

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, 邵盈鈔 (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, 蒋福祺, 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地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, 郭雅志, 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)

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

(中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083)

摘要: 探究城市三生空间系统的碳代谢效率有助于实现区域要素整合和空间优化。基于城市代谢视角, 采用物质流分析法构建了京津冀地区三生空间碳代谢效率评估框架, 并运用超效率DEA模型和Malmquist指数分析了2000~2020年三生空间碳代谢效率的时空分布、动态变化及演进模式。结果表明: ①2000~2020年, 京津冀地区三生空间碳代谢效率呈波动增长趋势, 各城市碳代谢效率空间分异明显, 碳代谢效率水平整体偏低, 呈中部高、南北低的分布格局。②京津冀地区碳代谢效率全要素生产率呈增加趋势, 技术进步变化和纯技术效率贡献作用不显著。超过50%的城市全要素生产率呈改善趋势, 仅有38.46%的城市在碳代谢效率改善过程中存在技术进步现象, 超过1/2地区的纯技术效率呈下降趋势, 大部分城市的技术效率和规模效率变化指数大于1。③各城市碳代谢效率呈现不同的类型特征, 按照其发展路径划为稳定式、反复式、渐进式和突变式这4种演进模式。各城市应据此采取差异化措施, 合理配置三生空间资源, 提高技术水平和规模效率, 以期提高城市碳代谢效率水平。

关键词: 三生空间; 碳代谢效率; 演进模式; 物质流分析; 超效率DEA模型; Malmquist指数

中图分类号: X24 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)03-1254-11 DOI: 10.13227/j.hjkk.202303122

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

(College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: This study explored the carbon metabolism efficiency of a production-living-ecological space system, which is of great significance for regional factor integration and spatial optimization. In this study, the material flow analysis method was introduced to establish a framework for evaluating the carbon metabolism efficiency of the production-living-ecological space system, and the super-efficiency DEA model and Malmquist index were used to empirically analyze the spatio-temporal distribution, dynamic change, and evolution patterns of the carbon metabolism efficiency of production-living-ecological space in the Beijing-Tianjin-Hebei Region, China, from 2000 to 2020 on the basis of the urban metabolic perspective. The results showed that: ① the carbon metabolism efficiency of the production-living-ecological space showed a fluctuating growth trend, indicating the significant spatial differentiation of carbon metabolism efficiency in each city. There was a low overall carbon metabolism efficiency level, with a distribution pattern of being high in the middle and low in the north and south. ② The Malmquist index showed that the Total Factor Productivity (TFP) of carbon metabolism efficiency was greater than 1, and both the Technical Change (TC) and Pure Efficiency Change (PEC) were less than 1, in which the TFP showed an increasing trend, whereas there was no significant contribution of technological progress or pure technical efficiency to carbon metabolism efficiency. The total factor productivity of more than 50% of the cities showed an improving trend, only 38.46% of which made technological progress in improving carbon metabolism efficiency, and more than half of the urban pure technical efficiency showed a decreasing trend, in which the technical efficiency change and scale efficiency change were greater than 1 in most cities. ③ There were different types of carbon efficiency characteristics in each city, and according to the movement rules of the corresponding points in the quartile map, the evolution patterns of tourism industry efficiency were classified into stable, reciprocating, progressive, and abrupt. Therefore, local governments should adopt differentiated strategies to reasonably allocate spatial resources of production-living-ecological space and improve the technical level and scale efficiency, so as to improve the efficiency of urban carbon metabolism.

Key words: production-living-ecological space; carbon metabolism efficiency; evolution mode; material flow analysis; super-efficiency DEA model; Malmquist index

城市是以人类行为为主导的社会-经济-自然复合生态系统^[1]。生产、生活和生态空间(简称三生空间)作为人类生存和发展的载体,在城市运转过程中进行着物质资源的投入、产品服务以及废物的输出,不断进行着新陈代谢,并实现整个系统的更新、完善和优化^[2]。土地利用是人类最基本的活动之一,也是陆地生态系统碳循环过程的重要环节,在一定程度上对城市碳排放变化产生影响,其产生的碳排放仅次于化石能源燃烧,是大气中温室气体增加的主要原因^[3,4]。随着社会经济的发展,碳排放的不断增加导致城市面临着人地矛盾突出、资源与能源开发利用率低、环境污染严重等一系列生态环境问题,严重制约着城市经济的可持续发展^[5,6]。党的十八大报告

首次提出三生空间的概念,并逐渐成为国土空间领域的热点,同时也为国土空间优化指明了方向^[7]。2020年习近平总书记提出中国“碳达峰”、“碳中和”(“双碳”)的宏伟目标,将“双碳”目标提到了前所未有的战略高度^[8]。“双碳”目标作为国土空间规划的战略定位,是城市发挥减排潜力,完成减排目标的重要方面。

城市碳代谢是指城市系统中不同组分间物质和能量流动、交换的过程,包括碳排放和碳储存,其从

收稿日期: 2023-03-14; 修订日期: 2023-06-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(41877533)

作者简介: 田超(1992~),女,博士研究生,主要研究方向为土地利用碳排放和土地利用规划与评价, E-mail: cumtbtc@126.com

* 通信作者, E-mail: chll@cumtb.edu.cn

资源利用的视角探究城市社会、经济和生态环境间的联系程度,并揭示对外部环境的响应^[9,10]。城市碳代谢效率则是衡量城市碳代谢质量和水平的重要指标,反映城市碳代谢过程中单位投入和产出的比例^[11,12]。“碳”通过生物过程和人类活动在自然生态系统中进行碳循环,并对城市系统的碳代谢效率产生影响^[13]。城市三生空间作为复杂的复合系统,其内部要素具有不同的空间异质性^[14]。“碳”作为城市资源生产的核心要素,既可以协调三生空间系统资源的开发和利用关系,还对三生空间内部的更新和效率变化产生重要作用。因此,基于三生空间对城市碳代谢效率进行解析,不仅有利于提高城市能源利用率,也可为城市可持续发展和国土空间优化提供重要的参考依据。

早期关于代谢效率的研究主要集中在美国、加拿大和俄罗斯等国家^[15,16],我国对代谢效率的研究起步相对较晚,主要对其应用和核算方法进行分析。在代谢效率的应用方面多集中在城市代谢效率^[2,17]、物质代谢效率^[18]、水资源代谢效率^[19]和产业代谢效率^[20]等。近年来,随着对城市气候变化问题的日益关注,城市碳代谢效率的相关研究逐渐成为热点^[11,21]。此外,随着三生空间内涵的不断深入,不少学者开始基于土地利用变化来探究碳代谢对城市系统中人工和自然组分的影响^[11,22]。在研究方法上,主要包括物质流分析法(material flow analysis, MFA)^[23]、能量流分析法(energy flow analysis, EFA)^[24]、生态网络分析法(ecological network analysis, ENA)^[25]和数据包络模型^[12,26](data envelopment analysis, DEA)等。目前尽管有少数研究围绕三生空间碳代谢效率等问题,但仍存在一些局限,如三生空间作为自然和社会经济复合系统,缺少从系统论的角度探索其子系统间要素相互作用关系,忽视了内部要素的物质流动过程,难以实现客观、科学的评价与优化。此外,基于传统的分析模型在处理非期望产出以及区分有效的决策单元上存在不足,且无法充分反映代谢效率有效效率的达成程度,结果容易出现较大偏差。超效率DEA模型是基于投入产出因素进行分析,可有效区分决策单元结果的差异性,目前广泛应用在区域效率的相关研究中^[27,28]。

鉴于此,本文以京津冀地区为例,结合物质流分析、超效率DEA模型和Malmquist指数及其分解,选取相应的投入产出指标,分析2000~2020年三生空间碳代谢效率的动态变化及演进模式,以揭示京津冀地区13个城市的三生空间碳代谢效率水平,以期为城市减排目标实现和相关决策部门制定差异化策略提供参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

京津冀地区位于华北平原的北部,总面积为21.6万km²,下辖北京市、天津市和河北省的石家庄、唐山、邯郸、保定、沧州、邢台、廊坊、承德、张家口、衡水和秦皇岛这11个地级市。京津冀协同发展战略是我国三大战略之一,在“双碳”目标的背景下,实现区内资源共享和联动减排是其战略的重要内容。2020年末,全区常住人口13207万人,GDP生产总值为87590亿元。随着城市规模的扩大,京津冀地区生态环境问题日益显现,面临产业结构单一、资源利用率低和生态空间破坏等问题,严重制约城市建设和发展^[29,30]。作为我国北方规模最大的城市群,京津冀地区经济的健康发展直接影响华北地区乃至全国经济建设和城市化进程。因此,探究京津冀地区城市碳代谢效率水平及其演变模式具有重要意义。

1.2 数据来源与处理

(1)土地利用数据 来源于中国科学院资源环境科学与数据中心的2000、2005、2010、2015和2020年这5期的Landsat-TM和Landsat-8 OLI遥感卫星数据,空间分辨率为30m×30m。其中遥感影像数据基于ArcGIS和ERDAS软件根据行政边界进行图像裁剪、大气校正、波段提取、几何配准、图像合成、精度验证和镶嵌等预处理。根据土地属性将其分为耕地、林地、草地、水域、城镇用地、农村居民点、工矿用地和未利用地,并且统一采用Albers正轴投影系统,通过核查线随机抽样核查方法和野外调查法进行验证^[31]。基于精度检验Kappa系数达到0.83以上,解译精度较高,可为后续研究提供支持。由于土地利用的多功能性,在划分三生空间范围时仍存在一定的主观误差,因此基于土地利用主导功能法对三生空间进行分类^[32,33],确定生产空间(耕地和工矿用地)、生活空间(城镇用地和农村居民点)和生态空间(林地、草地、水域和未利用地)。

(2)统计数据 ①能源数据:原煤、石油、天然气和工业能源等数据来源于2000~2020年《北京市统计年鉴》、《天津市统计年鉴》、《河北省统计年鉴》以及《中国能源统计年鉴》;②社会经济数据:各城市市物质、产业从业人员、产业产值和固定资产投资等数据均来源于2000~2020年北京市、天津市和河北省的统计年鉴、国民经济和社会发展公报以及各区市的统计年鉴等资料。

2 研究方法

2.1 三生空间碳代谢效率评估框架

京津冀地区自然资源丰富,但其生态系统脆弱,土地生态压力较大.因此,基于研究区地理位置的特殊性,考虑到城市经济发展、资源开采与生态环境保护间的矛盾,本文结合物质流分析法和超效率DEA模型,基于三生空间系统,从资源消耗、经济发展和环境压力三方面构建城市碳代谢效率评价框架.物质流分析是城市物质代谢研究的主要方法,其基于质量守恒定律,通过构建相应的指标体系,对特定时间和空间范围内的物质输入和输出进行量化分析,进而探究城市物质资源状况^[34,35].物质流分析法可用于分析城市经济发展、三生空间资源利用效率,可为衡量三生空间碳代谢水平、城市环境状况和构建可

持续发展指标提供重要的参考依据^[18].2001年欧盟统计局公布的《经济系统物质流分析方法导则》,物质流分析主要包括物质输入、过程和输出三大模块^[36].本文将物质流分析中的物质输入和输出模块分别对应三生空间碳代谢系统的投入和产出特征.此外,为全面反映城市经济系统的物质投入与环境影响状况,选取资源消耗反映三生空间系统的物质投入,包括水资源和各类能源等,对应DEA模型的物质投入部分.经济发展是基于生产空间和生活空间而开展的社会经济活动,包括社会资本、人力资源和土地资源禀赋的投入,并反映碳代谢过程中输出的“好”产出,对应DEA模型的资本、劳动力和土地投入以及期望产出部分.环境压力主要反映三生空间系统运行中的物质产出,包括废水、大气污染物和固体废弃物等,即“坏”产出,对应DEA模型的非期望产出部分(图1).

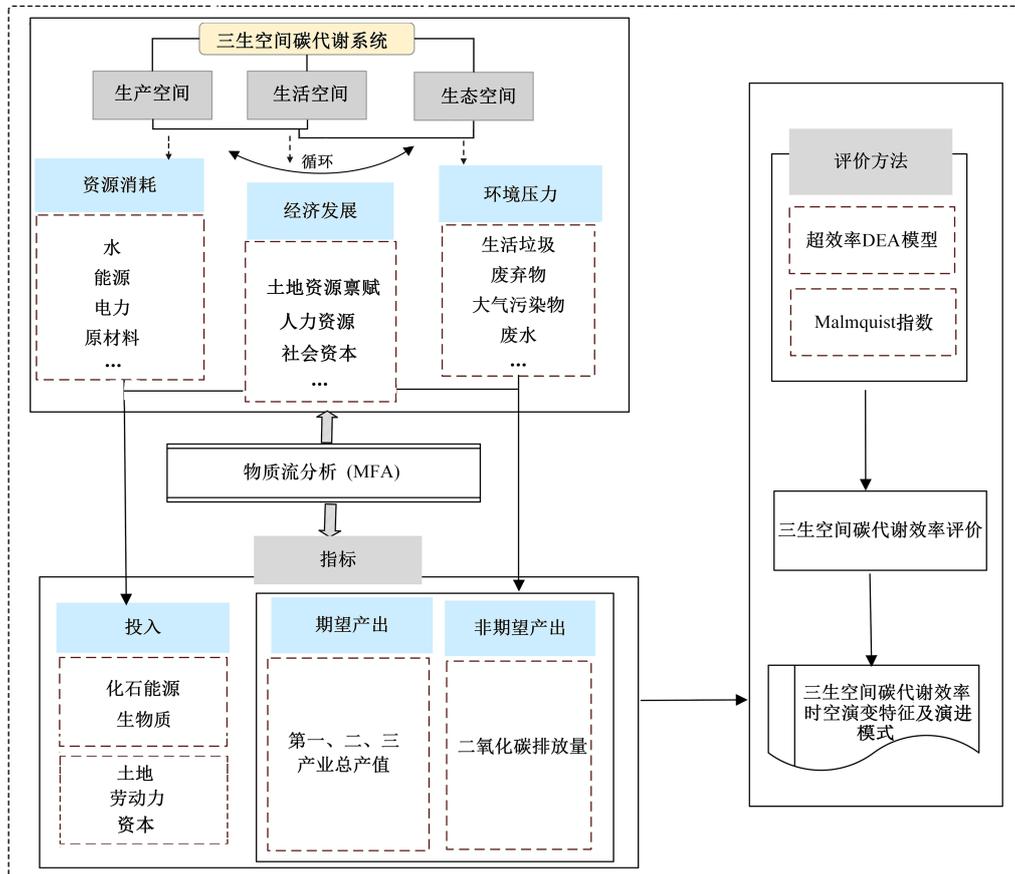


图1 三生空间碳代谢效率评价框架

Fig. 1 Assessment framework of carbon metabolism efficiency of production-living-ecological space

2.2 三生空间碳代谢效率指标体系构建

结合国内外研究成果^[21,37,38],考虑到数据可获得性和适用性,基于研究区实际情况,从城市碳代谢要素投入(物质资源、土地、资本和劳动力)和产出(期望和非期望)这2个方面构建三生空间碳代谢效率指标体系.选取能源消耗、生物质总量和三生空间面积分别表征碳代谢效率的物质资源投入和土地资源

投入.选取资本存量表征资本投入,参考徐莉^[18]和房汉国^[39]的研究结果,采用永续存盘法,以2010年为基期利用固定资产投资指数对历年固定资产总额进行平减,从而得到各年的资本投入量.选取第一、二、三产业从业人员总人口表征碳代谢效率的劳动力投入.第一、二、三产业总产值和二氧化碳排放量分别表征碳代谢过程的经济产出和社会发展过程中的环

境非期望产出,见表1.

2.3 超效率DEA模型

DEA模型是运用数学线性规划,以相对效率概念为基础,对同一区域内各决策单元(decision making units, DMU)的相对有效性进行评估^[40]. 由于传统DEA模型可能存在多个综合技术效率为1的计算结果,无法区分有效决策单元的差异. 而超效率DEA解决了同为有效决策单元的效率比较分析问题^[27,41]. 因

表1 三生空间碳代谢效率指标体系

Table 1 Carbon metabolism efficiency index system of production-living-ecological space

一级指标	二级指标	指标说明	指标释义
投入指标	物质资源投入	能源消耗和生物质总量(10 ⁴ t)	能源:原煤、石油和天然气标准能耗;生物质:各城市主要生物质总量,包括粮食、油料、蔬菜、棉花、水果等农产品、畜产品和水产品总量
	土地投入	生产空间面积(hm ²)	城市生产、生活和生态空间面积
		生活空间面积(hm ²)	
		生态空间面积(hm ²)	
资本投入	资本存量(万元)	城市固定资产净值年平均余额	
劳动力投入	第一、二、三产业从业人员总人口(万人)	城市第一、二、三产业从业人员	
产出指标	社会经济产出	第一、二、三产业总产值(万元)	城市第一、二、三产业总产值
	环境非期望产出	二氧化碳排放量(10 ⁴ t)	城市二氧化碳排放总量

$$\min \theta, \text{ s.t. } \begin{cases} \sum_{j=1}^n \lambda_j x_j + s^- = \theta x_0 \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j y_j - s^+ = y_0 \\ \lambda_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, j-1, j+1, \dots, n \\ s^+, s^- \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中, θ 为三生空间碳效率; s 和 t 分别为投入和产出的指标数量; λ_j 为决策单元的权重变量; x_j 和 y_j 分别为决策单元的投入和产出; s^- 和 s^+ 分别为松弛变量和剩余变量. θ 值越大,表明碳代谢效率排名越靠前,效率水平越高.

2.4 Malmquist模型

Malmquist指数模型是对各个决策单元不同时期数据的动态效率分析,以便衡量不同时期三生空间碳代谢效率的动态变化趋势^[42]. 采用含非期望产出的Malmquist指数衡量各城市碳代谢效率的动态变化特征,Malmquist指数定义为:

$$\text{TFP} = \text{TEC} \times \text{TC} = \text{PEC} \times \text{SEC} \times \text{TC} \quad (2)$$

式中,TFP(total factor productivity)为全要素生产率,用以表征各决策单元在2000~2020年三生空间碳代谢效率的变化程度. 若 $\text{TFP} > 1$,三生空间碳代谢全要素生产率上升;若 $\text{TFP} < 1$,则其下降;若 $\text{TFP} = 1$,则其无变化. TFP可进一步分解为技术效率变化(technical efficiency change, TEC)和技术进步变化(technical change, TC),其中TEC又可分为纯技术效率变化(pure efficiency change, PEC)和规模效率变化(scale

此,本文基于超效率DEA模型计算三生空间碳代谢效率,对有效决策单元进行区分. 考虑到三生空间投入要素的可操作性和规模效应,基于DEA模型中的投入导向BCC模型对碳代谢效率进一步分解. BBC模型是以规模报酬可变假设为基础,将综合效率(C)分解为纯技术效率(V)和规模效率(S),以便进一步分析不同城市规模的相对效率值. 超效率DEA模型的计算见式(1).

efficiency change, SEC).

3 结果与分析

3.1 三生空间碳代谢效率时空特征分析

由表2可知,2000~2020年三生空间碳代谢效率(C)呈波动增长的趋势,各城市碳代谢效率的差距相对较大. 其中,2000年三生空间碳代谢效率平均值为0.999,在2005年下降到0.873,随后在2020年上升至1.142. 从超效率DEA的决策单元来看,各城市碳代谢效率水平呈逐渐增长的趋势,碳代谢效率值变化不大,北京市的碳代谢效率始终保持最高水平. 2000~2020年,碳代谢效率水平大于1的城市主要包括北京市、天津市、石家庄市、唐山市、秦皇岛市和张家口市,表明以上城市的碳代谢效率水平相对较高.

从分解效率来看,2000~2020年,纯技术效率水平(V)整体呈波动增长态势,增长了1.33倍,年均增长率为1.44%. 纯技术效率大于1的城市包括北京市和天津市等,说明以上城市的纯技术效率水平相对较高,而衡水市、承德市、邢台市和沧州市的纯技术效率相对较低,表明以上城市能源开发和利用的技术水平有待提高. 规模效率(S)整体呈波动增长趋势,年均增长率为1.02%. 各城市规模效率增长明显,且差异较大. 其中,北京市和天津市的规模效率水平相对较高,而衡水市、沧州市和廊坊市的规模效率水平相对较低,表明以上城市应转变其粗放的经济增长方式,优化生产效率,扩大生产规模,以形成

表2 城市三生空间碳代谢效率及分解¹⁾

Table 2 Carbon metabolism efficiency and decomposition of production-living-ecological space of each city

城市	2000年				2005年				2010年			
	C	V	S	R-S	C	V	S	R-S	C	V	S	R-S
保定市	0.556	0.522	0.986	irs	0.681	0.615	0.996	irs	0.944	0.93	0.989	drs
北京市	1.786	1.135	1.121	—	1.992	1.322	1.235	drs	1.802	1.766	1.358	drs
沧州市	0.624	0.589	0.887	irs	0.707	0.632	0.796	—	0.891	0.887	0.566	—
承德市	0.73	0.711	0.651	—	0.571	0.891	0.771	—	0.865	0.89	0.812	irs
邯郸市	0.520	0.508	0.626	irs	0.534	0.531	0.625	irs	0.817	0.785	0.701	irs
衡水市	1.001	0.443	0.511	irs	0.775	0.521	0.375	drs	0.945	0.455	0.597	irs
廊坊市	0.809	0.896	0.519	—	0.522	0.519	0.556	—	0.960	0.996	0.599	—
秦皇岛市	0.721	1.012	1.021	drs	0.547	1.022	1.022	drs	1.07	1.088	1.251	—
石家庄市	1.282	0.754	0.932	irs	1.035	0.973	0.944	drs	1.064	0.949	0.999	drs
唐山市	0.948	0.891	0.898	irs	0.516	1.022	1.024	irs	1.35	1.117	1.034	—
天津市	1.644	0.998	1.287	—	1.789	1.34	1.118	drs	1.726	1.296	1.228	drs
邢台市	0.834	0.777	0.885	irs	0.612	0.717	0.582	irs	0.735	0.624	0.823	irs
张家口市	1.543	0.889	0.776	irs	1.067	0.926	0.99	—	1.077	1.023	0.998	—
均值	0.999	0.779	0.854		0.873	0.849	0.85		1.096	0.985	0.92	

城市	2015年				2020年			
	C	V	S	R-S	C	V	S	R-S
保定市	1.133	0.987	0.999	—	0.948	1.012	0.959	drs
北京市	2.107	1.889	1.425	drs	2.679	1.924	1.776	drs
沧州市	1.101	0.897	0.564	—	0.418	0.565	0.518	irs
承德市	0.824	0.902	0.952	—	0.515	0.912	1.022	—
邯郸市	0.706	0.61	0.774	irs	0.378	0.497	0.837	irs
衡水市	0.987	0.479	0.662	—	0.886	0.889	0.772	irs
廊坊市	1.012	0.998	0.667	drs	0.896	0.799	0.627	—
秦皇岛市	0.967	1.225	1.354	irs	1.215	1.547	1.446	irs
石家庄市	1.122	1.025	1.025	drs	1.447	1.011	1.137	drs
唐山市	1.308	1.536	1.176	—	1.322	1.412	1.332	irs
天津市	2.057	1.288	1.325	drs	2.499	1.347	1.456	drs
邢台市	0.757	0.571	0.837	irs	0.594	0.633	0.197	irs
张家口市	0.724	1.088	0.686	irs	1.055	0.924	0.801	irs
均值	1.138	1.038	0.957		1.142	1.036	0.991	

1) C表示三生空间综合效率;V表示纯技术效率;S表示规模效率;R-S表示规模收益;drs和irs分别表示规模收益递减和规模收益递增;“—”为规模收益不变

规模效应.从规模收益(R-S)来看,规模收益递增的城市数量维持不变,而规模收益递减的城市数量呈增长态势.其中,沧州市、邯郸市和唐山市的规模收益均呈递增状态,而北京市、石家庄市和天津市的规模收益均呈递减状态,以上城市在化石能源投入和物质资源生产过程中,应采取物质资源量化的措施.总的来说,京津冀地区三生空间碳代谢效率水平整体呈上升趋势,说明近年来京津冀地区的碳代谢效率水平在一定程度上得到了改善,各城市间碳代谢效率水平差距较大,今后仍需整合城市资源,加强各城市间的联系,以实现城市协调发展,从而提升城市碳代谢效率水平.

为进一步探究三生空间碳代谢效率及分解效率的空间分布特征,基于 ArcGIS 自然断点分级法

(Jenks)将其均值由强到弱划分为较好、良好、一般和较差这4个等级(图2).2000~2020年,研究区三生空间碳代谢效率及分解效率水平差异较大,呈中部高、南北低的空间分布格局.高值区主要分布在北京市、天津市、唐山市和秦皇岛市等,以上城市的物质及能源消耗量大,但地理位置优越,城市化水平高,三生空间资源配置合理,生产规模效率高,城市物质资源的投入与产出效率和谐,城市碳代谢效率水平高.低值区主要分布在邯郸市、衡水市和邢台市等,以上地区碳代谢效率较低,经济发展方式粗放,城市资源投入与产出比例不和谐.总的来看,三生空间碳代谢效率、纯技术效率和规模效率处于一般等级以下水平的城市比例分别为61.54%、53.85%和53.85%,表明三生空间碳代谢效率水平总体偏低,

由于京津冀地区特殊的地理位置,人口快速增长导致的能源大量消耗以及不合理的能源利用对资源与环境产生压力,进而造就了碳代谢效率水平整体偏

低的特征^[43].今后政府在其资源利用的过程中仍需投入更多的资金与精力,以保证各城市碳代谢效率水平的协调发展.

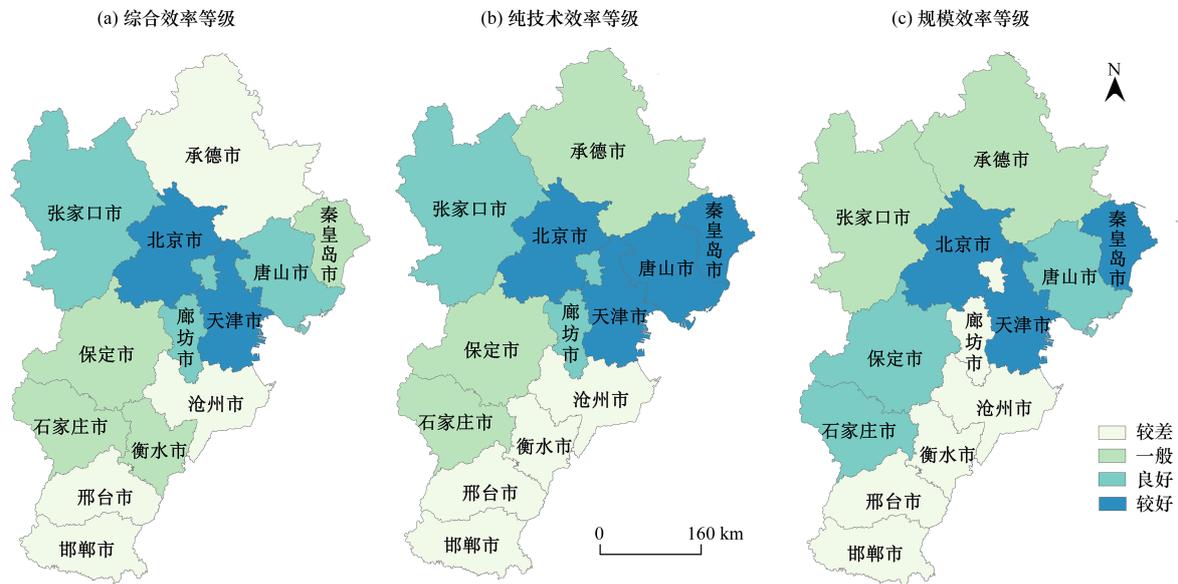


图2 2000~2020年碳代谢效率和分解效率空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of carbon metabolism efficiency and decomposition from 2000 to 2020

3.2 基于 Malmquist 指数的三生空间碳代谢分析

从整体来看(表3),京津冀地区全要素生产率大于1,即生产率变化呈上升趋势.其中,技术效率变化和规模效率变化均值大于1,技术进步变化和纯技术

效率变化小于1,表明技术效率和规模效率变化在一定程度上对三生空间碳代谢效率起促进作用,而技术进步变化和纯技术效率变化对三生空间碳代谢效率的贡献不显著.

表3 2000~2020年碳代谢 Malmquist 指数均值及分解

Table 3 Average value of Malmquist index of carbon metabolism and decomposition from 2000 to 2020

年份	全要素生产率(TFP)	技术效率变化(TEC)	技术进步变化(TC)	纯技术效率变化(PEC)	规模效率变化(SEC)
2000~2020	1.078	1.121	0.961	0.979	1.146

从分解指标来看(图3),2000~2020年,超过50%的全要素生产率均呈增长趋势,高值区主要集中在北京市、天津市和石家庄市,低值区主要分布在衡水市和邢台市,可能与城市经济发展落后和产业结构单一相关.仅有38.46%的城市在碳代谢效率提升过程中存在技术进步现象,其中,北京市、石家庄市和天津市的技术进步指数较高,而衡水市、承德市和邯郸市的技术进步指数较低,表明以上城市在能源开发和利用过程中技术水平并未得到显著提升.各城市纯技术效率变化指数差异较大,超过1/2地区的纯技术效率呈下降趋势,主要包括廊坊市、邢台市和邯郸市等,表明以上城市粗放的资源利用和开采模式有待提高.大部分城市的技术效率变化和规模效率变化呈增长趋势,且增幅排名前3的均为北京市、天津市和秦皇岛市.说明京津冀地区大多城市注重能源技术的开发利用,提升产业集聚能力,加快形成产业规模效应,各城市产业发展动力十足.

3.3 三生空间碳代谢效率的演进特征

3.3.1 类型特征分析

为全面了解三生空间的碳代谢效率水平,将超效率DEA模型与Malmquist指数中的综合效率值(C)和全要素生产率(TFP)相结合,绘制“效率大小-效率变化”的四分图,对三生空间碳代谢效率特征进行分类.将2000~2020年综合效率均值(1.04)作为横坐标效率大小的临界值,将1作为纵坐标效率变化的临界值,进而将各城市三生空间碳代谢效率分为I、II、III和IV这4种类型(图4).

I型:三生空间碳代谢效率较低,且全要素生产率下降.如衡水市和邯郸市,对应坐标分别为(0.917, 0.413)和(0.592, 0.706),以上城市碳代谢效率较低,且全要素生产率呈下降趋势.以上城市大部分以制造业为主,产业结构单一,高能耗产业比重较大,且在研究期内对技术的应用与转化不足,能源利用效率低,导致其城市碳代谢效率水平呈下降趋势.

II型:三生空间碳代谢效率较低,但全要素生产

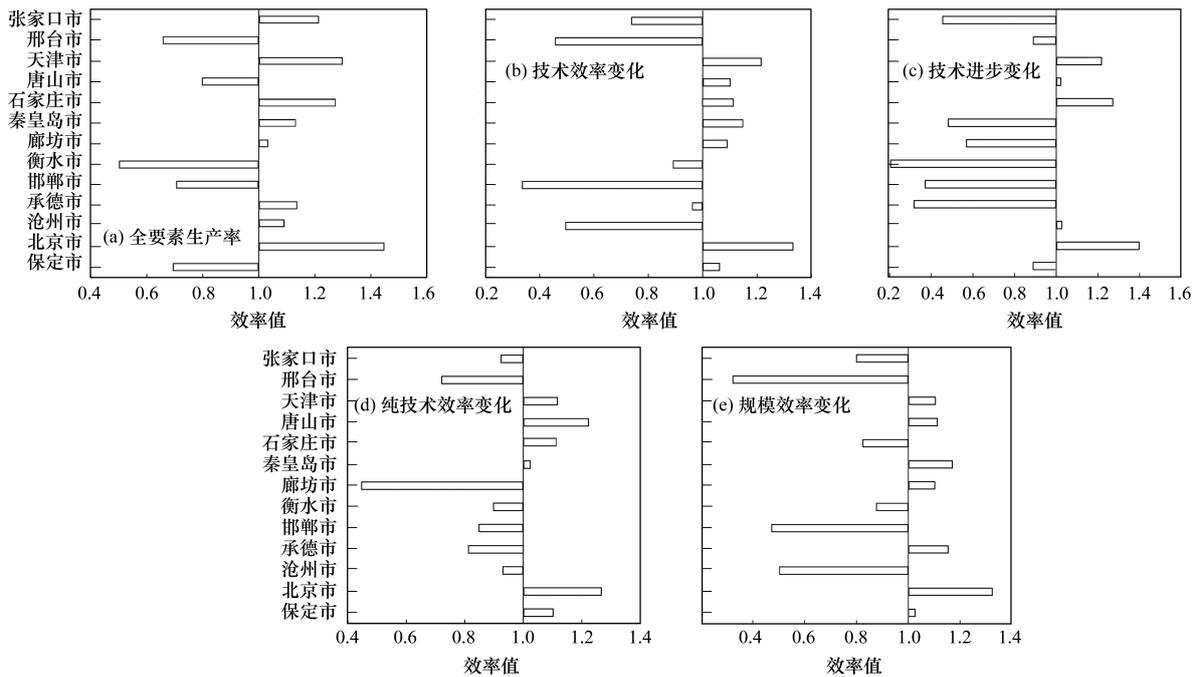


图3 2000-2020年城市碳代谢效率 Malmquist 指数及分解

Fig. 3 Malmquist index and decomposition of urban carbon metabolism efficiency from 2000 to 2020

率增长. 如秦皇岛市, 对应坐标为(0.904, 1.132). 该城市碳代谢效率不高, 但全要素生产率显著增加. 该类型城市产业发展基础相对薄弱, 但通过改善其资源利用方式, 合理配置土地资源, 优化产业结构, 加强技术引进, 使城市碳代谢水平明显改善, 全要素生产率大幅度提高.

III型: 三生空间碳代谢效率较高, 且全要素生产率保持增长. 如北京市, 对应坐标为(1.501, 1.447). 该市综合效率水平较高, 全要素生产率呈增长趋势. 该类型城市的代谢系统在既定投入的情况下, 积极引进和吸收先进技术, 生产组织方式先进, 技术水平较高, 处于生产前沿面, 使其碳代谢效率保持较高的增长态势. 周边城市如张家口市和石家庄市等通过产业结构优化, 经济水平不断发展, 尤其是张家口市将冬奥会的“冰雪经济”作为产业转型的突破口, 推动了城市经济转型升级和资源利用效率的提升.

IV型: 三生空间碳代谢效率较高, 但全要素生产率下降. 如唐山市, 对应坐标为(1.088, 0.798). 由于该城市的能源利用率和技术利用水平仍存在短板, 资源和物质投入和产出不协调, 导致其全要素生产率相对较低.

3.3.2 演进模式分析

根据京津冀地区三生空间综合效率和全要素生产率的分析可知, 基于三生空间碳代谢效率的碳代谢类型不断变化. 因此, 参考前人研究^[16,44], 基于不同时期城市碳代谢类型的变化, 进一步将碳代谢效率演进模式分为稳定式、反复式、渐进式和突变式

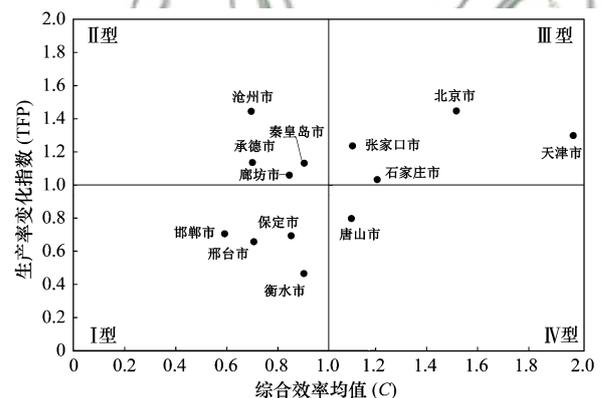


图4 城市碳代谢效率类型划分

Fig. 4 Classification of urban carbon metabolism efficiency

这4种类型(图5).

稳定式: 三生空间碳代谢综合效率和全要素生产率变化程度比较稳定, 城市碳代谢综合效率较高, 或其碳代谢效率相对较低, 而三生空间碳代谢效率有显著改善, 其对应的坐标点保持在四分图的某个象限内移动. 由表4可知, 属于稳定式演进模式包括北京市、天津市、石家庄市、邢台市和邯郸市, 多出现在I型和III型. 其中, 北京市、天津市和石家庄市的经济相对发达, 区位优势显著, 土地资源配置合理, 技术有效利用使其碳代谢水平处于持续增长阶段, 因此稳定在III型. 而邢台市和邯郸市以农用地为主, 产业结构相对单一, 农业温室气体排放相对较高, 技术创新投入不足, 这导致其三生空间碳代谢效率不断下降, 因此稳定在I型.

反复式: 三生空间碳代谢综合效率和全要素生

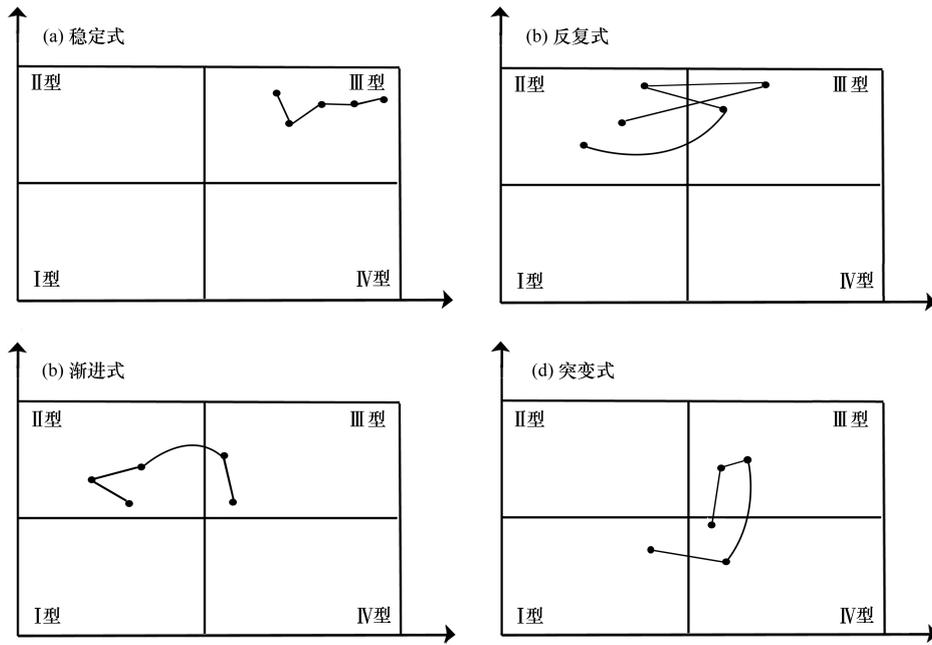


图 5 三生空间演进模式类型

Fig. 5 Evolution model type of carbon metabolism efficiency

产率变化方向反复变化,该类型的城市经济发展存在一定的波动特征,其对应的坐标点在相邻两个象限交替移动.属于反复式演进模式包括廊坊市、秦皇岛市和张家口市,多在 II 型和 III 型进行来回移动.以上城市主要由于外部因素,如地理位置、环境资源和政策变化导致其碳代谢效率和全要素生产率波动.

渐进式:三生空间碳代谢综合效率和全要素生产率变化趋势相对规律,该类型的城市经济发展水平相对平稳,其对应的坐标点以顺时针向各象限规律渐进移动.属于渐进式演进模式包括沧州市和承

德市,多由 II 型移动到 III 型 I 型移动到 II 型,以上城市碳代谢效率水平逐渐改善,三生空间资源配置合理,城市发展具有较大潜力.

突变式:三生空间碳代谢效率不稳定,全要素生产率变化没有规律,其对应的坐标点无规律移动.属于突变式演进模式包括保定市、衡水市和唐山市,多在 I 型、II 型、III 型和 I~IV 型变化.以上城市碳代谢效率水平差距较大,但其共同特征是碳代谢效率不稳定,碳代谢效率变化幅度大,全要素生产率也会受外界因素(如技术投入水平、土地资源配和产业发展等)的影响而发生较大变化.

表 4 城市碳代谢效率演进模式

Table 4 Evolution model of urban carbon metabolism efficiency

城市	年份					模式
	2000	2005	2010	2015	2020	
保定市	I	II	II	III	I	突变式
北京市	III	III	III	III	III	稳定式
沧州市	II	II	II	III	II	渐进式
承德市	I	II	II	II	II	渐进式
邯郸市	I	I	I	I	I	稳定式
衡水市	IV	I	II	II	II	突变式
廊坊市	II	II	II	III	II	反复式
秦皇岛市	II	II	III	II	III	反复式
石家庄市	III	III	III	III	III	稳定式
唐山市	I	II	III	III	IV	突变式
天津市	III	III	III	III	III	稳定式
邢台市	I	I	I	I	I	稳定式
张家口市	III	III	III	II	III	反复式

4 讨论

在“双碳”背景下,城市碳代谢的相关研究十分重要,本文做出了一些有益的尝试:首先,本文将城市类比成生态系统中的有机体,提出了一种基于新陈代谢视角下的三生空间碳代谢研究框架,采用物质流分析法构建了三生空间碳代谢效率的评估框架,并运用超效率DEA模型和Malmquist指数对三生空间碳代谢效率水平进行测度,研究结果更能全面反映城市碳代谢效率质量与水平,并反映出城市碳代谢水平的差异.此外,通过引进演进模式的概念,深化了城市碳代谢效率的相关研究,基于不同城市碳代谢类型效率变化,提出了不同城市碳代谢效率类型及其演进模式路径,这为差异化制定低碳城市管理对策以及识别城市不同发展模式提供了重要的参考依据.

三生空间变化影响着城市碳代谢效率水平,而三生空间的布局 and 结构受外部环境影响.因此,在提升城市碳代谢效率时,可以从政府的宏观调控和城市的微观政策两方面着手:①根据京津冀地区城市碳代谢效率水平的差异和空间分异特征,在政府宏观调控过程中,今后可通过梯度发展,缩小北部、中部和南部的资源配置差距,提高城市物质投入产出效率.对于碳代谢效率水平较低的邯郸市、衡水市和邢台市等,将其作为低碳城市建设过程中的重点区域,推进清洁能源和新能源的开发利用(如风能、核电和光伏等),并从技术、产业、土地和基础设施建设等多方面着力,针对性地提高资源利用率,逐步由粗放型向节约化生产模式转变^[45].此外,政府可以予以一定的政策倾斜,加大技术创新投入,建立低碳技术推广机制,加快产业形成集聚效应,切实推动全要素生产率的提升.另一方面,对于碳代谢效率水平较高的北京市和天津市,应加速推进绿色低碳技术攻关及产业化,推动相关产业的可持续发展,进一步优化产业结构,引导中部地区的企业、资金和人才流向南北部城市,在加强技术投入、人才创新和产业发展的同时,鼓励建设突出地域特色、文化特征的城市产业,提高城市碳代谢效率水平.②基于碳代谢效率演进模式和规律,应因地制宜、有的放矢地制定不同类型城市的发展策略.如I型的衡水市和承德市碳代谢效率水平低,技术投入不足,应通过增加科技投入,减少二氧化碳的排放量,改善生态空间质量,实现将资源优势转变为市场竞争胜势,推动城市碳代谢效率由I型向II型和III型演进.II型地区的碳代谢效率水平在既有政策的前提下,可通过产业结构优化升级、三生空间资源集约利用等方式,加强城市

土地、人力和物质资源投入的合理性,加强与周边城市间的协同发展,实现资源、技术等方面共享,从而提高城市碳代谢效率水平.III型城市大多是碳代谢效率相对较高的地区,应采取前瞻性措施,加快技术创新,提高能源利用效率和土地资源质量,优化产业结构,防止碳代谢效率逐渐变为IV型.IV型的唐山市碳代谢效率较高,但全要素生产率下降.因此,应优化产业结构,淘汰高能耗产业,加大技术投入以改善碳代谢效率水平.此外,应建立突发事件(自然灾害和能源危机等)应急处置机制,提高城市的风险防控能力和管理水平.

受数据资料获取的局限性,尚存在一些不足,如在构建指标体系时,尚未考虑金属资源、水资源和矿业资源等指标,评价指标体系还需进一步斟酌.

5 结论

(1)2000~2020年,京津冀地区三生空间碳代谢效率总体呈波动增长趋势,各城市碳代谢效率的差距相对较大,呈中部高、南北低的空间分布格局.从分解效率来看,纯技术效率水平和规模效率整体呈波动增长态势,年均增长率分别为1.44%和1.02%.各城市纯技术效率和规模水平增长明显,且差异较大,其规模收益递减数量呈增长态势.此外,三生空间碳代谢效率水平总体偏低,高值区主要分布在北京市、天津市、唐山市和秦皇岛市等,低值区主要分布邯郸市、衡水市和邢台市等,以上地区均为低碳城市建设过程中首要关注的重点城市.

(2)2000~2020年,京津冀地区碳代谢全要素生产率、技术效率变化和规模效率变化均大于1,技术进步变化和纯技术效率变化均小于1,表明研究区全要素生产率呈增长趋势,而技术进步变化和纯技术效率变化对三生空间碳代谢效率的贡献不显著.其中,超过50%城市的全要素生产率均呈改善趋势,仅有38.46%的城市在碳代谢效率提升过程中存在技术进步现象,超过1/2地区的纯技术效率呈下降趋势,大部分城市的技术效率和规模效率变化呈增长趋势,且增幅排名前3的城市均为北京市、天津市和秦皇岛市.

(3)2000~2020年,京津冀地区多数城市碳代谢效率呈现不同的类型特征,以I型和II型为主,即碳代谢效率水平偏低,但综合效率呈逐渐改善趋势.从演进模式来看,属于稳定式和突变式的城市数量相对较多,其次是反复式和渐进式.

参考文献:

- [1] Chen M Q. A study of low-carbon development, urban innovation and industrial structure upgrading in China [J]. International

- Journal of Low-Carbon Technologies, 2022, **17**: 185-195.
- [2] 杜金霜, 付晶莹, 郝蒙蒙. 基于生态网络效用的昭通市“三生空间”碳代谢分析[J]. 自然资源学报, 2021, **36**(5): 1208-1223.
- Du J S, Fu J Y, Hao M M. Analyzing the carbon metabolism of "production-living-ecological" space based on ecological network utility in Zhaotong [J]. Journal of Natural Resources, 2021, **36**(5): 1208-1223.
- [3] 林刚, 江东, 付晶莹, 等. “三生”空间格局演化“碳流”分析——以唐山市为例[J]. 科技导报, 2020, **38**(11): 107-114.
- Lin G, Jiang D, Fu J Y, *et al.* Carbon flow analysis for production-living-ecological space: a case study of Tangshan, China [J]. Science & Technology Review, 2020, **38**(11): 107-1148.
- [4] Wang M, Wang Y, Wu Y M, *et al.* Detecting differences in the impact of construction land types on carbon emissions: a case study of southwest China [J]. Land, 2022, **11**(5), doi: 10.3390/LAND11050719.
- [5] 李缘缘, 魏伟, 周俊菊, 等. 中国土地利用碳排放变化及协调分区[J]. 环境科学, 2023, **44**(3): 1267-1276.
- LI Y Y, Wei W, Zhou J J, *et al.* Changes in land use carbon emissions and coordinated zoning in China [J]. Environmental Science, 2023, **44**(3): 1267-1276.
- [6] 冯新惠, 李艳, 余迹, 等. 长三角城市群碳排放绩效与土地利用强度时空格局及协调发展特征[J]. 农业工程学报, 2023, **39**(3): 208-218.
- Feng X H, Li Y, Yu E, *et al.* Spatiotemporal pattern and coordinating development characteristics of carbon emission performance and land use intensity in the Yangtze River Delta Urban Agglomeration [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, **39**(3): 208-218.
- [7] 田超, 程琳琳, 殷婷婷. 一村一策, 确定乡村“三生”功能建设、提升人居环境质量工作重点[J]. 中国农业资源与区划, 2022, **43**(9): 201-209.
- Tian C, Cheng L L, Yin T T. One village, one strategy, set priorities for the construction of rural production-living-ecological function and improvement of human settlement environment quality [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2022, **43**(9): 201-209.
- [8] 杨柏, 秦广鹏, 邬钦. “双碳”目标下中国省域碳排放核算分析[J]. 环境科学, 2022, **43**(12): 5840-5849.
- Yang B, Qin G P, Wu Q. Analysis of provincial CO₂ emission accounting in China under the carbon peaking and carbon neutrality goals [J]. Environmental Science, 2022, **43**(12): 5840-5849.
- [9] Li J Z, Huang G H, Liu L R, *et al.* Projections of carbon metabolism in 2035 and implications for demand-side controls under various scenarios [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 151, doi: 10.1016/j.rser.2021.111561.
- [10] 刘凝音, 张妍, 李彦显, 等. 从城市到城市群: 京津冀物质代谢特征及影响因素[J]. 生态学报, 2023, **43**(4): 1326-1337.
- Liu N Y, Zhang Y, Li Y X, *et al.* From cities to agglomeration: characteristics and driving factors of material metabolism in the Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, **43**(4): 1326-1337.
- [11] 李明. 基于土地利用视角的城市碳代谢及其驱动因素研究——以兰州市为例[D]. 兰州: 西北师范大学, 2022.
- [12] 胡灿, 张宇硕, 赵林, 等. 环渤海地区城市代谢效率时空特征及影响因素[J]. 河南大学学报(自然科学版), 2018, **48**(1): 10-20.
- Hu C, Zhang Y S, Zhao L, *et al.* Spatio-temporal characteristics of urban metabolic efficiencies and its influence factors in Bohai rim region [J]. Journal of Henan University (Natural Science), 2018, **48**(1): 10-20.
- [13] Chen S Q, Chen B. Changing urban carbon metabolism over time: historical trajectory and future pathway [J]. Environmental Science & Technology, 2017, **51**(13): 7560-7571.
- [14] 武子豪, 祖健, 史云扬, 等. 城市职能视角下“三生”空间的识别与评价——以京津冀城市群为例[J]. 资源科学, 2022, **44**(11): 2247-2259.
- Wu Z H, Zu J, Shi Y Y, *et al.* Identification and evaluation of production-living-ecological space from the perspective of urban function: taking the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration as an example [J]. Resources Science, 2022, **44**(11): 2247-2259.
- [15] Wright L A, Coello J, Kemp S, *et al.* Carbon footprinting for climate change management in cities [J]. Carbon Management, 2011, **2**(1): 49-60.
- [16] Lebel L, Garden P, Banaticla M R N, *et al.* Management into the development strategies of urbanizing regions in Asia: implications of urban function, form, and role [J]. Journal of Industrial Ecology, 2007, **11**(2): 61-81.
- [17] 武昊彤, 冼超凡, 刘晶茹. 城市代谢效率研究的热点识别与综合效率实证研究[J]. 生态学报, 2021, **41**(22): 8709-8717.
- Wu H T, Xian C F, Liu J R. Hotspots identification for the research on urban metabolism efficiency with a case study addressing integrated efficiency [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, **41**(22): 8709-8717.
- [18] 徐莉. 绿洲城市代谢特征及其驱动因素研究——以新疆典型绿洲城市为例[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2021.
- [19] 黄初龙, 于昌平, 高兵, 等. 厦门市水资源与虚拟水耦合代谢效率评价[J]. 生态学报, 2016, **36**(22): 7267-7278.
- Huang C L, Yu C P, Gao B, *et al.* Assessment of urban water metabolism based on integrated analysis of available and virtual water: a case of Xiamen in China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, **36**(22): 7267-7278.
- [20] 赵佳. 产业协同集聚对资源型地区新陈代谢效率的影响研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2021.
- [21] 罗啸啸, 刘勇, 廖斌. 城市蔓延影响了城市代谢效率吗? ——基于285个地级市面板数据的实证研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2023, **33**(2): 113-123.
- Luo X X, Liu Y, Liao B. Does urban sprawl affect urban metabolic efficiency? based on the analysis of the panel data of 285 prefecture-level cities in China [J]. China Population, Resources and Environment, 2023, **33**(2): 113-123.
- [22] 夏楚瑜. 基于土地利用视角的多尺度城市碳代谢及“减排”情景模拟研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- [23] Zhao G M, Geng Y, Tang C, *et al.* Improving aluminium resource efficiency in China: based upon material flow analysis and entropy analysis [J]. Circular Economy, 2022, **1**(1), doi: 10.1016/j.ccc.2022.100005.
- [24] 韩文懿. 基于MuSIASEM与能值的特大城市代谢研究——以上海、东京为例[D]. 上海: 上海交通大学, 2018.
- [25] Li Y, Shen J Y, Xia C Y, *et al.* The impact of urban scale on carbon metabolism—a case study of Hangzhou, China [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, **292**, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.126055.
- [26] 李文. DEA空间化改进及其在城市效率评价中的应用[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2021.
- [27] Yang Y Y, Guo H X, Wang D Y, *et al.* Flood vulnerability and resilience assessment in China based on super-efficiency DEA and SBM-DEA methods [J]. Journal of Hydrology, 2021, **600**, doi:

10. 1016/j. jhydrol. 2021. 126470.
- [28] 温婷, 罗良清. 中国乡村环境污染治理效率及其区域差异—基于三阶段超效率SBM-DEA模型的实证检验[J]. 江西财经大学学报, 2021, (3): 79-90.
Wen T, Luo L Q. China's rural environmental pollution control efficiency and its regional differences: an empirical test based on the three-stage Super-Efficiency SBM-DEA model[J]. Journal of Jiangxi University of Finance and Economics, 2021, (3): 79-90.
- [29] 杨添棋, 王洪昌, 张辰, 等. 京津冀及周边地区“2+26”城市结构性调整政策的CO₂协同减排效益评估[J]. 环境科学, 2022, 43(11): 5315-5325.
Yang T Q, Wang H C, Zhang C, et al. Carbon dioxide mitigation co-effect analysis of structural adjustment measures in the “2+26” cities in the Jing-Jin-Ji region and its surroundings [J]. Environmental Science, 2022, 43(11): 5315-5325.
- [30] Tian C, Cheng L L, Yin T T. Spatial heterogeneity of driving forces in response to carbon emissions from land use at county-level in Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2023, 32(1): 267-279.
- [31] Cheng L L, Tian C, Yin T T. Identifying driving factors of urban land expansion using Google Earth Engine and machine-learning approaches in Mentougou District, China[J]. Scientific Reports, 2022, 12(1), doi: 10.1038/s41598-022-20478-z.
- [32] 冀正欣, 许月卿, 黄安, 等. 冀北山区“三生”空间识别与演化特征分析—以张家口市为例[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2022, 58(1): 123-134.
Ji Z X, Xu Y Q, Huang A, et al. Spatial pattern and evolution characteristics of the Production-Living-Ecological space in the mountainous area of northern Hebei province: a case study of Zhangjiakou city [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2022, 58(1): 123-134.
- [33] 邹艳. 淮海经济区核心城市群三生空间演化模拟与优化配置研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
- [34] 戴铁军, 刘瑞, 王婉君. 物质流分析视角下北京市物质代谢研究[J]. 环境科学学报, 2017, 37(8): 3220-3228.
Dai T J, Liu R, Wang W J. Material metabolism in Beijing by material flow analysis [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, 37(8): 3220-3228.
- [35] 高丽玲. 基于物质流分析的广东省碳生产率及低碳经济发展路径研究[D]. 深圳: 深圳大学, 2019.
- [36] 刘晓洁, 胡兆民, 邓祥征, 等. 碳中和目标下生态草牧业的物质流分析框架与发展策略[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2022, 14(4): 379-388.
Liu X J, Hu Z M, Deng X Z, et al. Material flow analysis framework and development strategy of ecological grass-based livestock husbandry under the target of carbon neutralization [J]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology (Natural Science Edition), 2022, 14(4): 379-388.
- [37] 罗啸潇, 王婷, 廖斌, 等. 中国省域城市代谢效率演化及影响因素分析[J]. 环境污染与防治, 2021, 43(12): 1625-1630.
Luo X X, Wang T, Liao B, et al. Analysis on the evolution and influencing factors of urban metabolic efficiency of Chinese provinces[J]. Environmental Pollution & Control, 2021, 43(12): 1625-1630.
- [38] 胡彪, 程达. 京津冀地区城市新陈代谢效率的时空格局演变研究[J]. 现代城市研究, 2018, (6): 37-43.
Hu B, Cheng D. Temporal and spatial differences of urban metabolic efficiencies in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Modern Urban Research, 2018, (6): 37-43.
- [39] 房汉国. 中国全要素生产率测度: 1952年-2014年[J]. 现代管理科学, 2016, (6): 79-81.
- [40] 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.
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.
- [41] 田超, 程琳琳, 王义方, 等. 转型期矿业乡村综合效能评价及障碍诊断[J]. 农业工程学报, 2022, 38(5): 241-249.
Tian C, Cheng L L, Wang Y F, et al. Comprehensive effectiveness evaluation and obstacle diagnosis of mining villages in the transition period [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(5): 241-249.
- [42] Pan Z W, Tang D C, Kong H J, et al. An analysis of agricultural production efficiency of Yangtze River economic belt based on a three-stage DEA Malmquist model [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 19(2), doi: 10.3390/ijerph19020958.
- [43] 杨青林, 赵荣钦, 胡月明, 等. 京津冀地区经济社会要素与碳排放的时空耦合关系[J]. 生态学报, 2023, 43(9): 3458-3472.
Yang Q L, Zhao R Q, Hu Y M, et al. Spatial-temporal coupling relationship between economic and social factors and carbon emissions in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(9): 3458-3472.
- [44] 郭向阳, 穆学青, 明庆忠, 等. 典型山区旅游地旅游效率与交通协调格局及演进模式[J]. 经济地理, 2020, 40(8): 212-221.
Guo X Y, Mu X Q, Ming Q Z, et al. Coordination pattern and evolution pattern of tourism efficiency and traffic in typical mountainous tourist destinations [J]. Economic Geography, 2020, 40(8): 212-221.
- [45] Zhou Y, Chen M X, Tang Z P, et al. Urbanization, land use change, and carbon emissions: quantitative assessments for city-level carbon emissions in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Sustainable Cities and Society, 2021, 66, doi: 10.1016/j. scs. 2020. 102701.

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)