

目次

“大气十条”实施期间南京市PM<sub>2.5</sub>化学组成与来源的演变特征 ..... 陈培林, 郭蓉, 王勤耕 (1)

河南省北部区域霾污染过程中城市和农村点位PM<sub>2.5</sub>组分差异 ..... 王申博, 王玲玲, 范相阁, 王楠, 马双良, 张瑞芹 (11)

廊坊市秋冬季大气细颗粒物污染特征及来源解析 ..... 朱淑贞, 佟洁, 鲍丰, 孙浩 (20)

天津市采暖季不同气团来向PM<sub>2.5</sub>中重金属污染特征及健康风险评价 ..... 李立伟, 邓小文, 肖致美, 元洁, 杨宁, 郭小龙, 白宇 (30)

基于多属性决策方法的太原市冬季街道尘土中潜在有害元素关键来源解析 ..... 邓文博, 刘文娟 (38)

北京市PM<sub>2.5</sub>-O<sub>3</sub>复合污染数值响应解析 ..... 刘添强 (48)

长三角区域人为源活性挥发性有机物高分辨率排放清单 ..... 田俊杰, 丁祥, 安静宇, 李曼, 王鑫, 黄成 (58)

南京北郊工业乡村混合区秋季边界层VOCs垂直分布特征 ..... 王泰, 朱彬, 施双双, 安俊琳, 唐贵谦, 徐家平 (66)

广西柳城县VOCs组分特征、来源及其对臭氧生成的敏感性 ..... 吴影, 莫招育, 吴琴琴, 陆嘉晖, 毛敬英, 陈雪梅, 粟少丽, 覃纹, 刘慧琳, 韦敏 (75)

城市臭氧污染特征与高影响气象因子:以苏州为例 ..... 何琰, 林惠娟, 曹舒娅, 宋璟璐, 孙伟, 熊宇 (85)

华北平原周县人为源氨排放清单及分布特征 ..... 康嘉慧, 孟凡磊, 刘学军, 许稳 (94)

WRF模式最优参数化方案在不同空气质量模式中的应用 ..... 杨景朝, 蒋兴文, 伯鑫, 王刚, 冯勇 (104)

西安市春季生物气溶胶的分布特征和健康影响 ..... 魏军强, 杨柳, 沈振兴, 王秀茹 (118)

青岛近海不同天气下生物气溶胶中细菌浓度及存活率分布特征 ..... 魏文淑, 祁建华, 常成 (127)

中国沉积物多环芳烃的时空分布及驱动因子 ..... 黄柱良, 蔡家伟, 王儒威 (138)

长江口近岸地区抗生素抗性基因与微生物群落分布特征 ..... 徐秋鸿, 刘曙光, 娄厦, Larisa Dorzhieva Radnaeva, Elena Nikitina, Makhinov Aleksei Nikolavich, Araruna José Tavares, 金字辰, 李鑫 (158)

人类活动影响下的高原湿地四环素类抗生素抗性基因赋存与微生物群落共线性 ..... 秦荣, 喻庆国, 刘振亚, 王行 (169)

我国东南地区饮用水源地多种农药的赋存特征及健康风险评估 ..... 何姝, 董慧峰, 任南琪 (180)

珠海市中部主要供水水库沉积物重金属时空分布与风险评价 ..... 王思瑞, 张坤锋, 昌盛, 张茉莉, 付青 (189)

苏州水网地区河道底泥的重金属分布特征与污染风险 ..... 郑敏慧, 白冬锐, 张涛, 陈坦, 王洪涛, 杨婷, 张冰, 金军 (198)

长三角典型城郊流域生物可降解性有机质的分布及影响因素 ..... 吴文雨, 马菁晨, 杨磊, 李敏, 唐剑锋 (210)

过水性湖泊水质长期演变趋势及驱动因素:以骆马湖为例 ..... 黄雪滢, 高鸣远, 王金东, 王明明, 陈思恩, 龚志军, 王腊春, 蔡永久 (219)

渭河微塑料污染现状与风险评价 ..... 山泽萱, 张妍, 张成前, 时鹏, 张鑫 (231)

不同颜色聚碳酸酯塑料对附着藻类生长和群落结构的影响 ..... 王梦雪, 尹思成, 王振方, 陈锦贤, 张玮, 王丽卿 (243)

苦草叶表附和浮游细菌群落多样性格局及其影响因素 ..... 张梅婷, 刘晋仙, 苏嘉贺, 柴宝峰 (252)

基于16S rRNA测序技术的青藏高原河流细菌群落多样性 ..... 璩伟卿, 张博美, 黄雪, 任泽, 高红凯 (262)

基于eDNA的硅藻群落时空异质性及生态健康评价 ..... 姜山, 张颜, 李飞龙, 张效伟 (272)

三峡库区澎溪河河段间水华程度差异及其机制 ..... 罗晓佼, 张妍, 黄伟, 胡鹏飞, 谭炳圆, 张磊 (282)

自然降雨下蔬菜土壤侵蚀及氮素流失特征 ..... 宁嘉丽, 黄艳芬, 李桂芳, 陈钊柱, 王坚桦 (293)

绿色、蓝色和蓝-绿屋顶径流水质特征 ..... 章孙逊, 张守红, 闫婧, 王恺, 杨航, 王任重, 张文龙, 李华林 (303)

基于地理探测器的山西省2000~2020年NPP时空变化特征及驱动力分析 ..... 邵嘉豪, 李晶, 闫星光, 马天跃, 张瑞 (312)

2000~2020年西南地区植被NDVI时空变化及驱动机制探究 ..... 徐勇, 戴强玉, 黄雯婷, 盘钰春, 郑志威, 郭振东 (323)

青海湖周边地区表层土壤重金属含量和抗性基因丰度及相关性 ..... 胡石磊, 瞿剑里, 章丽, 赵美蓉 (336)

四川盆地典型农耕地土壤重金属含量、污染及其影响因素 ..... 刘属灵, 吴梅, 刘志远, 刘双燕, 刘永林, 赵家宇, 刘怡 (347)

宁夏引黄灌区农田土壤重金属生态风险评价及来源解析 ..... 陈林, 马琨, 马建军, 王金保, 李虹, 贾彪, 倪细炉, 马进福, 梁翔宇 (356)

铜冶炼场周边土壤重金属污染特征与风险评价 ..... 彭驰, 刘旭, 周子若, 姜智超, 郭朝晖, 肖细元 (367)

西南地区典型土壤酸化特征及其与重金属形态活性的耦合关系 ..... 凌云, 刘汉燧, 张小婷, 魏世强 (376)

外源Cd在不同类型土壤中的稳定化特征 ..... 王港, 余海英, 黄化刚, 张路, 左洪菊 (387)

基于有效硒的富硒土壤阈值及有效硒的影响因素 ..... 王莹, 马彦斌, 王泽晶 (395)

基于成土母质分区的土壤-作物系统重金属累积特征与健康风险评价 ..... 陈子万, 许晶, 侯召雷, 彭敏, 杨帆, 陈杰, 徐永强, 杨树云, 李家云, 于林松 (405)

贵州省旱地土壤和玉米As含量特征及其种植安全性评估 ..... 黄凤艳, 周浪, 宋波, 虎瑞, 吴勇, 王佛鹏, 张云霞 (415)

象草与苦楝/构树间作修复矿区重金属污染土壤潜力 ..... 王小慧, 肖细元, 郭朝晖, 彭驰, 王小燕 (426)

1株高耐性肠杆菌的筛选及对镉、砷同步钝化 ..... 尹雪斐, 刘玉玲, 伍德, 黄薪铭, 张朴心, 铁柏清 (436)

黄土陵区人工刺槐林土壤有机碳矿化特征及其与有机碳组分的关系 ..... 朱玉帆, 刘伟超, 李佳欣, 苏玉博, 简俊楠, 杨改河, 任成杰, 冯永忠, 任广鑫, 王晓娇, 韩新辉 (444)

设施农业土壤磷素累积迁移转化及影响因素 ..... 方兵, 陈林, 王阳, 祝亚飞, 王瑞, 宋桂芳, 刘俊, 杨斌, 张世文 (452)

优化秸秆管理提高玉米农田碳氮效率与经济效益 ..... 王良, 钱欣, 高英波, 张慧, 刘开昌, 陈国庆, 李宗新 (463)

缓控释肥深施对黏性土壤麦田氮素去向的影响 ..... 侯朋福, 薛利祥, 袁文胜, 曹帅, 刘颖多, 薛利红, 杨林章 (473)

黄河下游冲积平原轮作休耕农田土壤真菌群落结构与功能 ..... 南镇武, 刘柱, 孟维伟, 代红翠, 徐杰, 王娜, 刘灵艳, 王旭清, 刘开昌 (482)

红壤区退化林地表土真菌群落结构对土壤改良措施的响应 ..... 管鸿智, 黄荣珍, 王金平, 朱丽琴, 邹显花, 姬绍晖, 林丽靖, 房焕英, 杨梦佳, 廖迎春 (494)

半干旱-亚湿润干旱沙区樟子松根内真菌群落结构和功能时空动态特征 ..... 赵珮杉, 郭米山, 高广磊, 丁国栋, 张英, 任悦 (502)

基于QMEC分析的青藏高原不同类型冰川前缘地土壤微生物功能潜力 ..... 张洁洁, Anders Priemé, 陈显轲, 周汉昌, 张沁唯, 庄绪亮, 秦翔, 庄国强, 马安周 (512)

中国主粮作物生物炭产量效应的Meta分析 ..... 于滨杭, 姬建梅, 王丽宇, 刘静, 高欢, 刘丹 (520)

生物炭影响抗生素在土壤中环境行为的Meta分析 ..... 李经涵, 张建强, 夏丽琼, 郑世界, 杨红薇, 何杨 (531)

不同农作物秸秆原料制备生物炭特性及重金属浸出行为 ..... 李家康, 邱春生, 赵佳奇, 王晨晨, 刘楠楠, 王栋, 王少坡, 孙力平 (540)

中国县城碳排放时空演变与异质性 ..... 宋苑震, 曾坚, 王森, 梁晨 (549)

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 ..... 向书江, 杨春梅, 谢雨琦, 王丹, 王子芳, 高明 (560)

中国1991~2018年突发环境事件时空特征及影响因素 ..... 余光辉, 王非凡, 刘贤赵, 李文慧, 向云波 (572)

季铵盐抗菌剂在环境中的迁移转化行为及其毒性效应 ..... 张利兰, 覃存立, 钱瑶, 易美玲 (583)

《环境科学》征订启事(29) 《环境科学》征稿简则(57) 信息(443, 481, 530)

# 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

向书江<sup>1</sup>, 杨春梅<sup>2</sup>, 谢雨琦<sup>1</sup>, 王丹<sup>3</sup>, 王子芳<sup>1</sup>, 高明<sup>1\*</sup>

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 2. 成都市国土规划地籍事务中心, 成都 610072; 3. 重庆地质矿产研究院, 重庆 401120)

**摘要:** 碳排放引起全球气候变暖是各界十分关注的环境问题, 对城市碳排放时空演进的动态监测是实现区域“双碳”目标的重要环节. 以重庆市主城区为例, 基于土地利用和能源消耗数据, 在采用碳排放系数法估算出 2000~2020 年主城区 153 个乡镇街道碳排放量的基础上, 运用 ESTDA 框架, 通过 LISA 时间路径、时空跃迁以及标准差椭圆模型等方法, 从时空交互视角分析了近 20 年主城区碳排放的时空动态演进及重心迁移. 结果表明: ①近 20 年主城区乡镇碳排放具有显著的空间正相关性, 空间趋同性呈先降后升的趋势. ②近 20 年低、中等相对长度的乡镇街道数共计 126 个(占比 82%), 表明主城区乡镇碳排放的局部空间结构具有较强的稳定性; 低、中等弯曲度的乡镇街道数共计 138 个(占比 90%), 说明主城区乡镇碳排放的空间依赖方向上的波动性较为稳定; 协同增长类型的乡镇街道数共计 113 个(占比 74%), 表明主城区乡镇碳排放格局具有较强的空间整合性. ③近 20 年时空凝聚指数均大于 70%, 说明主城区乡镇碳排放的局部空间关联模式和集聚特征具有较强的稳定性. ④近 20 年主城区碳排放重心分布于 106°30'43"~106°32'42"E, 29°33'34"~29°35'56"N 之间, 重心整体上向东北方向迁移, 空间分布由“西北-东南”格局转变为“东北-西南”格局. 研究结果可为重庆市绿色低碳可持续发展和制定差异化减排政策提供参考, 并为西部其他同类型山地城市提供借鉴.

**关键词:** 碳排放; LISA 时间路径; 时空跃迁; 重心迁移; 重庆市主城区

中图分类号: X24 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)01-0560-12 DOI: 10.13227/j.hjks.202203174

## Spatiotemporal Dynamic Evolution and Gravity Center Migration of Carbon Emissions in the Main Urban Area of Chongqing over the Past 20 Years

XIANG Shu-jiang<sup>1</sup>, YANG Chun-mei<sup>2</sup>, XIE Yu-qi<sup>1</sup>, WANG Dan<sup>3</sup>, WANG Zi-fang<sup>1</sup>, GAO Ming<sup>1\*</sup>

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Chengdu Land Planning and Cadastral Affairs Center, Chengdu 610072, China; 3. Chongqing Institute of Geology and Mineral Resources, Chongqing 401120, China)

**Abstract:** Global warming caused by carbon emissions is an environmental issue that is of great concern to all walks of life. Dynamic monitoring of the spatiotemporal evolution of urban carbon emissions is an important part of achieving the regional double-carbon goals. Taking the main urban area of Chongqing as an example, based on the data of land use and energy consumption, this study estimated the carbon emissions of 153 townships and streets in the main urban area of Chongqing from 2000 to 2020 by using the carbon emission coefficient method. Additionally, using the ESTDA framework to pass the LISA time path, spatiotemporal transition, and the standard deviation ellipse model from the perspective of spatiotemporal interaction, the spatiotemporal dynamic evolution of carbon emissions in the main urban area and the shift in the center of gravity over the past 20 years were analyzed. The results showed that: ① in the past 20 years, the carbon emissions in the main urban and rural areas have had a significant positive spatial correlation, and the spatial convergence showed a trend of first decreasing and then increasing. ② In the past 20 years, there were 126 township streets with low and medium relative lengths (accounting for 82%), indicating that the local spatial structure of township carbon emissions in the main urban area had strong stability; the total number of township streets with low and medium curvatures was 138 (accounting for 90%), indicating that the volatility of the main urban and rural carbon emissions in the direction of spatial dependence was relatively stable; there were 113 township streets (accounting for 74%) of the synergistic growth type, indicating that the main urban and rural carbon emissions were relatively stable. The emission pattern had strong spatial integration. ③ In the past 20 years, the spatiotemporal agglomeration index was greater than 70%, indicating that the local spatial correlation pattern and agglomeration characteristics of carbon emissions in the main urban and rural areas had strong stability. ④ In the past 20 years, the center of carbon emission in the main urban area had been distributed between 106°30'43"-106°32'42"E, 29°33'34"-29°35'56"N, and the center of gravity shifted to the northeast as a whole. The spatial distribution changed from the “northwest-southeast” pattern to the “northeast-southwest” pattern. These results can provide reference for the green and low-carbon sustainable development of Chongqing and the formulation of differentiated emission reduction policies, as well as provide reference for other similar mountain cities in western China.

**Key words:** carbon emissions; LISA time path; spatiotemporal transition; migration of gravity center; main urban area of Chongqing

CO<sub>2</sub> 大量排放引起气候变暖问题已经成为全球关注的焦点, 给自然-人类社会可持续发展造成了巨大挑战<sup>[1,2]</sup>. 减缓 CO<sub>2</sub> 等温室气体排放, 推动低碳经济发展是世界各国解决气候变暖的共同途径<sup>[3]</sup>. 自改革开放以来, 中国工业化和城市化的快速发展导致能源消耗和碳排放的持续增加, 严重阻碍了国家

生态文明建设步伐<sup>[4]</sup>. 据国际能源署(IEA)的统计

收稿日期: 2022-03-18; 修订日期: 2022-04-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(42177019); 重庆市教委人文社会科学基金项目(19SKGH276)

作者简介: 向书江(1999~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为土地资源管理与低碳经济, E-mail: xiang786957739@163.com

\* 通信作者, E-mail: gaoming@swu.edu.cn

数据,2018 年中国 CO<sub>2</sub> 排放量高达 9.48 Gt, 约占全球总量的 28.61%<sup>[5]</sup>. 当前中国作为世界最大碳排放国家之一, 面临着国内经济发展和国际碳减排责任的双重考验, 并在 2020 年联合国大会上提出了 2030 年前实现碳达峰和 2060 年前实现碳中和的“双碳”目标<sup>[6]</sup>. 城市作为人类活动最密集、最活跃的区域, 既是全球碳循环的最大驱动力, 也是承担碳减排任务的主体<sup>[7]</sup>, 因此科学分析城市碳排放时空动态特征是合理制定差异化减排政策的重要基础.

目前, 国内外学者针对碳排放问题做了大量研究, 内容侧重在碳排放核算<sup>[8,9]</sup>、碳排放模拟预测<sup>[10-12]</sup>、碳排放影响因素<sup>[13-15]</sup>以及碳足迹<sup>[16-18]</sup>等方面, 基于 ESTDA 框架探讨城市碳排放时空动态演进的研究尚不多见; 相关研究区域也多集中在京津冀<sup>[19]</sup>、长三角<sup>[20,21]</sup>、中部地区<sup>[22,23]</sup>和东部沿海城市<sup>[24,25]</sup>等地区, 针对西部地区城市碳排放的研究相对较少, 特别是像重庆这种山地城市还未见报道; 研究基本单元以省域<sup>[26-28]</sup>、市域<sup>[29,30]</sup>或县域<sup>[31,32]</sup>为主, 鲜见案例以乡域为单元研究城市碳排放. 事实上, 碳排放空间格局是自身单元与邻域单元动态空间效应共同作用的结果, 即使在同一省(市、县), 各乡域单元的碳排放也会存在差异, 乡域是中国行政管理体制中的最小组成单元, 对于实现城市低碳经济发展和区域“双碳”目标具有重要作用, 因此从这一空间尺度可以更加清晰地探讨城市碳排放的时空格局动态特征. 综上, 有必要从乡级尺度分析我国西部地区的城市碳排放时空格局动态变化, 这既是制定城市差异化减排策略的科学依据, 又是对现有碳

排放研究向更小尺度上的延伸拓展.

21 世纪初以来, 国家“西部大开发”重大战略与“三峡库区建设”重大工程的实施推动着西部地区经济快速发展, 城市碳排放量迅速增长<sup>[33]</sup>. 重庆市地处我国内陆西南部, 属于西部地区典型的山地城市, 作为长江上游地区的重要经济中心、西部大开发重要的战略支点、“一带一路”和长江经济带重要联结点, 在过去 20 年间人口加速聚集, 能源消耗急剧增长, 城市规模不断扩张, 尤其是主城区的能源消耗和碳排放强度较高, 具有典型的碳排放时空特征, 面临着十分严峻的碳减排任务. 鉴于此, 本文以重庆市主城区为例, 基于土地利用和能源消耗数据, 在采用碳排放系数法估算出 2000~2020 年主城区 153 个乡镇街道碳排放量的基础上, 运用 ESTDA 框架, 通过 LISA 时间路径、时空跃迁以及标准差椭圆模型等方法, 从时空交互的角度探讨近 20 年主城区乡域碳排放的时空演进特征及重心迁移, 这对于深刻理解西部山地城市碳排放的时空格局变化规律和制定“双碳”战略实施方案具有重要意义. 本文针对重庆市的案例研究, 以期供西部其他同类型山地城市借鉴, 并为城市绿色低碳发展、节能减排以及未来制定差异化减排政策提供参考依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

重庆主城区是全市的政治、经济、文化、交通和金融中心, 包括渝中、渝北、江北、沙坪坝、南岸、北碚、九龙坡、大渡口与巴南区等 9 个城区(图 1). 地形地貌以山地和丘陵为主, 台地和平坝分布

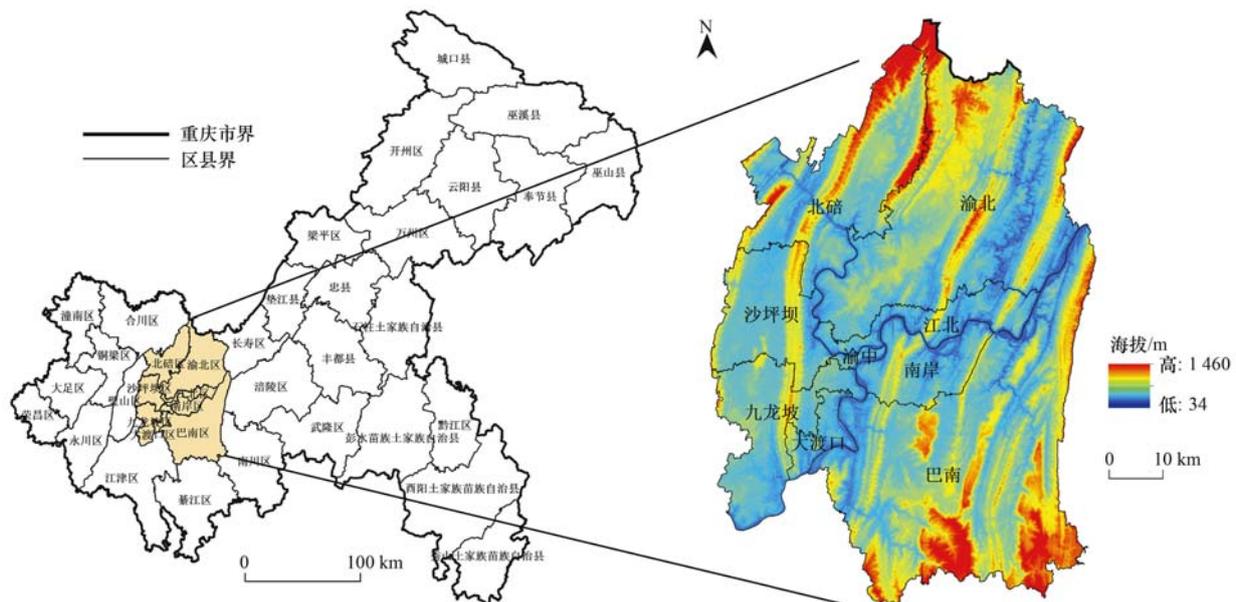


图 1 重庆市主城区地理位置及行政区划

Fig. 1 Geographical location and administrative division map of the main urban area of Chongqing

较少,形成“两江四山”的格局,属于西南地区典型的山地城市<sup>[34]</sup>. 主城辖区面积5 466 km<sup>2</sup>,截止到2020年,常住人口达1 036万人(占全市32%),城镇化率高达92.63%,地区生产总值9 822亿元(占全市39%).

## 1.2 数据来源

土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(<http://www.resde.cn>),分辨率30 m × 30 m,包括耕地、林地等6个一级地类和水田、旱地等24个二级地类,经重分类后得到耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地等六大类,得到2000、2005、2010、2015和2020年这5期土地利用数据. 能源终端消耗量数据来源于《中国能源统计年鉴》(2001~2021年). 矢量行政界线数据来源于国家基础地理信息中心(<http://www.ngcc.cn>).

## 1.3 研究方法

### 1.3.1 土地利用的碳排放量估算

本文采用碳排放系数法对主城区碳排放进行估算,主要包括耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地等6种地类,其中碳排放为建设用地和耕地,碳吸收为林地、草地、水域和未利用地. 其公式如下:

$$E = \sum e_i = \sum A_i \times \beta_i$$

式中, $E$ 为碳排放总量; $i$ 为第 $i$ 种地类; $e_i$ 为第 $i$ 种地类的碳排放量; $A_i$ 为第 $i$ 种地类面积; $\beta_i$ 为第 $i$ 种地类的碳排放系数(碳排放为正,碳吸收为负),取值参考已有研究成果来确定(表1).

表1 各土地利用类型的碳排放系数及文献来源

Table 1 Carbon emission coefficients and literature sources for each land use type

土地利用类型	碳排放系数/t·hm <sup>-2</sup>	文献
耕地	0.447	[35~40]
林地	-0.623	[40~43]
草地	-0.021	[40,41,44,45]
水域	-0.268	[40,45~47]
建设用地	71.356	[28,42]
未利用地	-0.005	[25,40,46]

(1)耕地碳排放系数的确定 耕地的碳排放需要考虑两方面,一是农业生产和灌溉过程产生大量CO<sub>2</sub>和CH<sub>4</sub>等温室气体,二是农作物生育期间通过光合作用能够吸收一定的CO<sub>2</sub><sup>[35]</sup>. 根据Cai等<sup>[36]</sup>的研究表明农作物碳排放系数为0.429 t·hm<sup>-2</sup>,何勇等<sup>[37]</sup>的研究表明农作物碳吸收系数为0.007 t·hm<sup>-2</sup>,由此计算得到耕地净碳排放系数为0.422 t·hm<sup>-2</sup>,再参考其他学者对重庆市及其周边相似区域的研究成果<sup>[38,39]</sup>,为减少单一误差给研究结果带

来的负面影响,最后取上述研究中系数的平均值做法<sup>[40,47]</sup>,即为0.447 t·hm<sup>-2</sup>.

(2)林地碳排放系数的确定 重庆市主城区位于亚热带,林地资源类型较为丰富. 方精云等<sup>[41]</sup>的研究表明林地碳排放系数为-0.644 t·hm<sup>-2</sup>,又根据其他学者对重庆市及其周边相似区域的研究<sup>[42,43]</sup>,综上研究成果,本文最后取上述研究中系数的平均值<sup>[40,47]</sup>,即为-0.623 t·hm<sup>-2</sup>.

(3)草地碳排放系数的确定 方精云等<sup>[41]</sup>的研究表明草地碳排放系数为-0.022 t·hm<sup>-2</sup>,结合其他学者对重庆市周边相似区域的研究<sup>[42,43]</sup>,彭文甫等<sup>[44]</sup>和李璐等<sup>[45]</sup>分别对四川省和武汉市的草地碳排放系数取值为-0.020 5 t·hm<sup>-2</sup>和-0.022 t·hm<sup>-2</sup>,其变化范围不大,故本文取平均值<sup>[40,47]</sup>,即为-0.021 t·hm<sup>-2</sup>.

(4)水域碳排放系数的确定 通常情况下水域被认为是碳汇,根据李璐等<sup>[45]</sup>、赖力<sup>[46]</sup>和孙赫等<sup>[47]</sup>的研究所确定水域碳排放系数分别为-0.298、-0.253和-0.252 t·hm<sup>-2</sup>,取其上述研究结果的平均值<sup>[40,47]</sup>,故本文选取水域碳排放系数为-0.268 t·hm<sup>-2</sup>.

(5)建设用地碳排放系数的确定 建设用地碳排放系数是根据间接估算方法得到<sup>[28]</sup>,取值和能源消耗密切相关,不同区域的能源使用情况存在较大差异,本研究考虑重庆市能源使用的实际情况,为减少统计误差给研究结果带来的负面影响,能源种类选取应该尽可能覆盖全面,包括原煤、洗精煤、其他洗煤、焦炭、焦炉煤气、高炉煤气、其他煤气、其他焦化产品、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、液化石油气、其他石油制品、天然气、热力和电力等18种生产生活所需的能源,各类能源标准煤转化系数和对应的碳排放系数分别参考文献<sup>[48,49]</sup>的数据(见表2),最终计算出重庆市建设用地的碳排放系数为71.356 t·hm<sup>-2</sup>,参考肖红艳等<sup>[42]</sup>和卢娜<sup>[50]</sup>的研究,本文取值较为合理. 间接估算方法的计算公式为:

$$E_{\text{cons}} = \sum_{i=1}^n m_i \cdot n_i \cdot \alpha_i$$

式中, $E_{\text{cons}}$ 为建设用地的碳排放总量; $m_i$ 为第 $i$ 种能源的终端消耗量; $n_i$ 为第 $i$ 种能源的标准煤换算系数; $\alpha_i$ 为第 $i$ 种能源的碳排放系数.

(6)未利用地碳排放系数的确定 主城区未利用地面积较少,且主要为沼泽地和裸岩石砾地类型. 参考魏燕茹等<sup>[25]</sup>、赖力<sup>[46]</sup>和范建双等<sup>[51]</sup>的研究,取其上述研究结果的平均值<sup>[40,47]</sup>,故本文选取-0.005 t·hm<sup>-2</sup>作为未利用地碳排放系数.

表 2 各类能源标准煤换算系数与碳排放系数<sup>1)</sup>

Table 2 Standard coal conversion factor and carbon emission factor for various energy sources

能源种类	原煤	洗精煤	其他洗煤	焦炭	焦炉煤气	高炉煤气	其他煤气	其他焦化产品	原油
标准煤换算系数	0.714 3	0.900 0	0.285 7	0.971 4	0.571 4	0.128 6	0.178 6	1.100 0	1.428 6
碳排放系数(以 C 计)/t·t <sup>-1</sup>	0.755 9	0.755 9	0.755 9	0.855	0.354 8	0.460 2	0.354 8	0.644 9	0.585 7
能源种类	汽油	煤油	柴油	燃料油	液化石油气	其他石油制品	天然气	热力	电力
标准煤换算系数	1.471 4	1.471 4	1.457 1	1.428 6	1.714 3	1.428 6	1.214 3	0.034 1	0.122 9
碳排放系数(以 C 计)/t·t <sup>-1</sup>	0.553 8	0.571 4	0.592 1	0.618 5	0.504 2	0.586	0.448 3	0.26	2.525 5

1) 标准煤换算系数(以标准煤计);原煤、洗精煤、其他洗煤、焦炭、其他焦化产品、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、液化石油气和其他石油制品单位为 $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;焦炉煤气、高炉煤气、天然气和其他煤气,单位为 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ;热力,单位为 $\text{kg}\cdot\text{MJ}^{-1}$ ;电力,单位为 $\text{kg}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1}$

### 1.3.2 探索性时空数据分析方法

在传统的探索性空间分析(ESDA)框架基础上,Rey 等<sup>[52]</sup>将时间和空间进行有效地整合,实现时空交互分析,提出了探索性时空数据分析(ESTDA),更加完善了对地理事物的综合过程和时空格局分析。

(1) LISA 时间路径 LISA 时间路径是基于 LISA 坐标在 Moran's  $I$  散点图中的时间迁移特性,来刻画乡域碳排在局部区域范围内的时空协同变化以及确定碳排放局部空间差异的时空动态性,以实现乡域单元碳排放值及其滞后随时间的相对移动,从而使静态的局部空间依赖转化为动态的连续表达<sup>[53]</sup>。具体方法是,每个乡域单元的 LISA 坐标由碳排放量的标准化值及其空间滞后量组成,LISA 坐标在 2 个时间点的转移通过相应 2 个时间点的 LISA 坐标的移动来测度,即 $[(y_{i,1}, yV_{i,1}), (y_{i,2}, yV_{i,2}), \dots, (y_{i,t}, yV_{i,t})]$ ,式中, $y_{i,t}$ 为  $i$  乡镇街道在  $t$  年的碳排放标准化值, $yV_{i,t}$ 为  $i$  乡镇街道在  $t$  年的空间滞后量。LISA 时间路径分析包括几何特征(相对长度  $L_i$  和弯曲度  $C_i$ )以及平均移动方向  $\gamma_i$ <sup>[54]</sup>,计算公式如下:

$$L_i = \frac{n \times \sum_{t=1}^{T-1} d(V_{i,t}, V_{i,t+1})}{\sum_{t=1}^n \sum_{t=1}^{T-1} d(V_{i,t}, V_{i,t+1})}$$

$$C_i = [d(V_{i,t}, V_{i,T})]^{-1} \cdot \sum_{t=1}^{T-1} d(V_{i,t}, V_{i,t+1})$$

$$\gamma_i = \arctan \left( \frac{\sum_i \sin \gamma_i}{\sum_i \cos \gamma_i} \right)$$

式中, $T$ 为时间间隔; $(V_{i,t}, V_{i,t+1})$ 为  $i$  乡镇街道在时刻  $t$  的 LISA 坐标; $d(V_{i,t}, V_{i,t+1})$ 为  $i$  乡镇街道从时刻  $t \sim t+1$  的移动距离; $L_i$ 为  $i$  乡镇街道的相对长度; $C_i$ 为  $i$  乡镇街道的弯曲度; $\gamma_i$ 为  $i$  乡镇街道的平均移动方向。 $L_i$ 数值越大表示  $i$  乡镇街道具有更加动态的局部空间依赖关系和空间结构。 $C_i$ 数值越大表明 LISA 时间路径越弯曲,即  $i$  乡镇街道具有更加波动的碳排放增长过程以及更加动态的局部空

间依赖;反之,则  $i$  乡镇街道受局部结构的时空依赖效应就越小,碳排放稳定性越强。

(2) LISA 时空跃迁 LISA 首先提供了从局部的视角揭示研究单元间的空间依赖性<sup>[55]</sup>。Rey<sup>[56]</sup>随后根据不同时段 Moran's  $I$  散点图中各单元局部空间关联类型的转移情况,提出了时空跃迁的概念。

时空跃迁反映 Moran's  $I$  散点图的时空演化,共分为 4 种类型<sup>[57]</sup>。类型 I 表示乡镇街道单元自身和领域随时间推移都没有发生跃迁,全部位于转移矩阵的主对角线上;类型 II 表示乡镇街道单元自身的跃迁,但是领域不跃迁,包括  $\text{HH}_t \rightarrow \text{LH}_{t+1}$ 、 $\text{HL}_t \rightarrow \text{LL}_{t+1}$ 、 $\text{LH}_t \rightarrow \text{HH}_{t+1}$  和  $\text{LL}_t \rightarrow \text{HL}_{t+1}$ ;类型 III 表示乡镇街道单元自身不跃迁,但是领域跃迁,包括  $\text{HH}_t \rightarrow \text{HL}_{t+1}$ 、 $\text{HL}_t \rightarrow \text{HH}_{t+1}$ 、 $\text{LH}_t \rightarrow \text{LL}_{t+1}$  和  $\text{LL}_t \rightarrow \text{LH}_{t+1}$ ;类型 IV 表示乡镇街道单元自身和领域均发生跃迁,又分为类型 IV A 和类型 IV B。类型 IV A 表示乡镇街道单元自身和领域的跃迁方向一致,包括  $\text{HH}_t \rightarrow \text{LL}_{t+1}$  和  $\text{LL}_t \rightarrow \text{HH}_{t+1}$ ;类型 IV B 表示乡镇街道单元自身和领域的跃迁方向相反,包括  $\text{HL}_t \rightarrow \text{LH}_{t+1}$  和  $\text{LH}_t \rightarrow \text{HL}_{t+1}$ 。此外 Rey 等<sup>[58]</sup>定义了时空变迁(flux)和时空凝聚(cohesion)的概念,其公式如下。

时空变迁为:

$$\text{SF} = (Y_2 + Y_3) / m$$

时空凝聚为:

$$\text{SC} = (Y_1 + Y_{4A}) / m$$

式中, $Y_1$ 、 $Y_2$ 、 $Y_3$  和  $Y_{4A}$  分别为研究时段内类型 I、II、III 和 IV<sub>A</sub> 的跃迁数量; $m$  为研究单元总数。

### 1.3.3 标准差椭圆

标准差椭圆(standard deviational ellipse, SDE)是一种衡量地理要素分布特征和时空演变的空间统计方法<sup>[59]</sup>,主要参数包括分布重心、主轴(长轴)、辅轴(短轴)和方位角等,计算详细过程参考宋永永等<sup>[60]</sup>的研究。SDE 的空间分布范围表示地理要素空间分布的主体区域,重心表示地理要素空间分布的相对位置,方位角反映地理要素分布的主趋势方向(即正北方向按顺时针旋转到椭圆长轴所形成的夹

角),长轴和短轴分别表示地理要素在主方向和次要方向上的离散程度。

## 2 结果与分析

### 2.1 主城区碳排放全局空间自相关性检验

由 GeoDa 软件计算出 2000、2005、2010、2015 和 2020 年主城区碳排放的全局 Moran's  $I$  指数分别为 0.430、0.432、0.349、0.261 和 0.339,结果均为正值,且通过显著性检验( $P < 0.05$ ),表明各乡镇街道碳排放之间在时空分布上不是完全随机状态,而是呈现出显著的空间正相关性,即碳排放高(低)值的乡镇(街道)在空间上趋于集聚在高(低)值附近。从全局 Moran's  $I$  指数的变化趋势来看,2000~2015 年总体呈下降趋势,由 2000 年的 0.430 下降到 2015 年的 0.261,表明该时段乡镇街道碳排放的空间趋同性不断减弱;在 2015~2020 年出现上升趋势,说明该期间乡镇街道碳排放空间趋同性逐渐增强,碳排放相似的乡镇街道在空间上更趋向于集聚分布。

### 2.2 LISA 时间路径变化分析

#### 2.2.1 几何特征分析

LISA 时间路径的几何特征能够揭示主城区碳排放局部空间结构的动态性以及空间依赖方向上的波动性<sup>[61]</sup>。本文采用自然间断点分级法(Jenks)将相对长度从低到高划分成 4 个等级,即低相对长度(0.171~0.735)、中等相对长度(0.736~1.408)、较高相对长度(1.409~2.272)和高相对长度(2.273~3.854)。图 2 显示,长生桥镇、双凤桥街道、鸳鸯街道、鱼嘴镇和龙兴镇等 5 个乡镇街道为高相对长度,说明其局部空间结构具有最强的动态性;较高相对长度包括花园路街道、曾家镇和王家街道等 22 个乡镇街道,表明上述乡镇街道的局部空间结构具有较强的动态性;石井坡街道、新山村街道和东阳街道等 69 个乡镇街道为中等相对长度,表明其具有较稳定的局部空间结构;柳荫镇、大湾镇和茨竹镇等 57 个乡镇街道为低相对长度,说明其局部空间结构的稳定性最强。综上,低相对长度和中等相对长度的乡镇街道共计 126 个(占比 82%),表明近 20 年整体上主城区乡域碳排放的局部空间结构较为稳定。从空间分布来看,整体呈“北低-中高-南低”的格局,北部和南部的乡域具有较为稳定的局部空间结构,多集中在渝北和巴南,其原因是这些区域多为资源型和老工业基地,碳排放量始终较高,转型压力大,导致局部空间结构不易发生改变;中部的乡域具有更加动态的局部空间结构,多集中在沙坪坝、渝中、江北和南岸,这可能是由于一方面近些年这些区域的经济快速发展导致居民生活水平和

社会消费水平显著提高,消费内容日趋丰富、消费量逐渐增大,由生存型隐含碳排放发展为奢侈型隐含碳排放<sup>[62]</sup>;另一方面房地产和汽车工业等产业的快速发展,带动了采掘业、石油和金属加工业、建材业等高碳制造业的急剧膨胀,从而导致碳排放显著增加,使得区域碳排放的局部空间结构动态性较大。

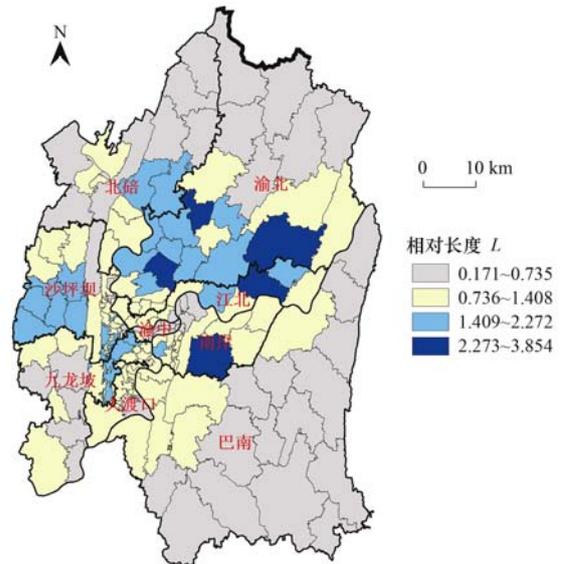


图 2 LISA 时间路径相对长度的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of relative length of the LISA time path

此外,本文通过自然间断点分级法将弯曲度从低到高划分 4 个等级,低弯曲度(1.001~1.591)、中等弯曲度(1.592~2.723)、较高弯曲度(2.724~4.977)和高弯曲度(4.978~10.812)。由图 3 可知,姜家镇、寸滩街道和天星寺镇为高弯曲度乡镇街道,表明这 3 个乡镇街道碳排放增长具有最强波动性和局部空间依赖变化过程;较高弯曲度包括回兴街道、双河口镇和柳荫镇等 12 个乡镇街道,其碳排放增长和局部空间依赖变化波动性较强;北温泉街道、井口街道和石板镇等 36 个乡镇街道为中等弯曲度,具有波动性较弱的碳排放增长和局部空间依赖变化过程;覃家岗街道、石油路街道和花园路街道等 102 个乡镇街道均属于低弯曲度乡镇街道,其碳排放增长和局部空间依赖变化波动性最弱。综上,低弯曲度和中等弯曲度的乡镇街道共计 138 个(占比 90%),表明整体上主城区碳排放增长和局部空间依赖变化过程较为稳定。从空间分布上看,弯曲度呈“西北低-东南高”的格局,弯曲度较大的乡镇多集中在巴南区,表明这些乡镇碳排放具有较强的空间依赖性。王少剑等<sup>[13]</sup>研究表明第二产业发展对碳排放增长具有较强推动作用,据统计数据显示,2020 年第二产业对巴南区经济增长贡献率高达 60.5%,巴南区一直作为重庆市的老工业基地,长期对外开

放和招商引资,兴建工业园区,发挥出良好的集聚效应,全区经济社会发展的同时导致乡域碳排放迅速增长,并表现出较强的空间依赖性.弯曲度较小的乡域多分布于渝中、江北和沙坪坝等,其原因是上述城区的第二产业比重较小,分别占 9.6%、21.4% 和 31.8%,工业碳排放的影响较小,使得乡镇碳排放局部空间依赖变化过程较为稳定.

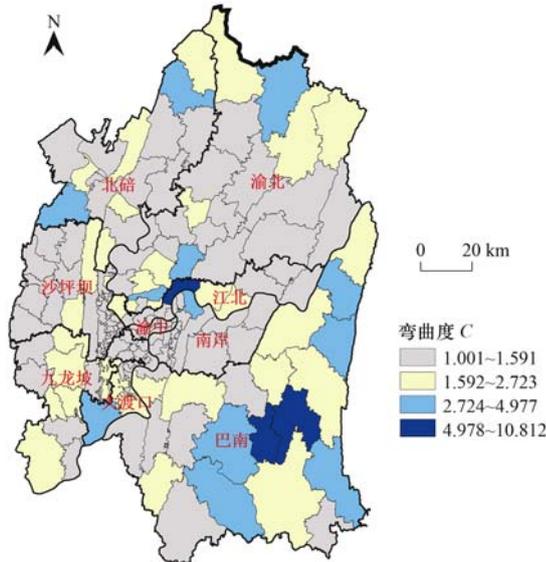


图 3 LISA 时间路径弯曲度的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of tortuosity of the LISA time path

### 2.2.2 平均移动方向分析

LISA 移动方向可以反映碳排放空间格局变化的整合性<sup>[61]</sup>.根据各乡镇街道 LISA 坐标计算得到 LISA 平均移动方向,分为 4 种类型:0°~90°方向(高-高态势),表示乡镇街道自身及其相邻乡镇街道的碳排放均保持高增长趋势;90°~180°方向(低-高态势),表示乡镇街道自身碳排放呈低增长趋势,而其相邻乡镇街道呈高增长趋势;180°~270°方向表示(低-低态势),即乡镇街道自身及其相邻乡镇街道的碳排放均呈低增长趋势;270°~360°方向表示(高-低态势),表明乡镇街道自身碳排放呈高增长趋势而其相邻乡镇街道则呈低增长态势.其中 0°~90°方向为协同高增长趋势,180°~270°方向是协同低增长趋势,这两种协同增长趋势表示乡镇街道及其相邻乡镇街道呈整合的空间动态性.

本研究结果显示(图 4),2000~2020 年协同高增长(0°~90°)的乡镇街道共有 38 个,呈协同高增长趋势;协同低增长(180°~270°)的乡镇街道共计 75 个,呈协同低增长趋势.两种协同增长类型的乡镇街道共计 113 个(占比 74%),说明近 20 年主城区乡镇街道碳排放空间格局变化具有较强的空间整合性.从空间分布来看,协同性增长型的乡镇街道分布呈片状集中分布,从这点也能表

明主城区乡域碳排放会受到邻域的影响,表现出较强的空间整合性.

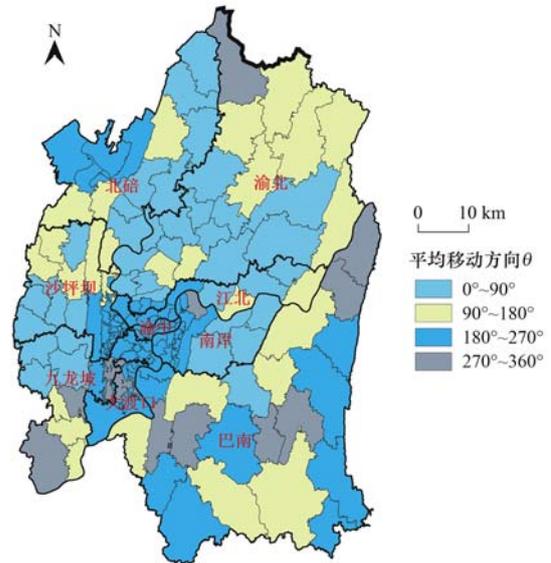


图 4 LISA 时间路径平均移动方向的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of average movement direction of the LISA time path

### 2.3 LISA 时空跃迁分析

LISA 时间路径分析仅仅揭示各乡镇街道 LISA 坐标的变化大小及变化趋势,但无法反映 Moran's  $I$  散点图中局部空间关联类型的相互转移特征,随后 Rey<sup>[56]</sup>提出的 Moran's  $I$  转移概率矩阵和时空跃迁有效解决了这一问题,因此本文利用其提出的概率转移矩阵和时空跃迁来探究主城区乡域碳排放局部空间关联类型的转移特征和演化过程.

由表 3 可知,2000~2005、2005~2010、2010~2015 和 2015~2020 年 4 个时段的 Moran's  $I$  散点保持在同一象限内(类型 I)的概率均在 70% 左右,说明主城区乡域碳排放存在一定的转移惰性,类型不易改变,具有较强的路径依赖和空间锁定特征.4 个时段的类型 II 和 III 占比均在 10% 左右,表明主城区乡域碳排放局部时空关联类别间存在一定的转移概率,其中  $LH_t \rightarrow LL_{t+1}$  和  $HL_t \rightarrow LL_{t+1}$  转移概率多数在 20% 以上,而  $LH_t \rightarrow HH_{t+1}$  和  $HL_t \rightarrow HH_{t+1}$  转移概率多数在 20% 以下,表明与高值俱乐部集聚趋势相对比,低值俱乐部集聚趋势会表现得更加明显.4 个时段的类型 IV 占比均小于 6%,表明主城区乡域碳排放发生跳跃转移型的概率很低.

根据各类型跃迁数量计算,得到 4 个时段的时空凝聚指数(SC)均大于 70%,时空变迁指数(SF)均小于 30%,进一步说明主城区乡域碳排放局部空间关联模式具有较强的稳定性,即存在一定的路径依赖或空间锁定特征.随着时间推移,时空凝聚指数呈下降趋势,时空变迁指数呈上升趋势,表

明主城区乡域碳排放空间格局的路径依赖和锁定特征逐渐弱化. 根据跃迁类型的转移概率可知, 主

城区乡域碳排放在一定程度上会受到邻域空间溢出效应影响.

表 3 主城区碳排放 Moran's *I* 转移概率矩阵与时空跃迁/%

Table 3 Moran's *I* transition probability matrix and spatiotemporal transition of carbon emissions/%

年份	$t \sim t+1$	HH	LH	LL	HL	类型	数量/个	比例	SF	SC
2000 ~ 2005	HH	80.77	15.38	1.92	1.92	I	128	83.66	15.03	84.97
	LH	13.64	77.27	9.09	0	II	15	9.80		
	LL	1.39	4.17	91.67	2.78	III	8	5.23		
	HL	28.57	0	28.57	42.86	IV	2	1.31		
2005 ~ 2010	HH	72.92	16.67	6.25	4.17	I	107	69.93	24.18	75.82
	LH	14.29	67.86	17.86	0	II	15	9.80		
	LL	8.45	19.72	67.61	4.23	III	22	14.38		
	HL	16.67	0	0	83.33	IV	9	5.88		
2010 ~ 2015	HH	80.43	6.52	0	13.04	I	115	75.16	24.18	75.82
	LH	2.44	70.73	26.83	0	II	12	7.84		
	LL	1.79	12.50	76.79	8.93	III	25	16.34		
	HL	10.00	0	30.00	60.00	IV	1	0.65		
2015 ~ 2020	HH	75.00	17.50	2.50	5.00	I	108	70.59	26.80	73.20
	LH	17.95	53.85	28.21	0	II	20	13.07		
	LL	5.26	5.26	87.72	1.75	III	21	13.73		
	HL	29.41	0	29.41	41.18	IV	4	2.61		

#### 2.4 主城区碳排放的重心迁移及标准差椭圆分析

本文为进一步揭示主城区碳排放重心的迁移变化以及高碳排放乡域的空间分布, 采用 SDE 方法进行补充探讨. 由表 4 和图 5 可知, 近 20 年主城区碳排放重心分布在  $106^{\circ}30'43'' \sim 106^{\circ}32'42''$  E,  $29^{\circ}33'34'' \sim 29^{\circ}35'56''$  N 之间, 位于全区几何中心 ( $106^{\circ}38'34''$  E,  $29^{\circ}36'03''$  N) 的西南方向, 表明主城区的西部和南部乡域碳排放量较高, 这是因为从经济水平和社会消费因素看, 西部地区经济发展水平较高, 经济高速发展的同时伴随着大量能源的消耗; 同时西部地区社会消费增长会带动能源需求扩大, 从而促进城市居民生活能源碳排放量提高. 从产业结构和资源禀赋因素看, 南部地区第二产业比重较大, 第二产业属于高耗能、高碳排放产业, 加之南部地区原煤、铁矿、石油和天然气等矿产资源丰富, 自然资源禀赋能力越强, 考虑成本距离, 则向邻近乡域输入的资源就越多, 使得生产规模会相应扩大, 势必造成南部地区的碳排放较高. 因此, 在制定差异化减排政策时西部和南部乡域都应该承担更多的减排任务.

从重心移动轨迹看, 主城区碳排放重心整体上向东北方向移动, 表明主城区东部和北部乡域的碳排放增长速度高于平均水平. 近 20 年移动距离共计 6.32 km, 具体表现为 2000 ~ 2005 年重心向东北方向迁移了 0.84 km; 2005 ~ 2010 年重心向西北方向迁移了 1.26 km; 2010 ~ 2015 年重心向东北方向迁移了 1.84 km; 2015 ~ 2020 年重心向东北方向迁移了 2.38 km.

从方位角变化看, 近 20 年呈先减小后增大的趋势. 首先从 2000 年的  $178.2^{\circ}$  减小到 2005 年的  $3.1^{\circ}$ , 然后持续增大到 2020 年的  $36.4^{\circ}$ , 表明近 20 年主城区碳排放的空间格局由“西北-东南”转变为“东北-西南”.

从主轴方向上看, 长轴由 2000 年的 40.10 km 缩小至 2005 年的 39.48 km, 表明该时段主城区碳排放在“东北-西南”方向上出现向心集聚现象, 这是因为经济发展作为碳排放增长的主导因素之一<sup>[5]</sup>, 在国家西部大开发战略实施之初, 西南和东北乡域经济基础薄弱, 发展速度较慢, 碳排放较低, 而中部乡域经济发展较快, 碳排放较高, 促使碳排放呈向心集聚. 2005 ~ 2020 年长轴由 39.48 km 扩大到 44.71 km, 表明该时段主城区碳排放在“东北-西南”方向上呈现发散, 其原因是西部大开发战略实施一定阶段后, 实施成效逐渐凸显, 近些年西南和东北乡域原先经济基础薄弱的态势得到极大改善, 经济发展取得长足进步, 导致碳排放增速加快, 逐渐缩小和中部乡域的差距, 使得碳排放呈发散现象.

从辅轴方向上看, 短轴由 2000 年的 27.83 km 增加到 2020 年的 35.23 km, 表明近 20 年主城区碳排放在“西北-东南”方向上呈现发散, 主要原因是一方面从经济发展看, 近些年北碚和渝北经济发展快速, 导致西北部乡域碳排放量增长较快; 另一方面从产业结构看, 作为老工业基地的巴南对第二产业具有高度依赖性, 近些年不断招商引资, 吸引大量重工业企业集聚, 导致对能源消耗需求较大, 使得碳排放表现出发散趋势.

表 4 主城区碳排放标准差椭圆参数

Table 4 Ellipse parameters of carbon emission standard deviation of towns (streets) in the main urban area

年份	重心坐标		重心迁移			长轴/km	短轴/km	方位角/(°)
	经度(E)	纬度(N)	方向	距离/km	速率/km·a <sup>-1</sup>			
2000	106°31'14"	29°33'34"	— <sup>1)</sup>	—	—	40.10	27.83	178.2
2005	106°31'17"	29°34'01"	东北	0.84	0.17	39.48	28.16	3.1
2010	106°30'43"	29°34'29"	西北	1.26	0.25	40.97	30.44	12.3
2015	106°31'39"	29°35'02"	东北	1.84	0.37	42.61	33.11	21.1
2020	106°32'42"	29°35'56"	东北	2.38	0.48	44.71	35.23	36.4

1) “—”表示无数据

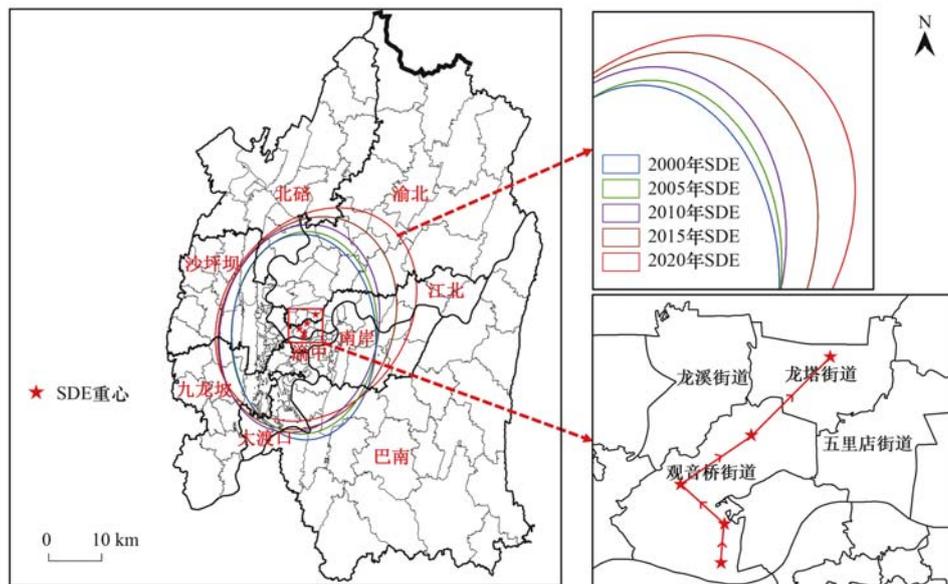


图 5 主城区碳排放标准差椭圆分布及重心移动轨迹

Fig. 5 Ellipse distribution of carbon emission standard deviation and the movement trajectory of the center of gravity of the township streets in the main urban area

### 3 讨论

本文从小尺度单元计算了城市碳排放的时空动态格局. 以往研究很少有过从如此小的空间尺度研究城市碳排放, 关于城市碳排放的文献大多是以县域为基本研究单元, 例如于博等<sup>[63]</sup>以县域为基本单元, 在县级尺度下对哈长城市群碳排放的空间溢出效应及影响因素进行了研究. 谭显春等<sup>[64]</sup>利用县域 GDP、人口和省级能耗指标对县级尺度下广东省碳排放量进行了核算. Jin 等<sup>[65]</sup>研究分析了江苏省县域城市旅游业碳排放流量的流入、流出和净流量的空间格局. 事实上, 高长春等<sup>[61]</sup>明确指出不能忽略小尺度导致碳排放研究产生的波动性及差异性; 李璐等<sup>[45]</sup>在对武汉城市圈开展碳排放研究展望中明确指出, 考虑到县域内部也存在一定的差异性, 后续研究工作应该进一步以乡镇作为基本单元, 以提高减排政策的现实指导作用. 因此本文尝试对现有碳排放研究向更小尺度的延伸拓展, 对现有研究现状进行补充完善, 在减排政策制定方面对城市碳排放时空动态格局具有较微观尺度的科学依据.

本研究发现 2000 ~ 2020 年主城区乡域碳排放存在显著的空间正相关性, 并且这种正相关程度在近 5 年得到增强, 因此未来在制定碳减排政策时应该优先考虑该关联性, 在区域协调发展的大背景下, 加强乡域之间要素流动、产业合作和优化调整, 使乡域产业发展具有联动特征, 同时加大对绿色产业的扶持, 完善乡域合作互助机制与利益补偿机制, 达到碳减排目的, 实现国家“双碳”战略目标. 由本文的 LISA 时间路径和时空跃迁结果可知, 乡域碳排放的空间地理分布上具有较强的路径依赖性, 并且局部空间结构具有较强的稳定性和整合性, 各个乡域碳排放受到邻域空间影响, 这一相似结果同样在赵桂梅等<sup>[66]</sup>、潘竞虎等<sup>[67]</sup>和王少剑等<sup>[68]</sup>分别对省域、市域和县域的碳排放研究中得到体现. 从 SDE 分析结果来看, 西部和南部乡域是未来碳减排的重点区域, 一方面加强对该区域碳排放状况的有效监测与治理, 加大碳排放的约束性, 优化以煤炭、重工业为主的传统经济发展路径, 促进化工、电力和钢铁等高耗能产业转型升级, 实现能源利用效率, 达到减排成效; 另一方面建议倡导低碳化的居民消费模

式和生活方式,优化消费结构,提高居民低碳意识,形成绿色环保的社会良好氛围。最后,城市低碳发展除了限制高碳排放之外,还应尽力提高区域碳汇<sup>[69]</sup>。林地和草地是碳汇的重要载体,建议完善区域生态补偿机制、补偿标准和实施体系,通过退耕还林和植树造林等途径有效增加区域生态系统碳汇。

目前关于碳排放的测算方法并不唯一,学术界尚未形成统一标准的核算方法。例如杜海波等<sup>[5]</sup>基于 DMSP/OLS 与 NPP/VIIRS 夜间灯光数据,研究了 2000~2018 年黄河流域能源消费碳排放的时空变化特征;莫惠斌等<sup>[70]</sup>同样利用 DMSP/OLS 与 NPP/VIIRS 夜间灯光数据反演得到 2000~2017 年黄河流域县域碳排放数据,并对其时空格局与空间效应进行了探析;刘华军等<sup>[32]</sup>根据中国碳核算公共数据库 CEADs(www.ceads.net)提供的县域单元碳排放数据,分析了 1997~2017 年中国碳排放的空间格局;侯勃等<sup>[31]</sup>利用碳排放系数法测算出上海市各区的碳排放量,探讨了上海市碳排放时空异质性探测及影响因素。上述测算方法都具有一定优势和不足:夜间灯光数据集虽然能较好地长时间动态监测碳排放特征,但是夜间灯光数据亮度值与碳排放量之间的准确关系需要更深入的研究<sup>[5]</sup>;CEADs 碳排放数据库具有涵盖全面,时间跨度大等优点,但是统计基本单元针对县域,缺乏对更小尺度单元的统计<sup>[67]</sup>;碳排放系数法的优点在于数据易获取、计算方便,缺点则是碳排放系数存在一定差异性和局限性<sup>[25]</sup>,缺乏考虑区域经济发展水平、资源禀赋和能源消耗强度造成的碳排放系数年际差异影响。本文的碳排放系数参考取值来源于已有研究文献,选取重庆市及其周边相似区域的研究成果,为减少单一误差给研究结果带来的负面影响,采取计算平均值方法,这种做法在其他学者研究中得到体现<sup>[40,47]</sup>,具有一定的合理性,但没有实地采样、勘测准确性高<sup>[14]</sup>。为进一步提高研究结果的准确性,后续研究应该根据主城区的实际情况对碳排放系数进行深入分析,并且考虑年际差异的影响,得到更适于主城区的碳排放系数。此外受文章篇幅所限,在本文研究成果的基础上,后续研究工作将会进一步选取相应驱动因子变量,通过相关模型和研究方法进行驱动机制定量分析,系统全面分析主城区乡域碳排放时空演变的深层次诱因,也将是后续研究的重点方向。

#### 4 结论

(1)2000~2020 年主城区碳排放全局 Moran's *I* 指数均为正值,且均通过显著性检验( $P < 0.05$ ),表

明主城区碳排放呈显著的空间正相关,即碳排放较高或较低的乡镇街道在空间上均趋于相邻。

(2)LISA 时间路径分析表明,2000~2020 年低、中等相对长度的乡镇街道数共计 126 个(占比 82%),表明主城区乡域碳排放的局部空间结构具有较强的稳定性;低、中等弯曲度的乡镇街道数共计 138 个(占比 90%),说明主城区乡域碳排放的空间依赖方向上的波动性较为稳定;协同增长类型的乡镇街道数共计 113 个(占比 74%),表明主城区乡域碳排放格局具有较强的空间整合性。

(3)LISA 时空跃迁分析表明,2000~2020 年 4 个时段的时空凝聚指数均大于 70%,时空变迁指数均小于 30%,说明主城区乡域碳排放局部空间关联模式存在较强的稳定性,即具有一定的路径依赖或空间锁定特征。

(4)2000~2020 年主城区碳排放重心分布在  $106^{\circ}30'43'' \sim 106^{\circ}32'42''E, 29^{\circ}33'34'' \sim 29^{\circ}35'56''N$  之间,位于全区几何中心( $106^{\circ}38'34''E, 29^{\circ}36'03''N$ )的西南方向,表明西部和南部乡域碳排放量较高;重心整体上向东北方向迁移,移动距离为 6.32 km,表明东部和北部乡域的碳排放增长速度高于平均水平;主城区碳排放的空间格局由“西北-东南”转变为“东北-西南”,长轴由 2000 年的 40.10 km 扩大至 2020 年的 44.71 km,短轴由 2000 年的 27.83 km 增加到 2020 年的 35.23 km。

#### 参考文献:

- [1] 蒋自然,金环环,王成金,等.长江经济带交通碳排放强度及其效率格局(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.
- [2] 王晓锋,袁兴中,陈槐,等.河流 CO<sub>2</sub> 与 CH<sub>4</sub> 排放研究进展[J].环境科学,2017,38(12):5352-5366.  
Wang X F, Yuan X Z, Chen H, et al. Review of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> emissions from rivers[J]. Environmental Science, 2017, 38(12): 5352-5366.
- [3] 刘婷婷,王晓锋,袁兴中,等.快速城市化区河流温室气体排放的时空特征及驱动因素[J].环境科学,2019,40(6):2827-2839.  
Liu T T, Wang X F, Yuan X Z, et al. Spatial-temporal characteristics and driving factors of greenhouse gas emissions from rivers in a rapidly urbanizing area[J]. Environmental Science, 2019, 40(6): 2827-2839.
- [4] 王少剑,田莎莎,蔡清楠,等.产业转移背景下广东省工业碳排放的驱动因素及碳转移分析[J].地理研究,2021,40(9):2606-2622.  
Wang S J, Tian S S, Cai Q N, et al. Driving factors and carbon transfer of industrial carbon emissions in Guangdong province under the background of industrial transfer[J]. Geographical Research, 2021, 40(9): 2606-2622.

- [5] 杜海波, 魏伟, 张学渊, 等. 黄河流域能源消费碳排放时空格局演变及影响因素——基于 DMSP/OLS 与 NPP/VIIRS 夜间灯光数据[J]. 地理研究, 2021, **40**(7): 2051-2065.  
Du H B, Wei W, Zhang X Y, *et al.* Spatio-temporal evolution and influencing factors of energy-related carbon emissions in the Yellow River Basin; based on the DMSP/OLS and NPP/VIIRS nighttime light data[J]. *Geographical Research*, 2021, **40**(7): 2051-2065.
- [6] 张卫建, 严圣吉, 张俊, 等. 国家粮食安全与农业双碳目标的双赢策略[J]. 中国农业科学, 2021, **54**(18): 3892-3902.  
Zhang W J, Yan S J, Zhang J, *et al.* Win-win strategy for national food security and agricultural double-carbon goals[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, **54**(18): 3892-3902.
- [7] 石龙宇, 许通, 高莉洁, 等. 可持续框架下的城市低碳社区[J]. 生态学报, 2018, **38**(14): 5170-5177.  
Shi L Y, Xu T, Gao L J, *et al.* Low carbon community research under sustainability context[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(14): 5170-5177.
- [8] Sun W, Huang C C. How does urbanization affect carbon emission efficiency? Evidence from China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, **272**, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.122828.
- [9] Samuel C N, Venkatadri U, Diallo C, *et al.* Robust closed-loop supply chain design with presorting, return quality and carbon emission considerations [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, **247**, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.119086.
- [10] 王少剑, 高爽, 黄永源, 等. 基于超效率 SBM 模型的中国城市碳排放绩效时空演变格局及预测[J]. 地理学报, 2020, **75**(6): 1316-1330.  
Wang S J, Gao S, Huang Y Y, *et al.* Spatio-temporal evolution and trend prediction of urban carbon emission performance in China based on super-efficiency SBM model [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2020, **75**(6): 1316-1330.
- [11] Ning Y D, Chen K K, Zhang B Y, *et al.* Energy conservation and emission reduction path selection in China: a simulation based on bi-level multi-objective optimization model[J]. *Energy Policy*, 2020, **137**, doi: 10.1016/j.enpol.2019.111116.
- [12] Li X, Li Y P. A multi-scenario ensemble simulation and environmental input-output model for identifying optimal pollutant- and CO<sub>2</sub>-emission mitigation scheme of Guangdong province[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, **262**, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121413.
- [13] 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.
- [14] 李磊, 陈浩, 朱弈, 等. 城镇河流 CO<sub>2</sub> 及 CH<sub>4</sub> 排放与市政排水管网污水输入的关联影响[J]. 环境科学, 2020, **41**(7): 3392-3401.  
Li L, Chen H, Zhu Y, *et al.* Relationship between CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> emissions in urban rivers and sewage discharging from a municipal drainage network[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(7): 3392-3401.
- [15] Quan C G, Cheng X J, Yu S S, *et al.* Analysis on the influencing factors of carbon emission in China's logistics industry based on LMDI method[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **734**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138473.
- [16] 郑德凤, 刘晓星, 王燕燕, 等. 中国省际碳足迹广度、深度评价及时空格局[J]. 生态学报, 2020, **40**(2): 447-458.  
Zheng D F, Liu X X, Wang Y Y, *et al.* Assessment of carbon footprint size, depth and its spatial-temporal pattern at the provincial level in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, **40**(2): 447-458.
- [17] Yang Y T, Qu S, Cai B F, *et al.* Mapping global carbon footprint in China[J]. *Nature Communications*, 2020, **11**(1), doi: 10.1038/s41467-020-15883-9.
- [18] Burtscher L, Barret D, Borkar A P, *et al.* The carbon footprint of large astronomy meetings [J]. *Nature Astronomy*, 2020, **4**(9): 823-825.
- [19] 吕倩, 刘海滨. 京津冀县域尺度碳排放时空演变特征——基于 DMSP/OLS 夜间灯光数据[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2019, **21**(6): 41-50.  
Lv Q, Liu H B. Spatio-temporal evolution characteristics of county scale carbon emissions in Beijing-Tianjin-Hebei region—a study based on DMSP/OLS nighttime light data [J]. *Journal of Beijing Institute of Technology (Social Sciences Edition)*, 2019, **21**(6): 41-50.
- [20] 李建豹, 黄贤金, 揣小伟, 等. 长三角地区碳排放效率时空特征及影响因素分析[J]. 长江流域资源与环境, 2020, **29**(7): 1486-1496.  
Li J B, Huang X J, Chuai X W, *et al.* Spatio-temporal characteristics and influencing factors of carbon emissions efficiency in the Yangtze River Delta region [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2020, **29**(7): 1486-1496.
- [21] 郭艺, 曹贤忠, 魏文栋, 等. 长三角区域一体化对城市碳排放的影响研究[J]. 地理研究, 2022, **41**(1): 181-192.  
Guo Y, Cao X Z, Wei W D, *et al.* The impact of regional integration in the Yangtze River Delta on urban carbon emissions [J]. *Geographical Research*, 2022, **41**(1): 181-192.
- [22] 张利国, 王占岐, 李冰清. 湖北省土地整治项目碳效应核算及其分析[J]. 自然资源学报, 2018, **33**(11): 2006-2019.  
Zhang L G, Wang Z Q, Li B Q. Carbon effect accounting and analysis of land consolidation in Hubei Province [J]. *Journal of Natural Resources*, 2018, **33**(11): 2006-2019.
- [23] 朱鹏祥. 低碳视角下的城市碳排放时空分布特征与空间管控研究——以合肥市为例[D]. 合肥: 安徽建筑大学, 2020.  
Zhu P X. Spatial distribution characteristics and spatial control of urban carbon emissions from a low-carbon perspective——Take Hefei City as an example [D]. Hefei: Anhui Jianzhu University, 2020.
- [24] 杨国清, 朱文锐, 文雅, 等. 20 年来广东省土地利用碳排放强度与效率空间分异研究[J]. 生态环境学报, 2019, **28**(2): 332-340.  
Yang G Q, Zhu W R, Wen Y, *et al.* Spatial differentiation in the intensity and efficiency of carbon emission from land use in Guangdong province in past two decades [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, **28**(2): 332-340.
- [25] 魏燕茹, 陈松林. 福建省土地利用碳排放空间关联性与碳平衡分区[J]. 生态学报, 2021, **41**(14): 5814-5824.  
Wei Y R, Chen S L. Spatial correlation and carbon balance zoning of land use carbon emissions in Fujian Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, **41**(14): 5814-5824.
- [26] 张帅, 袁长伟, 赵小曼. 中国交通运输碳排放空间聚类与关联网络结构分析[J]. 经济地理, 2019, **39**(1): 122-129.  
Zhang S, Yuan C W, Zhao X M. Spatial clustering and correlation network structure analysis of transportation carbon emissions in China [J]. *Economic Geography*, 2019, **39**(1): 122-129.
- [27] 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.
- [28] 周嘉, 王钰萱, 刘学荣, 等. 基于土地利用变化的中国省域碳排放时空差异及碳补偿研究[J]. *地理科学*, 2019, **39**(12): 1955-1961.
- Zhou J, Wang Y X, Liu X R, *et al.* Spatial temporal differences of carbon emissions and carbon compensation in China based on land use change [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2019, **39**(12): 1955-1961.
- [29] 刘贤赵, 高长春, 宋炎, 等. 湖南市域化石能源消费碳排放时空格局及驱动因素[J]. *生态学报*, 2017, **37**(7): 2476-2487.
- Liu X Z, Gao C C, Song Y, *et al.* Temporal-spatial carbon emission patterns caused by fossil energy consumption at the city level in Hunan Province, China and the factors driving their composition [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(7): 2476-2487.
- [30] 苏凯, 陈毅辉, 范水生, 等. 市域能源碳排放影响因素分析及减碳机制研究——以福建省为例[J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(2): 859-867.
- Su K, Chen Y H, Fan S S, *et al.* Influencing factors and reduction mechanism of carbon emissions at the city-range: an empirical study on Fujian province [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(2): 859-867.
- [31] 侯勃, 岳文泽, 王腾飞. 中国大都市区碳排放时空异质性探测与影响因素——以上海市为例[J]. *经济地理*, 2020, **40**(9): 82-90.
- Hou B, Yue W Z, Wang T F. Spatiotemporal heterogeneity pattern and influencing factors of carbon emission in metropolitan areas of China: a case of Shanghai [J]. *Economic Geography*, 2020, **40**(9): 82-90.
- [32] 刘华军, 邵明吉, 吉元梦. 中国碳排放的空间格局及分布动态演进——基于县域碳排放数据的实证研究[J]. *地理科学*, 2021, **41**(11): 1917-1924.
- Liu H J, Shao M J, Ji Y M. The spatial pattern and distribution dynamic evolution of carbon emissions in China: empirical study based on county carbon emission data [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2021, **41**(11): 1917-1924.
- [33] 王睿, 张赫, 强文丽, 等. 基于城镇化的中国县级城市碳排放空间分布特征及影响因素[J]. *地理科学进展*, 2021, **40**(12): 1999-2010.
- Wang R, Zhang H, Qiang W L, *et al.* Spatial characteristics and influencing factors of carbon emissions in county-level cities of China based on urbanization [J]. *Progress in Geography*, 2021, **40**(12): 1999-2010.
- [34] 张骞, 高明, 杨乐, 等. 1988—2013年重庆市主城九区生态用地空间结构及其生态系统服务价值变化[J]. *生态学报*, 2017, **37**(2): 566-575.
- Zhang Q, Gao M, Yang L, *et al.* Changes in the spatial structure of ecological land and ecosystem service values in nine key districts of Chongqing City over the past 25 years [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(2): 566-575.
- [35] 周思宇, 郗凤明, 尹岩, 等. 东北地区耕地利用碳排放核算及驱动因素[J]. *应用生态学报*, 2021, **32**(11): 3865-3871.
- Zhou S Y, Xi F M, Yin Y, *et al.* Accounting and drivers of carbon emission from cultivated land utilization in Northeast China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, **32**(11): 3865-3871.
- [36] Cai Z C, Kang G D, Tsuruta H, *et al.* Estimate of CH<sub>4</sub> emissions from year-round flooded rice fields during rice growing season in China [J]. *Pedosphere*, 2005, **15**(1): 66-71.
- [37] 何勇, 姜允迪, 丹利, 等. 中国气候、陆地生态系统碳循环研究 [M]. 北京: 气象出版社, 2006.
- [38] 蓝家程, 傅瓦利, 袁波, 等. 重庆市不同土地利用碳排放及碳足迹分析 [J]. *水土保持学报*, 2012, **26**(1): 146-150, 155.
- Lan J C, Fu W L, Yuan B, *et al.* Analysis of land use patterns on carbon emission and carbon footprint in Chongqing city [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, **26**(1): 146-150, 155.
- [39] 石洪听, 穆兴民, 张应龙, 等. 四川省广元市不同土地利用类型的碳排放效应研究 [J]. *水土保持通报*, 2012, **32**(3): 101-106.
- Shi H X, Mu X M, Zhang Y L, *et al.* Effects of different land use patterns on carbon emission in Guangyuan City of Sichuan Province [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2012, **32**(3): 101-106.
- [40] 何海珊, 赵宇豪, 吴健生. 低碳导向下土地覆被演变模拟——以深圳市为例 [J]. *生态学报*, 2021, **41**(21): 8352-8363.
- He H S, Zhao Y H, Wu J S. Simulation of urban landscape pattern under the influence of low carbon: a case study of Shenzhen [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, **41**(21): 8352-8363.
- [41] 方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 等. 1981~2000年中国陆地植被碳汇的估算 [J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2007, **37**(6): 804-812.
- Fang J Y, Guo Z D, Piao S L, *et al.* Terrestrial vegetation carbon sinks in China, 1981-2000 [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2007, **50**(9): 1341-1350.
- [42] 肖红艳, 袁兴中, 李波, 等. 土地利用变化碳排放效应研究——以重庆市为例 [J]. *重庆师范大学学报(自然科学版)*, 2012, **29**(1): 38-42.
- Xiao H Y, Yuan X Z, Li B, *et al.* The effects of land use changes on carbon emission C; take Chongqing as an example [J]. *Journal of Chongqing Normal University (Natural Science)*, 2012, **29**(1): 38-42.
- [43] 王刚, 张华兵, 薛菲, 等. 成都市县域土地利用碳收支与经济发展关系研究 [J]. *自然资源学报*, 2017, **32**(7): 1170-1182.
- Wang G, Zhang H B, Xue F, *et al.* Relations between land use carbon budget and economic development at county level in Chengdu city [J]. *Journal of Natural Resources*, 2017, **32**(7): 1170-1182.
- [44] 彭文甫, 周介铭, 徐新良, 等. 基于土地利用变化的四川省碳排放与碳足迹效应及时空格局 [J]. *生态学报*, 2016, **36**(22): 7244-7259.
- Peng W F, Zhou J M, Xu X L, *et al.* Effect of land use changes on the temporal and spatial patterns of carbon emissions and carbon footprints in the Sichuan Province of Western China, from 1990 to 2010 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, **36**(22): 7244-7259.
- [45] 李璐, 董捷, 徐磊, 等. 功能区土地利用碳收支空间分异及碳补偿分区——以武汉城市圈为例 [J]. *自然资源学报*, 2019, **34**(5): 1003-1015.
- Li L, Dong J, Xu L, *et al.* Spatial variation of land use carbon budget and carbon compensation zoning in functional areas: a case study of Wuhan urban agglomeration [J]. *Journal of Natural Resources*, 2019, **34**(5): 1003-1015.

- [46] 赖力. 中国土地利用的碳排放效应研究[D]. 南京: 南京大学, 2010.  
Lai L. Carbon emission effect of land use in China [D]. Nanjing: Nanjing University, 2010.
- [47] 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.
- [48] 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴(2001~2021年)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2002-2022.
- [49] Eggleston H S, Buendia L, Miwa K, *et al.* 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories [M]. Kanagawa: IGES, 2006.
- [50] 卢娜. 土地利用变化碳排放效应研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2011.  
Lu N. The research on carbon emission effects of land use change [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2011.
- [51] 范建双, 虞晓芬, 周琳. 南京市土地利用结构碳排放效率增长及其空间相关性[J]. 地理研究, 2018, **37**(11): 2177-2192.  
Fan J S, Yu X F, Zhou L. Carbon emission efficiency growth of land use structure and its spatial correlation: a case study of Nanjing city[J]. *Geographical Research*, 2018, **37**(11): 2177-2192.
- [52] Rey S J, Janikas M V. STARS: space-time analysis of regional systems[J]. *Geographical Analysis*, 2006, **38**(1): 67-86.
- [53] Ye X Y, Rey S. A framework for exploratory space-time analysis of economic data[J]. *The Annals of Regional Science*, 2013, **50**(1): 315-339.
- [54] Rey S J. Space-time patterns of rank concordance: local indicators of mobility association with application to spatial income inequality dynamics [J]. *Annals of the American Association of Geographers*, 2016, **106**(4): 788-803.
- [55] Anselin L. Local indicators of spatial association—LISA [J]. *Geographical Analysis*, 1995, **27**(2): 93-115.
- [56] Rey S J. Spatial empirics for economic growth and convergence [J]. *Geographical Analysis*, 2001, **33**(3): 195-214.
- [57] Rey S J, Murray A T, Anselin L. Visualizing regional income distribution dynamics [J]. *Letters in Spatial and Resource Sciences*, 2011, **4**(1): 81-90.
- [58] Ye X Y, Carroll M C. Exploratory space-time analysis of local economic development[J]. *Applied Geography*, 2011, **31**(3): 1049-1058.
- [59] Shi Y S, Matsunaga T, Yamaguchi Y, *et al.* Long-term trends and spatial patterns of PM<sub>2.5</sub>-induced premature mortality in South and Southeast Asia from 1999 to 2014[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **631-632**: 1504-1514.
- [60] 宋永永, 薛东前, 夏四友, 等. 近 40a 黄河流域国土空间格局变化特征与形成机理[J]. 地理研究, 2021, **40**(5): 1445-1463.  
Song Y Y, Xue D Q, Xia S Y, *et al.* Change characteristics and formation mechanism of the territorial spatial pattern in the Yellow River Basin from 1980 to 2018, China [J]. *Geographical Research*, 2021, **40**(5): 1445-1463.
- [61] 高长春, 刘贤赵, 李朝奎, 等. 近 20 年来中国能源消费碳排放时空格局动态[J]. 地理科学进展, 2016, **35**(6): 747-757.  
Gao C C, Liu X Z, Li C K, *et al.* Spatiotemporal dynamics of carbon emissions by energy consumption in China from 1995 to 2014[J]. *Progress in Geography*, 2016, **35**(6): 747-757.
- [62] 崔盼盼, 赵媛, 张丽君, 等. 基于不同需求层次的中国城镇居民消费隐含碳排放时空演变机制[J]. 生态学报, 2020, **40**(4): 1424-1435.  
Cui P P, Zhao Y, Zhang L J, *et al.* Spatio-temporal evolution and driving mechanism of per capita indirect carbon emissions based on different demand levels from urban residents' consumption in China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, **40**(4): 1424-1435.
- [63] 于博, 杨旭, 吴相利. 哈长城市群县域碳排放空间溢出效应及影响因素研究——基于 NPP-VIIRS 夜间灯光数据的实证[J]. 环境科学学报, 2020, **40**(2): 697-706.  
Yu B, Yang X, Wu X L. Study on spatial spillover effects and influencing factors of carbon emissions in county areas of Ha-Chang city group: evidence from NPP-VIIRS nightlight data[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(2): 697-706.
- [64] 谭显春, 赖海萍, 顾佰和, 等. 主体功能区视角下的碳排放核算——以广东省为例[J]. 生态学报, 2018, **38**(17): 6292-6301.  
Tan X C, Lai H P, Gu B H, *et al.* Carbon emission accounting from the perspective of main functional areas: a case study of Guangdong Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(17): 6292-6301.
- [65] Jin C, Cheng J Q, Xu J, *et al.* Self-driving tourism induced carbon emission flows and its determinants in well-developed regions: a case study of Jiangsu Province, China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, **186**: 191-202.
- [66] 赵桂梅, 赵桂芹, 陈丽珍, 等. 中国碳排放强度的时空演进及跃迁机制[J]. 中国人口·资源与环境, 2017, **27**(10): 84-93.  
Zhao G M, Zhao G Q, Chen L Z, *et al.* Research on spatial and temporal evolution of carbon emission intensity and its transition mechanism in China [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2017, **27**(10): 84-93.
- [67] 潘竞虎, 张永年. 中国能源碳足迹时空格局演化及脱钩效应[J]. 地理学报, 2021, **76**(1): 206-222.  
Pan J H, Zhang Y N. Spatiotemporal patterns of energy carbon footprint and decoupling effect in China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, **76**(1): 206-222.
- [68] 王少剑, 谢紫寒, 王泽宏. 中国县域碳排放的时空演变及影响因素[J]. 地理学报, 2021, **76**(12): 3103-3118.  
Wang S J, Xie Z H, Wang Z H. The spatiotemporal pattern evolution and influencing factors of CO<sub>2</sub> emissions at the county level of China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, **76**(12): 3103-3118.
- [69] 李彦旻, 沈育生, 王世航. 基于土地利用变化的安徽省陆地碳排放时空特征及效应[J]. 水土保持学报, 2022, **36**(1): 182-188.  
Li Y M, Shen Y S, Wang S H. Spatio-temporal characteristics and effects of terrestrial carbon emissions based on land use change in Anhui province [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, **36**(1): 182-188.
- [70] 莫惠斌, 王少剑. 黄河流域县域碳排放的时空格局演变及空间效应机制[J]. 地理科学, 2021, **41**(8): 1324-1335.  
Mo H B, Wang S J. Spatiotemporal evolution and spatial effect mechanism of carbon emission at county level in the Yellow River Basin [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2021, **41**(8): 1324-1335.

## CONTENTS

Evolution of PM <sub>2.5</sub> Chemical Composition and Sources in Nanjing During the Implementation of the APPCAP .....	CHEN Pei-lin, GUO Rong, WANG Qin-geng ( 1 )
Differences in PM <sub>2.5</sub> Components Between Urban and Rural Sites During Heavy Haze Event in Northern Henan Province .....	WANG Shen-bo, WANG Ling-ling, FAN Xiang-ge, <i>et al.</i> ( 11 )
Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Fine Particles in Langfang in Autumn and Winter .....	ZHU Shu-zhen, TONG Jie, BAO Feng, <i>et al.</i> ( 20 )
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM <sub>2.5</sub> of Different Air Masses During Heating Season in Tianjin .....	LI Li-wei, DENG Xiao-wen, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i> ( 30 )
Analysis of Critical Source of Potentially Harmful Elements in Urban Road Dust During Winter in Taiyuan Based on Multiple Attribute Decision Making Method .....	DENG Wen-bo, LIU Wen-juan ( 38 )
Numerical Response Analysis of PM <sub>2.5</sub> -O <sub>3</sub> Compound Pollution in Beijing .....	LIU Tian-qiang ( 48 )
High-resolution Emission Inventory of Reactive Volatile Organic Compounds from Anthropogenic Sources in the Yangtze River Delta Region .....	TIAN Jun-jie, DING Xiang, AN Jing-yu, <i>et al.</i> ( 58 )
Vertical Distribution Characteristics of Boundary Layer Volatile Organic Compounds in Autumn in the Mixed Industrial and Rural Areas over the Northern Suburb of Nanjing .....	WANG Tai, ZHU Bin, SHI Shuang-shuang, <i>et al.</i> ( 66 )
Characterization of Ambient Volatile Organic Compounds, Source Apportionment, and the Ozone-NO <sub>x</sub> -VOC Sensitivities in Liucheng County, Guangxi .....	WU Ying, MO Zhao-yu, WU Qin-qin, <i>et al.</i> ( 75 )
Characteristics of Ozone Pollution and High-impact Meteorological Factors in Urban Cities: A Case of Suzhou .....	HE Yan, LIN Hui-juan, CAO Shu-ya, <i>et al.</i> ( 85 )
Emission Inventory and Distribution Characteristics of Anthropogenic Ammonia in Quzhou County, North China Plain .....	KANG Jia-hui, MENG Fan-lei, LIU Xue-jun, <i>et al.</i> ( 94 )
Application of WRF Optimal Parameterization Scheme for Different Air Quality Models .....	YANG Jing-chao, JIANG Xing-wen, BO Xin, <i>et al.</i> ( 104 )
Distribution Characteristics and Health Effects of Bioaerosols in Spring over Xi'an City .....	WEI Jun-qiang, YANG Liu, SHEN Zhen-xing, <i>et al.</i> ( 118 )
Distribution of Bacterial Concentration and Viability in Atmospheric Bioaerosols Under Different Weather Conditions in the Coastal Region of Qingdao .....	WEI Wen-shu, QI Jian-hua, CHANG Cheng ( 127 )
Spatiotemporal Distribution and Driving Factors of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Inland Sediments of China .....	HUANG Zhu-liang, CAI Jia-wei, WANG Ru-wei ( 138 )
Distributions of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in the Nearshore Area of the Yangtze River Estuary .....	XU Qiu-hong, LIU Shu-guang, LOU Sha, <i>et al.</i> ( 158 )
Co-occurrence of Tetracycline Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in Plateau Wetlands Under the Influence of Human Activities .....	QIN Rong, YU Qing-guo, LIU Zhen-ya, <i>et al.</i> ( 169 )
Occurrence and Health Risk Assessment of Multiple Pesticides in Drinking Water Sources of Southeast China .....	HE Shu, DONG Hui-yu, REN Nan-qi ( 180 )
Spatiotemporal Distribution and Pollution Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Main Water Supply Reservoirs in Central Zhuhai City .....	WANG En-rui, ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, <i>et al.</i> ( 189 )
Distribution Characteristics and Pollution Risk of Heavy Metals in River Sediment of Suzhou Water Network Area, China .....	ZHENG Min-hui, BAI Dong-rui, ZHANG Tao, <i>et al.</i> ( 198 )
Distribution of Biodegradable Dissolved Organic Matter and Its Affecting Factors in a Typical Peri-urban Watershed in Yangtze River Delta .....	WU Wen-yu, MA Jing-sheng, YANG Lei, <i>et al.</i> ( 210 )
Long-term Succession Patterns and Driving Factors of Water Quality in a Flood-pulse System Lake: A Case Study of Lake Luoma, Jiangsu Province .....	HUANG Xue-ying, GAO Ming-yuan, WANG Jin-dong, <i>et al.</i> ( 219 )
Microplastic Pollution Status and Ecological Risk Evaluation in Weihe River .....	SHAN Ze-xuan, ZHANG Yan, ZHANG Cheng-qian, <i>et al.</i> ( 231 )
Effects of Different Colored Polycarbonate Plastics on Growth and Community Structure of Periphytic Algae .....	WANG Meng-xue, YIN Si-cheng, WANG Zhen-fang, <i>et al.</i> ( 243 )
Diversity Patterns and Influencing Factors of Epibiotic in <i>Vallisneria natans</i> and Planktonic Bacteria Communities .....	ZHANG Mei-ting, LIU Jin-xian, SU Jia-he, <i>et al.</i> ( 252 )
Bacterial Community and Diversity of River Ecosystems on the Qinghai-Tibet Plateau Based on 16S rRNA Gene Sequencing .....	QU Wei-qing, ZHANG Bo-mei, HUANG Xue, <i>et al.</i> ( 262 )
Spatial and Temporal Heterogeneity and Ecological Health Evaluation of Diatom Community Based on eDNA .....	JIANG Shan, ZHANG Yan, LI Fei-long, <i>et al.</i> ( 272 )
Severity Differences and Mechanisms of Algal Blooms Among Sections in Pengxi River of the Three Gorges Reservoir .....	LUO Xiao-jiao, ZHANG Xing, HUANG Wei, <i>et al.</i> ( 282 )
Characteristics of Soil Erosion and Nitrogen Loss in Vegetable Field Under Natural Rainfall .....	NING Jia-li, HUANG Yan-hui, LI Gui-fang, <i>et al.</i> ( 293 )
Effects of Green, Blue, and Blue-green Roofs on Runoff Quality .....	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, YAN Jing, <i>et al.</i> ( 303 )
Analysis of Spatiotemporal Variation Characteristics and Driving Forces of NPP in Shanxi Province from 2000 to 2020 Based on Geodetector .....	SHAO Jia-hao, LI Jing, YAN Xing-guang, <i>et al.</i> ( 312 )
Spatio-temporal Variation in Vegetation Cover and Its Driving Mechanism Exploration in Southwest China from 2000 to 2020 .....	XU Yong, DAI Qiang-yu, HUANG Wen-ting, <i>et al.</i> ( 323 )
Heavy Metal Content and Resistance Gene Abundance and Related Properties in the Surface Soil around Qinghai Lake .....	HU Shi-lei, QU Jian-li, ZHANG Li, <i>et al.</i> ( 336 )
Soil Heavy Metal Content, Pollution, and Influencing Factors in Typical Farming Area of Sichuan Basin .....	LIU Shu-ling, WU Mei, LIU Zhi-yuan, <i>et al.</i> ( 347 )
Risk Assessment and Sources of Heavy Metals in Farmland Soils of Yellow River Irrigation Area of Ningxia .....	CHEN Lin, MA Kun, MA Jian-jun, <i>et al.</i> ( 356 )
Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in the Soil Around Copper Smelting Sites .....	PENG Chi, LIU Xu, ZHOU Zi-ruo, <i>et al.</i> ( 367 )
Characteristics of Typical Soil Acidification and Effects of Heavy Metal Speciation and Availability in Southwest China .....	LING Yun, LIU Han-yi, ZHANG Xiao-ting, <i>et al.</i> ( 376 )
Stabilization Characteristics of Exogenous Cd in Different Types of Soil .....	WANG Gang, YU Hai-ying, HUANG Hua-gang, <i>et al.</i> ( 387 )
Threshold of Se-rich Soil Based on Available-Se and Influencing Factors of Available-Se .....	WANG Ying, MA Yan-bin, WANG Ze-jing ( 395 )
Accumulation Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soil-Crop System Based on Soil Parent Material Zoning .....	CHEN Zi-wan, XU Jing, HOU Zhao-lei, <i>et al.</i> ( 405 )
Characteristics and Planting Safety Assessment of As Content in Dryland Soil and Maize in Guizhou Province .....	HUANG Feng-yan, ZHOU Lang, SONG Bo, <i>et al.</i> ( 415 )
Potential of Intercropping <i>Pennisetum purpureum</i> Schum with <i>Melia azedarach</i> L. and <i>Broussonetia papyrifera</i> for Phytoremediation of Heavy-metal Contaminated Soil around Mining Areas .....	WANG Xiao-hui, XIAO Xi-yuan, GUO Zhao-hui, <i>et al.</i> ( 426 )
Inactivation of Cd and As by an <i>Enterobacter</i> Isolated from Cd and As Contaminated Farmland Soil .....	YIN Xue-fei, LIU Yu-ling, WU De, <i>et al.</i> ( 436 )
Mineralization Characteristics of Soil Organic Carbon and Its Relationship with Organic Carbon Components in Artificial <i>Robinia pseudoacacia</i> Forest in Loess Hilly Region .....	ZHU Yu-fan, LIU Wei-chao, LI Jia-xin, <i>et al.</i> ( 444 )
Accumulation, Migration, and Transformation of Soil Phosphorus in Facility Agriculture and Its Influencing Factors .....	FANG Bing, CHEN Lin, WANG Yang, <i>et al.</i> ( 452 )
Optimizing Straw Management to Enhance Carbon and Nitrogen Efficiency and Economic Benefit of Wheat-Maize Double Cropping System .....	WANG Liang, QIAN Xin, GAO Ying-bo, <i>et al.</i> ( 463 )
Effect of Deep Fertilization with Slow/Controlled Release Fertilizer on N Fate in Clayey Soil Wheat Field .....	HOU Peng-fu, XUE Li-xiang, YUAN Wen-sheng, <i>et al.</i> ( 473 )
Structure and Function of Soil Fungal Community in Rotation Fallow Farmland in Alluvial Plain of Lower Yellow River .....	NAN Zhen-wu, LIU Zhu, MENG Wei-wei, <i>et al.</i> ( 482 )
Response of Topsoil Fungal Community Structure to Soil Improvement Measures in Degraded Forest of Red Soil Region .....	GUAN Hong-zhi, HUANG Rong-zhen, WANG Jin-ping, <i>et al.</i> ( 494 )
Temporal and Spatial Variations in Root-associated Fungi Associated with <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i> in the Semi-arid and Dry Sub-humid Desertified Regions of Northern China .....	ZHAO Pei-shan, GUO Mi-shan, GAO Guang-lei, <i>et al.</i> ( 502 )
QMEC-based Analysis of the Soil Microbial Functional Potentials across Different Tibetan Plateau Glacier Forelands .....	ZHANG Jie-jie, Anders Priemé, CHEN Xian-ke, <i>et al.</i> ( 512 )
Meta Analysis on Yield Effect of Biochar for Staple Crops in China .....	YU Bin-hang, JI Jian-mei, WANG Li-xue, <i>et al.</i> ( 520 )
Effects of Biochar on Antibiotic Environmental Behaviors in Soil: A Meta-analysis .....	LI Jing-han, ZHANG Jian-qiang, XIA Li-qiong, <i>et al.</i> ( 531 )
Properties of Biochars Prepared from Different Crop Straws and Leaching Behavior of Heavy Metals .....	LI Jia-kang, QIU Chun-sheng, ZHAO Jia-qi, <i>et al.</i> ( 540 )
Spatial-temporal Evolution and Heterogeneity of Carbon Emissions at County-level in China .....	SONG Yuan-zhen, ZENG Jian, WANG Sen, <i>et al.</i> ( 549 )
Spatiotemporal Dynamic Evolution and Gravity Center Migration of Carbon Emissions in the Main Urban Area of Chongqing over the Past 20 Years .....	XIANG Shu-jiang, YANG Chun-mei, XIE Yu-qi, <i>et al.</i> ( 560 )
Spatiotemporal Characteristics and Influencing Factors of Environment Emergency Incident in China from 1991 to 2018 .....	YU Guang-hui, WANG Fei-fan, LIU Xian-zhao, <i>et al.</i> ( 572 )
Migration, Transformation, and Toxicity of Quaternary Ammonium Antimicrobial Agents in the Environment .....	ZHANG Li-jan, QIN Cun-li, QIAN Yao, <i>et al.</i> ( 583 )