

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

肆秩芳华担使命 踔厉扬帆向未来
——庆祝厦门大学环境学科创立40周年



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年11月

第43卷 第11期
Vol.43 No.11

目次

厦门大学环境学科创立 40 周年专栏

新污染物共排放对生态环境监测和管理的挑战	王佩, 黄欣怡, 曹致纬, 吴朝阳, 吕永龙 (4801)
河口-近海环境新污染物的环境过程、效应与风险	王新红, 于晓璇, 王思权, 殷笑晗, 钱韦旭, 林晓萍, 吴越, 刘畅 (4810)
海水痕量营养盐和金属的分子光谱分析方法研究进展	袁东星, 黄勇明, 王婷 (4822)
环境水体中硫化物的分析方法: 从实验室分析到原位监测	李鹏, 林坤德, 袁东星 (4835)
环境水体中无机砷现场分析方法研究进展	薄光永, 陈钊英, 弓振斌, 马剑 (4845)
海洋痕量元素采样技术和分析方法的发展及展望: 厦门大学痕量元素平台建设进展	黄勇明, 周宽波, 陈耀瑾, 张楠, 杨俊波, 戴民汉, 曹知勉, 蔡毅华 (4858)

聚乙烯微塑料的微生物降解研究进展	骆苑蓉, 钱义谦, 齐雅楠 (4869)
水稻土中氮素对微生物固氮的扰动及效应机制	王锋, 张静, 周少余, 王鸿辉, 李建, 赵聪媛, 黄鹏, 陈铮 (4876)
中国海洋生态毒理学研究中的毒性测试生物	史天一, 洪海征, 王明华, 谭巧国, 史大林 (4888)
中国油气系统甲烷逸散排放估算	陈春赐, 吕永龙, 贺桂珍 (4905)
2015 ~ 2020 年厦漳泉地区大气氨排放清单及分布特征	李香, 吴水平, 姜炳祺, 刘怡靖 (4914)
九龙江口微塑料与抗生素抗性基因污染分布特征	程宏, 陈荣 (4924)
厦门湾沙滩沉积物微塑料污染特征	姚蕊, 刘花台, 李永玉, 刘潇雅, 吴海波, 王新红 (4931)
九龙江口-厦门湾海域中溶解态痕量金属的时空分布特征与影响机制	戚柳倩, 岳新利, 钟灏文, 王棋, 王德利, 陈能汪 (4939)
福建省流域-近海溶解氧时空格局与低氧调控机制	杨艾琳, 杨芳, 李少斌, 余其彪, 陈能汪 (4950)
厦门西溪河口沉积物活性磷的分布特征及迁移转化机制	潘峰, 蔡宇, 郭占荣, 王新红 (4961)
改性生物炭固定床对模拟湖水体中 Mn^{2+} 的吸附	赵洁, 叶志隆, 王佳妮, 蔡冠竟 (4971)
基于表面增强拉曼光谱技术的饮用水中痕量恩诺沙星和环丙沙星快速检测	徐婧, 郑红, 卢江龙, 刘国坤 (4982)
紫外驱动高级氧化法降解水体中的磷酸三苯酯	徐子文, 印红玲, 熊远明, 宋娇娇, 譙杨 (4992)

研究报告

2019 年秋季海南省 4 次臭氧污染过程特征及潜在源区分析	符传博, 陈红, 丹利, 徐文帅 (5000)
伊犁河谷夏季 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中水溶性无机离子浓度特征和形成机制	陈巧, 谷超, 徐涛, 周春华, 张国涛, 赵雪艳, 吴丽萍, 李新琪, 杨文 (5009)
城区与郊区 $PM_{2.5}$ 污染及传输特征差异性	齐鹏, 周颖, 程水源, 白伟超 (5018)
南京北郊 BTEX 特征及健康风险评估	冯悦政, 安俊琳, 张玉欣, 王俊秀 (5030)
我国陆域水体系统表层水中微塑料生态风险评估	孙晓楠, 陈浩, 贾其隆, 朱奔, 马长文, 叶建峰 (5040)
东江流域不同空间尺度景观格局对水质影响分析	陈优良, 邹文敏, 刘星根, 曾金凤, 李丹, 郑汉奕 (5053)
长江与黄河源丰水期地表水中汞的分布特征、赋存形态及来源解析	刘楠涛, 吴飞, 袁巍, 王训, 王定勇 (5064)
青藏高原湖泊水环境特征及水质评价	刘智琦, 潘保柱, 韩谔, 李刚, 王韬轶 (5073)
基于水化学与硫同位素的卡林型金矿区岩溶水文地球化学特征及控制因素	查学芳, 吴攀, 李学先, 陈世万, 黄家琰, 李清光, 陈思睿 (5084)
丹江口水库真核浮游植物群落分布特征及其与环境因子的关系	贺玉晓, 买思婕, 任玉芬, 李卫国, 赵同谦, 马寅男 (5096)
铜沸石对磷和重金属的吸附与底泥钝化性能	王哲, 朱俊, 李雯, 闫德馨, 董雯, 刘玉玲, 李家科 (5106)
基于宏基因组与宏转录组分析石化废水生物处理系统脱氮功能菌群	章旭, 周佳佳, 周珉, 罗西子, 严新杰, 刘勇弟, 厉巍 (5115)
寒冷地区 IFAS + 磁混凝污水厂菌群结构和抗生素抗性基因分析	杜文琰, 姚俊芹, 马辉英, 胡渊鑫, 张春雷, 陈银广 (5123)
中国旱作农田一氧化氮排放及减排: Meta 分析	田政云, 吴雄伟, 吴媛媛, 魏佳楠, 白鹤, 顾立新 (5131)
硝化抑制剂对我国蔬菜生产产量、氮肥利用率和氧化亚氮减排效应的影响: Meta 分析	刘发波, 马笑, 张芬, 梁涛, 黎亮武, 王军杰, 陈新平, 王孝忠 (5140)
不同施肥措施对热带地区稻菜轮作体系土壤 CH_4 和 N_2O 排放的影响	邵晓辉, 汤水荣, 孟磊, 伍延正, 李金秋, 张广林 (5149)
不同水分条件下土地利用方式对我国热带地区土壤硝化过程及 NO 和 N_2O 排放的影响	唐瑞杰, 胡煜杰, 赵彩悦, 赵炎, 袁新生, 汤水荣, 伍延正, 孟磊 (5159)
基于文献计量分析的长江经济带农田土壤重金属污染特征	刘孝严, 樊亚男, 刘鹏, 吴秋梅, 胡文友, 田康, 黄标 (5169)
基于 EBK 插值预测和 GDM 模型的襄州区耕地土壤重金属时空分布及来源变化分析	高浩然, 周勇, 刘甲康, 程晓明, 郭嵩, 江衍, 谭恒鑫 (5180)
基于 GIS 对宁夏某铜银矿区周边土壤重金属来源解析	张扣扣, 贺婧, 钟艳霞, 魏琪琪, 陈锋 (5192)
老化作用对生物炭钝化白云鄂博矿区碱性土壤中 Cd^{2+} 的影响	王哲, 程俊丽, 卞园, 郑春丽, 王维大, 姜庆宏 (5205)
磁性氧化铁/桑树杆生物炭的制备及其对砷污染土壤溶解性有机碳和砷形态的影响	芦琳, 颜利玲, 梁美娜, 成官文, 朱宗强, 朱义年, 王敦球 (5214)
牡蛎壳粉和石灰改良酸性水稻土对磷有效性、形态和酶活性的影响	赵丽芳, 黄鹏武, 杨彩迪, 卢升高 (5224)
磷、锌和镉交互作用对小白菜生长和锌镉累积的影响	帅祖华, 刘汉燧, 崔浩, 魏世强 (5234)
重庆开州区农地土壤抗生素污染特征及潜在生态环境风险评估	方林发, 叶萃萃, 方标, 范晓霞, 高坤鹏, 李士洋, 陈新平, 肖然 (5244)
基于 InVEST 和 GeoSoS-FLUS 模型的黄河源区碳储量时空变化特征及其对未来不同情景模式的响应	侯建坤, 陈建军, 张凯琪, 周国清, 尤号田, 韩小文 (5253)
黄土丘陵区不同恢复植被类型的固碳特征	许小明, 张晓萍, 何亮, 郭晋伟, 薛帆, 邹亚东, 易海杰, 贺洁, 王浩嘉 (5263)
土壤多功能性对微生物多样性降低的响应	陈桂鲜, 吴传发, 葛体达, 陈剑平, 邓扬悟 (5274)
氮添加对不同坡度退化高寒草甸土壤真菌多样性的影响	苏晓雪, 李希来, 李成一, 孙华方 (5286)
碳减排背景下我国与世界主要能源消费国能源消费结构与模式对比	李辉, 庞博, 朱法华, 孙雪丽, 徐静馨, 王圣 (5294)
中国能源消费碳排放的空间化与时空动态	郝瑞军, 魏伟, 刘春芳, 颜斌斌, 杜海波 (5305)
京津冀及周边地区“2+26”城市结构性调整政策的 CO_2 协同减排效益评估	杨添祺, 王洪昌, 张辰, 朱金伟, 崔宇韬, 谭玉玲, 束轲 (5315)
我国塑料污染防治政策分析与建议	李欢, 朱龙, 沈茜, 贺亚楠, 邓义祥, 安立会 (5326)

中国能源消费碳排放的空间化与时空动态

郝瑞军¹, 魏伟^{1*}, 刘春芳², 颀斌斌³, 杜海波¹

(1. 西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070; 2. 西北师范大学社会发展与公共管理学院, 兰州 730070; 3. 兰州城市学院城市管理学院, 兰州 730070)

摘要: 近年来全球多地遭遇极端天气, 给人类社会的生产生活带来极大影响, 共同应对全球气候变化已成为国际共识, 在此背景下如何通过科学方法摸清二氧化碳排放情况成为响应国家“双碳”战略的重要工作。通过省级尺度的碳排放统计数据, 综合夜间灯光数据和人口数据, 将碳排放量分配到栅格尺度, 并对中国 2000、2005、2010、2015 和 2018 年碳排放的时空格局、演变特征及碳排放与经济增长的关联性进行综合分析。结果表明: ① 从 2000 ~ 2018 年, 中国的 CO₂ 排放总量持续增长, 但增长速率呈现放缓的趋势, 碳排放年均增长速率由 2000 ~ 2010 年的 9.9% 下降至 2010 ~ 2018 年的 7.4%。从空间分布来看, 无碳排放地区主要分布在西北无人区及东北的林区和山区, 低碳排放主要分布在广大的中小城镇地区, 高碳排放则集中分布于华北、华中、东部沿海以及西部的省会城市及城市群附近; ② 碳排放在地级市尺度上存在高值聚集或低值聚集现象, 且该聚集现象整体趋于稳定, 在 2005 年之后有所加强; 低低聚集区主要分布在西部的连片地区和海南岛, 且随着经济社会的发展, 低低聚集区开始破碎, 规模减小; 高高聚集区主要分布在京津冀城市群、太原城市群、长江三角洲城市群和珠江三角洲城市群地区且规模在逐步加强巩固; 高低、低高聚集区则主要出现在社会经济发展水平差异较大的邻近城市; ③ 中国大部分地区的碳排放量相对稳定, 碳排放发生较大变化的地区主要分布在省会城市和重点城市的外围地区, 即存在中心城区碳排放无变化, 外围区域碳排放变化的圈层结构; ④ 在 2000 ~ 2018 年中国城市发展进程中, 整体上遵循一个由“低排放-低收入”转向“高排放-低收入”再转向“高排放-高收入”最终转向“低排放-高收入”的发展规律。从整体来看, 中国碳排放的增速在放缓, 在实行“双碳”战略的大背景下, 各地区由于不同的社会经济发展情况和能源需求情况所面临的碳减排任务与压力也不尽相同, 因而应分地区和分行业实施差异化的碳减排政策。

关键词: 碳排放; 夜间灯光; 人口数据; 时空变化; 遥感数据

中图分类号: X24 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)11-5305-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202112066

Spatialization and Spatio-temporal Dynamics of Energy Consumption Carbon Emissions in China

HAO Rui-jun¹, WEI Wei^{1*}, LIU Chun-fang², XIE Bin-bin³, DU Hai-bo¹

(1. College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China; 2. School of Social Development and Public Administration, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China; 3. School of Urban Management, Lanzhou City University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: The adverse effects of global climate change on human production and life are becoming increasingly prominent. Responding to climate change has become a severe challenge faced by human society, and the reduction in greenhouse gas emissions has gradually become a common action by all countries. Therefore, analyzing carbon emissions through scientific methods has become an important foundation for responding to the national “dual carbon” strategy. This study used provincial-level carbon emission statistics, combined with nighttime light data and population data, and assigned carbon emissions to the grid scale. It also analyzed the temporal and spatial characteristics and evolution characteristics of carbon emissions in China in 2000, 2005, 2010, 2015, and 2018, as well as the correlation between carbon emissions and the economy. The results showed that: ① from 2000 to 2018, the total CO₂ emissions in China continued to grow, but the growth rate slowed over time. The average annual growth rate of carbon emissions dropped from 9.9% in 2000-2010 to 7.4% in 2010-2018. From the perspective of spatial distribution, carbon-free areas were mainly distributed in the northwest uninhabited area and northeast forest and mountainous areas, low-carbon emissions were mainly distributed in the vast small and medium-sized cities and towns, and high-carbon emissions were concentrated in northern, central, eastern coastal, and western provincial capitals and urban agglomerations. ② Carbon emissions had high-value or low-value agglomerations at prefecture-level cities; this agglomeration tended to stabilize as a whole and had strengthened after 2005. Low-low agglomeration areas were mainly distributed in the western contiguous areas and Hainan Island. With economic and social development, low-low agglomeration areas began to fragment and reduce in size; high-high agglomeration areas were mainly distributed in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration, Taiyuan urban agglomeration, Yangtze River Delta urban agglomerations, and Pearl River Delta urban agglomerations, and the scale was gradually strengthened and consolidated; high-low and low-high agglomeration areas mainly appeared in neighboring cities with large differences in economic development levels. ③ Carbon emissions in most parts of China were relatively stable. The areas where carbon emissions had changed were mainly distributed in the peripheral areas of provincial capitals and key cities, and there was a circle structure with no changes in the central urban area and changes in carbon emissions in the peripheral areas. ④ The overall process of urban development in China from 2000 to 2018 followed a shift from “low emission-low income” to “high emission-low income” to “high emission-high income” and finally to “low emission-high income.” The growth rate of carbon emissions in China is slowing down. Under the background of the “dual carbon” strategy, different regions face different carbon emission reduction tasks and pressures due to different carbon emission situations. Therefore, the differentiated carbon emissions policy should be implemented by regions and industries.

收稿日期: 2021-12-07; 修订日期: 2022-03-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(41861040)

作者简介: 郝瑞军(1997 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为资源环境遥感与可持续发展, E-mail: haorjgs@163.com

* 通信作者, E-mail: weiw@2006@126.com

Key words: CO₂ emissions; nighttime light data; population data; spatio-temporal variations; remote-sensing data

近年来全球多地遭遇罕见极端天气,给人们的生产生活造成了极大影响^[1,2]. 全球极端天气频发的主要原因之一是气候变化,自工业革命以来人类社会排放的大量温室气体正在重新塑造地球气候,过量的温室气体使得地球气候系统的“能量”过剩,而这些过剩“能量”最终以极端天气的形式进行释放^[3]. 中国是受全球气候变化影响最为显著的国家之一,干旱和洪涝等灾害频发,但同时中国也是世界上最大的能源消费国,二氧化碳排放总量居世界第一位,单位国内生产总值能耗为世界平均水平的 2 倍,人均碳排放量则超过世界平均水平的 40%^[4,5]. 面对巨大的气候环境压力和减排压力,近年来中国制定了一系列的降碳减排计划,习近平总书记也向世界做出了力争在 2030 年前碳排放达峰,2060 年前实现碳中和的“中国承诺”. 基于这一目标,如何科学准确地评估中国碳排放情况成为了实施“碳达峰”“碳中和”相关政策的前提和迫切需求.

近年来,学者们就中国的碳排放情况进行了大量科学研究. 主要有以能源消费统计数据为基础估算国家尺度的碳排放并计算碳排放强度^[6~9]和人均碳排放强度等^[10]; 基于社会经济数据、产业结构数据和能源统计数据等,研究影响中国能源碳排放的驱动因子^[11~15]; 此外,随着遥感技术的发展,大量的遥感数据产品也被用于对碳排放估算的研究,其中夜间灯光作为对人类社会活动最直接的体现,已被证明可用于经济社会指标估算、城镇化进程研究和重大事件影响评估等,因此不少学者在碳排放的研究中引入了夜间灯光数据,诸如基于夜间灯光、土地利用数据估算中国栅格尺度碳排放^[16],如苏泳娴等^[17]基于 1992~2010 年 DMSP/OLS 夜间灯光结合省市级的统计数据估算了中国大陆碳排放量,并分析了碳排放密度以及影响机制,发现经济增长是二氧化碳排放增长的主要因素,能源结构、能源利用效率和产业结构则是碳排放强度变化的主要因素;王少剑等^[18]基于 1992~2013 年 DMSP/OLS 夜

间灯光数据反演的中国地级能源碳排放,揭示了经济增长和第二产业占比升高对碳排放增长呈现正向效应,人口集聚、技术水平、对外开放度和公路运输强度则表现为负向效应;除此之外还有从流域视角研究碳排放格局和驱动因素^[19]以及基于碳排放格局、变化趋势和主要驱动因素进行的碳排放交易^[20]、碳减排政策^[21~24]和减排路径^[25~28]的研究.

上述关于中国能源碳排放的相关研究,为摸清碳排放家底和实施具体的碳减排措施提供了思路和方法,但仍存在 3 点不足:①单一的基于能源消费统计数据的研究,由于缺乏市级和更小尺度的数据以及不同尺度统计数据的统计口径、计算方法和统计误差等因素影响,使得现有研究大多聚焦于国家和省级尺度,对于市级以及更小尺度碳排放情况研究则较为稀缺;②基于夜间灯光数据的碳排放研究由于 DMSP/OLS 数据与 NPP/VIIRS 数据时间范围不同且两种数据存在较大差异,使得长时间连续的碳排放监测研究面临困难;③单一的基于夜间灯光数据的研究,由于夜间灯光与碳排放本身并无直接因果关系,在碳排放模拟结果尤其是在较小尺度上的模拟结果受到了部分学者的质疑.

因此,本文在前人研究的基础上,通过一系列科学方法力争解决上述问题. 首先,通过线性回归的方法重构了长时间序列可相互比较的夜间灯光数据集;其次,通过人口栅格数据的引入以及基于人均碳排放和单位 DN 值所承载的碳排放进行数据分组,最终估算了 2000、2005、2010、2015 和 2018 年中国碳排放,并对其时空特征、演变特征和城市碳排放与经济增长的关联性进行了分析,以期为实施碳减排措施和实现“碳达峰”和“碳中和”目标提供科学支撑.

1 材料与方法

1.1 数据来源

本文中用到的数据主要有 5 类,各类数据信息及来源如表 1 所示.

表 1 数据来源
Table 1 Data sources

数据名称	空间分辨率/km	数据来源
2000~2013 年 DMSP/OLS 稳定夜间灯光影像	1	美国国家海洋和大气管理局下属国家地球物理数据中心(NGDC)
2012~2018 年 NPP/VIIRS 夜间灯光影像	0.5	美国国家海洋和大气管理局下属国家地球物理数据中心(NGDC)
EVI/MOD13A3 数据产品	1	美国国家航空航天局(NASA)
LandScan 人口数据	1	美国能源部橡树岭国家实验室(ORNL)
能源消费统计数据、地区生产总值统计数据	—	中国能源统计年鉴 ^[29~33] 和中国城市统计年鉴 ^[34~38]
省市级矢量行政数据	—	国家基础地理信息中心 1:400 万数据库

1.2 研究方法

1.2.1 夜光数据的处理

夜光数据包含 DMSP/OLS 和 NPP/VIIRS 两套数据的处理,其中 DMSP/OLS 稳定夜间灯光数据去除了月光、火光和油气燃烧的噪声影响,但存在像元饱和,本文采用增强型植被指数对其进行去饱和度处理^[39],并进行年内合成校正与年际序列校正.对于 NPP/VIIRS 数据本文采用 Zhao 等^[40]提出的方法对其进行异常值去除、年内合成校正与年际序列校正.从原理上讲,不同的传感器对同一时间同一地点采集的夜光数据应大致相同,因此本文以 DMSP/OLS 数据为基准,把 NPP/VIIRS 数据作为校正对象,对 2012 年和 2013 年中国省级尺度的 DMSP/OLS 与 NPP/VIIRS 数据总亮度值 (total digital number, TDN) 进行回归分析.由图 1 可知两组数据存在较高的相关性 ($R^2 = 0.9589$),可以利用该方法进行数据拟合构建长时间序列连续的夜间灯光数据集. LandScan 人口数据主要采用了图像分析以及多变量不对称的建模方法来分解区域内的人口普查数据.

1.2.2 统计碳排放的计算

本文基于省级的能源消费统计数据计算碳排放量.具体计算方法是利用美国能源部橡树岭国家实

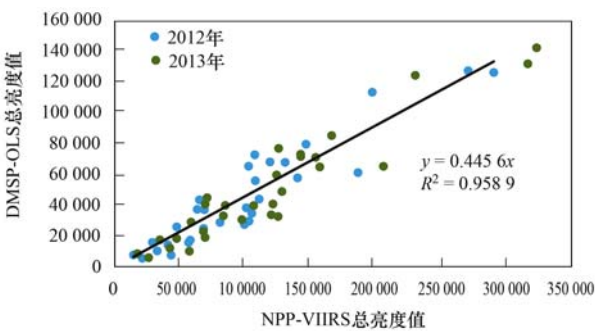


图 1 2012 年和 2013 年各省份 DMSP-OLS 数据和 NPP-VIIRS 数据 TDN 的关系

Fig. 1 Relationship between provincial DMSP-OLS data and NPP-VIIRS TDN in 2012 and 2013

验室 (ORNL) 提出的化石能源燃烧产生二氧化碳的计算公式^[41]以及政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 提供的各类能源碳排放系数,选取了 9 种主要能源的消费统计数据计算 CO₂ 排放量,计算公式如下:

CO₂ = 44 / 12 × ∑_{i=1}⁹ K_iE_i (1)

式中, i 表示能源类型,共计 9 种; E_i 表示能源 i 的消费量,按标准煤计 (万 t); K_i 表示能源 i 的碳排放系数 (万 t 碳/万 t 标准煤). 各类能源的换算标准煤系数和碳排放系数见表 2.

表 2 能源换算系数和碳排放系数

Table 2 Conversion factor and carbon emission factor for different types of fuels

能源种类	原煤	焦炭	原油	汽油	煤油	柴油	燃料油	天然气	电力
换算成标准煤 (t 标准煤/t)	0.714 3	0.971 4	1.428 6	1.471 4	1.471 4	1.457 1	1.428 6	1.33	0.345
碳排放系数 (万 t 碳/万 t 标准煤)	0.755 9	0.855	0.585 7	0.553 8	0.571 4	0.592 1	0.618 5	0.448 3	0.272

1.2.3 能源消费碳排放的模拟

(1)统计碳排放数据、夜光数据和人口数据分组 由于各省份的社会经济发展程度不一,导致各地人均碳排放以及单位 DN 值所承载的碳排放均有较大差异^[42,43],利用全国所有的数据进行一次碳排放的回归分析会造成一定程度的失真,因此本文对统计碳排放数据、夜光数据和人口数据进行二次分析,以实现原始数据符合实际的分组来减小统一回归分析的失真程度.具体方法是统计各个年份省级的 DN 值总值及总人口,分别计算各年份各省份的人均碳排放和单位 DN 值所承载的碳排放,计算公式如下:

A_{ij} = CO_{2ij} / POP_{ij}; B_{ij} = CO_{2ij} / DN_{ij} (2)

式中, i 表示不同年份, j 表示不同省份; CO_{2ij} 表示 i 年 j 省的统计碳排放量, POP_{ij} 表示 i 年 j 省的总人口数, DN_{ij} 表示 i 年 j 省的 DN 值总值; A_{ij} 表示 i 年 j 省的人均碳排放量, B_{ij} 表示 i 年 j 省的单位 DN 值所承

载的碳排放量.

利用自然断裂法分别对 A_{ij} 与 B_{ij} 进行两组断裂分组,综合 A_{ij} 与 B_{ij} 可以将 5 a 30 个省份共计 150 组数据分为 3 类 (命名为 ab 型, a 表示单位 DN 值所承载的碳排放, b 表示人均碳排放, 1 表示低值碳排放, 2 表示高值碳排放), 分组情况见表 3.

(2)能源消费碳排放模拟 利用分组后的 3 组原始数据导入 SPSS 进行不含截距的线性回归分析,结果显示统计碳排放数据与夜光数据和人口数据具有良好的线性相关关系, R^2 均大于 0.9. 碳排放回归方程参数见表 4.

因此可以对中国的能源消费碳排放进行估算,计算公式如下:

y = ax₁ + bx₂ (3)

式中, y 表示碳排放的估算值, x_1 表示夜间灯光 DN 值, x_2 表示人口数据, a 和 b 分别为各个自变量的回归参数.

表 3 数据分组

Table 3 Data grouping situation

分组类型	分组所属数据 ¹⁾
11 型	2000 年(北京、山东、福建、甘肃、广东、广西、海南、河北、河南、黑龙江、吉林、江苏、辽宁、内蒙古、宁夏、青海、陕西、上海、天津、新疆、云南和浙江) 2005 年(北京、山东、安徽、福建、甘肃、广东、广西、海南、河北、河南、黑龙江、吉林、江苏、江西、辽宁、内蒙古、宁夏、青海、陕西、上海、天津、新疆、云南、浙江和重庆) 2010 年(北京、山东、安徽、福建、甘肃、广东、广西、海南、河北、河南、黑龙江、湖北、吉林、江苏、江西、辽宁、青海、陕西、四川、新疆、云南、浙江和重庆) 2015 年(北京、山东、安徽、福建、甘肃、广东、广西、贵州、海南、河北、河南、黑龙江、湖北、湖南、吉林、江苏、江西、辽宁、青海、陕西、上海、四川、天津、云南、浙江和重庆) 2018 年(北京、山东、安徽、福建、甘肃、广东、广西、贵州、海南、河北、河南、黑龙江、湖北、湖南、吉林、江苏、江西、青海、陕西、上海、四川、天津、云南、浙江和重庆)
12 型	2010 年(内蒙古、宁夏、山西、上海和天津) 2015 年(内蒙古、宁夏、山西和新疆) 2018 年(辽宁、内蒙古、宁夏、山西和新疆)
21 型	2000 年(安徽、贵州、湖北、湖南、江西、山西、四川和重庆) 2005 年(贵州、湖北、湖南、山西和四川) 2010 年(贵州和湖南)

1) 包含能源消费统计数据、夜光数据和人口数据,西藏、香港、澳门和中国台湾省资料暂缺

表 4 碳排放回归方程参数
Table 4 Parameters of the quadratic polynomial
model of carbon emissions

模型	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> ²
11 型	0.423	4.025	0.904
12 型	0.381	17.342	0.949
21 型	2.195	0.756	0.972

1.2.4 空间自相关分析

(1)全局空间自相关使用 Moran’s *I* 刻画属性值在整个区域内的空间相关性,Moran’s *I* 值介于 -1~1,大于 0 表示正相关,即该属性值在区域内存在强的相似性;小于 0 则为负相关.计算公式如下^[44]:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4)$$

式中,*n* 表示地级行政单元数量;*x_i* 和 *x_j* 分别表示地级行政单元 *i* 和 *j* 的碳排放量; $\bar{x}$ 表示各地级单元碳排放量的平均值;*w_{ij}* 表示邻近地级单元 *i* 和 *j* 的空间权重矩阵.

(2)局部空间自相关一般利用 LISA 刻画在整体空间中可能存在的局部空间变异性,计算公式如下:

$$I_i = \frac{n(x_i - \bar{x}) \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (5)$$

式中,当 *I_i* > 0 时,表示邻近区域为正的空间自相关,为“高高”或“低低”型;当 *I_i* < 0 时,表示邻近区域为负的空间自相关,为“高低”或“低高”型.

1.2.5 变化频率分析

为反映 2000 年以来中国大陆地区的能源碳排放变化特征,本文引入数字编码法,对 5 期碳排放估算结果进行两两差值处理,再对 4 期差值数据进行数学编码运算,最终获得一幅体现 2000~2018 年中国大陆地区能源碳排放变化频次的栅格地图.具体方法是利用栅格计算器分别对 2000、2005、2010、2015 和 2018 年的 5 期碳排放估算结果进行做差运算,将等于 0 的赋值为 0,不等于 0 的赋值为 1,最后将 4 期差值图按照公式(6)叠加^[45].计算公式如下:

$$\begin{aligned} \text{code}_{2000 \sim 2018} = & 1\,000 \times \text{code}_{2000 \sim 2005} + \\ & 100 \times \text{code}_{2005 \sim 2010} + 10 \times \text{code}_{2010 \sim 2015} + \\ & 1 \times \text{code}_{2015 \sim 2018} \end{aligned} \quad (6)$$

式中,code_{2000~2005}、code_{2005~2010}、code_{2010~2015} 和 code_{2015~2018} 分别表示 4 期差值的编码(0 或 1),code_{2000~2018} 表示 2000~2018 年中国大陆地区能源碳排放变化频次代码,变化频次代码共计 5 类 16 种(表 5).

表 5 碳排放变化频次

Table 5 Statistics of carbon emission change frequency

频次代码	分类值	类型
0000	0	未发生变化
0001、0010、0100 和 1000	1	发生 1 次变化
0011、0101、1001、0110、1010 和 1100	2	发生 2 次变化
1110、1101、1011 和 0111	3	发生 3 次变化
1111	4	发生 4 次变化

2 结果与讨论

2.1 碳排放估算结果检验

本研究结果发现,基于统计数据的中国能源碳排放存在明显的阶段性差异,2000~2005 年间碳排放增长率为 77.27%,2005~2010 年间碳排

放增长率为 49.03%，2010～2015 年间碳排放增长率为 17.49%，2015～2018 年间碳排放的增长率为 9.60%，其中 2000～2005 年与 2005～2010 年为碳排放快速增长的两个阶段，因此选择 2005 年和 2010 年两个关键时间节点，选择深圳、珠海、厦门、忻州和晋城等 29 个地级市的碳排放统计数据

进行模型精度验证. 将估算结果与统计结果进行回归发现两者存在明显的线性关系(图 2)，在 2005 年 R^2 为 0.92，均方根误差 RMSE 为 1 145.56，在 2010 年 R^2 为 0.90，RMSE 为 1 272.77. 由此可见，综合夜间灯光与人口数据的碳排放估算模型有着良好的精度，误差在可控范围内，可以利用该模型进行中国能源碳排放估算以及时空演变分析的相关研究.

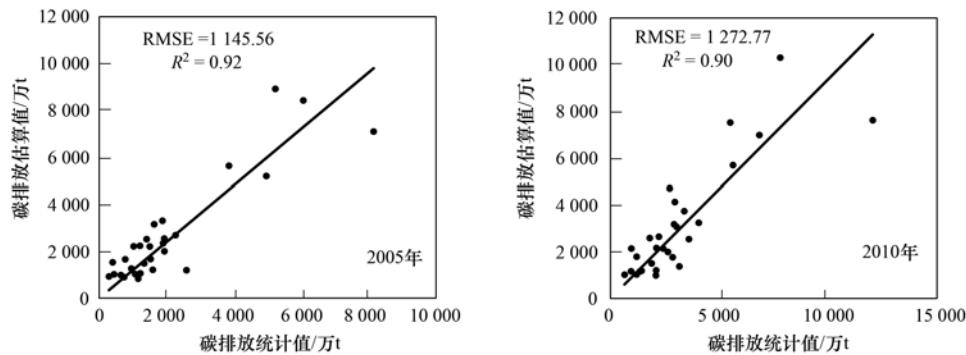


图 2 基于碳排放统计数据的碳排放估算精度验证
Fig. 2 Verification of carbon emission simulation accuracy based on statistics

2.2 碳排放时空演变特征分析

2.2.1 碳排放时空分布特征

如表 6 所示，从 2000～2018 年我国的 CO₂ 排放总量不断增长，但增长速率出现下降趋势. 碳排放总量从 2000 年的 48.2 亿 t 增长至 2018 年的 153.5 亿 t，碳排放年均增长速率则由 2000～2010 年的 9.9% 下降至 2010～2018 年的 7.4%. 该项数据也反映出由于经济社会发展对能源的需求，我国的碳排放总量在 2000～2018 年间快速增长，但由于后期国家层面开始调整能源结构，实施降碳减排政策，并同时研究相关的技术政策，使得碳排放增速开始下降.

为更好地分析我国碳排放的空间分布格局，本文将估算结果分为 3 类：无碳排放(<0 万 t)、低碳排放(0～1.16 万 t)、高碳排放(>1.16 万 t). 结果表明，无碳排放地区主要分布在西北及东北部分地区，低碳排放主要分布在广大的中小城镇地区，高碳排放则集中分布于华北、华中、东部沿海以及西部

的省会城市及城市群附近(图 3). 西北地区地广人稀，存在大量的无人区，如荒漠戈壁、雪山冰川等，因此碳排放少，主要的碳排放地区分布在重点城市、交通线附近的节点城市以及人口聚居区，东北地区的无碳排放主要分布在大兴安岭、小兴安岭和长白山地区；低碳排放主要分布在广大的中小城镇地区，因为这里分布了我国 94.1% 的人口，产生了不少的低碳排放；高碳排放分布的华北、华中地区是我国重要的能源基地、工业基地和粮食主产区，除此之外还分布着京津冀城市群、太原城市群、中原城市群、山东半岛城市群以及长江中游城市群^[46]，东部沿海地区是全国经济最发达的地区，人类活动强烈，能源消耗量较大且密集分布着大量的制造业，同时还有长江三角洲城市群、海峡西岸城市群、珠江三角洲城市群，西部的高碳排放则集中在省会地区附近，其中尤以成渝城市群和关中城市群最为显著.

表 6 2000～2018 年中国能源碳排放¹⁾

Table 6 Carbon emission from 2000 to 2018 in China

项目	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	2018 年
碳排放量/亿 t	48.2	67.3	96.1	126.5	153.5
年均增长速率/%		9.9(2000～2010 年)		7.4(2010～2018 年)	

1) 相关数据不含西藏、香港、澳门和中国台湾省；年均增长速率计算的是 2000～2010 年和 2010～2018 年两个时间阶段数据

2.2.2 碳排放空间自相关特征

通过 Moran's I 刻画中国能源碳排放空间自相关特征，发现该指数值均大于 0，表明中国大陆的碳排放呈现较为显著的正相关，即存在高值聚集或低值聚集现象. 具体变化为 2000 年莫兰指数值为

0.22，2005 年降为 0.19；在此之后总体为上升趋势，2010 年为 0.23，2015 年值为 0.23，2018 年则略有下降为 0.22，从指数变化看，整体趋于稳定，表明中国大陆的碳排放高值聚集或低值聚集现象趋于稳定. 利用 LISA 指数对中国能源碳排放进行局部变

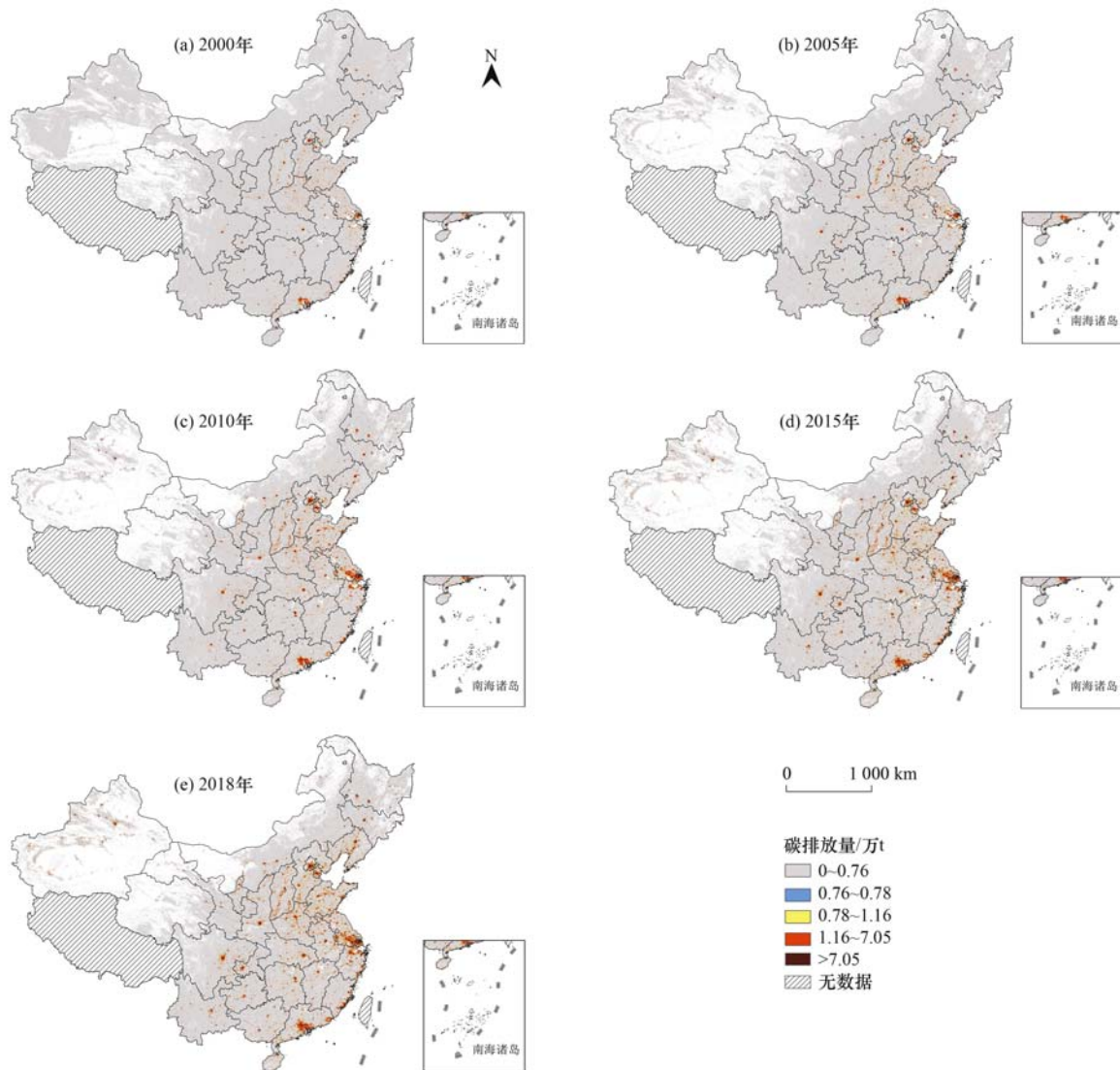


图3 2000~2018年中国能源碳排放空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of carbon emission from 2000 to 2018 in China

异性分析发现(图4),中国碳排放的低低集聚区正在破碎化,规模在减小而同时高高集聚区正在加强巩固,规模开始扩大;除此之外,分析集聚区的地域分布还发现地区的社会经济发展水平与碳排放存在密切联系^[47].具体表现为2000年在西部形成了新疆-青海-内蒙古西部-甘肃-四川西部连片的低低集聚区,海南岛也是一个低低集聚区,此外还有湖南西部、江西和安徽接壤处也形成了低低集聚区;而在京津冀城市群-太原城市群-潍坊-淄博-泰安-济宁-南通-苏州-嘉兴和中山-东莞-惠州-清远形成了4个高高集聚区;到2010年,西部地区的低低集聚区规模大幅减小,仅剩甘肃西北-青海-四川西部-云南西北部;高高集聚区中太原城市群加强为忻州-吕梁-临汾-长治-晋中,长三角地区加强为泰州-南通-无锡-苏州-嘉兴-上海;2015年,西部地区的低低集聚区规模进一步减小,湖南西部的低低集聚区消失;高高集聚区中长三角地区进一步加强为泰州-南通-

无锡-苏州-湖州-嘉兴-绍兴-上海;珠三角地区加强为清远-惠州-深圳-东莞-中山;到2018年,在怀化、天门-荆门-潜江出现新的低低集聚区;高高集聚区中辽宁鞍山以及长三角地区规模进一步扩大;其余地区的碳排放空间依赖性则无明显变化。

2.3 碳排放变化频率分析

为进一步探究2000~2018年中国能源碳排放的变化情况,本文在能源碳排放估算结果的基础上,利用数字编码法对碳排放变化情况做了量化分析(图5).本研究结果表明我国大部分地区的碳排放比较稳定,没有大幅增加或减少,结合碳排放的空间分布结果可以发现,这部分地区主要是无碳排放地区和低碳排放地区,值得注意的是在高碳排放地区也存在未发生变化的地方,这些地方主要是省会城市和重点城市的中心城区,例如北京、天津、西安、成都和上海等城市的中心城区,出现这种现象主要是由于这些省会城市和重点城市的中心城区已经过

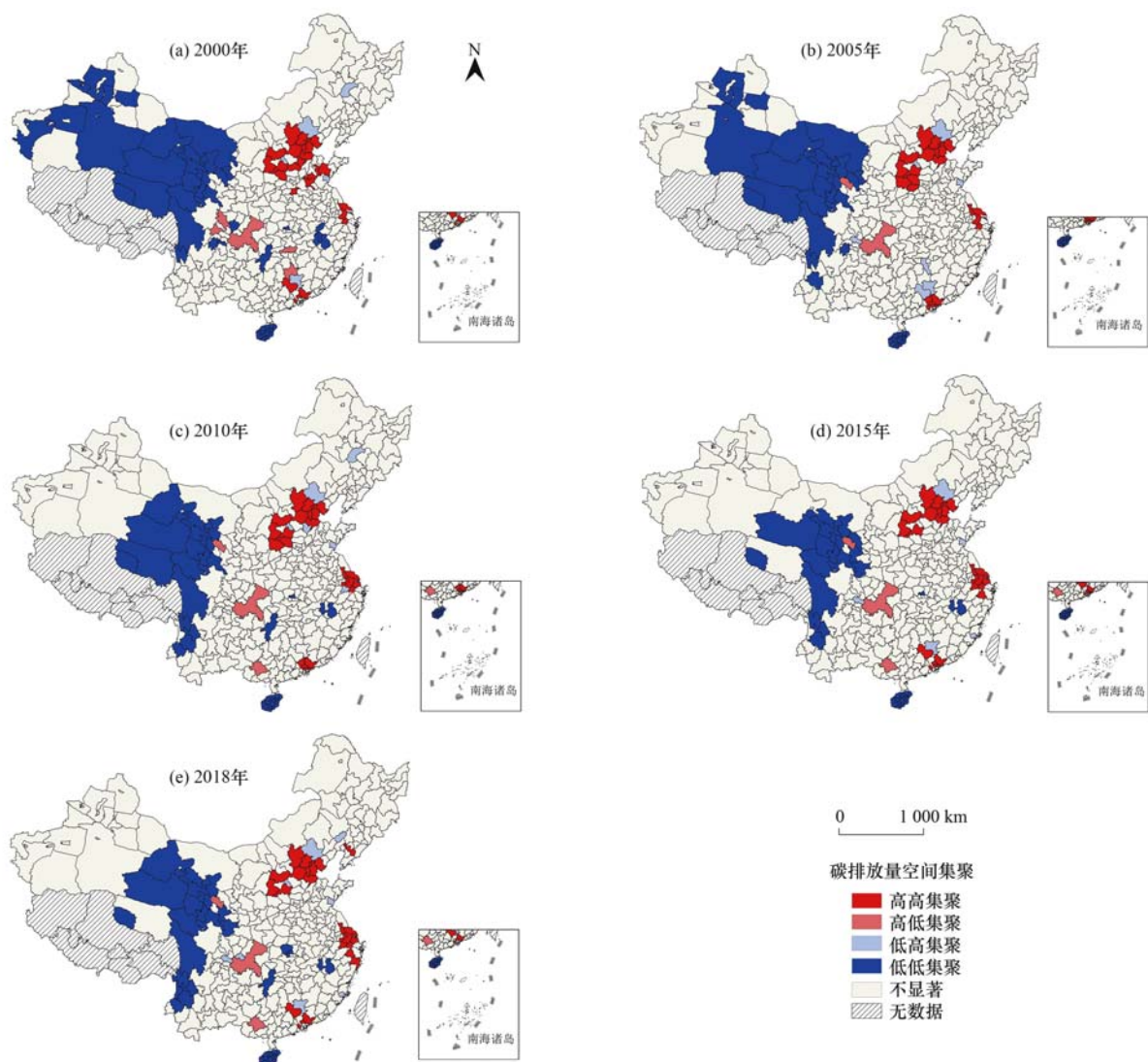


图4 2000~2018年中国碳排放集聚分布

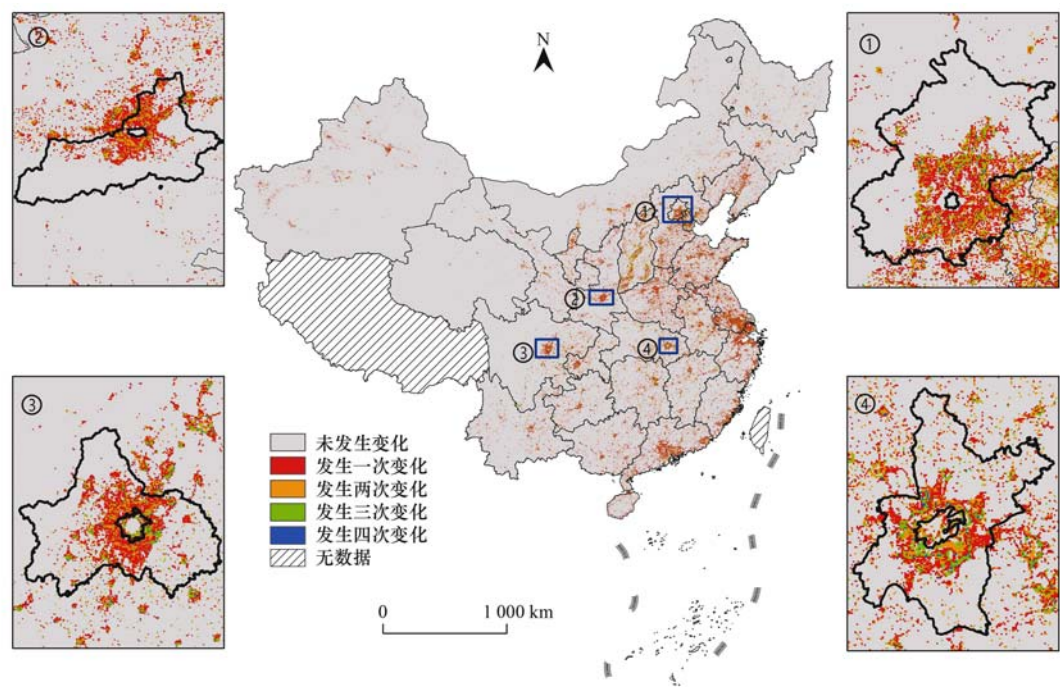
Fig. 4 Cluster conditions of the carbon emissions from 2000 to 2018 in China

多年的发展,空间结构、产业结构相对稳定,而且中心城区基本没有高碳排放企业,所以中心城区的碳排放一直相对稳定.碳排放发生1~2次变化和3~4次变化的地区主要分布在省会城市和重点城市的外围城区以及郊区,其中以发生1~2次变化为主,例如西安、成都和郑州等地,这些城市中心城区的外围主要是1~2次的碳排放变化,出现这种情况主要与城市扩张、人口、产业和企业向市郊县区流动有关;发生3~4次变化的地区主要由山西、河北、武汉和长沙这些地区的城市外围,山西和河北的变化主要与能源的直接消耗有关,例如山西在2000年之后开始大力关停私营煤矿和黑煤窑,淘汰和合并产能落后的煤矿,合并整顿国营煤炭企业,研发降碳技术等;河北在重度霾天气后开始大力淘汰钢铁产能,由于煤炭和钢铁这些高碳排放产业的变动,导致了山西和河北出现了碳排放的多次变化.武汉和长沙这些地区的城市外围碳排放的变化一方面来自于

自身城市的扩张、中心城区人口企业的外移,另一方面则来自于东部沿海地区制造业的内迁,武汉和长沙等地作为靠近东部沿海地区,经济基础又相对较好的内陆城市是这些内迁制造业的主要承接城市,综合这些原因使得武汉、长沙等城市外围出现了碳排放的多次变化.

2.4 城市碳排放与经济增长关联性分析

由于中国的高碳排放地区主要集中在重点城市和城市群附近,而城市的快速发展对能源的需求是产生碳排放的根本原因,因此本文在获取了城市碳排放估算结果的基础上,根据城市地区生产总值和城市碳排放量两个不同维度划分,运用四分位图刻画了2000~2018年中国城市在发展中能源消耗与经济增长的关联性(图6).该图横坐标为地区生产总值,代表经济发展,纵坐标为碳排放量,代表能源消耗.其中第三象限的点代表“低能耗-低收入”城市,第二象限的点代表“高能耗-低收入”城市,第一



黑色边界表示市域范围与中心城区范围,①北京市,中心城区包括东城区和西城区;②西安市,中心城区包括碑林区、莲湖区和新城区;③成都市,中心城区包括成华区、金牛区、锦江区、青羊区和武侯区;④武汉市,中心城区包括青山区、汉阳区、江岸区、江汉区、硚口区和武昌区

图5 2000~2018年中国能源碳排放变化频次

Fig. 5 Frequent carbon emission changes from 2000 to 2018 in China

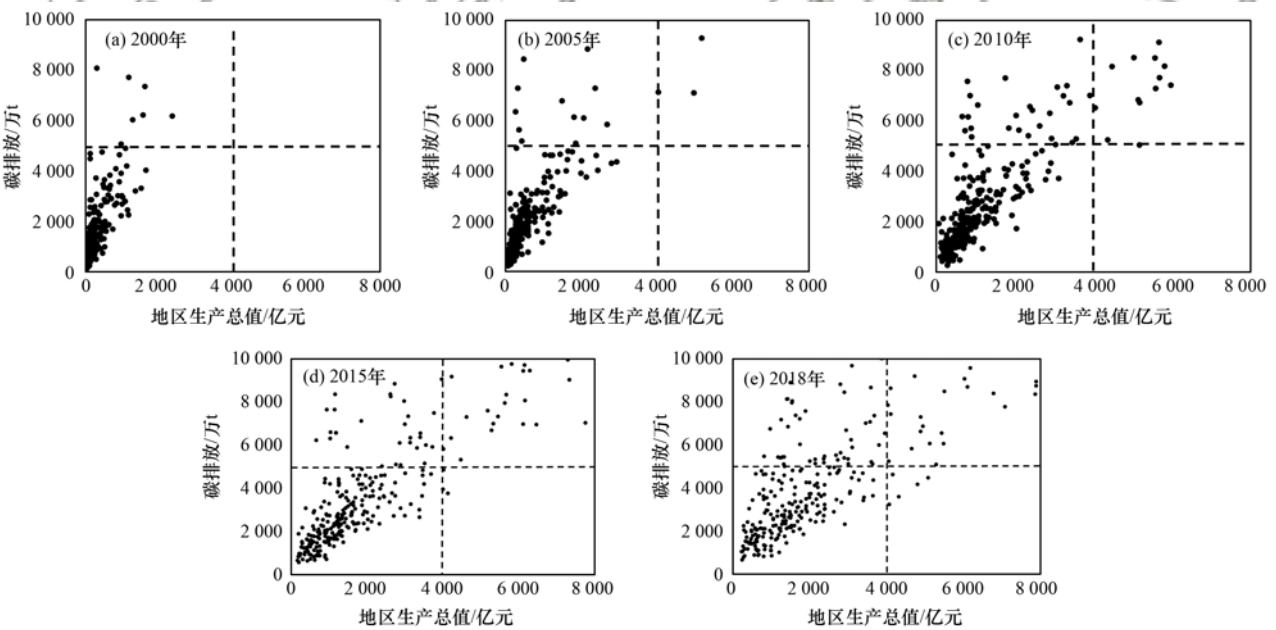


图6 2000~2018年中国城市“碳排放与经济”关系

Fig. 6 Relationship between carbon emissions and economy from 2000 to 2018 in China

象限的点代表“高能耗-高收入”城市,第四象限的点代表“低能耗-高收入”城市. 根据结果可发现,在2000~2018年中国城市发展进程中,遵循了由第三象限到第二象限再到第一象限、第四象限的一种顺时针发展规律,说明中国各城市的发展经历了由“低排放-低收入”转向“高排放-低收入”转向“高排

放-高收入”最终转向“低排放-高收入”的发展过程. 由此可见,城市的发展与碳排放有着密切的联系,同时相关研究也显示城市在无干预与规划干预两种情况下,城市的发展扩张以及对能源的需求有着较大的差异^[48]. 在当前“碳达峰”和“碳中和”大背景下,如何科学地干预城市发展并使“低排放-低收入”、

“高排放-低收入”和“高排放-高收入”城市快速步入“低排放-高收入”城市行列,实现城市低碳发展是需要深入探讨的一个命题。

3 结论

(1)从2000~2018年,我国的CO₂排放总量持续增长,但增长速率呈现放缓的趋势。碳排放从空间分布来看,无碳排放地区主要分布在西北及东北地区,低碳排放主要分布在除西北以外的广大地区,高碳排放则集中分布于华北、华中、东部沿海以及西部的省会城市及城市群附近。无论从总量还是空间分布来看,未来几年东部、中部地区都将面临更大的减排压力,在碳交易市场建立后东部、中部地区也将向西部和东部地区支付更多资金获取排放额,此举也将倒逼高排放产业进行减排技术革新。

(2)碳排放在地级市水平上呈现较为显著的全球空间正相关,存在高值聚集或低值聚集现象,且该聚集现象整体趋于稳定。

(3)中国大部分地区的碳排放量相对稳定,碳排放发生变化的地区主要分布在省会城市和重点城市的外围地区,即存在中心城区无变化,外围区域碳排放变化的圈层结构。城市作为减排工作的基本单元,中心城区并不是工作中心,城市外围地区才是降低城市碳排放的重点地区。

(4)在2000~2018年中国城市碳排放与经济关联性发展的历程中,整体上遵循一个由“低排放-低收入”转向“高排放-低收入”再转向“高排放-高收入”最终转向“低排放-高收入”的发展规律。

参考文献:

- [1] 吴大明. 近年来全球极端天气气候事件情况及影响分析[J]. 中国减灾, 2021, (15): 22-25.
- [2] 吴清一. 地球暖化加剧极端天气成常态[J]. 生态经济, 2017, 33(11): 2-5.
- [3] 罗国芳. 多国极端天气频发敲响气候变化警钟[N]. 中国环境报, 2021-07-30(04).
- [4] Wei W, Pang S F, Wang X F, *et al.* Temperature vegetation precipitation dryness index (TVPDI)-based dryness-wetness monitoring in China[J]. Remote Sensing of Environment, 2020, 248, doi: 10.1016/j.rse.2020.111957.
- [5] 白立鹏. 考虑含有新能源的电力系统安全约束经济调度[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2016.
- [6] Xiao H W, Ma Z Y, Zhang P, *et al.* Study of the impact of energy consumption structure on carbon emission intensity in China from the perspective of spatial effects[J]. Natural Hazards, 2019, 99(3): 1365-1380.
- [7] Chen C, Zhao T, Yuan R, *et al.* A spatial-temporal decomposition analysis of China's carbon intensity from the economic perspective[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 215: 557-569.
- [8] Dong F, Yu B L, Hadachin T, *et al.* Drivers of carbon emission intensity change in China[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2018, 129: 187-201.
- [9] Yan J N, Su B, Liu Y. Multiplicative structural decomposition and attribution analysis of carbon emission intensity in China, 2002-2012[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 198: 195-207.
- [10] Huang B, Meng L N. Convergence of per capita carbon dioxide emissions in urban China: a spatio-temporal perspective[J]. Applied Geography, 2013, 40: 21-29.
- [11] 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, 2020, 117(1): 29-36.
- [12] 刘玉珂, 金声甜. 中部六省能源消费碳排放时空演变特征及影响因素[J]. 经济地理, 2019, 39(1): 182-191.
- [12] Liu Y K, Jin S T. Temporal and spatial evolution characteristics and influencing factors of energy consumption carbon emissions in six provinces of central China[J]. Economic Geography, 2019, 39(1): 182-191.
- [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.
- [13] 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] Wang S J, Shi C Y, Fang C L, *et al.* Examining the spatial variations of determinants of energy-related CO₂ emissions in China at the city level using Geographically Weighted Regression Model[J]. Applied Energy, 2019, 235: 95-105.
- [15] 傅京燕, 司秀梅. “一带一路”沿线国家碳排放驱动因素、减排贡献与潜力[J]. 热带地理, 2017, 37(1): 1-9.
- [15] Fu J Y, Si X M. Driving factors of carbon emission of the countries along “the Belt and Road”, their potential and contribution to the emission reduction[J]. Tropical Geography, 2017, 37(1): 1-9.
- [16] Wei W, Zhang X Y, Cao X Y, *et al.* Spatiotemporal dynamics of energy-related CO₂ emissions in China based on nighttime imagery and land use data[J]. Ecological Indicators, 2021, 131, doi: 10.1016/j.ecolind.2021.108132.
- [17] 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.
- [17] 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.
- [18] 王少剑, 苏泳娴, 赵亚博. 中国城市能源消费碳排放的区域差异、空间溢出效应及影响因素[J]. 地理学报, 2018, 73(3): 414-428.
- [18] Wang S J, Su Y X, Zhao Y B. Regional inequality, spatial spillover effects and influencing factors of China's city-level energy-related carbon emissions[J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(3): 414-428.
- [19] 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.
- [19] 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.
- [20] Liu L W, Chen C X, Zhao Y F, *et al.* China's carbon-emissions trading: Overview, challenges and future[J]. Renewable and

- Sustainable Energy Reviews, 2015, **49**: 254-266.
- [21] 张国兴, 高秀林, 汪应洛, 等. 中国节能减排政策的测量、协同与演变——基于 1978-2013 年政策数据的研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2014, **24**(12): 62-73.
- Zhang G X, Gao X L, Wang Y L, *et al.* Measurement, coordination and evolution of energy conservation and emission reduction policies in China: based on the research of the policy data from 1978 to 2013 [J]. China Population, Resources and Environment, 2014, **24**(12): 62-73.
- [22] 宋国君, 王语苓, 姜艺婧. 基于“双碳”目标的碳排放控制政策设计[J]. 中国人口·资源与环境, 2021, **31**(9): 55-63.
- Song G J, Wang Y L, Jiang Y J. Carbon emission control policy design based on the targets of carbon peak and carbon neutrality [J]. China Population, Resources and Environment, 2021, **31**(9): 55-63.
- [23] 董军, 张旭. 中国工业部门能耗碳排放分解与低碳策略研究[J]. 资源科学, 2010, **32**(10): 1856-1862.
- Dong J, Zhang X. Decomposition of carbon emissions and low carbon strategies for industrial sector energy consumption in China [J]. Resources Science, 2010, **32**(10): 1856-1862.
- [24] 李治国, 王杰. 中国碳排放权交易的空间减排效应: 准自然实验与政策溢出[J]. 中国人口·资源与环境, 2021, **31**(1): 26-36.
- Li Z G, Wang J. Spatial emission reduction effects of China's carbon emissions trading: quasi-natural experiments and policy spillovers [J]. China Population, Resources and Environment, 2021, **31**(1): 26-36.
- [25] Wang T, Watson J. Scenario analysis of China's emissions pathways in the 21st century for low carbon transition [J]. Energy Policy, 2010, **38**(7): 3537-3546.
- [26] Zhou Y, Gu A L, Deng M Z. Voluntary emission reduction market in China: development, management status and future supply [J]. Chinese Journal of Population Resources and Environment, 2019, **17**(1): 1-11.
- [27] He J K, Li Z, Zhang X L, *et al.* Comprehensive report on China's long-term low-carbon development strategies and pathways [J]. Chinese Journal of Population, Resources and Environment, 2020, **18**(4): 263-295.
- [28] Tian C, Zheng X Q, Liu Q, *et al.* Long-term costs and benefits analysis of China's low-carbon policies [J]. Chinese Journal of Population Resources and Environment, 2019, **17**(4): 295-302.
- [29] 中国统计局. 中国能源统计年鉴 2001 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2001.
- [30] 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴 2006 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2006.
- [31] 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴 2011 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2011.
- [32] 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴 2016 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2016.
- [33] 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴 2019 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- [34] 国家统计局城市社会经济调查总队. 中国城市统计年鉴 2001 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2002.
- [35] 国家统计局城市社会经济调查司. 中国城市统计年鉴 2006 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2007.
- [36] 国家统计局城市社会经济调查司. 中国城市统计年鉴 2011 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2011.
- [37] 国家统计局城市社会经济调查司. 中国城市统计年鉴 2016 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2016.
- [38] 国家统计局城市社会经济调查司. 中国城市统计年鉴 2019 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- [39] Liu X P, Ou J P, Wang S J, *et al.* Estimating spatiotemporal variations of city-level energy-related CO₂ emissions: an improved disaggregating model based on vegetation adjusted nighttime light data [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, **177**: 101-114.
- [40] Zhao J C, Ji G X, Yue Y L, *et al.* Spatio-temporal dynamics of urban residential CO₂ emissions and their driving forces in China using the integrated two nighttime light datasets [J]. Applied Energy, 2019, **235**: 612-624.
- [41] 周星勇. 基于夜间灯光数据的广东省能源消耗碳排放估计与时空分布分析[D]. 成都: 成都理工大学, 2018.
- [42] 陈志建, 王铮, 孙翊. 中国区域人均碳排放的空间格局演变及俱乐部收敛分析[J]. 干旱区资源与环境, 2015, **29**(4): 24-29.
- Chen Z J, Wang Z, Sun Y. Spatial changing pattern of carbon dioxide emissions per capita and club convergence in China [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2015, **29**(4): 24-29.
- [43] 孙秀锋, 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.
- [44] 周榕, 庄汝龙, 黄晨熹. 中国人口老龄化格局演变与形成机制[J]. 地理学报, 2019, **74**(10): 2163-2177.
- Zhou R, Zhuang R L, Huang C X. Pattern evolution and formative mechanism of aging in China [J]. Acta Geographica Sinica, 2019, **74**(10): 2163-2177.
- [45] Wei W, Li Z Y, Xie B B, *et al.* Spatial distance-based integrated evaluation of environmentally sensitivity for ecological management in northwest China [J]. Ecological Indicators, 2020, **118**, doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106753.
- [46] 马明义, 郑君薇, 马涛. 多维视角下新型城市化对中国二氧化碳碳排放影响的时空变化特征[J]. 环境科学学报, 2021, **41**(6): 2474-2486.
- Ma M Y, Zheng J W, Ma T. Spatiotemporal characteristics of the impact of new urbanization on China's carbon dioxide emissions from a multi-dimensional perspective [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, **41**(6): 2474-2486.
- [47] 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.
- [48] Zhou L, Dang X W, Sun Q K, *et al.* Multi-scenario simulation of urban land change in Shanghai by random forest and CA-Markov model [J]. Sustainable Cities and Society, 2020, **55**, doi: 10.1016/j.scs.2020.102045.

CONTENTS

Challenges Regarding the Co-emission of Emerging Pollutants to Eco-environmental Monitoring and Management	WANG Pei, HUANG Xin-yi, CAO Zhi-wei, <i>et al.</i> (4801)
Environmental Process, Effects and Risks of Emerging Contaminants in the Estuary-Coastal Environment	WANG Xin-hong, YU Xiao-xuan, WANG Si-quan, <i>et al.</i> (4810)
Research Progress of Analytical Methods with Molecular Spectroscopy for Determination of Trace Nutrients and Metals in Seawaters	YUAN Dong-xing, HUANG Yong-ming, WANG Ting (4822)
Research Progress on the Determination of Sulfide in Natural Waters: From Laboratory Analysis to In-Situ Monitoring	LI Peng, LIN Kun-de, YUAN Dong-xing (4835)
Advances in On-site Analytical Methods for Inorganic Arsenic in Environmental Water	BO Guang-yong, CHEN Zhao-ying, GONG Zhen-bin, <i>et al.</i> (4845)
Advances and Prospect of Sampling Techniques and Analytical Methods for Trace Elements in the Ocean; Progress of Trace Element Platform Construction in Xiamen University	 HUANG Yong-ming, ZHOU Kuan-bo, CHEN Yao-jin, <i>et al.</i> (4858)
Biodegradation of Polyethylene Microplastic: A Review	 LUO Yuan-rong, QIAN Yi-qian, QI Ya-nan (4869)
Mechanism and Environmental Effect on Nitrogen Addition to Microbial Process of Arsenic Immobilization in Flooding Paddy Soils	WANG Feng, ZHANG Jing, ZHOU Shao-yu, <i>et al.</i> (4876)
Toxicity Testing Organisms for Marine Ecotoxicological Research in China	SHI Tian-yi, HONG Hai-zheng, WANG Ming-hua, <i>et al.</i> (4888)
Estimating Methane Fugitive Emissions from Oil and Natural Gas Systems in China	CHEN Chun-ci, LÜ Yong-long, HE Gui-zhen (4905)
Atmospheric NH ₃ Emission Inventory and Its Tempo-spatial Changes in Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou Region from 2015 to 2020	LI Xiang, WU Shui-ping, JIANG Bing-qi, <i>et al.</i> (4914)
Distribution of Microplastic and Antibiotic Resistance Gene Pollution in Jiulong River Estuary	CHENG Hong, CHEN Rong (4924)
Pollution Characteristics of Microplastics in Sediments of Xiamen Bay Beach	YAO Rui, LIU Hua-tai, LI Yong-yu, <i>et al.</i> (4931)
Spatial and Temporal Distribution and Influencing Factors of Dissolved Trace Metals in Jiulong River Estuary and Xiamen Bay	QI Liu-qian, YUE Xin-li, ZHONG Hao-wen, <i>et al.</i> (4939)
Spatiotemporal Characteristics of Dissolved Oxygen and Control Mechanism of Hypoxia (Low Oxygen) in the Watershed-Coastal System in Fujian Province	 YANG Ai-lin, YANG Fang, LI Shao-bin, <i>et al.</i> (4950)
Distribution, Migration, and Transformation Mechanism of Labile Phosphorus in Sediments of Xixi River Estuary, Xiamen	PAN Feng, CAI Yu, GUO Zhan-rong, <i>et al.</i> (4961)
Adsorption of Mn ²⁺ by Modified Biochar Fixed Bed in Simulated Lakes and Reservoir Waters	ZHAO Jie, YE Zhi-long, WANG Jia-ni, <i>et al.</i> (4971)
Rapid Detection of Trace Enrofloxacin and Ciprofloxacin in Drinking Water by SERS	XU Jing, ZHENG Hong, LU Jiang-long, <i>et al.</i> (4982)
Degradation of Triphenyl Phosphate in Water by UV-driven Advanced Oxidation Processes	XU Zi-wen, YIN Hong-ling, XIONG Yuan-ming, <i>et al.</i> (4992)
Characteristics and Potential Sources of Four Ozone Pollution Processes in Hainan Province in Autumn of 2019	FU Chuan-bo, CHEN Hong, DAN Li, <i>et al.</i> (5000)
Characterization and Formation Mechanism of Water-soluble Inorganic Ions in PM _{2.5} and PM ₁₀ in Summer in the Urban Agglomeration of the Ili River Valley	 CHEN Qiao, GU Chao, XU Tao, <i>et al.</i> (5009)
Difference in PM _{2.5} Pollution and Transport Characteristics Between Urban and Suburban Areas	QI Peng, ZHOU Ying, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (5018)
Characteristics and Health Risk Assessment of BTEX in the Northern Suburbs of Nanjing	FENG Yue-zheng, AN Jun-lin, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (5030)
Ecological Risk Assessment of Microplastics Occurring in Surface Water of Terrestrial Water Systems across China	SUN Xiao-nan, CHEN Hao, JIA Qi-long, <i>et al.</i> (5040)
Scale Effects of Landscape Pattern on Water Quality in Dongjiang River Source Watershed	CHEN You-liang, ZOU Wen-min, LIU Xing-gen, <i>et al.</i> (5053)
Mercury Speciation, Distribution, and Potential Sources in Surface Waters of the Yangtze and Yellow River Source Basins of Tibetan Plateau During Wet Season	 LIU Nan-tao, WU Fei, YUAN Wei, <i>et al.</i> (5064)
Water Environmental Characteristics and Water Quality Assessment of Lakes in Tibetan Plateau	LIU Zhi-qi, PAN Bao-zhu, HAN Xu, <i>et al.</i> (5073)
Karst Hydrogeochemical Characteristics and Controlling Factors of Carlin-type Gold Mining Area Based on Hydrochemistry and Sulfur Isotope	 ZHA Xue-fang, WU Pan, LI Xue-xian, <i>et al.</i> (5084)
Characteristics of Eukaryotic Phytoplankton Community Structure and Its Relationship with Environmental Factors in Danjiangkou Reservoir	HE Yu-xiao, MAI Si-jie, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (5096)
Adsorption of Phosphate and Heavy Metals by Lanthanum Modified Zeolite and Its Performance in Sediment Inactivation	WANG Zhe, ZHU Jun, LI Wen, <i>et al.</i> (5106)
Metagenomic and Metatranscriptomic Analysis of Nitrogen Removal Functional Microbial Community of Petrochemical Wastewater Biological Treatment Systems	 ZHANG Xu, ZHOU Jia-jia, ZHOU Min, <i>et al.</i> (5115)
Bacterial Community Structure and Antibiotic Resistance Gene Changes in IFAS + Magnetic Coagulation Process Wastewater Treatment Plant in Cold Regions	 DU Wen-yan, YAO Jun-qin, MA Hui-ying, <i>et al.</i> (5123)
Nitric Oxide Emissions from Chinese Upland Cropping Systems and Mitigation Strategies: A Meta-analysis	 TIAN Zheng-yun, WU Xiong-wei, WU Yuan-yuan, <i>et al.</i> (5131)
Impact of Nitrification Inhibitors on Vegetable Production Yield, Nitrogen Fertilizer Use Efficiency and Nitrous Oxide Emission Reduction in China: Meta Analysis	 LIU Fa-bo, MA Xiao, ZHANG Fen, <i>et al.</i> (5140)
Effect of Different Fertilization Treatments on Methane and Nitrous Oxide Emissions from Rice-Vegetable Rotation in a Tropical Region, China	 SHAO Xiao-hui, TANG Shui-rong, MENG Lei, <i>et al.</i> (5149)
Effects of Land-use Conversion on Soil Nitrification and NO & N ₂ O Emissions in Tropical China Under Different Moisture Conditions	TANG Rui-jie, HU Yu-jie, ZHAO Cai-yue, <i>et al.</i> (5159)
Characteristics of Heavy Metal Pollution in Farmland Soil of the Yangtze River Economic Belt Based on Bibliometric Analysis	LIU Xiao-yan, FAN Ya-nan, LIU Peng, <i>et al.</i> (5169)
Spatial and Temporal Distribution and Source Variation of Heavy Metals in Cultivated Land Soil of Xiangzhou District Based on EBK Interpolation Prediction and GDM Model	 GAO Hao-ran, ZHOU Yong, LIU Jia-kang, <i>et al.</i> (5180)
Identification of Soil Heavy Metal Sources Around a Copper-silver Mining Area in Ningxia Based on GIS	ZHANG Kou-kou, HE Jing, ZHONG Yan-xia, <i>et al.</i> (5192)
Effect of Aging on Stabilization of Cd ²⁺ Through Biochar Use in Alkaline Soil of Bayan Obo Mining Area	WANG Zhe, CHENG Jun-li, BIAN Yuan, <i>et al.</i> (5205)
Preparation of Magnetic Iron Oxide/Mulberry Stem Biochar and Its Effects on Dissolved Organic Carbon and Arsenic Speciation in Arsenic-Contaminated Soils	 LU Lin, YAN Li-ling, LIANG Mei-na, <i>et al.</i> (5214)
Effects of Oyster Shell Powder and Lime on Availability and Forms of Phosphorus and Enzyme Activity in Acidic Paddy Soil	ZHAO Li-fang, HUANG Peng-wu, YANG Cai-di, <i>et al.</i> (5224)
Effects of Interaction of Zinc and Cadmium on Growth and Cadmium Accumulation of <i>Brassica campestris</i> L.	SHUAI Zu-ping, LIU Han-yi, CUI Hao, <i>et al.</i> (5234)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Antibiotics in Vegetable Field in Kaizhou, Chongqing	FANG Lin-fa, YE Ping-ping, FANG Biao, <i>et al.</i> (5244)
Temporal and Spatial Variation Characteristics of Carbon Storage in the Source Region of the Yellow River Based on InVEST and GeoSoS-FLUS Models and Its Response to Different Future Scenarios	 HOU Jian-kun, CHEN Jian-jun, ZHANG Kai-qi, <i>et al.</i> (5253)
Carbon Sequestration Characteristics of Different Restored Vegetation Types in Loess Hilly Region	XU Xiao-ming, ZHANG Xiao-ping, HE Liang, <i>et al.</i> (5263)
Response of Soil Multifunctionality to Reduced Microbial Diversity	CHEN Gui-xian, WU Chuan-fa, GE Ti-da, <i>et al.</i> (5274)
Effect of Nitrogen Addition on Soil Fungal Diversity in a Degraded Alpine Meadow at Different Slopes	SU Xiao-xue, LI Xi-lai, LI Cheng-yi, <i>et al.</i> (5286)
Comparative Energy Consumption Structure and Mode between China and Major Energy-Consuming Countries Under the Background of Carbon Emission Reduction	 LI Hui, PANG Bo, ZHU Fa-hua, <i>et al.</i> (5294)
Spatialization and Spatio-temporal Dynamics of Energy Consumption Carbon Emissions in China	HAO Rui-jun, WEI Wei, LIU Chun-fang, <i>et al.</i> (5305)
Carbon Dioxide Mitigation Co-effect Analysis of Structural Adjustment Measures in the "2 + 26" Cities in the Jing-Jin-Ji Region and Its Surroundings	 YANG Tian-qi, WANG Hong-chang, ZHANG Chen, <i>et al.</i> (5315)
Policy Analysis in Plastic Pollution Governance and Recommendations in China	LI Huan, ZHU Long, SHEN Qian, <i>et al.</i> (5326)