

目次

“大气十条”实施期间南京市 PM _{2.5} 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 _{2.5} 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 _{2.5} 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 _{2.5} -O ₃ 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, 栗少丽, 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现性	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, 董慧岭, 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, 张坤峰, 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)
苦草叶表附和和水体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, 张钊, 黄伟, 胡鹏飞, 谭炳圆, 张磊 (282)
自然降雨下蔬菜地土壤侵蚀及氮素流失特征	宁嘉丽, 黄艳芸, 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, 王任重远, 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, 倪锦炉, 马进鹏, 梁翔宇 (356)
铜冶炼场地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铜、砷同步钝化	尹雪斐, 刘玉玲, 伍德, 黄薪铭, 张朴心, 铁柏清 (436)
黄土丘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, 王晓妍, 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, 王丽学, 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)

中国县域碳排放时空演变与异质性

宋苑震¹, 曾坚^{1*}, 王森¹, 梁晨²

(1. 天津大学建筑学院, 天津 300072; 2. 河北工业大学建筑与艺术设计学院, 天津 300130)

摘要: 县域是实现减排控碳的关键空间单元, 研究并揭示县域碳排放的时空演变特征和影响机制对于实现“双碳”目标具有重要意义. 以县域作为分析单元, 运用数理统计和面板数据回归模型等方法, 分析 2000 ~ 2017 年中国县域碳排放时空演变和异质性特征, 探究其影响机制. 结果表明: ① 2000 ~ 2017 年碳排放年均增速为 7.12%, 历经“大幅上升-缓慢上升-高位波动”3 个发展阶段, 最终稳定在 90×10^8 t 左右; 在县域尺度上表现为显著正向空间自相关. ② 普通面板回归模型显示, GDP、建设用地规模、人口规模、人均 GDP 和人均金融机构存款余额和碳排放关系显著, 前三者对碳排放的促进作用最为强烈. ③ 时空地理加权回归模型拟合优度较高, 除国民生产总值在全局上稳定表现为促进作用以外, 其余影响因素的作用方向和强度均在时空上发生了较大转变; 表明我国不同类型县域间碳排放水平和主要影响因素各异. 该研究一定程度上揭示了县域碳排放的演变特征和异质性, 有助于优化“双碳”目标的空间实施路径.

关键词: 县域; 碳排放; 时空演变; 异质性; 影响机制; 时空地理加权回归

中图分类号: X24 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)01-0549-11 DOI: 10.13227/j.hjks.202202137

Spatial-temporal Evolution and Heterogeneity of Carbon Emissions at County-level in China

SONG Yuan-zhen¹, ZENG Jian^{1*}, WANG Sen¹, LIANG Chen²

(1. School of Architecture, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. School of Architecture and Art Design, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

Abstract: Counties are the key spatial units in achieving the reduction and control of carbon emissions. It is of great significance to study and reveal the spatial-temporal evolution characteristics and influencing mechanism of carbon emissions for realizing the “carbon peak and carbon neutral” goal. In this study, the spatial-temporal evolution and heterogeneity of carbon emissions at the county level in China from 2000 to 2017 were analyzed by using mathematical statistics and panel data regression modeling, and the influencing mechanism was explored. The results showed that: ① from 2000 to 2017, the annual growth rate of carbon emissions was 7.12%, which experienced the three stages of “sharp rise, slow rise, and high fluctuation” and finally stabilized at approximately 90×10^8 t. At the county scale, there was a significant positive spatial autocorrelation. ② The general panel regression model showed that GDP, construction land area, population, per capita GDP, and per capita deposit balance of financial institutions were significantly correlated with carbon emissions, and the former three had the strongest promoting effect on carbon emissions. ③ The goodness of fit of the geographically and temporally weighted regression model was high, and the direction and intensity of the other impact factors changed greatly in spatial-temporal characteristics, except that GDP showed a stable promoting effect globally. The results showed that carbon emission levels and main influencing factors varied among counties in China. This study revealed the heterogeneity of carbon emissions at the county level, which is helpful to optimize the spatial-temporal implementation path of the “dual carbon” target.

Key words: county; carbon emissions; spatial-temporal evolution; heterogeneity; influencing mechanism; geographically and temporally weighted regression

2020 年 9 月, 习近平总书记提出了“碳达峰、碳中和”的目标. “双碳”目标的实现既要基于“全国一盘棋”的统筹布局, 更要考虑政策和具体措施的落地. 县域作为践行我国减碳增汇的关键单元和基层治理组织, 研究并明确其碳排放的时空演变特征和影响机制, 有助于制定差异化和非均衡性的实施措施, 保证“双碳”目标的有序实现.

碳排放一直是各学科的研究热点. 经济学和管理学等学科多基于统计数据、系数估计法或样本测算法对产业过程和门类^[1~5]碳排放进行研究, 使用 IPAT 等式^[6]、STIRPAT 模型^[7]和 LMDI 公式^[8]等方法对碳排放影响因素进行分解, 验证环境库兹涅茨曲线假说的显著性等. 此外, 使用统计分析模型^[9]、非线性智能模型^[10]和灰色预测模型^[11]等方法已经可以实现对碳排放路径的模拟等.

环境科学和城乡规划等空间学科往往从空间单

元入手, 使用探索性空间数据分析和回归分析等手段对碳排放时空特征和影响因素进行研究. 在全球尺度, 为降低全局分析所带来的误差, 有学者尝试基于经济发展水平或资源禀赋等特征对国家进行分组^[12~16], 进而研究全球和组别间主导因素的差异. 所得结论略有不同但均证实了不同类型国家碳排放影响因素具有较大差异的现象. 研究结论的多样性证实了碳排放的复杂性, 也使得学者认识到全局分析的弊端和样本尺度对结果的影响, 进而尝试从省域、市域乃至县域等尺度展开研究. 岳超等^[17]和谭丹等^[18]分别对我国东中西部碳排放进行分析, 得出我国东部碳排放总量大于中部和西部的结论, 表明

收稿日期: 2022-02-19; 修订日期: 2022-04-29

基金项目: 国家重点研发计划重点项目(2018YFD1100802); 国家自然科学基金项目(52078330)

作者简介: 宋苑震(1993~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为区域碳排放、空气污染过程和规划, E-mail: sxzyy@tju.edu.cn

* 通信作者, E-mail: 13602058416@vip.163.com

区域碳排放存在较大空间差异.在省域尺度上,李建豹等^[19]、王雅楠等^[20]和郑长德等^[21]分别使用地理加权回归或空间计量模型等方法分析碳排放演变和机制,结果表明省域尺度碳排放具有较强的空间聚集效应和溢出特征.王兆峰等^[22]、侯勃等^[23]和汪浩等^[24]则基于典型城市群,对区域内市域乃至县域的碳排放影响因素进行异质化特征分析,基于差异化的分析结果提出了科学的管控建议.在县域尺度研究则较为精细,王少剑等^[25]和王睿等^[26]使用面板分位数回归和地理探测器对我国县域碳排放影响因素进行分析,尝试从全局剖析县域碳排放和社会经济因素的关系,并认为县域尺度研究有助于因地制宜制定可行的减排控碳措施.

总体而言,学界对碳排放的研究较为系统,并从事不同空间尺度对碳排放时空演变和影响因素进行丰富分析,同时意识到碳排放在不同尺度上会表现出一定的溢出、聚集或差异的空间效应.但已有研究多集中在国家、区域和市域尺度,县域尺度研究较少.其次已有县域研究难以覆盖全局或采用基于全局假设的分析思路,掩盖了个体的异质性;所用方法多为截面分析手段,缺乏对长时间序列碳排放面板数据的统筹分析,难以精准把握时空演变过程.为此,本文从县域尺度出发,基于碳排放的面板数据,应用数理统计和考虑异质性的时空地理加权回归模型等分析手段,对2000~2017年县域碳排放的时空演变和影响因素异质性进行系统分析,以求全面把握中国县域碳排放的个体特征和非平稳性.

1 材料与方法

1.1 数据来源和分析单元

1.1.1 数据来源

本文所用碳排放数据来自中国碳核算数据库^[27](港澳台和西藏资料暂缺).

社会经济数据主要来自2000~2018年的中国县域统计年鉴和当地政府工作报告;土地利用类型数据来自中国科学院资源环境科学与数据中心;人口数据来自Worldpop,并与五普和六普数据进行交叉验证.个别缺失样本数据依据插值补齐.为消除变量间量纲的影响,对变量进行极差变换.

1.1.2 分析单元

本文以中华人民共和国民政部所列出的2020年行政区划统计表为依据,筛选出2691个市辖区及县域作为碳排放时空演变的基本分析单元.

随后考虑到市辖区数据缺失严重、在系统内表现为异常值的特性,剔除974个市辖区,为确保数据的连贯性、完整性和准确性,进一步剔除数据缺失

较多的95个县级行政单元,因此仅选取1623个县域进行影响因素的分析.

1.2 研究方法

1.2.1 空间自相关分析

空间自相关是一种探究地理现象属性因空间位置而产生相关性程度的空间分析方法,用此方法可以解释地理现象的空间分布特征、相关程度和聚集性^[28].主要指标有Moran's I 指数和LISA (local indicators of spatial association) 显著性分布.

1.2.2 面板数据回归分析

本文使用混合模型、个体固定效应模型和双向固定效应模型进行普通面板回归模型分析.

综合我国县域社会经济水平和资源本底的层次性差异和碳排放的空间效应,并突出县域个体的异质性特征,本文采用将异质性关系纳入模型设定的时空地理加权回归 (geographically and temporally weighted regression, GTWR) 进行空间回归分析.时空地理加权回归是将时间和空间特征整合到模型中,以捕获分析对象异质性特征,以局部加权法求解时空回归关系的空间分析手段^[29].

1.3 影响因素的选取

参考IPAT等式、STIRPAT模型分析和既有研究,重点考虑规模、结构和效率指标对于碳排放的影响,选取下列因素进行分析.

(1) 规模指标 经济社会的发展和碳排放总量具有内在的重要联系^[30].经济规模的扩大离不开能源等要素的投入,易导致较大碳排放;另一方面,绿色、低碳和可持续发展的经济发展模式,有助于改善当地环境^[31].人口规模也是影响碳排放的主要因素之一^[32],人口通过生产、生活和消费行为对碳排放总量产生影响^[33].本文选取地区生产总值 (gross domestic product, GDP, X_1) 作为表征地区经济规模的指标,同时选取通过Worldpop人口栅格数据分区统计获得的县域人口规模 (population, POP, X_2) 作为表征地区人口规模的指标.城镇化规模的的增长和结构的调整^[34],既隐含着建设过程中对水泥等建材和煤炭等化石燃料的需求,同时也包含着影响居民生活范围和出行方式的含义,由此对碳排放产生综合影响.以建设用地规模 (construction land area, CLA, X_3) 对城镇化规模进行表征.

(2) 结构指标 作为能耗大户的第二产业产生了近80%的人为温室气体排放量,对于减少碳排放具有决定性作用^[35];同时考虑到第二产业仍是我国部分地区发展主导动力的现状^[36],故选取第二产业占比 (share of secondary industry, SSI, X_4) 来衡量产业对于碳排放的影响.固定资产投资作为城市建

设和工业生产再投入的衡量标准,不仅影响产业的发展循环,还改变了当地能源消耗模式和构成,从而影响碳排放,体现建设和再生产过程对于碳排放的影响.因此将固定资产投资占 GDP 的比例(ratio of investment in fixed assets, RIFA, X_5)纳入模型之中.

(3) 效率指标 国民富裕程度的提升将带动生产并促进消费的升级,更易产生较多的生活碳排放;并且容易从需求侧对供给侧方面产生影响,进而改变碳排放总量.本文选取人均国民生产总值(per capita gross domestic regional product, PCGDP, X_6)和人均金融机构存款余额(per capita deposit amount of financial institutions, PCDAFI, X_7)作为代理变量.并将人均 GDP 的二次项(quadratic term of per capita gross domestic product, QTPCGDP, X_8)纳入模型中以检验人均富裕程度与碳排放的关系是否符合 EKC 假说.

2 中国县域碳排放时空演变特征

2.1 碳排放时序变化分析

使用数理统计的方法,对碳排放时序变化进行描述分析.

2017 年我国碳排放总量为 93.70×10^8 t,较 2000 年的 31.20×10^8 t 有较大幅度提升,年均增幅

为 7.12%.以变化特征差异为标准,将发展历程分为“大幅上升-缓慢上升-高位波动”3 个阶段.2000~2008 年间,碳排放总量呈现急速上升的趋势,总量翻倍增长至 2008 年的 68.30×10^8 t;之后 4 年间上升较为缓慢,平稳增长至 2012 年的 91.90×10^8 t 左右;随后我国碳排放总量围绕着 90×10^8 t 上下波动,并未出现明显的下降拐点.

结合图 1 可以看出,作为我国“老工业基地”的东北地区县域早期碳排放规模是较大的,但后续碳排放增速小于其余地区.上述现象的出现并非得益于县域产业成功转型升级等,而是受当地经济发展缓慢、人口外流和经济社会活力差等因素制约.经济较为发达的华东、华北和中南地区县域碳排放增长趋势和占比一直表现在较高水平,上述地区对整体碳排放的贡献最大.其中华东地区增速最高、占比最大,这与我国经济发达地区的空间分布态势是相吻合的.总的来说,各区域碳排放占比结构在研究时段内保证了一定的稳定性,但在演进趋势上略有差异.东北、中南和西南地区的占比均呈现下降趋势,但幅度不大.华东和西北地区则呈现缓慢但稳定上升的态势.华北地区则出现了先上升后下降的态势.综上所述,碳排放在我国区域尺度上表现为显著的异质性^[37].

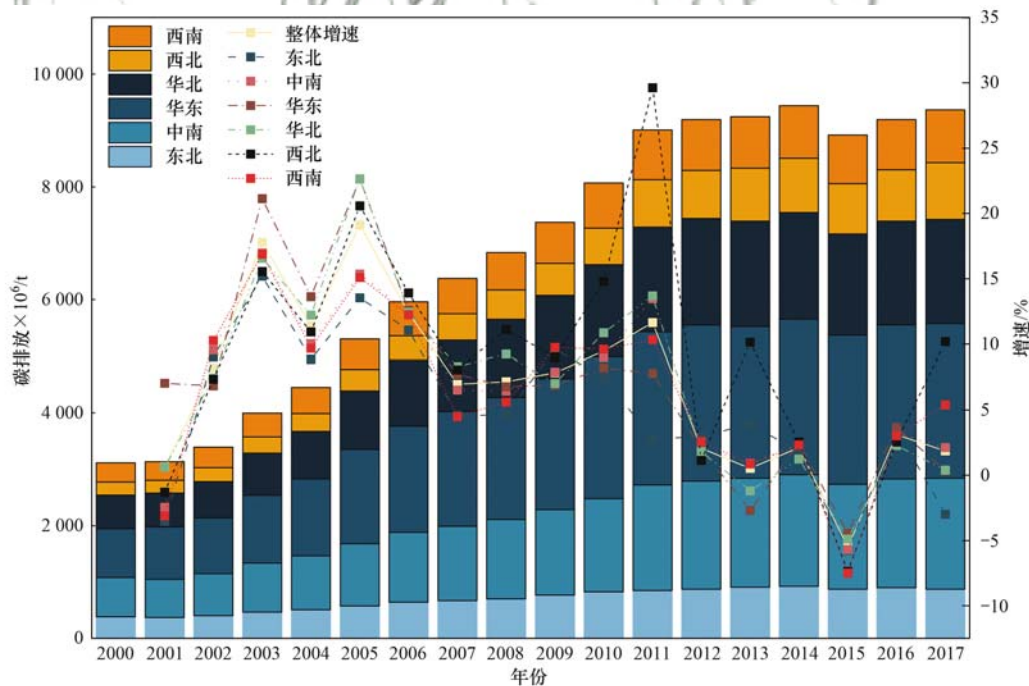


图 1 2000~2017 年中国六大区域县域碳排放占比和演变趋势

Fig. 1 Carbon emission proportions and evolution trend at county-level administrative units in China from 2000 to 2017

2.2 碳排放空间演变分析

由图 2 可得,历年全局空间自相关指标 Moran's I 指数均分布在(0.4,0.5)之间,表明中国县域碳排放存在显著的正向空间聚集特征^[38].总的来说全局

的空间自相关特性并未发生太大的变化,县域尺度上碳排放的空间依赖较为稳定.

局部空间自相关结果如图 3 所示.2000~2005 年间,北京、长三角、珠三角和辽东半岛等经济社

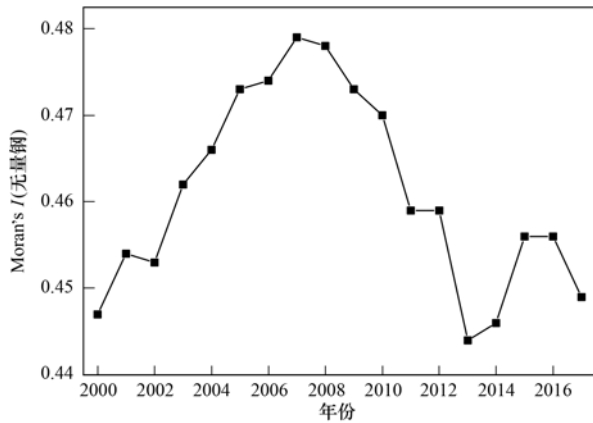


图2 中国县域 Moran's I 指数描述统计

Fig. 2 Moran's I index description statistics at county-level in China

会快速发展县域多表现为高高聚集;但也有以资源开发利用为主导的汾西县和抚顺县等县域同样表现为高高聚集.这分别说明产业集聚和经济快速发展易造成较高水平的碳排放;同时在资源开采和加工过程中,不可避免地产生碳排放加剧等问题.2005~2017年间,内蒙古、陕西和宁夏交界处的鄂尔多斯市、榆林市和呼伦贝尔市等成长型资源城市相继突变为高高聚集区域,主要是上述城市处于自然资源开发的初级阶段,煤炭和有色金属等能源在开采、销售和粗加工过程中极易产生高额的碳排放.同时北京和周边等产业转型县域逐步退出高高聚类行列,转向高效、绿色和低碳的发展模式.但上海内环和天津市六区等工业重地仍保留于高高聚类内.由此可以看出城市的发展阶段、主导产业和结构对于碳排放的影响较大.

3 中国县域碳排放影响因素分析

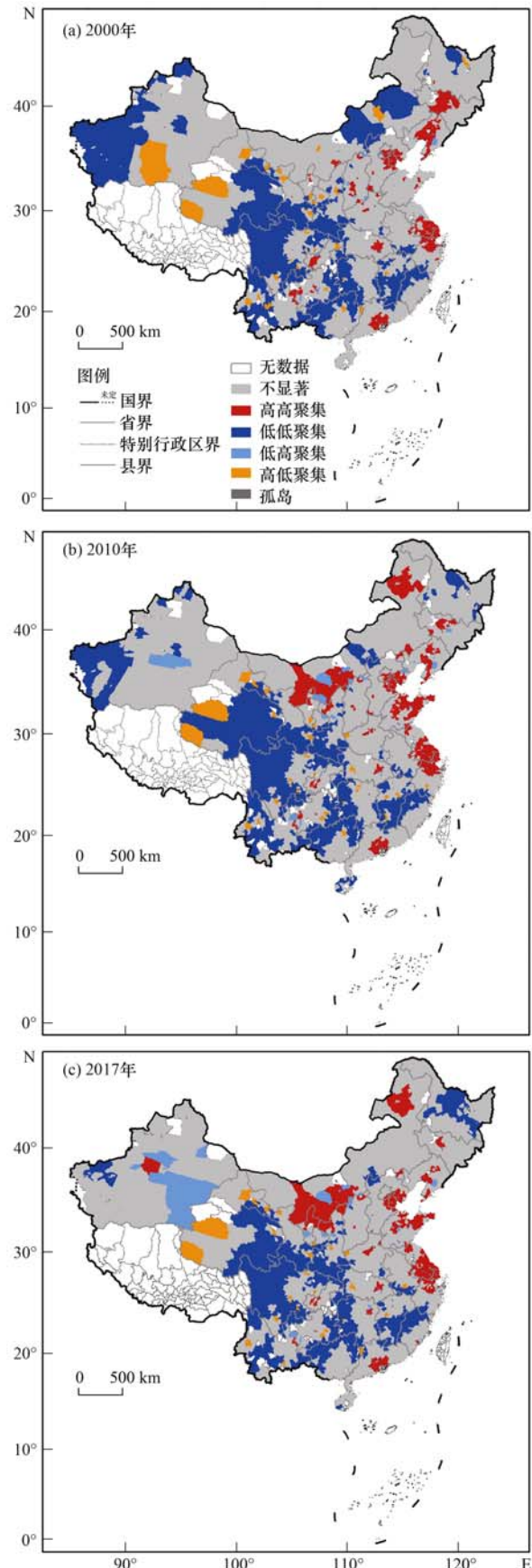
3.1 基于面板模型的要素综合分析

使用普通面板模型对全局进行分析.

所使用数据均通过相关性和共线性检验,所得模型估计结果如表1所示.

从表1可以看出,随机模型拟合优度为0.65,加入个体固定效应后,个体固定效应模型的拟合优度稍有上升至0.66,而同时加入个体和时间固定效应后,双向固定效应模型的拟合优度进一步增大为0.67.这表明,双向固定效应模型的解释能力最强.

双向固定效应模型显示,所选取的影响因素中, X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_6 和 X_7 呈现与碳排放的显著关系.结合作用强度方向和大小可以看出, X_1 、 X_2 和 X_3 等规模指标的促进作用最为强烈,说明我国广大县域仍处于经济快速发展阶段,碳排放呈现与经济社会发展与日俱增的态势; X_7 表现为对碳排放的抑制



基于自然资源部标准地图服务网站 GS(2019)

1822 号标准地图制作,底图边界无修改

图3 历年碳排放 LISA 分布

Fig. 3 LISA distribution of carbon emissions over the years

表 1 普通面板数据模型的估计和检验结果¹⁾
Table 1 Estimation and test results of ordinary panel data model

变量	随机模型	个体固定效应	双向固定效应模型
X_1	0.55 *** (9.49)	0.47 *** (28.17)	0.49 *** (29.59)
X_2	0.12 *** (5.41)	0.37 *** (14.00)	0.32 *** (12.14)
X_3	0.32 *** (4.04)	0.27 *** (15.56)	0.26 *** (15.10)
X_4	0.021 *** (3.54)	0.01 (1.18)	-0.01 (-1.32)
X_5	0.03 (0.54)	0.06 * (2.11)	-0.011 (-0.39)
X_6	0.30 *** (4.53)	0.34 *** (16.71)	0.22 *** (10.15)
X_7	0.07 ** (3.01)	0.06 *** (5.82)	-0.02 ** (-2.08)
X_8	-0.15 (-1.08)	-0.20 *** (-7.54)	-0.01 (-0.32)
常数项	-0.01 *** (-2.71)	-0.04 *** (-8.48)	-3.34 *** (-14.42)
R^2	0.65	0.66	0.67

1) 括号中数据为 z 或 t 检验值, *、** 和 *** 分别表示在 10%、5% 和 1% 的显著性水平

作用,过高的存款意味着消费的萎靡,从而无法从需求端对碳排放产生刺激。

然而业界公认的碳排放促进“大户”——第二产业占比的不显著一定程度上说明了我国县域社会经济发展的复杂性、多样性和差异性,表明普通的面板回归模型并不适用于全国范围的分析。

3.2 基于时空地理加权回归模型的异质性分析

3.2.1 模型构建与拟合结果

考虑到前文 Moran’s I 指数分析结果表明碳排放具有较强的空间效应的分析结果. 基于 ArcGIS 软件中的 GTWR 插件进行 GTWR 模型分析。

所得模型 R^2 为 0.78,描述统计结果如表 2 所示. 对比表 1 可以看出,GTWR 的拟合优度明显优于双向固定效应模型;且各变量的作用强度在时空上均存在非平稳性,进一步证实了 GTWR 模型的适用性。

从各自变量作用强度的中位数和均值可以看出,除 X_8 外,其余均表现为促进碳排放的作用;其中 X_1 、 X_3 和 X_5 的促进作用最为明显. 说明在我国广大县域中,经济发展和城市建设仍是促进碳排放的最主要因素^[39]. X_7 、 X_6 、 X_2 和 X_4 对于碳排放的促进作用相对较低. X_8 则主要表现为抑制碳排放。

表 2 GTWR 模型变量作用强度描述统计分析
Table 2 Estimation and test results of GTWR model

变量	最小值	下分位数	中位数	均值	上分位数	最大值	正值比/%	负值比/%
X_1	-0.13	0.81	1.41	1.53	2.09	5.01	99.95	0.05
X_2	-0.29	-0.01	0.04	0.06	0.15	0.55	66.09	33.91
X_3	-0.12	0.13	0.24	0.31	0.44	1.40	93.64	6.36
X_4	-0.08	0.03	0.05	0.05	0.07	0.17	87.68	12.32
X_5	-2.69	-0.23	0.08	0.25	0.70	3.48	54.32	45.68
X_6	-0.97	-0.17	0.13	0.12	0.36	1.12	62.39	37.61
X_7	-0.45	0.02	0.12	0.15	0.27	0.93	79.31	20.69
X_8	-11.68	-1.64	-0.44	-0.99	0.11	9.80	30.35	69.65

从各自变量表现为促进作用的样本数量占总体比例的正值比和表现为抑制作用的样本数量占总体比例的负值比可以看出, X_1 、 X_3 、 X_4 和 X_7 对近 80% 县域的时空碳排放均表现为促进作用, X_1 、 X_3 和 X_4 的促进作用最强。

3.2.2 拟合结果时间演变趋势分析

因 GTWR 模型回归结果信息众多,为避免分析遗漏或错乱,首先分析作用强度的时间演变趋势。

(1) 规模指标 从图 4 可以看出, X_1 对作用强度的区间逐渐收缩,但仍在全局上表现为促进作用. 我国县域经济发展以追求总量增长为导向,粗放的生产方式、高投入和高能耗的投入产

出过程形成了一定的碳排放^[40]. 但也可以看到其作用强度逐年下降,说明我国县域逐渐践行低碳经济的发展理念,实现经济增长与环境改善同步发展^[41]。

X_2 从早期的全局促进到现在的促进与抑制并重. 说明县域人口数量持续增加的过程中,虽然带来了一定的碳排放,但随着人口结构的变化、人口素质提升和居民生活习惯的改变,人口规模不再仅仅表现为简单的促进作用。

X_3 对碳排放的促进作用经历了从低到高再略有降低的发展路径. 值得注意的是,2005 ~ 2010 年间, X_3 的作用强度有了较大的提升. 主要原因在于

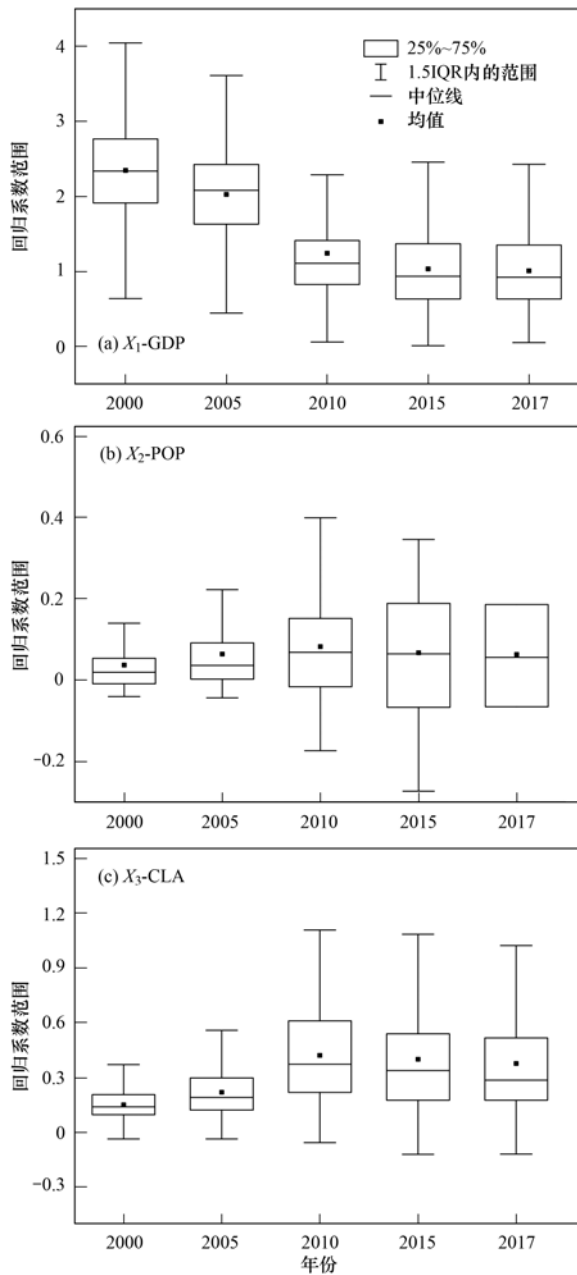


图4 规模指标作用强度变动趋势

Fig. 4 Regression coefficient variation of scale indices

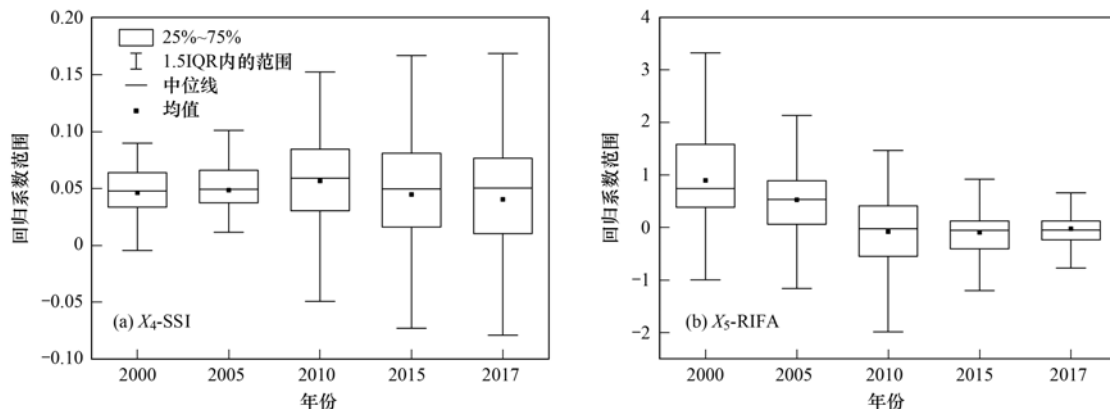


图5 结构指标作用强度变动趋势

Fig. 5 Regression coefficient variation of structural indices

以“四万亿”投资为核心的一揽子经济刺激方案,加快了重点基础设施项目的建设并推动城市快速扩张,在此过程中受城镇化规模扩张而产生的碳排放规模和强度显著增大。

(2)结构指标 结合图5可以看出, X_4 对于碳排放长期表现为促进,但作用强度在减弱。已在部分县域中由促进转向抑制,说明上述县域采取关闭或整改碳排放较为严重的重工业企业、大力发展清洁能源和第二产业结构升级等手段,实现了第二产业低碳和绿色发展的目标^[42]。

X_5 的促进作用逐渐减弱,且作用强度区间逐渐聚拢在0值附近。21世纪早期的“招商引资”促进了经济的发展和技术的提升,但也造成了环境污染密集型等产业国际转移等现象,对当地生态环境造成破坏。但随着我国经济社会水平的提高,固定资产投资带来的再生产效果逐渐低碳,且更多的是关注技术的升级,实现了碳排放效率的提升,一定程度上抑制了碳排放。

(3)效率指标 从图6可以看出, X_6 对于碳排放主要起到的是抑制作用,但有转向促进作用的趋势。本文认为该结果并没有观察到EKC曲线的存在,但 X_8 作用强度又与EKC曲线结论相一致。出现差异的原因可能在于指标选取相对单一或二氧化碳总量排放难以代表环境质量的本质等^[43]。但此结果与部分学者的研究相符^[44]。

至于 X_7 ,则具有先促进后趋向抑制的倾向。人均存款水平的提高不仅仅意味着居民收入的提升,也意味着消费结构的优化,一定程度上会加大家庭碳排放的产生^[45]。但过量的储蓄会导致消费的减少,应该引导居民积极消费,提倡低碳和适度消费。

3.2.3 作用强度空间分布态势分析

基于影响因素作用强度在空间上的均值进行图示,分析其空间分布态势。

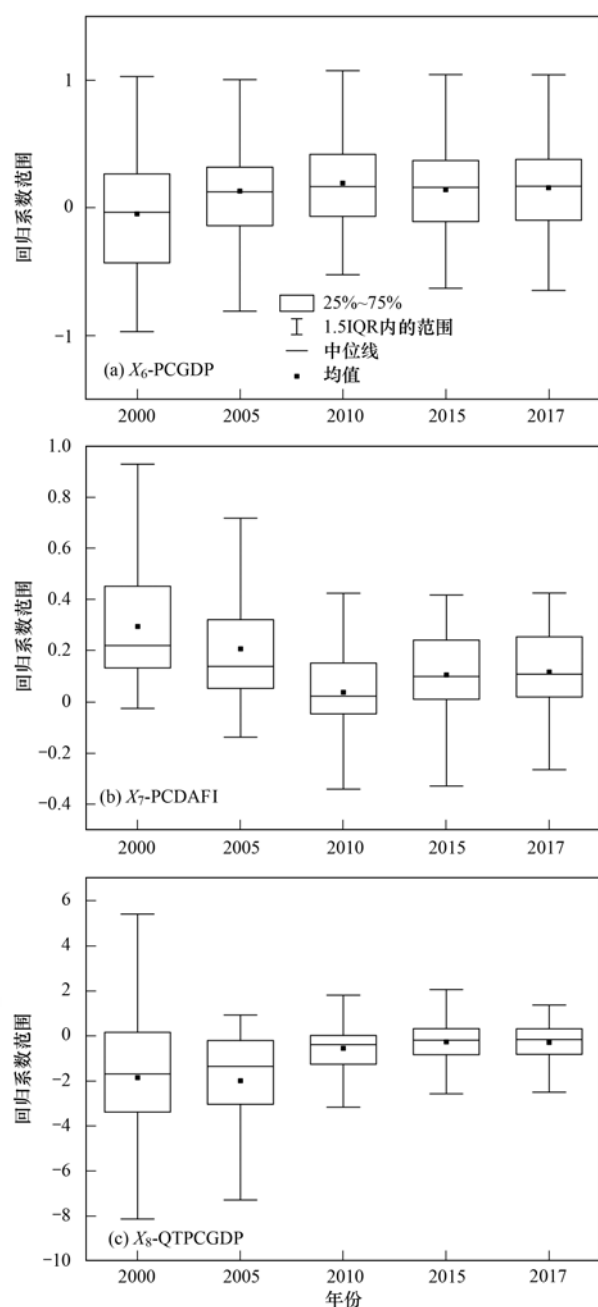


图6 效率指标作用强度变动趋势

Fig. 6 Regression coefficient variation of efficiency indices

(1) 规模指标 结合图7可以看出, X_1 作用强度在空间上呈现“中西强、东弱”的态势。这说明我国东部沿海县域经济发展起步早,已进入低碳发展阶段,总量稳定增长、结构绿色低碳, X_1 对于碳排放的促进作用也在逐渐下降。内陆县域受中部崛起和西部大开发等国家战略的引导,加之西气东输、青藏铁路和西电东送等诸多区域性重大基础设施的带动,推动了县域间人才和资源的快速流动,促使沿海县域原有的劳动力密集型和资源密集型产业向内陆人力资本较低的县域转移,带动县域经济发展的同时也造成了一定的碳排放^[46]。

X_2 则主要对东北、东部沿海和西北县域表现为促进作用。东北地区人口外流和城市萎缩现象在县域表现尤为明显:不断萎缩的人口规模反而导致了东北地区县域能耗的增加,基础公共服务设施运营和维护的分摊成本提高、对私家车的依赖程度升高,相应的增加了碳排放。而东部沿海县域对外来人口吸引大,规模不断扩大,促使了要素的聚集,提升了消费和生产端的碳排放水平。西南大部分县域处于工业化发展的早期阶段,人口规模的提升促进了要素升级和设施共享,集聚和规模效应提升了社会效率,反而降低了人口规模增加对碳排放的负面影响^[44]。至于西北部生态脆弱县域生态本底稳定性差,在资本和人口集聚的冲击下,形成了大量的碳排放。

X_3 的作用强度呈现出以胡焕庸线附近县域为低值、向东西两侧分异的趋势,对中部和东南沿海地区的促进作用尤甚。胡焕庸线作为我国重要的综合生态环境分界线,其东西两侧的建设情况具有一定差异。形如此空间分布态势的主要原因在于:胡焕庸线以东的县域建设起步早,用地规模总量较高,新增用地面积较小,且绿色建筑、绿色出行等方式普及程度高,即建设用地建设过程中所拉动和产生的

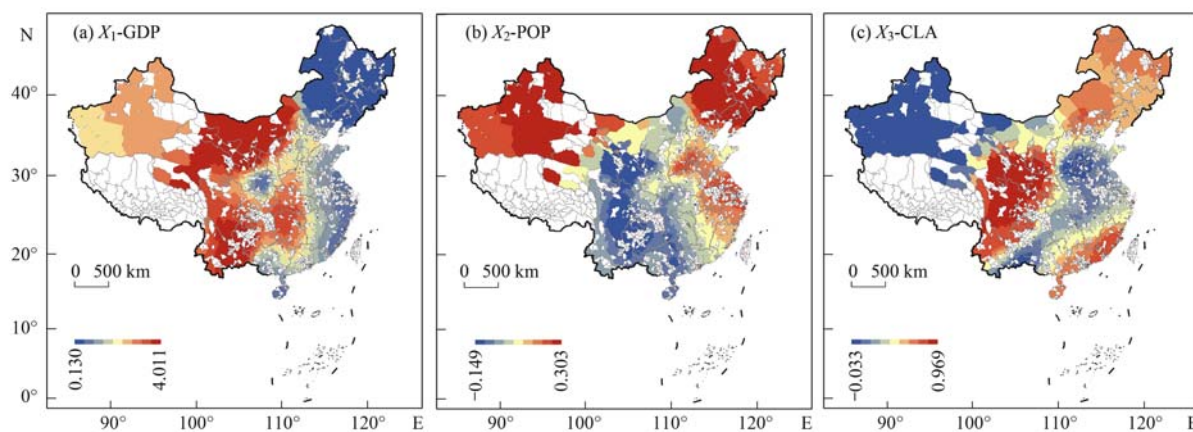


图7 规模指标作用强度均值空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of the mean of the regression coefficients of scale indices

碳排放逐年减少,但受其巨大经济体量的带动,建设用地所承载的碳排放则显著增多;胡焕庸线以西的县域建设用地总量少、相对增幅快,在建设用地扩张过程中所产生的碳排放较多.因此产生了建设用地作用强度呈现围绕胡焕庸线阶梯式变动的特征.

(2) 结构指标 从图 8 可以看出, X_4 的主要促进作用区域在空间上主要呈现东西向带状分布的态势,并对东三省和珠江三角洲县域的促进作用较为明显,其余地区主要表现为抑制.产业结构对于河南、山西、陕西、辽宁、吉林、江苏和广东等地县域的碳排放作用最为显著.山西、陕西和内蒙古等地

县域以煤炭和有色金属等能源开采为主,受 X_4 促进作用较为明显.东北地区长期以来以重工业为主,虽在东北振兴战略引导下和绿色低碳目标约束下,该地区产业结构合理化水平和资源配置效率有所提升,但受历史积重影响,短期内难以显著降低碳排放.江苏本身重工业比例也较高,且其“村村点火、户户冒烟”的乡镇企业发展模式往往伴随着粗放的能源消费.至于珠三角地区作为外向型经济发展基地、我国重要的制造业中心,虽已进入后工业化的成熟阶段,但产业结构现状仍会作用于能源消耗上,加剧碳排放^[47].

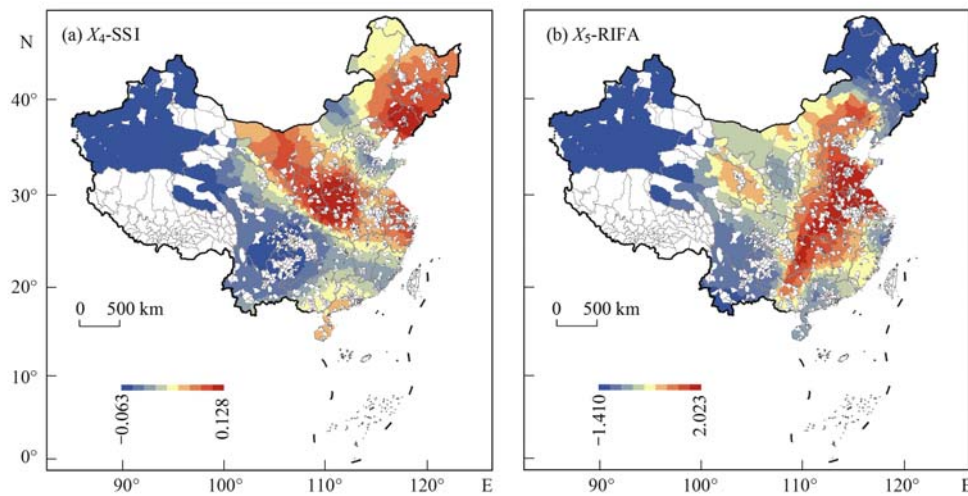


图 8 结构指标作用强度均值空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of the mean of the regression coefficients of structural indices

X_5 作用强度显现为以胡焕庸线为界、东高西低的态势.胡焕庸线以东和河西走廊地区固定资产投资对于碳排放的促进作用尤为明显.胡焕庸线以东地区、尤其是江苏和山东境内的县域是固定资产投资的稳定热点地区.根据投资乘数理论可知,固定资产的投入将会导致地区经济的成倍增加,因此带动碳排放.河西走廊地区则是受国家级顶级合作倡议“一带一路”的影响,吸引了大量的资金和资源的

涌入,带动当地经济社会发展的同时,刺激了碳排放.

(3) 效率指标 如图 9 所示, X_6 的抑制作用表现为从珠江三角洲向兰州和包头蔓延的“Y”字形分布,其余区域主要表现为促进作用,新疆尤甚. X_8 作用强度的分布特征则与 X_6 恰好相反.以和田县为代表的西北和西南县域则尚处于经济快速发展阶段,受当地县域经济发展和城市建设的带动,并刺激

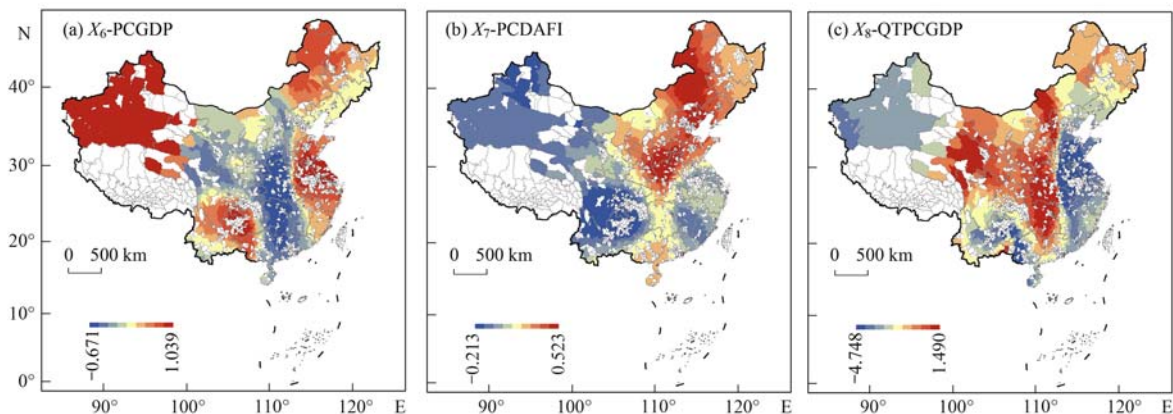


图 9 效率指标作用强度均值空间分布

Fig. 9 Spatial distribution of the mean of the regression coefficients of efficiency indices

了居民的消费欲望,产生了更高的碳排放水平。

X_7 作用强度表现为从东北向西南逐步降低的态势,最终在西南、东南和西北地区表现为抑制作用。通常来讲,储蓄水平和消费水平是相异的,较高的储蓄往往导致消费的减少,从而在大部分县域内表现为抑制作用。但根据相关学者的研究^[45]进行分析,近年东北人口外流县域储蓄水平受人口结构的调整得以提升,出现了第二次人口红利,促进资本积累的优势,实现了经济的进一步发展,进而带动了碳排放。

4 结论

(1)2000~2017 年我国碳排放呈现出“大幅上升-缓慢上升-高位波动”的发展历程;2012 年总量达到 91.9×10^8 t 左右后一直维持在高位波动且暂未出现下降拐点。我国县域碳排放呈现稳定且显著的空间依赖;基于局部空间自相关分析可以发现,经济发展水平较高的地区逐渐退出高高聚集的行列,而成长型资源城市逐步涌入高高聚集之中。

(2)时空地理加权回归模型的拟合优度优于普通面板回归模型。从作用强度来看,GDP、建设用地规模和固定资产投资占 GDP 的比例的促进作用最为显著;从作用方向来看国民生产总值、建设用地规模、第二产业产值占比和人均金融机构存款金额对近 80% 县域的时空碳排放均表现为促进作用。所选取影响因素的作用方向和强度在时空上均发生了较大改变,表明我国县域碳排放时空异质性明显,不同县域间主要影响因素各异。

(3)中国县域碳排放主导影响因素具有明显的时空分异,现阶段起到促进作用的因素主要有产业结构、GDP、固定资产投资和人口规模等,并在不同区域表现为不同的强度特征。第二产业促进作用最强的当属分布在湖南、湖北等内陆省份的制造业主导县域,上述县域具有本地消费产业转出、沿海出口产业转入的时空特征,应注意合理承接沿海省份转移产业、倒逼当地结构优化,并建立重点行业的减排监管和研发机制,实现区域协同和行业减排的目标。GDP 对于中西部城镇化快速发展且生态脆弱县域的促进作用最为突出,上述县域尚处在经济规模快速膨胀期,需考虑到脆弱的生态本底,避免走“先发展后治理”的老路,合理利用当地清洁能源,加强保护和发展的协调。沿海地区人口密集和后工业化时期县域碳排放受固定资产投资的促进作用较为显著。在后续发展过程中,应避免盲目“招商引资”,在压实发展任务的同时也要落实对环境的保护;同时做好环评工作,倒逼企业提升碳排放效率。

人口规模对吉林等地的人口外流县域和新疆等地的人口集聚县域的促进作用同样显著。前者应重点考虑如何吸引人口回流,或在人口萎缩的现状下,如何提升碳排放效率并保证经济发展;后者则需要保持经济发展、人口聚集和生态环境,避免“牺牲环境换发展”的现象出现。

(4)总体上,碳排放是一个复杂的系统问题,中国经济社会发展的特殊性又进一步提升了该问题的维度、增加了其认识难度。本文尝试从县域尺度分析多年中国碳排放的时空演变格局和异质性,有助于“双碳”目标的实现和差异化控碳路径的实现,在后续工作中将进一步深化不同类型县域的碳排放识别和解构,据此探索我国碳排放的问题区域和区域问题,从而实现“全国统筹一盘棋”的目标。

参考文献:

- [1] Rahman M. M., Kashem M. A. Carbon emissions, energy consumption and industrial growth in Bangladesh: empirical evidence from ARDL cointegration and Granger causality analysis [J]. *Energy Policy*, 2017, **110**: 600-608.
- [2] Ogundari K., Ademuwagun A. A., Ajao O. A. Revisiting environmental Kuznets curve in sub-Sahara Africa: evidence from deforestation and all GHG emissions from agriculture [J]. *International Journal of Social Economics*, 2017, **44**(2): 222-231.
- [3] Zhang J. K., Zhang Y. Carbon tax, tourism CO₂ emissions and economic welfare [J]. *Annals of Tourism Research*, 2018, **69**: 18-30.
- [4] Chen X., Shuai C. Y., Wu Y., et al. Analysis on the carbon emission peaks of China's industrial, building, transport, and agricultural sectors [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **709**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135768.
- [5] 蒋自然,金环环,王成金,等.长江经济带交通碳排放测度及其效率格局(1985~2016年)[J]. *环境科学*, 2020, **41**(6): 2972-2980.
- [6] Jiang Z. R., Jin H. H., Wang C. J., et al. Measurement of traffic carbon emissions and pattern of efficiency in the Yangtze River Economic Belt (1985-2016) [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(6): 2972-2980.
- [7] Ehrlich P. R., Ehrlich A. H., Hurlbut F. C. Population/resources/environment: issues in human ecology [J]. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 1973, **95**(1): 102-103.
- [8] York R., Rosa E. A., Dietz T. STIRPAT, IPAT and ImPACT: analytic tools for unpacking the driving forces of environmental impacts [J]. *Ecological Economics*, 2003, **46**(3): 351-365.
- [9] Dong F., Long R. Y., Chen H., et al. Factors affecting regional per-capita carbon emissions in China based on an LMDI factor decomposition model [J]. *PLoS One*, 2013, **8**(12), doi: 10.1371/journal.pone.0080888.
- [10] Xia Y., Wang H. J., Liu W. D. The indirect carbon emission from household consumption in China between 1995-2009 and 2010-2030: a decomposition and prediction analysis [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2019, **128**: 264-276.
- [11] Heydari A., Garcia D. A., Keynia F., et al. Renewable energies generation and carbon dioxide emission forecasting in microgrids and national grids using GRNN-GWO methodology [J]. *Energy Procedia*, 2019, **159**: 154-159.

- [11] Pao H T, Tsai C M. Modeling and forecasting the CO₂ emissions, energy consumption, and economic growth in Brazil [J]. *Energy*, 2011, **36**(5): 2450-2458.
- [12] Kais S, Sami H. An econometric study of the impact of economic growth and energy use on carbon emissions: panel data evidence from fifty eight countries[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, **59**: 1101-1110.
- [13] Chen P Y, Chen S T, Hsu C S, *et al.* Modeling the global relationships among economic growth, energy consumption and CO₂ emissions[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, **65**: 420-431.
- [14] 韩梦瑶, 刘卫东, 唐志鹏, 等. 世界主要国家碳排放影响因素分析——基于变系数面板模型[J]. *资源科学*, 2017, **39**(12): 2420-2429.
- Han M Y, Liu W D, Tang Z P, *et al.* Carbon emission impact factor analysis of major countries based on varying coefficient panel modeling[J]. *Resources Science*, 2017, **39**(12): 2420-2429.
- [15] Wang Q, Zhang F Y. The effects of trade openness on decoupling carbon emissions from economic growth -evidence from 182 countries[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, **279**, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123838.
- [16] Shuai C Y, Shen L Y, Jiao L D, *et al.* Identifying key impact factors on carbon emission: Evidences from panel and time-series data of 125 countries from 1990 to 2011[J]. *Applied Energy*, 2017, **187**: 310-325.
- [17] 岳超, 胡雪洋, 贺灿飞, 等. 1995—2007 年我国省区碳排放及碳强度的分析——碳排放与社会发展Ⅲ[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2010, **46**(4): 510-516.
- Yue C, Hu X Y, He C F, *et al.* Provincial carbon emissions and carbon intensity in China from 1995 to 2007 (carbon emissions and social development, Ⅲ) [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2010, **46**(4): 510-516.
- [18] 谭丹, 黄贤金. 我国东、中、西部地区经济发展与碳排放的关联分析及比较[J]. *中国人口·资源与环境*, 2008, **18**(3): 54-57.
- Tan D, Huang X J. Correlation analysis and comparison of the economic development and carbon emissions in the eastern, central and western part of China [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2008, **18**(3): 54-57.
- [19] 李建豹, 黄贤金, 吴常艳, 等. 中国省域碳排放影响因素的空间异质性分析[J]. *经济地理*, 2015, **35**(11): 21-28.
- Li J B, Huang X J, Wu C Y. Analysis of spatial heterogeneity impact factors on carbon emissions in China [J]. *Economic Geography*, 2015, **35**(11): 21-28.
- [20] 王雅楠, 赵涛. 基于 GWR 模型中国碳排放空间差异研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2016, **26**(2): 27-34.
- Wang Y N, Zhao T. Study on spatial difference of carbon emissions in China based on GWR model[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2016, **26**(2): 27-34.
- [21] 郑长德, 刘帅. 基于空间计量经济学的碳排放与经济增长分析[J]. *中国人口·资源与环境*, 2011, **21**(5): 80-86.
- Zheng C D, Liu S. Empirical research of carbon emission and economic growth in China based on the spatial econometric analysis[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2011, **21**(5): 80-86.
- [22] 王兆峰, 李竹, 吴卫. 长江经济带不同等级城市碳排放的时空演变及其影响因素[J]. *环境科学研究*, 2022, doi: 10.13198/j.issn.1001-6929.2022.02.29.
- Wang Z F, Li Z, Wu W. Spatio-temporal evolution and influencing factors of carbon emissions in different grade cities in the Yangtze River economic belt[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2022, doi: 10.13198/j.issn.1001-6929.2022.02.29.
- [23] 候勃, 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.
- [24] 汪浩, 陈操操, 潘涛, 等. 县域尺度的京津冀都市圈 CO₂ 排放时空演变特征[J]. *环境科学*, 2014, **35**(1): 385-393.
- Wang H, Chen C C, Pan T, *et al.* County scale characteristics of CO₂ emission's spatial-temporal evolution in the Beijing-Tianjin-Hebei metropolitan region[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(1): 385-393.
- [25] 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 CO₂ emissions at the county level of China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, **76**(12): 3103-3118.
- [26] 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.
- [27] Chen J D, Gao M, Cheng S L, *et al.* County-level CO₂ emissions and sequestration in China during 1997- 2017 [J]. *Scientific Data*, 2020, **7**, doi: 10.6084/m9.figshare.13090370.
- [28] Tobler W R. A computer movie simulating urban growth in the Detroit region[J]. *Economic Geography*, 1970, **46**(S1): 234-240.
- [29] Huang B, Wu B, Barry M. Geographically and temporally weighted regression for modeling spatio-temporal variation in house prices [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2010, **24**(3): 383-401.
- [30] 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.
- [31] Keene A, Deller S C. Evidence of the environmental Kuznets' curve among US counties and the impact of social capital[J]. *International Regional Science Review*, 2013, **38**(4): 358-387.
- [32] Zheng X Q, Lu Y L, Yuan J J, *et al.* Drivers of change in China's energy-related CO₂ emissions [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, **117**(1): 29-36.
- [33] Ribeiro H V, Rybski D, Kropp J P. Effects of changing population or density on urban carbon dioxide emissions[J]. *Nature Communications*, 2019, **10**(1), doi: 10.1038/s41467-019-11184-y.
- [34] Zhang C G, Lin Y. Panel estimation for urbanization, energy consumption and CO₂ emissions: a regional analysis in China [J]. *Energy Policy*, 2012, **49**: 488-498.
- [35] Liu L C, Fan Y, Wu G, *et al.* Using LMDI method to analyze

- the change of China's industrial CO₂ emissions from final fuel use: an empirical analysis[J]. *Energy Policy*, 2007, **35**(11): 5892-5900.
- [36] 田野,刘青青,孙建伟,等.长江沿岸主导产业的类型转换与格局演化——基于省级以上开发区的考察[J]. *长江流域资源与环境*, 2021, **30**(8): 1809-1818.
- Tian Y, Liu Q Q, Sun J W, *et al.* Type conversion and pattern evolution of leading industries along the Changjiang River Bank: a survey based on the national and provincial development zones [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2021, **30**(8): 1809-1818.
- [37] 王东,李金叶.中国碳排放强度区域差异与空间收敛特征[J]. *统计与决策*, 2022, **38**(1): 77-80.
- [38] 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.
- [39] 孙秀峰,施开放,吴健平.县级尺度的重庆市碳排放时空格局动态[J]. *环境科学*, 2018, **39**(6): 2971-2981.
- Sun X F, Shi K F, Wu J P. Spatiotemporal dynamics of CO₂ emissions in Chongqing: an empirical analysis at the county level [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(6): 2971-2981.
- [40] 王锋,吴丽华,杨超.中国经济发展中碳排放增长的驱动因素研究[J]. *经济研究*, 2010, **45**(2): 123-136.
- Wang F, Wu L H, Yang C. Driving factors for growth of carbon dioxide emissions during economic development in China [J]. *Economic Research Journal*, 2010, **45**(2): 123-136.
- [41] 石建屏,李新,罗珊,等.中国低碳经济发展的时空特征及驱动因子研究[J]. *环境科学与技术*, 2021, **44**(1): 228-236.
- Shi J P, Li X, Luo S, *et al.* Research on the spatiotemporal characteristics and driving factors of China's low carbon economic development[J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, **44**(1): 228-236.
- [42] 赵丽萍,李媛.产业结构对碳排放强度的影响[J]. *城市问题*, 2018, (6): 61-66.
- [43] 周正柱,王俊龙.环境库兹涅茨曲线假说检验研究进展与展望[J]. *中国农业资源与区划*, 2020, **41**(1): 185-193.
- Zhou Z Z, Wang J L. Research progress and implication about hypothesis test of environmental Kuznets curve [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2020, **41**(1): 185-193.
- [44] Alam M, Murad W, Noman A H M, *et al.* Relationships among carbon emissions, economic growth, energy consumption and population growth: testing environmental Kuznets curve hypothesis for Brazil, China, India and Indonesia[J]. *Ecological Indicators*, 2016, **70**: 466-479.
- [45] 李娜娜,赵月,王军锋.中国城市居民收入和储蓄增长对家庭能耗碳排放的区域异质性及政策应对[J]. *生态经济*, 2022, **38**(1): 30-35.
- Li N N, Zhao Y, Wang J F. Regional heterogeneity and policy responses of the rising residential income and savings on China's urban household energy-related CO₂ [J]. *Ecological Economy*, 2022, **38**(1): 30-35.
- [46] 郑佳佳.西部大开发提高了西部地区的碳排放绿色贡献度吗?——基于双倍差分法的经验分析[J]. *经济经纬*, 2016, **33**(4): 26-31.
- Zheng J J. Did western development program improve carbon green contribution coefficient in China's western region? ——an empirical analysis on difference-in-difference method [J]. *Economic Survey*, 2016, **33**(4): 26-31.
- [47] 段林丰,卢培利,蒲寅羽,等.典型城市群碳排放的脱钩效应及驱动机制研究[J]. *环境科学与技术*, 2021, **44**(11): 55-62.
- Duan L F, Lu P L, Pu Y Y, *et al.* The decoupling effect and driving mechanism of carbon emissions in typical city groups[J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, **44**(11): 55-62.

CONTENTS

Evolution of PM _{2.5} Chemical Composition and Sources in Nanjing During the Implementation of the APPCAP	CHEN Pei-lin, GUO Rong, WANG Qin-geng (1)
Differences in PM _{2.5} 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 _{2.5} 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 _{2.5} -O ₃ 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 _x -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-lan, QIN Cun-li, QIAN Yao, <i>et al.</i> (583)