ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第6期

Vol.39 No.6

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

双奖期刊

环境科学
(HUANJING KEXUE) ENVIRONMENTAL SCIENCE
第 39 卷 第 6 期
2018 年 6 月 15 日

目 次

北京市二次有机气溶胶生成潜势的日变化规律 …… 刘俊, 楚碧武, 贺泓(2505)
太原冬季 $PM_{2.5}$ 影响霾污染的关键尺度谱特征 …… 杨素英, 余欣洋, 赵秀勇, 李义宇, 孙洪娉, 田芷洁, 李岩, 吴尚, 王梓航(2512)
盘锦市冬季 $PM_{2.5}$ 水溶性离子特征及来源分析 …… 张蕾, 姬亚芹, 王士宝, 赵静琦, 张军, 李越洋, 张伟(2521)
广州市天河区 2016 年雨季挥发性有机物污染特征及来源解析 …… 古颖纲, 虞小芳, 杨闻达, 田智林, 李梅, 程鹏(2528)
热带树木燃烧颗粒物中脱水糖和醋菲烯的排放特征 …… 金诚妙, 崔敏, 韩勇, 陈颖军, 唐娇, 李军, 张干(2538)
天津地区污染天气分析中垂直扩散指标构建及运用 …… 蔡子颖, 韩素芹, 张敏, 姚青, 刘敬乐(2548)
亚热带农田和林地大气氮湿沉降与混合沉降比较 …… 朱潇, 王杰飞, 沈健林, 肖润林, 王娟, 吴金水, 李勇(2557)
京津冀地区黄标车政策的总量减排效益评估 …… 卢亚灵, 周佳, 程曦, 张伟, 蒋洪强(2566)
北京北运河河流生态系统健康评价 …… 顾晓昀, 徐宗学, 刘麟菲, 殷旭旺, 王汨(2576)
长江武汉段丰水期水体和沉积物中多环芳烃及邻苯二甲酸酯类有机污染物污染特征及来源分析 …… 董磊, 汤显强, 林莉, 郦超, 黎睿, 吴敏(2588)
福建省敖江下游抗生素抗性基因分布特征 …… 张丹丹, 郭亚平, 任红云, 周昕原, 黄福义, 张娴(2600)
三峡库区支流河口沉积物重金属分布特征及风险评价 …… 方志青, 陈秋禹, 尹德良, 王志康, 孙涛, 王永敏, 谢德体, 王定勇(2607)
三峡水库蓄水至 175 m 后干流沉积物理化性质与磷形态分布特征 …… 潘婵娟, 黎睿, 汤显强, 夏振尧, 李青云, 杨文俊, 许文年(2615)
基于水化学和稳定同位素的白洋淀流域地表水和地下水硝酸盐来源 …… 孔晓乐, 王仕琴, 丁飞, 梁慧雅(2624)
天目湖沙河水库热分层变化及其对水质的影响 …… 孙祥, 朱广伟, 笪文怡, 余茂蕾, 杨文斌, 朱梦圆, 许海, 国超旋, 余丽, 李恒鹏, 李慧赟(2632)
重庆雪玉洞洞穴滴水水文地球化学时空变化特征及其环境意义…… 曾泽, 蒋勇军, 吕现福, 曾思博, 胡刘婵, 雷佳琪(2641)
岩溶地表河旱季有色溶解有机质组成及来源:以金佛山碧潭河为例 …刘跃, 贺秋芳, 刘宁坤, 刘九缠, 王正雄, 段世辉(2651)
托来河流域不同海拔降水稳定同位素的环境意义 …李永格, 李宗省, 冯起, 肖莲桂, 吕越敏, 桂娟, 袁瑞丰, 张百娟(2661)
五里峡水库初级生产力对水气界面二氧化碳和甲烷排放速率时空变化的影响 …… 彭文杰, 李强, 宋昂, 靳振江(2673)
西南山区典型河道型水库藻类功能群时空演替特征及其影响因素:以紫坪铺水库为例 …… 张耀文, 李洪, 李嘉, 宋洋, 张陵蕾, 李永, 蒲迅赤, 黄文典(2680)
四明湖水库浮游植物功能类群的季节演替及其影响因子 …… 郑诚, 陆开宏, 徐镇, 郑忠明, 朱津永(2688)
营养盐添加对水华蓝藻——卵孢金孢藻生长和竞争影响的原位实验 …王梦梦, 张玮, 张军毅, 尚光霞, 杜彩丽, 王丽卿(2698)
植物配置与进水碳氮比对沉水植物塘水质净化效果的影响 …… 刘淼, 陈开宁(2706)
江汉平原水稻季灌排单元沟渠中氮磷变化特征及其环境风险…… 华玲玲, 张富林, 翟丽梅, 刘宏斌, 范先鹏, 王洪媛(2715)
冀西北典型北方小城镇污水处理厂中抗生素的分布和去除 …… 柴玉峰, 张玉秀, 陈梅雪, 王瑞, 柳蒙蒙, 郑嘉熹, 魏源送(2724)
臭氧-粉末炭联用作为预处理缓解膜污染的效果与机制 …… 董秉直, 高昊旸, 胡孟柳(2732)
中试 SAD-ASBR 系统处理含盐废水的启动与工艺特性 …… 于德爽, 唐佳佳, 张军, 王晓霞, 赵红, 韩长民, 孙捷(2740)
海藻酸锆/聚 *N*-异丙基丙烯酰胺半互穿网络凝胶球的除磷性能 …曾学阳, 骆华勇, 张耀坤, 荣宏伟, 曾子君, 钟广汇(2748)
玉米淀粉废水短程硝化快速启动及其稳定性 …… 龙北生, 刘迅雷, 刘红波, 杨靖新, 袁树森(2756)
硝化细菌的培养及包埋固定化中试 …… 杨宏, 胡银龙(2763)
不同运行策略下厌氧氨氧化的脱氮性能 …… 安芳娇, 彭永臻, 董志龙, 邵兆伟, 赵智超, 黄剑明, 陈永志(2770)
高含固污泥厌氧消化中蛋白质转化规律 …… 詹瑜, 施万胜, 赵明星, 许之扬, 阮文权, 宋联, 朱葛(2778)
污泥富磷堆肥前后重金属赋存形态及释放能力变化…… 李玉, 方文, 祁光霞, 魏勇红, 刘建国, 李润东(2786)
丝状菌污泥膨胀对脱氮除磷功能菌群的影响…… 高晨晨, 游佳, 陈轶, 郑兴灿, 尚巍, 张文安(2794)
同步去除并富集磷酸盐生物膜驯化过程中微生物种群分析 …… 孟璇, 潘杨, 章豪, 廖烜弘, 徐林建, 冯鑫, 单捷(2802)
四环素对人粪便好氧堆肥过程及微生物群落演替的影响 …… 时红蕾, 王晓昌, 李倩, 刘源(2810)
长期定位有机物料还田对关中平原夏玉米-冬小麦轮作土壤 NO 排放的影响…… 袁梦轩, 王晋峰, 谭跃慧, 魏静, 杨学云, 顾江新(2819)
菌渣还田量对紫色水稻土净温室气体排放的影响 …… 祁乐, 高明, 周鹏, 王富华, 高泳钦, 陈仕奇, 吴思琪, 邓静霖, 文婷(2827)
^{13}C脉冲标记法定量冬小麦光合碳分配及其向地下的输入 …… 孙昭安, 陈清, 韩笑, 吴文良, 孟凡乔(2837)
西南喀斯特区植被恢复对土壤氮素转化通路的影响 …… 杨怡, 欧阳运东, 陈浩, 肖孔操, 李德军(2845)
江苏海岸带土壤重金属来源解析及空间分布 …… 吕建树, 何华春(2853)
黄河下游典型区域土壤重金属来源解析及空间分布 …… 于元赫, 吕建树, 王亚梦(2865)
典型小城市土壤重金属空间异质性及其风险评价:以临安市为例 …… 郑晴之, 王楚栋, 王诗涵, 林于也, 赵科理, 吴东涛, 傅伟军(2875)
西南某铅锌矿区农田土壤重金属空间主成分分析及生态风险评价 …… 周艳, 陈檣, 邓绍坡, 万金忠, 张胜田, 龙涛, 李群, 林玉锁, 吴运金(2884)
典型山核桃产区土壤重金属空间异质性及其风险评价…… 张红桔, 赵科理, 叶正钱, 许斌, 赵伟明, 顾晓波, 张华锋(2893)
生物炭添加对湿地植物生长及氧化应激响应的影响 …… 黄磊, 陈玉成, 赵亚琦, 肖广全, 杨志敏(2904)
厌氧条件水稻土铁对砷释放的影响…… 王欣, 钟松雄, 陈志良, 何宏飞, 董家华, 陈晓丽(2911)
矿业活动影响区稻田土壤和稻米中重金属含量及健康风险 …… 田美玲, 钟雪梅, 张云霞, 余元元, 庞瑞, 周浪, 宋波(2919)
硅酸钙和生物腐殖肥复配对葱生长和镉吸收的影响 …… 刘德玲, 尹光彩, 陈志良, 林亲铁, 刘千钧, 钟松雄, 黄玲, 张建强(2927)
吉林四平设施土壤和蔬菜中重金属的累积特征 …… 李莲芳, 朱昌雄, 曾希柏, 李红娜, 叶婧, 李峰, 吴翠霞(2936)
喷施锌肥对油菜镉锌生物可给性的影响 …… 王林, 谷朋磊, 李然, 徐应明, 孙约兵, 梁学峰, 代晶晶(2944)
贵州草海底栖动物汞分布及其对沉积物汞的响应特征…… 许议元, 曾玲霞, 何天容, 陈梦瑜, 钱晓莉, 李振吉(2953)
废旧轮胎翻新过程中多环芳烃排放及健康风险 …… 付建平, 赵波, 黎玉清, 刘沙沙, 尹文华, 黄锦琼, 周长风, 张素坤, 贺德春, 韩静磊(2963)
县级尺度的重庆市碳排放时空格局动态 …… 孙秀锋, 施开放, 吴健平(2971)
颗粒尺寸对纳米氧化物环境行为的影响…… 严玉鹏, 唐亚东, 万彪, 王小明, 刘凡, 冯雄汉(2982)
防晒剂的海洋环境行为与生物毒性 …… 朱小山, 黄静颖, 吕小慧, 杜永芬, 蔡中华(2991)
《环境科学》征订启事(2527) 《环境科学》征稿简则(2723) 信息(2826, 2852, 2910)

县级尺度的重庆市碳排放时空格局动态

孙秀锋[1], 施开放[2,3*], 吴健平[3]
(1. 西南大学园艺园林学院, 重庆 400715; 2. 西南大学地理科学学院, 遥感大数据应用重庆市工程研究中心, 重庆 400715; 3. 华东师范大学地理信息科学教育部重点实验室, 上海 200241)

摘要: 碳排放具有明显的时间和空间分布特征, 研究区域碳排放时空格局动态特征可为制定合理的碳减排政策和措施提供重要的依据. 本文以重庆为例, 基于其 38 个区县的碳排放数据, 利用空间统计、空间自相关和位序-规模法则探讨了其县级尺度碳排放的区域差异和空间格局演变特征. 结果表明, 重庆市各区县都经历了快速的碳排放增长过程, 但碳排放的二元空间分布结构并没有改变; 重庆市县级尺度碳排放全局 Moran's *I* 指数呈现出波浪式的降低趋势, 主城区区县在中心相互辐射, 形成一个碳排放 HH 中心; 位序-规模法则分析结果则表明重庆市县级尺度碳排放基本属于首位型分布, 1997 ~ 2012 年区县碳排放规模分布趋于分散的力量均大于趋于集中的力量; 1997 和 2012 年, 第二产业比例和城市化率成为影响重庆市碳排放的最重要的因素, 人口与碳排放的相关关系却并不显著.

关键词:碳排放; 县级尺度; 时空格局; 空间自相关; 重庆市
中图分类号: X24 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2018)06-2971-11 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.201711080

Spatiotemporal Dynamics of CO_2 Emissions in Chongqing: An Empirical Analysis at the County Level

SUN Xiu-feng[1], SHI Kai-fang[2,3*], WU Jian-ping[3]
(1. College of Horticulture and Landscape Architecture, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Chongqing Engineering Research Center for Remote Sensing Big Data Application, School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China; 3. Key Laboratory of Geographic Information Science (Ministry of Education), East China Normal University, Shanghai 200241, China)

Abstract: China's CO_2 emissions present obvious temporal and spatial distribution characteristics. Therefore, the study of spatiotemporal dynamics of CO_2 emissions could provide useful information for the government and policy-makers on viable CO_2 emissions mitigation in China. Using Chongqing as a case study, we investigated the spatiotemporal dynamics of CO_2 emissions at the county level (38 counties) from 1997 to 2012. The mathematical statistical method, spatial autocorrelation, and rank size rule were employed to evaluate the CO_2 emissions change in detail. The results showed that all of the counties in Chongqing have experienced a rapid growth of CO_2 emissions, but the two dimensional structure of CO_2 emissions has not changed. The Global Moran's *I* clearly decreases with a small fluctuation, and these values gradually decrease from 0.56 in 1997 to 0.40 in 2012. In addition, the HH clusters are concentrated in some counties in the downtown areas. Based on the rank size rule analysis, the slope values *q* decrease from −1.35 in 1997 to −0.88 in 2012, indicating a clear scattered pattern of CO_2 emissions in Chongqing at the county level. It has also been proven that the proportion of second industries and the urbanization rate are more important impact factors for CO_2 emissions than the population.

Key words: CO_2 emissions; county level; spatiotemporal dynamics; spatial autocorrelation; Chongqing

自 1978 年改革开放以来, 我国国内生产总值(gross domestic product, GDP)以每年约 10% 的速度增长并逐步成为世界第二[1]. 能源消耗长期处于高位增长态势, 导致二氧化碳排放迅速增长, 由此引发国际社会对我国碳排放的高度关注[2~4]. 2007 年始我国超越美国成为世界上第一大碳排放国[5]. 在 2009 年的哥本哈根和 2015 年的巴黎气候峰会上, 我国政府分别承诺到 2020 年实现单位 GDP 二氧化碳排放比 2005 年下降 40% ~45%, 到 2030 降低 60% ~65% 的目标. 为了实现目标, 需要从区域角度分析碳排放的时空格局动态变化规律[6, 7], 为制定合理的差异化碳减排政策以及发展绿色低碳经济提供参考依据.

当前, 众多学者利用多种数据和方法对我国碳排放时空格局动态问题进行了大量研究[8~11]. 如 Wang 等[12]运用空间自相关模型对我国 1995 ~2011 年的省级尺度人均碳排放空间格局进行了测度, 认为伴随我国人均碳排放呈现逐年增长的态势, 其空

收稿日期: 2017-11-10; **修订日期**: 2017-12-22
基金项目: 中央高校基本科研业务费专项(SWU114014)
作者简介: 孙秀锋(1978 ~), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为区域生态与环境, E-mail:sunxf@swu.edu.cn
* 通信作者, E-mail:skffyy@swu.edu.cn

间自相关性呈现逐年下降趋势. 胡艳兴等[13]证明了在省级尺度上我国碳排放存在较为显著的空间正相关性, 且碳排放的重心有向西迁移的趋势. 赵雲泰等[14]估算得出我国碳排放从 1999 年的 0.91 Gt 逐年上升到 2007 年的 1.83 Gt, 碳排放强度从 0.83 t·万元$^{-1}$下降至 0.79 t·万元$^{-1}$; 碳排放强度的"热点"区域从西北地区转至东北以及黄河中游地区. Huang 等[15]探讨了广东省 1996 ~ 2008 年农用地、工业用地、住宅和商业用地、交通用地等 5 种土地利用类型的空间分布格局与碳排放强度之间的关系. 李建豹等[16]定量分析了 1998 ~ 2012 年长江经济带碳排放时空格局特征, 发现虽然该经济带内的碳排放空间格局相对稳定, 但是碳排放的绝对差异呈增大趋势, 高碳排放区域以江苏省为中心向四周扩散. 此外, Shi 等[17]基于夜间灯光遥感数据, 在 1 km 空间分辨率的基础上从不同尺度揭示了我国 1997 ~ 2012 年碳排放的时空格局动态变化特征. 蔡博峰等[18]基于天津市 1 km 网格碳排放数据, 评估了天津市碳排放的空间分布特征.

从总体上看, 部分现有的研究侧重于网格尺度(如 1km 空间分辨率)的碳排放估算以及时空格局动态分析[19, 20]. 虽然网格尺度的碳排放能够揭示区域内部碳排放的空间差异, 但是由于网格尺度的碳排放脱离了行政单元, 难以与具体的行政政策与措施相结合. 由于行政单元既是碳减排的实施区, 也是碳减排配额分配的主体, 目前大部分研究侧重于行政尺度的碳排放时空格局动态评估[21, 22]. 但是这些研究主要集中于国家、省级以及地级市等行政尺度[23, 24], 由于研究尺度较大, 碳排放数据较粗, 难以准确地反映区域碳排放的时空格局动态特征, 增加了研究的不确定性, 难以适应区域具体的碳减排政策制定. 而对区域碳排放时空格局动态研究来说, 细化到县级尺度才可以提高针对性和出台政策的可操作性[25]. 目前为止, 只有个别研究探讨了县级尺度的碳排放时空格局动态[25]. 而且, 这些研究主要集中在东部发达地区, 而对于西部不发达地区却鲜见研究. 我国不同地区的人口、经济发展水平、能源消耗、资源禀赋以及产业结构存在明显的空间差异, 不同地区的碳排放时空格局动态以及背后存在的机制千差万别[26, 27]. 尤其是我国东中西部地区之间, 由于社会经济发展水平和自然环境的差异, 碳排放时空格局特征具有明显的时空差异性. 因此, 有必要从县级尺度分析我国西部地区的碳排放时空格局动态, 这既是制定差异化精准减排政策和目标的需要, 也是对现有碳排放研究在更小尺度上的延伸.

重庆市作为我国直辖市之一, 是长江上游地区的经济、金融、商贸物流、科技创新和航运中心, 自直辖以来, 社会经济得到了极大的发展. GDP 由 1997 年的 1509.75 亿元增长到 2015 年的15 717.27 亿元; 城市化率由 1997 年的 31.00% 增长到 2015 年的 60.90%; 能源消耗总量也由 1997 年的 2 030.13万 t 标准煤增长到 2015 年的8 068.14万 t 标准煤[28]. 但是, 重庆市的社会经济发展存在着一个"大城市大农村"的空间分布格局特征, 其中心—小时经济圈和欠发达两翼的经济、社会发展存在着一个巨大的差距, 犹如我国东西部发展不平衡格局的缩影. 2015 年, 中心—小时经济圈 GDP 和能源消耗总量分别占重庆市的 77.14% 和 81.00%[28]. 区域内部社会经济的差异, 必然会对重庆市碳排放的时空格局动态产生深远的影响. 因此, 本文选择重庆市作为研究区域, 既具有社会经济差异的典型性, 也符合碳减排政策制定的需要.

综上所述, 本文基于重庆市 38 个区县的碳排放数据, 利用空间统计、空间自相关和位序-规模法则等方法探讨了其县级尺度碳排放的区域差异和空间格局演变特征, 不仅可以为重庆市建立一套适合两型社会的碳减排策略提供一定的科学依据, 也可以为我国西部其他地区制定差异化的碳减排目标和碳排放调控政策提供参考.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

重庆市位于我国西南部, 地跨东经 105°17′ ~ 110°11′、北纬 28°10′ ~ 32°13′之间; 东邻湖北、湖南, 南靠贵州, 西接四川, 北连陕西; 辖区东西长 470 km, 南北宽 450 km, 幅员面积 8.24 万 km^2; 截止 2016 年 12 月, 下辖 26 个区和 12 个县. 由于 2011 年双桥区和大足县合并为大足区, 万盛区与綦江县合并为綦江区, 考虑到数据的可得性和前后一致性, 本文统一以重庆市 38 个区县作为研究对象(图 1).

1.2 数据来源

目前多数研究通过化石能燃料消耗统计数据的定量核算进行区域碳排放总量估算[29~31]. 但统计数据一方面存在不同行政尺度统计数据的不一致性, 另一方面也存在县级行政单元碳排放数据无法完整获取[4]. Shi 等[17]通过构建 DMSP-OLS 夜间灯

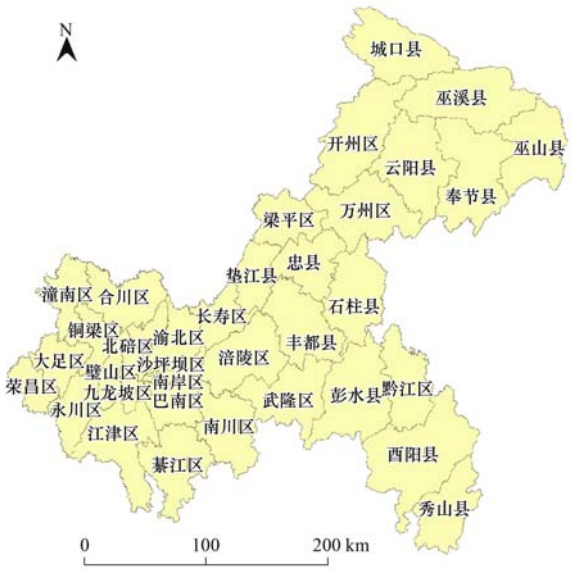

图 1　研究区概况

Fig. 1　Spatial distribution of study area

光遥感数据和统计能源消耗二氧化碳排放(文中统称为碳排放)数据的相关关系，建立了中国 1997 ~ 2012 年空间分辨率为 1 km 的碳排放数据集. 该套数据利用全国 40 个典型城市统计碳排放数据进行精度研究，平均 R^2 为 0.70，证明了其估算结果的合理性与可信性. 由于先前相关研究已经证明了可以通过碳排放栅格数据进行行政单元碳排放的时空格局特征评估[25]，因此，本文通过得到 1 km 碳排放网格数据，获得重庆市 38 个区县 1997 ~ 2012 年碳排放数据，可以有效地解决重庆市县级尺度数据不足以及不同地理单元数据差异的问题. 此外，文中的人口、GDP 和城市化率等社会经济数据来源于历年《重庆统计年鉴》，行政区划图来源于重庆市国土资源与房屋管理局.

1.3　研究方法

本文首先对 1997 ~ 2012 年重庆市县级尺度的碳排放总量和年均变化进行统计性研究；其次，基于空间自相关的方法，分析重庆市 38 个区县碳排放的空间自相关性和空间依赖性特征；最后，利用位序-规模法则分析县级尺度碳排放的集散程度.

1.3.1　碳排放统计方法

重庆市 38 个区县的碳排放总量计算公式为：

$$\mathrm{TC}_x = \sum_{i}^{n} C_i \tag{1}$$

式中，TC_x 为 x 区县的碳排放总量；C_i 为第 i 个像元的碳排放量.

此外，引入碳排放的年均增长率指数[32]，以便认识重庆市不同区县 1997 ~ 2012 年碳排放的变化情况. $t_1 \sim t_2$ 年间区县碳排放的年均增长率指数 VC 可表示为：

$$\mathrm{VC} = \left[\left(\frac{\mathrm{TC}_{t_2}}{\mathrm{TC}_{t_1}}\right)^{\frac{1}{t_2-t_1}} - 1\right] \times 100\% \tag{2}$$

式中，TC_{t1} 和 TC_{t2} 分别为 t_1 和 t_2 时期的碳排放总量.

1.3.2　空间自相关

为了揭示重庆市县级尺度碳排放的空间自相关性和空间依赖性特征，本文主要采用全局 Moran's I 指数和局部 Moran's I 指数进行度量和检验.

(1) 全局自相关

全局 Moran's I 指数通过反映空间邻接或邻近的区县单元碳排放的相似或相关程度，从而来判断重庆市县级尺度的碳排放空间分布模式，具体公式如下：

$$I = \frac{n\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} w_{ij}(x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} w_{ij}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2} \tag{3}$$

式中，I 表示全局 Moran's I 指数，n 为区县单元数，x_i 和 x_j 为第 i 和 j 个区县单元的碳排放值，为碳排放平均值. w_{ij} 表示标准化的空间权重矩阵，用来描述区县单元的空间邻接或邻近关系，本文主要采用 Queen 邻接.

全局 Moran's I 指数取值范围在[-1, 1]之间，大于 0 表示存在空间正相关，表明碳排放较高(或较低)的区县单元呈现空间集聚分布；小于 0 表明区县碳排放与周围区县存在显著差异，值越趋近于 -1，区县碳排放在空间上的差异越大；等于 0 则表示不存在空间关联性，即区县域碳排放在空间上呈随机分布模式. 全局 Moran's I 指数的显著与否，可以通过 Z 值大小进行检验. 在正态分布中，如果 $|Z| \leqslant 1.96$，$P > 0.05$，即区域间不存在空间自相关；如果 $|Z| \geqslant 1.96$，$P < 0.05$，即区域间存在显著的空间自相关；如果 $|Z| \geqslant 2.58$，$P < 0.01$，表明即区域间存在极为显著的空间自相关[33].

(2) 局部自相关

全局 Moran's I 指数仅能反映重庆市县级尺度碳排放的空间集聚(差异)平均程度，而局部 Moran's I 指数则可以进一步识别不同区县碳排放的空间集聚模式. 通过揭示碳排放的高值和低值的具体空间分布位置以及变化趋势，得出哪些区县单元对全局自相关的贡献较大[34]，其公式为：

$$I_i = z_i \sum_j w_{ij} z_j \quad (4)$$

式中，I_i 表示局部 Moran's I 指数，z_i 和 z_j 为区县 i 和 j 碳排放值的标准化，w_{ij}为空间权重. 其中，如果 I_i 大于0且 z_i 大于0，则区县 i 位于 HH 象限；如果 I_i 小于0且 z_i 小于0，则区县 i 位于 LH 象限；如果 I_i 大于0且 z_i 小于0，则区县 i 位于 LL 象限；如果 I_i 小于0且 z_i 大于0，则区县位于 HL 象限.

1.3.3 位序-规模法则

引入位序-规模法则[35, 36]，从区县碳排放量与区县碳排放量位序关系的视角出发，比较验证重庆市县级尺度碳排放的集散程度. 位序-规模法则可用以下公式表达：

$$P_i = P_1 \cdot R_i^{-q} \quad (5)$$

它是捷夫模式 $q=1$ 时的特例，若对式(5)进行对数变换可得到：

$$\lg P_i = \lg P_1 - q \lg R_i \quad (6)$$

式中，P_i 是第 i 个区县的碳排放量，P_1 是最大区县的碳排放量；R_i 是第 i 位区县的位序；q 是捷夫指数，用于描述区县碳排放量和位序之间的集中与分散程度. 当$|q|$值接近1时，说明重庆市县级尺度的碳排放量接近捷夫的理想状态；当$|q|$值大于1时，表明碳排放量分布为首位型，首位度较高，说明碳排放量分布比较集中，高位序区县很突出，而其他一些区县碳排放量较少；当$|q|$值小于1时，表明碳排放量分布为位次型，说明县级尺度的碳排放比较分散，高位序区县的碳排放不够突出. 当$|q|$值逐渐增大，说明重庆市县级尺度的碳排放分布趋于集中的力量大于分散的力量；当$|q|$值逐渐减小，则说明碳排放分布趋于分散的力量大于集中的力量.

2 结果与分析

2.1 碳排放总体格局特征

基于1997～2012年碳排放1 km空间网格数据，进行重庆市县级尺度碳排放变化的统计性分析，揭示重庆市内部38个区县近16年的发展变化规律. 图2展示了重庆市1997和2012年碳排放前10位的区县. 研究发现，重庆市自直辖以来，大多数区县的碳排放都经历了一个显著地增长过程. 1997年，碳排放最高的是九龙坡区(740.25万 t)，其次为江北区(640.87万 t)，接下来依次为沙坪坝区(634.52万 t)、渝北区(545.37万 t)和南岸区(482.03万 t)等. 2012年，碳排放最高的区县为渝北区(1 906.18万 t)，其次为江北区(1 302.27万 t)，接来下依次为沙坪坝区(1 253.12万 t)、大足区(1 193.59万 t)和九龙坡区(1 133.68万 t)等. 从上面的分析可以看出，虽然重庆市各个区县都经历了快速的碳排放增长过程，但是碳排放基本上都集中于主城区，表明主城区区县仍然是重庆市碳排放增长的主要贡献者. 重庆市碳排放的二元空间分布结构基本上没有改变. 这是由于这些区县既是重庆市的人口中心也是其经济发展中心. 一方面人口的集中会有更多的饮食、交通、住房等需求，这些需求会以更多的能源消耗为基本保障，从而产生更多的碳排放；另一方面，这些区县仍然是工业的分布集中区域，产业结构中第二产业的比例依然很高，经济的增长高度依赖于煤炭、石油等化石燃料的消耗，从而导致碳排放高居不下.

重庆市1997～2012年碳排放年均增长率前10位与后10位的区县如图3所示. 从中可以看出，大

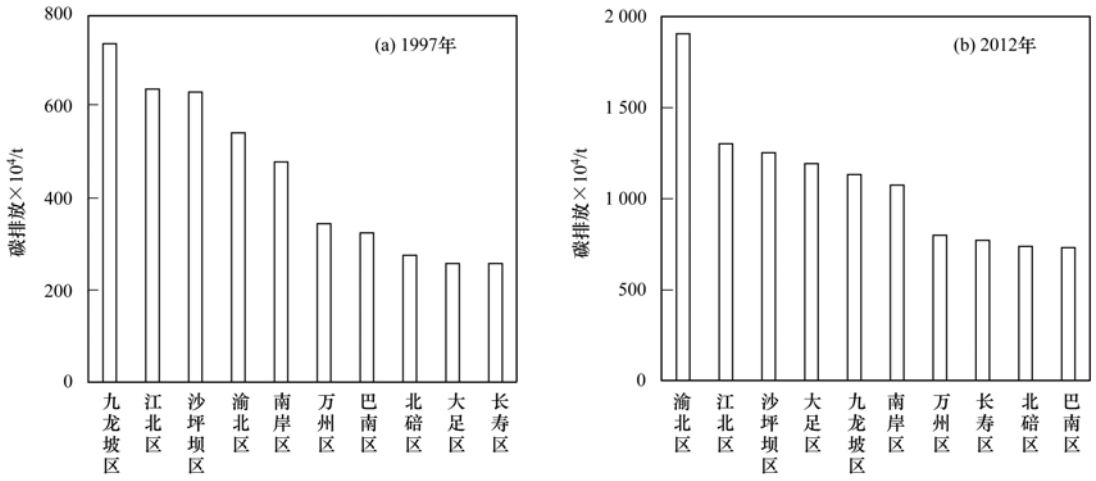

图2 1997和2012年碳排放前10的区县

Fig. 2 CO_2 emissions for 10 top counties in 1997 and 2012

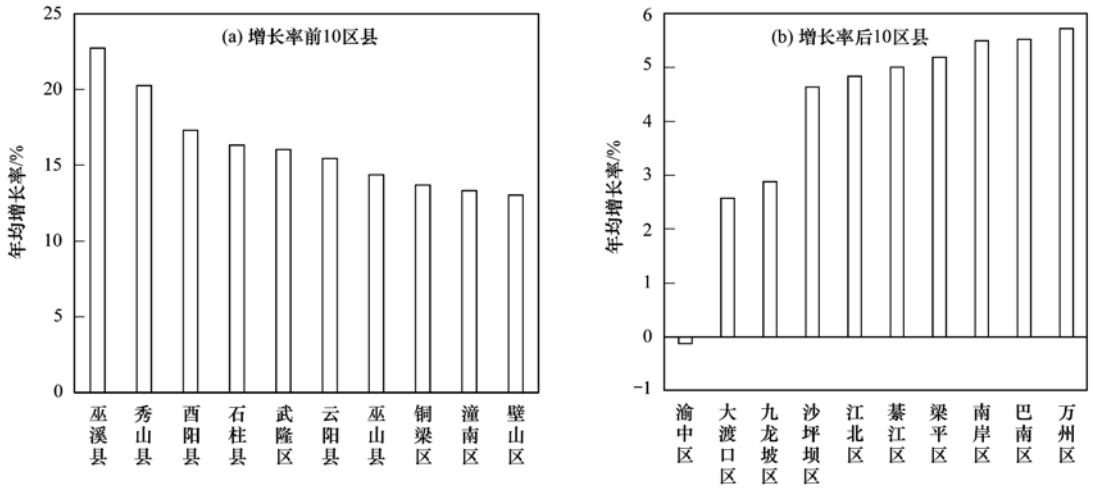

图 3　1997 ~ 2012 年碳排放年均增长率前 10 和后 10 的区县

Fig. 3　Average annual growth rates of CO_2 emissions for 10 top and bottom counties from 1997 to 2012

多数区县的碳排放都保持着一个较高的年均增长率，平均增长率为 9.91%. 1997 ~ 2012 年间，碳排放年均增长率最高的区县分别为巫溪县(22.73%)、秀山县(20.26%)、酉阳县(17.31%)、石柱县(16.33%)和武隆区(15.45%)等. 一方面由于这些区县本身经济较为落后，碳排放基数较小，经济的发展导致碳排放的增长易形成较高的年均增长率. 另一方面，随着重庆市的快速发展，这些区县经历了快速的城市化过程，同时也承接着主城区以及东部发达地区的产业转移，引起了对交通、能源等需求的增多，导致碳排放随之增长. 碳排放年均增长率最低的是渝中区(-0.12%)，其次为大渡口区(2.58%)，接下来依次为九龙坡区(2.88%)、沙坪坝(4.64%)和江北区(4.84%)等. 这可能是由于这些区县已经进行经济转型，发展绿色和低碳经济，因此导致碳排放年均增长率逐步降低，甚至出现负增长.

2.2　碳排放空间自相关分析

表 1 列出了 1997 ~ 2012 年重庆市县级尺度碳排放的全局 Moran's *I* 指数值. 各年全局 Moran's *I* 指数值均为正，都通过了 0.01 的显著性水平检验，且所有 *Z* 值都大于 2.58. 这个结果说明重庆市相邻区县的碳排放在空间分布上呈现出显著集聚现象，碳排放量较高的区县邻近，碳排放量较低的区县也互相相邻. 从时间上看，全局 Moran's *I* 指数呈现出一种波浪形的降低趋势(表 1). 从 1997 年的 0.56 降低到 2005 年的 0.37，之后逐步增长到 2009 年的 0.42，最后又降低到 2012 年的 0.40. 这一结果说明重庆市不同区县碳排放的空间集聚程度(包括高高集聚和低低集聚)逐渐降低. 随着重庆市社会经济的发展，各个区县的碳排放量都得到了显著性的提升，尤其是其远郊落后区县，由于东部地区以及重庆市主城区的产业转移，一些高碳排放工业得到了迅速发展，从而导致不同区县的碳排放差距在一定程度上有了缩小的趋势.

表 1　1997 ~ 2012 县级尺度碳排放全局 Moran's *I* 指数统计

Table 1　Global Moran's *I* of CO_2 emissions at the county level from 1997 to 2012

年份	全局 Moran's *I*	*Z* 值	*P* 值
1997	0.564 1	5.272 1	0.001
1998	0.555 9	5.151 1	0.001
1999	0.522 6	4.798 7	0.001
2000	0.514 7	4.819	0.001
2001	0.499 7	4.632 8	0.001
2002	0.452 6	4.372 2	0.001
2003	0.394 5	3.804 8	0.001
2004	0.378 3	3.673 8	0.001
2005	0.370 4	3.472 7	0.003
2006	0.397 3	4.034 2	0.001
2007	0.402 4	4.206 7	0.001
2008	0.415 7	4.028 2	0.001
2009	0.417 7	4.093 3	0.001
2010	0.414 2	4.177 4	0.001
2011	0.406 1	3.921 8	0.002
2012	0.396 6	3.907 6	0.001

检验全局 Moran's *I* 指数仅能从整体上判断和识别重庆市县级尺度碳排放的区域差异性，仍无法揭示其内部碳排放的空间集聚特征. 为了便于比较分析，依次选取 1997、2002、2007 和 2012 年时间截面碳排放进行局部空间自相关分析.

从图 4 可以看出，4 个时间点具有显著空间自相关的区县维持在 10 ~ 16 个之间. 在主城区、渝东南及渝东北形成 3 个显著的空间正相关效应，而万

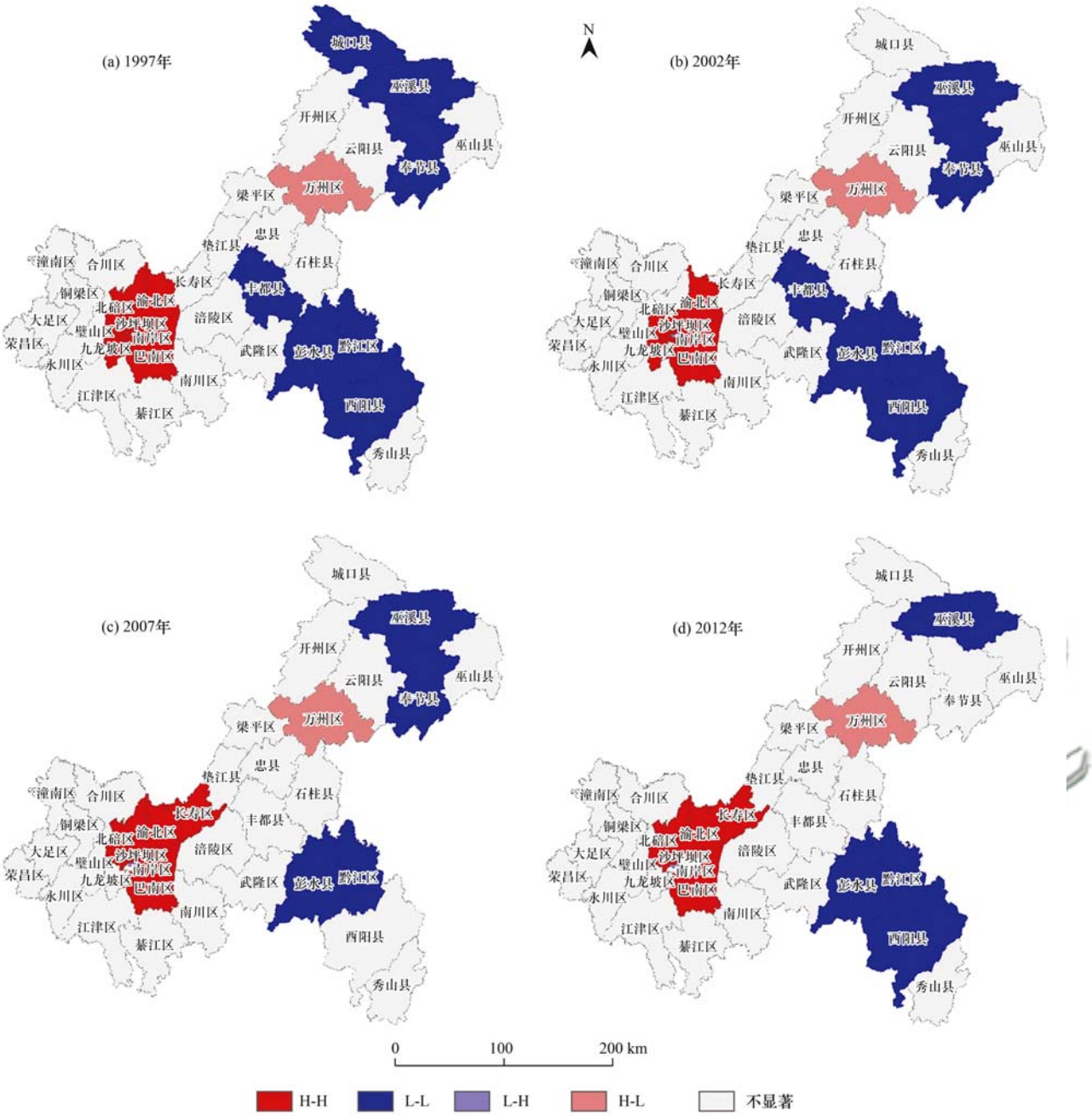

图 4 1997、2002、2007 和 2012 年县级尺度碳排放局部自相关类型

Fig. 4 Local Moran's *I* pattern of CO_2 emissions at the county level in 1997, 2002, 2007, and 2012

州区呈现显著空间负相关效应，整体上呈现出一个较为明显的分层集聚现象. 主城区区县在中心相互辐射，形成一个 HH 中心；渝东南和渝东北区县形成一个 LL 中心. 这与经济学中的"极化-扩散"效应相似：中心区域更易集中和消耗更多的能源，从而产生更多碳排放；而外圈的 LL 区县难以接收到中心溢出的技术和资本等资源而保持较低的发展，形成极核之间的低排放腹地，这一结论与汪浩等[25]、马国霞等[37]的研究结果基本保持一致.

从时间变化来看，HH 型从 1997 年的主城九区全部在内，到 2012 年逐步向东迁移，九龙坡区、大渡口区和渝中区逐步退出而东部的长寿区被纳入该空间系统，这与始于 2007 年历时 5 a 的重钢集团从大渡口搬迁至长寿区，及始于 2003 年的长寿化工园区建设有密切关系，而渝中区作为重庆的中央商务区，不再依赖于高碳排放产业，导致了该变化格局的产生. 万州区是渝东北三峡库区的中心城市，相对周边区县经济较为发达，与周围城市形成 HL 型的负相关关系. 渝东南和渝东北的两个 LL 型区，从整体上来看在研究时间段内都有成自相关弱化的

趋势，特别是渝东北表现更为明显，这可能是由于该类型中部分区县率先承接了第二产业转移而碳排放增高，或依托旅游等绿色产业摆脱了低排放自相关性有关. 此外，整体上来看各区县经济发展与人口流动同样导致碳排放更为发散，致使各区县的碳排放绝对差值逐步缩小.

2.3　碳排放位序-规模法则分析

如图 5 和表 2 所示，重庆市县级尺度碳排放的位序-规模双对数回归模型拟合优度 R^2 均大于 0.69，通过显著性检验. 在位序-规模双对数回归模型中，$|q|$ 值大于 1 居多，总体上呈不断减小趋势，从 1997 年的 1.35 降低到 2007 年的 0.98，之后逐

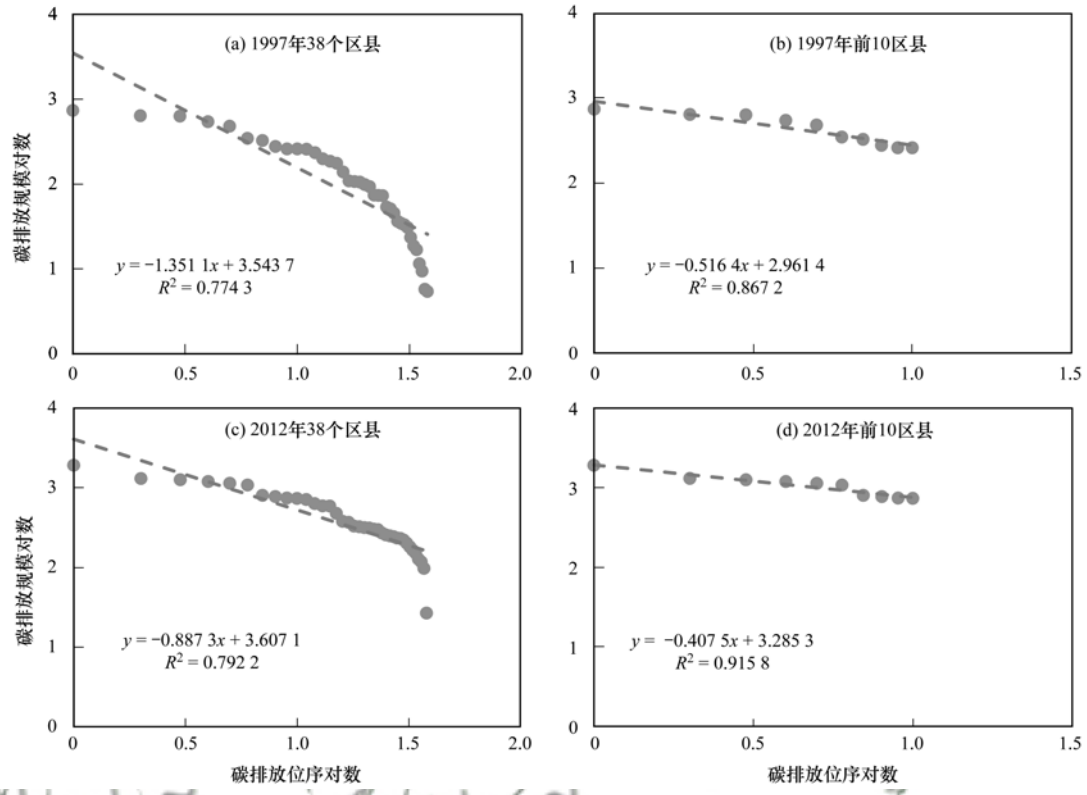

图 5　1997 和 2012 年重庆市县级尺度碳排放位序-规模双对数回归结果

Fig. 5　Regression results of rank-size double logarithm of CO_2 emissions at the county level in 1997 and 2012

表 2　1997～2012 年重庆市县级尺度碳排放位序-规模双对数回归结果

Table 2　Regression results of rank-size double logarithm of CO_2 emissions at the county level from 1997 to 2012

年份	38 个区县			前 10 区县		
	q	$\|q\|$	R^2	q	$\|q\|$	R^2
1997	−1.351 1	1.351 1	0.774 3	−0.516 4	0.516 4	0.867 2
1998	−1.302 8	1.302 8	0.754 0	−0.478 0	0.478 0	0.782 1
1999	−1.205 1	1.205 1	0.764 7	−0.477 4	0.477 4	0.772 1
2000	−1.174 4	1.174 4	0.751 7	−0.457 0	0.457 0	0.781 0
2001	−1.147 5	1.147 5	0.738 0	−0.435 7	0.435 7	0.803 4
2002	−1.029 1	1.029 1	0.732 0	−0.425 0	0.425 0	0.828 5
2003	−1.034 9	1.034 9	0.728 8	−0.452 1	0.452 1	0.829 9
2004	−1.016 9	1.016 9	0.729 1	−0.457 8	0.457 8	0.829 0
2005	−1.016 7	1.016 7	0.739 8	−0.489 9	0.489 9	0.870 8
2006	−0.991 5	0.991 5	0.747 0	−0.475 6	0.475 6	0.903
2007	−0.975 8	0.975 8	0.758 1	−0.473 4	0.473 4	0.929 5
2008	−1.038 4	1.038 4	0.694 9	−0.465 0	0.465 0	0.923 9
2009	−1.028 1	1.028 1	0.713 4	−0.456 8	0.456 8	0.919 2
2010	−0.949 7	0.949 7	0.804 5	−0.451 2	0.451 2	0.925
2011	−0.910 5	0.910 5	0.794 4	−0.425 5	0.425 5	0.932 4
2012	−0.887 3	0.887 3	0.792 2	−0.407 5	0.407 5	0.915 8

步增长到2012 年的 1.03. 一方面，这说明重庆市县级尺度碳排放基本上属于首位型分布(|q|值大于1)，碳排放主要集中于主城区的大部分区县，它们仍然是重庆市碳排放的主要贡献者，高位序区县的碳排放更为突出而部分落后区县碳排放量并不大. 另一方面|q|值的不断减小说明重庆市 38 个区县的碳排放规模的总体趋势日趋平衡，区县碳排放规模分布趋于分散的力量均大于趋于集中的力量.

位序-规模分布中下尾的可靠性不高，需要进行去尾处理[35, 38]. 因此，本文截取重庆市碳排放前10 位的区县(基本上为主城区区县)进行时间序列分析. 如图5 和表2 所示，重庆市碳排放前10 位的区县的位序-规模双对数回归模型拟合优度 R^2 均大于0.77，且都通过显著性检验，拟合优度明显优于全部 38 个区县. 由于|q|值均小于 1，说明在这前10 位碳排放的区县中，首位区县的碳排放规模并不突出，各个区县的碳排放规模分布较为均匀. 此外，|q|值总体上呈现出不断减小的趋势，从 1997 年的0.52 降低到2012 年的0.41，说明重庆市前10 位区县之间碳排放规模逐渐缩小，碳排放规模分布分散的趋势大于集中的趋势.

3 讨论

对比其他研究，与文本既有相同点也有很大的不同点. 从空间自相关分析来看，赵雲泰等[14]得出我国省级尺度碳排放各年全局 Moran's I 指数均为正，且在0.19 ~ 0.25 之间浮动(1999 ~ 2007). 胡艳兴等[39]得出我国省级尺度碳排放的全局 Moran's I 指数均为正值(1997 ~ 2012 年)，且在 2005 年达到了研究时段内的最高值(0.30)，此后表现出持续下降的态势. 苏泳娴等[4]研究中国地级市尺度碳排放的空间自相关性，发现 1995、2000、2005、2010 年我国碳排放全局 Moran's I 指数分别为0.384 8、0.397 8、0.430 3和0.478 1，呈现出一个增长的趋势. 此外，汪浩等[25]研究京津冀都市圈县级尺度碳排放时空演变特征，得出全局 Moran's I 指数由1990 年的0.14 下降到2009 的0.10. 总体上来看，不管是在省级尺度，还是地级市和县级尺度，我国碳排放的全局 Moran's I 指数均为正数，这与重庆市县级尺度碳排放的空间集聚模式基本相同. 但是，本研究发现重庆市县级尺度的 Moran's I 值都要大于地级市和省级尺度，这表明重庆市县级尺度碳排放呈现出更强的空间集聚特征. 对比王浩等的研究[25]，发现同样是在县级尺度，重庆市的全局 Moran's I 指数要远远大于京津冀都市圈，这表明京津冀都市圈各个区县碳排放比较均匀，而重庆市各个区县出现非常不平衡的空间分布格局，呈现出明显的“HH”和“LL”空间集聚格局.

上述空间集聚格局并不是随机分布的. 为了揭示其背后的影响因素，参考相关研究[40, 41]，选择人口、城市化率、GDP 和第二产业比例等 4 个指标，利用线性回归模型进行影响因素的对比和量化. 如图6 所示，发现在县级尺度上人口并不是碳排放的主要因素，这与其在省级尺度上的影响[39]明显不同. 通过对比相关系数(R^2)，发现 1997 和 2012 年的城市化率和 GDP 都对重庆市的碳排放产生了明显影响. GDP 的 R^2 由 1997 年的0.39 增长到 2012 年的0.61，这是由于进入到新世纪以来，重庆市的

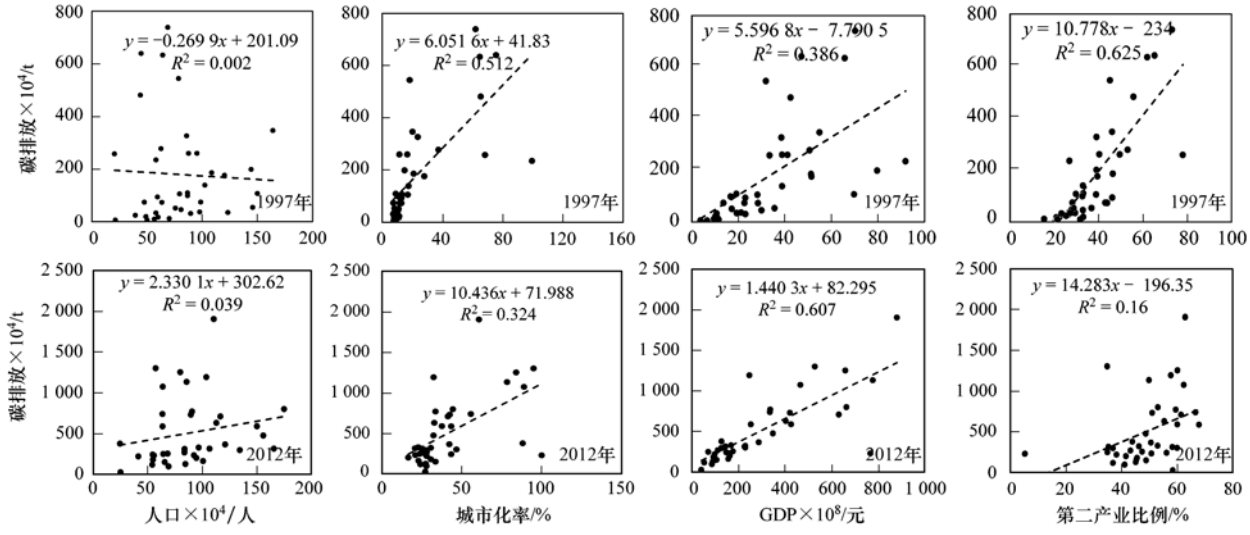

图6 县级尺度碳排放影响因素相关性分析

Fig. 6 Impact factors of CO_2 emissions at the county level

经济增长对投资依赖很大，投资的增长加快了高碳工业的发展，引起了对交通、能源等需要的增长，碳排放随之增长. 城市化率成为重庆各个区县碳排放增长的第二个重要影响因素，平均 R^2 为 0.42，这可能是由于重庆市城市化率的迅速提高在一定程度上增加了交通、住房、医疗卫生、地下水设施、城市绿化等各种公共服务的需求，而这些都在一定程度上消耗更多的化石能源，从而导致碳排放的迅速增加. 通过对比发现，第二产业比例对碳排放作用逐渐降低，R^2 由 1997 年的 0.73 降低到 2012 年的 0.16，这说明随着重庆市产业结构升级，尤其是第三产业的发展，一些发达区县，第三产业产值已经远远高于第二产业产值，因此导致第二产业对碳排放的影响程度逐步降低.

4　结论

(1)1997～2012 年，重庆市各个区县都经历了快速的碳排放增长过程，碳排放仍然保持集中于主城区的部分区县，但重心有逐步东移的趋势，同时远郊区县碳排放增长率高于主城区区县.

(2)重庆市县级尺度碳排放全局 Moran's I 指数呈现出一种波浪形的降低趋势，从 1997 年的 0.56 降低到 2005 年的 0.37，之后逐步增长到 2009 年的 0.42，最后又降低到 2012 年的 0.40，这说明重庆市不同区县碳排放的空间集聚程度逐渐降低；同时重庆市碳排放呈现出明显的二元空间分布结构，表现出显著的集聚现象，主城区区县在中心相互辐射，形成一个碳排放 HH 中心，而渝东南和渝东北的部分区县分别形成碳排放 LL 中心.

(3)位序-规模法则分析表明重庆市县级尺度碳排放基本上属于首位型分布，碳排放主要集中于主城区的大部分区县. 但是，在前 10 位碳排放的区县中，首位区县的碳排放规模并突出，表明它们之间碳排放规模差距逐渐缩小，碳排放规模分布分散的趋势大于集中的趋势.

(4)1997 和 2012 年的城市化率和 GDP 和都对重庆市的碳排放产生积极的影响；第二产业比例和城市化率成为影响碳排放的最重要的因素，随着产业结构升级，尤其是第三产业的发展，导致第二产业对碳排放的影响程度逐步降低；而人口与碳排放的相关关系却并不显著.

参考文献：

[1] Ni Y P, Xu Y, van Leeuwen B. Calculating China's historical economic aggregate: A GDP-centered overview [J]. Social Sciences in China, 2016, **37**(4): 56-75.

[2] Shi K F, Chen Y, Yu B L, *et al*. Detecting spatiotemporal dynamics of global electric power consumption using DMSP-OLS nighttime stable light data[J]. Applied Energy, 2016, **184**: 450-463.

[3] 杨乐，李贺鹏，孙滨峰，等. 新安江水库二氧化碳排放的时空变化特征[J]. 环境科学，2017，**38**(12)：5012-5019.
Yang L, Li H P, Sun B F, *et al*. Spatial and temporal variability of CO_2 emissions from the Xin'anjiang Reservoir [J]. Environmental Science, 2017, **38**(12): 5012-5019.

[4] 苏泳娴，陈修治，叶玉瑶，等. 基于夜间灯光数据的中国能源消费碳排放特征及机理[J]. 地理学报，2013，**68**(11)：1513-1526.
Su Y X, Chen X Z, Ye Y Y, *et al*. The characteristics and mechanisms of carbon emissions from energy consumption in China using DMSP/OLS night light imageries [J]. Acta Geographica Sinica, 2013, **68**(11): 1513-1526.

[5] 程叶青，王哲野，叶信岳，等. 中国能源消费碳排放强度及其影响因素的空间计量[J]. 地理学报，2013，**68**(10)：1418-1431.
Cheng Y Q, Wang Z Y, Ye X Y, *et al*. Spatial econometric analysis of carbon emission intensity and its driving factors from energy consumption in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2013, **68**(10): 1418-1431.

[6] 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.

[7] 陈前利，蔡博峰，胡方芳，等. 新疆地级市 CO_2 排放空间特征研究[J]. 中国人口·资源与环境，2017，**27**(2)：15-21.
Chen Q L, Cai B F, Hu F F, *et al*. Spatial characteristics of CO_2 emissions of prefecture-level cities in Xinjiang[J]. China Population Resources and Environment, 2017, **27**(2): 15-21.

[8] Geng Y H, Tian M Z, Zhu Q A, *et al*. Quantification of provincial-level carbon emissions from energy consumption in China[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, **15**(8): 3658-3668.

[9] Zhang Y X, Wang H K, Liang S, *et al*. Temporal and spatial variations in consumption-based carbon dioxide emissions in China[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, **40**: 60-68.

[10] Wang S J, Liu X P. China's city-level energy-related CO_2 emissions: spatiotemporal patterns and driving forces [J]. Applied Energy, 2017, **200**: 204-214.

[11] Long R Y, Shao T X, Chen H. Spatial econometric analysis of China's province-level industrial carbon productivity and its influencing factors[J]. Applied Energy, 2016, **166**: 210-219.

[12] Wang S J, Fang C L, Wang Y. Spatiotemporal variations of energy-related CO_2 emissions in China and its influencing factors: An empirical analysis based on provincial panel data [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, **55**: 505-515.

[13] 胡艳兴，潘竟虎，王怡睿. 基于 ESDA-GWR 的 1997——2012

年中国省域能源消费碳排放时空演变特征[J]. 环境科学学报, 2015, **35**(6): 1896-1906.
Hu Y X, Pan J H, Wang Y R. Spatial-temporal evolution of provincial carbon emission in China from 1997 to 2012 based on ESDA and GWR model[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, **35**(6): 1896-1906.

[14] 赵雲泰, 黄贤金, 钟太洋, 等. 1999~2007 年中国能源消费碳排放强度空间演变特征[J]. 环境科学, 2011, **32**(11): 3145-3152.
Zhao Y T, Huang X J, Zhong T Y, *et al*. Spatial pattern evolution of carbon emission intensity from energy consumption in China[J]. Environmental Science, 2011, **32**(11): 3145-3152.

[15] Huang Y, Xia B, Yang L. Relationship study on land use spatial distribution structure and energy-related carbon emission intensity in different land use types of Guangdong, China, 1996-2008 [J]. The Scientific World Journal, 2013, **2013**: 309680.

[16] 李建豹, 黄贤金. 基于空间面板模型的碳排放影响因素分析——以长江经济带为例[J]. 长江流域资源与环境, 2015, **24**(10): 1665-1671.
Li J B, Huang X J. Analysis of influential factors of carbon emission based on spatial panel models——a case study for Yangtze River economic belt[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, **24**(10): 1665-1671.

[17] Shi K F, Chen Y, Yu B L, *et al*. Modeling spatiotemporal CO_2 (carbon dioxide) emission dynamics in China from DMSP-OLS nighttime stable light data using panel data analysis[J]. Applied Energy, 2016, **168**: 523-533.

[18] 蔡博峰, 王金南. 基于 1 km 网格的天津市二氧化碳排放研究[J]. 环境科学学报, 2013, **33**(6): 1655-1664.
Cai B F, Wang J N. CO_2 emissions of Tianjin based on 1 km grid dataset[J]. Acta Scientiae Circumstantiate, 2013, **33**(6): 1655-1664.

[19] Wang M S, Cai B F. A two-level comparison of CO_2 emission data in China: evidence from three gridded data sources[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, **148**: 194-201.

[20] Ou J P, Liu X P, Li X, *et al*. Mapping global fossil fuel combustion CO_2 emissions at high resolution by integrating nightlight, population density, and traffic network data[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2016, **9**(4): 1674-1684.

[21] Shan Y L, Guan D B, Liu J H, *et al*. Methodology and applications of city level CO_2 emission accounts in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, **161**: 1215-1225.

[22] Chen Q L, Cai B F, Dhakal S, *et al*. CO_2 emission data for Chinese cities[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2017, **126**: 198-208.

[23] Kang Y Q, Zhao T, Wu P. Impacts of energy-related CO_2 emissions in China: A spatial panel data technique[J]. Natural Hazards, 2016, **81**(1): 405-421.

[24] Cai B F, Wang J N, He J, *et al*. Evaluating CO_2 emission performance in China's cement industry: An enterprise perspective[J]. Applied Energy, 2016, **166**: 191-200.

[25] 汪浩, 陈操操, 潘涛, 等. 县域尺度的京津冀都市圈 CO_2 排放时空演变特征[J]. 环境科学, 2014, **35**(1): 385-393.
Wang H, Chen C C, Pan T, *et al*. County scale characteristics of CO_2 emission's spatial-temporal evolution in the Beijing-Tianjin-Hebei metropolitan region[J]. Environmental Science, 2014, **35**(1): 385-393.

[26] Xiao B W, Niu D X, Wu H. Exploring the impact of determining factors behind CO_2 emissions in China: A CGE appraisal[J]. Science of the Total Environment, 2017, **581-582**: 559-572.

[27] Zhou C S, Wang S J. Examining the determinants and the spatial nexus of city-level CO_2 emissions in China: A dynamic spatial panel analysis of China's cities[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, **171**: 917-926.

[28] 重庆市统计局. 重庆统计年鉴 2016[M]. 北京: 中国统计出版社, 2016.
Chongqing Municipal Bureau of Statistics. Chongqing statistical yearbook 2016[M]. Beijing: China Statistics Press, 2016.

[29] 王少剑, 刘艳艳, 方创琳. 能源消费 CO_2 排放研究综述[J]. 地理科学进展, 2015, **34**(2): 151-164.
Wang S J, Liu Y Y, Fang C L. Review of energy-related CO_2 emission in response to climate change[J]. Progress in Geography, 2015, **34**(2): 151-164.

[30] Andreoni V, Galmarini S. Drivers in CO2 emissions variation: A decomposition analysis for 33 world countries[J]. Energy, 2016, **103**: 27-37.

[31] Zhang Y J, Peng Y L, Ma C Q, *et al*. Can environmental innovation facilitate carbon emissions reduction? Evidence from China[J]. Energy Policy, 2017, **100**: 18-28.

[32] 杨洋, 黄庆旭, 章立玲. 基于 DMSP/OLS 夜间灯光数据的土地城镇化水平时空测度研究——以环渤海地区为例[J]. 经济地理, 2015, **35**(2): 141-148, 168.
Yang Y, Huang Q X, Zhang L L. The spatial-temporal measurement on the land urbanization level using DMSP/OLS nighttime light data——A case study of bohai rim[J]. Economic Geography, 2015, **35**(2): 141-148, 168.

[33] 范斐, 杜德斌, 李恒, 等. 中国地级以上城市科技资源配置效率的时空格局[J]. 地理学报, 2013, **68**(10): 1331-1343.
Fan F, Du D B, Li H, *et al*. Spatial-temporal characteristics of scientific and technological resources allocation efficiency in prefecture-level cities of China[J]. Acta Geographica Sinica, 2013, **68**(10): 1331-1343.

[34] Le Gallo J, Ertur C. Exploratory spatial data analysis of the distribution of regional per capita GDP in Europe, 1980-1995 [J]. Papers in Regional Science, 2003, **82**(2): 175-201.

[35] 李德仁, 余涵若, 李熙. 基于夜光遥感影像的"一带一路"沿线国家城市发展时空格局分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2017, **42**(6): 711-720.
Li D R, Yu H R, Li X. The spatial-temporal pattern analysis of city development in countries along the Belt and Road initiative based on nighttime light data[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2017, **42**(6): 711-720.

[36] 杨洋, 李雅静, 何春阳, 等. 环渤海地区三大城市群城市规模分布动态比较——基于 1992-2012 年夜间灯光数据的分析和透视[J]. 经济地理, 2016, **36**(4): 59-69.
Yang Y, Li Y J, He C Y, *et al*. A comparative study on spatiotemporal dynamics of city size distribution among three urban agglomerations in bohai Rim: based on the analysis and perspective of nighttime light data from 1992 to 2012[J]. Economic Geography, 2016, **36**(4): 59-69.

[37] 马国霞, 田玉军, 石勇. 京津冀都市圈经济增长的空间极化及其模拟研究[J]. 经济地理, 2010, **30**(2): 177-182.
Ma G X, Tian Y J, Shi Y. Research on spatial polarization and

simulation of economic growth in Beijing-Tianjin-Hebei metropolitan region[J]. Economic Geography, 2010, **30**(2): 177-182.

[38] Jiang B, Jia T. Zipf's law for all the natural cities in the United States: a geospatial perspective[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2011, **25**(8): 1269-1281.

[39] 胡艳兴, 潘竟虎, 李真, 等. 中国省域能源消费碳排放时空异质性的 EOF 和 GWR 分析[J]. 环境科学学报, 2016, **36**(5): 1866-1874.
Hu Y X, Pan J H, Li Z, *et al*. Spatial-temporal analysis of provincial carbon emissions in China from 1997 to 2012 with EOF and GWR methods[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, **36**(5): 1866-1874.

[40] Wang Q, Wu S D, Zeng Y E, *et al*. Exploring the relationship between urbanization, energy consumption, and CO_2 emissions in different provinces of China[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, **54**: 1563-1579.

[41] Meng L N, Graus W, Worrell E, *et al*. Estimating CO_2 (carbon dioxide) emissions at urban scales by DMSP/OLS (defense meteorological satellite program's operational linescan system) nighttime light imagery: Methodological challenges and a case study for China[J]. Energy, 2014, **71**: 468-478.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 39 No. 6

Jun 15, 2018

CONTENTS

Diurnal Variation of SOA Formation Potential from Ambient Air at an Urban Site in Beijing ····· LIU Jun, CHU Bi-wu, HE Hong (2505)
Characteristics of Key Size Spectrum of $PM_{2.5}$ Affecting Winter Haze Pollution in Taiyuan ····· YANG Su-ying, YU Xin-yang, ZHAO Xiu-yong, *et al.* (2512)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Ions in $PM_{2.5}$ During Winter in Panjin ····· ZHANG Lei, JI Ya-qin, WANG Shi-bao, *et al.* (2521)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in the Rainy Season of Guangzhou City ····· GU Ying-gang, YU Xiao-fang, YANG Wen-da, *et al.* (2528)
Emission Characteristics of Dehydrated Sugar and Acephenanthrylene in Particles from Tropical Forest Burning ····· JIN Cheng-miao, CUI Min, HAN Yong, *et al.* (2538)
Construction and Application of Vertical Diffusion Index for Analyzing Weather During Pollution Events in Tianjin ····· CAI Zi-ying, HAN Su-qin, ZHANG Min, *et al.* (2548)
Comparison Between Atmospheric Wet-only and Bulk Nitrogen Depositions at Two Sites in Subtropical China ····· ZHU Xiao, WANG Jie-fei, SHEN Jian-lin, *et al.* (2557)
Emission Reduction Benefits When Eliminating Yellow-label Vehicles in the Jing-jin-ji Region ····· LU Ya-ling, ZHOU Jia, CHENG Xi, *et al.* (2566)
Health Assessment of the Stream Ecosystem in the North Canal River Basin, Beijing, China ····· GU Xiao-yun, XU Zong-xue, LIU Lin-fei, *et al.* (2576)
Pollution Characteristics and Source Identification of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Phthalic Acid Esters During High Water Level Periods in the Wuhan Section of the Yangtze River, China ····· DONG Lei, TANG Xian-qiang, LIN Li, *et al.* (2588)
Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Downstream Areas of the Aojiang River, Fujian Province ····· ZHANG Dan-dan, GUO Ya-ping, REN Hong-yun, *et al.* (2600)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in the Sediments of the Estuary of the Tributaries in the Three Gorges Reservoir, SW China ····· FANG Zhi-qing, CHEN Qiu-yu, YIN De-liang, *et al.* (2607)
Assessment of Physico-chemical Properties and Phosphorus Fraction Distribution Characteristics in Sediments after Impounding of the Three Gorges Reservoir to 175 m ····· PAN Chan-juan, LI Rui, TANG Xian-qiang, *et al.* (2615)
Source of Nitrate in Surface Water and Shallow Groundwater Around Baiyangdian Lake Area Based on Hydrochemical and Stable Isotopes ····· KONG Xiao-le, WANG Shi-qin, DING fei, *et al.* (2624)
Thermal Stratification and Its Impacts on Water Quality in Shahe Reservoir, Liyang, China ····· SUN Xiang, ZHU Guang-wei, DA Wen-yi, *et al.* (2632)
Spatial and Temporal Variation Characteristics of Drip Water Hydrogeochemistry in the Xueyu Cave of Chongqing and Its Implications for Environmental Research ····· ZENG Ze, JIANG Yong-jun, LÜ Xian-fu, *et al.* (2641)
Distinguishing the Compositions and Sources of the Chromophoric Dissolved Organic Matter in a Typical Karst River During the Dry Season: A Case Study in Bitan River, Jinfo Mountain ····· LIU Yue, HE Qiu-fang, LIU Ning-kun, *et al.* (2651)
Environmental Significance of the Stable Isotopes in Precipitation at Different Altitudes in the Tuolai River Basin ····· LI Yong-ge, LI Zong-xing, FENG Qi, *et al.* (2661)
Spatial-Temporal Variations of CO_2 and CH_4 Flux Through a Water-air Interface Under the Effect of Primary Productivity in Wulixia Reservoir ····· PENG Wen-jie, LI Qiang, SONG Ang, *et al.* (2673)
Spatiotemporal Succession Characteristics of Algal Functional Groups and Its Impact Factors for a Typical Channel-Type Reservoir in a Southwest Mountainous Area ····· ZHANG Yao-wen, LI Hong, LI Jia, *et al.* (2680)
Seasonal Succession of Phytoplankton Functional Groups and Their Driving Factors in the Siminghu Reservoir ····· ZHENG Cheng, LU Kai-hong, XU Zhen, *et al.* (2688)
Effects of Nutrient Addition on the Growth and Competition of Bloom Forming Cyanobacterium *Chrysosporum ovalisporum*: An In-situ Experiment ····· WANG Meng-meng, ZHANG Wei, ZHANG Jun-yi, *et al.* (2698)
Purification Effect of Submerged Macrophyte System with Different Plants Combinations and C/N Ratios ····· LIU Miao, CHEN Kai-ning (2706)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Concentration Dynamics in Natural Ditches Under an Irrigation-Drainage Unit in the Jianghan Plain ····· HUA Ling-ling, ZHANG Fu-lin, ZHAI Li-mei, *et al.* (2715)
Distribution and Treatment of Antibiotics in Typical WWTPs in Small Towns in China ····· CHAI Yu-feng, ZHANG Yu-xiu, CHEN Mei-xue, *et al.* (2724)
Effects and Mechanism of the Combination of Ozone-PAC as a Pretreatment for the Reduction of Membrane Fouling ····· DONG Bing-zhi, GAO Hao-yang, HU Meng-liu (2732)
Start-up and Process Characteristics of Simultaneous ANAMMOX and Denitrification (SAD) in a Pilot-scale Anaerobic Sequencing Batch Reactor (ASBR) ····· YU De-shuang, TANG Jia-jia, ZHANG Jun, *et al.* (2740)
Phosphate Removal on Zirconium Alginate/Poly(*N*-isopropyl acrylamide) Hydrogel Beads with a Semi-interpenetrating Network ····· ZENG Xue-yang, LUO Hua-yong, ZHANG Yao-kun, *et al.* (2748)
Shortcut Nitrification Rapid Start and Stability of Corn Starch Wastewater ····· LONG Bei-sheng, LIU Xun-lei, LIU Hong-bo, *et al.* (2756)
Nitrifying Bacteria Culture in Entrapment Immobilization ····· YANG Hong, HU Yin-long (2763)
Performance of the Removal of Nitrogen During Anaerobic Ammonia Oxidation Using Different Operational Strategies ····· AN Fang-jiao, PENG Yong-zhen, DONG Zhi-long, *et al.* (2770)
Transformation of Protein in Sludge During High Solids Anaerobic Digestion ····· ZHAN Yu, SHI Wan-sheng, ZHAO Ming-xing, *et al.* (2778)
Changes in Heavy Metal Speciation and Release Behavior Before and After Sludge Composting Under a Phosphate-rich Atmosphere ····· LI Yu, FANG Wen, QI Guang-xia, *et al.* (2786)
Effect of Denitrification and Phosphorus Removal Microorganisms in Activated Sludge Bulking Caused by Filamentous Bacteria ····· GAO Chen-chen, YOU Jia, CHEN Yi, *et al.* (2794)
Microbial Population Dynamics During Domestication and Cultivation of Biofilm to Remove and Enrich Phosphate ····· MENG Xuan, PAN Yang, ZHANG Hao, *et al.* (2802)
Effects of Elevated Tetracycline Concentrations on Aerobic Composting of Human Feces: Composting Behavior and Microbial Community Succession ····· SHI Hong-lei, WANG Xiao-chang, LI Qian, *et al.* (2810)
Effect of Long-term Organic Amendments on Nitric Oxide Emissions from the Summer Maize-Winter Wheat Cropping System in Guanzhong Plain ····· YUAN Meng-xuan, WANG Jin-feng, TAN Yue-hui, *et al.* (2819)
Effects of Mushroom Residue Application Rates on Net Greenhouse Gas Emissions in the Purple Paddy Soil ····· QI Le, GAO Ming, ZHOU Peng, *et al.* (2827)
Estimation of Winter Wheat Photosynthesized Carbon Distribution and Allocation Belowground via ^{13}C Pulse-labeling ····· SUN Zhao-an, CHEN Qing, HAN Xiao, *et al.* (2837)
Effects of Vegetation Restoration on Soil Nitrogen Pathways in a Karst Region of Southwest China ····· YANG Yi, OUYANG Yun-dong, CHEN Hao, *et al.* (2845)
Identifying the Origins and Spatial Distributions of Heavy Metals in the Soils of the Jiangsu Coast ····· LÜ Jian-shu, HE Hua-chun (2853)
Source Identification and Spatial Distribution of Heavy Metals in Soils in Typical Areas Around the Lower Yellow River ····· YU Yuan-he, LÜ Jian-shu, WANG Ya-meng (2865)
Spatial Variation of Soil Heavy Metals in Lin'an City and Its Potential Risk Evaluation ····· ZHENG Jing-zhi, WANG Chu-dong, WANG Shi-han, *et al.* (2875)
Principal Component Analysis and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils around a Pb-Zn Mine in Southwestern China ····· ZHOU Yan, CHEN Qiang, DENG Shao-po, *et al.* (2884)
Spatial Variation of Heavy Metals in Soils and Its Ecological Risk Evaluation in a Typical *Carya cathayensis* Production Area ····· ZHANG Hong-ju, ZHAO Ke-li, YE Zheng-qian, *et al.* (2893)
Influence of Biochar Application on Growth and Antioxidative Responses of Macrophytes in Subsurface Flow Constructed Wetlands ····· HUANG Lei, CHEN Yu-cheng, ZHAO Ya-qi, *et al.* (2904)
Effect of Iron on the Release of Arsenic in Flooded Paddy Soils ····· WANG Xin, ZHONG Song-xiong, CHEN Zhi-liang, *et al.* (2911)
Concentrations and Health Risk Assessments of Heavy Metal Contents in Soil and Rice of Mine Contaminated Areas ····· TIAN Mei-ling, ZHONG Xue-mei, ZHAGN Yun-xia, *et al.* (2919)
Effect of Calcium Silicate-biological Humus Fertilizer Composite on Uptake of Cd by Shallots from Contaminated Agricultural Soil ····· LIU De-ling, YIN Guang-cai, CHEN Zhi-liang, *et al.* (2927)
Accumulation Characteristics of Heavy Metals in Greenhouse Soil and Vegetables in Siping City, Jilin Province ····· LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, ZENG Xi-bai, *et al.* (2936)
Effect of Foliar Zinc Application on Bioaccessibility of Cadmium and Zinc in Pakchoi ····· WANG Lin, GU Peng-lei, LI Ran, *et al.* (2944)
Mercury Distribution of Benthonic Animals and Response to Mercury in Sediments in Caohai Wetland, Guizhou Province ····· XU Yi-yuan, ZENG Ling-xia, HE Tian-rong, *et al.* (2953)
Discussion of Emissions and Health Risk of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) from the Retreading Process of Waste Tires ····· FU Jian-ping, ZHAO Bo, LI Yu-qing, *et al.* (2963)
Spatiotemporal Dynamics of CO_2 Emissions in Chongqing: An Empirical Analysis at the County Level ····· SUN Xiu-feng, SHI Kai-fang, WU Jian-ping (2971)
Impact of Size on Environmental Behavior of Metal Oxide Nanoparticles ····· YAN Yu-peng, TANG Ya-dong, WAN Biao, *et al.* (2982)
Fate and Toxicity of UV Filters in Marine Environments ····· ZHU Xiao-shan, HUANG Jing-ying, LÜ Xiao-hui, *et al.* (2991)