

目次

中国城市碳排放强度的时空演变、动态跃迁及收敛趋势 ..... 杨清可, 王磊, 朱高立, 李颖, 范业婷, 王雅竹 (1869)

交通运输业碳排放效率时空演变及趋势预测 ..... 郑琰, 蒋雪梅, 肖玉杰 (1879)

基于扩展STIRPAT模型LMDI分解的碳排放脱钩因素 ..... 张江艳 (1888)

基于LEAP模型的工业园区碳达峰路径:以南京某国家级开发区为例 ..... 李慧鹏, 李荔, 殷茵, 何文大, 宿杰, 赵秋月 (1898)

高校碳排放核算与分析:以北京A高校为例 ..... 曹睿, 封莉, 张立秋 (1907)

北京市制造业减排降碳协同效应分析和驱动因素 ..... 俞珊, 韩玉花, 牟洁, 张双, 张增杰 (1917)

碳排放权交易价格与全要素生产率:来自中国的证据 ..... 吴雪萍 (1926)

中国城市PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>时空分布特征和影响因素分析 ..... 李江苏, 段良荣, 张天娇 (1938)

2017~2021年苏皖鲁豫交界区域PM<sub>2.5</sub>和O<sub>3</sub>时空变化特征及影响因素 ..... 陈伟, 徐学哲, 刘文清 (1950)

疫情管控期西安PM<sub>2.5</sub>和O<sub>3</sub>污染特征及成因分析 ..... 原晓红, 张强, 李琦, 谢文豪, 刘跃廷, 樊亭亭, 姜旭朋 (1963)

苏南五市秋冬季PM<sub>2.5</sub>化学组成特征和空间差异 ..... 冯蔚, 丁峰, 尚玥, 谢鸣捷 (1975)

湖北咸宁细颗粒物PM<sub>2.5</sub>来源 ..... 罗怡, 朱宽广, 陈璞琬, 田军, 谢旻, 战杨志豪, 赵润琪 (1983)

邢台氨减排对京津冀PM<sub>2.5</sub>改善的溢出效益 ..... 边泽君, 闻超玉, 郎建垒, 范晓茜, 夏祥晨, 周颖 (1994)

聊城市冬季PM<sub>2.5</sub>载带金属元素污染特征、风险评价及来源分析 ..... 张敬巧, 朱瑶, 曹婷, 燕丽, 王淑兰, 刘铮 (2003)

高原城市拉萨典型VOCs排放源成分谱特征 ..... 郭淑政, 叶春翔, 林伟立, 陈熠, 曾立民, 尹晴晴, 刘雪莉 (2011)

北京市工业园区VOCs污染特征及健康风险评估案例:高新技术产业的环境影响 ..... 王洁, 姚震, 王敏燕, 陈速敏, 龙腾, 王海滨, 李红, 郭秀锐, 郝江虹, 聂磊 (2019)

高温极端天气影响下的成都平原一次典型臭氧污染过程分析 ..... 雷丽娟, 张懿, 罗伊娜, 张潇, 冯森 (2028)

水环境中抗病毒毒物的存在、行为与风险 ..... 葛林科, 李璇艳, 曹胜凯, 郑金帅, 张蓬, 朱超, 马宏瑞 (2039)

黄河小浪底水库地表水中重金属的时空变化与概率健康风险 ..... 王亮, 邓雪娇, 王潇磊, 李明, 刘奕尧, 姜亚敏, 涂响, 张坤锋 (2054)

藏东多曲河流域总富集水化学特征及控制因素 ..... 李敬杰, 连晟, 王明国, 张智印, 张涛 (2067)

西北内陆区降水稳定同位素时空分布特征及其水汽来源 ..... 张炎炎, 辛存林, 郭小燕, 张博, 陈宁, 史延飞 (2080)

基于水化学和氢氧同位素的泰安城区岩溶地下水补给来源及演化过程 ..... 孟令华 (2096)

丹江流域山区地表水-地下水水化学特征及其影响因素 ..... 张子燕, 伏永朋, 王宁涛, 谭建民, 刘亚磊 (2107)

金塔盆地鸳鸯池灌区地下水水化学特征及控制因素 ..... 王晓燕, 韩双宝, 张梦南, 尹德超, 吴呈, 安永会 (2118)

德阳市平原区浅层地下水水化学特征与健康风险评价 ..... 刘楠, 陈盟, 高东东, 吴勇, 王楠楠 (2129)

典型城市河网沉积物微塑料时空分布特征 ..... 许万璐, 范一凡, 钱新 (2142)

抚仙湖流域尺度氮排放清单构建及关键源解析 ..... 王延杰, 梁启斌, 王艳霞, 侯磊, 陈奇伯, 王伟, 李晓琳, 高俊淑 (2150)

过氧化钙/海泡石海藻酸钠凝胶复合材料制备及其对内源磷的控制性能 ..... 曲思彤, 单苏洁, 王崇铭, 吴玲子, 李大鹏, 黄勇 (2160)

矿物超细颗粒的形成机制、结构特征及其环境行为和效应 ..... 刘振海, 张展华, 袁语欣, 朱盼盼, 陈威, 张彤 (2171)

生物炭固定化菌复合材料在环境修复中的应用研究进展 ..... 孙淑玉, 黄梦鑫, 孔强, 张焕新, 刘继伟 (2185)

微塑料对沸石吸附水体氨氮的影响及其机制 ..... 练建军, 谢诗婷, 吴培, 孟冠华, 陈波 (2195)

紫外老化作用对纳米生物炭吸附环丙沙星的影响机制 ..... 马锋锋, 薛之一, 赵保卫 (2203)

土地利用影响下永定河流域浮游植物群落与环境因子响应 ..... 郭善嵩, 胡恩, 丁一桐, 张嘉渭, 孙长顺, 卢悦, 潘保柱 (2211)

鄱阳湖湿地细菌群落多样性和可培养细菌功能基因丰度 ..... 喻江, 王淳, 龙永, 刘贵花, 李春杰, 范国权, 于镇华 (2223)

典农河沉积物细菌群落结构特征及其与重金属的关系 ..... 刘双羽, 蒙俊杰, 邱小琼, 周瑞娟, 李霖 (2233)

污水处理厂尾水排放对受纳河流细菌和真菌微生物群落的影响 ..... 郭有顺, 余仲, 郝文彬, 孟凡刚 (2246)

宏基因组学分析深度处理阶段污水中细菌的赋存特征及其功能 ..... 胡健双, 王燕, 周政, 汪雅琴, 王秉政, 李激 (2259)

大别山区生境质量时空特征及自然-人为因素驱动机制 ..... 郑亚平, 张俊华, 田惠文, 朱航成, 刘舒, 丁亚鹏 (2268)

基于连续小波变换、SHAP和XGBoost的土壤有机质含量高光谱反演 ..... 叶森, 朱琳, 刘旭东, 黄勇, 陈蓓蓓, 李欢 (2280)

秸秆还田、覆膜和施氮对旱地麦田土壤质量的影响 ..... 叶子壮, 王松燕, 陆潇, 史多鹏, 吕慎强, 李嘉, 杨泽宇, 王林科 (2292)

长期施用有机肥对土壤微塑料赋存及迁移特征的影响 ..... 王长远, 马啸驰, 郭德杰, 刘新红, 马艳, 罗佳 (2304)

土壤盐分变化对N<sub>2</sub>O排放影响:基于Meta分析 ..... 黄艺华, 余冬立, 史祯琦, 胡磊, 潘永春 (2313)

基于土地利用/覆被动态变化的粤港澳大湾区碳储量评价与预测 ..... 郑慧玲, 郑辉峰 (2321)

基于InVEST模型的伏牛山地区生态系统碳储量时空变化模拟 ..... 张哲, 时振钦, 朱文博, 孙梓欣, 赵体侠, 邓文萍, 刘志强 (2332)

防护林建设过程中土壤微生物养分限制与有机碳组分之间的关系 ..... 徐凤璟, 黄懿梅, 黄倩, 申继凯 (2342)

长期秸秆还田褐土有机碳矿化特征及其驱动力 ..... 赵宇航, 殷浩凯, 胡雪纯, 解文艳, 刘志平, 周怀平, 杨振兴 (2353)

冬绿肥覆盖对土壤团聚体及有机碳和AMF多样性的影响 ..... 鲁泽让, 陈佳钰, 李智贤, 李永梅, 罗志章, 杨锐, 田明洋, 赵吉霞, 范茂攀 (2363)

辽河流域氮素时空分布及其对土地利用和降雨的响应 ..... 周波, 李晓光, 童思陈, 吕旭波, 郭朝臣, 雷坤 (2373)

高强度农业种植区不同景观池塘氧化亚氮排放特征 ..... 张欣悦, 肖启涛, 谢晖, 刘臻婧, 邱银国, 罗菊花, 徐向华, 段洪涛 (2385)

生物炭与不同类型氮肥施肥对菜地土壤反硝化细菌群落的影响 ..... 柳晓婉, 刘杏认, 高尚洁, 李贵春 (2394)

大岳山不同林龄人工油松林土壤微生物特征 ..... 马义淑, 曹亚鑫, 牛敏, 张明昱, 程曼, 文永莉 (2406)

基于稀疏样点的土壤重金属含量模拟方法 ..... 张佳琦, 潘瑜春, 高世臣, 赵亚楠, 景胜强, 周艳兵, 郇允兵 (2417)

基于特定源-风险评估模型的兰州黄河风情线绿地土壤重金属污染优先控制源分析 ..... 李军, 李旭, 李开明, 焦亮, 台喜生, 臧飞, 陈伟, 脱新颖 (2428)

西南不同类型紫色土pH变化、重金属累积与潜在生态风险评估 ..... 张海琳, 张雨, 王顶, 谢军, 张跃强, 张宇亭, 王洁, 石孝均 (2440)

重庆某铁矿周边耕地土壤重金属污染评价及来源解析 ..... 廖泽源, 李杰芹, 沈智杰, 李彩霞, 罗程钟, 梅楠, 张成, 王定勇 (2450)

金属矿区周边农田土壤与农作物重金属健康风险评估 ..... 魏洪斌, 罗明, 向奎, 查理思 (2461)

赤泥基纳米零价铁对多金属污染土壤修复效果 ..... 刘龙宇, 杨世利, 赵黄诗雨, 常凯威, 余江 (2473)

施锌对碱性土壤-小麦幼苗体系累积镉的影响 ..... 张瑶, 王天齐, 牛硕, 杨阳, 陈卫平 (2479)

# 基于LEAP模型的工业园区碳达峰路径：以南京某国家级开发区为例

李慧鹏, 李荔, 殷茵, 何文太, 宿杰, 赵秋月\*

(江苏省环境科学研究院, 江苏省环境工程重点实验室, 南京 210036)

**摘要:** 工业园区是能源消费和碳排放的密集区域, 推动工业园区碳达峰对国家早日实现碳达峰目标具有重要意义. 以南京某国家级开发区为例, 基于LEAP模型, 设置基准情景(BAU)、非工业减排(S1)、全行业一般减排(S2)、全行业强化减排(S3)和深度减排(S4)共5类情景, 分析各情景下的能源消费需求与CO<sub>2</sub>排放变化情况, 评估各项措施的碳减排贡献, 提出园区实现碳达峰目标的政策建议. 结果表明, S2、S3和S4情景下能源消费需求和CO<sub>2</sub>排放量将分别于2035、2030和2028年达到峰值, 能源消费需求峰值(以标煤计)分别为26.28、21.66和19.10万t, CO<sub>2</sub>排放峰值分别为75.35、59.34和53.24万t. 工业是研究区域能源消费和碳排放的主要贡献行业, S2、S3和S4情景下工业能源消费和碳排放占比分别于2035年、2030年和2028年达到峰值57.1%、56.0%、53.6%和64.2%、66.2%和62.9%. 工业能效提升的碳减排贡献最大, 其次为经济增速放缓, 交通新能源汽车推广和公共建筑节能的碳减排贡献不显著. 综合考虑碳达峰时间和园区碳排放强度考核目标, 建议将S3情景作为该园区碳达峰的实施路径. 研究建议, 碳减排应以工业为重点, 以提升能效水平为主, 优先从重点行业入手. 同时不断提升新能源汽车占比, 降低公共建筑能耗水平.

**关键词:** LEAP模型; 工业园区; 能源消费; 碳减排; 碳达峰

中图分类号: X22; X24 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)04-1898-09 DOI: 10.13227/j.hjks.202305035

## Carbon Peak Pathways of Industrial Parks Based on the LEAP Model: A Case Study of a National Development Zone in Nanjing

LI Hui-peng, LI Li, YIN Yin, HE Wen-tai, SU Jie, ZHAO Qiu-yue\*

(Jiangsu Key Laboratory of Environmental Engineering, Jiangsu Provincial Academy of Environmental Science, Nanjing 210036, China)

**Abstract:** Industrial parks are concentrated areas for energy consumption and carbon emissions. Promoting the carbon peak of industrial parks is of great significance for China to achieve the carbon peak goal as soon as possible. Taking a national development zone in Nanjing as an example, five scenarios were set up based on the LEAP model: a baseline scenario (BAU), non-industrial carbon reduction scenario (S1), industrial carbon reduction scenario (S2), enhanced industrial carbon reduction scenario (S3), and all-factor carbon reduction scenario (S4). The energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions in each scenario were analyzed, and the contributions of various measures for CO<sub>2</sub> emission reduction were evaluated. Policy recommendations for achieving carbon peak goals in the industrial park were proposed. The results indicated that energy consumption demand and CO<sub>2</sub> emissions will peak in 2035, 2030, and 2028 in the S2, S3, and S4 scenarios. The peak energy consumption was 262.8, 216.6, and 191.0 thousand tons of standard coal equivalent, with peak CO<sub>2</sub> emissions reaching 753.5, 593.4, and 532.4 thousand tons, respectively. Industry was the main contributor to energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions. The proportions of industrial energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions in the S2, S3, and S4 scenarios were predicted to peak at 57.1%, 56.0%, and 53.6% and 64.2%, 66.2%, and 62.9% in 2035, 2030, and 2028, respectively. Improving industrial energy efficiency made the greatest contribution to CO<sub>2</sub> emissions reduction, followed by a slowdown in economic growth. The contribution of promoting new energy vehicles and energy conservation in public buildings to CO<sub>2</sub> emissions reduction was not significant. Considering the carbon peak time and the goal of CO<sub>2</sub> emission intensity reduction in the industrial parks, the S3 scenario was recommended as the carbon peak pathway for the industrial park. The research also suggested that carbon reduction should focus on industry, with the first priority given to key industries by improving energy efficiency. Further, an increase in the proportion of new energy vehicles and a reduction in the energy consumption of public buildings are also needed.

**Key words:** LEAP model; industrial parks; energy consumption; carbon reduction; peak carbon dioxide emissions

随着全球碳排放量的逐渐增加, 气候变暖产生的恶劣影响愈加显著, 对全人类的生命财产安全产生严峻威胁. 为积极应对气候变化, 习近平主席在第七十五届联合国大会一般性辩论上做出碳达峰、碳中和的郑重承诺, 中国将提高国家自主贡献力度, 采取更加有力的政策和措施, 二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值, 努力争取2060年前实现碳中和<sup>[1]</sup>. 实现碳达峰、碳中和目标已经成为我国应对气候变化的重大战略.

工业是我国能源消费和碳排放的主要领域之

一. 2020年我国工业领域能源消费量约占全国总量的66.8%<sup>[2]</sup>. 工业园区作为我国工业化与城镇化的重要载体, 已经成为我国工业发展过程中最主要也是最普及的发展空间<sup>[3]</sup>, 也是能源消费与碳排放的密集区域<sup>[4]</sup>. 有研究表明, 我国工业园区CO<sub>2</sub>排放量约

收稿日期: 2023-05-05; 修订日期: 2023-07-06

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC3709404); 江苏省创新能力建设计划项目(科技设施类)(BM2018017); 2022年度江苏省第六期“333工程”重点行业领域人才项目

作者简介: 李慧鹏(1991-), 男, 硕士研究生, 工程师, 主要研究方向为能源与低碳政策, E-mail: lihuipengtz@163.com

\* 通信作者, E-mail: qiuyue.zhao@163.com

占全国排放总量的 31%<sup>[5]</sup>. 由此可见, 工业园区节能减排对实现碳达峰、碳中和的目标具有重要意义. 江苏省作为我国发展水平较高的工业经济大省, 工业园区数量众多, 省级以上开发区贡献了超过江苏省一半的经济总量. 江苏省同时也是能源消耗和碳排放大省, 根据清华大学 MEIC 团队研究成果, 江苏省 CO<sub>2</sub> 排放量约占全国排放总量的 7%, 位居全国第四位, 工业 CO<sub>2</sub> 排放量在全省排放占比超 80%<sup>[6-8]</sup>. 随着未来工业企业入园率的不断提升, 工业园区的能源消费和碳排放量将持续增加. 因此, 以工业园区为碳减排的落脚点, 是江苏乃至全国实现碳达峰碳中和目标的重要途径<sup>[9]</sup>.

长期能源替代规划系统模型(long-range energy alternatives planning system, LEAP)是一种基于情景分析的经济-能源-环境综合模型<sup>[10]</sup>, 被广泛地应用于能源和碳排放的研究中<sup>[11]</sup>. 总体来看, 目前已有研究涵盖了工业<sup>[12-16]</sup>、交通<sup>[17-21]</sup>、建筑<sup>[22,23]</sup>和居民生活<sup>[24]</sup>等诸多领域, 主要集中在国家<sup>[25,26]</sup>、城市群<sup>[27-30]</sup>及省市<sup>[31-36]</sup>层面, 对园区等小区域层面的研究稍显不足. 有学者开展了园区层面的碳排放预测研究<sup>[37]</sup>, 但模型结构精细度不高, 未对工业行业类型进行详细划分, 也未将交通、建筑和居民生活等因素纳入, 模型的适用性一般. 为此, 以南京某国家级开发区为例, 综合考虑工业、交通、建筑和居民生活等因素, 构建了符合区域特征的 LEAP 模型. 通过设置 5 种发展情景, 模拟分析了研究区域未来能源消费需求、CO<sub>2</sub> 排放变化情况及不同措施的碳减排潜力, 旨在为研究区域科学合理确定碳达峰路径提供技术支撑, 同时为其他工业园区制定碳达峰路径提供工作思路.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

研究区域位于江苏省南京市, 园区管辖面积约 70 km<sup>2</sup>, 常住人口 10.3 万人. 历经 30 余年的发展, 研究区域已经形成了软件及电子信息、北斗卫星导航应用和生物医药特色产业集群, 成为带动区域经济结构升级和经济发展方式转变的驱动引擎之一. 近年来, 研究区域经济发展迅速, 规模以上工业企业数量和工业产值呈逐年增加态势, 综合能耗总体稳定略有波动. 2021 年, 研究区域规模以上工业企业共 97 家, 同比增加 19 家; 工业总产值约 460.0 亿元, 同比增长 15.1%; 规模以上工业企业综合能耗(以标煤计, 下同)5.63 万 t, 与 2019 年基本持平, 同比增长 12.8%. 其中, 汽车制造、医药制造和设备制造等行业的综合能耗约占全区规模以上工业企业综

合能耗总量的 56.5%. 目前, 研究区域能源结构低碳化程度相对较高, 无煤炭消费, 规模以上工业企业能源消费结构以外购电力(74.1%)和热力(16.5%)为主, 天然气(7.7%)、汽油(1.4%)和柴油(0.3%)等化石能源消费占比较低.

### 1.2 LEAP 模型介绍

LEAP 模型是由斯德哥尔摩研究所开发的一种能源政策分析和气候变化评估模型. 该模型基于情景分析, 可用于预测不同发展模式下各部门的能源生产、转换、消费以及大气污染物和温室气体排放等情况, 被诸多国家和地区用于能源规划、温室气体减排和大气污染物控制等研究中.

基于研究区域能源消费特征和未来发展规, 构建了涵盖工业、交通、公共建筑和居民生活等领域的 LEAP 模型, 以 2020 年为基准年, 2040 年为目标年, 采用情景分析法, 预测研究区域未来能源消费和 CO<sub>2</sub> 排放情况, 分析各项措施的碳减排潜力, 提出园区实现碳达峰目标的政策建议. LEAP 模型结构如图 1 所示. 工业部分按照研究区域的行业特征分为重点行业和一般行业, 重点行业细分为汽车制造业、医药制造业和设备制造业, 活动水平以工业产值表征, 能耗水平以单位产值能耗表征, 能源类型为电力、热力、天然气、汽油和柴油. 交通部分根据研究区域的交通统计分类, 分为公交车、出租车、轿车和货车这 4 类, 活动水平以保有量和行驶里程表征, 能耗水平以百公里能耗表征, 主要能源类型为电力、汽油和柴油. 公共建筑部分由于研究区域未进行分类统计, 故不细分, 活动水平以建筑面积表征, 能耗水平以单位建筑面积能耗表征, 主要能源类型为电力和热力. 居民生活部分未对城镇和非城镇人口进行细分, 主要考虑到研究区域位于南京城区, 按照统计分类均为城镇人口, 活动水平以常住人口表征, 能耗水平以人均能耗表征, 主要能源类型为电力、天然气和液化石油气.

研究区域的能源消费量可根据各部门活动水平和能耗水平计算得到, 结合 CO<sub>2</sub> 排放因子可进一步计算得到 CO<sub>2</sub> 排放总量. 本次考虑外购电力、热力消费带来的间接碳排放, 将其纳入研究区域的碳排放统计中. 计算如公式(1)和公式(2)所示.

$$\text{Energy}_{i,j} = \text{Activity}_i \times \text{EI}_{i,j} \quad (1)$$

$$\text{Carbon}_i = \sum_j (\text{Energy}_{i,j} \times \text{EF}_{i,j}) \quad (2)$$

式中,  $\text{Energy}_{i,j}$  为  $i$  部门  $j$  类能源的消费量;  $\text{Activity}_i$  为  $i$  部门的活动水平;  $\text{EI}_{i,j}$  为  $i$  部门单位活动水平  $j$  类能源的消费量,  $\text{Carbon}_i$  为  $i$  部门的 CO<sub>2</sub> 排放量,  $\text{EF}_{i,j}$  为  $i$  部门  $j$  类能源的 CO<sub>2</sub> 排放因子.

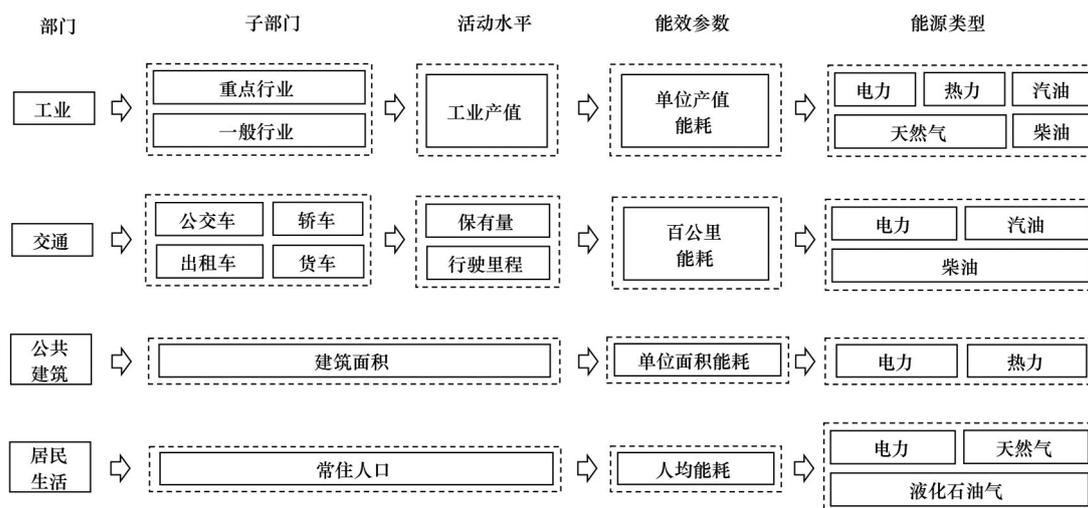


图1 LEAP模型结构

Fig. 1 Structure of LEAP model

### 1.3 数据来源

模型涉及的数据主要包括活动水平和能源效率. 工业产值、机动车保有量、公共建筑面积和常住人口等活动水平数据主要来自研究区域统计部门的官方数据; 单位产值能耗水平根据各行业综合能源消费量和工业产值计算得到; 百公里能耗和机动车行驶里程主要通过查阅相关研究<sup>[38,39]</sup>、调研营运公司和私家车主等方式获得; 人均能耗水平根据《南京市统计年鉴2021》<sup>[40]</sup>中家庭能源消费量和使用人口计算得到; 单位面积能耗通过文献<sup>[41,42]</sup>和报告<sup>[43,44]</sup>等方式获得; CO<sub>2</sub>排放因子参照《省级温室气体清单编制指南(试行)》<sup>[45]</sup>和国家发布的电网碳排放因子<sup>[46]</sup>获得.

### 1.4 情景设置

通过对研究区域未来发展的预判, 设置基准情景(BAU)、非工业减排情景(S1)、全行业一般减排情景(S2)、全行业强化减排情景(S3)以及深度减排情景(S4)共5类情景, 各情景描述及关键参数设置如表1所示. 情景设置参数包括经济增速、人口增长率、机动车保有量增长率和能效提升率等, 主要参考研究区域经济、能源和碳排放的相关政策规划, 如《南京某经济技术开发区“十四五”产业发展规划》和《南京某经济技术开发区绿色发展行动方案》等.

#### 1.4.1 基准情景

研究区域保持现有发展模式, 经济、人口和机动车保有量稳步增长, 期间不采取任何节能减排措施, 能源利用效率保持基准年水平.

#### 1.4.2 非工业减排情景

在BAU情景的基础上, 仅在交通和公共建筑领域开展节能减排, 大力推行新能源汽车和绿色建

筑, 提高新能源汽车占比, 降低公共建筑能耗水平.

#### 1.4.3 全行业一般减排情景

在S1情景的基础上, 推进工业节能减排, 工业能源利用效率稳步提升. 同时针对汽车制造、医药制造和设备制造等重点行业开展低碳化改造, 进一步提升绿色低碳发展水平.

#### 1.4.4 全行业强化减排情景

在S2情景的基础上, 经济增速略有放缓, 工业能源利用效率和重点行业绿色低碳发展水平持续提升. 同时加强新能源汽车和绿色建筑推广力度, 新能源汽车占比进一步提升, 公共建筑能耗持续降低.

#### 1.4.5 深度减排情景

在S3情景的基础上, 全面加强工业、交通和公共建筑等领域的节能减排力度, 工业能源利用效率和重点行业低碳发展水平进一步提升, 新能源汽车占比显著提高, 公共建筑能耗水平进一步降低.

## 2 结果与讨论

### 2.1 能源消费需求分析

不同情景下研究区域的能源消费需求预测结果如图2所示. 随着节能减排力度的不断加强, 能源消费需求不断削减. BAU情景下, 研究区域未来能源消费需求逐年增长, 到2040年能源消费需求预计达50.73万t; S1情景下, 通过大力推广新能源汽车, 实施公共建筑节能, 能源消费需求相对BAU情景略有减少, 但仍呈现逐年增长态势; S2情景下, 随着工业能效的提升, 能源消费需求预计于2035年达到峰值26.28万t, 较BAU情景削减37.5%; S3情景下, 由于节能减排力度的加大, 能源消费需求进一步降低, 可提前至2030年达到峰值21.66万t, 较BAU情景削减36.8%; S4情景下, 随着各行业领域节能减

表 1 情景描述及关键参数设置

Table 1 Scenario description and key parameter settings

一级情景	二级情景	情景描述
BAU	经济发展	保持现有发展模式,“十四五”期间平均增速 15%，“十五五”期间平均增速 12%，之后平均增速 9%
	工业能效提升	保持现有能源利用效率
	交通新能源汽车推广	机动车保有量年均增速 3%，新能源汽车占比保持现有水平
	公共建筑节能	保持现有建筑能耗水平
S1	经济发展	与“BAU 情景”保持一致
	工业能效提升	与“BAU 情景”保持一致
	交通新能源汽车推广	加大新能源汽车推广力度。到 2025 年，新增或替换的公交车等全部使用新能源和清洁能源车辆。到 2030 年，新能源汽车占比达 8%
S2	公共建筑节能	单位建筑面积碳排放降低 30%
	经济发展	与“S1 情景”保持一致
	工业能效提升	能源效率进一步提升。到 2025 年，能源利用效率提高 28% 左右，到 2030 年提高 24% 左右，2030 年后能源利用效率年均提高 4%。重点推动汽车制造、医药制造、设备制造等重点行业绿色低碳发展，单位工业产值能耗进一步降低 10%
S3	交通新能源汽车推广	与“S1 情景”保持一致
	公共建筑节能	与“S1 情景”保持一致
	经济发展	经济增速有所放缓,“十四五”期间平均增速 12%，“十五五”期间平均增速 9%，后平均增速 6%
	工业能效提升	在“S2 情景”的基础上，重点推动汽车制造、医药制造、设备制造等重点行业绿色低碳发展，单位工业产值能耗进一步降低 20%
S4	交通新能源汽车推广	在“S2 情景”的基础上，进一步加大新能源汽车政策支持力度和基础设施建设进度。到 2025 年新能源汽车占比 5%，到 2030 年占比达 10%
	公共建筑节能	公共建筑能耗进一步降低，到 2030 年单位建筑面积碳排放降低 40%
	经济发展	与“S3 情景”保持一致
	工业能效提升	“十四五”期间能源利用效率提高 35% 左右，“十五五”期间提高 30% 左右，2030 年后能源利用效率年均提高 5%。重点推动汽车制造、医药制造、设备制造等重点行业绿色低碳发展，单位工业产值能耗进一步降低 30%
	交通新能源汽车推广	到 2025 年新能源汽车占比 10%，到 2030 年占比达 20%
	公共建筑节能	到 2030 年单位建筑面积碳排放降低 50%

排的深入推进，能源消费需求可提前至 2028 年达到峰值 19.10 万 t，较 BAU 情景削减 36.6%。

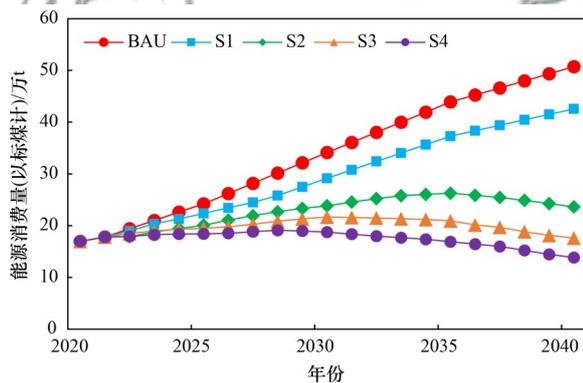


图 2 不同情景的能源消费需求

Fig. 2 Energy consumption in different scenarios

不同情景下主要年份分部门能源消费情况如图 3 所示。总体来看，工业是研究区域能源消费的主体，到 2040 年，BAU、S1、S2、S3 和 S4 情景下，工业能源消费占比分别为 67.6%、72.5%、52.8%、50.8% 和 41.1%。S1 情景下，由于未采取工业节能减排措施，工业能源消费占比逐年上升。S2、S3 和 S4 情景下，随着工业能源利用效率提升、交通新能源

汽车推广的深入推进，工业能源消费占比均呈现先上升后下降的趋势，分别于 2035、2030 和 2028 年达到峰值 57.1%、56.0% 和 53.6%。

不同情景主要年份的能源消费结构如图 4 所示。基准年研究区域能源消费以电力 (40.7%) 和汽油 (26.7%) 为主。随着工业节能减排、新能源汽车推广和老旧燃油车替代等措施的实施，研究区域能源消费结构不断改善。S2、S3 和 S4 情景下，到能源消费峰值年份研究区域能源消费结构以电力 (51.2%~61.9%) 和汽油 (18.5%~28.5%) 为主，电力和汽油消费占比有所提高，柴油消费占比显著降低。S1 情景下，到 2040 年研究区域能源消费结构转变为以电力 (68.2%) 和热力 (12.9%) 为主，电力消费占比持续提高，汽油和柴油消费占比显著降低。

## 2.2 CO<sub>2</sub> 排放分析

不同情景下 CO<sub>2</sub> 排放情况如图 5 所示，CO<sub>2</sub> 排放与能源消费需求呈现相似的变化规律。在 BAU 和 S1 情景下，研究区域 CO<sub>2</sub> 排放量逐年增长，表明按照当前发展趋势或仅仅依靠非工业领域的节能减排措施无法实现碳达峰的目标。主要原因在于非工业领域能源消费和 CO<sub>2</sub> 排放量占比较小，碳减排潜力有

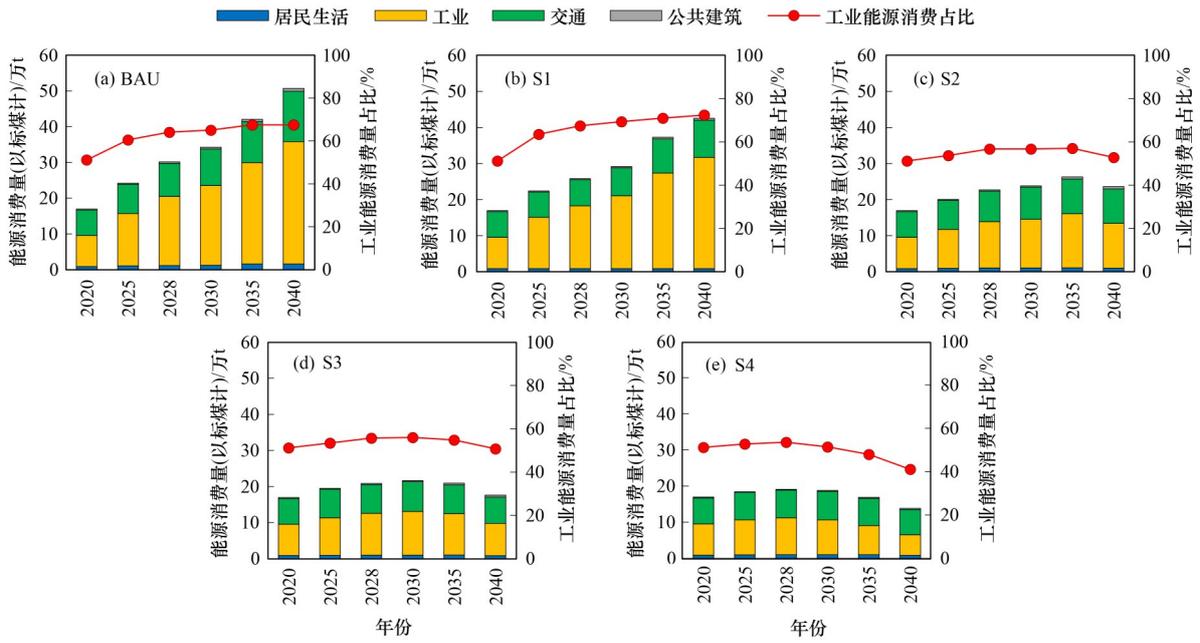


图 3 不同情景的分部门能源消费

Fig. 3 Sectoral energy consumption in different scenarios

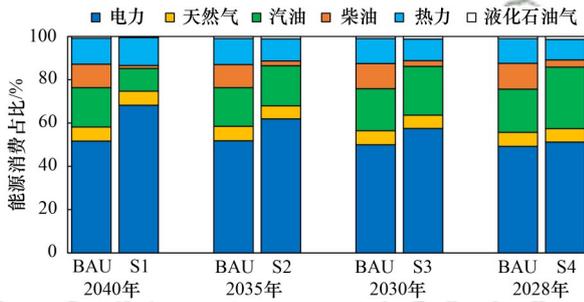


图 4 不同情景的能源消费结构

Fig. 4 Structure of energy consumption in different scenarios

限. S2、S3 和 S4 情景下, CO<sub>2</sub> 排放量分别于 2035、2030 和 2028 年达到峰值 75.35、59.34 和 53.24 万 t, 较 BAU 情景的削减率分别为 40.1%、39.3% 和 38.4%.

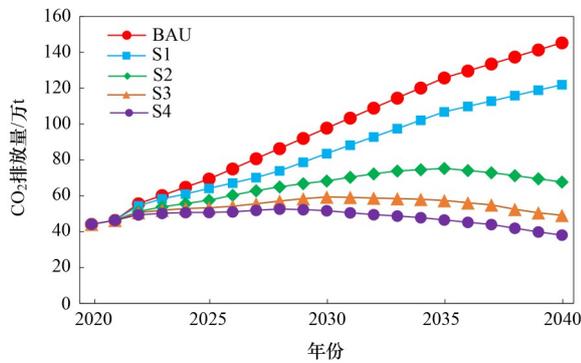


图 5 不同情景的 CO<sub>2</sub> 排放

Fig. 5 CO<sub>2</sub> emissions in different scenarios

不同情景下主要年份的碳排放结构如图 6 所示. BAU 和 S1 情景下, 工业碳排放占比逐年增长. S2、S3 和 S4 情景下, 工业碳排放占比呈现先上升后下降

的趋势, 分别于 2035、2030 和 2028 年达到峰值 64.2%、66.2% 和 62.9%, 与碳达峰年份相同, 表明研究区域想要实现碳达峰目标, 需加强工业节能减排力度, 减少工业碳排放量和排放占比.

### 2.3 碳减排贡献分析

基于以上分析, S3 和 S4 情景下研究区域可在 2030 年前实现碳达峰目标, 本节以这两种减排情景为例, 分析不同措施的碳减排贡献情况. S3 和 S4 情景下, 碳达峰年份不同措施的节能和碳减排贡献如图 7 所示. 总体来看, 各项措施在不同程度上均能促进研究区域能源消费和碳排放的削减. 其中, 工业能效提升对节能和碳减排贡献最为显著, 其次为经济增速放缓. 交通新能源汽车推广和公共建筑节能的碳减排贡献并不明显, 这与其能源消费和碳排放量在研究区域占比较小有关.

具体来看, S3 情景下工业能效提升对研究区域节能和碳减排的贡献率分别为 67.6% 和 65.1%, 其中重点行业能效提升的节能和碳减排贡献更为显著. 由于研究区域工业电力化程度较高, 能源消费结构优化空间有限, 工业碳减排主要依靠能源效率提升带来的能源消费量的减少. 新能源汽车推广的节能和碳减排的贡献率分别为 6.4% 和 9.0%, 通过新能源替代, 研究区域交通能源消费结构持续改善, 进一步推动了研究领域的交通碳减排. 与 S3 情景类似, S4 情景下工业能效提升的节能和碳减排的贡献最为显著, 其次为经济增速放缓、交通新能源汽车推广和公共建筑节能.

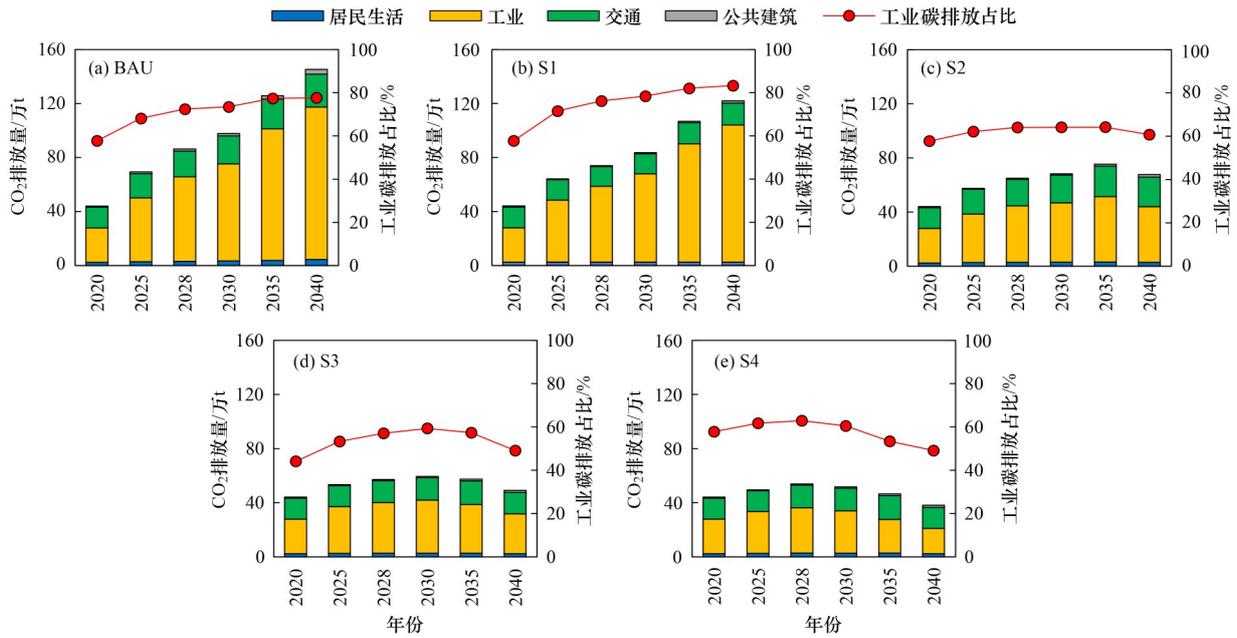
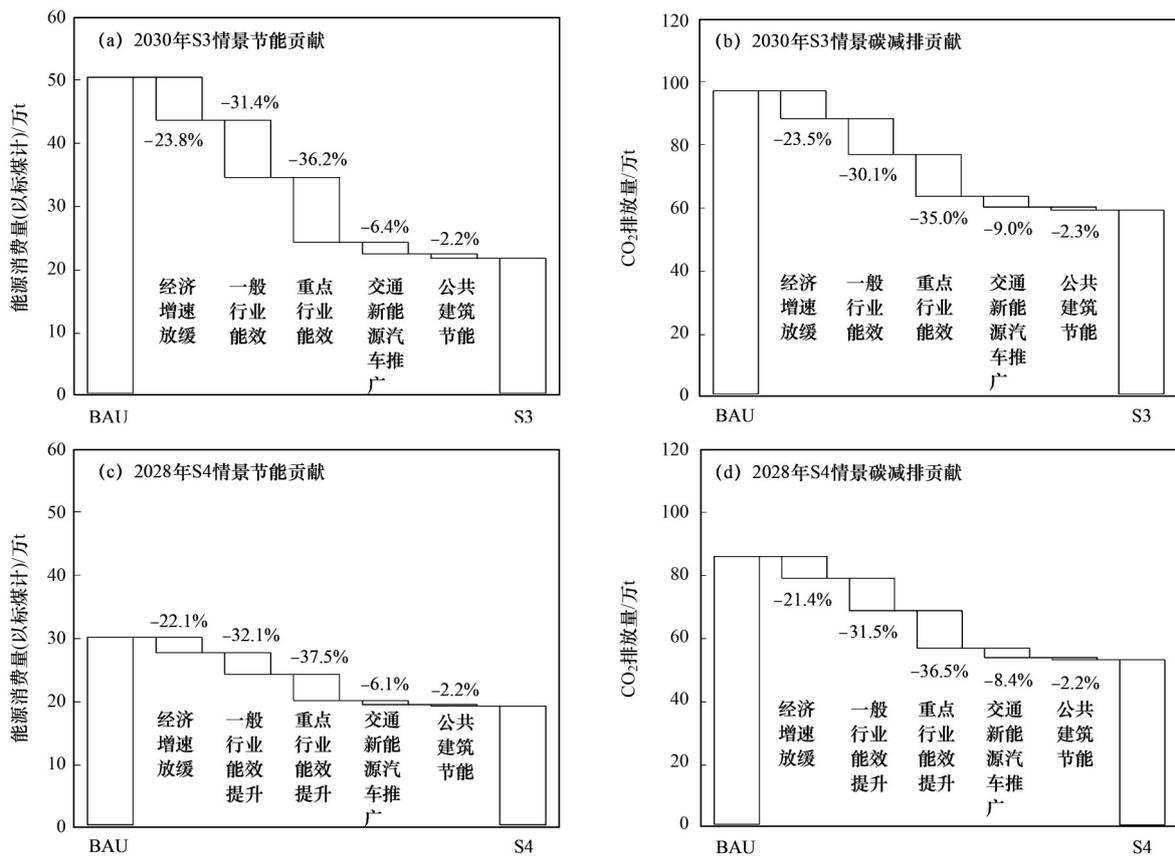


图 6 不同情景的 CO<sub>2</sub> 排放结构  
Fig. 6 Structure of CO<sub>2</sub> emissions in different scenarios



百分数分别表示各项措施的节能和碳减排贡献率  
图 7 S3 和 S4 情景下碳达峰年份的碳减排和节能贡献

Fig. 7 Contributions to carbon reduction and energy conservation in carbon peak years in S3 and S4 scenarios

### 2.4 碳达峰路径分析

S3 和 S4 情景下研究区域碳排放强度变化情况如图 8 所示. S3 和 S4 情景下, 到达峰年份研究区域碳排放强度(单位工业产值 CO<sub>2</sub> 排放量)分别达 0.088

t·万元<sup>-1</sup> 和 0.084 t·万元<sup>-1</sup>, 较基准年分别降低 20.5% 和 24.2%. 对照研究区域“十四五”规划目标“到 2030 年碳排放强度较 2020 年下降 20% 以上”可知, S3 和 S4 情景均能实现既定目标. 综合考虑碳达峰年

份和碳排放强度考核目标, 建议 S3 情景作为研究区域的达峰情景.

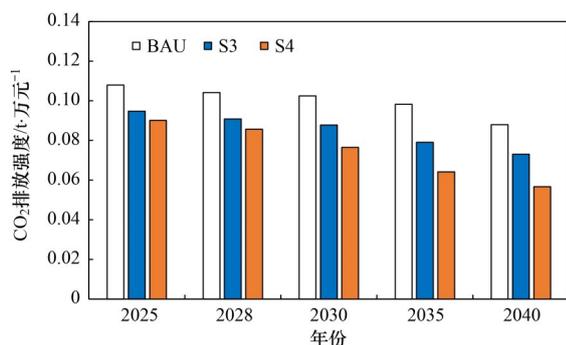


图 8 S3 和 S4 情景下主要年份碳排放强度

Fig. 8 Carbon intensity in major years in S3 and S4 scenarios

需要注意的是, S3 和 S4 情景在工业、交通、建筑等领域持续开展碳减排的基础上, 经济增速放缓 3 个百分点才能在 2030 年和 2028 年实现碳达峰, 可见研究区域碳达峰任务较为艰巨. 在保证未来经济发展的前提下, 研究区域需要充分挖掘工业、交通和建筑等领域的减排潜力.

在工业方面, 研究区域的重点减排领域应以工业为主, 考虑到区域工业活动以外来电力为主, 对煤炭等传统化石能源的依赖程度较低, 因此工业领域碳减排主要以提升能源利用效率为主. 工业领域应优先从汽车制造、医药制造和设备制造等重点行业入手, 开展重点行业和其他行业分梯次节能降碳. 具体而言, 大力推进工业节能提效改造升级, 深入挖掘汽车制造、医药制造和设备制造等重点行业的节能减排潜力, 有序推进重点行业和一般行业工艺和设备升级, 实施绿色照明和能量系统优化等工程, 促进能效水平稳步提升. 到 2025 年, 工业能源利用效率提高 28% 左右, 到 2030 年提高 24% 左右. 重点推动汽车制造、医药制造和设备制造等重点行业绿色低碳发展, 单位工业产值能耗进一步降低 20%.

在交通方面, 持续推进新能源汽车消费替代, 不断提升新能源汽车占比. 具体而言, 持续淘汰国三及以下排放标准柴油货车, 鼓励公交、邮政和环卫等公共领域用车采用新能源汽车, 推广中重型新能源货车应用. 到 2025 年新能源汽车占比达 5%, 到 2030 年占比达 10%. 同时做好绿色交通基础设施建设保障, 不断完善现有配套充电桩、电网等基础设施, 建立布局合理、运行高效的充电基础设施体系.

在公共建筑方面, 积极推广绿色建筑和既有建筑低碳改造, 不断降低公共建筑能耗水平. 具体而言, 严格执行建筑节能强制性标准, 2025 年新建建筑全面按照超低能耗建筑设计建造, 逐步提升公共

建筑节能标准至超低近零能耗建筑水平. 推广太阳能、光电等可再生能源建筑应用, 不断提高建筑电气化应用水平, 到 2030 年单位建筑面积碳排放降低 40%.

### 3 结论

(1) 从能源消费需求来看, 随着各项节能减排措施的深入推进, 研究区域未来能源消费需求将得到有效控制. S2、S3 和 S4 情景下研究区域能源消费需求分别于 2035、2030 和 2028 年达到峰值 26.28、21.66 和 19.10 万 t, 工业能源消费占比分别达 57.1%、56.0% 和 53.6%, 能源消费结构以电力和汽油为主.

(2) 从碳排放来看, S2、S3 和 S4 情景下研究区域 CO<sub>2</sub> 排放量将分别于 2035 年、2030 年和 2028 年达到峰值 75.35、59.34 和 53.24 万 t, 工业碳排放占比分别为 64.2%、66.2% 和 62.9%.

(3) 工业能效提升是研究区域实现碳达峰最为有效的措施, 针对重点行业的能效提升措施具有显著的碳减排潜力. 其次为经济增速放缓, 交通新能源汽车推广和公共建筑节能的碳减排潜力并不明显.

(4) 综合考虑碳达峰年份和碳排放强度考核目标, 建议 S3 情景作为研究区域的达峰情景, 达峰年碳排放强度为 0.088 t·万元<sup>-1</sup>. 碳减排措施主要以提升能效水平为主, 优先从重点行业入手. 交通方面应持续推进新能源汽车消费替代, 不断提升新能源汽车占比. 公共建筑方面应积极推广绿色建筑和既有建筑低碳改造, 不断降低公共建筑能耗水平.

#### 参考文献:

- [1] 中国政协网. 习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话(全文)[EB/OL]. <http://www.cppcc.gov.cn/zxww/2020/09/23/ARTI1600819264410115.shtml>, 2020-09-23.
- [2] 国家统计局. 中国统计年鉴-2022[M]. 北京: 中国统计出版社, 2022.
- [3] 严坤, 吕一铮, 郭扬, 等. 工业园区温室气体核算方法研究[J]. 中国环境管理, 2021, 13(6): 13-23.  
Yan K, Lv Y Z, Guo Y, et al. Review on greenhouse gas accounting methods on China's industrial parks[J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2021, 13(6): 13-23.
- [4] 李珀松, 冯昱, 王天天. 中国低碳产业园区的实践与发展模式选择[J]. 生态经济, 2014, 30(2): 143-146, 169.  
Li P S, Feng Y, Wang T T. Low carbon industrial park practice and development model selection in China[J]. Ecological Economy, 2014, 30(2): 143-146, 169.
- [5] 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]. Chinese Journal of Environmental Management, 2021, 13(1): 49-58.
- [6] 清华大学. 中国碳排放数据库 V2.0[EB/OL]. [http://meicmodel.org.cn/?page\\_id=2345](http://meicmodel.org.cn/?page_id=2345), 2023-04-28.
- [7] Li M, Liu H, Geng G N, et al. Anthropogenic emission inventories

- in China: a review [J]. *National Science Review*, 2017, **4**(6): 834-866.
- [ 8 ] Zheng B, Tong D, Li M, *et al.* Trends in China's anthropogenic emissions since 2010 as the consequence of clean air actions [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, **18**(19): 14095-14111.
- [ 9 ] 陈吕军. 建好生态工业园区 增辉中国式现代化[N]. *中国环境报*, 2023-03-06(04).
- [ 10 ] 燕东, 刘枫, 叶鹏飞, 等. 碳达峰情景预测的主要方法及模型 [J]. *环境保护与循环经济*, 2021, **41**(7): 97-101.
- [ 11 ] 王侃宏, 何好. 中国碳达峰模型研究综述[J]. *河北省科学院学报*, 2022, **39**(4): 57-64.
- Wang K H, He H. Review of research on carbon peaking model in China [J]. *Journal of the Hebei Academy of Sciences*, 2022, **39**(4): 57-64.
- [ 12 ] 程宁熹. 基于 LEAP 模型的上海市工业部门能源消费与碳排放研究[D]. 上海: 东华大学, 2021.
- Cheng N X. Research on energy consumption and carbon emissions of Shanghai's industrial sector based on LEAP model [D]. Shanghai: Donghua University, 2021.
- [ 13 ] 李新, 路路, 穆献中, 等. 基于 LEAP 模型的京津冀地区钢铁行业中长期减排潜力分析[J]. *环境科学研究*, 2019, **32**(3): 365-371.
- Li X, Lu L, Mu X Z, *et al.* Emission reduction potential of pollutants emissions from iron and steel industry over Beijing-Tianjin-Hebei region based on LEAP [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, **32**(3): 365-371.
- [ 14 ] 熊亚林, 刘玮, 高鹏博, 等. “双碳”目标下氢能在我国合成氨行业的需求与减碳路径[J]. *储能科学与技术*, 2022, **11**(12): 4048-4058.
- Xiong Y L, Liu W, Gao P B, *et al.* Research on the hydrogen energy demand and carbon-reduction path in China's synthetic ammonia industry to achieve the “carbon peak” and “carbon neutrality” goals [J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2022, **11**(12): 4048-4058.
- [ 15 ] Wang B. Low-carbon transformation planning of China's power energy system under the goal of carbon neutrality [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, **30**(15): 44367-44377.
- [ 16 ] 杨楠, 李艳霞, 吕晨, 等. 唐山市钢铁行业碳排放核算及达峰预测[J]. *环境工程*, 2020, **38**(11): 44-52.
- Yang N, Li Y X, Lv C, *et al.* Carbon emission accounting and peak forecasting of iron & steel industry in Tangshan [J]. *Environmental Engineering*, 2020, **38**(11): 44-52.
- [ 17 ] 黄莹, 郭洪旭, 廖翠萍, 等. 基于 LEAP 模型的城市交通低碳发展路径研究——以广州市为例[J]. *气候变化研究进展*, 2019, **15**(6): 670-683.
- Huang Y, Guo H X, Liao C P, *et al.* Study on low-carbon development path of urban transportation sector based on LEAP model——take Guangzhou as an example [J]. *Climate Change Research*, 2019, **15**(6): 670-683.
- [ 18 ] 吴玉婷, 王晓荣, 何潇蓉. 基于 LEAP 模型的北京市交通能耗及环境污染排放预测[J]. *河北建筑工程学院学报*, 2018, **36**(4): 85-90, 100.
- Wu Y T, Wang X R, He X R. Forecast of traffic energy consumption and environmental pollution emission in Beijing based on LEAP model [J]. *Journal of Hebei Institute of Architecture and Civil Engineering*, 2018, **36**(4): 85-90, 100.
- [ 19 ] 刘俊伶, 孙一赫, 王克, 等. 中国交通部门中长期低碳发展路径研究[J]. *气候变化研究进展*, 2018, **14**(5): 513-521.
- Liu J L, Sun Y H, Wang K, *et al.* Study on mid-and long-term low carbon development pathway for China's transport sector [J]. *Climate Change Research*, 2018, **14**(5): 513-521.
- [ 20 ] 庞可, 张芊, 马彩云, 等. 基于 LEAP 模型的兰州市道路交通温室气体与污染物协同减排情景模拟[J]. *环境科学*, 2022, **43**(7): 3386-3395.
- Pang K, Zhang Q, Ma C Y, *et al.* Forecasting of emission co-reduction of greenhouse gases and pollutants for the road transport sector in Lanzhou based on the LEAP model [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(7): 3386-3395.
- [ 21 ] 许绩辉, 王克. 中国民航业中长期碳排放预测与技术减排潜力分析[J]. *中国环境科学*, 2022, **42**(7): 3412-3424.
- Xu J H, Wang K. Medium-and long-term carbon emission forecast and technological emission reduction potential analysis of China's civil aviation industry [J]. *China Environmental Science*, 2022, **42**(7): 3412-3424.
- [ 22 ] 张时聪, 王珂, 杨芯岩, 等. 建筑部门碳达峰碳中和排放控制目标研究[J]. *建筑科学*, 2021, **37**(8): 189-198.
- Zhang S C, Wang K, Yang X Y, *et al.* Research on emission goal of carbon peak and carbon neutral in building sector [J]. *Building Science*, 2021, **37**(8): 189-198.
- [ 23 ] 洪竞科, 李沅潮, 郭德悦. 全产业链视角下建筑碳排放路径模拟: 基于 RICE-LEAP 模型[J]. *中国环境科学*, 2022, **42**(9): 4389-4398.
- Hong J K, Li Y C, Guo S Y. Simulating building carbon emission path with a RICE-LEAP model from the perspective of the whole supply chain [J]. *China Environmental Science*, 2022, **42**(9): 4389-4398.
- [ 24 ] 刘惠, 王真, 曹丽斌, 等. 基于 LEAP 模型的鹤壁市农村生活碳排放研究[J]. *环境科学与技术*, 2020, **43**(11): 25-35.
- Liu H, Wang Z, Cao L B, *et al.* Research of rural living carbon emission in Hebi based on LEAP model [J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, **43**(11): 25-35.
- [ 25 ] Zhou Y, Hao F H, Meng W, *et al.* Scenario analysis of energy-based low-carbon development in China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2014, **26**(8): 1631-1640.
- [ 26 ] Cai L Y, Guo J F. Scenario analysis of CO<sub>2</sub> emission abatement effect based on LEAP [J]. *Energy Procedia*, 2018, **152**: 965-970.
- [ 27 ] Wu W, Zhang T T, Xie X M, *et al.* Regional low carbon development pathways for the Yangtze River Delta region in China [J]. *Energy Policy*, 2021, **151**, doi: 10.1016/j.enpol.2021.112172.
- [ 28 ] Liu Y Y, Chen S, Jiang K J, *et al.* The gaps and pathways to carbon neutrality for different type cities in China [J]. *Energy*, 2022, **244**, doi: 10.1016/j.energy.2021.122596.
- [ 29 ] 黄昱杰, 刘贵贤, 薄宇, 等. 京津冀协同推进碳达峰碳中和路径研究[J]. *中国工程科学*, 2023, **25**(2): 160-172.
- Huang Y J, Liu G X, Bo Y, *et al.* Beijing-Tianjin-Hebei coordinated development toward the carbon peaking and carbon neutrality goals [J]. *Strategic Study of CAE*, 2023, **25**(2): 160-172.
- [ 30 ] 杨顺顺. 基于 LEAP 模型的长江经济带分区域碳排放核算及情景分析[J]. *生态经济*, 2017, **33**(9): 26-30.
- Yang S S. Regional carbon emissions estimation and scenario analysis in the Yangtze River economic belt based on LEAP model [J]. *Ecological Economy*, 2017, **33**(9): 26-30.
- [ 31 ] 常征, 潘克西. 基于 LEAP 模型的上海长期能源消耗及碳排放分析[J]. *当代财经*, 2014, (1): 98-106.
- Chang Z, Pan K X. An analysis of Shanghai's long-term energy consumption and carbon emission based on LEAP model [J].

- Contemporary Finance & Economics, 2014, (1): 98-106.
- [32] 王继龙, 刘觅颖, 杨冰. 北京市能源消费峰值预测及对策研究[J]. 低碳经济, 2018, 7(3): 136-145.  
Wang J L, Liu M Y, Yang B. Forecast of Beijing's energy consumption peak and research on countermeasures[J]. Journal of Low Carbon Economy, 2018, 7(3): 136-145.
- [33] 吴唯, 张庭婷, 谢晓敏, 等. 基于 LEAP 模型的区域低碳发展路径研究——以浙江省为例[J]. 生态经济, 2019, 35(12): 19-24.  
Wu W, Zhang T T, Xie X M, et al. Research on regional low carbon development path based on LEAP model: taking Zhejiang Province as an example[J]. Ecological Economy, 2019, 35(12): 19-24.
- [34] 吕茹. 基于 LEAP 模型的山西长期能源消耗及碳排放分析[J]. 山西化工, 2022, 42(3): 304-306.  
Lv R. Analysis of Shanxi's long-term energy consumption and carbon emission based on LEAP model[J]. Shanxi Chemical Industry, 2022, 42(3): 304-306.
- [35] 王春春, 王远, 朱晓东. 基于长期能源替代规划模型的江苏省能源 CO<sub>2</sub> 排放达峰时间及峰值水平[J]. 应用生态学报, 2019, 30(10): 3535-3543.  
Wang C C, Wang Y, Zhu X D. Peak volume and time of energy-related CO<sub>2</sub> emissions in Jiangsu Province, China based on long-range energy alternatives planning system model[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(10): 3535-3543.
- [36] 杜涵蓓, 赵立君, 刘巨炜, 等. 基于 LEAP 模型和 KAYA 模型的主城区碳达峰预测及不确定性分析[J]. 生态与农村环境学报, 2022, 38(8): 983-991.  
Du H B, Zhao L J, Liu C W, et al. Prediction of peaking carbon dioxide emissions in main city areas based on LEAP model and KAYA model and analyses on its uncertainty[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2022, 38(8): 983-991.
- [37] 杨培志, 韩春洋. 基于 LEAP 模型的长沙市某产业园区长期能源需求量与碳排放分析[A]. 见: 中国环境科学学会 2019 年科学技术年会—环境工程技术创新与应用分论坛论文集(一)[C]. 西安:《环境工程》编辑部, 2019.
- [38] 张翠霞. 基于 LEAP 模型的电动汽车发展对广州能源环境影响研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2013.  
Zhang C X. Research on the development of electric vehicle impact on energy and Environment in Guangzhou based on LAEP model[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2013.
- [39] 杨宛钰. 城市道路交通能源消耗测算方法研究——以南京为例[D]. 南京: 东南大学, 2018.  
Yang W Y. Study on urban road traffic system energy consumption calculation method in Nanjing[D]. Nanjing: Southeast University, 2018.
- [40] 南京市统计局, 国家统计局南京调查队. 南京统计年鉴-2022[M]. 北京: 中国统计出版社, 2022.
- [41] 潘晓, 陈毅兴, 邓章, 等. 典型建筑能耗模型搭建——以长沙商场建筑为例[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2021, 53(6): 947-954.  
Pan X, Chen Y X, Deng Z, et al. Development of prototype energy model: a case study of shopping mall buildings in Changsha[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2021, 53(6): 947-954.
- [42] 郭清. 江苏省公共建筑节能测评基础项能耗计算研究[J]. 建筑节能(中英文), 2021, 49(10): 117-121.  
Guo Q. Basic options' energy consumption calculation of public buildings energy efficiency evaluation in Jiangsu[J]. Journal of BEE, 2021, 49(10): 117-121.
- [43] 王清勤. 绿色建筑助力碳达峰与碳中和[EB/OL]. <http://www.chinajsb.cn/html/202105/24/20288.html>, 2021-05-24.
- [44] 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告 2022(公共建筑专题)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2022. 40-52.
- [45] 国家发展和改革委员会办公厅. 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.
- [46] 生态环境部办公厅. 关于做好 2022 年企业温室气体排放报告管理相关重点工作的通知[EB/OL]. [https://www.mee.gov.cn/xxgk/2018/xxgk/xxgk06/202203/t20220315\\_971468.html](https://www.mee.gov.cn/xxgk/2018/xxgk/xxgk06/202203/t20220315_971468.html), 2022-03-15.

## CONTENTS

Spatio-temporal Evolution, Dynamic Transition, and Convergence Trend of Urban Carbon Emission Intensity in China .....	YANG Qing-ke, WANG Lei, ZHU Gao-li, <i>et al.</i> (1869)
Spatio-temporal Evolution and Trend Prediction of Transport Carbon Emission Efficiency .....	ZHENG Yan, JIANG Xue-mei, XIAO Yu-jie (1879)
Research on Carbon Emission Decoupling Factors Based on STIRPAT Model and LMDI Decomposition .....	ZHANG Jiang-yan (1888)
Carbon Peak Pathways of Industrial Parks Based on the LEAP Model: A Case Study of a National Development Zone in Nanjing .....	LI Hui-peng, LI Li, YIN Yin, <i>et al.</i> (1898)
Accounting and Analysis of Carbon Emissions in Universities: A Case Study of Beijing A University .....	CAO Rui, FENG Li, ZHANG Li-qiu (1907)
Synergy Effects and Driving Factors of Pollution and Carbon Emission Reduction in Manufacturing Industry in Beijing .....	YU Shan, HAN Yu-hua, MU Jie, <i>et al.</i> (1917)
Carbon Emissions Trading Prices and Total Factor Productivity: Evidence from China .....	WU Xue-ping (1926)
Analysis of Spatio-temporal Distribution Characteristics and Influencing Factors of PM <sub>2.5</sub> and PM <sub>10</sub> in Chinese Cities .....	LI Jiang-su, DUAN Liang-rong, ZHANG Tian-jiao (1938)
Spatial-temporal Characteristics and Influencing Factors of PM <sub>2.5</sub> and Ozone in the Border Area of Jiangsu, Anhui, Shandong, and Henan from 2017 to 2021 .....	CHEN Wei, XU Xue-zhe, LIU Wen-qing (1950)
Analysis of the Characteristics and Causes of PM <sub>2.5</sub> and O <sub>3</sub> Pollution in Xi'an During the Epidemic Lockdown Period .....	YUAN Xiao-hong, ZHANG Qiang, LI Qi, <i>et al.</i> (1963)
PM <sub>2.5</sub> Chemical Composition and Spatial Variability in the Five Cities of Southern Jiangsu During Fall and Winter .....	FENG Wei, DING Feng, SHANG Yue, <i>et al.</i> (1975)
Source Apportionment of Fine Particles in Xianning, Hubei .....	LUO Yi, ZHU Kuan-guang, CHEN Pu-long, <i>et al.</i> (1983)
Spillover Benefits of Ammonia Emission Reduction in Xingtai Area to the Improvement of Atmospheric PM <sub>2.5</sub> Concentration in the Beijing-Tianjin-Hebei Region .....	BIAN Ze-jun, WEN Chao-yu, LANG Jian-lei, <i>et al.</i> (1994)
Characteristics, Risk Assessment, and Sources of the Polluted Metallic Elements in PM <sub>2.5</sub> During Winter in Liaocheng City .....	ZHANG Jing-qiao, ZHU Yao, CAO Ting, <i>et al.</i> (2003)
Composition Characteristics of Typical VOCs Sources in the Highland City of Lhasa .....	GUO Shu-zheng, YE Chun-xiang, LIN Wei-li, <i>et al.</i> (2011)
VOCs Pollution Characteristics and Health Risk Assessment in Typical Industrial Parks in Beijing: Environmental Impact of High and New Technology Industries .....	WANG Jie, YAO Zhen, WANG Min-yan, <i>et al.</i> (2019)
Analysis of a Typical Ozone Pollution Process in the Chengdu Plain Under the Influence of High Temperature Extremes .....	LEI Li-juan, ZHANG Yi, LUO Yi-na, <i>et al.</i> (2028)
Presence, Behavior, and Risk of Antiviral Drugs in the Aqueous Environment .....	GE Lin-ke, LI Xuan-yan, CAO Sheng-kai, <i>et al.</i> (2039)
Spatio-temporal Variation and Probability Health Risk of Heavy Metals in Surface Water of Xiaolangdi Reservoir in the Yellow River .....	WANG Liang, DENG Xue-jiao, WANG Xiao-lei, <i>et al.</i> (2054)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Strontium Enrichment of the Duoqu River Basin in Eastern Xizang .....	LI Jing-jie, LIAN Sheng, WANG Ming-guo, <i>et al.</i> (2067)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation and Its Moisture Sources in the Inland Regions of Northwest China .....	ZHANG Yan-yan, XIN Cun-lin, GUO Xiao-yan, <i>et al.</i> (2080)
Recharge Source and Evolution Process of Karst Groundwater in Tai'an Urban Area Based on Hydrochemistry and Hydrogen and Oxygen Isotopes .....	MENG Ling-hua (2096)
Hydrochemical Characteristics and Influencing Factors of Surface Water and Groundwater in the Mountainous Area of Danjiang River Basin .....	ZHANG Zi-yan, FU Yong-peng, WANG Ning-tao, <i>et al.</i> (2107)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Groundwater in Yuanyangchi Irrigation Area, Jinta Basin .....	WANG Xiao-yan, HAN Shuang-bao, ZHANG Meng-nan, <i>et al.</i> (2118)
Hydrochemical Characteristics and Health Risk Assessment of Shallow Groundwater in the Plain Zone of Deyang City .....	LIU Nan, CHEN Meng, GAO Dong-dong, <i>et al.</i> (2129)
Spatial and Temporal Distribution of Microplastics in the Sediments of Typical Urban River Network .....	XU Wan-lu, FAN Yi-fan, QIAN Xin (2142)
Construction of Nitrogen Emission Inventory at Sub-basin Scale and Analysis of Key Sources in Fuxian Lake Watershed .....	WANG Yan-jie, LIANG Qi-bin, WANG Yan-xia, <i>et al.</i> (2150)
Preparation of Lanthanum Crosslinked Calcium Peroxide/Sepiolite/Sodium Alginate Composite Hydrogels and Their Elimination Performance for Endogenous Phosphorus .....	QU Si-tong, SHAN Su-jie, WANG Chong-ming, <i>et al.</i> (2160)
Formation Mechanism, Structural Characteristics of Ultrafine Mineral Particles, and Their Environmental Effects .....	LIU Zhen-hai, ZHANG Zhan-hua, YUAN Yu-xin, <i>et al.</i> (2171)
Research Progress in Application of Biochar-immobilized Bacteria Composites in Environmental Remediation .....	SUN Shu-yu, HUANG Meng-xin, KONG Qiang, <i>et al.</i> (2185)
Effect of Microplastics on Ammonia Nitrogen Adsorption by Zeolite in Water and Its Mechanism .....	LIAN Jian-jun, XIE Shi-ting, WU Pei, <i>et al.</i> (2195)
Mechanism of Ultraviolet Aging Effect on the Adsorption of Ciprofloxacin by Nano-biochar .....	MA Feng-feng, XUE Zhi-yi, ZHAO Bao-wei (2203)
Response of Phytoplankton Communities and Environmental Factors Under the Influence of Land Use in the Wuding River Basin .....	GUO Shan-song, HU En, DING Yi-tong, <i>et al.</i> (2211)
Bacterial Community Diversity and Functional Gene Abundance of Culturable Bacteria in the Wetland of Poyang Lake .....	YU Jiang, WANG Chun, LONG Yong, <i>et al.</i> (2223)
Bacterial Community Structure and Its Relationship with Heavy Metals in Sediments of Diannong River .....	LIU Shuang-yu, MENG Jun-jie, QIU Xiao-cong, <i>et al.</i> (2233)
Impacts of Treated Wastewater on Bacterial and Fungal Microbial Communities in Receiving Rivers .....	GUO You-shun, YU Zhong, HAO Wen-bin, <i>et al.</i> (2246)
Metagenomics Reveals the Characteristics and Functions of Bacterial Community in the Advanced Wastewater Treatment Process .....	HU Jian-shuang, WANG Yan, ZHOU Zheng, <i>et al.</i> (2259)
Spatio-temporal Characteristics of Habitat Quality and Natural-human Driven Mechanism in Dabie Mountain Area .....	ZHENG Ya-ping, ZHANG Jun-hua, TIAN Hui-wen, <i>et al.</i> (2268)
Hyperspectral Inversion of Soil Organic Matter Content Based on Continuous Wavelet Transform, SHAP, and XGBoost .....	YE Miao, ZHU Lin, LIU Xu-dong, <i>et al.</i> (2280)
Effects of Straw Retention, Film Mulching, and Nitrogen Input on Soil Quality in Dryland Wheat Field .....	YE Zi-zhuang, WANG Song-yan, LU Xiao, <i>et al.</i> (2292)
Effects of Long-term Application of Organic Fertilizer on the Occurrence and Migration Characteristics of Soil Microplastics .....	WANG Chang-yuan, MA Xiao-chi, GUO De-jie, <i>et al.</i> (2304)
Effect of Different Soil Salinities on N <sub>2</sub> O Emission: A Meta-analysis .....	HUANG Yi-hua, SHE Dong-li, SHI Zhen-qi, <i>et al.</i> (2313)
Assessment and Prediction of Carbon Storage Based on Land Use/Land Cover Dynamics in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area .....	ZHENG Hui-ling, ZHENG Hui-feng (2321)
Simulation of Temporal and Spatial Changes in Ecosystem Carbon Storage in Funiu Mountains Based on InVEST Model .....	ZHANG Zhe, SHI Zhen-qin, ZHU Wen-bo, <i>et al.</i> (2332)
Relationship Between Microbial Nutrient Limitation and Soil Organic Carbon Fraction During Shelterbelts Construction .....	XU Feng-jing, HUANG Yi-mei, HUANG Qian, <i>et al.</i> (2342)
Characteristics and Driving Forces of Organic Carbon Mineralization in Brown Soil with Long-term Straw Returning .....	ZHAO Yu-hang, YIN Hao-kai, HU Xue-chun, <i>et al.</i> (2353)
Effects of Winter Green Manure Mulching on Soil Aggregates, Organic Carbon, and AMF Diversity .....	LU Ze-rang, CHEN Jia-yan, LI Zhi-xian, <i>et al.</i> (2363)
Spatial and Temporal Distribution of Nitrogen in the Liaohe River Basin and Its Responses to Land Use and Rainfall .....	ZHOU Bo, LI Xiao-guang, TONG Si-chen, <i>et al.</i> (2373)
Nitrous Oxide Emissions from Ponds in Typical Agricultural Catchment with Intensive Agricultural Activity .....	ZHANG Xin-yue, XIAO Qi-tao, XIE Hui, <i>et al.</i> (2385)
Effects of Biochar Combined with Different Types of Nitrogen Fertilizers on Denitrification Bacteria Community in Vegetable Soil .....	LIU Xiao-wan, LIU Xing-ren, GAO Shang-jie, <i>et al.</i> (2394)
Investigation of Soil Microbial Characteristics During Stand Development in <i>Pinus tabulaeformis</i> Forest in Taiyue Mountain .....	MA Yi-shu, CAO Ya-xin, NIU Min, <i>et al.</i> (2406)
Simulation of Heavy Metal Content in Soil Based on Sparse Sample Sites .....	ZHANG Jia-qi, PAN Yu-chun, GAO Shi-chen, <i>et al.</i> (2417)
Identification Priority Source of Heavy Metal Pollution in Greenspace Soils Based on Source-specific Ecological and Human Health Risk Analysis in the Yellow River Custom Tourist Line of Lanzhou .....	LI Jun, LI Xu, LI Kai-ming, <i>et al.</i> (2428)
Heavy Metal Accumulation and Assessment of Potential Ecological Risk Caused by Soil pH Changes in Different Types of Purple Soils in Southwest China .....	ZHANG Hai-lin, ZHANG Yu, WANG Ding, <i>et al.</i> (2440)
Assessment and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Arable Land Around an Iron Ore Mining Area in Chongqing .....	LIAO Ze-yuan, LI Jie-qin, SHEN Zhi-jie, <i>et al.</i> (2450)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils and Crops Around Metal Mines .....	WEI Hong-bin, LUO Ming, XIANG Lei, <i>et al.</i> (2461)
Effect of Red Mud-based Nano Zero-valent Iron on Remediation of Polymetallic Contaminated Soil .....	LIU Long-yu, YANG Shi-li, ZHAO Huang-shi-yu, <i>et al.</i> (2474)
Effects of Zinc Application on Cadmium Accumulation in Alkaline Soil-Wheat Seedling Systems .....	ZHANG Yao, WANG Tian-qi, NIU Shuo, <i>et al.</i> (2480)