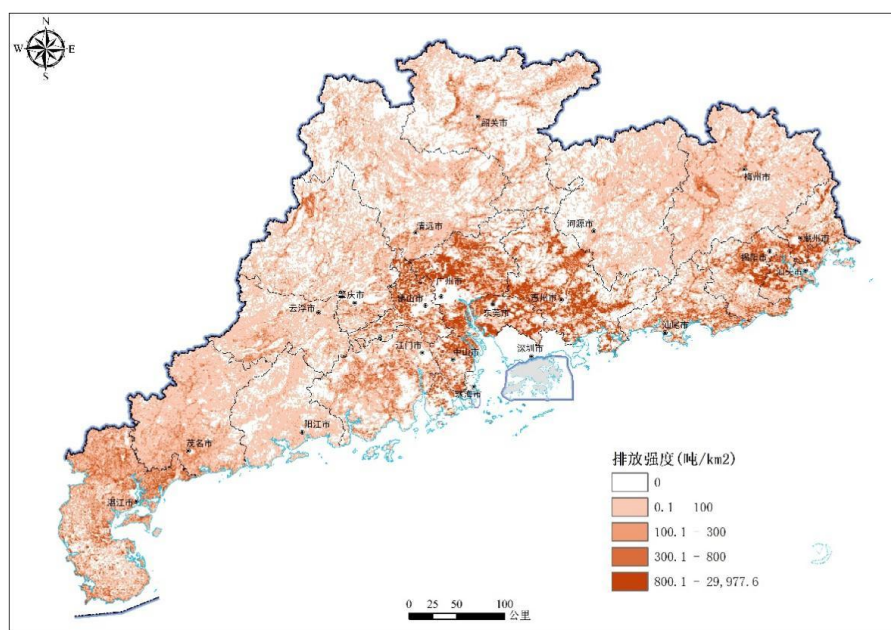


图 22 2020 年广东农村居民生活用地碳排放强度分布

3.4.2 居民生活住宅用地碳排放强度随城镇化率提高而升高

首先通过对城镇化率与居民生活的主要载体住宅用地碳排放强度的分布情况（图 23）进行分析可以发现，随着城镇化率的上升，省内城市碳排放强度总体也呈现上升趋势。江门、汕头的城镇化率高

于全省平均水平，而住宅用地碳排放强度低于平均水平；大部分粤东、粤西、粤北地区的城市城镇化率较低，同时住宅用地碳排放强度较高，具有较大管控潜势。

进一步将城镇住宅用地碳排放强度与农村宅基地结合来看，如图 23 所示，随着城镇住宅用地碳排放强度的上升，农村宅基地的住宅用地碳排放强度也会上升。其中，韶关的农村宅基地碳排放强度显著高于其他城市，而湛江的农村宅基地碳排放强度显著低于其他城市。此外，深圳的主要行政区域均已完成城镇化，农村宅基地仅涉及深汕特别合作区故仍有少量农村居民生活碳排放产生。

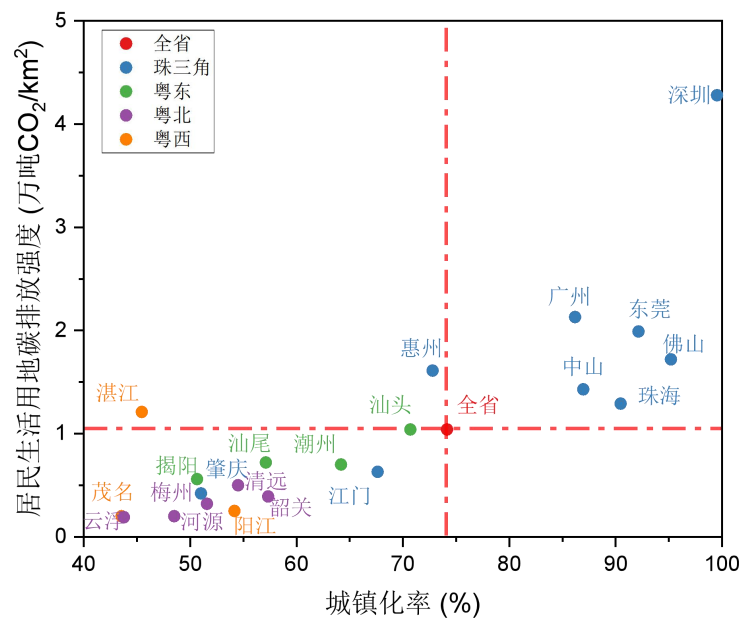


图 23 2020 年广东居民生活用地碳排放强度与城镇化率分布

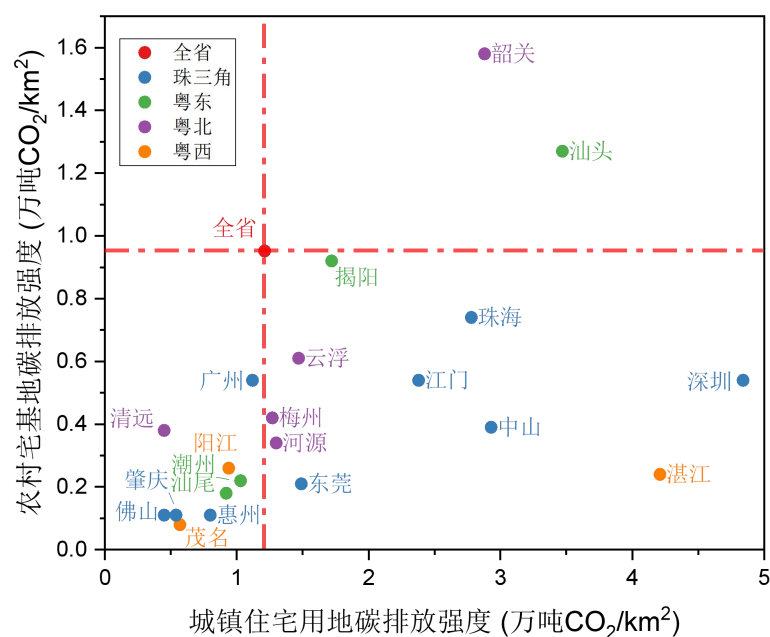


图 24 2020 年广东城乡居民生活用地碳排放强度分布

在珠三角地区（图 25(a)），总体呈现随着城镇住宅用地碳排放强度的增加，农村宅基地碳排放强度呈降低趋势。由于深圳的主要行政区、广州的核心城区以及佛山禅城区均已完成城镇化，故认为其没有农村居民生活碳排放，同时其城镇住宅用地碳排放强度也均高于珠三角区域均值。广州白云区、番禺区、珠海金湾区、斗门区、惠州惠城区的农村宅基地碳排放强度均高于城镇住宅用地碳排放强度，城乡住宅用地结构具有一定优化空间。

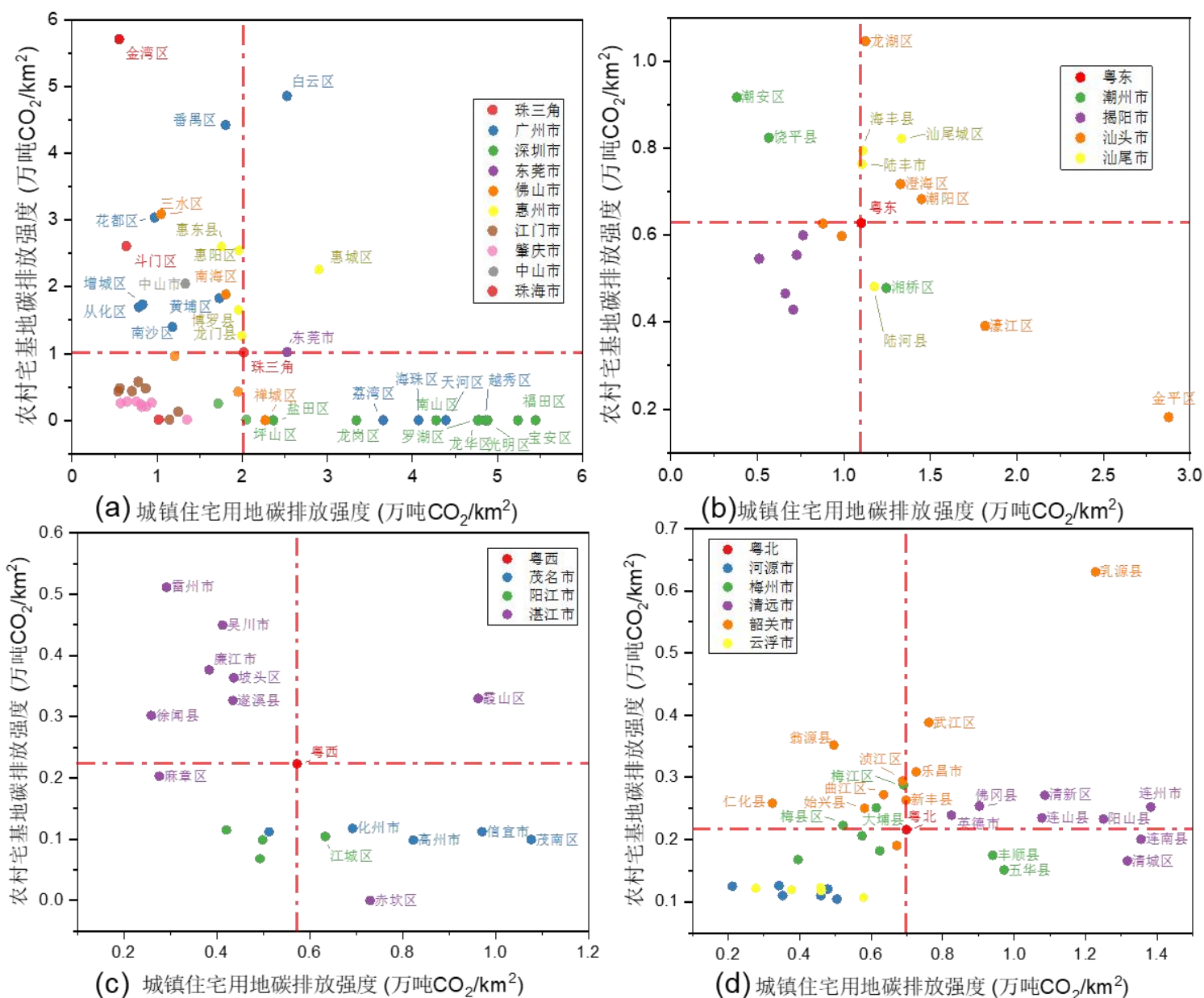


图 25 广东省 2020 年城乡居民生活用地碳排放强度分布

(a)珠三角; (b)粤东; (c)粤西; (d)粤北)

如图 25(b)和(c)所示, 东西两翼基本也呈现出随着城镇住宅用地碳排放强度的增加, 农村宅基地碳排放强度呈降低的趋势。湛江的霞山区的城乡住宅用地碳排放强度均在粤西的平均水平之上, 城乡住宅用地结构具有较大的优化空间。而从图 25(d)来看, 粤北地区城镇住宅用地碳排放强度的增加, 农村宅基地碳排放强度呈降低的趋势并不

明显，同时韶关乳源县的农村住宅用地碳排放强度明显高于区域其他县区，具有较大的管控和优化潜力。

3.5 服务业用地碳排放强度关联特征

3.5.1 服务业用地碳排放强度在环珠江口区域出现区域热点

在服务业领域，如图 26 所示，省内服务业用地碳排放强度最高值的区县集中在广州、深圳，呈现出环珠江口城市群服务业碳排放强度向外围区域降低的趋势，其中，广州、深圳、东莞、汕头、河源、佛山等地服务业碳排放强度较高，阳江、云浮、韶关、梅州等地服务业碳排放强度较低。进一步从图 27 来看，仓储物流用地碳排放呈现外围城市碳排放强度总体高于环珠江口城市群的趋势，其中由于粤北区县物流仓储用地面积占比较小，尽管其碳排放量较低，但也造成粤北整体物流仓储用地碳排放强度高于省内其他地区；其他服务业（商业服务业、公共管理和公共服务业）的用地碳排放强度分布特征则与服务业总用地碳排放强度分布相近，尽管区域、区县之间差异较大，总体呈现珠三角城市群平均强度高于粤东西北的特征，且在珠三角内部区县间的分布水平也存在较大差异，强度高值主要分布在广州、深圳、佛山等珠三角城市主要城区。

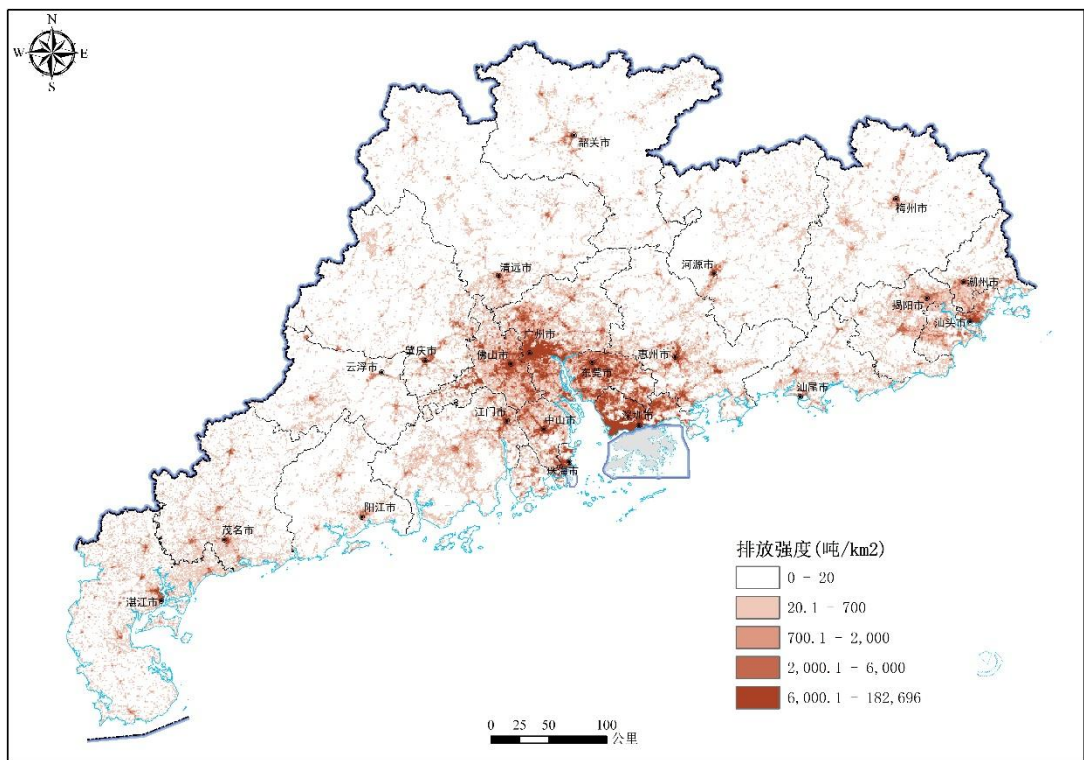


图 26 2020 年广东商业服务业、公共管理及公共服务业用地碳排放强度分布

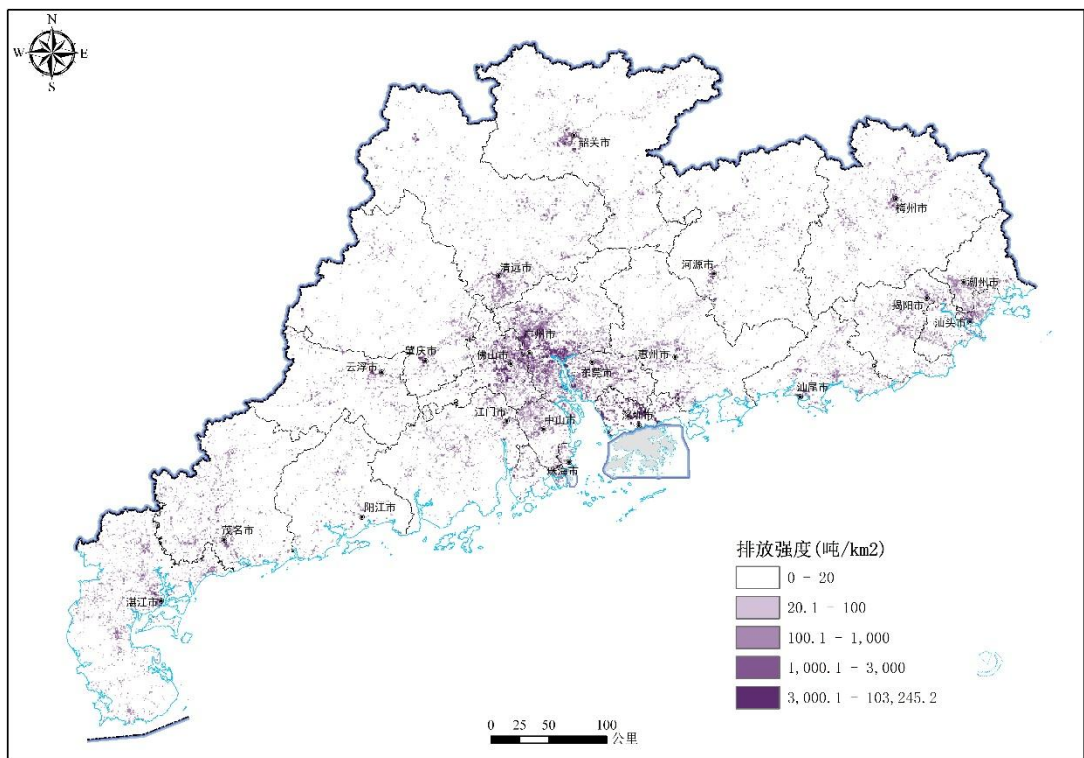


图 27 2020 年广东物流仓储业用地碳排放强度分布

3.5.2 服务业占比地区生产总值比例对商服和公服用地碳排放强度影响显著

如图 28 所示，将服务业用地碳排放强度和服务业占地区生产总值比例分布情况结合来看，随着服务业占比地区生产总值比例的提升，服务业用地碳排放强度总体也呈上升趋势。广州服务业占地区生产总值比例全省最高，但其服务业用地碳排放强度明显低于深圳，表明广州服务业用地的绿色发展水平在省内处于领先水平。东莞、佛山等珠三角城市第三产业占地区生产总值的比例低于全省平均水平，但其服务业用地碳排放强度高于或接近全省均值，服务业低碳发展水平具有较大提升空间。

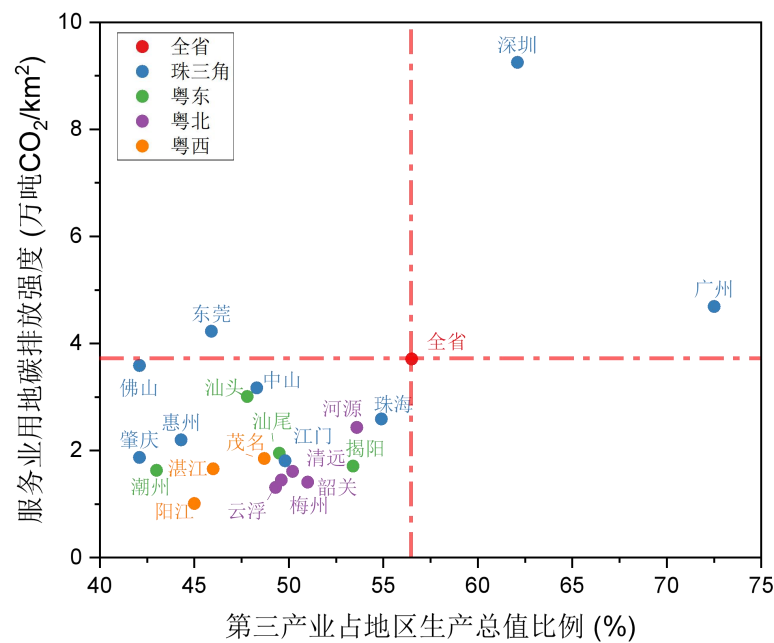


图 28 2020 年广东省服务业用地碳排放强度和服务业占地区生产总值比例分布

3.6 农业、建筑业用地等地类碳排放强度关联特征

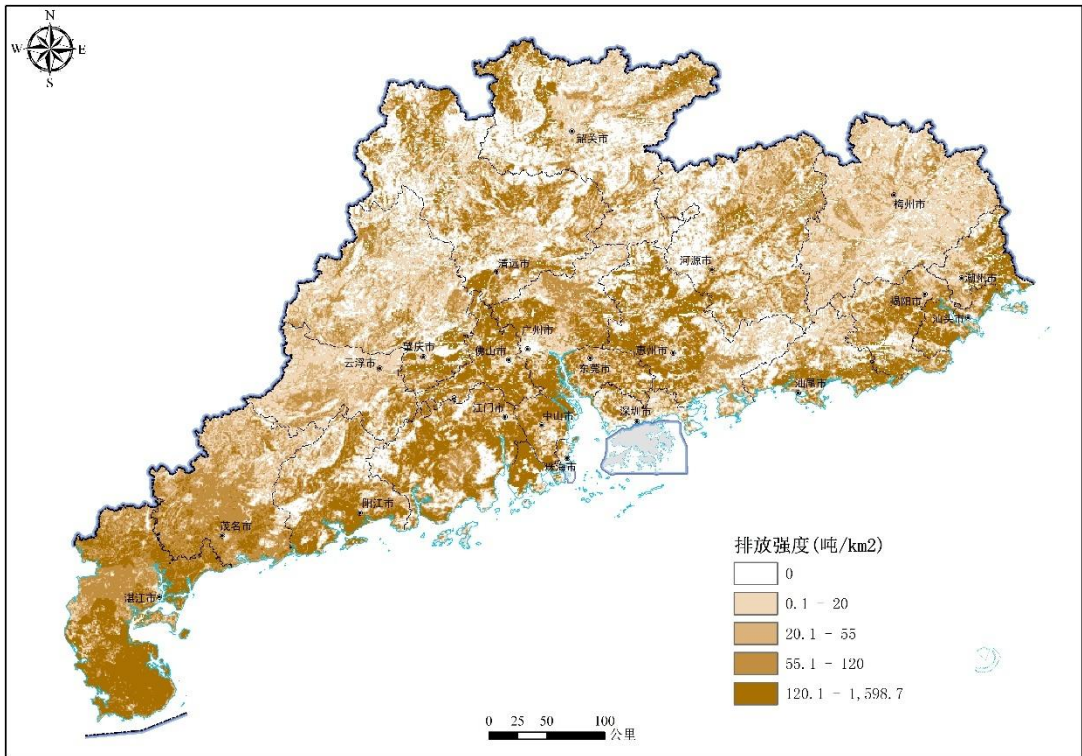


图 29 2020 年广东农业用地碳排放强度分布

对于农用地，全省农用地碳排放强度明显小于其他主要领域，从图 29 可以发现，珠三角的农用地碳排放强度空间分布差异大，深圳、珠海、佛山、惠州等核心城市出现农用地碳排放高值的原因主要是由于珠三角城市中心区农业用地面积非常小造成的；粤东地区农用地排放强度最高的区县分布在汕头和揭阳；粤西、粤北地区用地排放强度较低。除了广州越秀区无农业经济活动，故判定其没有农业碳排放外，粤北的韶关、云浮、梅州农业用地碳排放强度在省内处于低值水平。

在建筑业方面，广州市建筑业碳排放量最大，建筑业企业建筑施工面积远高于省内其他地市，因此如图 30 所示，广州市中心城区建筑业碳排放强度在省内处于高值水平，粤西的茂名、湛江和粤北的梅

州的建筑业碳排放强度紧随其后，也处于较高水平，粤东的汕尾、揭阳和粤西的阳江建筑业碳排放强度较低，所在城市的建筑业企业建筑施工面在省内也处于较低水平。

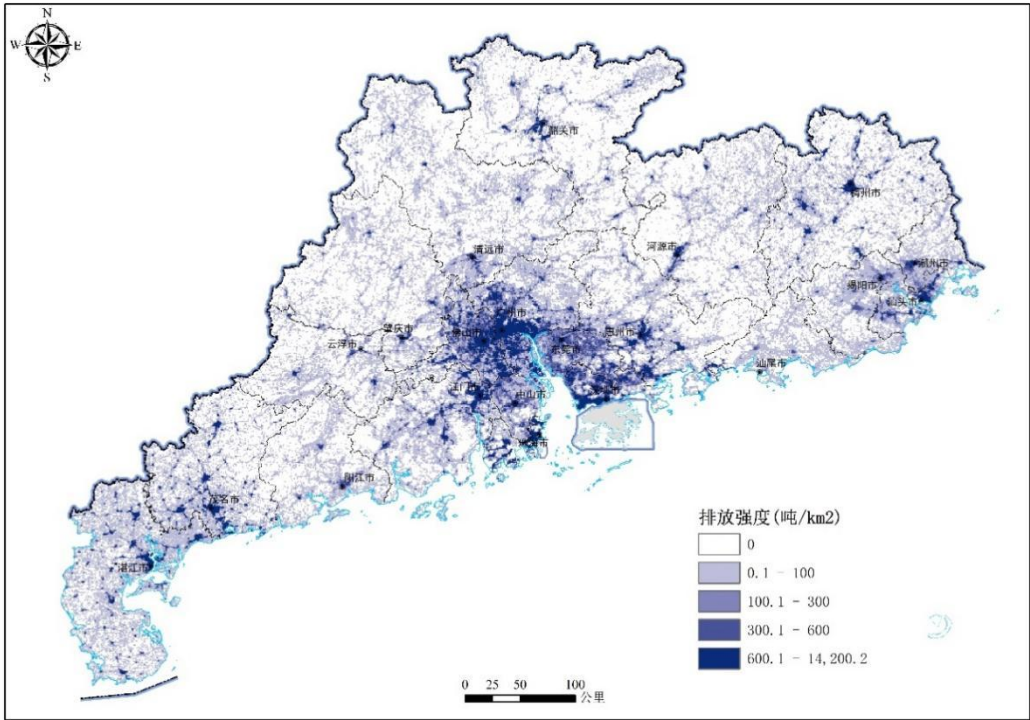


图 30 2020 年广东建筑业用地碳排放强度分布

3.7 广东不同用地类型碳排放强度略高于国内其他地区

与全国水平相比，广东省各用地类型碳排放强度较国内水平略微偏高（图 31），其中工业用地、交通运输用地（公路）碳排放强度明显高于全国平均水平。商服、公服用地、城镇住宅用地、农业建设用碳排放强度低于国内平均水平，表明广东省在城市低碳化和现代工业化领先于国内水平。在农村建设用地方面，碳排放强度稍高于国内平均水平。

同时，目前国内对土地利用排放强度因子研究仍大多停留在耕地、园地、林地、草地、水域和未利用地等宏观尺度，对细类建设用地碳

排放强度本地水平研究不足，针对各地地类用地碳排放强度因子研究有待深入开展。

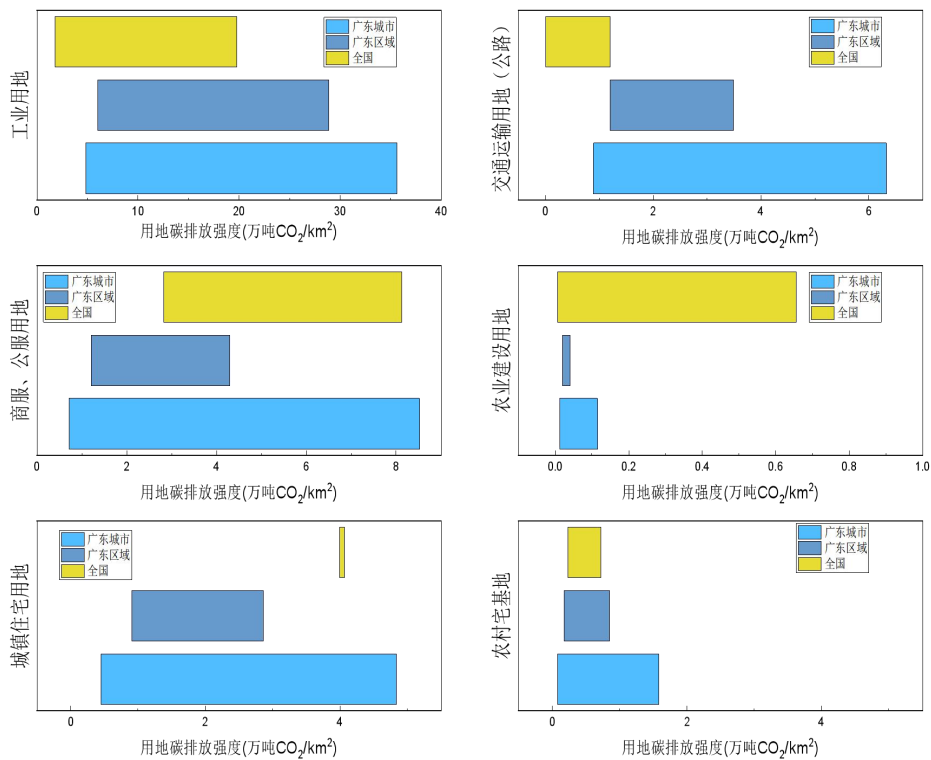


图 31 广东各地类用地碳排放强度与国内对比情况

第四章 典型行业“用地-碳排放”耦合关联分析

4.1 典型行业工业用地数据 POI (Point of Interest)

工业源碳排放数据主要通过研究团队近年来对省内主要行业企业开展的现场调查及大气污染源排放研究基础中获得，包括水泥、玻璃、火电、化工、纺织、钢铁、有色、陶瓷、汽车制造等碳排放重点行业。研究团队整理分析了大量典型规模以上企业能耗及生产活动水平基础数据，形成了覆盖广东省内超 500 余行业，样本容量接近 2 万条的本地工业源重点企业排放清单数据库，能够较好的反映省内大中型企业碳排放水平。由于将收集的企业经纬度落图后，部分企业坐标存在偏移问题，因此结合在线地图 POI 数据对经纬度进行校核配准，POI 数据校核流程如下，流程图如图 32 所示。

将得到的碳排放原始数据集根据各个企业的经纬度坐标在 GIS 中叠图分析，与区县矢量数据叠加核实区县属性是否正确，将区县属性不匹配的工业点源筛出进行校正，按照百度 POI 数据校正后再次按经纬度落图与区县矢量数据校核，叠加后大部分经纬度匹配正确，仍然不匹配的少数工业源按照剔除处理。最后将 POI 数据修正过的数据集落图与工业地块叠加，发现有部分工业源落在地块外围，按照就近原则将工业源关联到就近地块，建立工业源与地块的关联关系。

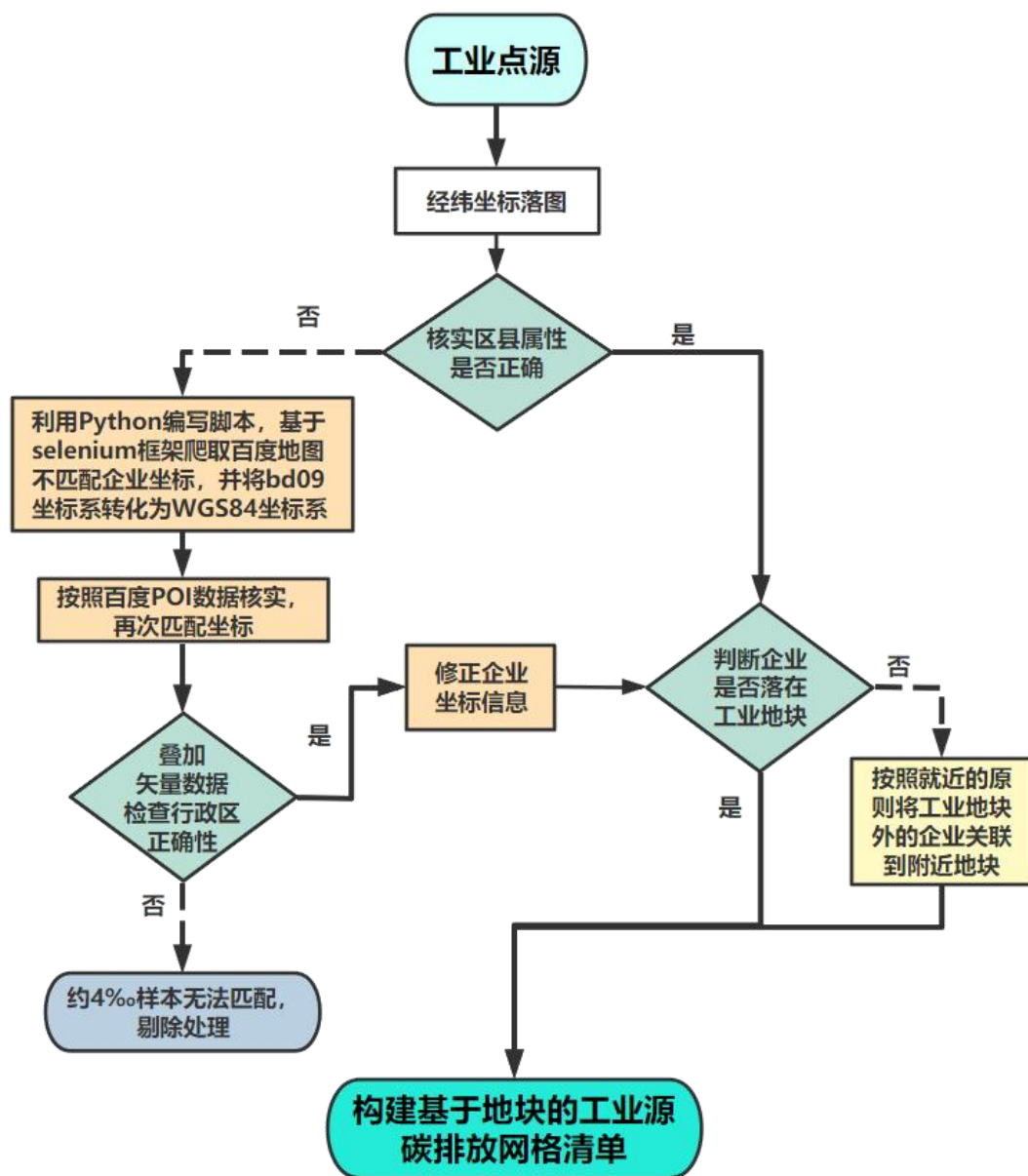


图 32 工业行业用地碳排放强度技术路线

将 POI 标点与企业行业信息对应, 然后分行业与工业地类进行对应, 分行业、分企业与 M1、M2、M3 工业用地类型进行关联对应, 进一步聚合汇总为工业用地大类网格结果, 通过与土地利用数据比对应, 最终得到工业用地碳排放网格清单。由于现行《城市用地分类与规划建设用地标准》(GB 50137-2011) 仅基于基本无污染、对环境有一定干扰和污染、对环境有严重干扰和污染的工业用地将工业用地

分为一类（M1）、二类（M2）和三类（M3）工业用地，并未对囊括行业进行详细划分，如表 1 所示，本研究参考相关课题研究成果^[6]，对调查企业样本的行业进行分类并与工业用地类型进行对应。

表 1 工业用地行业分类

工业地类	行业代码	行业名称
M1	38	电气机械和器材制造业
	39	计算机、通信和其他电子设备制造业
	40	仪器仪表制造业
	41	其他制造业
M2	13	农副食品加工业
	14	食品制造业
	15	酒、饮料和精制茶制造业
	16	烟草制品业
	17	纺织业
	18	纺织服装、服饰业
	20	木材加工和木、竹、藤、棕、草制品业
	21	家具制造业
	23	印刷和记录媒介复制业
	24	文教、工美、体育和娱乐用品制造业
	27	医药制造业
	29	橡胶和塑料制品业
	33	金属制品业
	34	通用设备制造业
	35	专用设备制造业
	36	汽车制造业
	37	铁路、船舶、航空航天和其他运输设
	42	废弃资源综合利用业
	43	金属制品、机械和设备修理业
	44	电力、热力生产和供应业
	45	燃气生产和供应业
	46	水的生产和供应业
	42	废弃资源综合利用业
	43	金属制品、机械和设备修理业
	44	电力、热力生产和供应业
	45	燃气生产和供应业
	46	水的生产和供应业
	19	皮革、毛皮、羽毛及其制品和制鞋业

M3	7	石油和天然气开采业
	8	黑色金属矿采选业
	9	有色金属矿采选业
	10	非金属矿采选业
	11	开采专业及辅助性活动
	19	皮革、毛皮、羽毛及其制品和制鞋业
	22	造纸和纸制品业
	25	石油、煤炭及其他燃料加工业
	26	化学原料和化学制品制造业
	28	化学纤维制造业
	30	非金属矿物制品业
	31	黑色金属冶炼和压延加工业
	32	有色金属冶炼和压延加工业

4.2 典型行业点源碳排放网格清单

研究团队对收集整理的近 2 万个企业样本进行“自下而上”的排放核算后，获得的工业点源碳排放空间分布图如图 33 所示，样本落图后点位能较好反映省内主要重点工业源碳排放空间特征。为了解决样本点数与实际企业数量的样本容量偏差问题，研究团队通过对清单的企业样本及行业碳排放进行统计学分析，得到省内未被清单覆盖的工业地块所分布的工业行业、企业的碳排放平均水平，并基于此“自下而上”核算出全省各县区、地市的工业源碳排放水平。

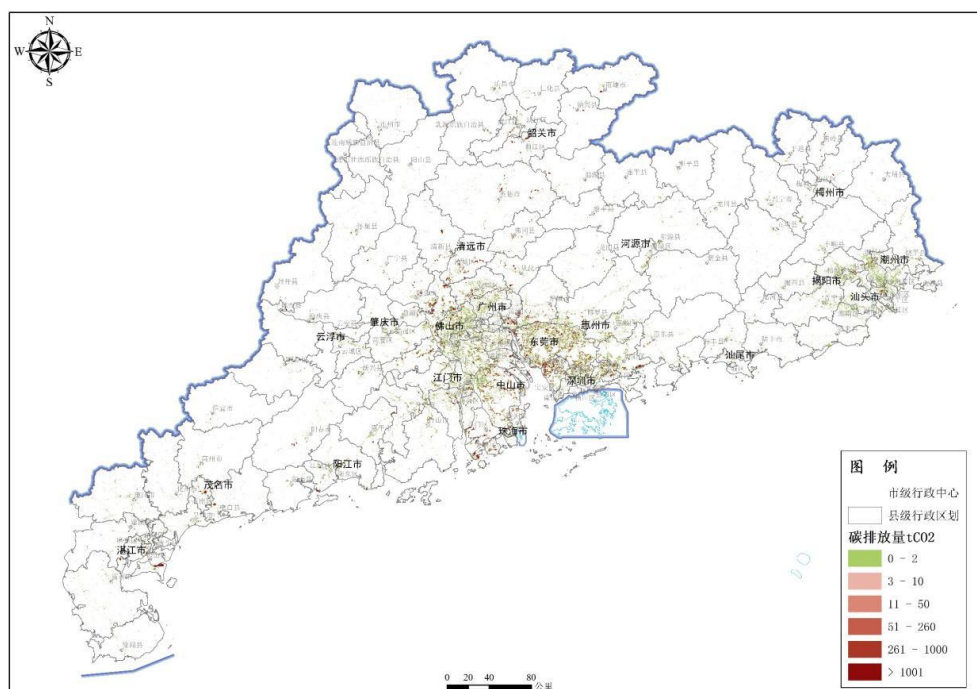


图 33 工业点源碳排放空间分布

从城市工业碳排放水平来看，深圳市规模以上工业总产值位居全省第一，但工业碳排放却不在省内前列，表明深圳工业产业结构绿色高质量转型发展进程走在全省前列；广州、佛山、东莞、惠州等珠三角城市工业领域碳排放居省内高值，但排名与规模以上工业总产值排名水平基本一致，表明以上城市工业产业结构仍有一定提质优化空间；以及湛江、茂名、韶关、清远等工业结构偏重的粤东西北城市碳排放总量处于省内较高水平，高碳排放和较低的规模以上工业总产值表明以上城市工业发展仍处于较为粗放阶段，利用国土空间规划和管控措施引导产业结构升级和淘汰落后抵消产能的潜力较大。

4.3 广东“两高”行业用地碳排放强度显著高于其他行业企业

依据《广东省发展改革委关于印发<广东省“两高”项目管理目录（2022年版）>的通知》（粤发改能源函〔2022〕1363号）煤电、

石化、焦化、煤化工、化工、钢铁、有色金属、建材等行业被列入“两高”项目管理目录（以下简称“目录”，如图 34 所示，对被列入目录和未列入目录的企业样本进行“两高”和“非两高”行业分类分析后发现：“两高”行业企业用地碳排放强度的中位数和均值是“非两高”行业企业单位用地碳排放强度中位数和均值的 4.1 倍和 3.4 倍。“两高”行业企业样本分布呈现出明显的右偏趋势，各行业、企业间用地碳排放强度水平差异巨大；尽管“非两高”行业的样本分布也呈现右偏趋势，但其用地碳排放强度比较“两高”行业表现得更为集中，行业、企业间的差异也相对较小。

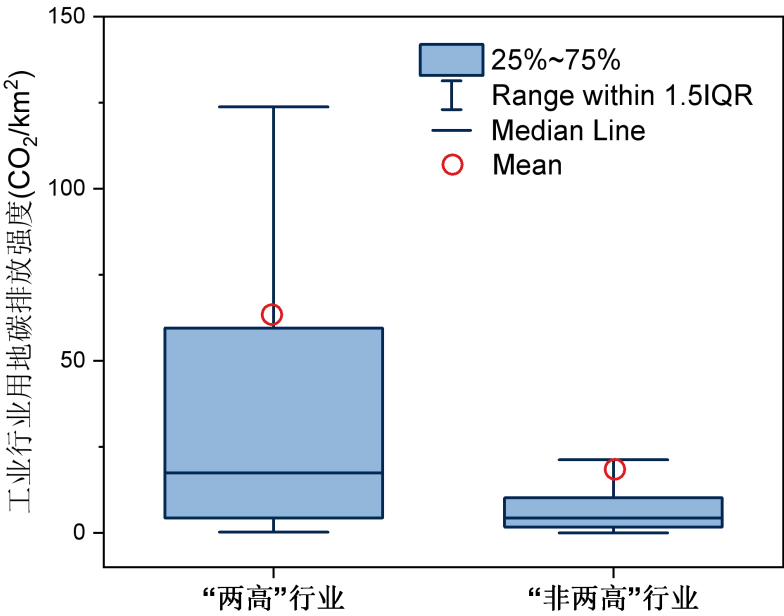


图 34 2020 年广东“两高”和“非两高”行业用地碳排放强度分布

4.4 典型行业工业用地碳排放强度均值呈现 $M3 > M1 > M2$ 特征

为更好的将工业行业用地碳排放情况与省内工业用地结构进行衔接，图 35 对根据工业用地类型进行分类后的调研企业样本进行进一步的分析。结果显示，广东省呈现出 $M3$ 企业用地平均排放强度显

著高于 M1 企业均值,但 M1 企业均值均略高于 M2 企业均值的特征。现有用地分类和用地标准对工业用地类型分类仅定性从是否对居住和公共设施等环境产生影响进行划分,未能科学精准识别行业节能降碳潜力,不足以推动广东工业用地的绿色集约利用和优化配置,对推动工业领域绿色低碳转型和高质量发展的支撑力度有待提升。

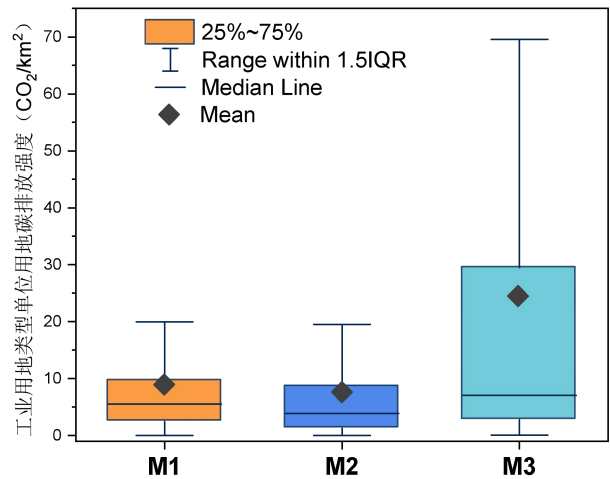


图 35 工业用地类型单位用地碳排放强度分布

4.5 产业结构升级有助于降低工业用地碳排放强度，工业用地分类标准和管控措施仍有完善空间

将省内典型工业企业调研数据按照行业进行整合后,结合工业行业单位用地工业增加值和工业典型行业用地碳排放强度来看(图 36),省内工业行业的用地碳排放强度总体呈现随着行业用地单位工业增加值的升高而降低的趋势,表明随着推动制造业的高质量发展,工业用地碳排放强度能够得到降低,工业的总体绿色发展水平能够得到提升。有色金属矿采选业的用地碳排放强度明显高于同水平地均工业增加值行业的强度水平,作为对居住和公共设施等环境有严重干扰的 M3 行业,对有关企业的管控水平仍要继续加强。此外,电力行业、

运输设备制造业、汽车制造业等 M2 行业以及电子设备制造业等 M1 行业相对比同等用地工业增加值的行业，均具有较高的用地碳排放强度，一方面表明对有关行业企业的节能提质增效管控工作仍有一定潜力，另一方面也反映了现有对于工业用地的分类标准并不能够反映行业的碳排放效率，与构建有利于碳达峰、碳中和的国土空间格局的要求存在脱节。

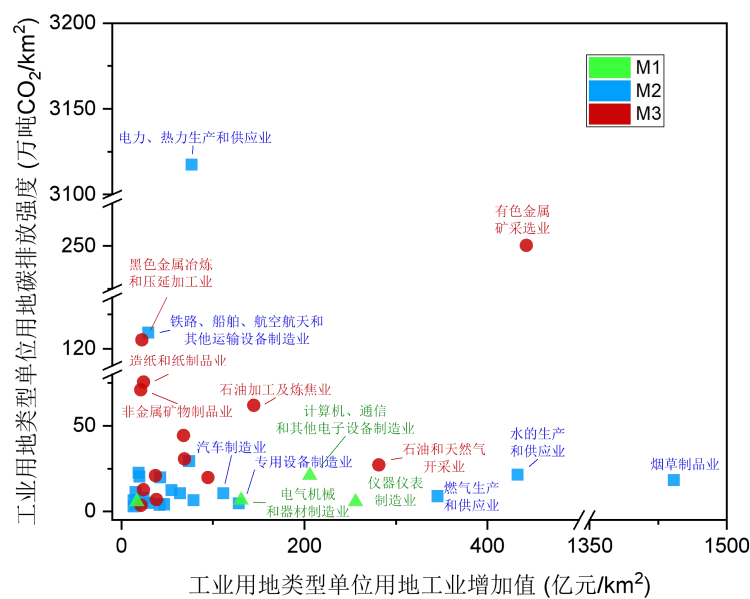


图 36 工业行业用地单位碳排放和工业增加值分布

结合工业行业用地碳排放强度与工业行业能源消费总量（图 37）来看，电子设备制造业虽然处于 M1 行业，但是其能源消耗总量与典型 M3 高耗能行业不相伯仲，且其行业用地碳排放强度亦高于平均水平；归类为 M2 行业的电力行业和运输设备制造业的行业用地碳排放强度显著高于同能源消费水平行业，相关行业企业用地结构具有一定的调整空间；此外，M3 行业总体呈现高能源消耗水平和高用地碳排放强度，表明行业能效水平和用地结构的提升和管控潜力较大。

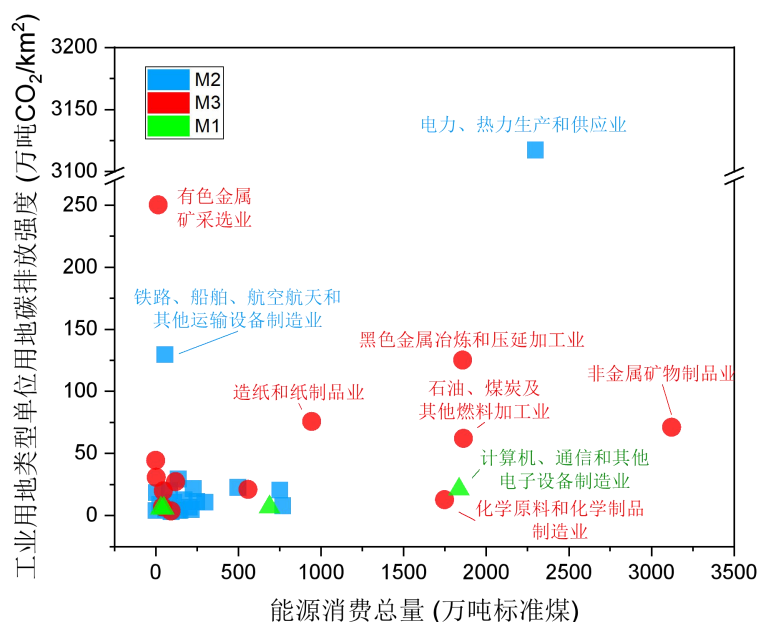


图 37 工业行业用地单位碳排放和行业能源消费总量分布

4.6 省内重点行业企业单位用地碳生产力水平差异较大

同一行业的不同企业由于生产资料水平、厂区占地、产品产能等生产要素的差异，土地利用效率有所不同。从上文分析可以发现，行业企业用地碳排放强度可提供工业用地碳排放强度水平及区域、行业差异等相关参考信息，但单一指标无法客观对企业用地、碳排放和产出效率进行综合评价。因此，研究团队创新性的在土地利用碳排放强度分析基础上增加对经济指标的考量，引入工业企业单位用地碳生产力的概念，计算公式如下：

$$\text{单位用地碳生产力} = \frac{\text{企业碳排放}}{\text{企业占地面积}} \div \text{企业生产总值} \quad (1)$$

计算企业的单位用地碳生产力能够将“生产产出-生产碳排放-生产用地”等与企业土地利用碳排放情况直接关联的三项指标进行关联，从单位用地的碳强度的角度综合考虑企业用地的碳排放和产出效率。同时，也能够更综合地考虑企业用地的经济效益和碳排放，为企业和行业的用地管控提供较全面的参考。

研究团队选取清单中年碳排放 5000 吨以上的重点行业企业，尤其是钢铁、石化化工、水泥、陶瓷、造纸等高耗能行业的数据样本进行分析，结果如图 38 所示，本研究将不同行业单位用地产出碳排放前 20%高值作为判断行业企业用地碳生产力水平的指示值：当企业单位产值用地碳排放超过划定指示值时，认为企业的用地碳生产力水平低，若企业的单位用地产出碳排放低于指示值，则认为企业的用地碳生产力在合理区间。其中，钢铁、石化化工、水泥、陶瓷、造纸等重点行业企业的用地碳生产力水平的建议指示值分布在 26~240 吨 CO₂/(万元·km²)。

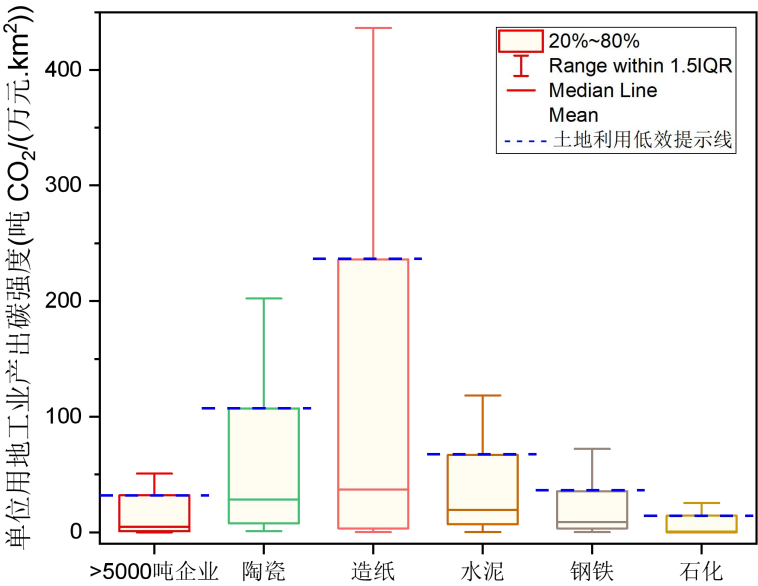


图 38 典型行业土地利用效率分布

第五章 广东省土地利用绿色低碳发展水平评估

5.1 土地利用绿色低碳发展指数评估体系

为了体现“土地利用-经济活动-碳排放”之间相互作用的内在逻辑联系，探索将土地利用与“碳达峰碳中和”目标要求系统衔接的可行方法，研究团队参考了国内有关研究面向国土空间规划的低碳评价方法^{[11][12]}，设计了土地利用绿色低碳发展指数评估体系。评估体系涵盖了“土地开发现状”、“土地碳排放现状”和“土地经济活动现状”等三个一级指标和 20 个涉及碳排放、城市建设、人口、居民收入、交通、经济、产业等领域的二级指标，如表 2 所示，并初步对省内城市土地利用绿色低碳发展水平现状进行分析和评估。

表 2 土地利用绿色低碳发展指数评估指标

一级指标	二级指标	指标含义	单位	正负向	权重
土地开发现状	城市开发强度	城市建成区与城市行政区域总面积之比	%	-	3.8%
	城镇化率	城镇人口占总人口比重	%	+	4.3%
	机动车保有量	地区拥有车辆的数量	辆	+	6.8%
	人口密度	单位土地面积上的人口数量	万人/km ²	+	6.0%
	居民人均可支配收入	居民可以用来自由支配的收入，标志着居民的购买力	元/人	+	6.9%
	居民人均消费支出	居民用于满足家庭日常生活消费的全部支出，体现居民生活水平和质量	元/人	+	5.7%
土地碳排放现状	碳排放	城市居民生产活动产生二氧化碳排放	万吨	-	2.1%
	建设用地碳排放强度	单位建设用地承载人类活动产生的碳排放	万吨 CO ₂ /km ²	-	2.1%
	工业用地碳排放强度	单位工业用地承载工业生产产生的碳排放	万吨 CO ₂ /km ²	-	1.2%
	道路交通运输用地碳排放强度	单位道路交通用地承载交通运输活动产生的碳排放	万吨 CO ₂ /km ²	-	1.1%
	商服和公服用地碳排放强度	单位商服和公服用地承载服务业生	万吨	-	0.8%

	度	产活动产生的碳排放	CO ₂ /km ²		
	物流仓储用地碳排放强度	单位物流仓储用地承载物流仓储运输业活动产生的碳排放	万吨 CO ₂ /km ²	-	1.1%
	城镇住宅用地碳排放强度	单位城镇住宅用地承载城镇居民生活活动产生的碳排放	万吨 CO ₂ /km ²	-	1.3%
	农村宅基地碳排放强度	单位农村宅基地承载农村居民生活活动产生的碳排放	万吨 CO ₂ /km ²	-	1.0%
	农用地碳排放强度	单位农用地承载农业生产活动产生的碳排放	万吨 CO ₂ /km ²	-	1.1%
土地经济 活动现状	单位建设用地生产总值	单位建设用地经济活动的产出	亿元/km ²	+	8.7%
	地区生产总值	本地区一定时期内生产活动的最终成果	亿元	+	10.3%
	工业增加值	本地区工业生产活动的最终成果	亿元	+	10.1%
	先进制造业产值	本地区现代产业生产活动的产值	亿元	+	11.5%
	第三产业生产总值	本地区第三产业生产活动的产值	亿元	+	13.2%

由于指标涉及多领域、多量纲,通过对各项指标进行标准化处理,并利用熵权法对处理后的指标赋予客观权重,具体方法如下所示:

(1) 数据的标准化处理

由于指标中既有正向指标也有负向指标,对不同含义的正负向指标 X_{ij} 采用不同的标准化处理方式:

$$X_{ij} = \begin{cases} \frac{X_{ij} - \min\{X_{ij}\}}{\max\{X_{ij}\} - \min\{X_{ij}\}} & (i = 1, 2, \dots, n), X_{ij} \text{ 为正向指标} \\ \frac{\max\{X_{ij}\} - X_{ij}}{\max\{X_{ij}\} - \min\{X_{ij}\}} & (i = 1, 2, \dots, n), X_{ij} \text{ 为负向指标} \end{cases} \quad (2)$$

(2) 熵权法赋权重

以信息熵确定的权重适用于机理复杂、影响因子众多的评估指标体系,故本研究中指标权重的赋值选取熵权法进行处理:

计算第 i 个样本的第 j 项指标值占该指标的比重 P_{ij} :

$$P_{ij} = \frac{X_{ij}}{\sum_{i=1}^n X_{ij}}, (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m) \quad (3)$$

计算第 j 项指标的熵值 e_j :

$$e_j = -\frac{1}{\ln(n)} \times \sum_{i=1}^n P_{i,j} \times \ln(P_{i,j}), (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m) \quad (4)$$

计算信息熵冗余度 d_j :

$$d_j = 1 - e_j, (j = 1, 2, \dots, m) \quad (5)$$

计算各项指标的权重 w_j :

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^m d_j}, (j = 1, 2, \dots, m) \quad (6)$$

(3) 土地利用绿色低碳发展指数计算

计算各样本的综合得分 S_j :

$$S_j = \frac{\sum_{j=1}^m w_j \times X_{i,j}}{S_{max}} \times 100, (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m) \quad (7)$$

5.2 土地利用绿色低碳发展指标评估结果

通过对省内各地市的土地利用绿色低碳发展水平进行分析可以发现，深圳、广州、东莞、佛山、珠海是综合总分最高的五个城市，云浮、韶关、河源、梅州、阳江是综合得分最低的五个城市。从各一级指标来看，珠海、东莞、中山的在土地开发现状指标中表现突出；云浮、河源、梅州的土地碳排放指标得分最高；深圳、广州、佛山的土地经济活动水平得分最高。

综合可以看出，深圳、广州土地利用发展水平遥遥领先省内其他城市，绿色低碳高质量发展水平走在全省前列。同时，珠三角城市内部发展差异大，两极分化明显，惠州、中山、江门、肇庆应抓住新发展机遇，向深圳、广州等先进城市汲取城市发展经验，推动社会经济高质量转型发展。而对于粤东西北地区，尽管区域土地利用的碳排放水平总体较低，但其土地开发水平和土地经济活动水平均明显落后于

珠三角城市，大部分城市仍处于粗放发展阶段，城市、区域发展亟待结合区域发展定位提质增效。

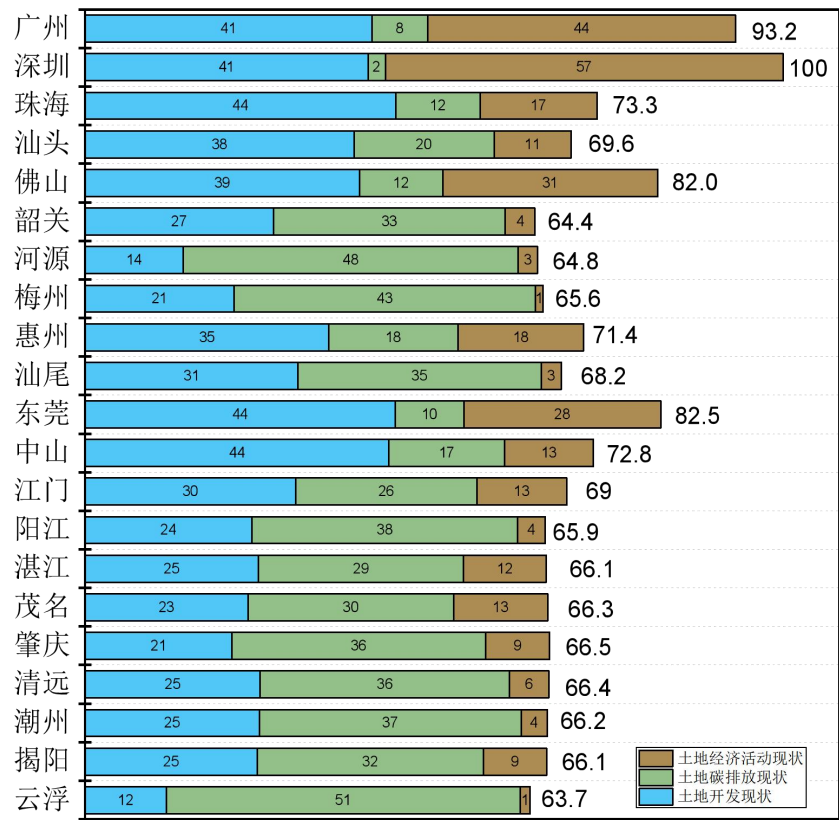


图 39 各城市土地利用绿色低碳发展指标评估结果

第六章 结论与建议

6.1 结论

面向“碳达峰碳中和”的目标要求，本研究以 2020 年为基准年，通过构建广东省 2020 年碳排放空间分布清单，将广东省能源活动产生的二氧化碳排放与国土用地结构进行关联，分别从纵向不同行政区划维度以及横向不同行业尺度对省内建设用地和细类用地的单位用地碳排放强度分布特征进行了研究，并将单位用地碳排放强度与经济、产业、人口等指标进行关联分析，并针对广东省典型工业企业的用地碳排放强度、单位用地碳排放的经济产出效率等指标开展了分析和研究。为了强化用地碳排放强度指标的应用性，本研究还构建了揭示了“土地开发利用-经济活动-碳排放”相互作用关系的土地利用绿色低碳发展评估体系，以广东各城市为例分析省内土地利用与“碳达峰碳中和”目标的系统发展水平。

本研究得到的空间分布清单、土地利用碳排放强度数据集和工业企业单位用地碳生产力效率指示值以及土地利用绿色低碳发展评估体系将有助于助力广东省省级和区域级国土管理部门识别土地利用碳排放的管控潜势，为广东省打造有利于实现碳达峰、碳中和目标的国土空间格局提供基础支撑。得到的主要结论包括：

广东省各级行政单元建设用地碳排放差异较大，省内发展不平衡、不协调情况明显。广东省 2020 年碳排放总体呈现出环珠江口核心城市圈向外围城市逐渐递减的趋势，工业仍然是省内最主要的二氧化碳人为排放源。珠三角和粤东西北地区的建设用地碳排放强度与现

有文献显示的江苏、福建、天津等省（市）的区域平均水平（1.5~4.3 万吨 CO₂/km²）相近；省内 21 个地市城市间建设用地碳排放强度分布差异较区域差异更为明显。

广东省建设用地碳排放强度与地区生产总值规模、现代产业规模等指标呈现倒“U”型曲线关系。省内城市的建设用地碳排放强度增幅随着地区生产总值和先进制造业增加值等衡量城市产业结构高端化发展水平的关联指标的增长而显著放缓，表明随着工业化、城镇化进程的推进，产业结构优化升级能够有效放缓由于城市发展需求客观造成的碳排放增长趋势，推动经济社会高质量绿色发展有助于积极稳妥推进碳达峰、碳中和目标实现。

广东省城市不同建设用地碳排放强度分布差异较大，建设用地类型对碳排放影响显著。产业结构和区域综合发展水平均处于领先水平的珠三角城市工业用地碳排放强度显著优于产业层次偏低、工业发展模式较粗放的粤西和粤北城市；而在道路交通、商业服务业和公共服务业、城乡居民生活等领域，珠三角城市的用地碳排放强度总体高于粤东西北地区。

广东省内不同工业行业的用地碳排放强度分布离散程度大，现行工业用地分类标准未能科学精准识别行业节能降碳潜力。“两高”行业企业用地碳排放强度平均水平是“非两高”企业均值的 3.4 倍，M1、M2、M3 行业用地碳排放强度均值呈现出 M3 企业用地碳排放强度均值 > M1 企业均值 > M2 企业均值的特征，表明现有用地分类和用地标准对工业用地类型分类缺乏具体可量化的分类标准，未能科学精准

识别行业节能降碳潜力，相关分类标准仍存在一定的完善空间。

广东省年碳排放 5000 吨以上企业单位用地碳生产力差异较大，钢铁、石化化工、水泥、陶瓷、造纸等重点行业企业的用地碳生产力水平的建议指示值分布在 26~240 吨 CO₂/(万元·km²)。为了综合反映重点工业行业“土地利用-经济活动-碳排放”之间的关系，本研究分析了年碳排放总量在 5000 吨以上企业的单位用地产出碳排放，将不同行业单位用地产出碳排放前 20%高值作为判断行业企业用地碳生产力水平的指示值：当企业单位产值用地碳排放超过划定指示值时，认为企业的用地碳生产力水平低，若企业的单位用地产出碳排放低于指示值，则认为企业的用地碳生产力在合理区间。

深圳、广州已初步形成有利于“碳达峰碳中和”的国土空间开发格局，土地利用绿色低碳发展水平全省领先。通过对各城市的土地利用绿色低碳发展水平进行综合评分，深圳、广州、东莞、佛山、珠海是评分前五位的城市，云浮、韶关、河源、梅州、阳江是后五位的城市。珠三角城市虽然总体发展水平优于粤东西北地区，但区域内部城市间两极分化明显，惠州、中山、江门、肇庆应积极抓住粤港澳大湾区发展机遇，推动经济社会早日实现绿色高质量发展转型；粤东西北城市的土地利用发展水平显著落后于珠三角地区，仍处于粗放发展阶段，国土空间规划助推区域、城市发展提质增效潜力大。

6.2 政策建议

《中共广东省委 广东省人民政府关于完整准确全面贯彻新发展理念推进碳达峰碳中和工作的实施意见》提出，要通过强化绿色低碳

发展规划引领，优化绿色低碳发展区域布局来推动经济社会发展全面绿色转型。为助力广东省加快构建有利于碳达峰、碳中和的国土空间开发保护新格局，本研究提出如下政策建议：

（1）开展建设用地碳排放评估，建立完善系统统筹碳达峰、碳中和目标要求的建设用地指标体系。针对不同用地类型、用地单元，开展面向碳达峰、碳中和的建设用地碳排放评估，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 $\text{CO}_2/（万元 \cdot \text{km}^2）$ ）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。通过建设用地奖惩制度，研究制定城市建设用地碳排放强度标准，引导城乡产业、居住、公共设施和基础设施等建设用地优化布局，促进节约集约用地、提高资源配置效率和产出效率。

（2）将工业重点行业碳达峰行动目标要求纳入工业用地“标准地”制度，分行业提出碳排放强度、用地碳生产力等指标数值和定义。依托工业用地“标准地”制度等土地供给侧改革措施的实施推广，在有条件的经济技术开发区、高新技术产业开发区、产业园区开展工业用地碳达峰、碳中和“标准地”供应试点建设。探索根据不同工业行业分类，在工业用地工地条件中额外设定碳强度、单位用地碳排放强度、单位用地碳生产力、用地节能降碳水平、减污降碳协同增效水平等指标，结合区域评估结果和规划要求，在试点区域内按照统筹降碳、减污、扩绿、增长目标要求的标准进行供应和监管的国有工业用地。

（3）开展工业用地分类标准的更新完善工作，探索定期开展重点工业行业企业用地碳生产力水平评估。探索在工业用地分类标准中

增加能耗和碳强度方面的分类依据，在现有分类基础上进一步细化工业用地分类，将工业行业在具体能耗指标、用地碳生产力等方面进行四级分类，推进节约集约用地，促进工业高质量发展。通过划定工业企业用地碳生产力指示值，坚决遏制用地碳生产力水平下的重点高耗能企业盲目发展，严格控制“两高”行业新增用地指标。支持工地碳生产力领跑企业高质量发展，鼓励领跑企业整合用地效率低的落后产能。

（4）将土地利用碳排放管控要求纳入“三线一单”减污降碳协同管控和重点行业建设项目碳排放环境影响评价等创新试点工作中，将碳达峰、碳中和要求逐步纳入生态环境分区管控要求。鼓励各级行政单元积极探索将土地利用碳排放效率相关“减污降碳协同增效”要求纳入生态环境“三线一单”分区管控体系的管理模式创新和应用场景创新。探索在重点行业建设项目碳排放环境影响评价试点工作中增加与土地利用碳排放效率相关评价指标，开展有关核算和水平分析方法研究，开展建设项目土地利用碳排放管控要求以及监管和管理对策相关研究，提高建设项目土地利用的绿色集约水平。

（5）构建国土空间碳核算体系，建立全国、省、市、县尺度的建设用碳排放强度数据库。开展高空间精度、多行业维度的基于国土空间开发利用的碳排放核算方法学和碳排放空间分布清单。以国土空间“一张图”为基础加强不同领域、部门碳排放数据与土地利用空间数据的交叉融合，通过多源数据的融合、多种方法的应用提高核算精度，强化研究成果的应用价值。

参考文献

- [1] 杜娟. “十三五”期间广东碳排放强度下降 22.35%[N]. 广州日报, 2021-09-21(A1).
- [2] 李晓江,何舸,罗彦,黄斐玫,牛宇琛,雷晓寒,刘菁,孙文勇.粤港澳大湾区碳排放空间特征与碳中和策略[J].城市规划学刊,2022(01):27-34.
- [3] 王伟,钟鸣,马焱. 基于土地利用变化的珠三角“碳中和”时空发展格局研究[C]//.面向高质量发展的空间治理——2021 中国城市规划年会论文集（05 城市规划新技术应用）,2021:138 147.
- [4] 杨国清,朱文锐,文雅,林英昌.20 年来广东省土地利用碳排放强度与效率空间分异研究[J].生态环境学报,2019,28(02):332-340.
- [5] 丁仲礼,张涛等. 《碳中和：逻辑体系与技术需求》[M].北京.科学出版社,2022.
- [6] 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.《国土空间用地结构对大气污染物与碳排放的影响研究》.北京.能源基金会.2021.
- [7] 张志飞,史敏琦,沈秀峰.基于碳排放视角的建设用地利用效率分析——以江苏省为例[J].江西农业学报,2022,34(03):231-239.
- [8] 常青,蔡为民.基于 EKC 检验及 Tapio 模型的建设用地规模和碳排放耦合关系研究——以天津市为例[J].农业与技术,2022,42(15):56-61.
- [9] 於冉,田思萌.基于承载关系的合肥市土地利用碳排放效应分析[J].安徽农业大学学报,2016,43(06):939-945.

- [10] 周萍,陈松林,李晶,李晨欣.福建省土地利用变化碳排放时空差异与碳补偿[J].水土保持通报,2022,42(03):356 365+372.
- [11] 张赫,胡佳慧,王睿,等. 面向国土空间规划的县域规划建设低碳评价方法研究 ——以河北省武安市为例[J]. 西部人居环境学刊,2021,36(6):23-30.
- [12] 杨大伟,康琦,何雅兰,等. 碳中和目标下的城市土地集约利用评价 ——基于 DPSIR 模型的西安市探索[J]. 国土资源科技管理,2022,39(1):69-80.
- [13] 赵新帅. “碳中和”目标约束下西安市城市用地碳平衡测算与影响因素分析[D].西北大学,2022.
- [14] 祝培甜,陈相利,张丽君,等. "双碳"目标下的土地利用碳平衡表编制初步探索[J]. 自然资源情报,2022(11):42-47.
- [15] 张茹倩,李鹏辉,徐丽萍. 城镇化对新疆土地利用碳排放的影响及其耦合关系[J]. 生态学报,2022,42(13):5226-5242.

免责声明

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

Disclaimer

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