

目次

基于机器学习方法研究气象及排放变化对长三角地区主要城市大气污染物的影响 ..... 付文星, 黄琳, 丁嘉豪, 秦墨梅, 于兴娜, 谢放尖, 胡建林 (5879)

不同行业减排对我国东部地区空气质量及大气温度的影响 ..... 龙籽谕, 朱佳, 李柯, 陈磊, 杜楠, 廖宏 (5889)

冬奥会期间京津冀及周边区域空气质量时空特征、气象影响和减排效果评估 ..... 侯露, 朱媛媛, 刘冰, 李健军 (5899)

中国印刷业 VOCs 排放趋势及未来减排潜力 ..... 梁小明, 吴彭珍, 陈来国, 刘明, 卢清, 朱李华, 孙西勃, 叶代启 (5915)

济南市典型行业 VOCs 排放特征及减排潜力分析 ..... 吴文璐, 单春艳, 赵菁林, 崔羽浓 (5924)

南京市溧水区大气挥发性有机物污染特征及来源解析 ..... 阮兆元, 燕鸥, 王体健, 王勤耕, 罗干, 文金科 (5933)

我国近 10 年城市生活垃圾处置单元温室气体排放时空变化及减排潜力分析 ..... 张昕雪, 高淑丹, 滕晓, 蒋旭彤, 陈纪宏, 高晨琦, 卞荣星, 孙英杰, 李卫华, 王亚楠, 王华伟 (5946)

中国重点城市大气污染与健康风险的时空分布特征 ..... 涂佩玥, 杨欢, 陈兰洲, 牛笑笑, 杨璐, 易嘉慧, 柯碧钦, 田雅, 叶志祥, 梅新, 洪松, 何超 (5954)

中国 PM<sub>1</sub> 浓度时空特征及其与 AOD 的相关性分析(2014~2017年) ..... 袁丽梅, 马芳芳, 卞泽, 秦凯 (5964)

长株潭城市群 PM<sub>2.5</sub> 中二次无机离子特征及生成机制 ..... 马杰利, 罗达通, 刘欣, 王蕾, 王幸, 刘湛, 沈健, 张俊丰, 李晟 (5975)

周口市 2022 年冬季重污染过程中细颗粒物污染特征及成因分析 ..... 马英歌, 杨露, 狄睿苗, 马南, 乔利平, 吴宇航, 周文鑫, 赵新华, 张越, 孙志华, 陈长虹, 陈学军, 楼晟荣, 黄成 (5986)

兰州市 PM<sub>2.5</sub> 中多环芳烃的污染特征和来源解析 ..... 马可婧, 孙丽娟 (5997)

北京市门头沟区大气降尘污染特征及其化学组分特征与质量重构 ..... 王志焱, 姚琦, 吕富, 王雨薇, 王珊, 王铮, 胡月琪 (6007)

典型热带海滨城市臭氧污染特征与成因分析 ..... 韩淑艳, 张鑫, 谢荣富, 霍思思, 高利澳, 吴泓锦, 党娟, 徐文帅, 邢巧, 张庆竹, 王文兴 (6015)

珠江源块泽河流域地表水水化学特征及控制因素 ..... 陶兰初, 寸得欣, 涂春霖, 马一奇, 刘振南, 尹林虎, 和成忠, 庞龙, 张七道 (6025)

淮南煤矿区地表水和地下水水化学特征及控制因素 ..... 刘海, 康博, 管政亭, 宋阳, 柴义伦 (6038)

巴伊盆地平原区地下水水化学特征及污染源识别 ..... 姜凤, 周金龙, 周殷竹, 孙英, 韩双宝, 鲁涵 (6050)

滇池周边浅层地下水硝酸盐来源及转化过程识别 ..... 陈清飞, 陈安强, 崔荣阳, 叶远行, 闵金恒, 付斌, 闫辉, 张丹 (6062)

典型铅锌矿流域土壤重金属累积与分布的影响因素分析 ..... 潘泳兴, 陈盟, 王樯樯 (6071)

铅锌矿周边岩溶流域重金属污染及健康风险评价 ..... 廖红为, 蒋忠诚, 周宏, 覃小群, 黄奇波, 吴华英 (6085)

开封市主要河道沉积物重金属时空分布特征及生态风险评价 ..... 丁亚鹏, 卢希昊, 王晓婧, 武鲲鹏, 张浩杰, 李欢, 付贤志, 王洪涛 (6095)

霍邱县城湖泊沉积物重金属环境容量评价与预测 ..... 刘海, 魏伟, 宋阳, 潘杨 (6106)

基于宏条形码技术的白洋淀水华藻类识别及其驱动因子分析 ..... 陈婷, 杜珣, 陈义永, 郭道宇, 熊薇 (6116)

基于种群、功能群对比分析洞庭湖浮游植物群落驱动因素及水质评价 ..... 严广寒, 殷雪妍, 汪星, 黄民生, 黄代中, 王思瑞, 张韵宇 (6125)

南水北调东线山东境内调蓄湖库蓝藻种群分布特征及环境驱动因子 ..... 韦洁琳, 崔玉静, 李亦真, 张莎莎, 徐杭州, 庞一鸣, 裴海燕 (6137)

广东省药物活性化合物的污染特征及生态风险评价 ..... 罗嘉豪, 王煜凯, 原珂, 卢耀斌, 罗丽娟, 栾天罡 (6149)

紫外老化微塑料衍生 DOM 理化特性及其与磺胺嘧啶、铜的络合机制 ..... 王筱, 晏彩霞, 聂明华, 莫茜婷, 丁明军, 徐鳌雪, 邓思维 (6159)

共混塑料在海水中的光降解及海洋环境风险 ..... 张洪瑜, 高嘉蔚, 陈思宝, 林千惠, 葛安琪, 赵莎莎, 郑浩, 李锋民 (6172)

铁改型蓝藻生物炭的制备及对地表水中磷的协同吸附机制 ..... 韩杰, 黄鑫, 杨昆仓, 宋超凡, 缪恒锋 (6181)

基于改进输出系数模型的非点源污染评估及关键源区识别: 以北运河上游流域为例 ..... 李华林, 张守红, 于佩丹, 宋卓远, 谢晨新, 张建军 (6194)

农村黑臭水体沉积物细菌群落结构特征 ..... 任宏伟, 田彦芳, 路金霞, 石雅君, 王进, 岳正波, 刘晓玲 (6205)

气候变化背景下人类活动对承德坝区植被净初级生产力的影响 ..... 单振东, 刘顿, 骆汉, 刘建伟, 张丽梅, 魏宇航 (6215)

氮沉降对陆地生态系统土壤有机碳含量影响的 Meta 分析 ..... 杨灵芳, 孔东彦, 刁静文, 郭鹏 (6226)

生物炭施用 5 a 后对桂北桉树人工林土壤有机氮组分和活性氮的影响 ..... 曹杨, 沈育伊, 陈运霜, 王紫卉, 牟芝熠, 徐广平, 张德楠, 孙英杰, 毛馨月 (6235)

稻田微氧层和还原层土壤有机碳矿化对氮素添加的响应 ..... 毛婉琼, 夏银行, 马冲, 朱光旭, 王忠诚, 涂强, 陈香碧, 吴金水, 苏以荣 (6248)

保护性耕作对玉米土壤中除草剂残留的影响 ..... 刘沅, 汪祖丞, 刘美华, 张天宇, 王健 (6257)

土壤中微塑料对陆生植物的毒性及其降解机制研究进展 ..... 刘微, 李宇欣, 荣飒爽, 汪晚晴, 王鑫鑫, 郭嘉朋, 韩冰, 王树涛 (6267)

南水北调丹江口库区土壤中微塑料分布特征及风险评估 ..... 王峰, 公玮, 刘哲, 朱重宁, 张润琴, 李志国, 刘毅 (6279)

北京市城市公园土壤铅累积特征、来源及健康风险 ..... 安江梅朵, 张瑞卿, 郭广慧, 王云涛 (6287)

锌冶炼废渣重金属在土壤中的垂向迁移特征及归趋 ..... 杨爱萍, 王小燕, 肖细元, 王倩如, 胡建华, 郭朝晖, 彭驰 (6297)

典型硫铁矿农区土壤-作物系统重金属生态风险及迁移富集特征 ..... 成晓梦, 赵辰, 吴超, 孙彬彬, 曾道明, 贺灵 (6309)

不同土壤-小麦体系中铅镉交互作用与转运特征 ..... 寇萌, 樊宇, 苏梦贤, 熊娟, 汪明霞, 谭文峰 (6319)

开花后小麦地上部镉、砷分布及其转运特征 ..... 王秋实, 华桂丽, 李翔宇, 冯柳旭, 唯康鑫, 耿丽平, 薛培英, 刘文菊 (6328)

黑河上游不同植被类型土壤细菌群落多样性、功能及季节动态 ..... 王竹, 刘扬, 王芳, 王义成 (6339)

典型煤炭产业园区土壤重金属污染对细菌群落结构的影响 ..... 郑丹凤, 刘娟, 苏超, 张红 (6354)

增氧模式对水稻根际微生物多样性和群落结构的影响 ..... 肖德顺, 徐春梅, 王丹英, 陈松, 褚光, 刘元辉 (6362)

紫色土硝化势和氨氧化微生物群落对化肥和有机肥配施生物炭的响应 ..... 李越, 王子芳, 贾丽娟, 谢军, 熊子怡, 高明 (6377)

连作对党参根际土壤理化性质、微生物活性及群落特征的影响 ..... 杨阳, 李海亮, 马凯丽, 虞凡枫, 牛世全 (6387)

粪肥施用对抗生素在土壤上吸附的影响 ..... 罗珊, 胡锦涛, 唐翔宇, 耿春文, 程建华 (6399)

基于脱钩指数的工业园区碳排放与经济关系 ..... 陈四瑜, 刘晶晶, 孙光明 (6412)

近 5 年我国部分城市群生活垃圾特性 ..... 王小波, 刘安琪, 钟慧琼, 赵增立 (6421)

《环境科学》征订启事(5963) 《环境科学》征稿简则(6193) 信息(5923, 6024, 6037)

# 基于脱钩指数的工业园区碳排放与经济发展关系

陈四瑜<sup>1,2</sup>, 刘晶茹<sup>1,2,3\*</sup>, 孙光明<sup>4</sup>

(1. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085; 2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049; 3. 中国科学院雄安创新研究院, 雄安 071702; 4. 河北交通职业技术学院电气与信息工程系, 石家庄 050051)

**摘要:** 工业园区是工业活动的主要载体,也是碳排放的重点区域.为深入探究工业园区碳排放与经济发展的脱钩情况及其驱动力,以郑州经济技术开发区(郑州经开区)为例,运用IPCC碳排放核算方法、Tapio脱钩模型和对数平均迪式指数分解法对园区能源消费碳排放的特征、碳排放与经济发展的脱钩关系和脱钩驱动因素进行分析.结果表明:①从碳排放特征看,郑州经开区能源消费碳排放以间接碳排放为主,碳排放总量呈现前期快速增长,中期增长减缓,后期负增长的趋势,碳排放强度逐年下降;②从脱钩情况看,2011~2016年郑州经开区碳排放总量与经济发展间的脱钩指数为1.021,处于增长连结状态,2016~2020年脱钩指数下降至0.089,转变为弱脱钩状态;③从驱动因素分析,2011~2016年能源碳排放系数、能源强度、产业结构和经济规模4个因素对郑州经开区碳排放脱钩均有抑制作用,2016~2020年除经济规模外均转为促进作用.研究显示,郑州经开区碳排放脱钩因素中,经济规模起主要抑制作用,能源效率起主要促进作用.研究成果可为以郑州经开区为代表的产城融合型工业园区制定相应碳减排政策和实现“双碳”目标提供参考.

**关键词:** 工业园区; 碳排放; 脱钩; Tapio模型; 对数平均迪式指数分解法(LMDI); “双碳”目标

中图分类号: X24 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)11-6412-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202211003

## Relationship Between Carbon Emissions and Economic Development of Industrial Parks Based on Decoupling Index

CHEN Si-yu<sup>1,2</sup>, LIU Jing-ru<sup>1,2,3\*</sup>, SUN Guang-ming<sup>4</sup>

(1. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Xiongan Innovation Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Xiongan 071702, China; 4. Department of Electrical and Information Engineering, Hebei Jiaotong Vocational and Technical College, Shijiazhuang 050051, China)

**Abstract:** Industrial parks are the main carriers of industrial activities and are also key areas for carbon emissions. To deeply explore the decoupling state of carbon emissions and economic development of industrial parks and the driving forces, Zhengzhou Economic Development Zone were taken as example, based on the energy consumption data of industrial enterprises above a designated size from 2011 to 2020, the IPCC carbon emission accounting method, Tapio decoupling model, and logarithmic mean Divisia index decomposition method were used to analyze the characteristics of carbon emissions from energy consumption in the park, the relationship between carbon emissions and economic development, and the driving factors of decoupling. The results showed that: ① in terms of carbon emission characteristics, the carbon emissions of energy consumption in Zhengzhou Economic Development Zone were mainly indirect carbon emissions, and the total carbon emissions showed a trend of rapid growth in the early stage, slowing down in the medium term, and negative growth in the later stage. The carbon emission intensity was decreasing annually. ② From the perspective of decoupling, the decoupling index between total carbon emissions and economic development in Zhengzhou Economic Development Zone from 2011 to 2016 was 1.021, which was in a state of growth linkage, and the decoupling index decreased to 0.089 from 2016 to 2020, turning into a weak decoupling state. ③ From the analysis of driving factors, from 2011 to 2016, four factors, namely carbon emission coefficient, energy efficiency, industrial structure, and economic level, all had a restraining effect on the decoupling of carbon emissions in Zhengzhou Economic Development Zone, and from 2016 to 2020, they all turned into promotion except for the economic level. This study showed that among the factors for the decoupling of carbon emissions in the Zhengzhou Economic Development Zone, the economic level played a major inhibitory role, and energy efficiency played a major role in promoting it. The results of this study can provide a reference for the industry-city integrated industrial park represented by Zhengzhou Economic Development Zone to formulate corresponding carbon emission reduction policies and achieve the carbon peaking and carbon neutrality goals.

**Key words:** industrial park; carbon emission; decoupling; Tapio model; logarithmic mean Divisia index(LMDI); carbon peaking and carbon neutrality goals

我国目前正处于快速工业化和城市化的进程中,其经济发展所带来的能源消耗和碳排放问题受到了国际社会的广泛关注<sup>[1]</sup>.工业部门是温室气体排放的主要来源,工业园区作为工业产业集聚区,贡献了全国31%的二氧化碳排放量<sup>[2]</sup>,是工业部门实现“双碳”目标的主战场<sup>[3]</sup>.作为工业发展的重要载体,工业园区面临着如何协调经济发展和“降碳”的困境.目前相关研究主要集中在:园区碳排放核算方法<sup>[4-7]</sup>、园区碳排放预测及减排策略研究等方面<sup>[8]</sup>.在国家<sup>[9]</sup>、区域<sup>[10-13]</sup>和城市层面<sup>[14-18]</sup>广泛

探讨的碳排放与经济增长脱钩研究,在工业园区层面鲜有涉及.同时,工业园区层面的碳排放核算方法目前尚未形成统一的标准,大部分研究参考国家、省和市层面的核算方法利用清单分析和投入产出分析法进行核算<sup>[4,6]</sup>.

脱钩理论于2002年由经济合作与发展组织

收稿日期: 2022-11-01; 修订日期: 2023-01-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(71874181,32261143730)

作者简介: 陈四瑜(1997~),女,硕士研究生,主要研究方向为产业生态化和工业园区碳排放, E-mail: ynuhensiyu@163.com

\* 通信作者, E-mail: liujingru@cees.ac.cn

(Organization for Economic Co-operation and Development, OECD) 正式提出, 是一项衡量经济增长与资源消耗或环境污染之间联系的指标<sup>[19]</sup>. 2000 年 Zhang<sup>[20]</sup> 首次用脱钩方法研究中国 CO<sub>2</sub> 排放与经济增长的关系. 目前脱钩理论已在国内外广泛应用于经济增长与 CO<sub>2</sub> 排放关系的研究中<sup>[21~25]</sup>. 基于脱钩指数概念, 2005 年 Tapio 在研究欧洲交通行业脱钩状况时定义了 3 种脱钩状态: 脱钩、连结和负脱钩, 并进一步细分为 8 种可能性, 即: 弱脱钩、强脱钩、衰退型脱钩、增长连结、衰退连结、弱负脱钩、强负脱钩和扩张型负脱钩<sup>[26]</sup>. 由于 Tapio 脱钩指数可以合理地表征环境变量和经济变量的 8 种可能组合, 因此 Tapio 脱钩指数已被许多学者广泛应用于我国碳排放与经济发展的脱钩关系研究<sup>[27~31]</sup>. 近年来, 我国关于经济发展与 CO<sub>2</sub> 排放脱钩的研究领域包含了: 交通运输<sup>[32]</sup>、农业<sup>[33]</sup>、旅游业<sup>[34]</sup>、建筑业<sup>[35]</sup>、电力行业<sup>[36]</sup>、物流业<sup>[37]</sup>和制造业<sup>[38]</sup>等. 此外, 诸多学者结合 LMDI 和广义迪式指数分解法 (GDIM) 等指数分解方法对我国碳排放与经济发展的脱钩关系进行分解分析<sup>[39~41]</sup>.

目前在工业园区尺度, 尚未形成综合脱钩分析方法、LMDI 分解方法的碳排放与经济发展脱钩及驱动力分析的系统研究框架. 同时, 对影响脱钩指数的驱动因子的探讨, 也未深入到具体的工业行业类别. 对于工业园区而言, 其能源活动直接来自各行业类别的工业企业, 不同行业类别的能源消费结构、能源效率和经济发展水平等都存在明显的差异, 这导致不同工业行业类别之间的碳排放状况及其与经济发展的脱钩关系也有显著差异. 本研究以郑州经开区为例, 对其过去工业园区及各工业行业类别的碳排放特征、脱钩关系及其驱动因素进行探究, 识别不同措施对脱钩的影响, 以期为以郑州经开区为代表的产城融合型工业园区制定相应碳减排政策和实现“双碳”目标提供参考.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域和数据来源

郑州经开区是以制造业为主的综合类工业园区, 形成了汽车及零部件、电子信息和装备制造业等产业集聚, 整车产量占河南省产量的 80%. 近 10 年来, 郑州经开区经济快速发展, 主导产业对能源的需求和碳排放也在增加, 因此揭示郑州经开区及其各工业行业类别碳排放特征及其与经济发展的脱钩关系, 进一步探讨其脱钩状况的驱动因素, 有利于郑州经开区因地制宜提出减排策略, 对其他综合类工业园区有关低碳减排政策的制定具有示范效应.

本文搜集了郑州经开区 2011 ~ 2020 年规模以上工业企业的能源消费数据、规模以上工业企业总产值数据. 工业总产值可以反映工业生产的总体规模, 工业总产值数据较为容易获取, 且覆盖了园区、行业和企业这 3 个层面, 因此选用工业总产值来表征经济水平. 2011 ~ 2020 年规模以上 (规上) 工业企业分企业、分品种能源消耗数据均来自郑州经开区统计局统计数据, 均为能源消费量. 能源品类包括煤炭、天然气、汽油、柴油、电力和热力. 统计数据均为终端能源消费量. 园区总产值数据来源于《郑州经开区统计年鉴》(2011 ~ 2020 年).

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 园区碳排放计算

目前, 工业园区开展碳排放核算主要参考两套体系: 一是政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 提出的碳排放清单框架<sup>[42]</sup>; 二是世界资源研究所 (WRI) 和世界可持续发展工商理事会 (WBCSD) 共同编制的温室气体核算体系, 将企业的排放范围分为范围 1 ~ 范围 3. 国家发展和改革委员会 (NDRC) 也制定了一系列省级温室气体清单指南<sup>[43]</sup>.

参考以上两套体系和指南, 本研究确定了工业园区碳排放核算的范围. 由于园区内不含污水处理厂及垃圾填埋场等基础设施, 且产品制造前端 (包括原材料制造和运输排放) 和使用端的数据无法获取, 因此, 本研究只核算范围 1 和范围 2 的排放量, 范围 1 排放包括煤炭、天然气、汽油和柴油燃烧, 范围 2 排放包括园区外购热、电排放.

根据国家发展改革委办公厅《省级温室气体清单编制指南 (试行)》中提供的参考方法, 化石燃料相关的碳排放量计算方法见式 (1) ~ (3).

$$CE_f = \sum_{ij} AD_{ij} \times NCV_i \times CC_i \times O_i \times \frac{44}{12} \quad (1)$$

$$CE_{heat_j} = \sum_j Heat_j \times EF_{heat} \quad (2)$$

$$CE_{ele_j} = \sum_j Ele_j \times EF_{ele} \quad (3)$$

式中,  $CE_f$  为各类化石能源产生的 CO<sub>2</sub> 排放量;  $AD_{ij}$  为  $j$  企业第  $i$  种化石能源的消耗量;  $NCV_i$  为第  $i$  类化石能源的平均低位发热量;  $CC_i$  为第  $i$  种化石能源的单位热值含碳量;  $O_i$  为第  $i$  种化石能源的碳氧化率;  $CE_{heat_j}$  为外购热力产生的 CO<sub>2</sub> 排放量;  $Heat_j$  为外购热力的消耗量;  $EF_{heat}$  为区外购热力的 CO<sub>2</sub> 排放因子;  $CE_{ele_j}$  为园区外购电力产生的 CO<sub>2</sub> 排放量;  $Ele_j$  为园区外购电力的消耗量;  $EF_{ele}$  为园区外购电力的 CO<sub>2</sub> 排放因子, 44/12 表示二氧化碳与碳的分子量之比, 化石能源的碳排放计算参数见表 1.

表 1 化石能源类型及碳排放计算参数<sup>1)</sup>  
Table 1 Fossil energy types and carbon emission calculation parameters

序号	能源类型	平均低位发热量 (NCV <sub>i</sub> )	单位热值含碳量 (CC <sub>i</sub> )	碳氧化率 (O <sub>i</sub> )
1	一般烟煤	26.70	28.00	0.96
2	天然气	389.31	15.32	0.98
3	汽油	43.07	18.90	0.98
4	柴油	43.65	20.20	0.99

1) 天然气平均低位发热量单位为  $\text{GJ} \cdot (\text{10}^4 \text{ m}^3)^{-1}$ , 其余能源平均低位发热量单位为  $\text{GJ} \cdot \text{t}^{-1}$ ; 单位热值含碳量单位为  $\text{t} \cdot \text{TJ}^{-1}$

### 1.2.2 脱钩分析

脱钩分析是分析两个不同变量变化速率之间关

表 2 脱钩状态划分

Table 2 Division of decoupling status

状态	项目	碳排放增长率 ( $\Delta C/C_0$ )	工业总产值增长率 ( $\Delta \text{GIO}/\text{GIO}_0$ )	脱钩指数( $D$ )
脱钩	弱脱钩	>0	>0	$0 \leq D < 0.8$
	强脱钩	<0	>0	$D < 0$
	衰退型脱钩	<0	<0	$D > 1.2$
连结	增长连结	>0	>0	$0.8 \leq D \leq 1.2$
	衰退连结	<0	<0	$0.8 \leq D \leq 1.2$
负脱钩	弱负脱钩	<0	<0	$0 \leq D < 0.8$
	强负脱钩	>0	<0	$D < 0$
	扩张型负脱钩	>0	>0	$D > 1.2$

### 1.2.3 脱钩分解方法

为进一步了解影响脱钩指数的驱动因素及其对脱钩的贡献率,采用分解分析的方法进行分析.对数平均迪式指数分解法(logarithmic mean Divisia index, LMDI)是一种目前广泛应用于低碳及碳排放脱钩分析的因素分解方法,由 Ang<sup>[44]</sup>于 20 世纪 90 年代提出.基于 Kaya 恒等式,对影响经济增长与碳排放变化间脱钩指数的驱动因素进行分解:

$$C = \text{GIO} \sum_i \frac{C_i}{E_i} \times \frac{E_i}{\text{GIO}_i} \times \frac{\text{GIO}_i}{\text{GIO}} \\ = \sum_i \text{EF}_i \times \text{EI}_i \times S_i \times \text{GIO} \quad (5)$$

式中,  $C$  为碳排放量,  $\text{GIO}$  为工业总产值,  $i$  表示行业类别,  $C_i$  为由  $i$  行业产生的二氧化碳排放量;  $E_i$  为  $i$  行业能源的消耗量;  $\text{GIO}_i$  为  $i$  行业工业产值.碳排放总量的变化受经济规模( $\text{GIO}$ )、能源碳排放系数( $\text{EF} = \frac{C_i}{E_i}$ )、能源强度  $\text{EI} = (\frac{E_i}{\text{GIO}_i})$ 、产业结构( $S = \frac{\text{GIO}_i}{\text{GIO}}$ )的影响,采用加和分解对公式(5)模型进行分解,则碳排放规模的变化( $\Delta C$ )可以表示为:

$$\Delta C = C_t - C_0 = \Delta C_{\text{EF}} + \Delta C_{\text{EI}} + \Delta C_S + \Delta C_{\text{GIO}} \quad (6)$$

式中,  $\Delta C_{\text{EF}}$  为能源碳排放系数效应,  $\Delta C_{\text{EI}}$  为能源强

系的有效工具<sup>[21]</sup>. 本文采用了 Tapio 脱钩模型作为分析模型,构建郑州经开区碳排放与经济增长的脱钩模型,根据 Tapio<sup>[26]</sup>给出的定义,脱钩指数如式(4)表示.

$$D = \frac{\Delta C/C_0}{\Delta \text{GIO}/\text{GIO}_0} = \frac{\text{GIO}_0}{C_0 \times \Delta \text{GIO}} \times (C_t - C_0) \quad (4)$$

式中,  $D$  为脱钩指数,反映了工业园区经济产值与碳排放之间的脱钩关系,脱钩状态划分见表 2;  $\Delta C$  和  $\Delta \text{GIO}$  分别表示碳排放量和工业总产值在末期相对于初期的变化量;  $\Delta C/C_0$  和  $\Delta \text{GIO}/\text{GIO}_0$  分别表示碳排放增长率和工业总产值增长率.

度效应,  $\Delta C_S$  为产业结构效应,  $\Delta C_{\text{GIO}}$  为经济规模效应.

结合脱钩公式(4),得到郑州经开区碳排放与经济增长的脱钩效应量化分解模型:

$$D = \frac{\text{GIO}_0}{C_0 \times \Delta \text{GIO}} \times (\Delta C_{\text{EF}} + \Delta C_{\text{EI}} + \Delta C_S + \Delta C_{\text{GIO}}) \quad (7)$$

各因素的脱钩效应计算如下:

$$D_{\text{EF}} = \begin{cases} 0, & \text{if } C_t \times C_0 = 0 \\ Z \times \sum_i \sum_j Y \times \ln \frac{\text{EF}_t}{\text{EF}_0} \end{cases} \quad (8)$$

$$D_{\text{EI}} = \begin{cases} 0, & \text{if } C_t \times C_0 = 0 \\ Z \times \sum_i \sum_j Y \times \ln \frac{\text{EI}_t}{\text{EI}_0} \end{cases} \quad (9)$$

$$D_S = \begin{cases} 0, & \text{if } C_t \times C_0 = 0 \\ Z \times \sum_i \sum_j Y \times \ln \frac{S_t}{S_0} \end{cases} \quad (10)$$

$$D_{\text{GIO}} = \begin{cases} 0, & \text{if } C_t \times C_0 = 0 \\ Z \times \sum_i \sum_j Y \times \ln \frac{\text{GIO}_t}{\text{GIO}_0} \end{cases} \quad (11)$$

$$Z = \frac{\text{GIO}_0}{C_t \times \Delta \text{GIO}} \quad (12)$$

$$Y = \frac{C_t - C_0}{\ln C_t - \ln C_0} \quad (13)$$

式中,  $D_{EF}$ 、 $D_{EI}$ 、 $D_S$  和  $D_{GIO}$  分别为能源碳排放系数、能源强度、产业结构和经济规模这 4 个驱动因素的脱钩指数。

## 2 结果与讨论

### 2.1 郑州经开区经济发展与碳排放现状

#### 2.1.1 园区层面碳排放特征

2011 ~ 2020 年期间, 郑州经开区碳排放量由 2011 年的  $24.85 \times 10^4$  t 增加至 2020 年的  $75.53 \times 10^4$  t, 年平均增长率为 8.97%, 碳排放量处于前期快速增长、中期增长缓慢至后期波动下降的趋势(图 1)。2011 ~ 2014 年碳排放量快速增长, 年均增长率达 20.98%, 增速最快; 2014 ~ 2017 年碳排放增速放缓, 碳排放量稳步增长, 由  $61.74 \times 10^4$  t 增长至  $86.79 \times 10^4$  t, 年均增长率为 12.02%; 2017 ~ 2020 年, 碳排放减少了  $11.26 \times 10^4$  t, 年均增长率实现负增长, 碳排放强度呈现出下降趋势, 由 2011 年的  $0.08 \text{ t} \cdot \text{万元}^{-1}$  降为 2020 年的  $0.06 \text{ t} \cdot \text{万元}^{-1}$ 。

#### 2.1.2 行业层面碳排放特征

在郑州经开区各行业中, 电子设备制造业, 汽车制造业, 非金属矿物制品业及食品制造业是碳排放的主要来源, 4 个行业每年碳排放量的总和占当年

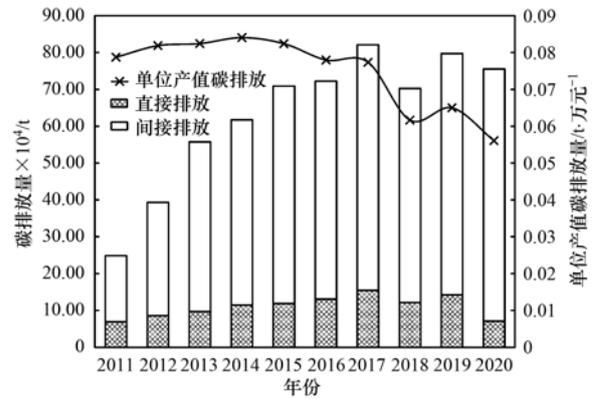


图 1 2011 ~ 2020 年郑州经开区能源碳排放状况

Fig. 1 Energy carbon emission in Zhengzhou Economic and Technological Development Zone from 2011 to 2020

园区碳排放总量的 65% 以上。其中电子设备制造业及汽车制造业碳排放量呈前期快速增长、中期增长减缓、后期波动下降的趋势(图 2), 与园区总体碳排放变化趋势一致; 非金属矿物制品业呈现先增长、后稳定、再下降的趋势; 食品制造业在 2011 ~ 2017 年碳排放量总体保持增长, 2017 年后出现波动并有下降趋势。2020 年碳排放量最高的是电子设备制造业及汽车制造业, 其中电子设备制造业碳排放量占园区的 24.8%, 为  $18.74 \times 10^4$  t, 汽车制造业碳

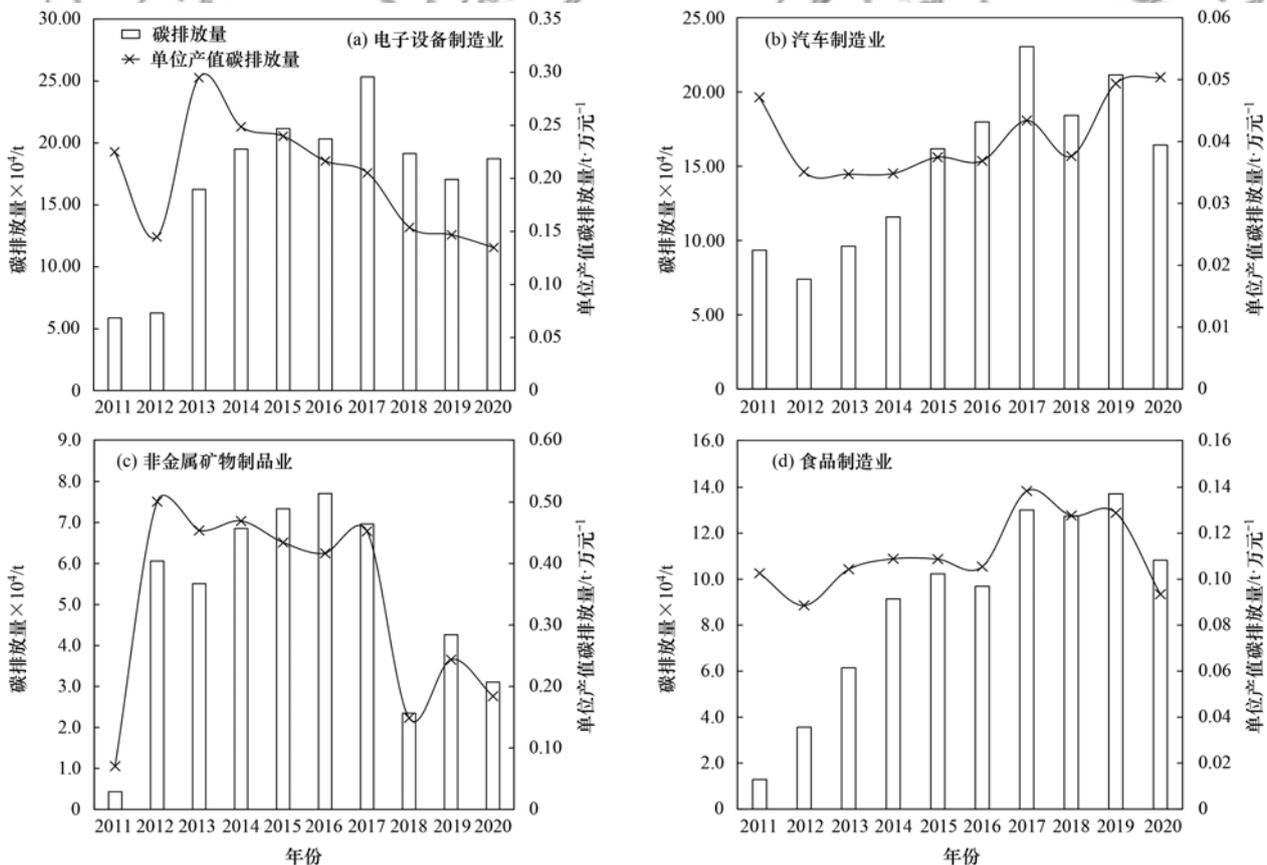


图 2 2011 ~ 2020 年郑州经开区各行业碳排放及单位产值碳排放状况

Fig. 2 Total carbon emissions and carbon emissions per unit output value of various industries in Zhengzhou Economic and Technological Development Zone from 2011 to 2020

排放量占园区的 21.8%,为  $16.43 \times 10^4$  t. 汽车制造业的碳排放强度明显低于其他 3 个行业,非金属矿物制品业虽在这 4 个行业中碳排放量最低,但其碳排放强度较高.

## 2.2 碳排放与经济增长之间的脱钩分析

根据郑州经开区不同时间段碳排放量的变化特点,将 2011~2020 年划分为 2011~2016 年和 2016~2020 年这两个时间段,计算郑州经开区及其中各行业两个时段的碳排放量和工业总产值的变化量,通过式(4)和表 2,得到两个时间段的脱钩关系(表 3).

### 2.2.1 园区层面脱钩情况

从表 3 可知,郑州经开区经济增长与碳排在 2011~2020 年经历了增长连结和弱脱钩两种不同类型的脱钩状态. 2011~2016 年郑州经开区碳排放脱钩指数为 1.021,为增长连结状态,说明经济增长的同时碳排放量也在增长,且碳排放量的增幅略大于总产值增幅. 2016~2020 年,郑州经开区碳排放脱钩指数为 0.089,为弱脱钩状态,说明该时期郑州经开区总产值和碳排放同时增长,但碳排放增速低于经济增速. 该时期郑州经开区企业数量快速增加,且新增企业中高耗能企业较少,大多为高端制造业企业,因此在碳排放增速较缓的同时还能保持工业总产值持续升高. 在此时期内,郑州经开区响应国家号召,关停或搬迁“两高”企业,同时调整园区能源结构,开展了“煤改电”、“煤改气”及能源“双控”等

工作,形成了以汽车制造、电子设备制造业为主导的产业结构和以电力消耗为主的能源结构. 因此,郑州经开区经济增长与碳排在长时间内应继续表现为弱脱钩或呈现强脱钩与弱脱钩交替的脱钩状态.

### 2.2.2 行业层面脱钩情况

从各行业类别来看,郑州经开区 2011~2020 年经济增长与碳排放的脱钩状态出现弱脱钩和强脱钩两种类型,其中,电子制造业和汽车制造业等 6 个行业脱钩状态由弱脱钩转变为强脱钩. 专用设备制造业等 4 个行业的脱钩状态由 2011~2016 年的强脱钩转变为弱脱钩,这是由于,郑州经开区该时期新引入了部分专用设备制造业企业,碳排放量随之增加. 农副食品加工业等 5 个行业一直保持弱脱钩状态不变.

从脱钩指数区间的行业数量可以看出郑州经开区碳排放脱钩状态在 2016~2020 年优于 2011~2016 年. 2011~2016 年脱钩状态为弱脱钩的有汽车制造业和电子设备制造业等 11 个行业,其中脱钩指数位于 0.05 的有通用设备制造业等 5 个行业,位于 0.05~0.1 的有食品制造业等 2 个行业,大于 0.1 的有非金属矿物制品业等 4 个行业. 2016~2020 年在脱钩状态为弱脱钩的 9 个行业中,脱钩指数为 0~0.05 的有通用设备制造业等 7 个行业,位于 0.05~0.1 的有批发业 1 个行业,大于 0.1 的有专用设备制造业 1 个行业.

表 3 2011~2020 年郑州经开区碳排放与工业总产值的脱钩状况

行业类别	2011~2016 年		2016~2020 年	
	脱钩指数	状态	脱钩指数	状态
郑州经开区	1.021	增长连结	0.089	弱脱钩
汽车制造业	0.205	弱脱钩	-0.049	强脱钩
电子设备制造业	0.343	弱脱钩	-0.050	强脱钩
通用设备制造业	0.028	弱脱钩	0.031	弱脱钩
专用设备制造业	-0.001	强脱钩	0.364	弱脱钩
非金属矿物制品业	0.173	弱脱钩	-0.145	强脱钩
农副食品加工业	0.141	弱脱钩	0.009	弱脱钩
食品制造业	0.059	弱脱钩	0.027	弱脱钩
医药制造业	0.005	弱脱钩	0.047	弱脱钩
印刷和记录媒介复制业	-0.026	强脱钩	0.005	弱脱钩
化学原料和制品制造业	0.076	弱脱钩	-0.113	强脱钩
金属制品业	0.012	弱脱钩	-0.011	强脱钩
电气机械和器材制造业	0.029	弱脱钩	-0.050	强脱钩
仪器仪表制造业	-0.002	强脱钩	0.008	弱脱钩
批发业	0.040	弱脱钩	0.056	弱脱钩
科技推广和应用服务业	-0.000 1	强脱钩	0.033	弱脱钩

## 2.3 脱钩状态影响因素解析

利用式(7)~(13)对郑州经开区及其各行业类别碳排放脱钩指数进行分解,得到 EF、EI、S 和 GIO 这 4 个因素的碳排放脱钩指数,结果如表 4 所示. 下面将从 4 类因素进行解析.

### 2.3.1 能源碳排放系数因素

能源碳排放系数效应对经济增长与碳排放脱钩在两个时段有相反的驱动作用(表 4). 2011~2016 年,郑州经开区碳排放系数脱钩指数为 0.003,不利于碳排放的脱钩. 在各行业类别中,电子设备制造

业、汽车制造业和农副产品加工业等 9 个行业的碳排放系数对经济增长与碳排放脱钩有促进作用,其他行业均为抑制作用. 主要原因为,该时段内多数行业的能源结构还未得到明显改善,仍有较多行业使用燃煤作为燃料. 2016 ~ 2020 年,郑州经开区能源碳排放系数脱钩指数为 -0.119,有利于碳排放的脱钩. 此时期内专用设备制造业、非金属矿物制品业和化学制品制造业等 6 个行业的碳排放系数对碳排放脱钩有较明显的促进作用,虽对碳排放脱钩起促进作用的行业数量少于前一时期,但其脱钩贡献率远超前一时期. 该时期郑州经开区煤炭使用逐步被天然气和电力替代,可见优化能源结构对于工业园区碳排放脱钩效果显著.

### 2.3.2 能源强度因素

在影响郑州经开区碳排放脱钩的 4 种效应中,

能源强度效应是促进碳排放脱钩的最主要因素,脱钩指数由 2011 ~ 2016 年的 0.081 降低至 2016 ~ 2020 年的 -0.504 (表 4),对园区碳排放脱钩由抑制作用转为促进作用. 这说明郑州经开区的能源效率不断提升,持续向低能耗、高效集约的高端制造业方向发展. 2011 ~ 2016 年,汽车制造业等 8 个行业的能源效率对经济增长与碳排放脱钩有促进作用,2016 ~ 2020 年,起促进作用的行业增加至 11 个. 但医药制造业、汽车制造业、仪器仪表制造业这 3 类行业由对园区碳排放脱钩的促进作用转变为微弱的抑制作用,原因是这 3 类行业在 2016 ~ 2020 年期间碳排放量减少的同时,总产值也在减少,且总产值的下降速率大于碳排放下降速率.

### 2.3.3 产业结构因素

产业结构效应对郑州经开区碳排放脱钩在两个

表 4 2011 ~ 2020 年郑州经开区碳排放与工业总产值的脱钩指数因素分解<sup>1)</sup>

Table 4 Decomposition of decoupling index between carbon emissions and gross industrial output value in Zhengzhou Economic and Technological Development Zone from 2011 to 2020

行业类别	2011 ~ 2016 年				2016 ~ 2020 年			
	$D_{EF}$	$D_{EI}$	$D_S$	$D_{GIO}$	$D_{EF}$	$D_{EI}$	$D_S$	$D_{GIO}$
郑州经开区	0.003 (0.25%)	0.081 (7.46%)	0.014 (1.26%)	0.984 (91.03%)	-0.119 (-73.64%)	-0.504 (-312.19%)	-0.010 (-6.44%)	0.794 (492.26%)
汽车制造业	-0.011 (-1.04%)	-0.066 (-6.09%)	-0.054 (-5.00%)	0.336 (31.07%)	0.120 (74.42%)	0.049 (30.41%)	-0.427 (-264.61%)	0.209 (129.44%)
电子设备制造业	-0.036 (-3.33%)	0.025 (2.34%)	0.058 (5.33%)	0.296 (27.40%)	0.033 (20.29%)	-0.323 (-200.48%)	0.003 (2.15%)	0.237 (146.96%)
通用设备制造业	-0.002 (-0.20%)	0.004 (0.39%)	0.010 (0.93%)	0.016 (1.51%)	0.011 (7.08%)	0.012 (7.29%)	-0.015 (-9.22%)	0.023 (14.05%)
专用设备制造业	0.004 (0.33%)	-0.001 (-0.10%)	-0.011 (-0.98%)	0.007 (0.68%)	-0.099 (-61.31%)	-0.070 (-43.13)	0.495 (307.06%)	0.037 (23.08%)
非金属矿物制品	-0.007 (-0.66%)	0.114 (10.51%)	0.002 (0.19%)	0.064 (5.93%)	-0.158 (-98.21%)	0.028 (17.59%)	-0.076 (-47.29%)	0.061 (38.10%)
农副产品加工业	-0.021 (-1.93%)	0.066 (6.07%)	0.042 (3.88%)	0.054 (5.02%)	-0.005 (-2.95%)	-0.052 (-32.27%)	-0.013 (-7.89%)	0.079 (48.72%)
食品制造业	-0.006 (-0.54%)	-0.036 (-3.32%)	0.053 (4.89%)	0.047 (4.38%)	0.033 (20.23%)	0.000 (-0.20%)	-0.051 (-31.86%)	0.046 (28.37%)
医药制造业	0.001 (0.05%)	-0.002 (-0.15%)	0.002 (0.14%)	0.005 (0.43%)	0.003 (1.88%)	0.013 (8.26%)	0.020 (12.39%)	0.010 (6.39%)
印刷业	-0.005 (-0.46%)	0.005 (0.49%)	-0.042 (-3.85%)	0.015 (1.38%)	0.004 (2.34%)	-0.007 (-4.49%)	0.005 (3.31%)	0.003 (2.03%)
化学制品制造业	0.081 (7.48%)	-0.014 (-1.31%)	-0.052 (-4.77%)	0.061 (5.60%)	-0.064 (-39.51%)	-0.083 (-51.19%)	0.009 (5.48%)	0.025 (15.20%)
金属制品业	-0.002 (-0.19%)	0.007 (0.61%)	-0.002 (-0.18%)	0.009 (0.84%)	0.000 (0.03%)	-0.005 (-2.87%)	-0.012 (-7.47%)	0.006 (3.49%)
电气机械制造业	0.002 (0.21%)	0.042 (3.89%)	-0.043 (-4.00%)	0.028 (2.63%)	0.015 (9.34%)	-0.071 (-44.09%)	-0.004 (-2.22%)	0.010 (6.14%)
仪器仪表制造业	0.004 (0.33%)	-0.019 (-1.71%)	0.006 (0.52%)	0.008 (0.71%)	0.000 (-0.15%)	0.002 (1.02%)	0.002 (1.02%)	0.005 (2.83%)
批发业	0.003 (0.30%)	-0.044 (-4.07%)	0.049 (4.49%)	0.032 (2.95%)	-0.018 (-10.96%)	-0.002 (-1.50%)	0.039 (23.93%)	0.037 (23.13%)
科技推广和应用	-0.001 (-0.10%)	-0.001 (-0.07%)	-0.003 (-0.33%)	0.005 (0.49%)	0.006 (3.84%)	0.006 (3.44%)	0.014 (8.78%)	0.007 (4.34%)

1)  $D_{EF}$ : 能源碳排放系数脱钩指数,  $D_{EI}$ : 能源强度脱钩指数,  $D_S$ : 产业结构脱钩指数,  $D_{GIO}$ : 经济规模脱钩指数; 括号内的值表示各行业类别分解指标对郑州经开区总体脱钩的贡献率

时间段有相反的驱动作用(表4),2011~2016年,产业结构的脱钩指数为0.014,对碳排放脱钩的贡献率为1.26%,不利于碳排放的脱钩。2016~2020年,产业结构的脱钩指数为-0.010,对碳排放脱钩的贡献率为6.44%,在一定程度上促进了园区碳排放的脱钩,但其贡献较小。两个时间段内,对园区碳排放脱钩起促进作用的行业类别中,贡献率最大的均为汽车制造业,说明主导产业对工业园区整体碳排放脱钩贡献最大,可见产业结构转型升级有助于工业园区碳排放脱钩。

### 2.3.4 经济规模因素

经济规模效应对郑州经开区及其各个行业碳排放脱钩均为抑制作用(表4)。2011~2016年郑州经开区经济规模脱钩指数为0.984,其中汽车制造业(0.336)脱钩指数最大,经济规模效应对其碳排放脱钩的抑制作用最大。2016~2020年经济规模效应对郑州经开区及其各个行业碳排放脱钩均为抑制作用,但脱钩指数下降至0.794,相比前一时期抑制作用减弱,其中电子设备制造业经济规模脱钩指数最大(0.237)。可见经济规模是抑制园区碳排放脱钩的主要因素,在2011~2016年和2016~2020年两个时间段内,工业生产总产值分别增长了193.36%和45.39%,碳排放总量分别增加了190.59%和4.58%,工业规模的扩大导致能源消费量的增加;但相比之下,后一时段的碳排放增长速率明显下降,因此经济规模效应对郑州经开区碳排放脱钩的抑制作用已明显减弱,碳排放主要来自于汽车制造业和电子设备制造业,因此这两个行业在所有行业类别中对园区碳排放脱钩的抑制贡献率也最大。

## 3 政策建议

目前我国工业园区碳排放基数大,完成“双碳”目标时间紧、任务重,基于本研究的结果,提出以下3点建议。

(1)郑州经开区通过对重点耗能企业实施“煤改气”、“煤改电”工程,采用地热供暖和光伏发电等方式,逐步实现低碳能源代替高碳能源,因此园区碳排放强度逐年下降。同类型的工业园区也可以通过因地制宜发展清洁能源、引导企业调整用能结构、对重点耗能企业耗能设备进行升级改造的方式来提升节能管理水平,通过能源替代的方式减少化石能源的使用,实现园区绿色化发展。

(2)本研究结果显示,能源强度效应是影响碳排放与经济发展脱钩的主导效应,郑州经开区通过以传统主导产业集群建设为引领、加快培育新兴产业集群和探索发展前沿产业的方式,构建了各产业

集群内部能源利用的共生体系,提高了能源利用效率,降低了能源强度。因此加快推动产业结构转型升级,形成低碳共生产业集群,是降低能源强度、实现碳排放和经济发展脱钩的重点。

(3)本研究结果发现,郑州经开区汽车制造业和电子设备制造业两大主导产业,对园区碳排放与经济增长脱钩影响的贡献率最大。因此应在园区内建设形成产业链完整、价值高端的主导产业体系,发挥主导产业的低碳发展引领作用,并且引导主导产业中的龙头企业在节能降碳方面逐渐形成具有示范效应的技术创新和管理模式至关重要。

## 4 结论

(1)2011~2020年郑州经开区的经济规模不断增长,碳排放也呈现增加趋势,碳排放强度逐年下降,整体呈现出“低碳发展”态势。从行业类别看,碳排放量高的行业主要为园区的主导产业,这些行业也是园区经济规模较大的行业。

(2)用脱钩指数对园区及各行业类别经济产值与碳排放的耦合关系进行计算发现,2011~2020年郑州经开区整体及各行业类别主要处于增长连结、弱脱钩、强脱钩3种状态。2011~2016年,郑州经开区整体处于增长连结状态,各行业以弱脱钩为主;2016~2020年,郑州经开区整体转变为弱脱钩状态,各行业类别中,强脱钩的行业数量增加。

(3)通过对脱钩指数进行因子分解发现,在郑州经开区经济增长过程中,工业总产值的增长推动着能源消耗碳排放的增加,产业结构的优化、能源结构的转型和技术的进步对园区的节能减排、实现经济发展与碳排放的脱钩有一定的促进作用。影响郑州经开区碳排放脱钩的主导效应主要为经济规模效应和能源强度效应,产业结构效应影响最小。不同时期,郑州经开区影响碳排放脱钩贡献率最大的行业具有差异性。2011~2016年,各行业中,汽车制造业的能源强度效应对脱钩的促进作用及其经济规模效应对脱钩的抑制作用最大;2016~2020年,各行业中,电子设备制造业的能源强度效应对脱钩的促进作用及其经济规模效应对脱钩的抑制作用最大。

### 参考文献:

- [1] Zhang M, Wang C, Wang S S, et al. Assessment of greenhouse gas emissions reduction potential in an industrial park in China [J]. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2020, 22(7): 1435-1448.
- [2] 郭扬,吕一铮,严坤,等.中国工业园区低碳发展路径研究[J].*中国环境管理*,2021,13(1):49-58.  
Guo Y, Lv Y Z, Yan K, et al. Low-Carbon development pathways of industrial parks in China [J]. *Environmental*

- conformity Assessment, 2021, **13**(1): 49-58.
- [ 3 ] 陈吕军. 做好碳达峰碳中和工作, 工业园区必须做出贡献[J]. 资源再生, 2021, (2): 15-20.  
Chen L J. To do a good job of carbon peak and carbon neutrality, industrial parks must make contributions [ J ]. Resource Recycling, 2021, (2): 15-20.
- [ 4 ] Yu X, Zheng H R, Sun L, *et al.* An emissions accounting framework for industrial parks in China [ J ]. Journal of Cleaner Production, 2020, **244**, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118712.
- [ 5 ] 张雁飞, 王晓菲, 于斐, 等. 工业园区碳排放核算方法及实证研究[J]. 生态经济, 2013, (9): 155-157.  
Zhang Y F, Wang X F, Yu F, *et al.* Carbon emissions accounting methods and instance research of industrial parks [ J ]. Ecological Economy, 2013, (9): 155-157.
- [ 6 ] 陈彬, 杨维思. 产业园区碳排放核算方法研究 [ J ]. 中国人口·资源与环境, 2017, **27**(3): 1-10.  
Chen B, Yang W S. Carbon emission accounting methods for industrial parks [ J ]. China Population, Resources and Environment, 2017, **27**(3): 1-10.
- [ 7 ] Dong H J, Geng Y, Xi F M, *et al.* Carbon footprint evaluation at industrial park level: a hybrid life cycle assessment approach [ J ]. Energy Policy, 2013, **57**: 298-307.
- [ 8 ] Duan H Y, Dong X Z, Xie P L, *et al.* Peaking industrial CO<sub>2</sub> emission in a typical heavy industrial region: from multi-industry and multi-energy type perspectives [ J ]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, **19**(13), doi: 10.3390/ijerph19137829.
- [ 9 ] 郝瑞军, 魏伟, 刘春芳, 等. 中国能源消费碳排放的空间化与时空动态 [ J ]. 环境科学, 2022, **43**(11): 5305-5314.  
Hao R J, Wei W, Liu C F, *et al.* Spatialization and spatio-temporal dynamics of energy consumption carbon emissions in China [ J ]. Environmental Science, 2022, **43**(11): 5305-5314.
- [ 10 ] Liu K, Zhao M X, Xie X Y, *et al.* Study on the decoupling relationship and rebound effect between economic growth and carbon emissions in central China [ J ]. Sustainability, 2022, **14**(16), doi: 10.3390/su141610233.
- [ 11 ] Ning Y D, Zhang B Y, Ding T, *et al.* Analysis of regional decoupling relationship between energy-related CO<sub>2</sub> emission and economic growth in China [ J ]. Natural Hazards, 2017, **87**(2): 867-883.
- [ 12 ] 杨柏, 秦广鹏, 邹钦. “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 CO<sub>2</sub> emission accounting in China under the carbon peaking and carbon neutrality goals [ J ]. Environmental Science, 2022, **43**(12): 5840-5849.
- [ 13 ] 丛建辉, 石雅, 高慧, 等. “双碳”目标下中国省域碳排放责任核算研究——基于“收入者责任”视角 [ J ]. 上海财经大学学报, 2021, **23**(6): 82-96.  
Cong J H, Shi Y, Gao H, *et al.* Research on the responsibility accounting of China's provincial carbon emission under the “double carbon” goal: based on the perspective of “income responsibility” [ J ]. Journal of Shanghai University of Finance and Economics, 2021, **23**(6): 82-96.
- [ 14 ] Wang X Z, Li J, Song R, *et al.* 350 cities of China exhibited varying degrees of carbon decoupling and green innovation synergy [ J ]. Energy Reports, 2022, **8**(S6): 312-323.
- [ 15 ] Pei F S, Zhong R, Liu L A, *et al.* Decoupling the relationships between carbon footprint and economic growth within an urban agglomeration—a case study of the Yangtze River Delta in China [ J ]. Land, 2021, **10**(9), doi: 10.3390/land10090923.
- [ 16 ] 向书江, 杨春梅, 谢雨琦, 等. 近 20 年重庆市主城区碳排放的时空动态演进及其重心迁移 [ J ]. 环境科学, 2023, **44**(1): 560-571.  
Xiang S J, Yang C M, Xie Y Q, *et al.* Spatiotemporal dynamic evolution and gravity center migration of carbon emissions in the main urban area of Chongqing over the past 20 years [ J ]. Environmental Science, 2023, **44**(1): 560-571.
- [ 17 ] 李健, 王尧, 王颖. 天津市碳排放脱钩态势及碳减排潜力分析——基于 2007—2016 年的面板数据 [ J ]. 生态经济, 2019, **35**(4): 26-32.  
Li J, Wang Y, Wang Y. Tianjin carbon emissions decoupling analysis and carbon emission reduction potential: based on panel data from 2007 to 2016 [ J ]. Ecological Economy, 2019, **35**(4): 26-32.
- [ 18 ] 李云燕, 赵国龙. 我国超大城市碳排放与经济增长关系的实证研究 [ J ]. 工业技术经济, 2016, **35**(10): 138-147.  
Li Y Y, Zhao G L. The empirical study on the relationship between carbon emissions and economic growth in megacity behemoths [ J ]. Journal of Industrial Technological Economics, 2016, **35**(10): 138-147.
- [ 19 ] OECD. Indicators to measure decoupling of environmental pressure from economic growth. Sustainable Development [ EB/OL ]. [https://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?doclanguage=en&cote=sg/sd\(2002\)1/final,2002-05-16](https://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?doclanguage=en&cote=sg/sd(2002)1/final,2002-05-16).
- [ 20 ] Zhang Z X. Decoupling China's carbon emissions increase from economic growth: an economic analysis and policy implications [ J ]. World Development, 2000, **28**(4): 739-752.
- [ 21 ] Chen J D, Wang P, Cui L B, *et al.* Decomposition and decoupling analysis of CO<sub>2</sub> emissions in OECD [ J ]. Applied Energy, 2018, **231**: 937-950.
- [ 22 ] Guo W B, Chen Y. Assessing the efficiency of China's environmental regulation on carbon emissions based on Tapio decoupling models and GMM models [ J ]. Energy Reports, 2018, **4**: 713-723.
- [ 23 ] Wu Y, Tam V W Y, Shuai C Y, *et al.* Decoupling China's economic growth from carbon emissions: empirical studies from 30 Chinese provinces (2001-2015) [ J ]. Science of the Total Environment, 2019, **656**: 576-588.
- [ 24 ] Song Y, Sun J J, Zhang M, *et al.* Using the Tapio-Z decoupling model to evaluate the decoupling status of China's CO<sub>2</sub> emissions at provincial level and its dynamic trend [ J ]. Structural Change and Economic Dynamics, 2020, **52**: 120-129.
- [ 25 ] Hossain M A, Chen S. The decoupling study of agricultural energy-driven CO<sub>2</sub> emissions from agricultural sector development [ J ]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2022, **19**(5): 4509-4524.
- [ 26 ] Tapio P. Towards a theory of decoupling: degrees of decoupling in the EU and the case of road traffic in Finland between 1970 and 2001 [ J ]. Transport Policy, 2005, **12**(2): 137-151.
- [ 27 ] Xu W H, Xie Y L, Xia D H, *et al.* A multi-sectoral decomposition and decoupling analysis of carbon emissions in Guangdong province, China [ J ]. Journal of Environmental Management, 2021, **298**, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.113485.
- [ 28 ] Shi B G, Xiang W J, Bai X D, *et al.* District level decoupling analysis of energy-related carbon dioxide emissions from economic growth in Beijing, China [ J ]. Energy Reports, 2022, **8**: 2045-2051.
- [ 29 ] Kouyakh N R. CO<sub>2</sub> emissions in the Middle East: decoupling and decomposition analysis of carbon emissions, and projection of

- its future trajectory[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **845**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.157182.
- [30] Zhou X, Zhang M, Zhou M H, *et al.* A comparative study on decoupling relationship and influence factors between China's regional economic development and industrial energy-related carbon emissions [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, **142**: 783-800.
- [31] 齐绍洲, 林岫, 王班班. 中部六省经济增长方式对区域碳排放的影响——基于 Tapio 脱钩模型、面板数据的滞后工具变量法的研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2015, **25**(5): 59-66.
- Qi S Z, Lin S, Wang B B. Impact of economic growth pattern of the six provinces of central China on regional carbon emission: Based on the Tapio model and Lag instrumental variable analysis of panel data [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2015, **25**(5): 59-66.
- [32] 吕倩, 高俊莲. 京津冀地区交通运输碳排放模型及驱动因素分析[J]. *生态经济*, 2018, **34**(1): 31-36.
- Lv Q, Gao J L. Analysis of traffic and transportation carbon emissions model and driving factors in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. *Ecological Economy*, 2018, **34**(1): 31-36.
- [33] 田云, 张俊飏, 李波. 中国农业碳排放研究: 测算、时空比较及脱钩效应[J]. *资源科学*, 2012, **34**(11): 2097-2105.
- Tian Y, Zhang J B, Li B. Agricultural carbon emissions in China: calculation, spatial-temporal comparison and decoupling effects[J]. *Resources Science*, 2012, **34**(11): 2097-2105.
- [34] 孙玉环, 杨光春. 中国旅游业碳排放的影响因素分解及脱钩效应[J]. *中国环境科学*, 2020, **40**(12): 5531-5539.
- Sun Y H, Yang C G. Factor decomposition and decoupling effect of Chinese tourism-derived carbon emissions [J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(12): 5531-5539.
- [35] Wu Y, Chau K W, Lu W S, *et al.* Decoupling relationship between economic output and carbon emission in the Chinese construction industry [J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2018, **71**: 60-69.
- [36] Xie P J, Gao S S, Sun F H. An analysis of the decoupling relationship between CO<sub>2</sub> emission in power industry and GDP in China based on LMDI method [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, **211**: 598-606.
- [37] Zhang S Q, Wang J W, Zheng W L. Decomposition analysis of energy-related CO<sub>2</sub> emissions and decoupling status in China's logistics industry [J]. *Sustainability*, 2018, **10**(5), doi: 10.3390/su10051340.
- [38] Dong J, Li C B, Wang Q Q. Decomposition of carbon emission and its decoupling analysis and prediction with economic development: a case study of industrial sectors in Henan Province [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, **321**, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.129019.
- [39] Zhao X R, Zhang X, Li N, *et al.* Decoupling economic growth from carbon dioxide emissions in China: a sectoral factor decomposition analysis [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, **142**: 3500-3516.
- [40] 马晓君, 陈瑞敏, 董碧滢, 等. 中国工业碳排放的因素分解与脱钩效应[J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(8): 3549-3557.
- Ma X J, Chen R M, Dong B Y, *et al.* Factor decomposition and decoupling effect of China's industrial carbon emissions [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(8): 3549-3557.
- [41] Wang Z H, Yang L. Delinking indicators on regional industry development and carbon emissions: Beijing-Tianjin-Hebei economic band case [J]. *Ecological Indicators*, 2015, **48**: 41-48.
- [42] IPCC. Guidelines for national greenhouse gas inventories [R]. Geneva: International Panel on Climate Change, 2006.
- [43] 国家发展改革委办公厅. 省级温室气体清单编制指南(试行) [EB/OL]. <http://www.cbcsd.org.cn/sjk/nengyuan/standard/home/20140113/download/shengjiwenshiqiti.pdf>, 2011-05-01.
- [44] Ang B W. The LMDI approach to decomposition analysis: a practical guide [J]. *Energy Policy*, 2005, **33**(7): 867-871.

## CONTENTS

Elucidating the Impacts of Meteorology and Emission Changes on Concentrations of Major Air Pollutants in Major Cities in the Yangtze River Delta Region Using a Machine Learning De-weather Method .....	FU Wen-xing, HUANG Lin, DING Jia-hao, <i>et al.</i> (5879)
Impact of Emission Reduction in Different Sectors on Air Quality and Atmospheric Temperature in Eastern China .....	LONG Zi-yu, ZHU Jia, LI Ke, <i>et al.</i> (5889)
Analysis of Spatio-temporal Characteristics of Air Quality, Meteorological Impact, and Emission Reduction Effect During the Winter Olympics in Beijing-Tianjin-Hebei and Its Surrounding Areas .....	HOU Lu, ZHU Yuan-yuan, LIU Bing, <i>et al.</i> (5899)
Emission Trends and Reduction Potential of VOCs from Printing Industry in China .....	LIANG Xiao-ming, WU Peng-zhen, CHEN Lai-guo, <i>et al.</i> (5915)
Analysis of VOCs Emission Characteristics and Emission Reduction Potential of Typical Industries in Jinan, China .....	WU Wen-lu, SHAN Chun-yan, ZHAO Jing-lin, <i>et al.</i> (5924)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in Lishui Area of Nanjing .....	RUAN Zhao-yuan, YAN Ou, WANG Ti-jian, <i>et al.</i> (5933)
Spatio-temporal Change in City-level Greenhouse Gas Emissions from Municipal Solid Waste Sector in China During the Last Decade and Its Potential Mitigation .....	ZHANG Ting-xue, GAO Shu-dan, TENG Xiao, <i>et al.</i> (5946)
Spatiotemporal Distribution Characteristics of Air Pollution and Health Risks in Key Cities of China .....	TU Pei-yue, YANG Huan, CHEN Lan-zhou, <i>et al.</i> (5954)
Spatial and Temporal Variations in PM <sub>1</sub> Concentration and its Correlation with AOD in China from 2014 to 2017 .....	YUAN Li-mei, MA Fang-fang, BIAN Ze, <i>et al.</i> (5964)
Characteristics and Generation Mechanism of Secondary Inorganic Ions in PM <sub>2.5</sub> in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan City Group .....	MA Jie-li, LUO Da-tong, LIU Xin, <i>et al.</i> (5975)
Characteristics and Cause of PM <sub>2.5</sub> During Haze Pollution in Winter 2022 in Zhoukou, China .....	MA Ying-ge, YANG Lu, DI Rui-miao, <i>et al.</i> (5986)
Characterization and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM <sub>2.5</sub> in Lanzhou .....	MA Ke-jing, SUN Li-juan (5997)
Characteristics of Atmospheric Dust Fall Pollution and Its Chemical Composition and Mass Reconstruction in Mentougou District of Beijing .....	WANG Zhi-yao, YAO Qi, LÜ Fu, <i>et al.</i> (6007)
Ozone Pollution Characteristics and Formation Mechanism in a Typical Tropical Seaside City .....	HAN Shu-yan, ZHANG Xin, XIE Rong-fu, <i>et al.</i> (6015)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Surface Water in Kuaize River Basin at the Upper Pearl River .....	TAO Lan-chu, CUN De-xin, TU Chun-lin, <i>et al.</i> (6025)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Surface Water and Groundwater in Huainan Coal Mine Area .....	LIU Hai, KANG Bo, GUAN Zheng-ting, <i>et al.</i> (6038)
Hydrochemical Characteristics and Pollution Source Identification of Groundwater in Plain Area of Barkol-Yiwu Basin .....	JIANG Feng, ZHOU Jin-long, ZHOU Yin-zhu, <i>et al.</i> (6050)
Identification of Nitrate Source and Transformation Process in Shallow Groundwater Around Dianchi Lake .....	CHEN Qing-fei, CHEN An-qiang, CUI Rong-yang, <i>et al.</i> (6062)
Analysis of Influencing Factors on the Accumulation and Distribution of Heavy Metals in Soil of a Typical Lead-zinc Mine Watershed .....	PAN Yong-xing, CHEN Meng, WANG Xiao-tong (6071)
Heavy Metal Pollution and Health Risk Assessment in Karst Basin Around a Lead-Zinc Mine .....	LIAO Hong-wei, JIANG Zhong-cheng, ZHOU Hong, <i>et al.</i> (6085)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Heavy Metals in Main Rivers Sediments and Ecological Risk Assessment in Kaifeng City .....	DING Ya-peng, LU Xi-hao, WANG Xiao-jing, <i>et al.</i> (6095)
Evaluation and Prediction of Environmental Capacities of Heavy Metals in the Surface Sediments of Lakes in Huoqiu County .....	LIU Hai, WEI Wei, SONG Yang, <i>et al.</i> (6106)
Metabarcoding Profiling of Phytoplankton Communities Associated with Algal Blooms and Determining Related Drivers in Baiyangdian Lake .....	CHEN Ting, DU Xun, CHEN Yi-yong, <i>et al.</i> (6116)
Driving Factors Analyze of Phytoplankton Community by Comparison of Population and Functional Groups and Water Quality Evaluation in Dongting Lake .....	YAN Guang-han, YIN Xue-yan, WANG Xing, <i>et al.</i> (6125)
Distribution Characteristics and Environmental Driving Factors of Cyanobacteria Community in Impounded Lakes and Reservoirs in Shandong on the East Route of South-to-North Water Diversion Project .....	WEI Jie-lin, CUI Yu-jing, LI Yi-zhen, <i>et al.</i> (6137)
Characteristics and Ecological Risk Assessment of Pharmaceutical Active Compounds in Guangdong Province .....	LUO Jia-hao, WANG Yu-kai, YUAN Ke, <i>et al.</i> (6149)
Characteristics of Microplastic-derived Dissolved Organic Matter(MPDOM) and the Complexation Between MPDOM and Sulfadiazine/Cu <sup>2+</sup> .....	WANG Xiao, YAN Cai-xia, NIE Ming-hua, <i>et al.</i> (6159)
Photodegradation of Plastic Blends in Seawater and Its Risk to the Marine Environment .....	ZHANG Hong-yu, GAO Jia-wei, CHEN Si-bao, <i>et al.</i> (6172)
Preparation of Iron-improved Blue Algae Biochar and Its Co-adsorption Mechanism for Phosphorus in Surface Water .....	HAN Jie, HUANG Xin, YANG Kun-lun, <i>et al.</i> (6181)
Estimation and Critical Source Area Identification of Non-point Source Pollution Based on Improved Export Coefficient Models: A Case Study of the Upper Beiyun River Basin .....	LI Hua-lin, ZHANG Shou-hong, YU Pei-dan, <i>et al.</i> (6194)
Characteristics of Bacterial Community Structure in the Sediment of Rural Black and Odorous Water Bodies .....	REN Hong-wei, TIAN Yan-fang, LU Jun-xia, <i>et al.</i> (6205)
Impacts of Human Activities on the Net Primary Productivity of Vegetation in Chengde's Transitional Region from Plateau to Plain in the Context of Climate Change .....	SHAN Zhen-dong, LIU Dun, LUO Han, <i>et al.</i> (6215)
Meta-analysis on the Effects of Nitrogen Addition on Soil Organic Carbon Content in Terrestrial Ecosystems .....	YANG Ling-fang, KONG Dong-yan, DIAO Jing-wen, <i>et al.</i> (6226)
Effects of Biochar Application on Soil Organic Nitrogen Component and Active Nitrogen in <i>Eucalyptus</i> Plantations After Five Years in Northern Guangxi .....	CAO Yang, SHEN Yu-yi, CHEN Yun-shuang, <i>et al.</i> (6235)
Response of Organic Carbon Mineralization to Nitrogen Addition in Micro-aerobic and Anaerobic Layers of Paddy Soil .....	MAO Wan-qiong, XIA Yin-hang, MA Chong, <i>et al.</i> (6248)
Effects of Conservation Tillage on Herbicide Residues in Maize Field Soil .....	LIU Yuan, WANG Zu-cheng, LIU Mei-hua, <i>et al.</i> (6257)
Research Progress on Toxicity of Microplastics in Soil to Terrestrial Plants and Their Degradation Mechanism .....	LIU Wei, LI Yu-xin, RONG Sa-shuang, <i>et al.</i> (6267)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Microplastics in Soil in Danjiangkou Reservoir Area of South-to-North Water Diversion Project .....	WANG Feng, GONG Wei, LIU Zhe, <i>et al.</i> (6279)
Accumulation Characteristics, Sources, and Health Risks of Soil Lead of Urban Parks in Beijing .....	AN Jiang-mei-duo, ZHANG Rui-qing, GUO Guang-hui, <i>et al.</i> (6287)
Vertical Migration Characteristics and Fate of Heavy Metals from Zinc Smelting Slag in Soil Profile .....	YANG Ai-ping, WANG Xiao-yan, XIAO Xi-yan, <i>et al.</i> (6297)
Ecological Risk Assessment and Migration and Accumulation Characteristics of Heavy Metals in Farmland Soil-crop System from Typical Pyrite Mining Area .....	CHENG Xiao-meng, ZHAO Chen, WU Chao, <i>et al.</i> (6309)
Interaction and Transport Characteristics of Lead and Cadmium in Different Soil-wheat Systems .....	KOU Meng, FAN Yu, SU Meng-xian, <i>et al.</i> (6319)
Distribution and Transport of Cadmium and Arsenic in Different Aboveground Parts of Wheat After Flowering .....	WANG Qiu-shi, HUA Gui-li, LI Xiang-yu, <i>et al.</i> (6328)
Effects of Vegetation Types and Seasonal Dynamics on the Diversity and Function of Soil Bacterial Communities in the Upper Reaches of the Heihe River .....	WANG Zhu, LIU Yang, WANG Fang, <i>et al.</i> (6339)
Ecological Responses of Soil Bacterial Communities to Heavy Metal Contamination Surrounding a Typical Coal-based Industrial Region .....	ZHENG Dan-feng, LIU Di, SU Chao, <i>et al.</i> (6354)
Effects of Aeration Methods on Microbial Diversity and Community Structure in Rice Rhizosphere .....	XIAO De-shun, XU Chun-mei, WANG Dan-ying, <i>et al.</i> (6362)
Response of Nitrification Potential and Ammonia Oxidation Microbial Community in Purple Soils to the Application of Biochar Combined with Chemical Fertilizer and Manure .....	LI Yue, WANG Zi-fang, JIA Li-juan, <i>et al.</i> (6377)
Effect of Continuous Cropping on the Physicochemical Properties, Microbial Activity, and Community Characteristics of the Rhizosphere Soil of <i>Codonopsis pilosula</i> .....	YANG Yang, LI Hai-liang, MA Kai-li, <i>et al.</i> (6387)
Effect of Manure Application on the Adsorption of Antibiotics to Soil .....	LUO Shan, HU Jin-sheng, TANG Xiang-yu, <i>et al.</i> (6399)
Relationship Between Carbon Emissions and Economic Development of Industrial Parks Based on Decoupling Index .....	CHEN Si-yu, LIU Jing-ru, SUN Guang-ming (6412)
Characteristics of Municipal Solid Waste in Some Urban Agglomeration in the Past Five Years .....	WANG Xiao-bo, LIU An-qi, ZHONG Hui-qiong, <i>et al.</i> (6421)