

目次(卷终)

基于气象条件指数的我国重点区域 PM _{2.5} 和臭氧复合污染气象影响评估	杨欣, 杨元琴, 李红, 高健, 牛军捷, 储王辉, 刘世杰, 陈义珍, 何友江, 赵好希 (6433)
“2+26”城市 PM _{2.5} 与气象因子的尺度依存关系及影响因素分析	吴舒祺, 金团团, 郑冬阳, 顾杨吻, 赵文吉 (6441)
武汉军运会前后大气 PM _{2.5} 化学组分和来源	刘世豪, 孔少飞, 郑煌, 陈楠, 祝波, 祁士华 (6452)
2016~2020年邯郸市冬季 PM _{2.5} 污染特征与来源解析	牛红亚, 高娜娜, 鲍晓磊, 胡伟, 胡偲豪, 吴春苗, 马心怡, 纪晓腾, 樊景森, 王金喜 (6463)
渭南市冬季 PM _{2.5} 化学组成及来源解析	郭景宁, 李小飞, 余锋, 张蕊, 高月, 杨雯 (6474)
长三角城郊冬季 PM _{2.5} 中铵盐的形成过程及来源解析	项妍琨, 曹芳, 张雯洪, 范美益, 章炎麟 (6486)
上海城区硝基芳香族化合物的化学组成及特征分析	杨露, 马英歌, 郁建珍, 吴宇航, 乔利平, 周敏, 朱书慧, 黄成, 童张法 (6495)
吕梁市 PM _{2.5} 中多环芳烃的来源解析及健康风险评估	牟玲, 刘紫叶, 李杨勇, 李雪梅, 李晓帆, 刘添, 冯传阳, 姜辛 (6508)
广西背景大气中生物质燃烧对碳质气溶胶组成和吸光性的影响	吴星麒, 曹芳, 洪一航, 邢佳莉 (6518)
南京北郊大气棕碳吸光特性、来源及其季节变化特征	陈星州, 崔世杰, 张运江, 先久坤, 王镜雯, 汪俊峰, 盖鑫磊 (6529)
京津冀地区“煤改电”对 PM _{2.5} 污染的健康效益评估	张茹婷, 陈传敏, 刘松涛, 吴华成, 周卫青, 李朋 (6541)
基于化学损耗修正的青岛胶州市环境 VOCs 来源解析	孔翠丽, 吴雨彤, 顾瑶, 宋江邦, 孟赫, 石来元, 刘保双 (6551)
聊城市城区夏季 VOCs 污染特征及来源解析	李万勇, 黄浩瑜, 王艳振, 朱子博, 王一秋, 高艳珊, 彭娜娜, 伦小秀, 黄亮, 冯如帆, 菅月诚, 王强 (6564)
基于三维空气质量模型的淄博市臭氧及前体物来源解析	张馨心, 赵秀颖, 黄凌, 薛金, 卞锦婷, 王杨君, 李莉 (6576)
中国高温下臭氧抑制事件的时空特征及其影响因素	欧林冲, 陈伟华, 伍永康, 吴乐敏, 王雪梅 (6586)
基于无人机的城市大气颗粒物与臭氧污染探测与溯源研究进展	曲雅微, 王体健, 袁成, 吴昊 (6598)
京津冀地区机动车细颗粒物污染的健康影响分析	郝永佩, 宋晓伟, 宋晓东, 王京伟, 程鹏 (6610)
中国水泥行业通过 CCUS 技术的减排潜力评估	魏宁, 刘胜男, 魏凤, 李小春 (6621)
钢铁行业生命周期碳排放核算及减排潜力评估	宋晓璐, 杜帅, 邓陈宁, 谢明辉, 沈鹏, 赵慈, 陈忱, 刘晓宇 (6630)
珠江三角洲二氧化碳源汇演变特征及驱动因素	胡景心, 沙青娥, 刘慧琳, 张雪驰, 郑君瑜 (6643)
东莞市低碳路径下加速电气化对 CO ₂ 和污染物协同减排影响	吴乐敏, 陈丙寅, 欧林冲, 白玉洁, 刘可旋, 王伟文, 彭勃, 王雪梅 (6653)
县域尺度下长株潭地区城市化与碳排放的关系	刘贤赵, 李阳 (6664)
城市草坪温室气体排放特征及影响因素	陈丽涵, 刘硕, 林溢, 郭娜, 臧昆鹏, 陈圆圆, 李嘉鑫, 邱珊珊, 卿雪梅, 洪海祥, 蒋凯, 熊浩宇, 方双喜 (6680)
双视角下中国畜牧业甲烷排放的温室效应	刘舒乐, 严薇, 高庆先, 马占云 (6692)
中国典型流域有机磷酸酯的污染特征与风险评估	赵江陆, 路海健, 吕佳佩, 杨江涛, 罗莹, 曹渺, 孙善伟, 郭昌胜, 徐建 (6700)
黄河下游悬河段饮用水源地土壤重金属污染、来源及健康风险	彭超月, 任翀, 申浩欣, 王艳峰, 段海静, 王玉龙, 李旭辉, 刘德新, 马建华 (6710)
黄河干流沉积物重金属的赋存形态特征及污染评价	王依滴, 欧阳威, 刘连华, 陆中桂 (6720)
土地利用结构与空间格局对鄱阳湖流域中小河流水质的影响	温嘉伟, 王鹏, 黄高翔, 张华, 聂明华, 丁明军, 折远洋 (6728)
内蒙古典型湖泊水环境特征及水质评价	王欣远, 潘保柱, 王立新, 刘铁军, 廖梓龙, 韩译, 杨子杰 (6744)
锡林河上游雨季降水、河水和地下水转化关系	孙金, 王怡璇, 杨璐, 段利民, 褚少杰, 张桂馨, 张波, 刘廷玺 (6754)
西北盐湖流域地下水水化学特征及控制因素	艳艳, 高瑞忠, 刘廷玺, 房丽晶, 王银龙 (6767)
巴里坤-伊吾盆地平原区地下水污染风险评价	刘钰, 曾妍妍, 周金龙, 闫志云, 白凡 (6778)
亚硫酸氢盐强化微量 Fe ²⁺ 活化过二硫酸盐降解扑热息痛	莫茜婷, 聂淑华, 晏彩霞, 丁明军, 陈诗瑶, 聂明华 (6790)
污泥生物炭活化过一硫酸盐降解环丙沙星	郑大洋, 邹佳丽, 徐皓, 王滕, 石宇翔, 陈永健, 李彬阳, 王亚宜, 冯沁, 吴敏 (6801)
NaHCO ₃ 活化荞麦皮生物炭对碘酸钾的吸附	魏红, 赵江娟, 景立明, 钮金芬, 付冉, 董莹 (6811)
竹基 N、P 共掺杂活性炭的制备及其铜离子吸附性能	王贵龙, 刘艳艳, 江荣源, 李思敏, 林冠峰, 卢贝丽, 黄彪, 陈燕丹 (6823)
西南高山峡谷区植被变化及影响因素分析	赖金林, 齐实, 崔冉冉, 廖瑞恩, 唐颖, 李鹏 (6833)
生物炭施用对农田土壤团聚体及有机碳影响的整合分析	孟艳, 沈亚文, 孟维伟, 王旭清, 李宗新, 刘开昌, 代红翠 (6847)
农田土壤碳循环过程及其量化方法	孙昭安, 朱彪 (6857)
生物炭施用 5 a 后对桂北桉树人工林土壤有机碳组分的影响	牟芝熠, 沈育伊, 曹杨, 王紫卉, 陈运霜, 滕秋梅, 黄科朝, 毛馨月, 徐广平 (6869)
喀斯特地区植被恢复下土壤活性有机碳与碳库管理指数的演变特征	蔡华, 舒英格, 王昌敏, 廖远行, 罗秀龙, 龙慧, 李雪梅 (6880)
中国典型抗生素在环境介质中的污染特征与生态风险评估	陈丽红, 曹莹, 李强, 孟甜, 张森 (6894)
基于 MGWR 的土壤 pH 值空间建模及其影响因素分析	赵明松, 陈宣强, 徐少杰, 邱士其, 王世航 (6909)
某燃煤电厂周边农田土壤重金属污染特征及源解析	张军, 李旭, 刘磊玉, 李雨茹 (6921)
重庆典型在产石化场地土壤污染特征及来源解析	张渝蓉, 罗帅, 陈媛, 曹军, 刘斌, 刘元元 (6933)
高垦殖丘陵区不同类型农用地土壤中抗生素抗性基因分布特征	陈瑞, 程建华, 唐翔宇 (6947)
有机肥配施生物炭对果园土壤反硝化微生物和酶活性的影响	邓正昕, 高明, 熊子怡, 王莹燕, 谢军, 王子芳 (6955)
有机肥处理对旱地红壤细菌群落及玉米生产力的影响	林婷婷, 郑洁, 朱国繁, 梁璐, 杨叶钰萍, 刘佳, 徐勤松, 孙波, 蒋瑞霖 (6965)
微塑料和镉复合污染对狼尾草根际土壤微生物群落结构和功能的影响	段莉阳, 张玉, 任学敏, 李玉英, 张英君, 张浩, 韩辉, 陈兆进 (6973)
设施番茄种植年限对土壤理化性质及微生物群落的影响	赵阳阳, 刘银双, 宋瑶, 张晓旭, 贾振华, 黄亚丽 (6982)
3 种氧化剂对焦化场地多环芳烃的修复效果与土著微生物的响应关系	李伟, 王伟伟, 孟祥宇, 孙英杰, 王亚楠, 李书鹏, 杨乐巍, 刘鹏, 刘渊文 (6992)
河北省不同盐渍化土壤类型的微生物多样性与种群结构	刘银双, 牛宏进, 赵阳阳, 孙宏勇, 陈晓波, 黄亚丽 (7004)
玉米根际微生物氮磷转化的功能基因组学分析	汪香君, 姜美彤, 李森, 倪浩为, 孙波, 梁玉婷 (7014)
外源菌剂联合柠檬酸强化龙葵修复土壤镉污染	王楷, 王丽, 王一钲, 游梦, 梁婷, 邹茸, 范洪黎 (7024)
1 株肠杆菌与硫酸盐联合施用对水稻积累镉的影响	张朴心, 姚俊帆, 刘玉玲, 张威宇, 尹雪斐, 铁柏清 (7036)
《环境科学》第 44 卷(2023 年)总目录	(7045)
《环境科学》征订启事(6507)	
《环境科学》征稿简则(6620)	
信息(6743, 6846, 6856)	

县域尺度下长株潭地区城市化与碳排放的关系

刘贤赵, 李阳

(湖南科技大学地球科学与空间信息工程学院, 湘潭 411201)

摘要: 基于碳代谢模型核算了 1995 ~ 2020 年长株潭县域碳排放, 采用 Tapio 脱钩模型探讨了长株潭各县域碳排放与城市用地之间的脱钩关系, 并用时空地理加权回归 (GTWR) 模型分析了城市空间形态对碳排放的影响机制。结果表明: ①研究区县域碳排放总体上形成了以市辖区为中心的聚集分布, 且呈逐年扩散趋势。2020 年相比 1995 年新增 7 个高碳排放区, 均为长沙市区县。②1995 ~ 2020 年, 研究区整体由以强脱钩为主转变为以扩张负脱钩为主, 空间上脱钩状态在脱钩和负脱钩之间来回波动; 除 7 个县域脱钩状态在倒退外, 2020 年其余均达到脱钩状态或向脱钩状态靠近。③城市斑块面积 (CA)、城市斑块数量 (NP) 和斑块结合度 (COHESION) 与城市碳排放之间呈正相关效应, 而景观形状指数 (LSI)、最大斑块指数 (LPI) 和欧氏距离均值 (ENN_MN) 与城市碳排放则呈负相关效应, 不同城市形态指标对碳排放的影响具有显著空间异质性。

关键词: 县域碳排放; 城市扩张; 脱钩分析; 城市空间形态; 时空地理加权回归 (GTWR)

中图分类号: X24 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)12-6664-16 DOI: 10.13227/j.hjxx.202301068

Relationship Between Urbanization and Carbon Emissions in the Chang-Zhu-Tan Region at the County Level

LIU Xian-zhao, LI Yang

(School of Earth Science and Spatial Information Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: Urbanization is a major source of carbon emissions. A quantitative study on the dynamic relationship between urbanization and its morphological characteristics and carbon emissions is crucial for formulating urban carbon emission reduction policies. Based on the carbon metabolism model, the carbon emissions at the county level in Chang-Zhu-Tan from 1995 to 2020 were calculated. The Tapio decoupling model was used to explore the decoupling relationship between the carbon emissions of Chang-Zhu-Tan and urban land, and a geographically and temporally weighted regression (GTWR) model was used to analyze the impact mechanism of urban spatial morphology on carbon emissions. The following conclusions were drawn: ① carbon emissions at the county level in the study area formed a clustered distribution centered on the city jurisdiction and showed a trend of diffusion from year to year. Compared with those in 1995, there were seven new high carbon emission districts in 2020, all of which belonged to Changsha. ② From 1995-2020, the research area as a whole changed from mainly strong decoupling to mainly dilated negative decoupling, and the spatial decoupling state fluctuated back and forth between the decoupling and negative decoupling. By 2020, except for the seven regions with the uncoupling state regressing, all of them reached the uncoupling state or were close to the uncoupling state. ③ Urban patch area (CA), urban patch number (NP), and patch combination degree (COHESION) were positively correlated with urban carbon emissions, whereas landscape shape index (LSI), maximum patch index (LPI), and Euclidean distance mean (ENN_MN) were negatively correlated with urban carbon emissions, and the impact of different urban form indicators on carbon emissions had significant spatial heterogeneity.

Key words: county level carbon emissions; urban expansion; decoupling analysis; urban spatial form; geographically and temporally weighted regression (GTWR)

城市作为人口、产业和交通等的高度聚集地, 尽管面积只占地球表面的 1%, 但承载着人类 85% 的生产活动与经济活动^[1]。快速城市化在促进经济发展的同时也导致了一系列的生态环境问题^[2]。其中, CO₂ 排放 (简称碳排放, 下同) 引起的全球变暖是当今人类社会面临的最具挑战性的问题之一^[3]。据美国国家海洋与气象局 (NOAA) 统计^[4], CO₂ 在大气中的体积分数已从工业化前的约 280×10^{-6} 上升到 2022 年的 421×10^{-6} 。中国作为世界上第一大碳排放国, 曾两次在国际气候变化大会上做出减排承诺^[5], 而要在短时间内扭转碳排放的增长趋势相当具有挑战性。由于城市化是碳排放的主要来源, 因此对城市化及其形态特征与碳排放之间的动态关系进行定量研究, 对制定城市碳减排政策具有重要意义。

城市化伴随城市外部扩张和内部形态变化, 而

城市用地作为城市化最直观的空间表征之一, 是城市扩张和城市空间形态与碳排放研究的重要切入点^[6-8]。关于城市扩张与碳排放关系的研究已取得丰硕成果, 研究内容涉及城市扩张对碳排放量、碳强度的影响^[8-11], 城市用地增长与碳排放的脱钩分析等^[8, 12]。如 Liu 等^[11]考察了中国 10 个城市扩张与生态建设对碳排放的影响, 结果表明城市扩张增加了碳排放, 而生态建设缓解了排放增长; Zhang 等^[9]采用人工神经网络-元胞自动机等模型探讨了武汉碳排放与城市扩张之间的因果关系, Zhao 等^[10]对中国 620 个县城的城市扩张与碳排放强度进行了相关性研究。而张思齐等^[8]和邢梓涵等^[12]分别就武汉市和辽中南城市群的城市扩张与碳排放量进行了

收稿日期: 2023-01-10; 修订日期: 2023-03-08

基金项目: 湘自资料项目 (2022-05)

作者简介: 刘贤赵 (1970 ~), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为碳排放与管理, E-mail: xianzhao@163.com

脱钩分析,发现它们的用地扩张与碳排放之间均未达到完全脱钩状态。

此外,城市的快速扩张也使城市空间形态发生了显著的变化。城市空间形态是人类活动在某一特定时间点的空间分布和格局,反映了城市的发展模式以及土地利用、资源配置和交通设施等空间分布,并深刻影响着城市碳排放^[13,14]。近年来,不少学者就城市形态对碳排放的影响进行了实证分析。如杨浩等^[15]运用脱钩模型分析了长株潭城市群紧凑度与碳强度之间的互动关系,Shi 等^[16]、Ou 等^[17]和舒心等^[18]采用面板数据模型定量探讨了城市空间形态与城市碳排放的关系;Li 等^[19]采用 XGBoost 和多尺度地理加权回归模型分析了 275 个城市的社会经济和城市形态对碳排放影响的重要性和时空异质性,结果表明紧凑但多中心的城市结构有利于实现碳减排;而 Shi 等^[20]从环境、经济和社会这 3 个维度选取城市形态指标,采用 GTWR 构建城市空间形态与碳排放的关系模型,为分析城市形态对碳排放的影响提供了新视角。

上述研究多侧重从市级尺度定量分析城市化过程中碳排放与城市扩张以及城市空间形态的关系,仅有少数学者从县级等微观尺度展开相关研究^[21,22],而县域作为新型城镇化和生态管理决策的基本空间单元,对区域生态文明建设以及绿色转型发展有重要意义^[23,24]。本文以长株潭 23 个县域城市为研究区,精细刻画县域碳排放的时空格局及其演变规律,探讨各县域碳排放与城市用地的脱钩关系,明晰城市空间形态对碳排放的影响机制,以期为城市用地规划、城市形态优化以及区域协调发展提供理论支撑。

1 研究区域及数据来源

1.1 研究区域

长株潭城市群位于我国湖南省中东部,由长沙、株洲和湘潭三市呈“品”字形分布组成,共包括 23 个县域(图 1),是湖南省经济发展和城市化的核心区域。作为湖南省区域空间形态的最高组织形式,长株潭城市群正不断加强区域内各城市间的空间联系且形成更加紧凑的空间格局。随着“长株潭区域一体化发展”建设的不断推进,区域发展空间进一步拓展,尤其是城市用地不断扩张,因而导致的碳排放问题也愈发凸显。

1.2 数据来源

1995~2020 年每 5 a 为一期的六期城市用地数据来自中国科学院地理科学与资源研究所,该数据基于美国 NASA 的陆地卫星 Landsat TM/ETM 影像,

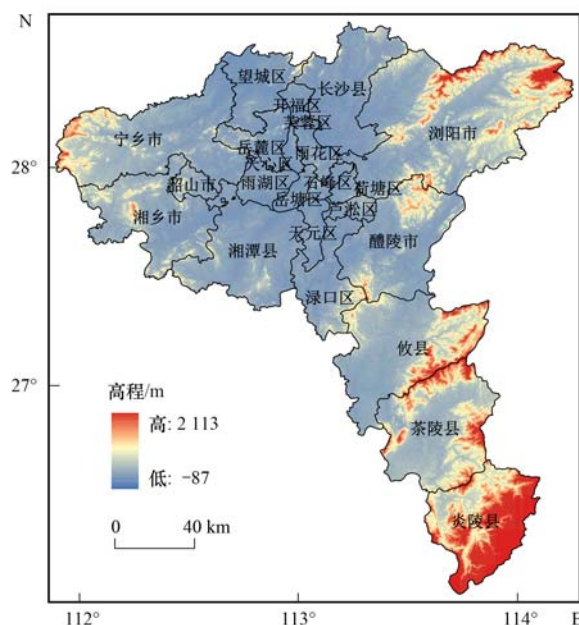


图 1 研究区位置示意
Fig. 1 Location of study area

经人工目视判读生成,数据集空间分辨率为 30 m × 30 m。县域城市空间形态指标基于以上六期遥感影像所提取的城市用地,通过格式转换后经软件 FRAGSTATS 4.2 求得。计算城市碳排放所用的能源消费数据来自《中国能源统计年鉴》,城镇人口数和各行业 GDP 等相关统计数据来自《湖南统计年鉴》以及各市县历年统计公报和年鉴等。

2 研究方法

2.1 城市碳排放测算

由于长株潭城市群县域城市尺度的碳排放数据匮乏,本文基于 Yan 等^[25]建立的城市碳代谢模型,并结合既有学者核算城市碳排放的方法来估算长株潭县域城市碳排放量^[18,21,26]。

城市碳代谢模型估算的碳排放量包括城市用地、交通用地和工业用地这 3 个部分产生的碳排放量(表 1)。城市用地碳排放包括建筑业、人类呼吸、住宿和餐饮业、批发与零售业以及城镇居民生活消费产生的碳排放。在交通用地碳排放核算上,由于研究区各类机动车行驶里程等数据可获性较差,因此本文根据消耗的燃料量核算交通碳排放^[27];鉴于统计年鉴缺乏单独的交通运输部门能源消耗数据,而是和邮政业、仓储合并统计,且后两者耗能很少^[28],因此,本文将邮政业和仓储、交通运输三者能源消耗量视为交通用地碳排放^[29]。工业用地碳排放包括制造业、电信服务业和采矿业。

与能源消耗相关的碳排放计算采用 IPCC 推荐的排放因子法,包括城市用地中的建筑业、住宿和

表 1 城市碳排放核算目录
Table 1 Urban carbon emission accounting directory

项目	碳排放核算内容
城市用地	建筑业、人类呼吸、住宿和餐饮业、批发与零售业和城镇居民生活消费
交通用地	邮政业和仓储、交通运输
工业用地	制造业、电信服务业和采矿业

餐饮业、批发和零售业以及城镇居民生活消费,交通用地中的邮政业和仓储、交通运输和工业用地中的采矿、制造业和电信服务业. 计算公式为:

表 2 化石能源和电力的碳排放系数及标准煤折标参数¹⁾

Table 2 Carbon emission coefficients and standard coal folding parameters for fossil energy and electricity

能源种类	原煤	焦炭	原油	汽油	煤油	柴油	燃料油	天然气	电力
折标煤系数/ $10^4 \text{ tce} \cdot (10^4 \text{ t})^{-1}$	0.714 3	0.971 4	1.428 6	1.471 4	1.471 4	1.457 1	1.428 6	1.330 0	0.122 9
碳排放系数/ $10^4 \text{ t} \cdot (10^4 \text{ tce})^{-1}$	0.755 9	0.855 0	0.585 7	0.553 8	0.571 4	0.592 1	0.618 5	0.448 3	0.793 5

1) tce 为吨标准煤当量

人口呼吸碳排放参照舒心等^[18]的方法,利用公式(2)进行计算,其中 A_c 为城镇人口呼吸碳排放量, k_1 为人类呼吸碳排放系数,参照文献^[26]取值为 $79 \text{ kg} \cdot (\text{a} \cdot \text{人})^{-1}$, P 为各县域城镇人口.

$$A_c = k_1 P \quad (2)$$

基于以上统计数据,将城镇居民生活消费按城镇人口比例由各省分配至各市,除人口呼吸碳排放外,其余部分碳排放按各行业 GDP 比例由各省分配至各市,各部分相加可得到长株潭各市碳排放^[18,26].最后根据城镇人口占比由各市分配至各县,即可得到长株潭县域碳排放^[23,31].

2.2 Tapio 脱钩分析

脱钩分析是描述阻断经济增长与环境污染或能源消耗之间关系的一种基本理论,现已逐步扩展到环境、能源和农业等领域^[32].学术界广泛运用的脱钩模型主要有两种,一种是经合组织(OECD)提出的脱钩因子法,该方法对数据的选取有一定的敏感性,仅选取初、末期数据进行处理,核算结果易产生偏差.另一种是 Tapio 基于弹性变化建立的脱钩模型,可有效克服统计量纲的偏差,提高脱钩分析的科学与精准性^[33].本文根据 Tapio 脱钩分析理论,建立长株潭城市群用地增长与县域碳排放之间的脱钩模型如下:

$$e = \frac{\Delta \text{CE} / \text{CE}_{\text{起始年}}}{\Delta \text{UL} / \text{UL}_{\text{起始年}}} \quad (3)$$

式中, e 为城市碳排放随城市用地增加呈现出来的变化趋势,即碳排放与城市用地之间的脱钩状态; ΔCE 为某一时段内的城市碳排放变化量, $\text{CE}_{\text{起始年}}$ 为起始年的碳排放量; ΔUL 为某一时段内城市用地的变化量, $\text{UL}_{\text{起始年}}$ 为起始年城市用地面积. Tapio 根据

$$Q_i = \sum_{i=1}^r F_i \times f_i \times G_i \times \frac{44}{12} \quad (1)$$

式中, Q_i 为第 i 年湖南省化石能源消耗生产的碳排放总量, F_i 为第 i 种化石能源消耗量, r 为能源种类, f_i 为第 i 种化石能源标准煤折算系数, G_i 为湖南省第 i 类化石能源碳排放系数(表 2), $44/12$ 为 CO_2 与碳的分子量比值.各类化石能源碳排放系数和标准煤折算系数取自 IPCC 参考值和《中国能源统计年鉴附录 4》;电力的碳排放系数参考文献^[30].

核算出的脱钩弹性值 e 划分成 8 种脱钩状态(表 3),其中强脱钩(即 $\Delta \text{CE} < 0, \Delta \text{UL} > 0, e < 0$)为最理想状态,表示在城市用地扩张的同时,对环境的破坏或对能源的消耗随之减少,即城市产生的碳排放减少;强脱钩与强负脱钩正好相反,其余脱钩状态介于两者之间^[34].

表 3 Tapio 脱钩模型状态划分

Table 3 State division of decoupling model

脱钩状态	程度	ΔCE	ΔUL	弹性系数(e)
脱钩	强脱钩	< 0	> 0	$e < 0$
	弱脱钩	> 0	> 0	$0 < e < 0.8$
	衰退脱钩	< 0	< 0	$e > 1.2$
连接	增长连结	> 0	> 0	$0.8 < e < 1.2$
	衰退连结	< 0	< 0	$0.8 < e < 1.2$
负脱钩	强负脱钩	> 0	< 0	$e < 0$
	弱负脱钩	< 0	< 0	$0.8 < e < 1.2$
	扩张负脱钩	> 0	> 0	$e > 1.2$

2.3 城市空间形态表征

景观格局指数是基于景观格局信息、反映空间形态特征和景观结构组成的量化指标,对表征城市空间形态、结构和土地利用模式具有明显的优势^[16,17,35].因而,城市化进程中呈现的景观破碎度提高、景观紧凑度降低等空间形态变化可采用相应的景观指数进行量化.本文结合长株潭城市群空间形态特点,借鉴前人对景观指数选取的准则,从城市规模、紧凑性和复杂性等角度选择 6 个指标,测度长株潭县域 1995 ~ 2020 年的城市空间形态及其演变特征^[36].各景观指标的含义如表 4,指标具体计算过程在 Fragstats 4.2 中完成.

2.4 时空地理加权回归模型

在对空间异质性的研究方面,目前使用较多的

表 4 城市形态指数及其描述
Table 4 Urban form index and its description

角度	指标名称	缩写	描述
城市规模	城市斑块面积	CA	城市建成区斑块总面积; 取值范围: CA > 0
破碎度	城市斑块数量	NP	斑块数量越多表示景观破碎化程度越高; 取值范围: NP ≥ 1
紧凑度	斑块结合度	COHESION	衡量景观类型的物理连通性, 值越大物理连通更加紧密, 即越紧凑; 取值范围: 0 < COHESION ≤ 100
复杂度	景观形状指数	LSI	衡量城市形态复杂程度, 值越大表示空间形态越复杂; 取值范围: LSI ≥ 1
中心性	最大斑块指数	LPI	反映连续完整的地块在区域中的主导程度, 值越大表示中心性越大; 取值范围: 0 < LPI ≤ 100
邻近度	欧氏距离均值	ENN_MN	平均城市斑块的最邻近距离, 值越小则邻近度越高; 取值范围: ENN_MN > 0

是地理加权回归 (GWR) 模型; GWR 模型虽然考虑了空间效应, 但所用数据为截面数据, 样本数量有限, 在实际应用中存在一些问题^[37]. GTWR 模型相比 GWR 模型引入了时间维度, 同时考虑了空间和时间的非平稳性^[38]. 因此, GTWR 模型能够降低参数估计偏差和模型误差, 满足对复杂时空数据的分析要求^[39]. 本文将 GTWR 模型应用于城市形态与碳排放的关系研究中, 建立模型如下:

$$Y_i = \varphi_0(u_i, v_i, z_i) + \sum_{j=1}^m \varphi_j(u_i, v_i, z_i) X_{ij} + \delta_i \quad (4)$$

式中, Y_i 为第 i 个研究区域的被解释变量, X_{ij} 为第 i 个研究区域的第 j 个解释变量; (u_i, v_i) 为第 i 个研究区域的经纬度坐标, z_i 为观测时间, $\varphi_0(u_i, v_i, z_i)$ 为截距, $\varphi_j(u_i, v_i, z_i)$ 为第 i 个研究区域的第 j 个解释变量的回归系数; $\varphi > 0$ 为解释变量对被解释变量有正向影响, 反之, 则为负向影响; δ_i 为随机误差. 本文采用 ArcGIS 10.2 软件并结合吴迪等^[38]创建的模型插件来实现 GTWR 模型的操作. 其中, 时空距离参数比设为 1, 带宽采用 AICc 优化设置.

3 结果与讨论

3.1 城市碳排放数据可靠性

关于长株潭地区碳排放核算方面, 已有不少学者就此展开研究, 如牛亚文等^[40]和李键等^[41]基于土地利用类型核算研究区县域和市域碳排放, 杨浩等^[15]基于能源消费数据计算长株潭城市群碳排放量. 土地利用碳排放核算的是研究区碳源碳汇的差值, 而本研究探讨的是长株潭城市形态对碳排放的影响, 因此只需要核算城市部分碳排放, 未包含农田等“非城市”部分以及碳汇部分. 实际上, 已有研究证明人类产生的 80% 的 CO₂ 来自煤炭、天然气等化石燃料的消耗^[20], 因此, 采用与能源消耗相关的统计数据提供了一种有效估算城市碳排放量的方法. 本文基于能源统计年鉴采用碳代谢模型核算了 1995~2020 年长株潭地区县域城市尺度碳排放量, 为确保核算结果的可靠性, 将各市核算结果与中国

碳核算权威数据库 (CEADs) 进行比较, 发现拟合优度 R^2 达 0.942 (图 2), P 值为 0.000 5, 满足精度要求, 可为后续研究长株潭城市化与碳排放的关系提供可靠数据基础.

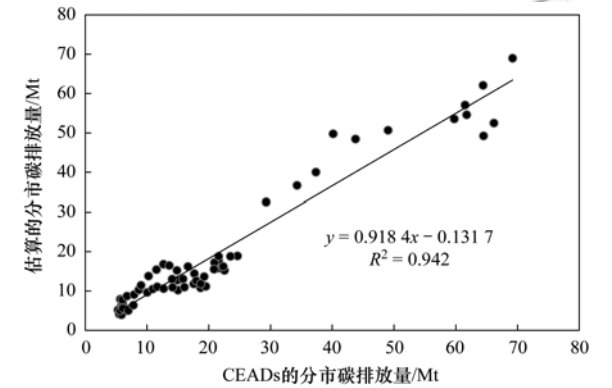


图 2 CEADs 数据库与估算的碳排放回归结果
Fig. 2 CEADs database and estimated carbon emission regression results

3.2 碳排放时空演变

3.2.1 长株潭市域碳排放时间演变

长株潭城市群在研究期间碳排放总量整体呈明显上升趋势, 尽管自 2012 年开始碳排放总量围绕 87 Mt 上下波动, 但总体仍呈增长趋势, 说明长株潭城市群碳减排压力依然严峻 (图 3). 具体来看, 长株潭三市碳排放量由 1995 年的 29.14 Mt 增加到 2020 年的 90.23 Mt, 年均增长率约为 1.03 Mt·a⁻¹. 其中, 长沙市碳排放量呈快速增长趋势, 2020 年碳排放量达 59.17 Mt, 占整个长株潭城市群碳排放总量的 66%; 而株洲和湘潭两市碳排放量均呈缓慢增长, 本研究期间, 分别由 1995 年的 9.05 Mt (株洲市) 和 5.95 Mt (湘潭市) 增长到 17.56 Mt (株洲市) 和 13.5 Mt (湘潭市), 分别占研究区排放总量的 19% 和 15%. 从碳排放增长率来看, 三市碳排放增长率的整体变化趋势大致相似, 即在 1995~2005 年呈曲折上升趋势, 其原因主要是“十五”以来, 由于工业化和城市化不断推进, 高消耗和低效益的粗放型经济发展模式消耗了大量的化石能源, 导致研究区碳排放

量迅速增长.但在 2005 ~ 2020 年碳排放增长率呈平稳发展态势,特别是党的“十八大”以来,长株潭城市群经济由高速增长向高质量发展转变,碳排放增长率明显降低.

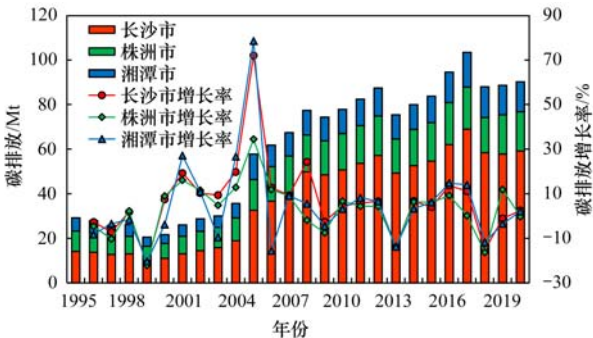


图 3 1995 ~ 2020 年长株潭市域碳排放趋势

Fig. 3 Trend chart of carbon emissions in Chang-Zhu-Tan from 1995 to 2020

3.2.2 长株潭县域碳排放空间演变

图 4 显示,长株潭地区县域碳排放总体形成了以市辖区为中心的聚集性分布,且呈逐年扩散趋势.1995 年研究区碳排放量普遍较低,多数县域属于低碳排放区(碳排放量低于 2 Mt).相较 1995 年,2000 年各县域碳排放量有所下降,且全部为低碳排放区,这与我国于 1997 年出台的《节能法》有关,明确节能是国家经济发展的一项长远方针,合理调整产业

结构和消费结构.随着长株潭经济一体化发展推进以及工业经济的快速发展,各区碳排放量均有所增加,2010 年高碳排放区(碳排放量超过 5 Mt 的县域)达 8 个,均出现在长沙市境内;低碳排放区相比 2005 年减少至 8 个,为株洲市和湘潭市县城.随着我国在哥本哈根气候大会上减排承诺的提出,各级政府积极贯彻落实减排工作,区域间碳排放净增量逐渐减少,但 2020 年仍有 7 个高碳排放区;其中,碳排放量最大值为岳麓区,达 10.24 Mt,相比 2015 年增长 47%;碳排放量最小值是韶山市,为 44.33 Mt,相比 2015 年增长 33.12%.韶山市在 1995 ~ 2020 年均保持在低值区,这与该区丘陵地形和旅游产业较发达有关.

3.3 脱钩分析

3.3.1 脱钩状态时间变化

表 5 为各阶段长株潭县域碳排放与城市用地之间的脱钩情况.由表 5 可知,1995 ~ 2020 年,研究区脱钩状态整体由以强脱钩为主转变为以扩张负脱钩为主,整体脱钩状态有所倒退,即随着城市用地扩张,碳排放量也在增长,且碳排放增长速度在加快.具体而言,炎陵县和醴陵市的碳排放与城市用地的脱钩状态变化过程相对理想,均由负脱钩变为脱钩;开福区和茶陵县的碳排放与城市用地的脱钩状态属

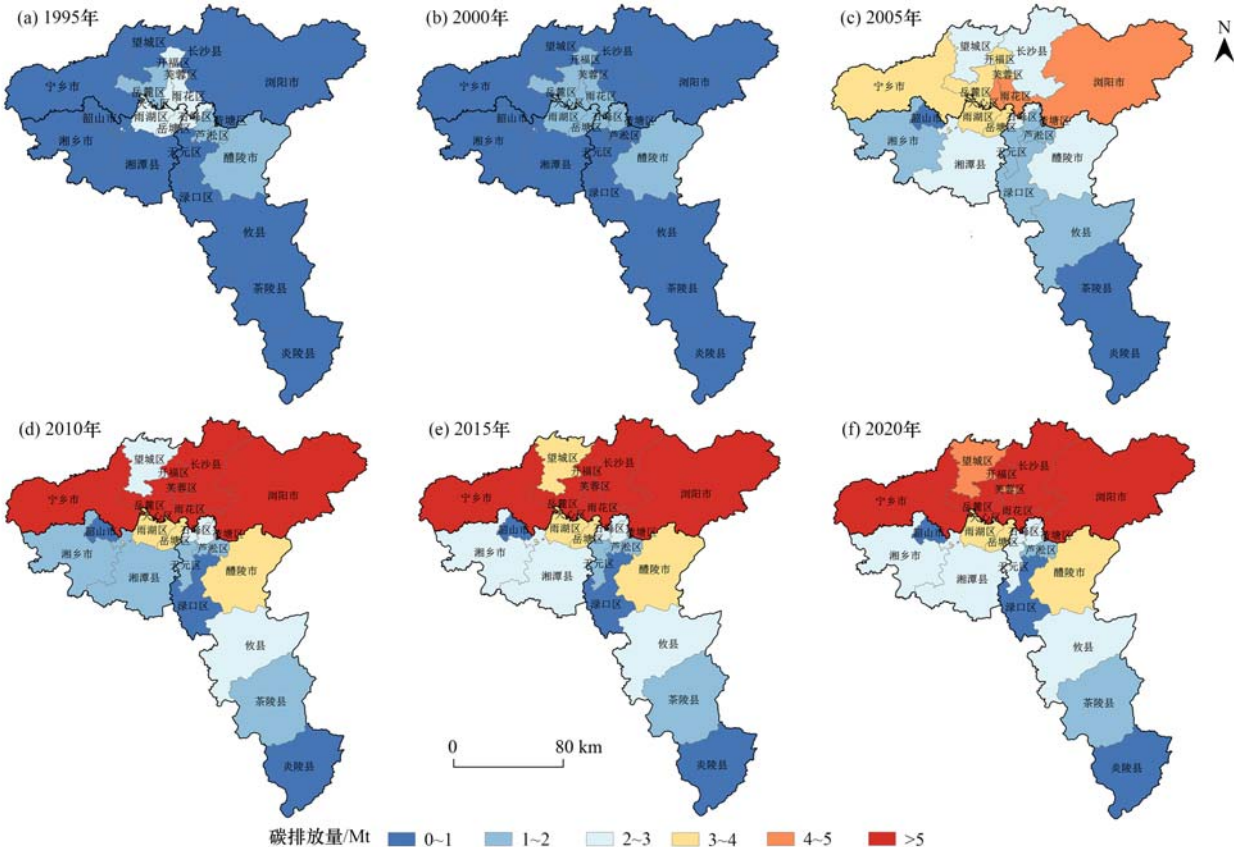


图 4 1995 ~ 2020 年长株潭县域碳排放空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of carbon emissions at county level in Chang-Zhu-Tan from 1995 to 2020

表 5 1995 ~ 2020 年长株潭县域碳排放与城市用地增长的脱钩状态¹⁾
Table 5 Decoupling state of carbon emissions at county level and urban land growth in Chang-Zhu-Tan from 1995 to 2020

县 域	1995 ~ 2000 年			2000 ~ 2005 年			2005 ~ 2010 年			2010 ~ 2015 年			2015 ~ 2020 年		
	ΔCE/CE	ΔUL/UL	e	状态	ΔCE/CE	ΔUL/UL	e	状态	ΔCE/CE	ΔUL/UL	e	状态	ΔCE/CE	ΔUL/UL	e
芙蓉区	-0.27	-0.17	1.59	C	1.44	0.08	18.68	F	0.55	0.62	0.88	E	-0.15	0.00	153.20
天心区	-0.22	-0.08	2.82	C	1.46	0.23	6.33	F	0.22	0.40	0.56	B	0.04	0.02	1.81
岳麓区	-0.25	-0.02	14.36	C	1.66	0.54	3.06	F	0.87	0.95	0.91	E	0.47	0.00	314.92
开福区	-0.31	0.04	-7.33	A	1.23	0.36	3.41	F	0.48	0.51	0.95	E	-0.04	0.00	-9.97
雨花区	-0.24	-0.15	1.57	C	1.61	0.23	7.14	F	0.61	1.24	0.49	B	0.10	-0.01	-20.05
望城区	0.02	0.04	0.34	B	2.97	1.22	2.44	F	0.26	0.19	1.35	F	0.50	0.00	163.77
长沙县	-0.42	-0.09	4.58	C	4.12	3.47	1.19	E	1.12	2.03	0.55	B	0.34	0.02	15.44
浏阳市	0.26	-0.01	-41.75	H	3.36	0.42	7.99	F	0.45	0.82	0.55	B	-0.16	0.00	-45.32
宁乡市	-0.14	0.03	-4.96	A	3.26	0.60	5.44	F	0.55	0.89	0.62	B	-0.16	0.00	-36.52
荷塘区	-0.39	0.01	-64.84	A	0.85	0.05	16.85	F	0.13	0.13	1.02	E	0.05	-0.01	-8.03
芦淞区	-0.44	0.06	-7.75	A	0.72	0.11	6.70	F	0.10	0.17	0.60	B	0.02	0.00	5.87
石峰区	-0.42	0.00	-133.44	A	0.70	0.02	38.22	F	-0.03	0.34	-0.10	A	-0.04	0.00	-17.35
天元区	-0.68	0.02	-27.16	A	4.07	1.14	3.58	F	0.16	1.35	0.12	B	0.75	0.01	144.27
渌口区	1.41	0.04	38.10	F	0.21	0.06	3.46	F	-0.24	0.27	-0.92	A	-0.01	0.00	-31.90
攸县	-0.09	-0.11	0.81	D	1.97	0.07	28.47	F	0.15	0.24	0.62	B	-0.14	0.00	346.45
茶陵县	-0.13	0.00	-75.92	A	1.74	0.10	18.12	F	1.10	0.13	8.74	F	-0.17	0.00	-207.67
炎陵县	0.03	0.00	-5.28	H	1.42	0.23	6.20	F	0.33	0.29	1.12	E	-0.10	0.01	-9.30
醴陵市	0.06	0.04	1.55	F	1.17	0.12	10.07	F	0.29	0.26	1.13	E	-0.02	0.03	-0.69
雨湖区	-0.38	-0.01	34.01	C	1.37	0.12	11.47	F	0.05	0.80	0.06	B	0.09	0.01	8.67
岳塘区	-0.40	0.00	-132.44	A	1.30	0.17	7.54	F	0.05	0.48	0.11	B	0.10	0.01	10.64
湘潭县	0.07	0.14	0.51	B	4.40	0.38	11.69	F	-0.21	0.44	-0.48	A	0.14	0.00	49.65
湘乡市	-0.16	0.07	-2.25	A	2.69	0.07	36.64	F	-0.17	0.79	-0.21	A	0.23	0.00	1 021.27
韶山市	-0.32	-0.67	0.48	C	2.04	0.50	4.04	F	-0.05	2.15	-0.02	A	0.33	0.00	-524.83

1) A 为强脱钩, B 为弱脱钩, C 为衰退脱钩, D 为衰退连结, E 为增长连结, F 为扩张脱钩, G 为弱负脱钩, H 为扩张负脱钩

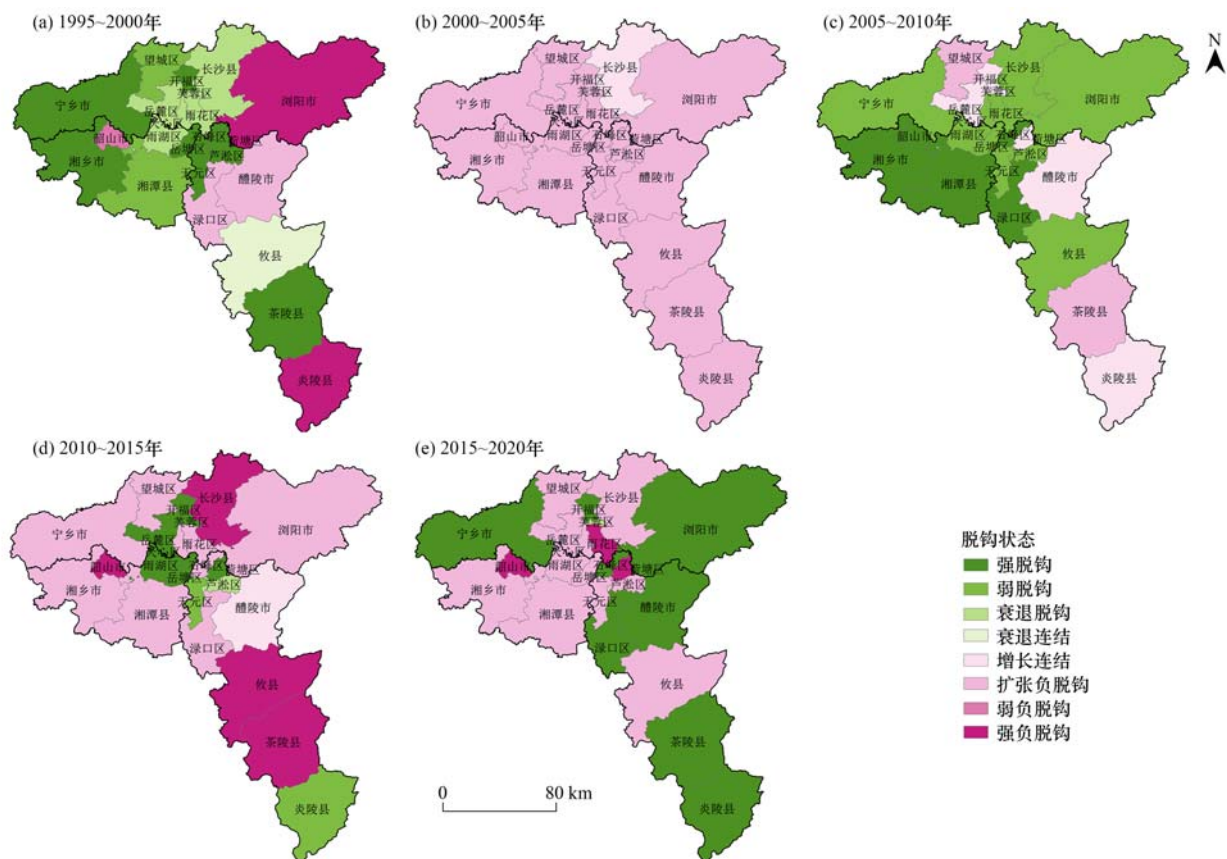


图5 1995~2020年长株潭区域碳排放与城市用地增长的脱钩状态空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of decoupling status of carbon emissions at country level and urban land growth in Chang-Zhu-Tan from 1995 to 2020

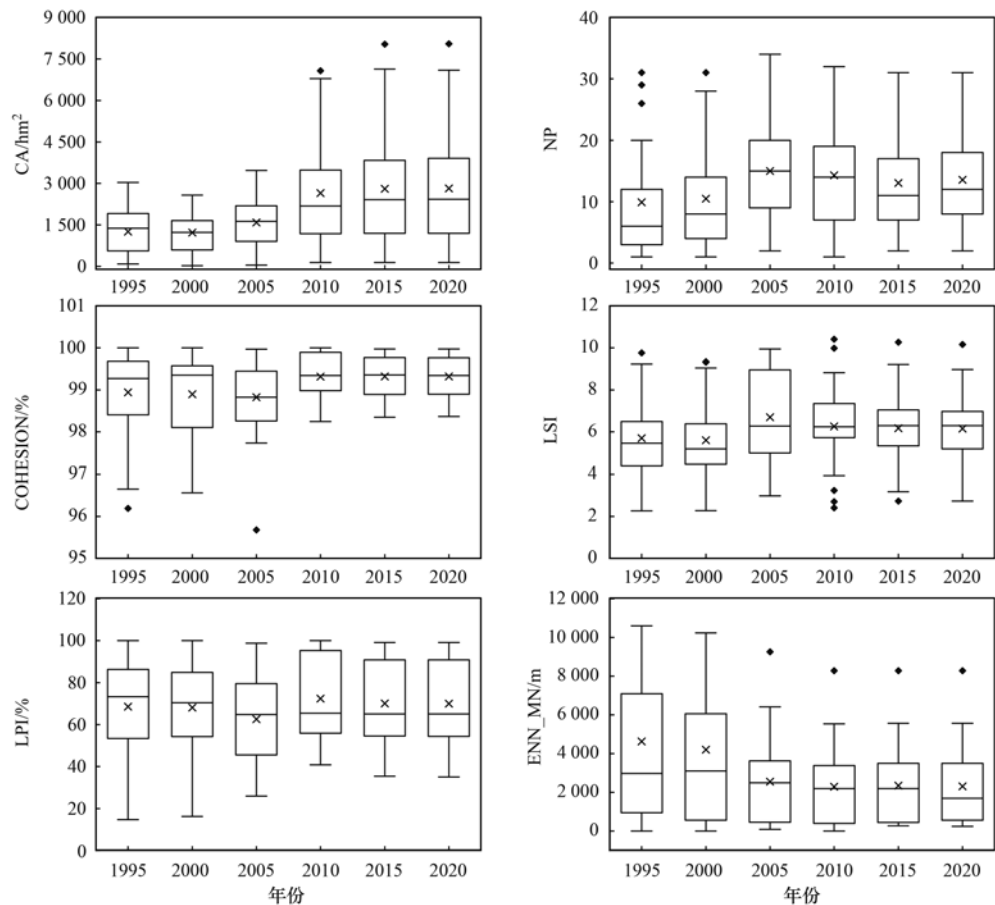


图6 1995~2020年长株潭地区城市形态指标变化

Fig. 6 Changes in urban form indicators in Chang-Zhu-Tan Region from 1995 to 2020

于先升后降型,均由强脱钩变化为扩张负脱钩后再回到强脱钩状态;而望城区的碳排放与城市用地的脱钩状态一直在倒退,从弱脱钩升到扩张负脱钩后保持不变.其它县域多在强脱钩、衰退连结和扩张负脱钩等状态之间来回变动,如芙蓉区、天心区、岳麓区、宁乡市、石峰区、浏口区、岳塘区和湘乡市等;另有少数县域在某一阶段发生了脱钩状态的强烈“突变”,如荷塘区在2010~2020年间从强脱钩突变为强负脱钩,韶山市在2005~2010年为强脱钩,2010~2015年突变为强负脱钩.至2020年,仅有9个县域的碳排放与城市用地增长之间达到了脱钩状态,占长株潭全部县域的39%,与1995年相比减少了近35%;此外,2020年强负脱钩县域相比1995年也有所增加,这说明研究区仍存在以牺牲环境为代价提高城市化率的现象,减排工作仍需高度重视.

3.3.2 脱钩状态空间格局演变

图5为1995~2020年长株潭县域碳排放与城市用地之间脱钩状态的时空演变情况.总体来看,研究区1995~2020年脱钩状态在脱钩和负脱钩之间来回摆动.其中,1995~2000年有9个县域的碳排放与城市用地之间为强脱钩状态,占总数的39%,

表明这些县域城市用地持续增长的同时碳排放量也出现实质性的下降;这可能与“九五”期间国家对煤炭产业实施关停导致原煤消耗量大幅下降有关,进而该阶段脱钩状态较为理想.2000~2005年除长沙县脱钩状态为增长连结外,其余县域均为扩张负脱钩状态,原因是该时期长株潭地区城市化速率大幅提升(由2000年的29%增长到2005年的48%),对化石能源消耗急增;加上2001年中国加入世贸组织,长株潭城市群紧抓经济战略发展机遇,占用了大量城市用地,导致碳排放增长率超过城市扩张用地增长率,进而出现脱钩状态倒退现象.2005~2010年,各县域的脱钩状态均有所好转,碳排放的城市用地增长弹性系数均减小,其中石峰区、浏口区、湘潭县、湘乡市和韶山市为强脱钩状态.2010~2015年再次出现脱钩状态倒退且长株潭城市群内部脱钩状态差异较大的情况,6个强脱钩县域(芙蓉区、岳麓区、开福区、荷塘区、雨湖区和岳塘区)均为市辖区且呈团状分布,这说明长株潭中部地区城市扩张所导致的碳排放增量有所减少.而在2015~2020年,除岳麓区、雨花区、荷塘区、芦淞区、天元区、雨湖区和岳塘区等7个县域脱钩状态存在倒退外,其余县域均达到脱钩状态或向脱钩状态靠近.原因

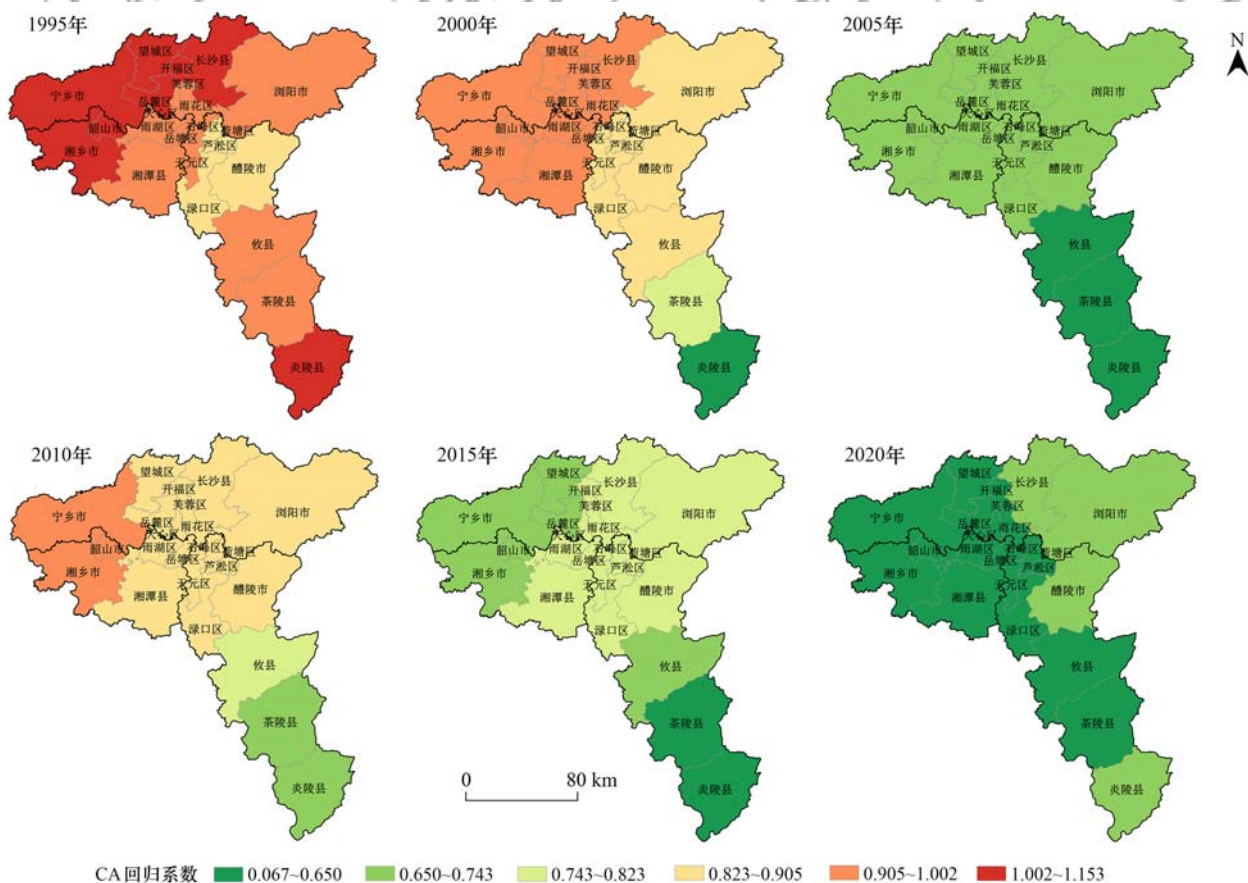


图7 CA回归系数空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of CA regression coefficients

是该阶段城市化进程加快,2020 年长株潭地区城市化率高达 77%,但各县城城市用地变化率较小,表明各县城在“两型社会”建设过程中向高质量方向发展,从而使得城市用地增长和碳排放之间的脱钩状态朝稳中向好的方向发展.

3.4 城市空间形态变化

城市空间形态指标的计算结果表明(图 6),长株潭城市群 23 个县城的 CA 值呈快速增长趋势,建成区总面积从 1995 年的 28 986.75 hm² 增至 2020 年的 64 947.06 hm²,整体增速达 124.06%,说明长株潭地区经历了快速的城市化,城市用地扩张迅速,土地覆被变化明显.然而,不同城市之间的变化趋势和幅度存在明显差异.攸县和茶陵县的 NP 值在研究期间呈整体下降趋势,说明城市斑块在减少,景观破碎度在降低;而芙蓉区、浏阳市、石峰区和炎陵县的 NP 值呈整体上升趋势,说明这 4 个区域城市斑块数量在增多,景观破碎度在增加;芦淞区、醴陵市和湘乡市的 NP 值呈先降后升,而渌口区 NP 值无明显变化,其余县城均呈先升后降趋势.研究区 COHESION 值整体呈先降后升趋势,均值从 1995 年的 98.94% 降至 2005 年的 98.82%,最终升至 2020

年的 99.32%,表明城市的紧凑性先降低后升高,朝越来越紧凑的趋势发展.研究区 LSI 值呈曲折上升趋势,表明长株潭地区城市形态越来越复杂.其中,2005 年箱体长度突增,数值较分散,此年份除浏阳市、荷塘区和渌口区 LSI 值有略微下降外,其余县城 LSI 值均有不同程度的增大,表明城市形态复杂度增加.而研究区 LPI 值呈曲折下降趋势,在 2010 年有小幅上升,此后 LPI 值持续下降,表明城市中心性下降、城市斑块连片面积缩小,内部生境减少.长株潭 23 个县城的 ENN_MN 均值表现出整体下降趋势,从 1995 年的 4 837.08 m 下降到 2020 年的 2 310.20 m,降幅为 52.24%,说明城市化快速发展的同时整体提升了研究区的城市斑块邻近度.

3.5 城市空间形态与碳排放的关系

3.5.1 多重共线检验

在运用 GTWR 模型来探讨长株潭地区城市空间形态对城市碳排放影响的时空异质性前,为避免指标(自变量)相互影响对估计结果造成偏差,首先对城市形态指标进行共线性检验.表 6 显示,所有指标的方差膨胀因子(VIF)均小于 10,且容差值均大于 0.1,说明自变量之间不存在多重共线.

表 6 城市空间形态指标的方差膨胀因子

Table 6 Variance inflation factor of urban spatial form index

变量	CA	NP	COHESION	LSI	LPI	ENN_MN
VIF	1.742	4.876	3.618	5.296	3.355	1.207
容差	0.574	0.205	0.276	0.189	0.298	0.828

3.5.2 GTWR 模型结果与分析

使用 GTWR 模型,采用拟合优度 R^2 和 AICc 值来评估模型的可靠性,并对参数拟合结果进行分析. R^2 的数值越大代表模型解释能力越好;而 AICc 是评价模型性能的度量,其数值越小表示模型拟合观测数据越好.本文将 GTWR 模型与普通最小二乘法(OLS)、时间加权回归(TWR)以及 GWR 这 3 种模型拟合结果进行对比,来检验 GTWR 的有效性与适用性.由表 7 可知,GTWR 模型的拟合优度 R^2 为 0.963 8,远大于 OLS、TWR 和 GWR 模型的 R^2 值,同时 GTWR 模型的 AICc 值也相对较小,且远小于 OLS 和 GWR 模型的 AICc 值.由此表明使用 GTWR 模型在时空维度上能够较好地解释城市空间形态指标对长株潭县城碳排放影响的时空异质性.下面将选取的 6 个城市空间形态指标对长株潭地区城市碳

排放影响的回归系数进行可视化,以探讨各指标对碳排放影响的时空异质性.

由城市形态指标的空间回归系数可知(图 6 ~ 11),CA、NP 和 COHESION 这 3 个指标和城市碳排放主要呈正相关效应,而 LSI、LPI 和 ENN_MN 这 3 个指标主要表现为负相关效应.对碳排放的影响强度由高到低依次为:COHESION > LPI > CA > LSI > NP > ENN_MN.

图 7 显示,长株潭地区的 CA 与城市碳排放呈正相关,即城市碳排放随建成区面积增加而增长;但其回归系数在研究期间总体呈下降趋势,说明影响程度逐渐变小.1995 ~ 2010 年回归系数高值区主要分布在研究区的西北部,如宁乡市、湘乡市和韶山市,且整体呈西北向东南递减态势;2010 年以后,各县域回归系数值相差不大,低值区主要分布在研究区西部和南部,如宁乡市和茶陵县.研究期间,长株潭地区城市化进程加速,城市建设用地快速增长,如宁乡市和湘乡市在 1995 ~ 2010 年建成区面积增长率分别为 210% 和 106%.一方面,城市居民区和基础设施的扩张减少了森林覆盖面积,导致碳汇规

表 7 模型评价指标对比

Table 7 Comparison of model evaluation indicators

模型参数	OLS	TWR	GWR	GTWR
R^2	0.825 8	0.917 7	0.854 6	0.963 8
AICc	152.502	110.733	147.934	116.704

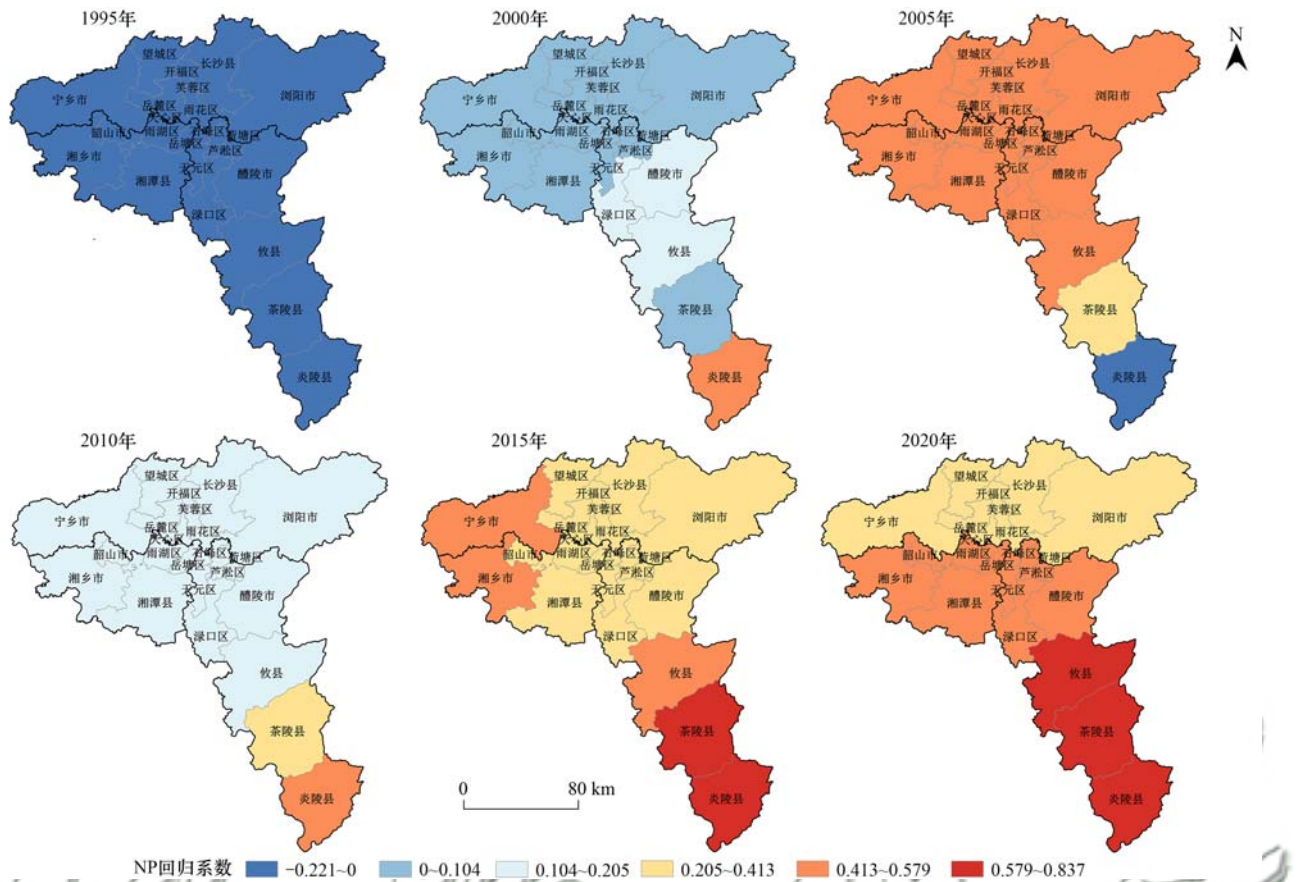


图 8 NP 回归系数空间分布
Fig. 8 Spatial distribution of NP regression coefficients

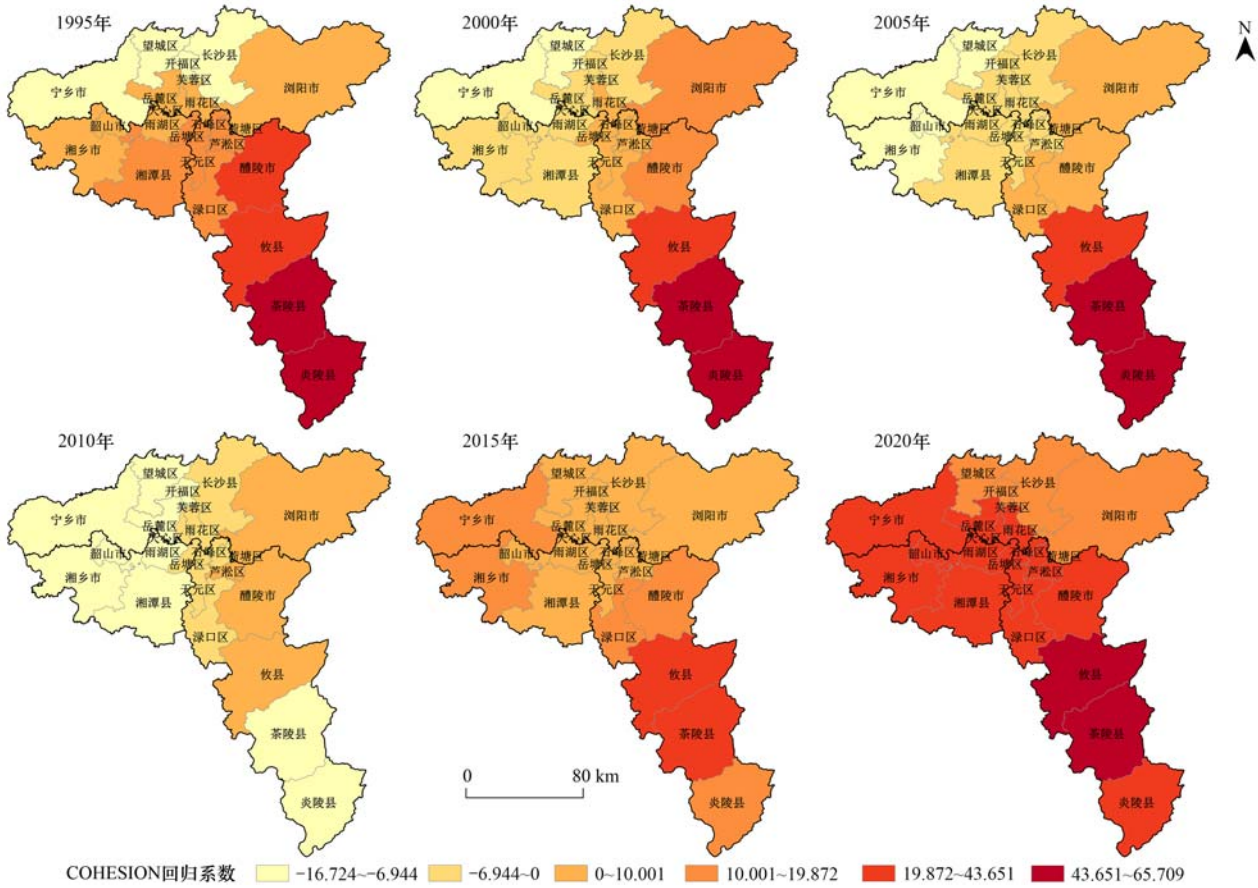


图 9 COHESION 回归系数空间分布
Fig. 9 Spatial distribution of COHESION regression coefficients

模缩小,对碳储存产生负面影响,容易导致城市热岛、全球变暖等环境变化^[42]. 另一方面,随着城镇人口的快速增长,居民消费大幅增加,加速工业生产和能源消耗进程,导致城市碳排放大幅增加^[43]. CA 对城市碳排放的正向影响逐渐减小的原因可能是研究期间长株潭地区的城市绿化覆盖面积逐渐增加^[44],研究区建成区绿化覆盖面积从 2000 年的 55.46 km² 增长到 2020 年的 286.39 km²,净增长 230.93 km²,碳储量相应增加;此外,优化国土空间规划、促进低碳经济发展等措施也使 CA 的正向影响减弱.

斑块数量能够反映城市的破碎化程度,斑块数量越多,城市土地利用的空间格局越分散,则城市破碎化程度越高. 图 8 显示,长株潭地区 NP 与城市碳排放之间从弱负相关转变成正相关,且正向影响呈逐渐增强趋势,表明城市斑块数量增加是促进城市碳排放增长的重要因素;NP 回归系数绝对值高值区主要集中在炎陵县、茶陵县等南部地区,且影响程度由南向北逐渐减弱. 城市化初级阶段,城市碳排放量随 NP 值增加而减少;而 2000 年之后,城市用地趋于分散化分布,各斑块之间物理连通性较差;如炎陵县等南部地区的新开发区、工业园区交通耦合度不高,尚未形成环境友好型城市空间利用模式,导致城市碳排放量增加^[45].

图 9 显示,长株潭地区 COHESION 对城市碳排放的影响较大,两者从以负相关为主转变成以正相关为主,且正向影响程度增强. COHESION 回归系数在空间分布上存在明显的空间异质性,在 1995 ~ 2010 年,宁乡市和望城区等西北地区对碳排放有负向影响,而攸县和醴陵市等东南部地区对碳排放有正向影响;回归系数由西北向东南从负逐步过渡到正,且表现出逐渐增强的负相关,表明城市紧凑性在减少碳排放方面发挥作用的区域从西北部向外扩散;这一阶段,各县城朝具有多功能中心且相对聚集的空间特征发展,城市布局满足居民多样化的生活需求,区域间互动性较少,长株潭县域紧凑程度的提高主要通过影响交通碳排放进而增加城市碳排放效率^[46]. 自 2010 年以后,长株潭地区城市紧凑性对碳排放产生显著积极影响,回归系数高值区主要集中在攸县、茶陵县等地,且有向南北两端扩张的趋势;这可能是研究区人口规模扩大,公共服务投入有限,城市紧凑性的减排效应超过阈值,最终减排效果被抵消转变为促进碳排放^[20].

城市复杂度代表地块边缘的不规则程度,反映了城市边界形状的规则性或“锯齿状”. 一般来说,城市复杂度越高,城市景观越不规则,城市碳排放量

越多^[42,44]. 从图 10 可以看出,在 1995 ~ 2015 年,长株潭地区的 LSI 与城市碳排放的关系以负相关为主;而 2015 年以后,LSI 对城市碳排放的负向影响逐渐降低,导致宁乡市、韶山市等部分地区出现弱正相关,LSI 回归系数由研究区东南部的负相关逐渐过渡到东北部的正相关. 2015 年以前 LSI 对碳排放产生负向影响可能由于长株潭地区 LSI 值整体波动幅度不大,且城市连通性较好,但随着净碳排放的大幅增加,减排效应逐渐减弱;此外,2015 年以来县域 LSI 有小幅增大,城市形态趋于复杂化,不规则的城市形态增加了市民的职住流动和通勤时间,增加了碳排放,导致部分研究区的 LSI 对碳排放开始产生正向影响.

图 11 显示,长株潭地区 LPI 与城市碳排放的关系以负相关为主,但负向影响逐渐减弱,有整体向正向效应转变的趋势. 1995 ~ 2005 年 LPI 回归系数由西北向东南逐渐减小,而 2005 年以后,LPI 回归系数由北部向南部逐渐增大. LPI 是以城市用地面积来衡量某一斑块对整体景观的影响程度,LPI 值越大,则说明该区域存在集中连片的斑块类型,不同区域之间互动性降低,从而不会产生太多碳排放;而长株潭各县域 LPI 值呈下降趋势,表明研究区以“单中心”发展模式逐渐向“多中心”发展模式转变;如雨湖区、开福区和芦淞区等北部地区逐渐演变成经济多心发展模式,而南部地区如炎陵县的 LPI 值从 1995 年的 100 变为 2020 年的 35,降幅达 65%,为所有县域最低值,因此炎陵县的 LPI 回归系数变化较大. 此外,“多中心”发展模式会导致各区域之间经济活动交流增多,从而交通流量增加;根据统计年鉴,长株潭三市私人汽车拥有量在 2010 年约为 75 万辆,但在 2020 年增加到 350 万辆,车流量增多而道路资源不足会导致交通拥堵,从而产生更多碳排放,因此研究区 LPI 对城市碳排放的影响由负向效应转变为正向效应.

图 12 中 ENN_MN 的回归系数值不大,但空间分布呈现出明显的异质性,1995 ~ 2010 年正、负相关两种效应来回摆动,2010 年以后整体有朝正向效应发展的趋势,ENN_MN 回归系数绝对值高值主要分布在湘潭县、渌口区等西南部地区. 欧氏距离均值越高,城市斑块之间的空间连接性越弱,能源消耗量越多;而长株潭地区县域整体 ENN_MN 值呈下降趋势,表明研究区整体邻近度在提高,因此所产生的城市碳排放减少,以致在 2010 年研究区 ENN_MN 均为负值. 2010 年以后研究区呈“多中心”发展模式的趋势,板块之间的最邻近距离虽然有所缩短,但各中心尚未形成完整的功能分区,居民日常消耗反而

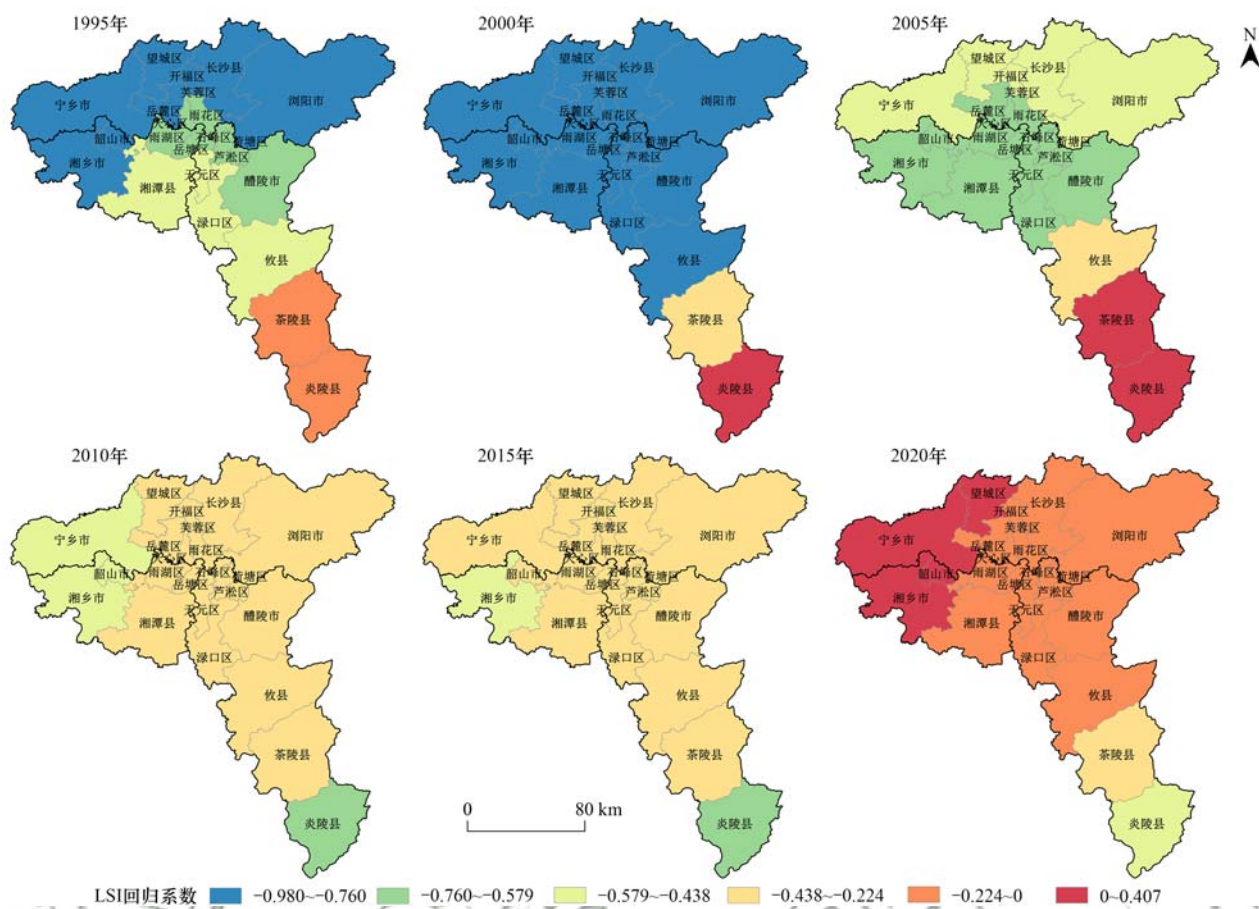


图 10 LSI 回归系数空间分布

Fig. 10 Spatial distribution of LSI regression coefficients

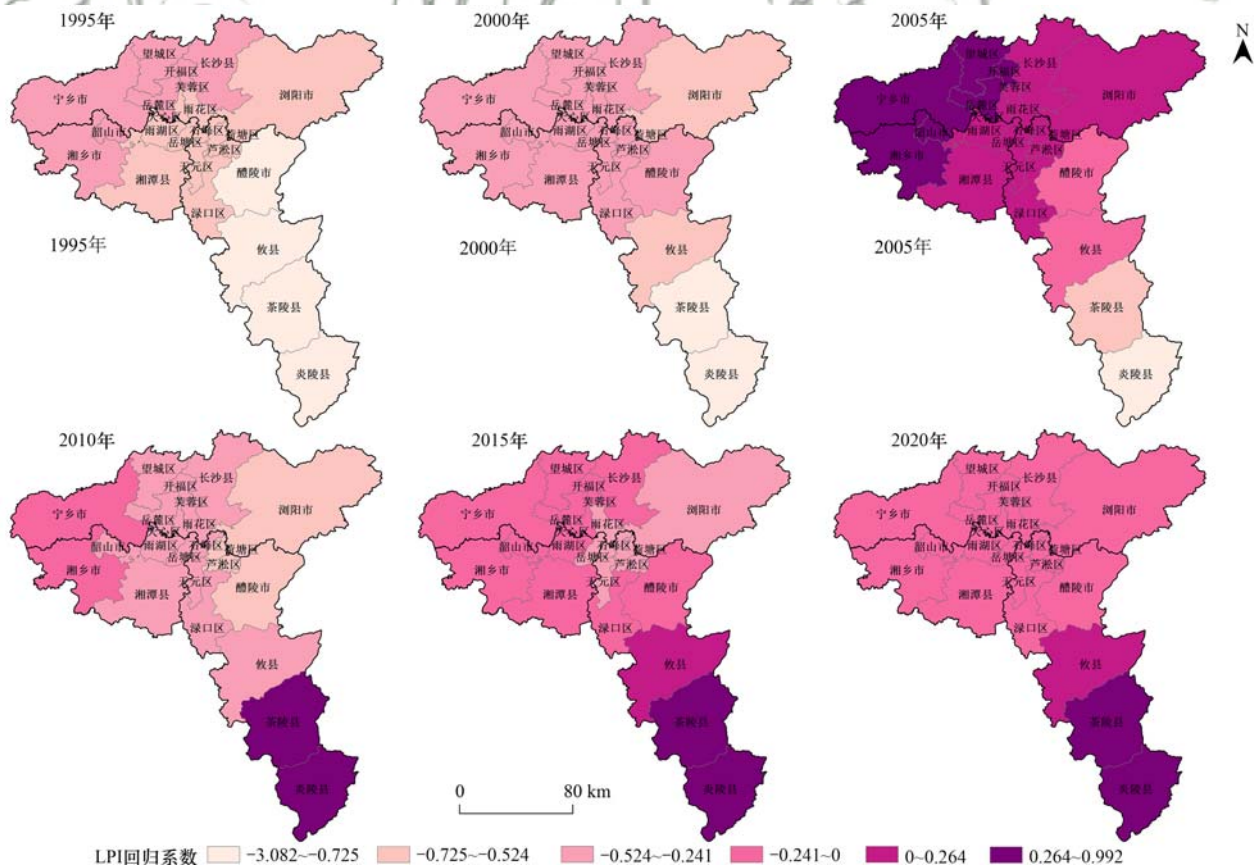


图 11 LPI 回归系数空间分布

Fig. 11 Spatial distribution of LPI regression coefficients

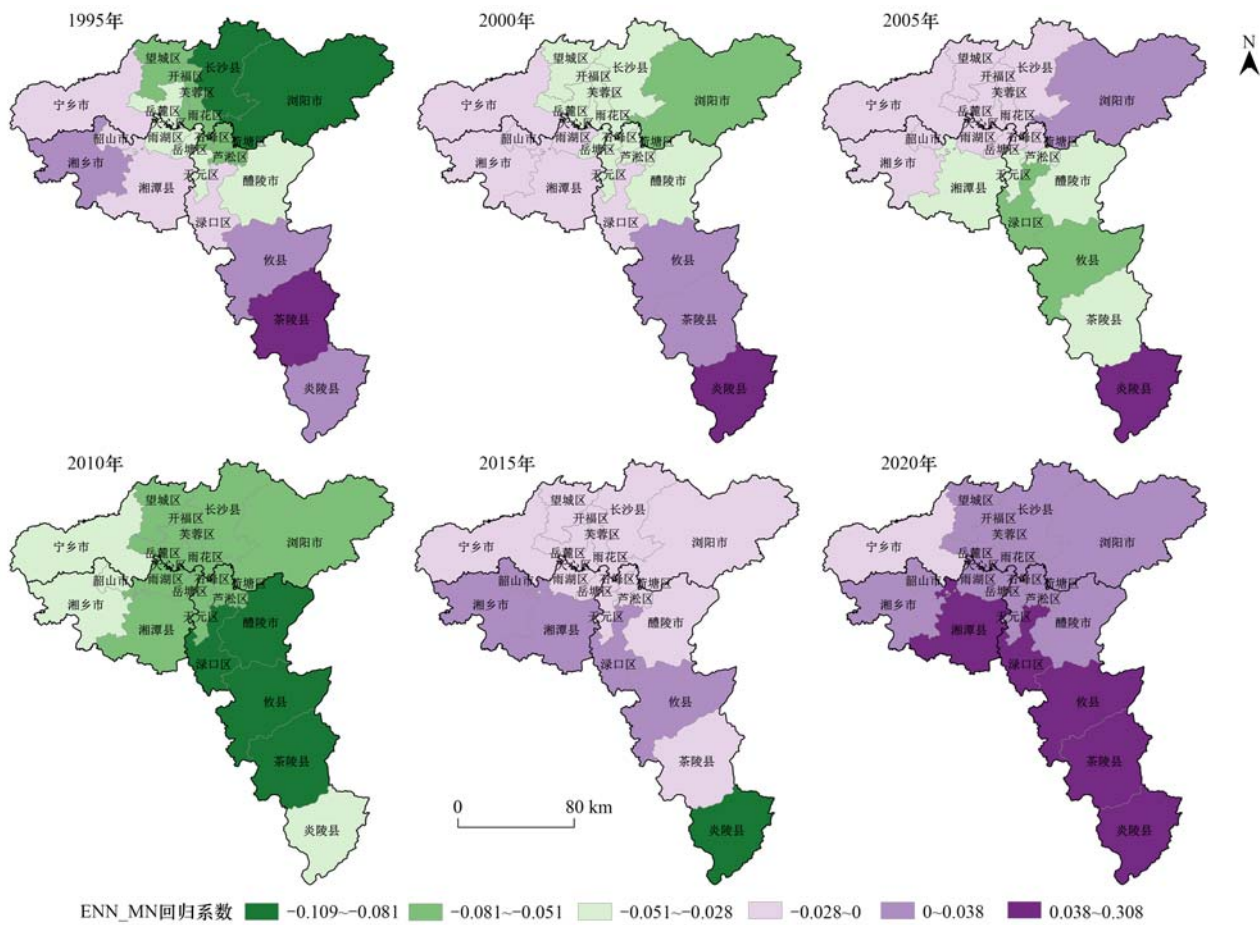


图 12 ENN_MN 回归系数空间分布
Fig. 12 Spatial distribution of ENN_MN regression coefficients

增多。

4 建议

研究结果表明长株潭城市群减排任务依旧艰巨,完成“双碳”目标时间紧、任务重,基于本研究结果,提出以下 3 点建议。

(1)作为“两型”社会建设改革试验区,长株潭城市群应利用自身发展优势大力发展高新技术产业,促进产业结构优化升级,推进能源消费结构由以煤炭为主向多元化转变;不同层级政府为实现共同减排目标需协同合作,促进各区县协调发展,实现城市低碳化。

(2)本研究结果显示,控制长株潭县域碳排放量与城市用地变化率是实现两者脱钩的关键。在城市扩张方面,未来应加强土地管理,节约利用土地资源,避免研究区城市用地的无序扩张,同时增强城市用地有效混合。在碳减排方面,除优化能源消费结构、加快构建清洁能源体系外,应重视城市碳汇,增加绿化面积;利用长株潭的“绿心”优势,加强对碳排放的捕捉和碳汇,构建可持续的空间结构体系,促进城市扩张与城市碳排放脱钩。

(3)CA 对长株潭地区城市碳排放的正向影响逐渐减小得益于研究区城市绿化覆盖面积增加,因此,促进建成区绿化覆盖面积净增长,增加碳储量,有利于城市碳减排。NP 主要通过影响交通碳排放从而增加城市碳排放量,长株潭城市群处于机动化快速发展阶段,未来应构建绿色、经济、低碳的交通体系,此外,应提高城市连通性以提高出行效率。COHESION 对城市碳排放的影响由以负向效应为主转变为以正向效应为主与研究区人口规模扩张有一定的关系,未来应合理控制人口增长,改变“摊大饼”式的增长,同时增加城市群内部各功能之间的联系以缓解城市紧凑带来的压力。LSI 和 LPI 对城市碳排放的负向效应逐渐减弱表明,研究区在向“多中心”发展模式转变的同时需注重完善各中心内部功能,优化城市空间结构。而 ENN_MN 对城市碳排放的影响效应表明,在提升区域邻近度的同时要注重区域间的协调发展。

5 结论

(1)长株潭城市群在研究期间碳排放总量整体呈明显上升趋势,碳排放量由 1995 年的 29.14 Mt

增加到 2020 年的 90.23 Mt, 年均增长率约为 $1.03 \text{ Mt} \cdot \text{a}^{-1}$. 长株潭县城碳排放总体形成了以市辖区为中心的聚集性分布, 且呈逐年扩散趋势. 2020 年相比 1995 年新增 7 个高碳排放区, 碳排放量最大值为岳麓区, 而韶山市历年均保持在低值区.

(2) 从时间上看, 1995 ~ 2020 年, 研究区总体脱钩状态从以强脱钩为主发展为以扩张负脱钩为主; 其中炎陵县和醴陵市的脱钩状态变动过程较为理想, 而望城区一直处于倒退状态, 较多县城出现了在强脱钩、衰退连结和扩张负脱钩等状态之间变动的情况. 从空间上看, 研究区 1995 ~ 2020 年在脱钩和负脱钩之间来回摇摆, 2015 ~ 2020 年除 7 个县域脱钩状态在倒退, 其余均达到脱钩状态或向脱钩状态靠近.

(3) GTWR 模型结果显示, CA、NP 和 COHESION 这 3 个指标和城市碳排放主要呈正相关效应, 而 LSI、LPI 和 ENN_MN 这 3 个指标主要表现为负相关效应. 影响强度由高到低依次为: $\text{COHESION} > \text{LPI} > \text{CA} > \text{LSI} > \text{NP} > \text{ENN_MN}$, 不同城市形态指标对碳排放的影响具有显著的空间异质性.

参考文献:

- [1] Liu C, Yang K, Bennett M M, *et al.* Automated extraction of built-up areas by fusing VIIRS nighttime lights and Landsat-8 data[J]. *Remote Sensing*, 2019, **11**(13), doi: 10.3390/rs11131571.
- [2] Guo X M, Fang C L. How does urbanization affect energy carbon emissions under the background of carbon neutrality? [J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, **327**, doi: 10.1016/J.JENVMAN.2022.116878.
- [3] 刘贤赵, 郭若鑫, 张勇, 等. 中国省域碳排放空间依赖结构的非参数估计及其实证分析[J]. *中国人口·资源与环境*, 2019, **29**(5): 40-51.
Liu X Z, Guo R X, Zhang Y, *et al.* Nonparametric estimation and empirical analysis of spatial dependence structure of provincial carbon emissions in China[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2019, **29**(5): 40-51.
- [4] Sun C L, Zhang Y L, Ma W W, *et al.* The impacts of urban form on carbon emissions: a comprehensive review[J]. *Land*, 2022, **11**(9), doi: 10.3390/LAND11091430.
- [5] 刘贤赵, 高长春, 张勇, 等. 中国省域碳强度空间依赖格局及其影响因素的空间异质性研究[J]. *地理科学*, 2018, **38**(5): 681-690.
Liu X Z, Gao C C, Zhang Y, *et al.* Spatial dependence pattern of carbon emission intensity in China's provinces and spatial heterogeneity of its influencing factors[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2018, **38**(5): 681-690.
- [6] 徐智邦, 焦利民, 王玉. 1988-2018 年中国城市实体地域与行政地域用地扩张对比[J]. *地理学报*, 2022, **77**(10): 2514-2528.
Xu Z B, Jiao L M, Wang Y. Comparison of urban land expansion between urban physical and administrative areas in China from 1988 to 2018[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2022, **77**(10): 2514-2528.
- [7] Rao Y X, Dai J Y, Dai D Y, *et al.* Effect of urban growth pattern on land surface temperature in China: a multi-scale landscape analysis of 338 cities[J]. *Land Use Policy*, 2021, **103**, doi: 10.1016/J.LANDUSEPOL.2021.105314.
- [8] 张思齐, 陈银蓉. 城市建设用地扩张与能源消耗碳排放相关效应[J]. *水土保持研究*, 2017, **24**(1): 244-249.
Zhang S Q, Chen Y R. Correlation effect of city construction land expansion and energy consumption carbon emission [J]. *Research of Soil and Water*, 2017, **24**(1): 244-249.
- [9] Zhang M M, Kafy A A, Xiao P N, *et al.* Impact of urban expansion on land surface temperature and carbon emissions using machine learning algorithms in Wuhan, China [J]. *Urban Climate*, 2023, **47**, doi: 10.1016/J.UCLIM.2022.101347.
- [10] Zhao J C, Liu Q Q. Examining the driving factors of urban residential carbon intensity using the LMDI method: evidence from China's county-level cities [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, **18**(8), doi: 10.3390/IJERPH18083929.
- [11] Liu G, Zhang F. How do trade-offs between urban expansion and ecological construction influence CO₂ emissions? New evidence from China [J]. *Ecological Indicators*, 2022, **141**, doi: 10.1016/J.ECOLIND.2022.109070.
- [12] 邢梓涵, 李晓燕, 石振宇, 等. 辽中南城市群城市扩张及其碳排放效应[J]. *自然资源遥感*, 2022, **34**(4): 272-279.
Xing Z H, Li X Y, Shi Z Y, *et al.* Urban expansion and carbon emission effect of the urban agglomeration in south-central Liaoning Province [J]. *Remote Sensing for Natural Resources*, 2022, **34**(4): 272-279.
- [13] Cai M, Shi Y, Ren C, *et al.* The need for urban form data in spatial modeling of urban carbon emissions in China: a critical review[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, **319**, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.128792.
- [14] 李莎, 邹滨, 刘宁, 等. 面向二/三维城市形态指标的 PM_{2.5} 浓度调控模拟[J]. *环境科学*, 2022, **43**(9): 4425-4437.
Li S, Zou B, Liu N, *et al.* Simulation of PM_{2.5} concentration based on optimized indexes of 2D/3D urban form [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(9): 4425-4437.
- [15] 杨浩, 卢新海, 匡兵, 等. 城市紧凑度与碳排放强度的时空互动关系及驱动因素——以长株潭城市群为例[J]. *长江流域资源与环境*, 2021, **30**(11): 2618-2629.
Yang H, Lu X H, Kuang B, *et al.* Spatial-temporal interaction and driving factors of urban compactness and carbon emission intensity: a case study in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2021, **30**(11): 2618-2629.
- [16] Shi K F, Xu T, Li Y Q, *et al.* Effects of urban forms on CO₂ emissions in China from a multi-perspective analysis[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, **262**, doi: 10.1016/j.jenvman.2020.110300.
- [17] Ou J P, Liu X P, Wang S J, *et al.* Investigating the differentiated impacts of socioeconomic factors and urban forms on CO₂ emissions: empirical evidence from Chinese cities of different developmental levels [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, **226**: 601-614.
- [18] 舒心, 夏楚瑜, 李艳, 等. 长三角城市群碳排放与城市用地增长及形态的关系[J]. *生态学报*, 2018, **38**(17): 6302-6313.
Shu X, Xia C Y, Li Y, *et al.* Relationships between carbon emission, urban growth, and urban forms of urban agglomeration in the Yangtze River Delta [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(17): 6302-6313.

- [19] Li Z, Wang F, Kang T T, *et al.* Exploring differentiated impacts of socioeconomic factors and urban forms on city-level CO₂ emissions in China: Spatial heterogeneity and varying importance levels[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2022, **84**, doi: 10.1016/J. SCS. 2022. 104028.
- [20] Shi F C, Liao X, Shen L Y, *et al.* Exploring the spatiotemporal impacts of urban form on CO₂ emissions: Evidence and implications from 256 Chinese cities[J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2022, **96**, doi: 10.1016/J. EIAR. 2022. 106850.
- [21] 袁青, 郭冉, 冷红, 等. 长三角地区县域中小城市空间形态对碳排放效率影响研究[J]. *西部人居环境学刊*, 2021, **36**(6): 8-15.
Yuan Q, Guo R, Leng H, *et al.* Research on the impact of urban form of small and medium-sized cities on carbon emission efficiency in the Yangtze River Delta[J]. *Journal of Human Settlements in West China*, 2021, **36**(6): 8-15.
- [22] Li C L, Li Y Q, Shi K F, *et al.* A multiscale evaluation of the coupling relationship between urban land and carbon emissions: a case study of Chongqing, China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, **17**(10), doi: 10.3390/ijerph17103416.
- [23] 刘畅, 苏筠, 黎玲玲. 中国县域能源消费碳排放估算及其空间分布[J]. *环境污染与防治*, 2020, **42**(1): 113-119.
Liu C, Su Y, Li L L. The estimation and spatial distribution of the carbon emissions of county units in China[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2020, **42**(1): 113-119.
- [24] 宋苑震, 曾坚, 王森, 等. 中国县域碳排放时空演变与异质性[J]. *环境科学*, 2023, **44**(1): 549-559.
Song Y Z, Zeng J, Wang S, *et al.* Spatial-temporal evolution and heterogeneity of carbon emissions at county-level in China[J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(1): 549-559.
- [25] Yan Z, Xia L L, Xiang W N. Analyzing spatial patterns of urban carbon metabolism: a case study in Beijing, China[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2014, **130**: 184-200.
- [26] 夏楚瑜. 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[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
Xia C Y. Multi-scale studies on urban carbon metabolism from the perspective of land use and Scenario analysis of emission reduction[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.
- [27] 曾晓莹, 邱荣祖, 林丹婷, 等. 中国交通碳排放及影响因素时空异质性[J]. *中国环境科学*, 2020, **40**(10): 4304-4313.
Zeng X Y, Qiu R Z, Lin D T, *et al.* Spatio-temporal heterogeneity of transportation carbon emissions and its influencing factors in China[J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(10): 4304-4313.
- [28] 胡怀敏, 左薇, 徐士元. 长江经济带交通能源碳排放脱钩效应及驱动因素研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2022, **31**(4): 862-877.
Hu H M, Zuo W, Xu S Y. Decoupling effect and driving factors of transportation energy carbon emission in Yangtze River Economic Belt[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2022, **31**(4): 862-877.
- [29] 杨文越, 李涛, 曹小曙. 中国交通 CO₂ 排放时空格局演变及其影响因素——基于 2000~2012 年 30 个省(市)面板数据的分析[J]. *地理科学*, 2016, **36**(4): 491-501.
Yang W Y, Li T, Cao X S. The evolution of spatial-temporal characteristics and influence factors of CO₂ emissions from transport in China: a panel data analysis of 30 provinces in China from 2000 to 2012[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2016, **36**(4): 491-501.
- [30] 孙赫, 梁红梅, 常学礼, 等. 中国土地利用碳排放及其空间关联[J]. *经济地理*, 2015, **35**(3): 154-162.
Sun H, Liang H M, Chang X L, *et al.* Land use patterns on carbon emission and spatial association in China[J]. *Economic Geography*, 2015, **35**(3): 154-162.
- [31] 汪浩, 陈操操, 潘涛, 等. 县域尺度的京津冀都市圈 CO₂ 排放时空演变特征[J]. *环境科学*, 2014, **35**(1): 385-393.
Wang H, Chen C C, Pan T, *et al.* County scale characteristics of CO₂ emission's spatial-temporal evolution in the Beijing-Tianjin-Hebei metropolitan region[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(1): 385-393.
- [32] Qian Y, Wang H, Wu J S. Spatiotemporal association of carbon dioxide emissions in China's urban agglomerations[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, **323**, doi: 10.1016/J. JENVMAN. 2022. 116109.
- [33] 于卓卉, 毛世平. 中国农业净碳排放与经济增长的脱钩分析[J]. *中国人口·资源与环境*, 2022, **32**(11): 30-42.
Yu Z H, Mao S P. Analysis of the decoupling of China's agricultural net carbon emissions from its economic growth[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2022, **32**(11): 30-42.
- [34] 陈四瑜, 刘晶茹, 孙光明. 基于脱钩指数的工业园区碳排放与经济发展关系[J]. *环境科学*, 2023, **44**(11): 6412-6420.
Chen S Y, Liu J R, Sun G M. Relationship between carbon emissions and economic development of industrial parks based on decoupling index[J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(11): 6412-6420.
- [35] Cao F J, Qiu Y, Wang Q X, *et al.* Urban form and function optimization for reducing carbon emissions based on crowd-sourced spatio-temporal data[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, **19**(17), doi: 10.3390/IJERPH191710805.
- [36] Zheng S, Huang Y K, Sun Y. Effects of urban form on carbon emissions in China: implications for low-carbon urban planning[J]. *Land*, 2022, **11**(8), doi: 10.3390/LAND11081343.
- [37] 刘贤赵, 张国桥, 杨文涛, 等. 长株潭城市群 PM_{2.5} 和 O₃ 浓度时空分布特征及影响因素分析[J]. *环境科学*, 2022, **43**(12): 5354-5366.
Liu X Z, Zhang G Q, Yang W T, *et al.* Analysis of spatiotemporal distribution characteristics and influencing factors of PM_{2.5} and O₃ in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration, China[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(12): 5354-5366.
- [38] 吴迪, 杜宁, 王莉, 等. 基于 GTWR-XGBoost 模型的四川省 PM_{2.5} 小时浓度估算[J]. *环境科学*, 2023, **44**(7): 3738-3748.
Wu D, Du N, Wang L, *et al.* Estimation of PM_{2.5} hourly concentration in Sichuan province based on GTWR-XGBoost model[J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(7): 3738-3748.
- [39] Liu J G, Li S J, Ji Q. Regional differences and driving factors analysis of carbon emission intensity from transport sector in China[J]. *Energy*, 2021, **224**, doi: 10.1016/J. ENERGY. 2021. 120178.
- [40] 牛亚文, 赵先超, 胡艺觉. 基于 NPP-VIIRS 夜间灯光的长株潭地区县域土地利用碳排放空间分异研究[J]. *环境科学学报*, 2021, **41**(9): 3847-3856.
Niu Y W, Zhao X C, Hu Y J. Spatial variation of carbon emissions from county land use in Chang-Zhu-Tan area based on NPP-VIIRS night light[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, **41**(9): 3847-3856.
- [41] 李键, 毛德华, 蒋子良, 等. 长株潭城市群土地利用碳排放

- 因素分解及脱钩效应研究[J]. 生态经济, 2019, **35**(8): 28-34, 66.
- Li J, Mao D H, Jiang Z L, *et al.* Research on factors decomposition and decoupling effects of land use carbon emissions in Chang-Zhu-Tan urban agglomeration [J]. Ecological Economy, 2019, **35**(8): 28-34, 66.
- [42] Fang C L, Wang S J, Li G D. Changing urban forms and carbon dioxide emissions in China: a case study of 30 provincial capital cities[J]. Applied Energy, 2015, **158**: 519-531.
- [43] Ou J P, Liu X P, Li X, *et al.* Quantifying the relationship between urban forms and carbon emissions using panel data analysis[J]. Landscape Ecology, 2013, **28**(10): 1889-1907.
- [44] 胡顺石, 彭雨龙, 秦建新, 等. 长株潭城市群植被指数动态变化及城市扩展对其影响分析[J]. 经济地理, 2019, **39**(12): 178-186.
- Hu S S, Peng Y L, Qin J X, *et al.* Research on the vegetation index dynamic changes and the impact of urban expansion on it for Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration [J]. Economic Geography, 2019, **39**(12): 178-186.
- [45] 丛建辉. 碳中和愿景下中国城市形态的碳排放影响效应研究——基于289个地级市的数据分析[J]. 贵州社会科学, 2021, (9): 125-134.
- [46] Hong S F, Hui E C M, Lin Y Y. Relationship between urban spatial structure and carbon emissions: a literature review[J]. Ecological Indicators, 2022, **144**, doi: 10.1016/J.ECOLIND.2022.109456.



CONTENTS

Meteorological Impact Assessment of PM _{2.5} and O ₃ Complex Pollution in Key Regions of China Based on Meteorological Conditions Index	YANG Xin, YANG Yuan-qin, LI Hong, <i>et al.</i>	(6433)
Scale Dependence Between PM _{2.5} and Meteorological Factors and Its Influencing Factors in “2+26” Cities	WU Shu-qi, JIN Jian-nan, ZHENG Dong-yang, <i>et al.</i>	(6441)
Chemical Constituents and Sources of PM _{2.5} Around the Wuhan Military Games Period	LIU Shi-hao, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i>	(6452)
Characteristics and Sources of PM _{2.5} Pollution During Winter in Handan City from 2016 to 2020	NIU Hong-ya, GAO Na-na, BAO Xiao-lei, <i>et al.</i>	(6463)
Chemical Compositions and Sources of PM _{2.5} in Weinan City	GUO Jing-ning, LI Xiao-fei, YU Feng, <i>et al.</i>	(6474)
Analysis of Formation Processes and Sources of PM _{2.5} Ammonium During Winter and Summer in Suburban Area of the Yangtze River Delta	XIANG Yan-kun, CAO Fang, ZHANG Wen-qi, <i>et al.</i>	(6486)
Chemical Composition and Characterization of Nitroaromatic Compounds in Urban Areas of Shanghai	YANG Lu, MA Ying-ge, YU Jian-zhen, <i>et al.</i>	(6495)
Source Analysis and Health Risk Assessment of PAHs in PM _{2.5} , Liliang City	MU Ling, LIU Zi-ye, LI Yang-yong, <i>et al.</i>	(6508)
Effect of Biomass Burning on Carbonaceous Aerosol Composition and Light Absorption in Guangxi Regional Background Site	WU Xing-qi, CAO Fang, HONG Yi-hang, <i>et al.</i>	(6518)
Characteristics of Light Absorption, Sources, and Seasonal Variation of Atmospheric Brown Carbon in Northern Nanjing	CHEN Xing-zhou, CUI Shi-jie, ZHANG Yun-jiang, <i>et al.</i>	(6529)
Health Benefit Assessment of Coal-to-electricity Policy on PM _{2.5} Pollution in Beijing-Tianjin-Hebei Region	ZHANG Ru-ting, CHEN Chuan-min, LIU Song-tao, <i>et al.</i>	(6541)
Source Apportionment of Ambient VOCs in Qingdao Based on Photochemical Loss Correction	KONG Cui-li, WU Yu-tong, GU Yao, <i>et al.</i>	(6551)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of VOCs in Urban Areas of Liaocheng in Summer	LI Wan-yong, HUANG Hao-yu, WANG Yan-zhen, <i>et al.</i>	(6564)
Source Analysis of Ozone and Its Precursors in Zibo Based on 3-D Air Quality Model	ZHANG Xin-xin, ZHAO Xiu-ying, HUANG Ling, <i>et al.</i>	(6576)
Spatio-temporal Characteristics and Influencing Factors of Ozone Suppression Events Under High Temperature in China	OU Lin-chong, CHEN Wei-hua, WU Yong-kang, <i>et al.</i>	(6586)
Review of UAV-based Atmospheric Fine Particulate Matter and Ozone Pollution Detection and Source Localization	QU Ya-wei, WANG Ti-jian, YUAN Cheng, <i>et al.</i>	(6598)
Health Impact Analysis of Fine Particulate Pollution from Vehicles in the Beijing-Tianjin-Hebei Region	HAO Yong-pei, SONG Xiao-wei, ZHU Xiao-dong, <i>et al.</i>	(6610)
Assessment of Emission Reduction Potential of CO ₂ Capture, Geological Utilization, and Storage in Cement Industry of China	WEI Ning, LIU Sheng-nan, WEI Feng, <i>et al.</i>	(6621)
Life Cycle Carbon Emission Accounting and Emission Reduction Potential Assessment of Steel Industry	SONG Xiao-cong, DU Shuai, DENG Chen-ning, <i>et al.</i>	(6630)
Evolution Characteristics and Driving Forces of Carbon Dioxide Emissions and Sinks in the Pearl River Delta Region, China	HU Jing-xin, SHA Qing-e, LIU Hui-lin, <i>et al.</i>	(6643)
Impact of Accelerated Electrification Under the Low Carbon Path in Dongguan City on the Coordinated Emission Reduction of CO ₂ and Pollutants	WU Le-min, CHEN Bing-yin, OU Lin-chong, <i>et al.</i>	(6653)
Relationship Between Urbanization and Carbon Emissions in the Chang-Zhu-Tan Region at the County Level	LIU Xian-zhao, LI Yang, <i>et al.</i>	(6664)
Characteristics and Influencing Factors of Greenhouse Fluxes from Urban Lawn	CHEN Li-han, LIU Shuo, LIN Yi, <i>et al.</i>	(6680)
Dual-Perspective Analysis of the Warming Effect of the Methane Emissions from Animal Husbandry in China	LIU Shu-le, YAN Wei, CAO Qing-xian, <i>et al.</i>	(6692)
Pollution Level and Risk Assessment of OPEs in Typical River Basins of China	ZHAO Jiang-lu, LU Hai-jian, LÜ Jia-pei, <i>et al.</i>	(6700)
Soil Heavy Metal Contamination, Sources, and Health Risk of Typical Drinking Water Sources in the Suspended Reach of the Lower Yellow River	PENG Chao-yue, REN Chong, SHEN Hao-xin, <i>et al.</i>	(6710)
Fraction Characteristic and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of the Yellow River Mainstream	WANG Yi-di, OUYANG Wei, LIU Lian-hua, <i>et al.</i>	(6720)
Influence of Land Use Structure and Spatial Pattern on Water Quality of Small and Medium-sized Rivers in Poyang Lake Basin	WEN Jia-wei, WANG Peng, HUANG Gao-xiang, <i>et al.</i>	(6728)
Water Environment Characteristics and Water Quality Assessment of Typical Lakes in Inner Mongolia	WANG Xin-yuan, PAN Bao-zhu, WANG Li-xin, <i>et al.</i>	(6744)
Relationship Between Precipitation, River Water, and Groundwater Conversion in the Upper Reaches of Xilin River During the Rainy Season	SUN Jin, WANG Yi-xuan, YANG Lu, <i>et al.</i>	(6754)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Groundwater in the Northwest Salt Lake Basin	YAN Yan, GAO Rui-zhong, LIU Ting-xi, <i>et al.</i>	(6767)
Groundwater Pollution Risk Assessment in Plain Area of Barkol-Yiwu Basin	LIU Yu, ZENG Yan-yan, ZHOU Jin-long, <i>et al.</i>	(6778)
Bisulfite Promoted Minute Fe ²⁺ -Activated Peroxydisulfate for Paracetamol Degradation	MO Xi-ting, NIE Shu-hua, YAN Cai-xia, <i>et al.</i>	(6790)
Degradation of Ciprofloxacin by Activating Peroxymonosulfate with Sludge Biochar	ZHENG Da-yang, ZOU Jia-li, XU Hao, <i>et al.</i>	(6801)
Adsorption of Iopamidol by NaHCO ₃ -activated Buckwheat Biochar	WEI Hong, ZHAO Jiang-juan, JING Li-ming, <i>et al.</i>	(6811)
Preparation of Bamboo-based N, P Co-doped Activated Carbon and Its Lanthanum Ion Adsorption Performance	WANG Gui-long, LIU Yan-yan, JIANG Rong-yuan, <i>et al.</i>	(6823)
Analysis of Vegetation Change and Influencing Factors in Southwest Alpine Canyon Area	LAI Jin-lin, QI Shi, CUI Ran-ran, <i>et al.</i>	(6833)
Effect of Biochar on Agricultural Soil Aggregates and Organic Carbon: A Meta-analysis	MENG Yan, SHEN Ya-wen, MENG Wei-wei, <i>et al.</i>	(6847)
Carbon Cycling Processes in Croplands and Their Quantification Methods	SUN Zhao-an, ZHU Biao, <i>et al.</i>	(6857)
Effects of Biochar Application on Soil Organic Carbon Component in <i>Eucalyptus</i> Plantations After Five Years in Northern Guangxi	MOU Zhi-yi, SHEN Yu-yi, CAO Yang, <i>et al.</i>	(6869)
Evolution Characteristics of Soil Active Organic Carbon and Carbon Pool Management Index Under Vegetation Restoration in Karst Area	CAI Hua, SHU Ying-ge, WANG Chang-min, <i>et al.</i>	(6880)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Typical Antibiotics in Environmental Media in China	CHEN Li-hong, CAO Ying, LI Qiang, <i>et al.</i>	(6894)
Spatial Prediction Modeling for Soil pH Based on Multiscale Geographical Weighted Regression (MGWR) and Its Influencing Factors	ZHAO Ming-song, CHEN Xuan-qiang, XU Shao-jie, <i>et al.</i>	(6909)
Characteristics and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Farmland Around a Coal-fired Power Plant	ZHANG Jun, LI Xu, LIU Lei-yu, <i>et al.</i>	(6921)
Characteristics of Soil Pollution and Source Analysis of Typical Pollutants in the Petrochemical Site	ZHANG Yu-rong, LUO Shuai, CHEN Yuan, <i>et al.</i>	(6933)
Characteristics of Antibiotic Resistance Genes Distribution in Different Types of Agricultural Land Soils in Highly Cultivated Hilly Areas	CHEN Rui, CHENG Jian-hua, TANG Xiang-yu, <i>et al.</i>	(6947)
Effects of Organic Fertilizer Combined with Biochar on Denitrifying Microorganisms and Enzyme Activities in Orchard Soil	DENG Zheng-xin, GAO Ming, XIONG Zi-yi, <i>et al.</i>	(6955)
Effects of Organic Fertilization on Bacterial Community and Maize Productivity in Dryland Red Soil	LIN Ting-ting, ZHENG Jie, ZHU Guo-fan, <i>et al.</i>	(6965)
Effects of Combined Pollution of Microplastics and Cadmium on Microbial Community Structure and Function of <i>Pennisetum hybridum</i> Rhizosphere Soil	DUAN Li-yang, ZHANG Yu, REN Xue-min, <i>et al.</i>	(6973)
Effects of Tomato Planting Years on Soil Physical and Chemical Properties and Microbial Communities	ZHAO Yang-yang, LIU Yin-shuang, SONG Yao, <i>et al.</i>	(6982)
Remediation of Three Oxidants on Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Coking Contaminated Soil and Its Response to Indigenous Microorganisms	LI Wei, WANG Hua-wei, MENG Xiang-yu, <i>et al.</i>	(6992)
Microbial Diversity and Population Structure of Different Salinized Soil Types in Hebei Province	LIU Yin-shuang, NIU Hong-jin, ZHAO Yang-yang, <i>et al.</i>	(7004)
Functional Genomics Analysis of Nitrogen and Phosphorus Transformation in Maize Rhizosphere Microorganisms	WANG Xiang-jun, JIANG Mei-tong, LI Sen, <i>et al.</i>	(7014)
Remediation of Soil Cadmium Contamination by <i>Solanum nigrum</i> L. Enhanced by the Combination of Exogenous Bacteria and Citric Acid	WANG Kai, WANG Li, WANG Yi-kun, <i>et al.</i>	(7024)
Effect of Combined Application of an <i>Enterobacter</i> and Sulfur Fertilizer on Cadmium and Arsenic Accumulation in Rice	ZHANG Pu-xin, YAO Jun-fan, LIU Yu-ling, <i>et al.</i>	(7036)