

目次

中国省域差异化碳达峰评价方法与应用刘润璞, 彭栓, 陈玉烁, 陈民, 张楠, Nihed Benani, 吕连宏, 阳平坚 (1233)

全生命周期视角下中国建筑碳排放空间关联网络演化及影响因素分析任晓松, 李昭睿 (1243)

京津冀地区城市三生空间碳代谢效率特征及演进模式田超, 程琳琳, 邵盈钊 (1254)

太原市“十四五”规划大气污染防治政策的CO₂协同效益评估肖婷玉, 束赕, 李慧, 王涵, 李俊宏, 严沁, 张文杰, 姜华 (1265)

湖南省工业领域碳减排与空气质量改善协同李楠, 刘弯弯, 朱书涵, 邢晓雯, 汤克勤, 王松伟, 白露 (1274)

“双碳”背景下河南省电力行业中长期控煤降碳路径张静, 杨萌, 张伟, 曹东, 赵静, 李勃, 薛英岚, 蒋洪强 (1285)

郑州市公交车队电动化减排降碳环境效益邹超, 汪亚男, 吴琳, 何敬, 倪经纬, 毛洪钧 (1293)

长江中游城市群城市化对PM_{2.5}浓度的多尺度驱动机制张政, 周廷刚, 周志衡, 昌悦 (1304)

天山北坡城市群PM_{2.5}浓度时空分布特征及影响因素分析王相男, 张喆, 刘方青 (1315)

天津市PM_{2.5}碳组分空间差异性来源解析武甫亮, 吴建会, 戴启立, 肖致美, 冯银厂 (1328)

贵阳市花溪城区大气PM_{2.5}中碳质气溶胶的变化特征及来源解析桂佳群, 杨员, 王显钦, 李云武, 闫广轩, 徐鹏 (1337)

新乡市大气PM_{2.5}中水溶性离子的污染特征、来源解析及气象影响分析刘桓嘉, 李岚清, 李焕莉, 任言, 许梦源, 贾梦珂, 刘恒志, 杨莹, 宋天颂, 洪启航 (1349)

2017~2018年冬季菏泽大气PM_{2.5}中金属元素特征及健康风险评估杜虹萱, 任丽红, 赵明升, 韩慧霞, 徐义生 (1361)

北京市臭氧污染跳变型特征及影响因素分析潘锦秀, 安欣欣, 刘保献, 李云婷, 李倩, 孙峰, 张章, 邱启鸿, 陈阳 (1371)

南京夏季大气臭氧光化学特征与敏感性分析罗丽彤, 章炎麟, 林煜棋, Ahsan Mozaffar, 曹梦瑶 (1382)

苏州市初夏臭氧污染成因及年际变化吴也正, 张鑫, 顾韵, 缪青, 魏恒, 熊宇, 杨倩, 吴斌, 沈文渊, 马强 (1392)

长江中游典型湖泊沉积物重金属分布特征、生态风险评估及溯源卢洪斌, 卢少勇, 李响, 张霖霖, 黄张根 (1402)

基于PCA-APCS-MLR模型的乌梁素海表层沉积物重金属时空分布及来源解析崔志谋, 史小红, 赵胜男, 卢俊平, 张昊, 刘莹慧, 郭鑫, 王彦隽 (1415)

重庆市长寿湖水表层水体重金属时空分布及风险评价张瑞溪, 刘娅君, 罗泳楠, 李杰芹, 李彩霞, 李佳佳, 张成 (1428)

长江流域微塑料污染特征及生态风险评估李思琼, 王华, 储林佑, 曾一川, 闫雨婷 (1439)

宜昌市东山运河微塑料污染评估及年排放量估算丁爽, 李卫明, 张续同, 刘子健, 高雅坤, 李映成, 王芳炜 (1448)

汜水河(荥阳段)入河排污口水体微塑料赋存特征及风险评估赵长民, 和兵, 李和通, 张瑞琪, 李银月, 张发文, 桂新, 马丽 (1457)

宁夏入黄排水沟中药物和个人护理品的污染特征与生态风险评估高礼, 李凌云, 郑兰香, 吴海娟, 陶红, 刘邓超 (1468)

浙南瓯江流域水体抗生素污染特征及风险评估钟奕昕, 李立湘, 吴鑫, 周施阳, 姚飞延, 董好刚 (1480)

鄱阳湖沉积物中多环芳烃的时空分布及源解析马妍, 孙晨, 毕茹乐, 张波涛, 刘艳, 邵鹏, 刘统, 王圣瑞, 钟文军 (1492)

杭州湾南岸20a水质净化功能变化及预测王珊珊, 曹公平, 徐明伟, 黄君宝, 曾剑 (1502)

不同缓冲区的土地利用方式对地表水水质的影响:以海河流域天津段为例代孟均, 张兵, 杜倩倩, 孙季琰, 田蕾, 王义东 (1512)

长江流域安庆段浅层地下水水化学特征及控制因素刘海, 宋阳, 李迎春, 魏伟, 赵国红, 王旭东, 黄健敏 (1525)

富营养化湖泊藻华腐解产生的溶解性有机质动态变化及其环境效应张瑾, 陈明滢, 郝智能, 钟寰, 何欢, 雷沛 (1539)

紫外光活化亚硫酸盐降解水中卡马西平林涛, 苑宇杰 (1553)

再生水消毒副产物的检测、生成与控制廖雨枫, 王正, 潘昀, 李爱民 (1561)

3种人工湿地基质材料对氨氮的吸附特性何强, 陈博文, 杨雨静, 周全, 刘彦君, 王志刚, 程呈 (1577)

基于改进遥感生态指数的青藏公路那(曲)安(多)段生态环境评估及驱动机制分析傅楷翔, 贾国栋, 余新晓, 王旭 (1586)

基于AWRSEI的岱海流域生态环境质量时空演变及驱动因子分析赵嘉丽, 李兴, 孙冰 (1598)

定量评估气候变化对长江中下游地区植被GPP_{GS}变化的影响徐勇, 盘钰春, 邹滨, 郑志威, 郭振东 (1615)

基于Meta分析的煤矿区植被恢复对土壤有机碳储量的影响李健明, 康雨欣, 蒋福祯, 宋明丹, 祁凯斌, 卢素锦, 李正鹏 (1629)

连续周年轮作休耕对土壤团聚体稳定性及有机碳的影响鲁泽让, 李永梅, 杨春怀, 夏梓泰, 程伟威, 王自林, 赵吉霞, 范茂攀 (1644)

4种改良剂对酸性紫色土肥力及活性有机碳组分的影响丁馨茹, 严宁珍, 王子芳, 李志琦, 黄容, 王洋, 代文才, 高明 (1655)

不同植茶年限土壤氮素组分变化及其与环境因子关系邵奇, 吴涛, 解雪峰, 徐梓晴, 李文琦, 蒋国俊, 张建珍, 徐飞 (1665)

黄河下游典型湿地土壤养分及其生态化学计量特征王传盈, 王凯月, 王浩然, 张梦迪, 周云凯 (1674)

覆膜年限和有机肥施用对花生田耕层土壤微塑料赋存特征的影响宋宁宁, 李梦佳, 王学霞, 刘君, 王芳丽, 宗海英, 黄小丽, 王斌, 梁丽娜 (1684)

秸秆还田和添加生物炭对热带地区稻菜轮作体系中淹水后土壤温室气体排放的影响胡天怡, 车佳玥, 胡煜杰, 陈琦琦, 张冬明, 雷菲, 曾建华, 汤水荣, 伍延正, 孟磊 (1692)

耕作深度调控秸秆还田对农田土壤呼吸的影响陈曦, 张彦军, 邹俊亮, 李天姿, 于媛, 李晶 (1702)

基于遥感时-空-谱特征及随机森林模型的土壤重金属空间分布预测王泽强, 张冬有, 徐夕博, 王兆鹏, 杨东宇, 宋晓宁 (1713)

黄河流域农田土壤重金属污染特征及其优先控制源分析李军, 李旭, 李开明, 焦亮, 台喜生, 臧飞, 曹素珍 (1724)

广西贺州市典型矿区周边耕层土壤Cd通量特征杨烨宇, 李程, 杨忠芳, 张起钻, 邹胜章, 宋淑娟, 蔡贺清 (1739)

基于信息扩散模型的沔东新区土壤重金属潜在生态风险评估杨楠楠, 韩玲, 刘明 (1749)

湘西地区土壤重金属污染溯源分析及环境质量评价肖凯琦, 徐宏根, 甘杰, 戴亮亮, 李毅, 李凯, 许青阳, 张俊, 邓世民, 李颖 (1760)

典型行业再利用土壤重金属含量分布、来源解析及生态风险评估沈城, 王文娟, 沙晨燕, 谢雨晴, 王敏, 吴健 (1769)

省级尺度土壤As迁移转化与水稻安全种植区划:以贵州省为例董心月, 吴勇, 周子寒, 王佛鹏, 张云霞, 宋波 (1781)

谷壳灰硅肥改善土壤质量降低水稻镉累积的效应易轩韬, 欧阳坤, 辜娇峰, 李倩, 游萍, 周航, 廖柏寒 (1793)

EDDS对土壤铜镉有效性及蓖麻吸收转运的影响刘文英, 吴刚, 胡红青 (1803)

叶面凋制剂对复合污染农田小麦籽粒Cd、As和Pb累积的阻控效应肖冰, 王秋实, 高培培, 赵全利, 杨威, 王钊, 刘文菊, 薛培英 (1812)

民勤绿洲退耕地土壤微生物群落结构与功能多样性特征李常乐, 张富, 王理德, 赵赫然, 赵学成, 张恒平 (1821)

宏基因组揭示紫色土中邻苯二甲酸酯去除的微生物学机制李雨桐, 余海, 刘坤, 柏宏成, 汪军, 朱正杰 (1830)

养鸡场空气微生物污染及工人呼吸暴露风险白渔樵, 孙兴滨, 仇天雷, 郭雅杰, 高敏, 王旭明 (1840)

玛瑙河多环境介质和铜锈环螺体内微塑料的赋存特征高雅坤, 李卫明, 张续同, 刘子健, 李映成, 丁爽, 王芳炜, 刘流 (1849)

不同官能团微塑料对斑马鱼胚胎菌群和代谢功能的胁迫效应闫振华, 张燕, 包旭辉, 朱培元, 陈玉芳 (1859)

中国省域差异化碳达峰评价方法与应用

刘润璞¹, 彭栓^{1,2}, 陈玉烁¹, 陈民¹, 张楠¹, Nihed Benani^{1,2}, 吕连宏¹, 阳平坚^{1*}

(1. 中国环境科学研究院, 北京 100012; 2. 天津大学环境科学与工程学院, 天津 300350)

摘要: 推动有条件的地区率先行动是“全国一盘棋”实现双碳目标的必然选项。考虑到中国各省的差异性, 研究基于碳排放空间分配测算各省达峰压力, 进而从达峰压力、减排现状、经济发展、政策支持和资源禀赋这 5 个维度构建省域碳达峰能力评价体系, 采用熵值法确定指标权重, 对中国除香港、澳门、台湾和西藏以外的 30 个省级行政区进行碳达峰能力综合评价, 基于评价结果将各省划分为 5 个梯队。结果表明: ①海南和北京等 18 地的碳排放空间呈现盈余, 河北和山东等 8 地碳排放空间呈现赤字, 另有浙江、安徽、河南和湖北这 4 地分配所得的碳排放空间与各自实际排放量相当; ②发达地区碳达峰能力普遍高于欠发达地区, 其中北京和上海等地碳达峰能力尤为突出, 江西和贵州等地碳达峰能力提升空间较大。最后, 针对不同达峰梯队的省份, 因地制宜地提出差异化达峰目标和行动建议。

关键词: 碳达峰; 差异化; 达峰压力; 碳排放空间分配; 碳达峰能力评价

中图分类号: X24 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)03-1233-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202304121

Research on the Evaluation Method and Application of Provincial Differentiated Carbon Peaking in China

LIU Run-pu¹, PENG Shuan^{1,2}, CHEN Yu-shuo¹, CHEN Min¹, ZHANG Nan¹, Nihed Benani^{1,2}, LÜ Lian-hong¹, YANG Ping-jian^{1*}

(1. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: Promoting regions with favorable conditions to take the lead in reaching a carbon peak is an inevitable step towards achieving the dual carbon goals under the "nationwide coordinated action" plan. Considering the differences among Chinese provinces, this study measured the peaking pressure of each province based on the spatial distribution of carbon emissions. We then constructed a provincial peaking capacity evaluation system based on five dimensions, namely, peaking pressure, emission reduction status, economic development, policy support, and resource endowment, to comprehensively evaluate the carbon peaking capacity of 30 provincial administrative regions in China, excluding Hong Kong, Macau, Taiwan, and Tibet, using the entropy value method to determine the index weights. The 30 provinces were divided into five peaking tiers according to the evaluation results. The results showed that: ① 18 regions, such as Hainan and Beijing, displayed a surplus in carbon emission space; eight regions, including Hebei and Shandong, showed a deficit in carbon emission space; and the carbon emission spaces allocated to Zhejiang, Anhui, Henan, and Hubei were comparable to their respective actual emissions. ② Developed regions generally had a higher carbon peaking capacity than that of less developed regions, with Beijing and Shanghai showing outstanding carbon peaking capacity, whereas Jiangxi and Guizhou had more room to improve their capacity. Finally, differentiated peaking targets and priority actions were proposed according to the provinces' different peaking tiers and local conditions.

Key words: carbon peaking; differentiation; peaking pressure; carbon emissions spatial allocation; evaluation of carbon peaking capacity

2030 年前实现碳达峰及 2060 年前实现碳中和, 是我国对世界作出的庄严承诺, 但考虑我国的实际国情, 如期实现“双碳”目标面临诸多挑战^[1]。此前, 中共中央、国务院及各部委、各地方政府陆续出台相关政策文件, 构建完成“1+N”政策体系。“二十大”报告再次明确要求“立足我国能源资源禀赋, 坚持先立后破, 有计划分步骤实施碳达峰行动”。由于各省的发展阶段、自然条件、人口规模、资源禀赋和产业结构存在差异, 在制定碳达峰路径方案时, 必须坚持“全国一盘棋”, 分类施策、因地制宜和上下联动, 梯次有序推进各地区实现差异化碳达峰。

有部分研究基于发展定位或聚类将地区分类, 以探究地区间共性与差异^[2-8]。也有研究基于区域差异性从多个角度选取相关指标对各地低碳潜力进行评价, Yang 等^[9]基于气候雄心、减排状态和排放趋势这 3 个角度构建中国省级碳达峰与碳中和评价指标

体系, 将 30 个省份分为国际化大都市、沿海经济大省等 6 类并提出针对性的建议; Niu 等^[10]从碳排放效率和碳汇能力等 6 个方面对中国各省进行了碳中和能力评价, 将各省划分为 3 类; 孙宝东等^[11]从经济、能源和环境这 3 个角度对我国各省的碳中和能力进行评价; 孙钰等^[12]将创新投入和环境保护支出等指标融入指标体系, 测量了中国各省份生态文明可持续发展效率及区域差异。Hou 等^[13]从安全、效率、清洁和低碳排放这 4 个方面对各省能源可持续性水平进行评估; Zhang 等^[14]从支持和压力指数这 2 个方面选取 26 个指标评价了中国主要城市的城市资源和环

收稿日期: 2023-04-14; 修订日期: 2023-06-05

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 (2021YSKY-01)

作者简介: 刘润璞 (1999~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为环境规划与管理及双碳政策与低碳转型, E-mail: liurunpu21@mails.ucas.ac.cn

* 通信作者, E-mail: yang.pingjian@craes.org.cn

境承载力(RECC);Shi等^[15]从经济发展、社会民生和资源环境这3个角度筛选多个指标构建城市绿色经济评价指标体系,并针对15个副省级城市进行实证分析;Yu等^[16]从能源、经济、环境、技术和社会等方面对中国30个省份2011~2015年可再生能源开发利用(REDU)的综合绩效进行了评价;张保留等^[17]构建城市碳达峰碳中和行动指数评估指标体系以评价当前城市的碳达峰碳中和表现;李春花等^[18]基于绿色设计生产能力等4个准则构建了绿色设计能力指标体系;汪明月等^[19]基于经济、社会和环境这3个要素构建区域减排能力评价指标体系;李铜山等^[20]从碳源与碳汇两个方面构建了省域农业碳中和能力评价体系;王怡^[21]则将脱钩系数作为省域碳达峰的影响因素之一;也有研究在进行碳排放预测时将技术创新、政府干预与环境规制考虑在内^[22, 23].可以看出,当前研究从环境与经济耦合的角度对省份绿色低碳进程进行评价,但针对各省实现碳达峰的能力和可行性评价还有待进一步研究.此外,已有评价体系所涉及的指标多关注于区域低碳发展能力和社会经济发展状态,对于碳排放目标约束和压力缺乏考虑.

达峰压力相关研究基于自上而下的视角,以达成特定目标为约束,反向计算出一定时期内所允许的碳排放总量,称之为总碳排放权或总碳排放空间,并依据一定原则分配给各地^[24].李小胜等^[25]基于效率原则对各省碳排放额度进行分配,在探讨分配原则方面,单一的原则已不能满足分配有效性的需要^[26];欧元明^[27]测算了省域碳公平与碳转移指数并进行省域碳排放权分配,指出单一指标存在公平性问题.因此,公平性和效率性分配原则的结合已经获得了较为广泛的应用.王慧慧等^[28]基于碳排放强度和人均碳排放对132个国家的碳排放权进行分配;Feng等^[29]基于历史累计排放量、人口和GDP等指标构造加权投票模型对2020年和2030年的碳排放权进行双重分配;同时也有部分研究者出于可行性和可持续原则的考虑纳入相关分配指标,王文举等^[30]根据公平性和可持续发展原则与效率性原则得到不同侧重的分配方案,最后基于熵值法整合得到综合性碳配额分配方案;宋敏等^[31]将人均碳排放、人口、能耗强度、碳生产力、三产占比、科技水平、城市化率和森林覆盖率等指标引入分配模型.碳排放空间与实际碳排放之间的差值可反映各地减排责任及减排压力^[32],但碳排放权测算与分配过程中存在较大不确定性^[33, 34].王勇等^[35]将人口、GDP、累计能源碳排放、碳生产力和三产比重等指标纳入分配体系,并指出发展缓慢的西部地区面临较大压力;方恺等^[36]额

外考虑了基尼系数、研究支出占比、煤炭消费比重、公共预算收入、能源消费弹性系数和生态系统恢复力等指标;田云等^[37]在人口、GDP和碳生产力的基础上加入保障性指标,结果偏好低碳禀赋较好的省份,而部分重工业省份和能源基地省份减排压力较大,其他研究也有类似结论^[38, 39].Cui等^[40]基于公平、效率和可持续原则研究了中国省域电力部门碳配额的分配情况,结果对中西部省份不利.可以看出,当前基于碳排放空间分配探究差异化碳达峰的相关研究充分考虑了公平性和效率性原则,但对于可行性与可持续性方面的指标考虑不足,从而导致部分省份减排责任和压力过大.

基于此,本文根据碳排放分配体系测算中国除香港、澳门、台湾和西藏以外的30个省级行政区的碳达峰压力,并将其纳入省域碳达峰能力综合评价体系,对各省碳达峰能力开展评价,以评价结果划分各省梯次达峰顺序,识别各梯队省份实现碳达峰的挑战与优势,旨在为各省份更好地实现差异化碳达峰提供支撑.

1 材料与方法

1.1 省域碳达峰能力评价方法

1.1.1 省域达峰压力测算方法

(1)总碳排放空间测算 本文根据我国GDP和碳排放强度测算总碳排放空间.碳排放强度目标设定以我国宣布的2030年单位GDP碳排放量较2005年减少65%的硬性目标作为参考依据.考虑到疫情对经济发展以及碳排放的影响,本文选择将碳排放强度基准年定为2019年,计算可得2019~2030年间的年平均变化率 q ,计算公式如下:

$$q = 1 - \sqrt[11]{\frac{I_{2030}}{I_{2019}}} = 1 - \sqrt[11]{\frac{I_{2005} \times (1 - \beta)}{I_{2019}}} \quad (1)$$

式中, β 为2030年碳排放强度较2005年的下降幅度, I_{2005} 、 I_{2019} 和 I_{2030} 分别为2005、2019和2030年的碳排放强度.

经济增速的设定中2020~2023年GDP增速为实际值.关于剩余年份的预测,我国《政府工作报告》分别将2021、2022和2023年国内生产总值增长年度预期目标设定为6%、5.5%和5%;另有一些权威机构、专家学者预测我国“十四五”及“十五五”的经济增速介于5%~6%之间^[30, 31, 36, 41].因此,本文设定中国2022~2030年GDP增速为5%~6%.

中国2020~2030年碳排放空间计算公式如下:

$$C_t = \text{GDP}_{2020} \times (1 + p)^{(t-2020)} \times I_{2020} \times (1 - q)^{(t-2020)} \quad (2)$$

$$C_{10} = \sum_{t=2020}^{2030} C_t \quad (3)$$

式中, C_t 为第 t 年的碳排放空间, GDP_{2020} 为 2020 年中国 GDP 总量, p 为本文设定的 GDP 年均增速, C_{10} 为 2020~2030 年总碳排放空间。

表 1 碳排放空间分配指标体系

Table 1 Carbon emission spatial allocation index system

分配原则	维度	分配指标	指标说明	指标单位	指标方向
公平性	环境	历史累计碳排放	2001~2019年碳排放总量	万 t	负向
	经济	人口数量	各省当年常住人口数量	万人	正向
		GDP	各省当年地区生产总值	亿元	正向
效率性	环境	碳生产力 ^[31,35]	GDP/碳排放总量(以 CO ₂ 计)	万元·t ⁻¹	正向
	经济	单位 GDP 能耗强度	能源消费总量/GDP(以标煤计)	t·万元 ⁻¹	负向
可行性	环境	煤炭消费占比	煤炭消费量/能源消费总量	%	正向
	经济	第三产业比重 ^[31,35]	三产产值/地区 GDP	%	负向
可持续性	环境	森林覆盖率 ^[31,36]	森林覆盖面积/土地面积	%	正向
	经济	城市化率 ^[31,36]	城镇人口/总人口	%	负向

(3) 基于主成分分析法确定各指标权重 客观赋权法受主观因素影响较小, 其中熵值法适合数据独立性较强的指标, 而主成分分析法适用于信息重复的指标体系^[42]。经过 KMO 和 Bartlett 球形度检验, 碳排放空间分配体系指标重复度较高, 主成分分析法适用。

根据指标作用方向进行标准化消除量纲影响, 得到第 i 省第 j 项指标标准化后的数据 x'_{ij} 。

当指标作用方向为正向时, 采用正向指标标准化方法:

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \min_j}{\max_j - \min_j} \quad (4)$$

当指标作用方向为负向时, 采用负向指标标准化方法:

$$x'_{ij} = \frac{\max_j - x_{ij}}{\max_j - \min_j} \quad (5)$$

基于样本矩阵探究指标之间方差最大的线性组合 F_1, \dots, F_q , 即主成分(各主成分之间互不相关, 方向正交)。根据主成分方程计算主成分得分, 并以各主

(2) 碳排放空间分配指标体系构建 当前研究对公平性和效率性及代表指标^[28,32,39]展开充分论述, 部分研究还纳入了其他分配指标^[30,31,35,40], 以反映可行性和可持续性原则。本文基于上述原则从经济和环境这两个维度构建总碳排放空间分配指标体系, 如表 1 所示。

成分方差贡献率占有所有主成分总方差贡献率的比率为权重计算各指标的权重得分。最后对所有指标进行归一化处理, 得到各指标权重。

(4) 达峰压力测算 参考王勇等^[35]的衡量方式, 各省所分配到的碳排放空间与实际碳排放差值即为碳排放空间余额, 归一化得到各省达峰压力。为消除疫情偶然性带来的影响, 选取各省 2019 年碳排放量作为其实际碳排放值。计算公式如下:

$$CES_i = CEQ_i - CE_i \quad (6)$$

式中, CEQ_i 为第 i 省总碳排放空间, CE_i 为第 i 省按实际碳排放估算的 2020~2030 年总碳排放量, CES_i 为第 i 省碳排放空间余额。

1.1.2 省域碳达峰能力评价指标体系构建

基于已有研究所构建的评价体系^[9,11,17,37], 本文选定达峰压力、减排现状、经济发展、政策支持和资源禀赋为一级指标表征碳达峰能力(表 2)。同时, 为避免指标的影响叠加重复, 产业结构、森林覆盖率和能源结构等指标已在碳排放空间分配体系中被采用, 在达峰能力评价体系中不再纳入。

表 2 省域碳达峰能力评价指标体系指标说明

Table 2 Description of indicators of provincial carbon peaking capacity evaluation system

一级指标	二级指标	指标解释	指标单位	指标方向
达峰压力	碳排放空间余额	碳排放空间与实际碳排放之间的差值	亿 t	正向
减排现状	脱钩系数	2015~2019 年碳排放变化率/GDP 变化率	—	负向
	减排效率	2015~2019 年年均碳排放强度下降率	%	正向
经济发展	交通运输结构 ^[9]	公路货运周转量/总货运周转量	%	负向
	经济发展水平	GDP/人口	万元·人 ⁻¹	正向
政策支持	创新投入	R&D 投入金额/GDP	%	正向
	环境污染防治支出	地方财政环境保护支出/地方财政一般预算支出	%	正向
低碳禀赋	风能	年平均风功率密度	W·m ⁻²	正向
	太阳能	水平面年总太阳辐射量	kW·h·m ⁻²	正向

达峰压力反映各省在实现全国达峰目标中的控碳任务难度. 考虑到与共同富裕目标时间的高度重合, 某地碳排放空间余额越多, 碳减排随之引起的经济波动与社会福利损失越小^[43], 可安排较早实现碳达峰并尽可能削减峰值, 从而为其他省份留出周转空间, 故碳排放空间余额为正向指标.

减排现状通过历史表现反映地区在低碳方面的努力和工作基础. Tapio脱钩系数通过计算碳排放变化率和GDP变化率之间的比值量化地区的碳排放脱钩状态, 经测算2015~2019年各省的GDP变化率均为正数, 故脱钩系数越小表明地区经济与碳排放脱钩状态越强, 地区低碳工作越扎实, 越有利于实现碳达峰目标, 因此脱钩系数指标为负向指标. 碳排放强度下降表明地区在能源结构清洁转型或能源效率提高等方面做出重要努力, 这将助推地区实现碳达峰, 故减排效率为正向指标.

地区经济发展水平通过人均GDP反映, 一个地区的经济发展水平越高, 说明基础设施越完备, 人民生活质量和环保意识较高, 越容易在对社会福利影响较小的情况下推进低碳转型, 故经济发展水平为正向指标. 货运周转量与经济发展存在紧密的联系^[44], 且交通逐渐成为高碳排放行业之一, 而公路货运相较于水路、铁路运输能源消耗及碳排放均偏高, 推动公路货运向铁路等转型有助于地区低碳化发展^[45], 因此以公路货运周转量占比表征的交通运输结构为负向指标.

政策支持反映政府对低碳转型工作的重视程度. 创新投入反映地区对科技研发的支持力度^[36], 支持力度正向推动低碳技术的研发, 促进地区低碳转型, 故创新投入为正向指标. 环境污染防治支出反映地区对环境保护的重视程度^[36], 而碳排放与大气污染物治理具有协同效应^[46], 故环境污染防治支出为正向指标.

资源禀赋反映地区发展可再生能源的条件, 结合“十四五”可再生能源发展规划目标主要对风能和光能展开评价^[9,11]. 年平均风功率密度、水平面年总太阳辐射量分别反映区域发展风电、光伏发电的资源禀赋. 数值越高, 说明地区发展可再生能源的能力越强, 具有通过清洁能源转型来实现区域碳达峰的优势, 故两项指标均为正向指标.

省域碳达峰能力评价体系指标独立性较高, 采用熵值法确定各指标的权重, 据此计算省域碳达峰能力综合得分.

$$ZS_i = \sum_{j=1}^m W_j \times x'_{ij} \quad (7)$$

式中, ZS_i 为第 i 省碳达峰能力综合得分, W_j 为第 j 个指

标权重.

1.2 数据来源

全国和30个省份能源碳排放数据来源于中国碳排放数据库(CEADs), 部分省份缺失早期数据采用线性插值法补齐; 人口、GDP、第三产业比重、城市化率、森林覆盖率和环境污染防治支出等指标来源于国家统计局(其中, 我国2005~2019年GDP数据以2015年为基期计算不变价); 单位GDP能耗强度、煤炭消费占比、公路货运周转量占比和创新投入等指标来源于各省统计年鉴或公开数据; 各省年平均风功率密度和水平面年总太阳辐射量数据来源于《中国风能太阳能资源年景公报》.

2 结果与讨论

2.1 省域碳达峰能力评价结果

2.1.1 省域达峰压力测算结果

通过碳排放空间分配体系测算各省达峰压力, 权重计算结果如表3所示. 从分配原则来看, 公平性和可行性原则极大影响了碳排放空间分配结果, 可持续性原则影响稍弱. 从两大维度上来看, 环境维度指标权重占比为41.00%, 经济维度指标权重占比为59.00%, 经济维度指标在影响碳排放空间分配上占据主导地位.

表3 碳排放空间分配体系各指标权重
Table 3 Weight of each index of carbon emission spatial allocation system

原则	指标	指标权重/%	原则项权重占比/%
公平性	历史累计碳排放	10.50	33.47
	人口	10.40	
	GDP	12.57	
效率性	碳生产力	9.80	21.55
	单位GDP能耗	11.75	
可行性	第三产业比重	13.14	24.17
	煤炭消费占比	11.03	
可持续性	城市化率	11.14	20.81
	森林覆盖率	9.67	

根据表1所示碳排放空间分配体系对各省碳排放空间进行分配, 结果如图1所示. 中部和东南沿海省份分配到的碳排放空间较多, 广东、河南和江西等省具有较高碳排放空间. 广东省人口和GDP均位居全国前列, 且生产效率较高. 河南省和江西省产业结构调整空间较大, 且单位GDP能耗强度较低, 江西森林覆盖率和河南城市化率等指标得分各具优势. 整体上看, 北部省份所分配到的碳排放空间相对较少, 北部省份的碳排放空间排名普遍在全国下游, 而东部和南部省份除上海外均位于全国上游. 北部省份历史累计碳排放、城镇化率、森林覆盖率各异, 产业

结构和能源结构调整空间较大,但在表征体量和效率的指标方面均较为落后,导致所分配的碳排放空间较低;而南部省份在人口、GDP、碳生产力和单位GDP能耗方面具备一定比较优势。

从结果来看,分配结果与已有研究类似^[35,36],具体省份排名上有所差异,相比于田云等^[37]更加照顾广西和贵州等省份,并对山东和河北等北方重工业省份提出了较高要求。

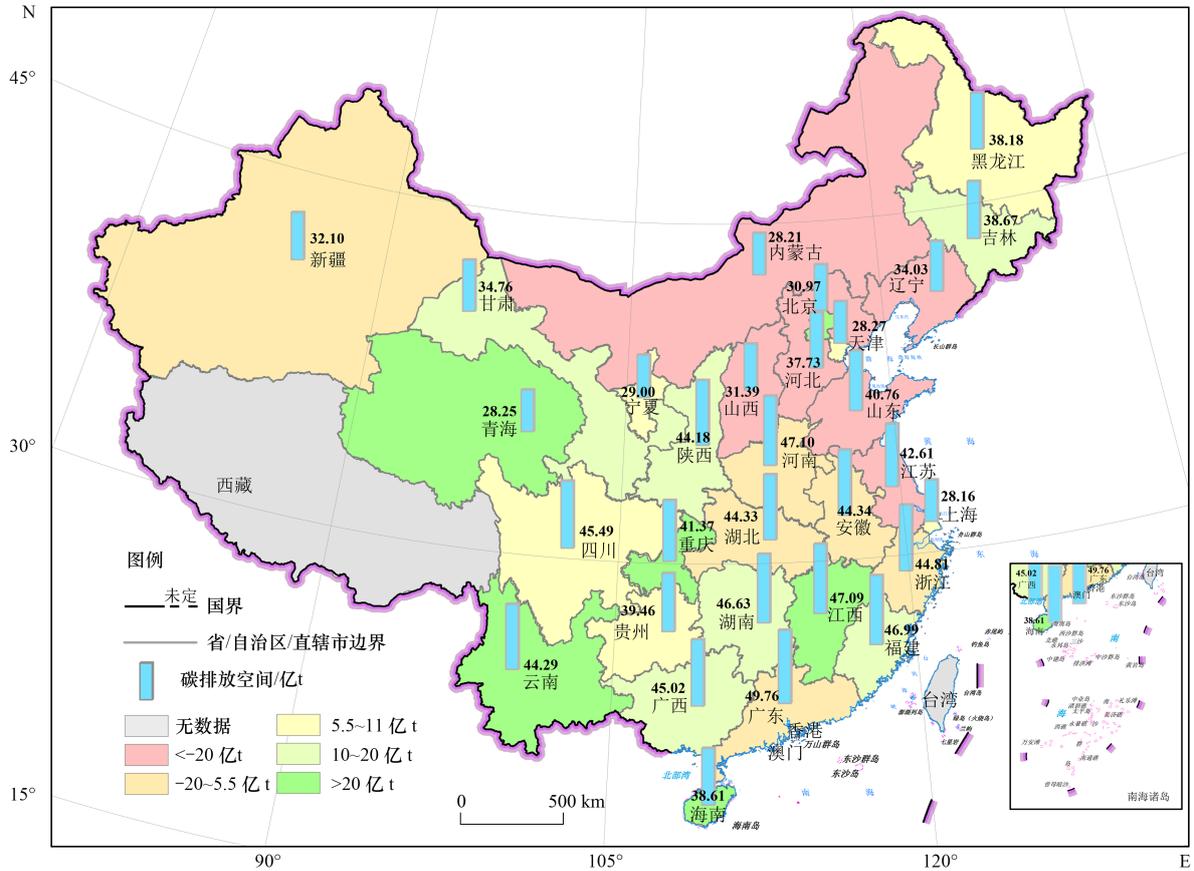


图1 2020~2030年中国省域碳排放空间分配情况

Fig. 1 Spatial distribution of provincial carbon emissions in China from 2020 to 2030

根据式(6)计算各省空间余额,归一化得到各省达峰压力,如图1所示,碳排放空间余额无明显地理分布特征.浙江、安徽、河南和湖北这4地空间余额基本持平;河北、山西、辽宁、江苏、内蒙古、山东、广东和新疆这8省碳排放空间余额呈现赤字,达峰压力较大.河北和山东等重工业省份人均碳排放和工业增加值占比等均处于全国前列,产业结构和能源消费结构亟待转型,需要大力推进节能降碳工作.而江苏和广东虽能源利用水平较高,但体量庞大,带动经济发展的责任较重,对低碳转型提出了更高要求.其余18省市的碳排放空间余额盈余,碳达峰压力较低,其中大部分省份所分配到的碳排放空间处于全国中下游水平,但由于碳排放控制较好,大力开发清洁能源,尤其青海非化石能源占比较高,能源结构较为清洁,所分配到的空间可兼顾达峰目标与发展需要,减排压力较小。

2.1.2 碳达峰能力评价结果

碳达峰能力评价体系的指标权重如表4所示,经

济发展水平和创新投入的权重最高,其次是污染防治支出、风能和交通运输结构这3项指标,权重最低的是太阳能、减排效率和脱钩系数.从一级指标来看,政策支持和经济发展指标贡献突出,减排现状和达峰压力指标则贡献稍弱。

根据权重占比计算各省的碳达峰能力得分,结果如图2所示。

其中北京、上海、天津和广东等东部经济发达省份能力得分较高,从二级指标得分来看,北京和上海达峰压力较小,广东略大,三地经济发展水平和创新投入占比均位居全国前列,脱钩系数、减排效率和交通运输结构均位居中上游,但污染防治支出和低碳禀赋略有不足;而天津则在污染防治支出方面位居前列,达峰压力较小,脱钩系数、交通运输结构也位于全国上游,但创新投入方面存在不足.其他东部发达省份也各有优势,无明显短板。

排名处于中游的省份在二级指标得分上呈现差异,例如海南和青海,达峰压力较小,交通运输结构

表4 碳达峰能力评价体系各指标权重

Table 4 Weight of each index of the carbon peaking capacity evaluation system

项目	一级指标	一级指标权重/%	二级指标	二级指标权重/%
省域碳达峰能力	达峰压力	8.28	碳排放空间余额	8.28
	减排现状	10.53	脱钩系数	4.92
			减排效率	5.60
	经济发展	29.55	交通运输结构	9.40
			经济发展水平	20.15
	政策支持	31.31	创新投入	20.16
			环境污染防治支出	11.16
	低碳禀赋	20.33	风能	13.18
			太阳能	7.15

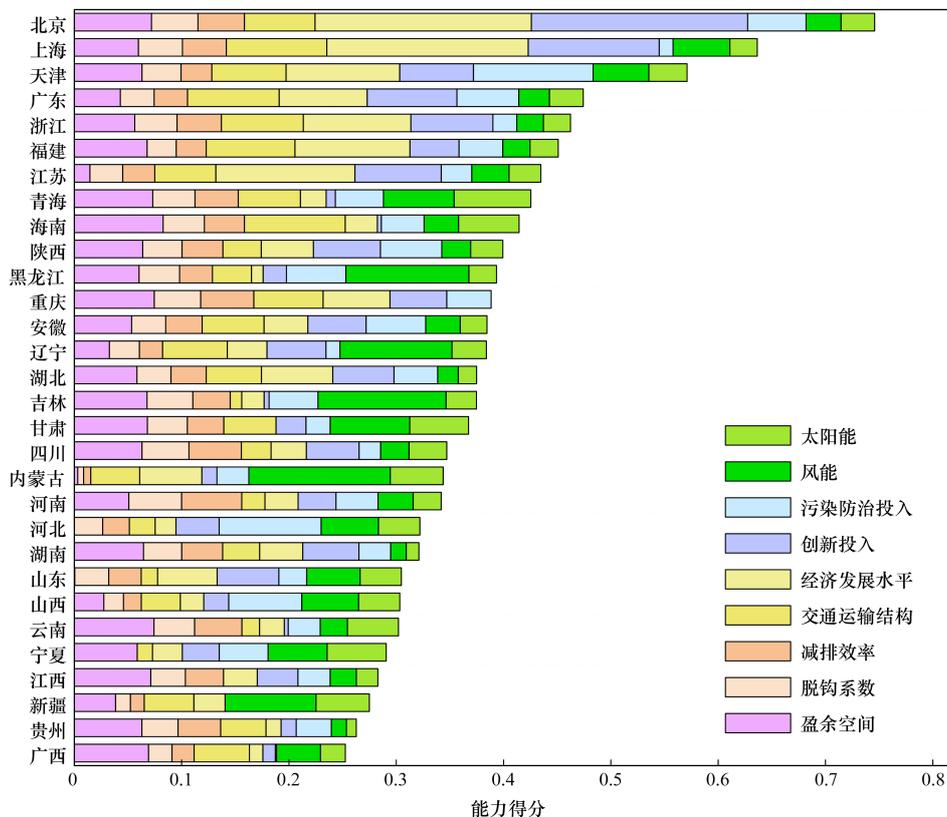


图2 碳达峰能力评价结果

Fig. 2 Evaluation results of carbon peaking capacity

较为清洁,光能资源充足,但创新投入、污染防治支出和经济发展水平是其短板;安徽在多项指标上位居中上游,且煤炭占比较高,降碳空间较大;四川和重庆减排现状和达峰压力得分较高,但创新投入、风能和光能资源略有不足;内蒙古达峰压力较大,减排现状得分较低,但低碳禀赋较好;而湖南各指标不具有显著优势,且低碳禀赋落后于其他省份。

江西、贵州和广西等得分较低的省份在减排现状、经济发展、政策支持中多项指标上处于落后水平,资源禀赋差异较大,仅在达峰压力指标上有微弱优势,总体不具有显著优势,达峰能力支撑不足。

从结果来看,排名靠前和落后的省份与已有研究的结论类似^[4,9-11],而中间部分的省份由于评价侧

重点不同存在部分差异。

2.2 省域差异化达峰评价结果

由于各省碳排放尚处于波动状态,且并无省份明确公布已实现碳达峰,故本文暂不考虑各省已达峰的情况,根据省域碳达峰能力评价结果并结合各省发展状态划分梯队,具体如表5和图3所示。

第一梯队皆为经济较发达省份,此类省份碳达峰能力多位居全国前列,具备较好的社会经济发展条件,是我国经济发展和科技创新的重要地区,且达峰压力较小,低碳发展对经济造成的冲击较低,应在维持经济稳定的同时先行先试,尽快达峰并尽可能削减峰值,为减排压力较大的省份腾出空间,可考虑制定详细行动计划,大力推动“双碳”技术研发,提高

表 5 差异化达峰梯队

Table 5 Differentiated carbon peaking echelons

项目	省份	碳排放占比/%
第一梯队	北京、上海、天津、广东、浙江、福建和江苏	22.77
第二梯队	青海、海南、陕西、黑龙江、重庆、安徽和辽宁	16.26
第三梯队	湖北、吉林、甘肃、四川、内蒙古和河南	21.11
第四梯队	河北、湖南、山东和山西	25.10
第五梯队	云南、宁夏、江西、新疆、贵州和广西	14.76

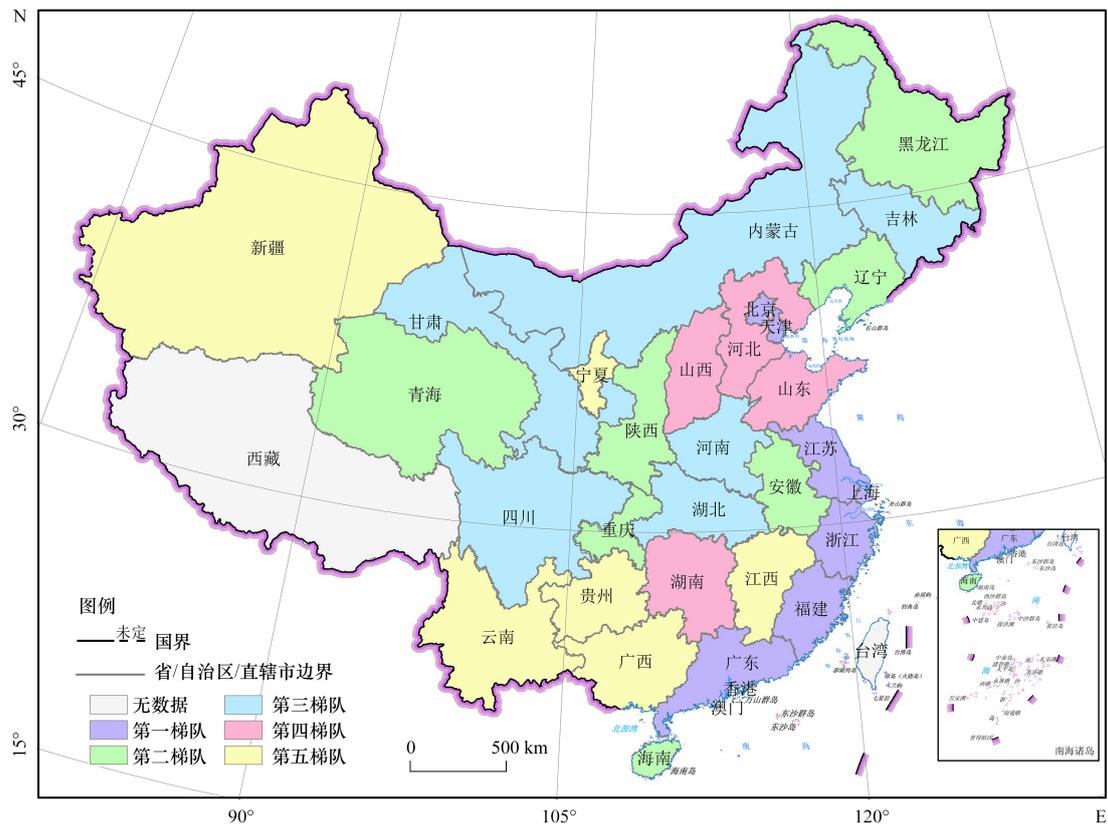


图 3 达峰梯队分布

Fig. 3 Distribution of carbon peaking echelons

绿电调入比例,加强重点领域低碳建设与温室气体监测管理,建议于2025年前达峰.

第二梯队省份各具特点,大部分省份达峰压力较小,减排基础较好,部分省份可通过跨地区的碳排放交易市场,将盈余的碳排放空间转移给空间紧张的省份获取收益,发掘低碳建设与经济发展的协同性.重庆、海南和青海的产业结构、可再生能源、生态禀赋等条件优越,辽宁、黑龙江积极推进东北振兴战略,安徽地处长江经济带的重要位置,陕西是西部大开发的重要枢纽,此类省份发展定位不一,在各二级指标得分上各具优势,具备较快达峰的能力,需发挥本地优势,结合各地特色因地制宜制定达峰方案,规划建立低碳产业体系,发展创新型绿色经济,优化能源使用结构,深入推动产业绿色化改造,建立有利于重点领域能源资源节约及循环利用的政策体系,建议于“十五五”前期达峰.

第三梯队主要以资源禀赋较好的省份和能源输出大省为主,河南和四川经济未形成高耗能行业路径依赖,内蒙古、甘肃承担着能源保供的重任,是维护我国能源安全和实现碳达峰的重要省份.此类省份经济发展大都处于中下游,碳排放较高,碳排放空间较为紧张,能力支撑不足,需尽快弥补短板,根据自身发展特点及战略定位积极探索可再生能源的提质增效与减污降碳协同增效的转型路径,建议于“十五五”中期达峰.

第四梯队以重工业型省份为主,河北、山东和山西这三省产业结构偏重,能源结构偏煤,碳排放较高且碳排放空间紧张,达峰压力较大,是我国实现碳达峰过程中需重点突破的省份,需大力推进产业转型与能源清洁升级,探索减污降碳协同增效的转型路径,锚定碳排放强度指标,通过技术升级提高经济发展质量,加速经济发展和碳排放脱钩,推进形成以电

力转型为主的减污降碳规划路径,建议于“十五五”后期与国家同步达峰。

第五梯队省份大都处于经济转型的早期,受自身资源禀赋、产业结构等方面的影响导致碳达峰能力较弱,多项指标落后于全国大部分省份,经济发展与碳达峰任务较为艰巨,需合理制定产业、能源、交通的“分步走”结构转型计划,强化制度保障与政策支持,建议于2030年后尽快达峰。

3 结论

(1)影响碳排放分配结果的指标中,第三产业比重权重最高,其次是GDP,森林覆盖率指标权重最低。影响碳达峰能力评价结果的指标中,一级指标中政策支持权重较高,二级指标中经济发展水平和创新投入权重较高,脱钩系数和减排效率权重较低。

(2)碳排放空间最多的省份是广东(49.76亿t),其次是河南、江西两省(超过47亿t),而青海、内蒙古和上海这3地获得的碳排放空间不足30亿t,排名靠后。通过计算碳排放空间余额发现,海南和北京等18地达峰压力相对较小;浙江、安徽、河南和湖北这4地达峰压力适中;辽宁、内蒙古和山东等8地达峰压力较大。

(3)基于省域碳达峰能力综合评价体系,东部经济发达省份能力得分较高,部分省份存在一定短板;排名中部省份在部分指标上存在优势,但整体存在较大短板;排名末位的省份在大部分指标上处于相对落后水平,发展空间较大。

(4)根据能力评价结果,全国30省可划分为5个梯队依次达峰,以北京、上海为代表的第一梯队达峰能力领跑全国,以辽宁、重庆为代表的第二梯队需发挥本地优势,以湖北、内蒙古为代表的第三梯队需根据自身发展特点及战略定位积极探索可再生能源的提质增效与减污降碳协同增效的转型路径,以山东、河北为代表的第四梯队亟需产业结构转型与能源清洁升级,以江西、新疆为代表的第五梯队需合理制定各领域“分步走”结构转型计划。

(5)本文主要根据能力评价结果等距设置各梯队省份达峰时间,下一步研究可考虑自下而上的预测与自上而下的分配结合,量化整体和各省具体达峰时间。

参考文献:

[1] 卢纯. 开启我国能源体系重大变革和清洁能源创新发展新时代——深刻理解碳达峰、碳中和目标的历史意义[J]. 人民论坛·学术前沿, 2021, (14): 28-41.
Lu C. Opening a new era of major changes in China's energy system and innovative development of clean and renewable energy—deeply understanding the great historical significance of the

targets of carbon peak and carbon neutralization [J]. *Frontiers*, 2021, (14): 28-41.

- [2] Shan Y L, Guan D B, Hubacek K, *et al.* City-level climate change mitigation in China [J]. *Science Advances*, 2018, **4**(6), doi: 10.1126/sciadv.aaq0390.
- [3] Ramaswami A, Jiang D Q, Tong K K, *et al.* Impact of the economic structure of cities on urban scaling factors: Implications for urban material and energy flows in China [J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2018, **22**(2): 392-405.
- [4] 张诗卉, 李明煜, 王灿, 等. 中国省级碳排放趋势及差异化达峰路径[J]. 中国人口·资源与环境, 2021, **31**(9): 45-54.
Zhang S H, Li M Y, Wang C, *et al.* Carbon emission trend analysis of China's provinces and their differentiated peak strategy design [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2021, **31**(9): 45-54.
- [5] 陈芳, 曹晓芸. 长三角差异化工业碳达峰路径研究[J]. 苏州大学学报(哲学社会科学版), 2022, **43**(4): 41-51.
Chen F, Cao X Y. A study of differentiated industrial carbon peaking path in the Yangtze River delta [J]. *Journal of Soochow University (Philosophy & Social Science Edition)*, 2022, **43**(4): 41-51.
- [6] 郭芳, 王灿, 张诗卉. 中国城市碳达峰趋势的聚类分析[J]. 中国环境管理, 2021, **13**(1): 40-48.
Guo F, Wang C, Zhang S H. Cluster analysis of carbon emissions peaking trends in Chinese cities [J]. *Chinese Journal of Environmental Management*, 2021, **13**(1): 40-48.
- [7] 王逸, 边天夏, 黄贤金. 中国综合经济区碳达峰实现的时空差异研究[J]. 景观设计学(中英文), 2021, **9**(6): 24-43.
Wang Y, Bian T X, Huang X J. Research on time-space differences in the prediction of carbon peaking of China's comprehensive economic zones [J]. *Landscape Architecture Frontiers*, 2021, **9**(6): 24-43.
- [8] Sun X Y, Ma X J, Shi F, *et al.* Decomposition of China's regional carbon emission paths: an analysis of environmental input and output considering regional development differences [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2022, **29**(41), doi: 10.1007/s11356-022-20739-4.
- [9] Yang P J, Peng S, Benani N, *et al.* An integrated evaluation on China's provincial carbon peak and carbon neutrality [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, **377**, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.134497.
- [10] Niu D X, Wu G Q, Ji Z S, *et al.* Evaluation of provincial carbon neutrality capacity of China based on combined weight and improved TOPSIS model [J]. *Sustainability*, 2021, **13**(5), doi: 10.3390/SU13052777.
- [11] 孙宝东, 张军, 春雨童. 中国省域碳中和能力评价及实现路径研究[J]. 环境工程, 2023, **41**(10): 223-229.
Sun B D, Zhang J, Chun Y T. Research on the evaluation and realization path of provincial carbon neutrality capability in China [J]. *Environmental Engineering*, 2023, **41**(10): 223-229.
- [12] 孙钰, 苗世青, 梁一灿. 生态文明可持续发展效率及其区域动态差异——基于31个省份的面板数据[J]. 生态经济, 2021, **37**(1): 212-219.
Sun Y, Miao S Q, Liang Y C. Sustainable development efficiency of ecological civilization and its regional dynamic differences: based on panel data of 31 provinces [J]. *Ecological Economy*, 2021, **37**(1): 212-219.
- [13] Hou X R, Lv T, Xu J, *et al.* Energy sustainability evaluation of 30 provinces in China using the improved entropy weight-cloud model [J]. *Ecological Indicators*, 2021, **126**, doi: 10.1016/j.ecolind.

2021. 107657.
- [14] Zhang F, Wang Y, Ma X J, *et al.* Evaluation of resources and environmental carrying capacity of 36 large cities in China based on a support-pressure coupling mechanism [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **688**: 838-854.
- [15] Shi B F, Yang H F, Wang J, *et al.* City green economy evaluation: empirical evidence from 15 sub-provincial cities in China [J]. *Sustainability*, 2016, **8**(6), doi: 10.3390/su8060551.
- [16] Yu S W, Zheng Y L, Li L X. A comprehensive evaluation of the development and utilization of China's regional renewable energy [J]. *Energy Policy*, 2019, **127**: 73-86.
- [17] 张保留, 白梓函, 阳平坚, 等. 城市碳达峰碳中和行动评估方法与应用 [J]. *环境科学*, 2023, **44**(7): 3649-3659.
Zhang B L, Bai Z H, Yang P J, *et al.* Evaluation method and application for urban carbon peaking & neutrality performance [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(7): 3649-3659.
- [18] 李春花, 孙振清. 碳达峰目标下区域绿色设计能力评价研究 [J]. *科技管理研究*, 2021, **41**(19): 177-183.
Li C H, Sun Z Q. Research on evaluation of regional green design capability under the target of carbon peak [J]. *Science and Technology Management Research*, 2021, **41**(19): 177-183.
- [19] 汪明月, 刘宇, 李梦明, 等. 区域碳减排能力协同度评价模型构建与应用 [J]. *系统工程理论与实践*, 2020, **40**(2): 470-483.
Wang M Y, Liu Y, Li M M, *et al.* Construction and application of evaluation model for coordinated degree of regional carbon emission [J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2020, **40**(2): 470-483.
- [20] 李铜山, 王艳蕊. 基于熵权TOPSIS模型的区域农业碳中和能力评价研究 [J]. *区域经济评论*, 2022, **57**(3): 92-98.
Li T S, Wang Y R. Evaluation of regional agricultural carbon neutralization capacity based on entropy weight TOPSIS model [J]. *Regional Economic Review*, 2022, **57**(3): 92-98.
- [21] 王怡. 中国省域二氧化碳排放达峰情景预测及实现路径研究 [J]. *科学决策*, 2022, (1): 95-105.
Wang Y. Research on carbon dioxide emissions peaking scenario prediction and realization path in Chinese provinces [J]. *Scientific Decision Making*, 2022, (1): 95-105.
- [22] 韩楠, 罗新宇. 多情景视角下京津冀碳排放达峰预测与减排潜力 [J]. *自然资源学报*, 2022, **37**(5): 1277-1288.
Han N, Luo X Y. Carbon emission peak prediction and reduction potential in Beijing-Tianjin-Hebei region from the perspective of multiple scenarios [J]. *Journal of Natural Resources*, 2022, **37**(5): 1277-1288.
- [23] 蒋昀辰, 钟苏娟, 王逸, 等. 全国各省域碳达峰时空特征及影响因素 [J]. *自然资源学报*, 2022, **37**(5): 1289-1302.
Jiang Y C, Zhong S J, Wang Y, *et al.* Spatio-temporal characteristics and influencing factors of carbon emission peak by province of China [J]. *Journal of Natural Resources*, 2022, **37**(5): 1289-1302.
- [24] 朱永彬, 顾恒, 王铮. 不同升温目标下全球与中国未来排放空间分析 [J]. *气候变化研究进展*, 2015, **11**(3): 195-204.
Zhu Y B, Gu H, Wang Z. Global and China's admissible emissions pathways under the different warming targets [J]. *Progressus Inquisitiones DE Mutatione Climatis*, 2015, **11**(3): 195-204.
- [25] 李小胜, 宋马林. “十二五”时期中国碳排放额度分配评估——基于效率视角的比较分析 [J]. *中国工业经济*, 2015, (9): 99-113.
Li X S, Song M L. Regional allocation of CO₂ emissions allowance during the "Twelfth Five-Year Plan" in China—from the perspective of efficiency comparative analysis [J]. *China Industrial Economics*, 2015, (9): 99-113.
- [26] He W J, Yang Y T, Gu W. A comparative analysis of China's provincial carbon emission allowances allocation schemes by 2030: a resource misallocation perspective [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, **361**, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.132192.
- [27] 欧元明. 省域碳排放公平、转移与分配研究 [J]. *生态经济*, 2016, **32**(6): 44-47.
Ou Y M. Research on the fair, transfer and distribution of carbon emissions in the province [J]. *Ecological Economy*, 2016, **32**(6): 44-47.
- [28] 王慧慧, 刘恒辰, 何霄嘉, 等. 基于代际公平的碳排放权分配研究 [J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(6): 1895-1904.
Wang H H, Liu H C, He X J, *et al.* Allocation of carbon emissions right based on the intergenerational equity [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(6): 1895-1904.
- [29] Feng Z Y, Tang W H, Niu Z W, *et al.* Bi-level allocation of carbon emission permits based on clustering analysis and weighted voting: a case study in China [J]. *Applied Energy*, 2018, **228**: 1122-1135.
- [30] 王文举, 孔晓旭. 基于2030年碳达峰目标的中国省域碳配额分配研究 [J]. *数量经济技术经济研究*, 2022, **39**(7): 113-132.
Wang W J, Kong X X. Analysis on China's Provincial Carbon Quota allocation based on the 2030 carbon peak goal [J]. *Journal of Quantitative & Technological Economics*, 2022, **39**(7): 113-132.
- [31] 宋敏, 邹素娟. 黄河流域碳排放权省域分配及碳减排潜力评估——基于2030年碳强度目标 [J]. *科技管理研究*, 2022, **42**(15): 230-239.
Song M, Zou S J. Provincial allocation of carbon emission rights and assessment of carbon-reduction potential in the Yellow River basin under the constraint of 2030 carbon intensity target [J]. *Science and Technology Management Research*, 2022, **42**(15): 230-239.
- [32] 祁悦, 谢高地. 碳排放空间分配及其对中国区域功能的影响 [J]. *资源科学*, 2009, **31**(4): 590-597.
Qi Y, Xie G D. The carbon emission permits allocation and its impact on regional functions in China [J]. *Resources Science*, 2009, **31**(4): 590-597.
- [33] 王利宁, 陈文颖. 全球2℃温升目标下各国碳配额的不确定性分析 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2015, **25**(6): 30-36.
Wang L N, Chen W Y. Uncertainty analysis of national carbon permits under 2℃ target [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2015, **25**(6): 30-36.
- [34] 滕飞, 何建坤, 高云, 等. 2℃温升目标下排放空间及路径的不确定性分析 [J]. *气候变化研究进展*, 2013, **9**(6): 414-420.
Teng F, He J K, Gao Y, *et al.* Uncertainty analysis on cumulative emission and emission trajectory under the 2℃ target [J]. *Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis*, 2013, **9**(6): 414-420.
- [35] 王勇, 程瑜, 杨光春, 等. 2020和2030年碳强度目标约束下中国碳排放权的省区分解 [J]. *中国环境科学*, 2018, **38**(8): 3180-3188.
Wang Y, Cheng Y, Yang G C, *et al.* Provincial decomposition of China's carbon emission rights under the constraint of 2020 and 2030 carbon intensity targets [J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(8): 3180-3188.
- [36] 方恺, 张琦峰, 叶瑞克, 等. 巴黎协定生效下的中国省际碳排放权分配研究 [J]. *环境科学学报*, 2018, **38**(3): 1224-1234.

- Fang K, Zhang Q F, Ye R K, *et al.* Allocating China's carbon emission allowance to the provincial quotas in the context of the Paris Agreement [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38** (3): 1224-1234.
- [37] 田云, 林子娟. 巴黎协定下中国碳排放权省域分配及减排潜力评估研究[J]. *自然资源学报*, 2021, **36**(4): 921-933.
Tian Y, Lin Z J. Provincial distribution of China's carbon emission rights and assessment of its emission reduction potential under the Paris Agreement[J]. *Journal of Natural Resources*, 2021, **36**(4): 921-933.
- [38] Kong Y C, Zhao T, Yuan R, *et al.* Allocation of carbon emission quotas in Chinese provinces based on equality and efficiency principles [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, **211**: 222-232.
- [39] 王洁方, 田晨萌. 基于省域协同的中国低成本碳达峰: 责任共担与利益调控[J]. *统计与决策*, 2022, **38**(5): 185-188.
- [40] Cui X Y, Zhao T, Wang J. Allocation of carbon emission quotas in China's provincial power sector based on entropy method and ZSG-DEA [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, **284**, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124683.
- [41] 中国社会科学院宏观经济研究中心课题组. 未来15年中国经济增长潜力与“十四五”时期经济社会发展主要目标及指标研究[J]. *中国工业经济*, 2020, (4): 5-22.
Research Group of the Macroeconomic Research Center of the CASS. Research on the potential growth of the Chinese economy in the next 15 years and the main goals and indicators of economic and social development during the 14th five-year plan period [J]. *China Industrial Economics*, 2020, (4): 5-22.
- [42] 杨宇. 多指标综合评价中赋权方法评析[J]. *统计与决策*, 2006, (7): 17-19.
- [43] 王勇, 王恩东, 毕莹. 不同情景下碳排放达峰对中国经济的影响——基于CGE模型的分析[J]. *资源科学*, 2017, **39** (10): 1896-1908.
Wang Y, Wang E D, Bi Y. Impact of a peak in carbon emissions on China's economy in different situations: analysis based on CGE model [J]. *Resources Science*, 2017, **39**(10): 1896-1908.
- [44] 刘建翠. 中国交通运输部节能潜力和碳排放预测[J]. *资源科学*, 2011, **33**(4): 640-646.
Liu J C. Energy saving potential and carbon emissions prediction for the transportation sector in China [J]. *Resources Science*, 2011, **33**(4): 640-646.
- [45] 袁志逸, 李振宇, 康利平, 等. 中国交通部门低碳排放措施和路径研究综述[J]. *气候变化研究进展*, 2021, **17**(1): 27-35.
Yuan Z Y, Li Z Y, Kang L P, *et al.* A review of low-carbon measurements and transition pathway of transport sector in China [J]. *Climate Change Research*, 2021, **17**(1): 27-35.
- [46] 王涵, 马军, 陈民, 等. 减污降碳协同多元共治体系需求及构建探析[J]. *环境科学研究*, 2022, **35**(4): 936-944.
Wang H, Ma J, Chen M, *et al.* Analysis of needs and construction of coordinated multi-governance system for pollution reduction and carbon reduction [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2022, **35**(4): 936-944.



CONTENTS

Research on the Evaluation Method and Application of Provincial Differentiated Carbon Peaking in China	LIU Run-pu, PENG Shuan, CHEN Yu-shuo, <i>et al.</i> (1233)
Evolution and Influencing Factors of Spatial Correlation Network of Construction Carbon Emission in China from the Perspective of Whole Life Cycle	REN Xiao-song, LI Zhao-ru (1243)
Efficiency Characteristics and Evolution Patterns of Urban Carbon Metabolism of Production-Living-Ecological Space in Beijing-Tianjin-Hebei Region	TIAN Chao, CHENG Lin-lin, SHAO Ying-chao (1254)
Assessment of CO ₂ Co-benefits of Air Pollution Control Policies in Taiyuan's 14th Five-Year Plan	XIAO Ting-yu, SHU Yun, LI hui, <i>et al.</i> (1265)
Coordinated Control of Carbon Emission Reduction and Air Quality Improvement in the Industrial Sector in Hunan Province	LI Nan, LIU Wan-wan, ZHU Shu-han, <i>et al.</i> (1274)
Coal Control and Carbon Reduction Path in Henan Province's Power Industry Under the Carbon Peak and Neutralization Target: A Medium- and Long-term Study	ZHANG Jing, YANG Meng, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (1285)
Environmental Benefits of Pollution and Carbon Reduction by Bus Fleet Electrification in Zhengzhou	ZOU Chao, WANG Ya-nan, WU Lin, <i>et al.</i> (1293)
Multi-scale Driving Mechanism of Urbanization on PM _{2.5} Concentration in Urban Agglomeration in the Middle Reaches of the Yangtze River	ZHANG Zheng, ZHOU Ting-gang, ZHOU Zhi-heng, <i>et al.</i> (1304)
Analysis of Spatio-temporal Distribution Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} Concentration in Urban Agglomerations on the Northern Slope of Tianshan Mountains	WANG Xiang-nan, ZHANG Zhe, LIU Fang-qing (1315)
Spatial Variability and Source Apportionment of PM _{2.5} Carbon Components in Tianjin	WU Fu-liang, WU Jian-hui, DAI Qi-li, <i>et al.</i> (1328)
Characteristics and Source Analysis of Carbonaceous Aerosols in PM _{2.5} in Huaxi District, Guiyang	GUI Jia-qun, YANG Yuan, WANG Xian-qin, <i>et al.</i> (1337)
Pollution Characteristics, Source Apportionment, and Meteorological Response of Water-soluble Ions in PM _{2.5} in Xinxiang, North China	LIU Huan-jia, LI Lan-qing, LI Huan-li, <i>et al.</i> (1349)
Characterization of Metal Elements in Atmospheric PM _{2.5} and Health Risk Assessment in Heze in Winter from 2017 to 2018	DU Hong-xuan, REN Li-hong, ZHAO Ming-sheng, <i>et al.</i> (1361)
Analysis of the Jumping Characteristics and Influencing Factors of Ozone Pollution in Beijing	PAN Jin-xin, AN Xin-xin, LIU Bao-xian, <i>et al.</i> (1371)
Analysis of Photochemical Characteristics and Sensitivity of Atmospheric Ozone in Nanjing in Summer	LUO Li-tong, ZHANG Yan-lin, LIN Yu-qi, <i>et al.</i> (1382)
Ozone Pollution in Suzhou During Early Summertime: Formation Mechanism and Interannual Variation	WU Ye-zheng, ZHANG Xin, GU Jun, <i>et al.</i> (1392)
Distribution Characteristics, Ecological Risk Assessment, and Source Tracing of Heavy Metals in the Sediments of Typical Lakes in the Middle Reaches of the Yangtze River	LU Hong-bin, LU Shao-yong, LI Xiang, <i>et al.</i> (1402)
Spatiotemporal Distribution and Source Analysis of Heavy Metals in Surface Sediments in Lake Ulansuhai Based on PCA-APCS-MLR Model	CUI Zhi-mou, SHI Xiao-hong, ZHAO Sheng-nan, <i>et al.</i> (1415)
Spatial and Temporal Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Water of Changshou Lake Reservoir, Chongqing	ZHANG Rui-xi, LIU Ya-jun, LUO Yong-nan, <i>et al.</i> (1428)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Microplastics in the Yangtze River Basin	LI Si-qiong, WANG Hua, CHU Lin-you, <i>et al.</i> (1439)
Assessment of Microplastic Pollution and Estimation of Annual Emission Volume in the Dongshan Canal of Yichang City	DING Shuang, LI Wei-ming, ZHANG Xu-tong, <i>et al.</i> (1448)
Occurrence Characteristic and Risk Assessment of Microplastics in Sishui River (Xingyang Section)	ZHAO Chang-min, HE Bing, LI He-tong, <i>et al.</i> (1457)
Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Pharmaceuticals and Personal Care Products in Drains Flowing into the Yellow River of Ningxia	GAO Li, LI Ling-yun, ZHENG Lan-xiang, <i>et al.</i> (1468)
Characteristics and Risk Assessment of Antibiotic Contamination in Oujiang River Basin in Southern Zhejiang Province	ZHONG Yi-xin, LI Li-xiang, WU Xin, <i>et al.</i> (1480)
Spatial-temporal Distribution and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediments of Poyang Lake	MA Yan, SUN Chen, BI Jia-le, <i>et al.</i> (1492)
Change and Prediction of Water Purification Function in the South Bank of Hangzhou Bay in the Past 20 Years	WANG Shan-shan, CAO Gong-ping, XU Ming-wei, <i>et al.</i> (1502)
Effects of Land Use Types on Water Quality at Different Buffer Scales: Tianjin Section of the Haihe River Basin as an Example	DAI Meng-jun, ZHANG Bing, DU Qian-qian, <i>et al.</i> (1512)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Shallow Groundwater in Anqing Section of the Yangtze River Basin	LIU Hai, SONG Yang, LI Ying-chun, <i>et al.</i> (1525)
Dynamic Changes of Dissolved Organic Matter Derived from Algal Decomposition and the Environmental Effects in Eutrophic Lakes	ZHANG Jin, CHEN Ming-ying, HAO Zhi-neng, <i>et al.</i> (1539)
Degradation of Carbamazepine in Water by UV-activated Sulfite Process	LIN Tao, YUAN Yu-jie (1553)
Detection, Generation, and Control of Disinfection By-products of Reclaimed Water	LIAO Yu-feng, WANG Zheng, PAN Yang, <i>et al.</i> (1561)
Absorption of Ammonium by Three Substrates Materials in Constructed Wetland System	HE Qiang, CHEN Bo-wen, HAN Ling, LIU Ming, <i>et al.</i> (1577)
Ecological Environment Assessment and Driving Mechanism Analysis of Nagqu and Amdo Sections of Qinghai-Xizang Highway Based on Improved Remote Sensing Ecological Index	FU Kai-xiang, JIA Guo-dong, YU Xin-xiao, <i>et al.</i> (1586)
Spatial-temporal Evolution and Driving Factors Analysis of Ecological Environment Quality in Daihai Basin based on AWRSEI	ZHAO Jia-li, LI Xing, SUN Bing (1598)
Quantitative Assessment of the Impact of Climate Change on the Growing Season of Vegetation Gross Primary Productivity in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River	XU Yong, PAN Yu-chun, ZOU Bin, <i>et al.</i> (1615)
Effect of Vegetation Restoration on Soil Organic Carbon Storage in Coal Mining Areas Based on Meta-analysis	LI Jian-ming, KANG Yu-xin, JIANG Fu-zhen, <i>et al.</i> (1629)
Effects of Continuous Annual Crop Rotation and Fallow on Soil Aggregate Stability and Organic Carbon	LU Ze-rang, LI Yong-mei, YANG Chun-huai, <i>et al.</i> (1644)
Effects of Four Amendments on Fertility and Labile Organic Carbon Fractions of Acid Purple Soil	DING Xin-ru, YAN Ning-zhen, WANG Zi-fang, <i>et al.</i> (1655)
Changes in Soil Nitrogen Components and Their Relationship with Environmental Factors with Different Tea Plantation Ages	SHAO Qi, WU Tao, XIE Xue-feng, <i>et al.</i> (1665)
Nutrients and Ecological Stoichiometry Characteristics of Typical Wetland Soils in the Lower Yellow River	WANG Chuan-ying, WANG Kai-yue, WANG Hao-ran, <i>et al.</i> (1674)
Effect of Film Mulching Age and Organic Fertilizer Application on the Distribution Characteristics of Microplastics in the Soil of a Peanut Field	SONG Ning-ning, LI Meng-jia, WANG Xue-xia, <i>et al.</i> (1684)
Effects of Straw Returning and Biochar Addition on Greenhouse Gas Emissions from High Nitrate Nitrogen Soil After Flooding in Rice-vegetable Rotation System in Tropical China	HU Tian-yi, CHE Jia-yue, HU Yu-jie, <i>et al.</i> (1692)
Tillage Depth Regulation and the Effect of Straw Return on Soil Respiration in Farmland	CHEN Xi, ZHANG Yan-jun, ZOU Jun-liang, <i>et al.</i> (1702)
Distribution Prediction of Soil Heavy Metals Based on Remote Sensing Temporal-Spatial-Spectral Features and Random Forest Model	WANG Ze-qiang, ZHANG Dong-you, XU Xi-bo, <i>et al.</i> (1713)
Characteristics and Identification Priority Source of Heavy Metals Pollution in Farmland Soils in the Yellow River Basin	LI Jun, LI Xu, LI Kai-ming, <i>et al.</i> (1724)
Characteristics of Cd Flux in Topsoil Around Typical Mining Area in Hezhou, Guangxi	YANG Ye-yu, LI Cheng, YANG Zhong-fang, <i>et al.</i> (1739)
Potential Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Fengdong New District Based on Information Diffusion Model	YANG Nan-nan, HAN Ling, LIU Ming (1749)
Traceability Analysis and Environmental Quality Assessment of Soil Heavy Metal Pollution in West Hunan Province	XIAO Kai-qi, XU Hong-gen, GAN Jie, <i>et al.</i> (1760)
Distribution Characteristics, Source Analysis and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Typical Industry Reclaimed Soil	SHEN Cheng, WANG Wen-juan, SHA Chen-yan, <i>et al.</i> (1769)
Provincial-scale Soil As Migration and Transformation and Rice Safe Planting Zoning: A Case Study of Guizhou Province	DONG Xin-yue, WU Yong, ZHOU Zi-han, <i>et al.</i> (1781)
Effect of Silica Fertilizer (Husk Ash) to Improve Soil Quality and Reduce Cd and As Accumulation in Rice	YI Xuan-tao, OUYANG Kun, GU Jiao-feng, <i>et al.</i> (1793)
Effect of EDDS Application on Soil Cu/Cd Availability and Uptake/transport by Castor	LIU Wen-ying, WU Gang, HU Hong-qing (1803)
Blocking Effects of Foliar Conditioners on Cadmium, Arsenic, and Lead Accumulation in Wheat Grain in Compound-contaminated Farmland	XIAO Bing, WANG Qiu-shi, GAO Pei-pei, <i>et al.</i> (1812)
Soil Microbial Community Structure and Functional Diversity Character of Abandoned Farmland in Minqin Oasis	LI Chang-le, ZHANG Fu, WANG Li-de, <i>et al.</i> (1821)
Microbial Mechanisms of Removal of Phthalic Acid Esters in Purple Soils Revealed Using Metagenomic Analysis	LI Yu-tong, YU Hai, LIU Kun, <i>et al.</i> (1830)
Air Microbial Contamination and Risk of Respiratory Exposure of Workers in Chicken Farms	BAI Yu-qiao, SUN Xing-bin, QIU Tian-lei, <i>et al.</i> (1840)
Occurrence Characteristics of Microplastics in Multi-environmental Media and <i>Bellamyia aeruginosa</i> of Manao River	GAO Ya-kun, LI Wei-ming, ZHANG Xu-tong, <i>et al.</i> (1849)
Biological Effect of Microplastics with Different Functional Groups on the Bacterial Communities and Metabolic Functions of Zebrafish (<i>Danio rerio</i>) Embryos	YAN Zhen-hua, ZHANG Yan, BAO Xu-hui, <i>et al.</i> (1859)