

目 次

中国城市碳排放强度的时空演变、动态跃迁及收敛趋势	杨清可, 王磊, 朱高立, 李颖, 范业婷, 王雅竹 (1869)
交通运输业碳排放效率时空演变及趋势预测	郑琰, 蒋雪梅, 肖玉杰 (1879)
基于扩展 STIRPAT 模型 LMDI 分解的碳排放脱钩因素	张江艳 (1888)
基于 LEAP 模型的工业园区碳达峰路径: 以南京某国家级开发区为例	李慧鹏, 李荔, 殷茵, 何文大, 宿杰, 赵秋月 (1898)
高校碳排放核算与分析: 以北京 A 高校为例	曹睿, 封莉, 张立秋 (1907)
北京市制造业减排降碳协同效应分析和驱动因素	俞珊, 韩玉花, 牟洁, 张双, 张增杰 (1917)
碳排放权交易价格与全要素生产率: 来自中国的证据	吴雪萍 (1926)
中国城市 PM _{2.5} 和 PM ₁₀ 时空分布特征和影响因素分析	李江苏, 段良荣, 张天娇 (1938)
2017~2021 年苏皖鲁豫交界区域 PM _{2.5} 和 O ₃ 时空变化特征及影响因素	陈伟, 徐学哲, 刘文清 (1950)
疫情管控期西安 PM _{2.5} 和 O ₃ 污染特征及成因分析	原晓红, 张强, 李琦, 谢文豪, 刘跃廷, 樊亭亭, 姜旭朋 (1963)
苏南五市秋冬季 PM _{2.5} 化学组成特征和空间差异	冯蔚, 丁峰, 尚玥, 谢鸣捷 (1975)
湖北咸宁细颗粒物 PM _{2.5} 来源	罗怡, 朱宽广, 陈璞琰, 田军, 谢旻, 战杨志豪, 赵润琪 (1983)
邢台氨减排对京津冀 PM _{2.5} 改善的溢出效益	边泽君, 闻超玉, 郎建奎, 范晓茜, 夏祥晨, 周颖 (1994)
聊城市冬季 PM _{2.5} 载带金属元素污染特征、风险评价及来源分析	张敬巧, 朱瑶, 曹婷, 燕丽, 王淑兰, 刘铮 (2003)
高原城市拉萨典型 VOCs 排放源成分谱特征	郭淑政, 叶春翔, 林伟立, 陈熠, 曾立民, 尹晴晴, 刘雪莉 (2011)
北京市工业园区 VOCs 污染特征及健康风险评估案例: 高新技术产业的环境影响	王洁, 姚震, 王敏燕, 陈速敏, 龙腾, 王海林, 李红, 郭秀锐, 郝江虹, 聂磊 (2019)
高温极端天气影响下的成都平原一次典型臭氧污染过程分析	雷丽娟, 张懿, 罗伊娜, 张潇, 冯森 (2028)
水环境中抗病毒药物的存在、行为与风险	葛林科, 李璇艳, 曹胜凯, 郑金帅, 张蓬, 朱超, 马宏瑞 (2039)
黄河小浪底水库地表水中重金属的时空变化与概率健康风险	王亮, 邓雪娇, 王潇磊, 李明, 刘奕尧, 姜亚敏, 涂响, 张坤峰 (2054)
藏东多曲河流域总富集水化学特征及控制因素	李敬杰, 连晟, 王明国, 张智印, 张涛 (2067)
西北内陆区降水稳定同位素时空分布特征及其水汽来源	张炎炎, 辛存林, 郭小燕, 张博, 陈宁, 史延飞 (2080)
基于水化学和氢氧同位素的泰安城区岩溶地下水补给来源及演化过程	孟令华 (2096)
丹江流域山区地表水-地下水水化学特征及其影响因素	张子燕, 伏永朋, 王宁涛, 谭建民, 刘亚磊 (2107)
金塔盆地鸳鸯池灌区地下水水化学特征及控制因素	王晓燕, 韩双宝, 张梦南, 尹德超, 吴玺, 安永会 (2118)
德阳市平原区浅层地下水水化学特征与健康风险评价	刘楠, 陈盟, 高东东, 吴勇, 王橹橹 (2129)
典型城市河网沉积物微塑料时空分布特征	许万璐, 范一凡, 钱新 (2142)
抚仙湖流域尺度氮排放清单构建及关键源解析	王延杰, 梁启斌, 王艳霞, 侯磊, 陈奇伯, 王伟, 李晓琳, 高俊淑 (2150)
过氧化钙/海泡石海藻酸钠缓释凝胶复合材料的制备及其对内源磷的控制性能	曲思彤, 单苏洁, 王崇铭, 吴玲予, 李大鹏, 黄勇 (2160)
矿物超细颗粒的形成机制、结构特征及其环境行为和效应	刘振海, 张展华, 袁语欣, 朱盼盼, 陈威, 张勇 (2171)
生物炭固定化菌复合材料在环境修复中的应用研究进展	孙淑玉, 黄梦鑫, 孔强, 张焕新, 刘继伟 (2185)
微塑料对沸石吸附水体氨氮的影响及其机制	练建军, 谢诗婷, 吴培, 孟冠华, 陈波 (2195)
紫外老化作用对纳米生物炭吸附环丙沙星的影响机制	马锋锋, 薛之一, 赵保卫 (2203)
土地利用影响下永定河流域浮游植物群落与环境因子响应	郭善嵩, 胡恩, 丁一桐, 张嘉渭, 孙长顺, 卢悦, 潘保柱 (2211)
鄱阳湖湿地细菌群落多样性和可培养细菌功能基因丰度	喻江, 王淳, 龙永, 刘贵花, 李春杰, 范国权, 于镇华 (2223)
典农河沉积物细菌群落结构特征及其与重金属的关系	刘双羽, 蒙俊杰, 邱小琮, 周瑞娟, 李霖 (2233)
污水处理厂尾水排放对受纳河流细菌和真菌微生物群落的影响	郭有顺, 余仲, 郝文彬, 孟凡刚 (2246)
宏基因组学分析深度处理阶段污水中细菌的赋存特征及其功能	胡健双, 王燕, 周政, 汪雅琴, 王秉政, 李激 (2259)
大别山区生境质量时空特征及自然-人为因素驱动机制	郑亚平, 张俊华, 田惠文, 朱航成, 刘舒, 丁亚鹏 (2268)
基于连续小波变换、SHAP 和 XGBoost 的土壤有机质含量高光谱反演	叶森, 朱琳, 刘旭东, 黄勇, 陈蓓蓓, 李欢 (2280)
秸秆还田、覆膜和施氮对旱地麦田土壤质量的影响	叶子壮, 王松燕, 陆潇, 史多鹏, 吕慎强, 李嘉, 杨泽宇, 王林权 (2292)
长期施用有机肥对土壤微塑料赋存及迁移特征的影响	王长远, 马啸驰, 郭德杰, 刘新红, 马艳, 罗佳 (2304)
土壤盐分变化对 N ₂ O 排放影响: 基于 Meta 分析	黄艺华, 余冬立, 史祺琦, 胡磊, 潘永春 (2313)
基于土地利用/覆被动态变化的粤港澳大湾区碳储量评价与预测	郑慧玲, 郑辉峰 (2321)
基于 InVEST 模型的伏牛山地区生态系统碳储量时空变化模拟	张哲, 时振钦, 朱文博, 孙梓欣, 赵体侠, 邓文萍, 刘志强 (2332)
防护林建设过程中土壤微生物养分限制与有机碳组分之间的关系	徐凤璟, 黄懿梅, 黄倩, 申继凯 (2342)
长期秸秆还田褐土有机碳矿化特征及其驱动力	赵宇航, 殷浩凯, 胡雪纯, 解文艳, 刘志平, 周怀平, 杨振兴 (2353)
冬绿肥覆盖对土壤团聚体及有机碳和 AMF 多样性的影响	鲁泽让, 陈佳钰, 李智贤, 李永梅, 罗志章, 杨锐, 田明洋, 赵吉霞, 范茂攀 (2363)
辽河流域氮素时空分布及其对土地利用和降雨的响应	周波, 李晓光, 童思陈, 吕旭波, 郭朝臣, 雷坤 (2373)
高强度农业种植区不同景观池塘氧化亚氮排放特征	张欣悦, 肖启涛, 谢晖, 刘臻婧, 邱银国, 罗菊花, 徐向华, 段洪涛 (2385)
生物炭与不同类型氮肥配施对菜地土壤反硝化细菌群落的影响	柳晓婉, 刘杏认, 高尚洁, 李贵春 (2394)
太岳山不同林龄人工油松林土壤微生物特征	马义淑, 曹亚鑫, 牛敏, 张明昱, 程曼, 文永莉 (2406)
基于稀疏样点的土壤重金属含量模拟方法	张佳琦, 潘瑜春, 高世臣, 赵亚楠, 景胜强, 周艳兵, 邹允兵 (2417)
基于特定源-风险评估模型的兰州黄河风情线绿地土壤重金属污染优先控制源分析	李军, 李旭, 李开明, 焦亮, 台喜生, 臧飞, 陈伟, 脱新颖 (2428)
西南不同类型紫色土 pH 变化、重金属累积与潜在生态风险评估	张海琳, 张雨, 王顶, 谢军, 张跃强, 张宇亭, 王洁, 石孝均 (2440)
重庆某铁矿区周边耕地土壤重金属污染评价及来源解析	廖泽源, 李杰芹, 沈智杰, 李彩霞, 罗程钟, 梅楠, 张成, 王定勇 (2450)
金属矿区周边农田土壤与农作物重金属健康风险评估	魏洪斌, 罗明, 向奎, 查理思 (2461)
赤泥基纳米零价铁对多金属污染土壤修复效果	刘龙宇, 杨世利, 赵黄诗雨, 常凯威, 余江 (2473)
施锌对碱性土壤-小麦幼苗体系累积镉的影响	张瑶, 王天齐, 牛硕, 杨阳, 陈卫平 (2479)

中国城市碳排放强度的时空演变、动态跃迁及收敛趋势

杨清可¹, 王磊^{2*}, 朱高立¹, 李颖¹, 范业婷¹, 王雅竹²

(1. 南京财经大学公共管理学院, 南京 210023; 2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

摘要: 合理控制城市碳排放强度对于中国实现碳达峰、碳中和目标愿景以及应对气候变化的意义重大。采用夜间灯光数据反演得到2001~2020年城市碳排放量, 测算碳排放强度, 并对城市碳排放强度的时空演变、动态跃迁及收敛趋势进行研究。结果表明: ①中国城市碳排放强度持续下降, 从2001年的2.79 t·万元⁻¹降至2020年的0.88 t·万元⁻¹, 年均降幅5.94%。各大区域城市碳排放强度的差距存在收敛特征。空间分布上, 城市碳排放强度的高值区集中在东北地区, 以及内蒙古、宁夏和陕西等地, 南北地区差异拉大, 中南部与东部地区的碳排放强度降幅明显, 高低集聚层次分明。②中国城市碳排放强度的 global Moran's I 较高, 均值为0.436, 空间自相关性显著。碳排放强度以城市自身与邻域城市均未发生跃迁的类型为主, 不同类型间时空跃迁的概率较低, 凝聚度指数高达82.57%。跃迁类型的稳态较高, 碳排放强度的时空演变存在空间锁定效应和“俱乐部趋同”现象。③城市碳排放强度的 σ 收敛不显著, 但存在绝对 β 收敛和条件 β 收敛。绝对 β 收敛速度差异明显, 全国的收敛速度为3.137%。东部和西部地区的收敛速度略低, 分别仅有3.043%和3.050%。④条件 β 收敛速度有所加快。东部地区增幅最大, 为3.772%; 东北地区的收敛速度提升小, 仅有0.098%; 中部和西部的收敛速度增长处于中间水平, 分别为0.486%和0.661%。人均GDP提升、人口空间集聚和外资引进带来低碳技术的变革、财政资金对R&D的投入倾斜促进了碳排放强度的空间收敛。

关键词: 城市碳排放强度; 时空演变; 动态跃迁; 空间收敛

中图分类号: X24 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)04-1869-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202305134

Spatio-temporal Evolution, Dynamic Transition, and Convergence Trend of Urban Carbon Emission Intensity in China

YANG Qing-ke¹, WANG Lei^{2*}, ZHU Gao-li¹, LI Ying¹, FAN Ye-ting¹, WANG Ya-zhu²

(1. School of Public Administration, Nanjing University of Finance & Economics, Nanjing 210023, China; 2. Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: Rational control of urban carbon emission intensity was of great significance for China to achieve the goal of carbon peak and carbon neutrality, to combat tackle climate change. This study used nighttime lighting data to invert urban carbon emissions in China from 2001 to 2020, calculated carbon emission intensity, and used spatial autocorrelation and convergence test models to study the spatiotemporal evolution, dynamic transition, and convergence trend of urban carbon emission intensity in China. The results showed that: ① during the research period, urban carbon emission intensity in China continued to decrease, from 0.279 tons per thousand yuan in 2001 to 0.088 tons per thousand yuan in 2020, with an average annual decrease of 5.94%. There was a convergence characteristic in the differences in carbon emission intensity among major regional cities. In terms of spatial distribution, the high value areas of urban carbon emission intensity were concentrated in provinces such as Northeast China, Inner Mongolia, Ningxia, and Shaanxi. The difference between the northern and southern regions was widening, and carbon emission intensity in the central, southern, and eastern regions had decreased significantly, with clear levels of high and low agglomeration. ② The global Moran's I of carbon emission intensity in Chinese cities was relatively high, with an average of 0.436, indicating significant spatial autocorrelation. The probability of spatio-temporal transition between different types was relatively low, with a spatial cohesion index of 82.57%. The spatial stability of the transition type was relatively high, and there was a spatial locking effect and 'club convergence' phenomenon in the spatiotemporal evolution of carbon emission intensity. ③ The σ convergence in China and the four major regions was not significant, but absolute β convergence and conditions of β convergence existed. The convergence speed of absolute β was different, and the rate of convergence nationwide was 3.137%. The rate of convergence in the eastern and western regions was slightly lower, at only 3.043% and 3.050%, respectively. The frequent flow of factors such as people, funds, and information in the western region led to a higher convergence rate of urban carbon emission intensity. ④ The rate of conditional β convergence had accelerated. The growth rate in the eastern region was the highest, at 3.772%. The rate of convergence in Northeast China increased slightly, only by 0.098%. The growth rate of convergence in the central and western regions was in the middle range, at 0.486% and 0.661%, respectively. The impact of factors such as economic level, industrial structure, population density, foreign investment, scientific research investment, and road network density on urban carbon emission intensity showed significant heterogeneity. The increase in per capita GDP, population spatial agglomeration, and the transformation of low-carbon technologies brought about by foreign investment, as well as the inclination of fiscal investment in R&D, all had a positive effect on the convergence of urban carbon emission intensity.

Key words: urban carbon emission intensity; spatio-temporal evolution; dynamic transition; spatial convergence

2020年9月22日, 国家主席习近平在第七十五届联合国大会上宣布中国2030年碳排放的达峰目标

收稿日期: 2023-05-15; 修订日期: 2023-07-07

基金项目: 国家社会科学基金项目(22FGLB021); 国家自然科学基金项目(42001225, 42201317); 江苏省优秀青年基金项目(BK20200109)

作者简介: 杨清可(1988~), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为城市碳排放和土地利用与规划, E-mail: yangqingke66@163.com

* 通信作者, E-mail: wanglei@niglas.ac.cn

与2060年碳中和愿景,提出我国碳减排的时间计划表,展现中国气派和大国担当.2021年12月中央经济工作会议进一步明确为“实现能耗‘双控’向碳排放总量和强度‘双控’转变”创造有利条件.减排降碳工作成为当前社会发展中的优先事项,尤其是城市碳排放作为造成温室效应的关键原因^[1],通过改变能源消费结构和人类活动强度影响不同城市空间承载的自然和人为碳排放过程^[2,3].此外,城市作为人类活动的空间载体,消耗大量化石能源,碳排放总量相较于工业革命前提升明显,对全球生态多样性和环境保护造成诸多负面影响^[4,5].因此,探究中国城市碳排放强度的时空演变、动态跃迁与收敛趋势有助于从基础层面评估人类活动对环境的影响程度,也是推动低碳转型和可持续发展的重大战略需求,已然成为政府和学界共同关注的焦点^[6,7].

城市碳排放强度指单位GDP上的碳排放量,是衡量经济增长与污染排放相互联系的重要指标^[8].相较于碳排放绩效或者碳排放总量,采用碳排放强度来表征节能减排目标对城市可持续发展更具现实意义^[9,10].目前城市碳排放量数据在我国尚无专业机构发布,如要开展碳排放强度相关研究,还需对碳排放总量进行核算.当前主要核算方法为指数分解法,是指不同类型能源的消耗量与碳排放系数相乘,累加求和得到城市碳排放总量^[11,12].同时,也有研究运用考虑非参数距离函数的生产分解法^[13],以及投入产出法等^[14].通过核算碳排放总量得到城市碳排放强度,探究不同区域和不同类型城市碳排放强度的动态演变特征^[15-17].当前有关城市碳排放强度的成果较多,内容涉及碳排放强度的测算、时空特征和空间相关性,以及影响机制等^[18].尤其在碳排放的时空演进方面,不少学者引入收敛理论和空间模型开展研究^[19,20].其中,核密度估计法能够精细化地反映数据动态演变特征,刻画碳排放绩效和强度的趋势变化^[18,21].在研究方法上,泰尔指数、变异系数和空间自相关(全局Moran's I 指数和局部 G 系数)等常被学者们采用来表征碳排放强度的空间差异,如潘竞虎等^[22]基于泰尔指数对中国省际碳排放强度差异进行研究,发现碳排放强度在省域之间存在差异且不断升高,但区域内部差异却逐年下降,区域间差异对总体差异的贡献最大.张卓群等^[10]从国家深入实施区域重大战略角度出发,采用Dagum基尼系数及其分解法测算区域碳排放强度的差异,运用变异系数和空间面板模型开展 σ 收敛和 β 收敛分析,探究全国碳排放强度的区域差异和动态演进.STIRPAT模型因综合考虑空间差异和自相关性而被较多采用,解析我国省域碳排放强度的空间依赖

性,评估能源强度、人口布局和产业发展等因素对碳排放强度的影响程度^[23,24].再者,研究尺度涉及国家、省域和市域等不同空间尺度单元,而区域的划分也多是依据经验判断进行分类,比如中国六大经济区、沿海地区和内陆地区、东中西部地区等^[25-27].相较于省域研究,城市尺度上的研究主要是基于Landsat TM影像解译数据,构建碳排放和面板分位数回归模型,从经济贡献力、生态承载力及二者的耦合关系探讨城市碳排放的空间异质性^[28,29].此外,城市空间被地理学家认为是社会经济发展的承载体,也是碳排放的重要来源,低碳城市建设成为碳减排的关键^[30-32].因此,在城市尺度上开展碳排放强度研究的重要性越发凸显.

综上,城市碳排放强度的相关研究逐渐受到关注,但对该领域的研究还需拓展.第一,对城市碳排放量核算的主流方法依赖不同类型的能源消费数量,而城市尺度上的能源消费数据较为匮乏,很难准确测算城市碳排放总量.第二,通过不同类型能源的消费总量和碳排放系数相乘累加得到的结果精度不足,部分城市碳排放量与实际偏差较大.第三,在碳排放强度特征分析中多采用统计计量模型开展收敛性检验,但从空间角度对城市碳排放强度的动态跃迁与收敛性研究还需强化.鉴于此,本文首先采用夜间灯光遥感数据反演得到城市碳排放数据,整理得到2001~2020年中国284个地级以上城市碳排放强度,探究其时空演变情况.其次,运用空间自相关、时空跃迁矩阵等方法在城市尺度下刻画碳排放的动态跃迁特征,丰富城市碳排放强度时序演变在不同空间尺度上的差别化认识.最后,构建空间杜宾模型探究城市碳排放强度的收敛趋势,识别关键影响因素,以期有针对性的制定城市发展的减排降碳政策,也为加快碳达峰、碳中和步伐提供参考.

1 材料与方法

1.1 研究区

作为人类活动的集中区域,城市空间承载各项社会经济活动,成为碳排放的重要地区,城市低碳发展也是实现全球节能减排目标的重要途径^[33,34].同时,许多国家和地区将城市作为实施减排措施的关键落脚点,着力推进低碳城市建设^[35,36].因此,本文以城市作为研究单元,具体以2013年的城市行政边界范围为准开展数据整理.由于部分城市统计数据的缺失且不包含西藏和港澳台地区,使得本研究中地级及以上城市数量为284个,涉及全国30个省级行政单元.

1.2 数据来源

2001~2020 年 DMSP/OLS 和 NPP/VIIRS 夜间灯光数据来自美国国家海洋和大气管理局 (National Oceanic and Administration) 下属的国家地球物理数据中心 (National Geophysical Data Center). 其他数据来自历年中国城市统计年鉴、中国城市建设统计年鉴, 以及各市的国民经济和社会发展统计公报. 其中, 涉及价格的部分变量以 2001 年为基期, 采用城市 GDP 的平减指数进行处理. 实际使用外资金额选用当年平均汇率进行美元和人民币之间的换算. 部分缺失数据运用滑动平均法和趋势外推法进行插补.

1.3 研究方法

1.3.1 城市碳排放强度的核算

城市碳排放是指城市空间承载区域生产、生活活动而形成的碳排放, 主要包括人类呼吸、工业生产与能源消费等过程产生的碳排放^[3,37,38]. 因此, 鉴于使用各类能源数量和排放系数相乘间接估算的碳排放量存在的潜在问题, 也为避免因城市能源结构与强度差异带来碳排放计算产生的较大误差, 本文城市碳排放量是通过夜间灯光数据反演得到.

具体处理步骤为: 首先, 选取两种夜间灯光遥感数据 (DMSP/OLS 和 NPP/VIIRS), 对其进行连续性校正和对数变换, 之后对 2 种数据进行过饱和校正和一致性校正, 建立 2001~2020 年长时间序列夜间灯光遥感数据, 并提取城市范围内的夜间灯光总值. 其次, 采用粒子群优化-反向传播算法统一空间尺度, 开展匹配对照分析, 验证城市碳排放量与夜间灯光亮度的相关性, 定量构建两者之间的拟合联系和碳排放反演模型, 据此整理得到城市碳排放量^[39,40]. 最后, 为了检测数据的精度, 比较模拟值与统计值的差异发现, CO₂ 模拟值与统计值的平均相对误差为 4.72%, 表明基于夜间灯光数据模拟城市碳排放总量的精度较高.

GDP 数据采用全市统计口径, 收集自历年《中国城市统计年鉴》, 缺失值由各城市国民经济和社会发展统计公报中的数据予以补全. 因此, 城市碳排放强度 (carbon emission intensity, CEI) 的测算公式为:

$$CEI_{it} = \frac{\text{CarbonEmission}_{it}}{\text{GDP}_{it}} \quad (1)$$

式中, CEI_{it} 为城市 i 在 t 年的碳排放强度, $\text{CarbonEmission}_{it}$ 为城市 i 在第 t 年的碳排放量, GDP_{it} 为城市 i 在第 t 年的国民生产总值.

1.3.2 空间自相关检验

考虑城市碳排放强度的时序演变及动态跃迁特征, 学者们多采用全域空间相关性 (global Moran's I)

和局部空间自相关 (local Moran's I) 开展进行空间自相关检验^[41]. 其中, 全域空间相关性是检验整个区域中邻近地区间的相似和相异 (空间正相关和负相关) 特征, 公式为:

$$\text{global Moran's } I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n \mathbf{W}_{ik} (x_i - \bar{x})(x_k - \bar{x})}{S^2 \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n \mathbf{W}_{ik}} \quad (2)$$

式中, x_i 为城市碳排放强度, $\bar{x}$ 和 S^2 分别为碳排放强度的均值和方差, $\mathbf{W}_{ik}$ 为空间权重矩阵, 表示第 i 个城市和 k 个城市在空间上的邻接情况. global Moran's I 的取值范围是 $[-1, 1]$, 当结果接近 1 时, 表示碳排放强度相似的值在空间上集聚; 当结果接近 -1 时, 表示碳排放强度相异的值在空间上集聚; 当结果接近 0 时, 表示碳排放强度的值随机分布, 或不存在空间自相关性. 全域空间相关性未能涉及局部城市碳排放强度在空间上的非典型特征, 而局部空间自相关检验弥补了此种不足. 其中, 多数学者采用局部 Moran's I 指数进行表征, 它从微观视角判断城市之间的空间相关性, 公式为^[42]:

$$\text{local Moran's } I = \frac{(x_i - \bar{x}) \sum_{k=1}^n \mathbf{W}_{ik} (x_k - \bar{x})}{S^2} \quad (3)$$

local Moran's I 的取值范围是 $[-1, 1]$, 当结果为正, 表示城市碳排放强度存在高高或低低 (周围相似性) 的空间集聚; 当结果为负, 表示城市碳排放强度存在高低或低高 (周围非相似性) 的空间集聚.

1.3.3 收敛检验模型

收敛检验模型不仅用于解释经济发展特征, 在绿色创新效率^[43]和碳生产率变动^[44]等方面也得到普遍应用, 研究效果良好. 因此, 本文采用收敛检验模型应用于中国城市碳排放强度的动态演化分析, 探索推进“碳达峰和碳中和”战略时, 碳排放强度趋势变化的可能收敛状态. σ 收敛和 β 收敛是当前常用的检验模型. 其中, 本文采用变异系数表征 σ 收敛, 观察城市碳排放强度的离差随时间演进是否会出现下降的收敛特征, 公式为:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_j} (\text{CEI}_{ij} - \overline{\text{CEI}}_j)^2}{N_j \overline{\text{CEI}}_j}} \quad (4)$$

式中, CEI_{ij} 为区域 j 内城市 i 的碳排放强度, $\overline{\text{CEI}}_j$ 为区域 j 内城市碳排放强度的均值, N_j 为区域 j 内的城市个数.

β 收敛是指城市碳排放强度的高值区会有更大降幅, 与碳排放强度较低城市的差距缩小至同一稳

定状态. 它又可分为绝对 β 收敛和条件 β 收敛等两种类型. 其中, 绝对 β 收敛检验没有考虑外界社会经济发展因素, 城市间存在趋同的发展趋势, 而条件 β 收敛则是考虑外界控制因素, 城市碳排放强度最终收敛到趋同状态. 公式为:

$$\ln\left(\frac{CEI_{i,t+1}}{CEI_{it}}\right) = \alpha + \beta \ln(CEI_{it}) + \mu_i + \eta_t + \varepsilon_{it} \quad (5)$$

考虑到城市碳排放强度的空间特征, 在进行收敛分析时需将空间效应纳入研究范畴, 构建绝对 β 收敛检验的空间杜宾模型 (SDM), 公式为:

$$\ln\left(\frac{CEI_{i,t+1}}{CEI_{it}}\right) = \alpha + \beta \ln CEI_{it} + \rho W_{ij} \ln\left(\frac{CEI_{i,t+1}}{CEI_{it}}\right) + \theta W_{ij} \ln CEI_{it} + \mu_i + \eta_t + \varepsilon_{it} \quad (6)$$

条件 β 收敛的空间杜宾模型 (SDM) 是在绝对 β 收敛模型上加入控制变量, 公式为:

$$\ln\left(\frac{CEI_{i,t+1}}{CEI_{it}}\right) = \alpha + \beta \ln CEI_{it} + \rho W_{ij} \ln\left(\frac{CEI_{i,t+1}}{CEI_{it}}\right) + \theta W_{ij} \ln CEI_{it} + \sum_{k=1}^m \phi_k X_{kit} + \mu_i + \eta_t + \varepsilon_{it} \quad (7)$$

式中, $CEI_{i,t+1}$ 为第 $t+1$ 期城市 i 的碳排放强度, CEI_{it} 为第 t 期城市 i 的碳排放强度, $\ln\left(\frac{CEI_{i,t+1}}{CEI_{it}}\right)$ 为城市 i

的碳排放强度在 $t+1$ 时期内的增加率. β 表示收敛系数, 当 $\beta < 0$ 时, 表明城市碳排放强度存在收敛态势, 反之呈现发散态势. 收敛速度为 $v = \frac{-\ln(1-|\beta|)}{T}$, 其中 T 为研究时长. ρ 为空间自回归系数, θ 为空间外溢系数, W_{ij} 为空间权重矩阵, X_k 为城市碳排放强度收敛的 k 个控制变量. μ_i 、 η_t 和 ε_{it} 分别为地区效应、时间效应和随机扰动项.

其中, X_k 作为影响城市碳排放强度的一系列控制变量, 它的选择可参考张卓群等^[10]、余文梦等^[45]和 Dong 等^[46]的研究成果. 具体控制变量为经济水平 (GDP), 用人均 GDP 表示; 产业结构 (IND), 通过三产产值与二产产值之比计算得到; 人口密度 (POP), 由常住人口与城市行政区总面积之比来衡量; 外商投资 (FDI), 由实际使用外资额与 GDP 之比表示; 科研投入 (RES), 采用科技支出金额与一般公共预算支出之比表示; 路网密度 (NED), 选用城市道路面积与行政区土地总面积之比表示. 同时, 对上述变量进行相关性分析, 不存在显著的多重共线性. 相关变量的特征见表 1.

表 1 相关变量的描述性统计

Table 1 Descriptive statistics of related variables

变量名称	缩写	最大值	最小值	均值	标准差
城市碳排放强度/ $t \cdot \text{万元}^{-1}$	CEI	21.52	0.13	1.95	1.51
经济水平/万元	GDP	215 488.00	99.00	35 854.77	30 799.84
产业结构	IND	9.48	0.09	0.94	0.52
人口密度/万人 $\cdot \text{km}^{-2}$	POP	16 741.98	4.93	456.28	544.22
外商投资	FDI	0.48	0.00	0.02	0.03
科研投入	RES	0.21	0.00	0.01	0.01
路网密度	NED	69.96	0.11	12.59	5.34

2 结果与讨论

2.1 城市碳排放强度的时空演变

本研究期内, 中国城市碳排放强度的时序变化以 2007 年和 2016 年为节点分为 3 个阶段 (图 1). 2001~2007 年城市碳排放强度从 $2.79 t \cdot \text{万元}^{-1}$ 降至 $1.42 t \cdot \text{万元}^{-1}$, 年均降幅 10.67%. 2008~2016 年, 城市碳排放强度总体变化平稳, 均值保持在 $1.23 t \cdot \text{万元}^{-1}$. 此阶段, 受世界经济危机影响, 各级政府实施大范围的产业振兴规划, 传统的高污染、高排放的制造业快速扩张, 能源利用粗放, 碳排放强度降幅较小. 针对上述情况, 各城市积极响应国家生态文明战略, 推动减排降碳政策落地, 尤其在“十三五”期间, 淘汰落后产能和促进污染企业改造,

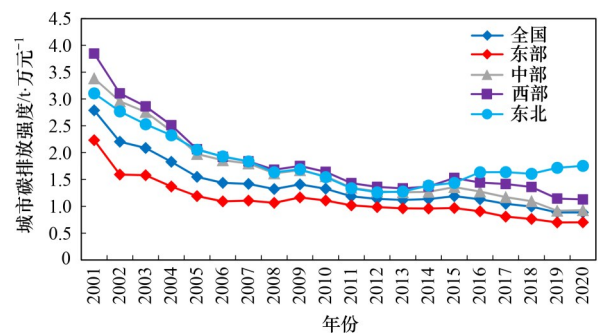


图 1 2001~2020 年中国与四大区域的城市碳排放强度

Fig. 1 Urban carbon emission intensity in China and four major regions from 2001 to 2020

使 2017~2020 年城市碳排放强度再次降低, 从 $1.13 t \cdot \text{万元}^{-1}$ 降至 $0.88 t \cdot \text{万元}^{-1}$, 为国家“双碳”战略的推进提供保障.

根据中国经济区域的地理划分, 东部地区城市碳排放强度明显低于其他区域, 并从2001年的 $2.23 \text{ t} \cdot \text{万元}^{-1}$ 降至2020年的 $0.70 \text{ t} \cdot \text{万元}^{-1}$. 这主要是由于东部地区城市能源消费和产业特征趋同, 逐步向节约高效的资源利用方式和服务业为主的产业结构转变. 2001~2020年, 城市碳排放强度下降最大的为西部地区, 降幅高达 $2.72 \text{ t} \cdot \text{万元}^{-1}$, 区域内城市推动节能减排的政策措施效果显著. 值得注意的是, 东北地区城市碳排放强度在2001~2013年不断降低, 但在随后的2014~2020年却有所上升, 区域内城市低碳减排的压力较大.

为更好了解城市碳排放强度的空间演变特征, 使用 ArcGIS 10.7 软件对2001年、2010年和2020年等主要节点年份的城市碳排放强度进行空间可视化(见图2). 从空间维度看, 多数城市的碳排放强度在研究期内均有不同程度的下降. 2001年碳排放强度较高的城市主要分布在东北地区的黑龙江和吉林, 西部地区的内蒙古、宁夏和陕西等地, 以及位于广东省的珠三角地区; 2010年, 城市碳排放强度的高值区集中于黑龙江、宁夏和山西等地. 而到2020年, 城市碳排放强度的高值区则集中于东北地区以及内蒙古、宁夏和陕西等地, 南北之间的差异持续拉大, 空间分布层次分明. 总体上, 研究期内中国城市碳排放强度逐年下降, 东部与中部部分城市碳排放强度的降幅最为明显.

2.2 城市碳排放强度的动态跃迁

2.2.1 空间相关检验

2001~2020年中国城市碳排放强度的 global Moran's I , 结果见表2. 研究期内 global Moran's I 结果均大于0, 并通过0.01水平下的显著性检验, 说明城市碳排放强度正向空间相关. 碳排放强度高(或低)的城市集聚分布, 而非随机分布. global Moran's I 的时序变化存在“N”形波动特征, 从2001年的0.405升至2009年的0.432, 继而降至2012年的0.381, 之后又升至2020年的0.521, 表明中国城市碳排放强度的空间相关性在波动中逐渐增强.

2.2.2 动态跃迁结果

从 global Moran's I 发现, 中国城市碳排放强度的空间集聚特征显著. 因此, 本文通过2001年、2010年和2020年的 local Moran's I 值图, 解析城市碳排放强度的动态跃迁特征.

图3表示中国城市碳排放强度 LISA 图, 发现碳排放强度的空间集聚模式单一, 局部空间自相关的主体类型为高-高集聚(HH)和低-低集聚(LL), 其中高-高集聚的城市数目由2001年的28个增至2020年的38个, 低-低集聚的城市数目由2001年

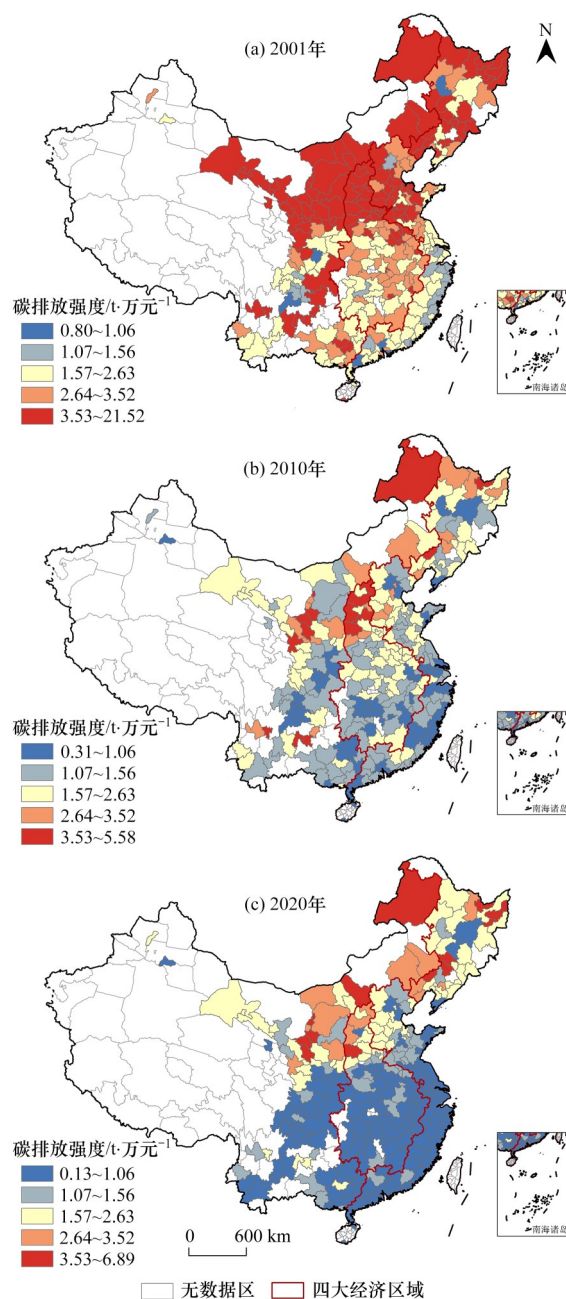


图2 2001~2020年中国城市碳排放强空间分布格局

Fig. 2 Spatiotemporal pattern of urban carbon emission intensity in China from 2001 to 2020

的53个增至2020年的61个, 增幅明显. 同时, 高-高集聚(HH)的城市分布重心从研究早期的宁夏、山西和内蒙古等中西部地区向东北地区、内蒙古东部地区转移, 形成新的空间集聚区, 高-高集聚(HH)的城市在后期集中分布在黑龙江、吉林、内蒙古和甘肃等地. 与之对应, 低-低集聚(LL)区的集聚程度下降较小, 从早期集中于东南沿海, 逐渐沿长江向中、西部地区延伸, 在研究后期主要集中于四川、湖南、江西和浙江等地. 尤其是习近平总书记提出长江经济带“共抓大保护, 不搞大开发”的发展理念后, 沿江城市“退二进三”的

表 2 中国城市碳排放强度的 global Moran's I 及其检验结果

Table 2 Global Moran's I and test results on urban carbon emission intensity in China

年份	Moran's I	Z 值	P 值	年份	Moran's I	Z 值	P 值
2001	0.405	3.654	0.003	2011	0.413	3.953	0.035
2002	0.399	3.193	0.000	2012	0.381	3.852	0.001
2003	0.410	3.453	0.002	2013	0.405	4.258	0.005
2004	0.423	3.025	0.001	2014	0.425	4.529	0.005
2005	0.424	3.408	0.004	2015	0.445	4.626	0.007
2006	0.430	4.021	0.000	2016	0.463	5.014	0.000
2007	0.431	5.252	0.000	2017	0.464	4.526	0.000
2008	0.443	6.252	0.025	2018	0.483	4.259	0.001
2009	0.432	4.826	0.000	2019	0.504	4.363	0.004
2010	0.431	5.257	0.025	2020	0.521	4.529	0.003

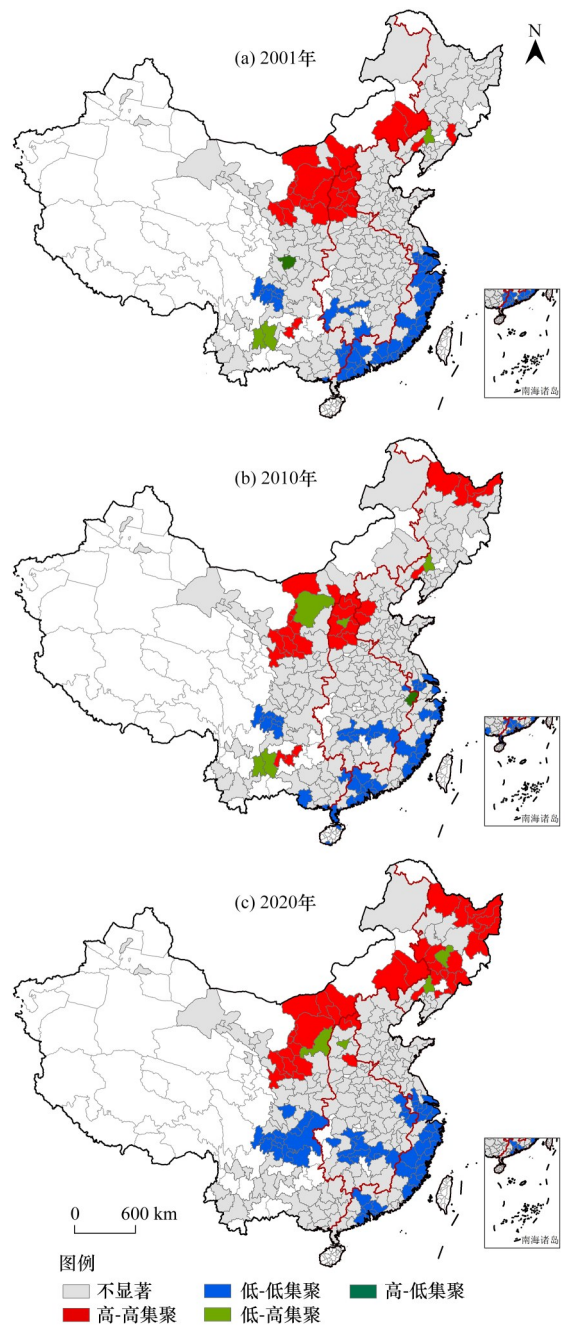


图 3 2001~2020 年中国城市碳排放强的 LISA 分布
Fig. 3 LISA distribution of carbon emission intensity in China from 2001 to 2020

产业结构转型和环境污染治理工作加速展开,碳排放强度的降幅较大.东部地区以传统的能源消费结构为主,城市碳排放的密集度高,而西部、东北地区由于承接东南沿海地区高排放、高消耗传统制造业的转移,使得高-高集聚(HH)与低-低集聚(LL)的南北空间分异显著.此外,随着城镇化与工业化的持续推进,西北地区能源利用效率提升很大,但城市碳排放强度的降低存在一定滞后性,要在短期内突破原有发展模式具有相当难度.

选取LISA时空转移矩阵探究城市碳排放强度空间集聚类型的动态跃迁过程,具体可见表3.动态跃迁包括4种类型:类型I表示仅城市自身发生跃迁,邻域城市未跃迁;类型II表示城市自身未跃迁,邻域城市发生跃迁;类型III表示城市自身与邻域城市均发生跃迁;类型IV表示城市自身与邻域城市均未发生跃迁.表3显示2001~2020年类型IV的跃迁模式占据主导,不同类型间很少发生时空跃迁,城市碳排放强度表现出较强的空间集聚性和低流动性.动态跃迁类型存在很强的空间稳定性,发生跃迁行为的概率较低,在城市碳排放强度LISA分析中并未通过显著性检验,即多数城市并未脱离其原来的空间集聚范畴.2001~2010年城市的空间集聚程度,即空间凝聚指数高达92.52%,2010~2020年城市碳排放强度动态聚类具有相当程度的空间锁定效应和“俱乐部趋同”特征,稳态水平较高.同时,城市碳排放强度的“核心-外围”格局也已初步形成,表现出较强的路径依赖特征.

2.3 城市碳排放强度的收敛分析

2.3.1 σ 收敛分析

中国及四大区域城市碳排放强度的 σ 收敛检验结果见图4.全国范围的 σ 收敛系数先减后增,在2012年最低.其后,由于城市能源消费和产业结构转型的进度不同,城市碳排放强度的变异程度增大,且期末和期初的结果相近, σ 收敛程度较低.具

表3 2001~2020年中国城市碳排放强度的时空跃迁矩阵¹⁾
Table 3 Space-time transition matrices of carbon emission intensity in China from 2001 to 2020

年份	空间关联模式	HH	HL	LL	LH
2001~2010	HH	IV(28)	II(0)	III(0)	I(0)
	HL	II(2)	IV(6)	I(1)	III(0)
	LL	III(0)	I(2)	IV(31)	II(0)
	LH	I(0)	III(0)	II(0)	IV(8)
2010~2020	HH	IV(24)	II(0)	III(0)	I(0)
	HL	II(0)	IV(5)	I(0)	III(0)
	LL	III(0)	I(0)	IV(26)	II(0)
	LH	I(0)	III(0)	II(0)	IV(6)
2001~2020	HH	IV(23)	II(0)	III(0)	I(0)
	HL	II(0)	IV(5)	I(0)	III(0)
	LL	III(0)	I(0)	IV(30)	II(0)
	LH	I(0)	III(0)	II(0)	IV(6)

1) I、II、III、IV分别表示4种动态跃迁的类型,括号里的数值表示该类型的城市数量

体的,西部地区城市碳排放强度 σ 收敛系数最高,表现出先减后增的变化特征,并在2006~2014年差异趋缓之后,上升趋势显现.这主要是由于区域核心城市(西安、成都和重庆等)能源利用效率和产业发展层次较高,节能减排措施落地到位,而其他城市能源消费和产业发展滞后,增大了碳排放强度的分化程度.中部地区城市碳排放强度 σ 收敛系数波动变化,但系数值从2001年的最高值0.755降至2020年的0.588,表明区域内城市碳排放强度的差异在缩小.同时,东部和东北地区的 σ 收敛系数保持在较低水平,究其原因城市产业转型与能源结构差异较小.总体上,中国及四大区域城市碳排放强度的期末值与期初值相差不大, σ 收敛特征不明显.

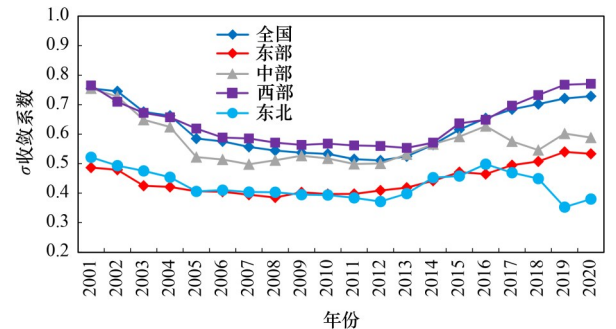


图4 中国及四大区域城市碳排放强度的 σ 收敛趋势
Fig. 4 The σ convergence trend on carbon emission intensity in China and four major regions

2.3.2 β 收敛分析

开展 β 收敛分析前,需要筛选合适的空间计量模型,结果见表4.首先,拉格朗日乘子(LM)及其稳健形式(Robust LM)检验均未通过显著性检验,说明空间关联形式并没有明显的以滞后项或以误差项存

在.其次,LR和Wald的统计量均在0.01水平上拒绝原假设,表明空间杜宾模型(SDM)相较空间滞后模型(SLM)或空间误差模型(SEM)更为合理.因此,本文选择空间杜宾模型(SDM)进行 β 收敛检验.

表4 空间计量模型选择的适用性检验
Table 4 Applicability testing of spatial econometric model selection

检验	绝对 β 收敛		条件 β 收敛	
	统计量	P值	统计量	P值
LM 检验	1.820	0.177	1.558	0.152
Robust LM 检验	1.539	0.104	1.741	0.136
LR 检验(SEM)	152.252	0.000	164.728	0.000
Wald 检验(SEM)	13.525	0.000	35.253	0.000
LR 检验(SLM)	142.456	0.000	138.496	0.000
Wald 检验(SLM)	25.528	0.000	60.249	0.000

(1)绝对 β 收敛分析 根据表5中Hausman分析结果,应选用时空固定的空间杜宾模型开展城市碳排放强度的绝对 β 收敛检验.本研究显示:第一,全国及四大区域均存在不同程度的绝对 β 收敛,通过0.01水平下的显著性检验.这表明在忽略社会经济因素的影响时,城市碳排放强度将收敛至各自的稳定状态.结合图1中城市碳排放强度逐年下降的实际,即使短期内 σ 收敛系数出现上升(见图4),但是碳排放强度总体降低与长期收敛的特征已经出现.第二,城市碳排放强度表现出不同的收敛速度.全国的收敛速度为3.137%,高于全国平均水平的是中部和东北地区,而东部和西部地区的收敛速度略低,分别仅有3.043%和3.050%.第三,全国及四大区域的空间效应差异明显.尤其是东部地区城市碳排放强度的空间外溢效应最为突出,且模型中的 θ 在1%的水平下显著为正,这与东部地区城市传统制造业产能向周边地区转移高度相关.值得注意的是,上述绝对 β 收敛分析并未考虑社会经济发展因素,即默认全国及四大区域的经济水平、产业结构、人口密度、外商投资、科研投入和路网密度等因素水平相近,然而现实并非如此,还需开展条件 β 收敛检验来做深入研究.

(2)条件 β 收敛分析 全国及四大区域的条件 β 收敛分析结果见表6.本研究显示:第一,各研究对象存在条件 β 收敛,通过0.01水平下的显著性检验,说明在考虑控制因素后,全国及四大区域的城市碳排放强度也将收敛至稳定状态.第二,对比绝对 β 收敛结果,条件 β 收敛速度有所加快.东部地区的收敛速度增长最大,为3.772%;东北地区的收敛速度提升小,仅有0.098%;中部和西部的收敛速度增长处于中间水平,分别为0.486%和0.661%.说明控制变量的引入能够区分区域收敛情况,指标选取合理.

表 5 中国及四大区域城市碳排放强度的绝对 β 收敛¹⁾Table 5 Absolute β convergence on carbon emission intensity in China and four major regions

变量	全国	东部	中部	西部	东北
β	-0.466***	-0.455***	-0.508***	-0.555***	-0.482***
ρ	0.025***	-0.005**	-0.087**	0.037***	0.122***
θ	0.365***	0.397***	0.232***	0.353***	0.316***
时间效应	YES	YES	YES	YES	YES
个体效应	YES	YES	YES	YES	YES
收敛速度/%	3.137	3.043	3.547	3.050	3.291
半程收敛周期	22.316	23.005	19.733	22.954	21.271
R^2	0.687	0.731	0.667	0.689	0.726
Hausman 检验	82.24***	74.38***	62.54***	70.53***	60.57***

1)*表示 $P < 0.1$, **表示 $P < 0.05$, ***表示 $P < 0.01$; YES 表示效应存在

第三, 各评价单元间存在空间效应. 尤其是东部地区, 城市碳排放强度的正向溢出效应显著, 这与长三角、珠三角等发达地区向周边地区转移高能耗、高排放的工矿企业有关.

条件 β 收敛分析中的 R^2 相较绝对 β 收敛提升较大, 说明控制变量的选择有效, 全国及四大区域城市碳排放强度影响因素的作用强度差异显著. 全国层面上, 经济水平、人口密度、外商投资和科研投入等因素对碳排放强度的负向影响大, 表明人均 GDP 的实际水平、人口的空间集聚、引进外资带来

低碳技术的进步、财政资金对 R&D 的投入倾斜均能推动城市低碳发展. 此外, 不同控制因素对城市碳排放强度的影响存在空间异质性. 其中, 人口密度能促进中部和西部地区城市碳排放强度的提升, 而对东部和东北地区的碳排放强度降低起到限制作用. 东部地区城市人口密度的分布均衡, 空间集聚效应不显著, 但能推动碳排放强度向低值收敛. 而外商投资仅对西部地区的城市碳排放强度起促进作用, 对其他三大区域则与全国保持一致, 起负向作用.

表 6 中国及四大区域城市碳排放强度的条件 β 收敛¹⁾Table 6 Conditional β convergence on carbon emission intensity in China and four major regions

变量	全国	东部	中部	西部	东北
β	-0.596***	-0.741***	-0.554***	-0.524***	-0.492***
ρ	0.048***	0.195***	0.040**	-0.031**	0.161**
θ	0.407***	0.554***	0.386***	0.275***	0.661***
GDP	-0.002	-0.002***	-0.006**	0.001***	0.026***
IND	0.024***	-0.046***	-0.027**	0.037***	0.032***
POP	0.014	-0.044***	0.008**	0.016	-0.012***
FDI	-0.037	0.478***	-0.062	0.137	-0.432*
RES	-1.662***	-0.777**	-1.095***	-0.715	-0.951
NED	-0.004	-0.009	-0.087	-0.011	0.014
时间效应	YES	YES	YES	YES	YES
个体效应	YES	YES	YES	YES	YES
收敛速度/%	4.535	6.815	4.034	3.711	3.388
半程收敛周期	15.434	10.272	17.353	18.865	20.659
R^2	0.706	0.732	0.696	0.619	0.637
Hausman 检验	115.42***	79.47***	76.52***	52.65***	68.65***

1)*表示 $P < 0.1$, **表示 $P < 0.05$, ***表示 $P < 0.01$; YES 表示效应存在

3 结论

(1) 中国城市碳排放强度持续下降, 东部地区碳排放强度最低, 西部地区碳排放强度降幅最大. 各大区域城市碳排放强度的差距存在收敛特征. 空

间上, 城市碳排放强度的高值区集中在东北地区, 以及内蒙古、宁夏和陕西等地, 南北地区之间的差异拉大, 中南部与东部地区的碳排放强度降幅较大, 高低集聚分布的层次分明.

(2) 中国城市碳排放强度的正向空间相关性显

著, 碳排放强度高(或低)的城市集聚分布, 而非随机分布. 从LISA动态跃迁上看, 城市碳排放强度的高-高集聚(HH)与低-低集聚(LL)的南北分异明显, 以类型IV(城市本身和邻域城市均未发生跃迁)跃迁为主, 不同类型间的时空跃迁发生次数很少. 跃迁类型表现出高度的空间稳定性, 发生动态跃迁的概率较低, 动态聚类存在空间锁定效应和“俱乐部趋同”特征, 稳态水平较高. 城市碳排放强度的“核心-外围”格局特征也已形成, 并存在路径依赖特征.

(3)城市碳排放强度的收敛特征差异较大, σ 收敛不显著, 但均存在绝对 β 收敛和条件 β 收敛. 绝对 β 收敛速度不同, 东部和西部地区的收敛速度略低. 西部地区城市碳排放强度因人才、资金和信息等要素的频繁流动, 收敛速度也保持在较高水平. 东部地区传统制造业产能向周边地区转移, 碳排放强度的空间外溢效应最为显著. 条件 β 收敛中经济水平、产业结构、人口密度、外商投资、科研投入和路网密度等因素对城市碳排放强度的影响存在空间异质性. 人均GDP提升、人口空间集聚和外资引进带来低碳技术的变革、财政资金对R&D的投入倾斜, 能够促进城市碳排放强度的空间收敛.

参考文献:

- [1] Shu Y X, Deng N X, Wu Y M, *et al.* Urban governance and sustainable development: the effect of smart city on carbon emission in China [J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2023, **193**, doi: 10.1016/j.techfore.2023.122643.
- [2] 吴健生, 晋雪茹, 王喆, 等. 中国碳排放及影响因素的市域尺度分析[J]. *环境科学*, 2023, **44**(5): 2974-2982.
Wu J S, Jin X J, Wang J, *et al.* Analysis of carbon emissions and influencing factors in China based on city scale [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(5): 2974-2982.
- [3] Xiong T L, Liu Y W, Yang C, *et al.* Research overview of urban carbon emission measurement and future prospect for GHG monitoring network[J]. *Energy Reports*, 2023, **9**(6): 231-242.
- [4] Lv T G, Hu H, Zhang X M, *et al.* Impact of multidimensional urbanization on carbon emissions in an ecological civilization experimental area of China[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2022, **126**, doi: 10.1016/j.pce.2022.103120.
- [5] Shi Y S, Wang H F, Shi S Z. Relationship between social civilization forms and carbon emission intensity: a study of the Shanghai metropolitan area [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, **228**: 1552-1563.
- [6] 蒋自然, 金环环, 王成金, 等. 长江经济带交通碳排放测度及其效率格局(1985~2016年)[J]. *环境科学*, 2020, **41**(6): 2972-2980.
Jiang Z R, Jin H H, Wang C J, *et al.* Measurement of traffic carbon emissions and pattern of efficiency in the Yangtze River economic belt (1985-2016) [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(6): 2972-2980.
- [7] Yu Q Y, Li M, Li Q, *et al.* Economic agglomeration and emissions reduction: does high agglomeration in China's urban clusters lead to higher carbon intensity? [J]. *Urban Climate*, 2022, **43**, doi: 10.1016/j.uclim.2022.101174.
- [8] 王少剑, 黄永源. 中国城市碳排放强度的空间溢出效应及驱动因素[J]. *地理学报*, 2019, **74**(6): 1131-1148.
- Wang S J, Huang Y Y. Spatial spillover effect and driving forces of carbon emission intensity at city level in China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, **74**(6): 1131-1148.
- [9] Zhao L J, Lv Y, Wang C C, *et al.* Embodied greenhouse gas emissions in the international agricultural trade [J]. *Sustainable Production and Consumption*, 2023, **35**: 250-259.
- [10] 张卓群, 张涛, 冯冬发. 中国碳排放强度的区域差异、动态演进及收敛性研究[J]. *数量经济技术经济研究*, 2022, **39**(4): 67-87.
Zhang Z Q, Zhang T, Feng D F. Study on regional differences, dynamic evolution and convergence of carbon emission intensity in China [J]. *The Journal of Quantitative & Technical Economics*, 2022, **39**(4): 67-87.
- [11] 吕志超, 刘雁, 李佳茹, 等. 基于LMDI的河北省能源消费碳排放核算及因素分析[J]. *环境生态学*, 2023, **5**(4): 74-78, 87.
Lv Z C, Liu Y, Li J R, *et al.* Calculation and factor analysis of energy consumption carbon emissions in Hebei Province based on LMDI [J]. *Environmental Ecology*, 2023, **5**(4): 74-78, 87.
- [12] Wang Y Z, Jeong S, Hang Y, *et al.* Determinants of net energy-related CO₂ emissions in China: a source-to-sink decomposition analysis [J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2023, **98**, doi: 10.1016/j.eiar.2022.106979.
- [13] 向书江, 杨春梅, 谢雨琦, 等. 近20年重庆市主城区碳排放的时空动态演进及其重心迁移[J]. *环境科学*, 2023, **44**(1): 560-571.
Xiang S J, Yang C M, Xie Y Q, *et al.* Spatiotemporal dynamic evolution and gravity center migration of carbon emissions in the main urban area of Chongqing over the past 20 years [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(1): 560-571.
- [14] Zeng S B, Jin G, Tan K Y, *et al.* Can low-carbon city construction reduce carbon intensity? Empirical evidence from low-carbon city pilot policy in China [J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, **332**, doi: 10.1016/j.jenvman.2023.117363.
- [15] 梁归, 林跃胜, 方凤满. 环境规制视角下长三角地区碳排放的时空效应[J]. *环境科学研究*, 2023, **36**(4): 848-856.
Liang G, Lin Y S, Fang F M. Temporal and spatial effects of carbon emissions in the Yangtze River Delta from the perspective of environmental regulation [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2023, **36**(4): 848-856.
- [16] Ke N, Lu X H, Kuang B, *et al.* Regional disparities and evolution trend of city-level carbon emission intensity in China [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2023, **88**, doi: 10.1016/j.scs.2022.104288.
- [17] Liu X J, Jin X B, Luo X L, *et al.* Multi-scale variations and impact factors of carbon emission intensity in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, **857**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.159403.
- [18] Wang H P, Zhang Z. Forecasting Chinese provincial carbon emissions using a novel grey prediction model considering spatial correlation [J]. *Expert Systems with Applications*, 2022, **209**, doi: 10.1016/j.eswa.2022.118261.
- [19] Nazlioglu S, Payne J E, Lee J, *et al.* Convergence in OPEC carbon dioxide emissions: evidence from new panel stationarity tests with factors and breaks [J]. *Economic Modelling*, 2021, **100**, doi: 10.1016/j.econmod.2021.105498.
- [20] 杨柏, 秦广鹏, 郭钦. “双碳”目标下中国省域碳排放核算分析[J]. *环境科学*, 2022, **43**(12): 5840-5849.
Yang B, Qin G P, Wu Q. Analysis of provincial CO₂ emission accounting in China under the carbon peaking and carbon neutrality goals [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(12): 5840-5849.
- [21] 宋宛震, 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.
- [22] 潘竞虎, 赵轩茹. 基于空间回归模型的中国碳排放空间差异模拟[J]. *环境科学学报*, 2018, **38**(7): 2894-2901.
- Pan J H, Zhao X R. Spatial difference simulation of China's carbon emissions using spatial regression models [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(7): 2894-2901.
- [23] 李云燕, 张硕. 中国城市碳排放强度时空演变与影响因素的时空异质性[J]. *中国环境科学*, 2023, **43**(6): 3244-3254.
- Li Y Y, Zhang S. Spatio-temporal evolution of urban carbon emission intensity and spatiotemporal heterogeneity of influencing factors in China [J]. *China Environmental Science*, 2023, **43**(6): 3244-3254.
- [24] 赵桂梅, 耿涌, 孙华平, 等. 中国省际碳排放强度的空间效应及其传导机制研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2020, **30**(3): 49-55.
- Zhao G M, Geng Y, Sun H P, *et al.* Spatial effects and transmission mechanism of inter-provincial carbon emission intensity in China [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2020, **30**(3): 49-55.
- [25] Wang S J, Wang J Y, Fang C L, *et al.* Inequalities in carbon intensity in China: a multi-scalar and multi-mechanism analysis [J]. *Applied Energy*, 2019, **254**, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.113720.
- [26] 刘志华, 徐军委. “双碳”目标下中国省域碳排放公平性及其影响因素[J]. *地理科学*, 2023, **43**(1): 92-100.
- Liu Z H, Xu J W. Equity and influence factors of China's provincial carbon emissions under the “Dual Carbon” goal [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2023, **43**(1): 92-100.
- [27] Zhou K L, Yang J N, Yang T, *et al.* Spatial and temporal evolution characteristics and spillover effects of China's regional carbon emissions [J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, **325**, doi: 10.1016/j.jenvman.2022.116423.
- [28] 邝嫦娥, 李文意, 黄小丝. 长江中游城市群碳排放强度与经济高质量发展耦合协调的时空演变及驱动因素[J]. *经济地理*, 2022, **42**(8): 30-40.
- Kuang C E, Li W Y, Huang X S. Spatial-temporal evolution and driving factors of coupling coordination between carbon emission intensity and high-quality economic development in urban agglomerations in the middle reaches of the Yangtze River [J]. *Economic Geography*, 2022, **42**(8): 30-40.
- [29] Wang S J, Huang Y Y, Zhou Y Q. Spatial spillover effect and driving forces of carbon emission intensity at the city level in China [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2019, **29**(2): 231-252.
- [30] Du M Z, Feng R K, Chen Z F. Blue sky defense in low-carbon pilot cities: a spatial spillover perspective of carbon emission efficiency [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **846**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.157509.
- [31] Huo W D, Qi J, Yang T, *et al.* Effects of China's pilot low-carbon city policy on carbon emission reduction: a quasi-natural experiment based on satellite data [J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2022, **175**, doi: 10.1016/j.techfore.2021.121422.
- [32] Zhang X P, Yan F Y, Liu H J, *et al.* Towards low carbon cities: a machine learning method for predicting urban blocks carbon emissions (UBCE) based on built environment factors (BEF) in Changxing City, China [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2021, **69**, doi: 10.1016/j.scs.2021.102875.
- [33] 李硕硕, 刘耀彬, 骆康. 环鄱阳湖县域新型城镇化对碳排放强度的空间溢出效应[J]. *资源科学*, 2022, **44**(7): 1449-1462.
- Li S S, Liu Y B, Luo K. Spatial spillover effect of new-type urbanization on carbon emission intensity in counties around the Poyang Lake [J]. *Resources Science*, 2022, **44**(7): 1449-1462.
- [34] Wang G J, Peng W F, Xiang J Y, *et al.* Modelling spatiotemporal carbon dioxide emission at the urban scale based on DMSP-OLS and NPP-VIIRS data: a case study in China [J]. *Urban Climate*, 2022, **46**, doi: 10.1016/j.uclim.2022.101326.
- [35] 徐丽笑, 王亚菲. 我国城市碳排放核算: 国际统计标准测度与方法构建[J]. *统计研究*, 2022, **39**(7): 12-30.
- Xu L X, Wang Y F. City carbon emission accounting in China: international statistical standards measurement and methodology construction [J]. *Statistical Research*, 2022, **39**(7): 12-30.
- [36] Song M L, Zhao X, Shang Y P. The impact of low-carbon city construction on ecological efficiency: empirical evidence from quasi-natural experiments [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2020, **157**, doi: 10.1016/j.resconrec.2020.104777.
- [37] 王少剑, 王泽宏, 方创琳. 中国城市碳排放绩效的演变特征及驱动因素[J]. *中国科学: 地球科学*, 2022, **52**(8): 1613-1626.
- Wang S J, Wang Z H, Fang C L. Evolutionary characteristics and driving factors of carbon emission performance at the city level in China [J]. *Science China Earth Sciences*, 2022, **65**(7): 1292-1307.
- [38] Dai S F, Qian Y W, He W J, *et al.* The spatial spillover effect of China's carbon emissions trading policy on industrial carbon intensity: evidence from a spatial difference-in-difference method [J]. *Structural Change and Economic Dynamics*, 2022, **63**: 139-149.
- [39] Chen J D, Gao M, Cheng S L, *et al.* County-level CO₂ emissions and sequestration in China during 1997-2017 [J]. *Scientific Data*, 2020, **7**(1), doi: 10.1038/s41597-020-00736-3.
- [40] 李建豹, 黄贤金, 孙树臣, 等. 长三角地区城市土地与能源消费 CO₂ 排放的时空耦合分析[J]. *地理研究*, 2019, **38**(9): 2188-2201.
- Li J B, Huang X J, Sun S C, *et al.* Spatio-temporal coupling analysis of urban land and carbon dioxide emissions from energy consumption in the Yangtze River Delta region [J]. *Geographical Research*, 2019, **38**(9): 2188-2201.
- [41] Chen C, Qin Y D, Gao Y J. Does new urbanization affect CO₂ emissions in China: a spatial econometric analysis [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2023, **96**, doi: 10.1016/j.scs.2023.104687.
- [42] Sun X Y, Lian W W, Gao T M, *et al.* Spatial-temporal characteristics of carbon emission intensity in electricity generation and spatial spillover effects of driving factors across China's provinces [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, **405**, doi: 10.1016/j.jclepro.2023.136908.
- [43] 吕岩威, 谢雁翔, 楼贤骏. 中国区域绿色创新效率时空跃迁及收敛趋势研究[J]. *数量经济技术经济研究*, 2020, **37**(5): 78-97.
- Ly Y W, Xie Y X, Lou X J. Study on the space-time transition and convergence trend of China's regional green innovation efficiency [J]. *The Journal of Quantitative & Technical Economics*, 2020, **37**(5): 78-97.
- [44] Murshed M, Apergis N, Alam M S, *et al.* The impacts of renewable energy, financial inclusivity, globalization, economic growth, and urbanization on carbon productivity: evidence from net moderation and mediation effects of energy efficiency gains [J]. *Renewable Energy*, 2022, **196**: 824-838.
- [45] 余文梦, 张婷婷, 沈大军. 基于随机森林模型的我国县域碳排放强度格局与影响因素演进分析[J]. *中国环境科学*, 2022, **42**(6): 2788-2798.
- Yu W M, Zhang T T, Shen D J. County-level spatial pattern and influencing factors evolution of carbon emission intensity in China: a random forest model analysis [J]. *China Environmental Science*, 2022, **42**(6): 2788-2798.
- [46] Dong J, Li C B. Structure characteristics and influencing factors of China's carbon emission spatial correlation network: a study based on the dimension of urban agglomerations [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **853**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.158613.

CONTENTS

Spatio-temporal Evolution, Dynamic Transition, and Convergence Trend of Urban Carbon Emission Intensity in China	YANG Qing-ke, WANG Lei, ZHU Gao-li, <i>et al.</i> (1869)
Spatio-temporal Evolution and Trend Prediction of Transport Carbon Emission Efficiency	ZHENG Yan, JIANG Xue-mei, XIAO Yu-jie (1879)
Research on Carbon Emission Decoupling Factors Based on STIRPAT Model and LMDI Decomposition	ZHANG Jiang-yan (1888)
Carbon Peak Pathways of Industrial Parks Based on the LEAP Model: A Case Study of a National Development Zone in Nanjing	LI Hui-peng, LI Li, YIN Yin, <i>et al.</i> (1898)
Accounting and Analysis of Carbon Emissions in Universities: A Case Study of Beijing A University	CAO Rui, FENG Li, ZHANG Li-qiu (1907)
Synergy Effects and Driving Factors of Pollution and Carbon Emission Reduction in Manufacturing Industry in Beijing	YU Shan, HAN Yu-hua, MU Jie, <i>et al.</i> (1917)
Carbon Emissions Trading Prices and Total Factor Productivity: Evidence from China	WU Xue-ping (1926)
Analysis of Spatio-temporal Distribution Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} and PM ₁₀ in Chinese Cities	LI Jiang-su, DUAN Liang-rong, ZHANG Tian-jiao (1938)
Spatial-temporal Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} and Ozone in the Border Area of Jiangsu, Anhui, Shangdong, and Henan from 2017 to 2021	CHEN Wei, XU Xue-zhe, LIU Wen-qing (1950)
Analysis of the Characteristics and Causes of PM _{2.5} and O ₃ Pollution in Xi'an During the Epidemic Lockdown Period	YUAN Xiao-hong, ZHANG Qiang, LI Qi, <i>et al.</i> (1963)
PM _{2.5} Chemical Composition and Spatial Variability in the Five Cities of Southern Jiangsu During Fall and Winter	FENG Wei, DING Feng, SHANG Yue, <i>et al.</i> (1975)
Source Apportionment of Fine Particles in Xianning, Hubei	LUO Yi, ZHU Kuan-guang, CHEN Pu-long, <i>et al.</i> (1983)
Spillover Benefits of Ammonia Emission Reduction in Xingtai Area to the Improvement of Atmospheric PM _{2.5} Concentration in the Beijing-Tianjin-Hebei Region	BIAN Ze-jun, WEN Chao-yu, LANG Jian-lei, <i>et al.</i> (1994)
Characteristics, Risk Assessment, and Sources of the Polluted Metallic Elements in PM _{2.5} During Winter in Liaocheng City	ZHANG Jing-qiao, ZHU Yao, CAO Ting, <i>et al.</i> (2003)
Composition Characteristics of Typical VOCs Sources in the Highland City of Lhasa	GUO Shu-zheng, YE Chun-xiang, LIN Wei-li, <i>et al.</i> (2011)
VOCs Pollution Characteristics and Health Risk Assessment in Typical Industrial Parks in Beijing: Environmental Impact of High and New Technology Industries	WANG Jie, YAO Zhen, WANG Min-yan, <i>et al.</i> (2019)
Analysis of a Typical Ozone Pollution Process in the Chengdu Plain Under the Influence of High Temperature Extremes	LEI Li-juan, ZHANG Yi, LUO Yi-na, <i>et al.</i> (2028)
Presence, Behavior, and Risk of Antiviral Drugs in the Aqueous Environment	GE Lin-ke, LI Xuan-yan, CAO Sheng-kai, <i>et al.</i> (2039)
Spatio-temporal Variation and Probability Health Risk of Heavy Metals in Surface Water of Xiaolangdi Reservoir in the Yellow River	WANG Liang, DENG Xue-jiao, WANG Xiao-lei, <i>et al.</i> (2054)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Strontium Enrichment of the Duoqu River Basin in Eastern Xizang	LI Jing-jie, LIAN Sheng, WANG Ming-guo, <i>et al.</i> (2067)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation and Its Moisture Sources in the Inland Regions of Northwest China	ZHANG Yan-yan, XIN Cun-lin, GUO Xiao-yan, <i>et al.</i> (2080)
Recharge Source and Evolution Process of Karst Groundwater in Tai'an Urban Area Based on Hydrochemistry and Hydrogen and Oxygen Isotopes	MENG Ling-hua (2096)
Hydrochemical Characteristics and Influencing Factors of Surface Water and Groundwater in the Mountainous Area of Danjiang River Basin	ZHANG Zi-yan, FU Yong-peng, WANG Ning-tao, <i>et al.</i> (2107)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Groundwater in Yuanyangchi Irrigation Area, Jinta Basin	WANG Xiao-yan, HAN Shuang-bao, ZHANG Meng-nan, <i>et al.</i> (2118)
Hydrochemical Characteristics and Health Risk Assessment of Shallow Groundwater in the Plain Zone of Deyang City	LIU Nan, CHEN Meng, GAO Dong-dong, <i>et al.</i> (2129)
Spatial and Temporal Distribution of Microplastics in the Sediments of Typical Urban River Network	XU Wan-lu, FAN Yi-fan, QIAN Xin (2142)
Construction of Nitrogen Emission Inventory at Sub-basin Scale and Analysis of Key Sources in Fuxian Lake Watershed	WANG Yan-jie, LIANG Qi-bin, WANG Yan-xia, <i>et al.</i> (2150)
Preparation of Lanthanum Crosslinked Calcium Peroxide/Sepiolite/Sodium Alginate Composite Hydrogels and Their Elimination Performance for Endogenous Phosphorus	QU Si-tong, SHAN Su-jie, WANG Chong-ming, <i>et al.</i> (2160)
Formation Mechanism, Structural Characteristics of Ultrafine Mineral Particles, and Their Environmental Effects	LIU Zhen-hai, ZHANG Zhan-hua, YUAN Yu-xin, <i>et al.</i> (2171)
Research Progress in Application of Biochar-immobilized Bacteria Composites in Environmental Remediation	SUN Shu-yu, HUANG Meng-xin, KONG Qiang, <i>et al.</i> (2185)
Effect of Microplastics on Ammonia Nitrogen Adsorption by Zeolite in Water and Its Mechanism	LIAN Jian-jun, XIE Shi-ting, WU Pei, <i>et al.</i> (2195)
Mechanism of Ultraviolet Aging Effect on the Adsorption of Ciprofloxacin by Nano-biochar	MA Feng-feng, XUE Zhi-yi, ZHAO Bao-wei (2203)
Response of Phytoplankton Communities and Environmental Factors Under the Influence of Land Use in the Wuding River Basin	GUO Shan-song, HU En, DING Yi-tong, <i>et al.</i> (2211)
Bacterial Community Diversity and Functional Gene Abundance of Culturable Bacteria in the Wetland of Poyang Lake	YU Jiang, WANG Chun, LONG Yong, <i>et al.</i> (2223)
Bacterial Community Structure and Its Relationship with Heavy Metals in Sediments of Diannong River	LIU Shuang-yu, MENG Jun-jie, QIU Xiao-cong, <i>et al.</i> (2233)
Impacts of Treated Wastewater on Bacterial and Fungal Microbial Communities in Receiving Rivers	GUO You-shun, YU Zhong, HAO Wen-bin, <i>et al.</i> (2246)
Metagenomics Reveals the Characteristics and Functions of Bacterial Community in the Advanced Wastewater Treatment Process	HU Jian-shuang, WANG Yan, ZHOU Zheng, <i>et al.</i> (2259)
Spatio-temporal Characteristics of Habitat Quality and Natural-human Driven Mechanism in Dabie Mountain Area	ZHENG Ya-ping, ZHANG Jun-hua, TIAN Hui-wen, <i>et al.</i> (2268)
Hyperspectral Inversion of Soil Organic Matter Content Based on Continuous Wavelet Transform, SHAP, and XGBoost	YE Miao, ZHU Lin, LIU Xu-dong, <i>et al.</i> (2280)
Effects of Straw Retention, Film Mulching, and Nitrogen Input on Soil Quality in Dryland Wheat Field	YE Zi-zhuang, WANG Song-yan, LU Xiao, <i>et al.</i> (2292)
Effects of Long-term Application of Organic Fertilizer on the Occurrence and Migration Characteristics of Soil Microplastics	WANG Chang-yuan, MA Xiao-chi, GUO De-jie, <i>et al.</i> (2304)
Effect of Different Soil Salinities on N ₂ O Emission: A Meta-analysis	HUANG Yi-hua, SHE Dong-li, SHI Zhen-qi, <i>et al.</i> (2313)
Assessment and Prediction of Carbon Storage Based on Land Use/Land Cover Dynamics in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	ZHENG Hui-ling, ZHENG Hui-feng (2321)
Simulation of Temporal and Spatial Changes in Ecosystem Carbon Storage in Funiu Mountains Based on InVEST Model	ZHANG Zhe, SHI Zhen-qin, ZHU Wen-bo, <i>et al.</i> (2332)
Relationship Between Microbial Nutrient Limitation and Soil Organic Carbon Fraction During Shelterbelts Construction	XU Feng-jing, HUANG Yi-mei, HUANG Qian, <i>et al.</i> (2342)
Characteristics and Driving Forces of Organic Carbon Mineralization in Brown Soil with Long-term Straw Returning	ZHAO Yu-hang, YIN Hao-kai, HU Xue-chun, <i>et al.</i> (2353)
Effects of Winter Green Manure Mulching on Soil Aggregates, Organic Carbon, and AMF Diversity	LU Ze-rang, CHEN Jia-yu, LI Zhi-xian, <i>et al.</i> (2363)
Spatial and Temporal Distribution of Nitrogen in the Liaohe River Basin and Its Responses to Land Use and Rainfall	ZHOU Bo, LI Xiao-guang, TONG Si-chen, <i>et al.</i> (2373)
Nitrous Oxide Emissions from Ponds in Typical Agricultural Catchment with Intensive Agricultural Activity	ZHANG Xin-yue, XIAO Qi-tao, XIE Hui, <i>et al.</i> (2385)
Effects of Biochar Combined with Different Types of Nitrogen Fertilizers on Denitrification Bacteria Community in Vegetable Soil	LIU Xiao-wan, LIU Xing-ren, GAO Shang-jie, <i>et al.</i> (2394)
Investigation of Soil Microbial Characteristics During Stand Development in <i>Pinus tabulaeformis</i> Forest in Taiyue Mountain	MA Yi-shu, CAO Ya-xin, NIU Min, <i>et al.</i> (2406)
Simulation of Heavy Metal Content in Soil Based on Sparse Sample Sites	ZHANG Jia-qi, PAN Yu-chun, GAO Shi-chen, <i>et al.</i> (2417)
Identification Priority Source of Heavy Metal Pollution in Greenspace Soils Based on Source-specific Ecological and Human Health Risk Analysis in the Yellow River Custom Tourist Line of Lanzhou	LI Jun, LI Xu, LI Kai-ming, <i>et al.</i> (2428)
Heavy Metal Accumulation and Assessment of Potential Ecological Risk Caused by Soil pH Changes in Different Types of Purple Soils in Southwest China	ZHANG Hai-lin, ZHANG Yu, WANG Ding, <i>et al.</i> (2440)
Assessment and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Arable Land Around an Iron Ore Mining Area in Chongqing	LIAO Ze-yuan, LI Jie-qin, SHEN Zhi-jie, <i>et al.</i> (2450)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils and Crops Around Metal Mines	WEI Hong-bin, LUO Ming, XIANG Lei, <i>et al.</i> (2461)
Effect of Red Mud-based Nano Zero-valent Iron on Remediation of Polymetallic Contaminated Soil	LIU Long-yu, YANG Shi-li, ZHAO Huang-shi-yu, <i>et al.</i> (2474)
Effects of Zinc Application on Cadmium Accumulation in Alkaline Soil-Wheat Seeding Systems	ZHANG Yao, WANG Tian-qi, NIU Shuo, <i>et al.</i> (2480)