

目次

加速能源转型与产业结构调整的环境健康协同效益评估:以京津冀鲁地区为例 ..... 杨玺, 孙奕生, 常世彦, 李胜悦, 郑昊天, 王书肖, 张希良 (3627)

基于不同电力需求的中国减污降碳协同增效路径 ..... 向梦宇, 王深, 吕连宏, 张楠, 白梓函 (3637)

城市碳达峰碳中和行动评估方法与应用 ..... 张保留, 白梓函, 张楠, 吕连宏, 阳平坚 (3649)

基于可解释性机器学习的城市 O<sub>3</sub> 驱动因素挖掘 ..... 董佳奇, 胡冬梅, 闫雨龙, 彭林, 张辉辉, 牛月圆, 段小琳 (3660)

基于响应曲面法的臭氧生成敏感性分析 ..... 朱禹寰, 陈冰, 张雅茹, 刘晓, 李光耀, 舍静, 陈强 (3669)

基于 WRF-CMAQ/ISAM 模型的榆林市夏季 O<sub>3</sub> 来源解析 ..... 王伊凡, 仝纪龙, 陈羽翔, 林鑫, 刘永乐, 敖丛杰, 刘浩天 (3676)

基于轻量级梯度提升机的南京大气臭氧浓度预测 ..... 朱珈莹, 安俊琳, 冯悦政, 贺婕, 张玉欣, 王俊秀 (3685)

2022 年广东省冬季一次臭氧污染过程的气象成因及潜在源区分析 ..... 李婉苑, 陈靖扬, 龚宇, 沈劲 (3695)

夏季对流层臭氧辐射强迫对华北地区天气和空气质量的影响 ..... 杜楠, 陈磊, 廖宏, 朱佳, 李柯 (3705)

气象、本地光化学生成和外围传输对长沙市 2018~2020 年臭氧污染趋势变化影响的识别 ..... 杨俊, 杨雷峰, 丁华, 谢丹平, 刘妍妍, 余涛, 吕明, 袁自冰 (3715)

2000~2021 年成渝城市群 PM<sub>2.5</sub> 时空变化及驱动机制多维探测 ..... 徐勇, 郭振东, 郑志威, 戴强玉, 赵纯, 黄雯婷 (3724)

基于 GTWR-XGBoost 模型的四川省 PM<sub>2.5</sub> 小时浓度估算 ..... 吴迪, 杜宁, 王莉, 吴宇宏, 张少磊, 周彬, 张显云 (3738)

2013~2021 年邢台 PM<sub>2.5</sub> 重污染过程输送和增长特性 ..... 江琪, 盛黎, 靳雨晨, 王继康, 尤媛, 王飞 (3749)

基于高分辨率在线观测数据分析上海市城区秋冬季大气有机气溶胶化学特征及污染来源 ..... 朱书慧 (3760)

机动车尾气碳质气溶胶排放因子及其稳定碳同位素特征 ..... 于鸣媛, 王谦, 付明亮, 戈畅, 谢锋, 曹芳, 章炎麟 (3771)

沈阳工业区夏季 VOCs 组成特征及其对二次污染形成的贡献 ..... 关璐, 苏枫枫, 库盈盈, 胡建林, 于兴娜 (3779)

疫情管控期间深圳市城区 VOCs 的变化特征及减排效果评估 ..... 云龙, 林楚雄, 李成柳, 邱志诚, 古添发, 李光程, 张明棣, 郭健锋 (3788)

西安市冬季道路扬尘中有机质组成特征及其氧化潜势 ..... 王擎雯, 陈庆彩, 王超, 王瑞鹤, 刘国瑞, 李豪, 李艳广 (3797)

淮北孙疃矿区地表尘中多环芳烃类化合物的污染特征及致癌风险评价 ..... 徐振鹏, 钱雅慧, 洪秀萍, 罗钟庚, 高秀龙, 梁汉东 (3809)

雄安建设初期白洋淀水质时空差异及其对降雨和土地利用的响应 ..... 王子铭, 杨丽虎, 宋献方 (3820)

流域尺度污染溯源模拟-优化防控方法:以铜陵市顺安河流域为例 ..... 刘国王辰, 陈磊, 李佳奇, 张钰晨, 赵奕欣, 刘妍琪, 沈珍瑶 (3835)

南昌市浅层地下水水质评价及监测指标优化 ..... 郑紫吟, 储小东, 徐金英, 马志飞 (3846)

闪电河流域“三水”氢氧同位素特征及水体转换分析 ..... 杨丽娜, 贾德彬, 高瑞忠, 苏文旭, 卢方园, 郝玉胜 (3855)

金沙江丰富类和稀有类浮游真核微生物的分布特征与影响因素 ..... 燕炳成, 崔戈, 孙胜浩, 王沛芳, 王超, 吴程, 陈娟 (3864)

嘉陵江不同干扰断面河道沉积物细菌群落多样性 ..... 竹兰萍, 张拓, 李佳宁, 王佳颖, 郑伟亮, 徐飞, 张富斌 (3872)

水库水深变化对不同浮游微生物群落及网络互作关键种的影响 ..... 王洵, 廖琴, 王沛芳, 袁秋生, 胡斌, 邢小蕾, 徐浩森 (3881)

典型工业区地下水细菌群落多样性特征与环境因子响应初探 ..... 吴建强, 张书源, 王敏, 陈敏, 叶文娟, 熊丽君, 黄沈发 (3892)

太湖流域肥料施用策略调整对典型作物系统氮磷流失的影响 ..... 俞映倬, 王逸之, 杨根, 杨林章, 段婧婧, 韩雪梅, 薛利红 (3902)

基于机器学习的长江流域农田氮径流流失负荷估算 ..... 张育福, 潘哲祺, 陈丁江 (3913)

千岛湖地区上梧溪流域地表径流非点源氮污染分类识别 ..... 俞珂, 严璇, 唐张轩, 张方方, 何圣嘉, 姜培坤 (3923)

沱江和涪江水系干支流氮磷营养盐的空间分布特征 ..... 李子阳, 周明华, 徐鹏, 陈露, 刘祥龙, 林洪羽, 江南, 任兵, 张博文 (3933)

外秦淮河底泥污染及疏浚效果 ..... 张沐, 任增谊, 张曼, 赵琼, 尹洪斌 (3945)

新污染物多环芳烃衍生物的来源、分布与光化学行为 ..... 葛林科, 王子宇, 曹胜凯, 车晓佳, 朱超, 张蓬, 马宏瑞 (3957)

镉在针铁矿界面共吸附的相互作用机制 ..... 苏子贤, 刘赛红, 管玉峰, 陶亮 (3970)

环糊精键合 Fe-TAML 催化剂的制备及其活化 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 氧化水中有机微污染物 ..... 刘清泉, 蔡本哲, 蔡喜运 (3978)

Co(II) 活化过一硫酸盐降解氨基三甲膦酸的性能及反应机制 ..... 朱敬林, 汪舒 (3990)

微塑料诱导下污泥造粒潜能变化及微生物富集特征 ..... 谢晴帆, 俞楠, 张妮, 谢周云, 单珂欣, 吴亦馨, 唐力, 夏静芬, 杨国靖 (3997)

中国农田土壤 Cd 累积分布特征及概率风险评价 ..... 王静, 魏恒, 潘波 (4006)

渝东南典型地质高背景区土壤重金属来源解析及污染评价 ..... 蒋玉莲, 余京, 王锐, 王佳彬, 李瑜, 余飞, 张云逸 (4017)

基于 PMF 模型的农田土壤重金属源暴露风险综合评价:以浙江省某电子垃圾拆解区为例 ..... 方嘉, 何影, 黄乃涛, 支裕优, 傅伟军 (4027)

乌鲁木齐市郊农田土壤及农作物中多环芳烃的污染特征及风险评价 ..... 范悦, 曹双瑜, 艾力江·努尔拉, 于芸云江·吗米提敏, 阿不都艾尼·阿不里, 谢宣宣, 古丽斯坦·阿不都拉, 刘河疆 (4039)

荒漠绿洲土壤抗生素抗性基因分布特征及驱动机制 ..... 黄福义, 周曙仡, 苏建强, 朱永官 (4052)

近 15 年我国土壤抗生素污染特征与生物修复研究进展 ..... 赵晓东, 乔青青, 秦宵睿, 李晓晶, 李永涛 (4059)

改性生物炭修复砷镉复合污染土壤研究进展 ..... 吕鹏, 李莲芳, 黄晓雅 (4077)

沼液还田对土壤-作物系统重金属累积的影响:Meta 分析 ..... 赵奇志, 杨志敏, 孔凡靖, 熊海灵, 朱康文, 陈玉成 (4091)

两种铁改性生物炭对微碱性砷镉污染土壤的修复效果 ..... 梁欣冉, 何丹, 郑墨华, 付庆灵, 胡红青, 朱俊 (4100)

秸秆离田对土壤 Cd 生物有效性及水稻 Cd 积累的影响 ..... 王子钰, 周航, 周坤华, 谭文韬, 蒋毅, 唐棋, 伍港繁, 辜娇峰, 曾鹏, 廖柏寒 (4109)

秸秆与脱硫石膏配施改良黄河三角洲盐碱地的理化性质 ..... 赵惠丽, 于金艺, 刘涛, 王丽, 赵英 (4119)

基于环境 DNA 的复合污染土壤生物评价和胁迫诊断 ..... 黄湘云, 钟文军, 刘训杰, 毕婉娟, 钱林皓, 张效伟 (4130)

地质高背景区土壤-玉米重金属综合质量评价 ..... 张传华, 王钟书, 刘力, 刘燕 (4142)

浙江省蔬菜生产系统重金属污染生态健康风险 ..... 张述敏, 刘翠玲, 杨桂玲, 邓美华 (4151)

生物炭配施磷肥对土壤养分、酶活性及紫花苜蓿养分吸收的影响 ..... 刘鑫裕, 王冬梅, 张泽洲, 张鹏, 樊桐桐 (4162)

低密度聚乙烯微塑料对空心菜生长和生理特征的影响 ..... 周颖, 蒋文婷, 刘训悦, 朱高荻, 唐荣贵, 章海波, 蔡廷江 (4170)

沼液施用对麦茬茬口期土壤微生物群落结构特征及功能的影响 ..... 乔宇颖, 奚辉, 李娜, 陈喜靖, 沈阿林, 喻曼 (4179)

大同铅锌尾矿不同污染程度土壤细菌群落分析及生态功能特征 ..... 刘泽勋, 庄家尧, 刘超, 郑康, 陈玲 (4191)

马尾松采伐迹地火烧黑炭对土壤有机碳组分和碳转化酶活性的影响 ..... 姚智, 焦鹏宇, 吴晓生, 严强, 刘先, 胡亚林, 王玉哲 (4201)

《环境科学》征订启事(3648) 《环境科学》征稿简则(3659) 信息(3714, 4150, 4178)

# 城市碳达峰碳中和行动评估方法与应用

张保留, 白梓函, 张楠, 吕连宏\*, 阳平坚\*

(中国环境科学研究院, 北京 100012)

**摘要:** 城市作为温室气体排放的重点单元, 对实现国家碳达峰碳中和目标有着最直接根本的意义. 为评估当前城市碳达峰碳中和表现, 基于考虑决策者偏好的层次分析法, 通过影响因素确定、指标遴选与赋分原则确定和指标赋权等步骤, 开发了一套由3个准则层、7个要素层和14个具体指标层构成的城市碳达峰碳中和行动指数评估指标体系, 形成相对全面科学的综合评估方法, 全面评估城市在实现达峰碳中和目标中的政府态度和能力建设, 在社会经济、能源消费、产业结构和绿色出行等方面的低碳状态及在减排效率与减排趋势上的实际成效. 经对中心城市的评估应用结果发现, 一线经济发达、低碳试点城市达峰中和综合表现更为突出, 北京、深圳、武汉、上海、青岛、广州、成都、厦门、昆明和兰州综合得分均超过60分. 各城市在双碳行动上各具特点, 北京、厦门、宁波、深圳和青岛气候雄心显著, 海口、广州、成都、南宁和北京低碳状态表现较好; 昆明、兰州、洛阳、大庆和吉林等城市减排趋势表现显著. 多数城市仍存在达峰意愿不足, 统计信息披露制度欠缺等问题. 未来可从完善指标体系、更新赋权和形成年度评估机制等方面优化评估方法. 建议地方统筹全国一盘棋上下联动制定双碳工作方案, 完善城市能源与温室气体统计与信息披露制度, 组织有条件地区开展碳达峰试点建设工作.

**关键词:** 碳达峰; 碳中和; 行动表现; 层次分析法; 指数评估; 方法应用

中图分类号: X24 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)07-3649-11 DOI: 10.13227/j.hjkk.202208091

## Evaluation Method and Application for Urban Carbon Peaking & Neutrality Performance

ZHANG Bao-liu, BAI Zi-han, ZHANG Nan, LÜ Lian-hong\*, YANG Ping-jian\*

(Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

**Abstract:** As the key unit of greenhouse gas emission sources, cities have the most direct and fundamental significance to achieve the national carbon peaking carbon neutrality goal. In order to evaluate the current performance of urban carbon peaking and neutrality, a set of urban peaking and carbon neutrality action index evaluation systems consisting of three criterion layers, seven elements, and fourteen specific index layers were developed based on the analytic hierarchy process considering the preferences of decision makers, through the steps of influencing factor determination, indicator selection, and scoring principle determination, as well the indicator weightings. Thus, a relatively comprehensive scientific evaluation method was formed to fully evaluate the attitude of the government towards the goal of carbon peaking and neutrality, the state of social economy, energy consumption, industrial structure, transportation, and other aspects, as well as the actual effect of emission reduction efficiency and trends. Through the central city evaluation application study, it was found that the first-tier economically developed and low-carbon pilot cities had a more outstanding comprehensive performance in reaching the peak and neutrality. The comprehensive scores of Beijing, Shenzhen, Wuhan, Shanghai, Qingdao, Guangzhou, Chengdu, Xiamen, Kunming, and Lanzhou all exceeded 60 points. Beijing, Xiamen, Ningbo, Shenzhen, and Qingdao had significant climate ambitions, whereas Haikou, Guangzhou, Chengdu, Nanning, and Beijing had a better low-carbon status. Kunming, Lanzhou, Luoyang, Daqing, Jilin, and other cities showed significant emission reduction trends. Most cities still had problems such as insufficient willingness to reach the peak and lack of statistical information disclosure system. The evaluation method could be optimized by improving the index system, updating the empowerment, and forming the annual evaluation mechanism next step. It is suggested to formulate the local carbon reduction work plan by coordinating the whole country at different levels, improve the urban energy and greenhouse gas statistics and information disclosure system, and organize the carbon peaking pilot construction in areas where conditions permit.

**Key words:** carbon peaking; carbon neutrality; performance; analytic hierarchy process; index evaluation; method application

2030年前实现碳达峰和2060年前实现碳中和,是党中央经过深思熟虑作出的重大战略决策,也是我国高质量发展的内在要求,体现了我国积极承担国际责任的大国担当精神.作为人类生产生活的主要聚集地,城市是能源消耗和碳排放的主体之一.根据政府间气候变化专门委员会(IPCC)的第五次评估报告(AR5)<sup>[1]</sup>,城市贡献了总能源消费量的67%~76%以及与能源相关二氧化碳排放量的71%~76%.城市是至关重要的政策实施单元和关注对象,其节能减排对全球气候与环境的影响意义重大.评估城市碳达峰碳中和进展,对于推动城市采取充分合理的达峰中和措施,发挥城市作为低碳发展的

核心和主体地位,对于省级层面乃至国家层面的碳达峰碳中和目标实现有着自下而上层层推进的现实意义<sup>[2,3]</sup>,从而助力我国如期实现碳达峰目标起到决定性作用,也是实现我国整体目标的重要前提.

目前国内外有关碳达峰碳中和的评估较少,其中郭芳等<sup>[4]</sup>基于与碳达峰趋势的相关指标对中国286个样本城市进行聚类分析,将其分为几种达峰

收稿日期: 2022-08-10; 修订日期: 2022-10-08

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务专项(2021 YSKY-07); 国家社会科学基金项目(21BJY247)

作者简介: 张保留(1989~),女,硕士,助理研究员,主要研究方向为低碳发展与应对气候变化, E-mail: zblsmile@126.com

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

类型;张立等<sup>[5]</sup>从达峰定义和标准的角度构建了中国城市碳达峰初步评估方法,通过碳排放量检验其是否达峰.项辉<sup>[6]</sup>则对现阶段可采用的达峰评估方法进行了简要概述.与本文有关的碳达峰碳中和的研究多为达峰中和预测与影响因素研究.其中,通过对全国各省域碳达峰影响因素研究发现,碳排放强度的改善对碳达峰时间影响较大,产业结构、政府干预程度和对外开放程度对能否如期实现碳达峰目标影响显著<sup>[7]</sup>.另一研究则将脱钩系数、碳排放强度和达峰趋势作为省域达峰预测影响因素<sup>[8]</sup>.针对中国碳达峰路径选择研究发现,中国技术减排效应较强,能源结构减排效应次之,最后为产业结构减排<sup>[9]</sup>.对中国碳达峰碳中和的情景分析研究中将碳排放函数分解成人口、人均 GDP 和碳强度这 3 个因素,碳峰值出现时间为 3 个因素年增长率之和由正转负的正数值年度;在能源消费总量逐渐回落的前提条件下,2060 年不同情景下的非化石能源占比需提高至 65%~70%<sup>[10]</sup>.对城市和区域的达峰研究发现:人口、人均 GDP 和能源强度对中国超大城市碳排放起到正向促进效应,人口的影响效应最大,其次是能源强度,人均 GDP 影响最小<sup>[11]</sup>.第三产业固定资产投资占比、能源强度、能源结构、环境规制和科技投入强度是影响京津冀碳达峰的因素<sup>[12]</sup>.地区经济发展水平、要素市场一体化、外商直接投资、公共财政收入和科技支出显著影响长三角地区的碳达峰<sup>[13]</sup>.人口规模、城镇化率、人均 GDP、能源强度和产业结构是影响闽三角城市碳达峰的关键因素<sup>[14]</sup>.影响河南省碳达峰的六大关键因素为煤炭消费占比、单位 GDP 能耗、森林覆盖率、能源消费总量、第二产业 GDP 比重和私人汽车拥有量<sup>[15]</sup>.除此之外,还有采用指数评价法开展的绿色低碳发展和应对气候变化评估的研究,包括机构层面发布的:①基于低碳结构、低碳基础和低碳能力构成的指标体系下的 G20 低碳竞争力指数<sup>[16]</sup>;②由低碳经济、绿色经济政策、能源效率、清洁技术创新和 COVID-19 疫情状况及清洁经济复苏构成的加州绿色创新指数<sup>[17]</sup>;③由宏观指标、产业低碳、能源低碳、绿色生活、资源环境和政策创新构成的中国绿色低碳城市建设评价体系<sup>[18]</sup>;④由温室气体排放、可再生能源、能源利用和气候政策构成的“气候变化绩效指数”<sup>[19]</sup>等.学者层面提出的由经济、能源、社会及生活、碳排放及环境、科技、城市交通、固体废弃物和水资源等指标构成的低碳城市评价指标体系<sup>[20~22]</sup>等.

目前碳达峰碳中和评估研究所涉及的指标及因素较为单一,无法定量体现城市达峰中和状况.本研究将构建一套城市碳达峰碳中和行动指数,其指标体

系主要由气候雄心、低碳状态和减排趋势等方面构成.同时,考虑到碳排放影响因素多以人口和 GDP 等为主<sup>[23~27]</sup>,本研究将应用此方法,对全国中心城市在碳达峰碳中和的进展及表现进行综合评估.

## 1 材料与方法

### 1.1 数据来源

本研究数据均来源于官方公开渠道,主要包括中国城市统计年鉴<sup>[28]</sup>、中国城市建设年鉴<sup>[29]</sup>和样本城市统计年鉴等.评估方法应用部分数据获取截至时间为 2021 年 8 月.

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 层次分析法

层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)是一种定性和定量相结合、系统化和层次化的分析方法<sup>[30]</sup>.主要解决由众多因素构成且因素之间相互关联,AHP 建模大体分为 4 个步骤:①建立递阶层次结构模型;②构造各层次中的判断矩阵;③层次单排序及一致性检验;④层次总排序及一致性检验.AHP 是较为复杂且偏于定性化问题的决策和排序提供了一种简洁且实用的建模方法,已广泛应用于环境风险、环境绩效与环境质量评价领域<sup>[31~35]</sup>,近年来对于企业和地方低碳发展评价也有一定应用<sup>[36~39]</sup>.鉴于层次分析法具有将定性和定量相结合,将复杂的问题进行分解的特点<sup>[30]</sup>,本研究采用此方法,结合实现碳达峰碳中和目标的政治和战略高度,考虑决策者偏好,一方面从定性分析角度分层构建指标体系;另一方面对指标进行赋权求解,得出主客观相结合的赋权结果.

#### 1.2.2 标准化处理

在定量指标赋分上对指标进行无量纲化处理.借助线性标准化法<sup>[40,41]</sup>,将正向指标和逆向指标分别按照如下公式进行赋分处理:

$$Z = \frac{y - \min(y)}{\max(y) - \min(y)} \cdot S + A, \\ S + A = 100 \quad (1)$$

$$Z = \frac{\max(y) - y}{\max(y) - \min(y)} \cdot S + A, \\ S + A = 100 \quad (2)$$

式中,  $Z$  为该项指标标准化得分,  $\max(y)$  和  $\min(y)$  分别为定量指标对应数值的上限与下限,  $S$  和  $A$  均为常数,  $S$  与  $A$  之和表示该指标总分,本研究中均采用满分制,即 100.

#### 1.2.3 综合评价法

以城市碳达峰碳中和指数(carbon emissions peak & neutrality index, CPNI)来综合评价城市碳达

峰碳中和行动上的具体表现. 城市达峰中和指数采用百分制, 计算公式:

$$CPNI(t) = \sum_{i=1}^m P_i \omega_i \quad (3)$$

$$P_i = \sum_{j=1}^n F_j \omega_j \quad (4)$$

$$F_j = \sum_{k=1}^q S_k \omega_k \quad (5)$$

式中,  $CPNI(t)$  为目标层碳达峰碳中和评价指数,  $t$  为评价年份;  $m$ 、 $n$  和  $q$  分别为准则层、要素层和具体指标层指标个数,  $P_i$  为准则层第  $i$  个指标的综合评分,  $\omega_i$  为第  $i$  个准则层指标的权重;  $F_j$  为要素层第  $j$  个指标的综合评分,  $\omega_j$  为第  $j$  个要素层指标的权重;  $S_k$  为第  $k$  个具体指标层指标的综合评分;  $\omega_k$  为第  $k$  个具体指标层指标的权重.

## 2 城市碳达峰碳中和行动评估方法构建

本着科学可操、兼顾整体与层次、代表性与动态性和定性定量相结合的原则, 本研究将城市碳达峰碳中和行动评估方法构建流程分为 3 步: 首先, 确定城市碳达峰碳中和行动影响因素. 从政府决策、资源禀赋和当前碳减排趋势角度考虑, 以气候雄心、低碳状态和减排趋势这 3 个方面为准则层尽可能全面地纳入指标. 第二, 遴选形成最终的城市碳达峰碳中和行动评估指标体系, 并确定对应赋分原则. 因可供遴选的指标数量较多, 结合当前城市社会经济统计体系的实际情况以及指标量化赋分的可操作性, 对指标进行适当增补、替代或删减, 在体现全面性、代表性和客观性的同时, 保证数据的可得性和连续性. 第三, 为城市碳达峰碳中和行动评估指标赋权. 根据遴选的最终指标体系进行指标赋权计算, 将赋权结果代入综合评估指数模型.

### 2.1 指标体系构建

基于以上思路, 研究初步考虑尽可能更全面纳入影响指标, 以全面客观反映城市在实现碳达峰碳中和目标中的政府决策、低碳发展状态及中长期减排趋势方面的综合表现. 在气候雄心层面, 从政府决策层面的政策文件、宏观目标制定和能力建设角度出发, 纳入碳达峰碳中和行动计划、碳达峰碳中和目标、能源消费目标、碳汇目标、低碳试点建设和信息公开等制度建设和碳交易市场参与情况; 在低碳状态层面, 从能源消费、社会经济结构、交通运输、低碳出行、低碳建筑和碳汇资源等层面出发, 纳入综合能源消费强度、非化石能源消费占比、二产占比、铁路货运周转量占比、人均公共汽车拥有量、新能源汽车占比、绿色建筑项目占比和森林覆盖率等指标; 在减排趋势层面, 从减排效率和达峰趋势角度出发, 纳入中长期碳排放量增速、碳排放增速与经济增速之间的脱钩指数和达峰趋势检验情况等指标.

结合城市统计数据的可得性和连续性, 研究对初步的指标进行遴选. 鉴于篇幅原因, 此处仅做概况说明, 不一一详述. 比如, 将城市统计系统中缺失度较大的指标剔除, 包括能源目标、碳汇目标, 货运周转量占比、新能源汽车占比、绿色建筑项目占比和森林覆盖率等指标; 将信息渠道存在不完备性和代表性不足指标剔除, 包括碳达峰碳中和行动计划、碳交易市场参与情况. 对于城市统计系统缺失的重要指标, 选取相近指标代替增补. 比如用电力消耗强度代替综合能源消费强度, 以体现能源利用效率情况. 经过层层筛选, 最终构建了一套由 1 个目标层、3 个准则层、7 个要素层和 14 个具体指标层构成的指标体系 (表 1).

表 1 指标体系筛选及指标作用方向

Table 1 Selection of index system and indicator direction

目标层	准则层	要素层	指标层	单位	方向 <sup>1)</sup>
城市碳达峰碳中和行动指数	气候雄心	宏观目标	碳达峰目标	—	+
			碳中和目标	—	+
	能力建设	能源消费	试点示范建设	—	+
			统计核算与披露	—	+
			节能环保投入占比	%	+
	低碳状态	社会经济结构	全社会电力消耗强度	$\text{kW} \cdot \text{h} \cdot (\text{万元})^{-1}$	-
			非化石能源消费占比	%	+
			二产占比	%	-
			人均公共汽(电)车拥有量	$\text{辆} \cdot (\text{万人})^{-1}$	+
	减排趋势	碳排放水平	人均碳排放	$\text{t} \cdot (\text{人})^{-1}$	-
			碳排放强度	$\text{t} \cdot (\text{万元})^{-1}$	-
			碳排放增速	%	-
			脱钩指数	—	-
		达峰趋势	碳达峰趋势检验	—	+

1) “+”表示正向指标,“-”表示负向指标

从指标准则层而言,气候雄心指的是为了实现碳达峰碳中和的政府决心与行动,政府决心以宏观目标设定的角度引入碳达峰碳中和目标制定作为指标层,政府行动从试点示范建设情况、统计核算与披露等内容和节能环保投入占比这3个方面衡量,此部分指标的选择主要出于对政府层面在制度建设和资金投入方面的评估需要.低碳状态指的是城市低碳发展现状,从能源消费情况、社会经济结构和碳排放水平这3个方面考虑,选取全社会电力消耗强度、非化石能源消费占比、二产占比、人均公共汽(电)车拥有量、人均碳排放和碳排放强度等指

标,主要考虑分别从能源和产业层面考量能源的低碳高效利用程度及产业结构的低碳化情况,同时考量交通出行的低碳化程度,以及具有相对可比性的碳排放效率与人均排放水平.减排趋势则指的是结合历史数据判断城市过往碳排放和碳达峰的趋势,对城市所采取措施的减排效果进行衡量,其中包括减排效率和达峰趋势两个要素层指标,前者在指标层包括碳排放增速和脱钩指数,后者则指碳达峰趋势检验,该部分指标的选择主要出于兼顾减排效率与公平的考虑,实现碳排放量与经济发展关联.具体指标涵义、选取意义和赋分原则如见表2.

表2 指标涵义、选取意义和赋分原则

Table 2 Index meaning, selection significance, and assigning principle

指标类型	指标名称	指标涵义/选取意义	赋分原则	
定性指标	碳达峰目标	城市政府所设定的碳达峰目标;用来考量城市在碳达峰行动上的积极性,目标年越近、且在国家达峰中和承诺后明确宣示目标越能彰显气候雄心	以国家2030年碳达峰目标为基准,赋分为20分,目标年每提前1a加8分,每向后推迟1a减4分,尚未明确提出碳达峰目标年的城市不得分	
	碳中和目标	城市政府提出的中和目标;用来考量城市在碳中和行动上的积极性	2040年以前得分100分,2060年得分20分,向前提前1a加4分	
	试点示范建设	城市在低碳试点示范工作上的表现;用来考量各地区开展各领域低碳建设的积极性和表率作用	国家级低碳试点城市计20分,其他涉碳试点类型每项计10分,满分80分,可累计加分至满分	
	统计核算与披露	城市碳排放数据披露与制度建设,以及能源消费数据公开情况;用来考量统计核算与披露的完备性	按碳披露制度以能源消费信息公开的完整性计分.有明确碳披露制度计20分公开全社会全品类能源消费数据得80分,仅公开部分能源数据计40分,未公开不得分	
定量指标	节能环保投入占比	节能环保支出占地区GDP的比例;考量减排资金投入	城市节能环保支出(万元)/GDP(万元)	
	全社会电力消耗强度	全社会单位GDP电力消费量;考量能源利用效率	全社会用电量(亿kW·h)/GDP(亿元)	
	非化石能源消费占比	非化石能源消费占能源消费总量的比例;考量城市能源消费结构的低碳程度	非化石能源消费(t,以标煤计)/能源消费总量(t,以标煤计)	
	二产占比	第二产业产值占经济总产值的比例;考量城市产业结构的低碳程度	第二产业产值(万元)/GDP(万元)	
	人均公共汽(电)车拥有量	常驻人口人均拥有公共车辆数量;考量低碳出行程度	公共汽车运营车数(辆)/常住人口(万人)	线性标准法赋分,具体参照公式(1)和公式(2)
	人均碳排放	城市单位常住人口年碳排放量;考量人均碳排放水平	碳排放量(万t)/常住人口(万人)	
	碳排放强度	城市单位GDP产生的碳排放量;考量碳排放效率	碳排放量(万t)/GDP(万元)	
	碳排放增速	碳排放量年均增速;考量城市中长期碳排放变化情况	$\left(\frac{\text{期末碳排放量}}{\text{期初碳排放量}}\right)^{\frac{1}{\text{期末与期初间隔年数}}} - 1$	
	脱钩指数	反映城市碳排放量年均变化率/地区GDP年均变化率;考量城市的碳减排效率	见表3	
	碳达峰趋势检验	采用条件函数判断+MK检验法 <sup>[42,43]</sup> 确定各城市碳排放趋势;考量城市历史年份碳排放达峰趋势情况	碳排放未出现峰值的不得分,出现峰值后年数小于5a的得分计20分.对于出现峰值且峰值后年数满5年的,对峰值年后的碳排放数据进行MK检验,其中Z≥0的,即碳排放处于平台期,得分计40分;Z<0但下降趋势不显著的计50分;Z<0且在0.1显著水平下计60分,在0.05水平显著的计80分,在0.01水平显著的计100分	

其中,脱钩指数在 Tapio 脱钩模型基础上,根据 不同脱钩类型的程度进行赋分(见表 3)。

表 3 Tapio 脱钩脱钩指数与赋分原则

Table 3 Tapio decoupling index and its scoring method

脱钩类型		$\Delta\text{CO}_2$	$\Delta\text{GDP}$	脱钩指数	赋分原则(区间内标准化赋分)
连接	衰退连接	<0	<0	(0.8, 1.2)	0 (城市 GDP 呈现负增长,不予赋分,下同)
	增长连接	>0	>0	(0.8, 1.2)	[20, 39], 系数越大,分值越小
脱钩	衰退脱钩	<0	<0	(1.2, +∞)	[40, 60], 系数越大,分值越大
	强脱钩	<0	>0	(-∞, 0)	[80, 100], 系数越大,分值越小
	弱脱钩	>0	>0	(0, 0.8)	[60, 79], 系数越大,分值越小
负脱钩	弱负脱钩	<0	<0	(0, 0.8)	0
	强负脱钩	>0	<0	(-∞, 0)	0
	增长负脱钩	>0	>0	(1.2, +∞)	[0, 19], 系数越大,分值越小

## 2.2 指标赋权结果

### 2.2.1 判断矩阵构建

经 AHP 建模及判断矩阵一致性检验<sup>[44,45]</sup>,结合决策者偏好与专家打分法,对准则层、要素层和指标层中,同层因素按照构造的判断矩阵进行两两比较.在对  $n$  个子要素  $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$  成对比较时,  $a_{ij}$  表示子因素  $i$  与子因素  $j$  对母因素的重要程度之比,通过数字进行重要程度标识后进行一致性检验与调整。

以准则层为例,气候雄心用以描述城市在宏观目标设立和碳达峰能力建设方面的努力,低碳状态表示目前该城市在碳达峰达成方面当前基础,而减排趋势则通过对城市碳排放变化率、脱钩类型和数学趋势判断对其在碳达峰方面的趋势加以界定;本文认为低碳状态是城市的现状与后续减排的基础,略重要于其余二者;而气候雄心与减排趋势,前者是城市在碳达峰碳减排方面对未来做出的承诺、后者是通过过去历史数据所总结的趋势,从决策者的偏好层面来讲,目前基本同等重要.因而准则层形成判断矩阵如表 4 所示,通过一致性检验。

表 4 准则层判断矩阵

Table 4 Criterion layer judgment matrix

准则层指标	气候雄心	低碳状态	减排趋势
气候雄心	1	3/4	1
低碳状态	4/3	1	4/3
减排趋势	1	4/3	1

### 2.2.2 指标权重计算

假设,  $A > 0$ . 各因素对于  $A$  的相对排序权重为  $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m$ , 采用幂法计算如下。

(1) 任意取初始正向量:

$$\mathbf{X}^{(0)} = (x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_m^{(0)})^T,$$

$$m_0 = \|\mathbf{X}^{(0)}\|_{\infty} = \max\{x_i^{(0)}\} \quad (6)$$

$$\mathbf{Y}^{(0)} = \mathbf{X}^{(0)}/m_0 \quad (7)$$

(2) 迭代计算:

对于  $k=0, 1, 2, \dots$ , 计算。

$$\mathbf{X}^{(k+1)} = \mathbf{A}\mathbf{Y}^{(k)} \quad (8)$$

$$m_{k+1} = \|\mathbf{X}^{(k+1)}\|_{\infty} = \max\{x_i^{(k+1)}\} \quad (9)$$

$$\mathbf{Y}^{(k+1)} = \mathbf{X}^{(k+1)}/m_{k+1} \quad (10)$$

(3) 精度检查:

当  $|m_{k+1} - m_k| < \varepsilon$ , 转入步骤(4); 否则, 令  $k = k + 1$ , 转入步骤(2). 本文设定  $\varepsilon = 0.0001$ .

(4) 求最大特征值和对应的特征向量:

将  $\mathbf{Y}^{(k+1)}$  归一化, 即:

$$\mathbf{W} = \mathbf{Y}^{(k+1)} / \sum_{i=1}^m y_i^{(k+1)} \quad (11)$$

$$\lambda_{\max} = m_{k+1} \quad (12)$$

由此得到本研究各层次各指标综合权重(见表 5)。

## 3 中心城市评估应用

考虑到碳排放的重要影响因素主要包括经济发展水平和人口规模等因素, 本研究将针对全国中心城市开展碳达峰碳中和行动评估应用, 对在一定区域内和全国社会经济活动中处于重要地位、具有综合功能或多种主导功能、起着枢纽作用的大城市和特大城市的碳达峰碳中和进程进行评估, 以客观量化呈现具有经济领先地位城市的达峰中和表现, 发挥领跑城市带头作用, 鼓励其他城市推进碳达峰碳中和行动. 考虑到已公开城市中地区 GDP 总量低于 1 000 万元的城市仅占 1/4, 本研究剔除地区 GDP 总量在 1 000 万元或人均 GDP 在 8 000 美元以下以及不具备数据基础的部分城市, 最终对 58 个城市进行评估。

指标得分计算时间与范围方面, 定性指标均采用截至 2021 年 8 月的情况计算得分, 定量指标中除碳排放增速、碳达峰趋势采用 2005 ~ 2019 年序列数据计算, 脱钩指数采用 2015 ~ 2019 年序列数据计算外, 其余指标均采用 2019 年数据计算得分. 评估样本及评估结果见图 1, 其中图 1(a) 以准则层指标计总分构成, 图 1(b) 以要素层指标计总分构成, 以更细化展示各城市在不同指标层面的评分状况。

表 5 城市碳达峰碳中和行动指标权重计算

Table 5 Carbon emissions peak and neutrality index weighing results

准则层	权重	要素层	权重	指标层	权重
气候雄心	0.300	宏观目标	0.180	碳达峰目标	0.162
				碳中和目标	0.018
		能力建设	0.120	试点示范建设	0.048
				统计核算与披露	0.048
				节能环保投入	0.024
低碳状态	0.400	能源消费	0.120	全社会电力消耗强度	0.036
				非化石能源消费占比	0.084
		社会经济结构	0.120	二产占比	0.108
				人均公共汽(电)车拥有量	0.012
				人均碳排放	0.064
碳排放水平	0.160	碳排放强度	0.096		
		碳排放增速	0.144		
		脱钩指数	0.096		
减排趋势	0.300	减排效率	0.240	碳达峰趋势检验	0.060
		达峰趋势	0.060		

本研究结果发现,从综合得分上来看,得分排名前 10 的城市分别为:北京、深圳、武汉、上海、青岛、广州、成都、厦门、昆明和兰州,得分均超过 60 分,其中北京、深圳得分超过 70 分。北京在气候雄心、低碳状态上表现突出,深圳则在低碳状态和减排趋势上表现较好。大部分城市在 30~50 分之间,平均得分为 49.5。低于 30 分的城市有唐山、九江和银川,其中除了唐山 3 项指标表现均不足外,九江主要因为气候雄心和减排趋势不足,银川则因为低碳状态表现欠佳。

分指标来讲,在气候雄心上,北京、厦门、宁波、深圳和青岛表现最为突出,其中北京已经宣布达峰,且设定 2050 年实现碳中和的目标。值得注意的是,上海、苏州、济南、武汉再次明确了碳达峰目标年,其中武汉在 2022 年外,其余均在 2025 年,更多的城市尚未制定达峰目标,达峰意愿尚未明确;除北京、天津、上海和重庆这 4 个直辖市外,其余城市能源信息披露尚存在不完备、不及时等能力建设问题。在低碳状态上,海口、广州、成都、南宁和北京表现更为突出,主要得益于其本身较为优越的产业结构与能源结构。在减排趋势上,昆明、兰州、洛阳、大庆和吉林等城市表现突出,除了大庆可能因经济衰退原因导致减排强度较大,更多城市主要源于为满足国家生态文明建设大背景下的可持续发展需求,在产业与能源转型中取得实效。

总体而言,碳达峰碳中和表现较为突出的领跑城市多为经济发达和规模较大的低碳试点城市,本身具备一定的资源、技术和产业政策上的优势。表现相对落后的城市本身存在制度上和资源禀赋上的表现劣势,但在减排趋势上表现较为突出,仍有进步空间,也还需进一步加强绿色低碳发展。评价所呈现

的经济越发达,达峰中和工作越领先的状态,在一定程度上与当前经济相对较发达国家绿色低碳发展程度较高的表现一致,也与我国建立健全绿色低碳发展经济体系重大战略决策,最终实现高质量发展目标一脉相承。

#### 4 展望与建议

未来可继续完善城市碳达峰碳中和行动评估方法,主要包括以下 3 个方面。

一是完善指标体系:①能源消费指标。补充全社会综合能耗强度、工业能耗强度等指标,更为全面地评估城市的综合能耗和高碳行业耗能状况;②行业领域指标。补充交通运输、建筑领域相关指标,如铁路(水运)货运周转量占比,建筑能耗等指标,形成全面涵盖电力、工业、交通、建筑四大领域的指标体系;③碳汇指标,补充森林覆盖率等指标,从碳汇端评估城市达峰中和行动表现等;进一步提升评估指标的科学性和代表性。

二是完善指标赋权:结合一定的决策者偏好和客观发展形势调整指标权重,以满足评价需求。比如当前处于达峰中和目标初期阶段,会将制定目标年份的权重提高,随着时间推移,该项权重会视情况降低。

三是形成年度评估机制:在不断完善指标体系和指标赋权的基础上形成年度评估机制,通过定期更新各指标的年度表现,有利于政府及时掌握城市碳达峰碳中和进展,支撑政府决策助力实现碳达峰碳中和目标。

另外,针对城市碳达峰碳中和评估方法应用结果提出以下建议。

一是建议各省在落实统筹“全国一盘棋”实施

国家“双碳”战略上,应充分识别城市的优势和短板,特别是重点关注那些非自然禀赋因素导致的低分指标项,抓住主要矛盾,针对性地采取扬长补短措

施,因地制宜制定符合实际情况和发展阶段的“双碳”行动目标和方案.

二是建议地方构建并完善统一的城市能源、温



图 1 中心城市碳达峰碳中和指数得分及排名情况

Fig. 1 Carbon emissions peak and neutrality index score and ranking of central cities

续图 1



室气体统计与信息披露制度,提升碳排放计量与实测能力. 弥补当前数据尚不完备,数据口径不一的不足,建立完善的信息统计披露体系有利于掌握碳排放状态及趋势,全面有效支撑下一步降碳工作开展.

三是建议开展城市“双碳”领跑者行动,推动具备条件地区、行业和企业率先达峰. 树立能源、工业、建筑、交通等领域低碳转型模范,形成城市间先进带后进、你追我赶落实绿色低碳转型局面,通

过“赛马机制”创新落实中央“鼓励主动作为、率先达峰”的指示精神。

## 5 结论

(1) 本研究为全面评估城市在实现碳达峰碳中和目标上的综合表现, 基于决策者偏好的层次分析法构建了一套由 3 个准则层、7 个要素层和 14 个具体指标层构成的城市碳达峰碳中和行动指数评估指标体系, 并为指标赋权, 进而建立综合指数评估方法。主要步骤为: ①从气候雄心、低碳状态和减排趋势 3 个方面, 确定城市碳达峰碳中和行动影响因素, 初步尽可能全面地纳入较多指标。②结合当前城市社会经济统计体系的实际情况以及指标量化赋分的可操作性, 遴选形成最终的城市碳达峰碳中和行动评估指标, 并确定对应赋分原则。③为城市碳达峰碳中和行动评估指标赋权, 代入城市碳达峰碳中和行动综合评估指数模型, 形成城市碳达峰碳中和行动评估方法。

(2) 本研究将评估方法应用于在经济发展和人口规模上表现处于全国重要地位的国家中心城市的碳达峰碳中和行动评估, 结果发现经济发达大城市在碳达峰碳中和行动中同样处于领跑地位, 北京、深圳排名最高, 得分超过 70 分。北京在气候雄心、低碳状态上表现突出, 深圳则在低碳状态和减排趋势上表现较好。表现较为落后的城市部分因资源禀赋等先天劣势导致低碳状态不足, 比如唐山, 作为重工业型城市在低碳发展方面所面临的结构性阻碍。更多城市得分较低的原因在于能力建设或雄心不足, 比如在全社会全品类能源消费数据信息公开上存在较大欠缺。

### 参考文献:

- [ 1 ] Intergovernmental Panel on Climate Change. The fifth assessment report of the IPCC [R]. Geneva: IPCC, 2014.
- [ 2 ] 庄贵阳, 魏鸣昕. 城市引领碳达峰、碳中和的理论和路径 [J]. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(9): 114-121.  
Zhuang G Y, Wei M X. Theory and pathway of city leadership in emission peak and carbon neutrality [J]. China Population, Resources and Environment, 2021, 31(9): 114-121.
- [ 3 ] 何宇, 田杰鑫, 陈珍珍. 碳中和背景下中国城市绿色发展效率研究 [J]. 生态经济, 2022, 38(7): 92-98.  
He Y, Tian J X, Chen Z Z. Research on the green development efficiency of Chinese cities under the background of carbon neutrality [J]. Ecological Economy, 2022, 38(7): 92-98.
- [ 4 ] 郭芳, 王灿, 张诗卉. 中国城市碳达峰趋势的聚类分析 [J]. 中国环境管理, 2021, 13(1): 40-48.  
Guo F, Wang C, Zhang S H. Cluster analysis of carbon emissions peaking trends in Chinese cities [J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2021, 13(1): 40-48.
- [ 5 ] 张立, 谢紫璇, 曹丽斌, 等. 中国城市碳达峰评估方法初探 [J]. 环境工程, 2020, 38(11): 1-5, 43.  
Zhang L, Xie Z X, Cao L B, et al. Discussion on evaluation method on carbon dioxide emissions peaking for Chinese cities [J]. Environmental Engineering, 2020, 38(11): 1-5, 43.
- [ 6 ] 项辉. 现阶段城市碳达峰评估方法研究 [J]. 内蒙古煤炭经济, 2021, (11): 17-18.
- [ 7 ] 蒋昀辰, 钟苏娟, 王逸, 等. 全国各省域碳达峰时空特征及影响因素 [J]. 自然资源学报, 2022, 37(5): 1289-1302.  
Jiang Y C, Zhong S J, Wang Y, et al. Spatio-temporal characteristics and influencing factors of carbon emission peak by province of China [J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(5): 1289-1302.
- [ 8 ] 王怡. 中国省域二氧化碳排放达峰情景预测及实现路径研究 [J]. 科学决策, 2022, (1): 95-105.  
Wang Y. Research on carbon dioxide emissions peaking scenario prediction and realization path in Chinese provinces [J]. Scientific Decision-Making, 2022, (1): 95-105.
- [ 9 ] 黄超, 娄华. 规模、结构和技术视角下中国碳达峰路径选择研究 [J]. 环境科学与技术, 2022, 45(3): 10-20.  
Huang C, Lou H. Selection of pathway to peak carbon emission from perspective of scale, structure and technology in China [J]. Environmental Science & Technology, 2022, 45(3): 10-20.
- [ 10 ] 唐志鹏, 于浩杰, 陈明星, 等. 基于函数极值条件下的中国碳达峰碳中和情景分析 [J]. 自然资源学报, 2022, 37(5): 1247-1260.  
Tang Z P, Yu H J, Chen M X, et al. The scenario analysis of China's carbon emission peak and carbon neutrality based on extremum condition of function [J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(5): 1247-1260.
- [ 11 ] 王勇, 许子易, 张亚新. 中国超大城市碳排放达峰的影响因素及组合情景预测——基于门限-STIRPAT 模型的研究 [J]. 环境科学学报, 2019, 39(12): 4284-4292.  
Wang Y, Xu Z Y, Zhang Y X. Influencing factors and combined scenario prediction of carbon emission peaks in megacities in China: based on Threshold-Stirpat Model [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, 39(12): 4284-4292.
- [ 12 ] 韩楠, 罗新宇. 多情景视角下京津冀碳排放达峰预测与减排潜力 [J]. 自然资源学报, 2022, 37(5): 1277-1288.  
Han N, Luo X Y. Carbon emission peak prediction and reduction potential in Beijing-Tianjin-Hebei region from the perspective of multiple scenarios [J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(5): 1277-1288.
- [ 13 ] 晏清, 贺超飞, 郭焕修. 基于区域一体化的长三角城市碳达峰实证研究 [J]. 世界经济与政治论坛, 2022, (3): 150-172.
- [ 14 ] 侯丽朋, 唐立娜, 王琳, 等. 闽三角城市群碳达峰的多情景模拟分析 [J]. 生态学报, 2022, 42(23): 9511-9524.  
Hou L P, Tang L N, Wang L, et al. Multi scenario stimulation of carbon emissions peaking in the Golden Triangle of Southern Fujian Province, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(23): 9511-9524.
- [ 15 ] 赵金辉, 李景顺, 王潘乐, 等. 基于 Lasso-BP 神经网络模型的河南省碳达峰路径研究 [J]. 环境工程, 2023, 40(12): 151-156, 164.  
Zhao J H, Li J S, Wang P L, et al. A study of carbon peak paths in Henan province based on Lasso regression-BP neural network model [J]. Environmental Engineering, 2023, 40(12): 151-156, 164.
- [ 16 ] The Climate Institute and E3G. G20 low carbon competitiveness [R]. Australia: Vivid Economics, 2009.
- [ 17 ] Noel P, Kredell C, Perry M, et al. 2020 California green innovation index (12 Edition) [R]. USA: Next 10, 2021.
- [ 18 ] 中国社会科学院城市发展与环境研究所, 哈尔滨工业大学

- (深圳)气候变化与低碳经济研究中心. 中国绿色低碳城市评价研究报告[R]. 深圳: 中国社会科学院城市发展与环境研究所, 哈尔滨工业大学(深圳)气候变化与低碳经济研究中心, 2019.
- [19] Burck J, Hagen U, Bals C, *et al.* Climate change performance index[R]. Germany: Germanwatch, 2021.
- [20] 朱婧, 刘学敏, 张昱. 中国低碳城市建设评价指标体系构建[J]. 生态经济, 2017, **33**(12): 52-56.  
Zhu J, Liu X M, Zhang Y. Research on the evaluation index system for low carbon city construction in China[J]. Ecological Economy, 2017, **33**(12): 52-56.
- [21] Tan S T, Yang J, Yan J Y, *et al.* A holistic low carbon city indicator framework for sustainable development[J]. Applied Energy, 2017, **185**: 1919-1930.
- [22] Zhang L P, Zhou P. A non-compensatory composite indicator approach to assessing low-carbon performance[J]. European Journal of Operational Research, 2018, **270**(1): 352-361.
- [23] 韦彦汀, 李思佳, 张华. 成渝城市群的碳排放时空演变特征及其影响因素分析[J]. 中国环境科学, 2022, **42**(10): 4807-4816.  
Wei Y T, Li S J, Zhang H. Temporal-spatial evolution of carbon emission and driving factors in the Chengdu-Chongqing urban agglomeration[J]. China Environmental Science, 2022, **42**(10): 4807-4816.
- [24] 徐英启, 程钰, 王晶晶, 等. 中国低碳试点城市碳排放效率时空演变与影响因素[J]. 自然资源学报, 2022, **37**(5): 1261-1276.  
Xu Y Q, Cheng Y, Wang J J, *et al.* Spatio-temporal evolution and influencing factors of carbon emission efficiency in low carbon city of China[J]. Journal of Natural Resources, 2022, **37**(5): 1261-1276.
- [25] 唐赛, 付杰文, 武俊丽. 中国典型城市碳排放影响因素分析[J]. 统计与决策, 2021, **37**(23): 59-63.
- [26] 吴健生, 晋雪茹, 王晗, 等. 中国碳排放及影响因素的市域尺度分析[J]. 环境科学, 2023, **44**(5): 2974-2982.  
Wu J S, Jin X R, Wang H, *et al.* Analysis of carbon emissions and influencing factors in China based on city scale[J]. Environmental Science, 2023, **44**(5): 2974-2982.
- [27] Zhang N, Lv L H, Zhao M X, *et al.* A comparative study of stage characteristics and factorial decomposition of CO<sub>2</sub> emissions between China and the USA[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, **29**(32): 48769-48783.
- [28] 国家统计局城市社会经济调查司. 中国城市统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
- [29] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 中国城乡建设统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社有限公司, 2021.
- [30] 郭金玉, 张忠彬, 孙庆云. 层次分析法的研究与应用[J]. 中国安全科学学报, 2008, **18**(5): 148-153.  
Guo J Y, Zhang Z B, Sun Q Y. Study and applications of analytic hierarchy process[J]. China Safety Science Journal, 2008, **18**(5): 148-153.
- [31] 李艳萍, 乔琦, 柴发合, 等. 基于层次分析法的工业园区环境风险评价指标权重分析[J]. 环境科学研究, 2014, **27**(3): 334-340.  
Li Y P, Qiao Q, Chai F H, *et al.* Study on environmental risk assessment index weight of industrial park based on the analytic hierarchy process[J]. Research of Environmental Sciences, 2014, **27**(3): 334-340.
- [32] 俞雅乖, 刘玲燕. 基于层次分析法的水环境绩效审计评价指标体系研究[J]. 科技与管理, 2015, **17**(1): 45-51.  
Yu Y G, Liu L Y. Analysis on performance evaluation index system of water environment auditing based on analytic hierarchy process[J]. Science-Technology and Management, 2015, **17**(1): 45-51.
- [33] 李帅, 魏虹, 倪细炉, 等. 基于层次分析法和熵权法的宁夏城市人居环境质量评价[J]. 应用生态学报, 2014, **25**(9): 2700-2708.  
Li S, Wei H, Ni X L, *et al.* Evaluation of urban human settlement quality in Ningxia based on AHP and the entropy method[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, **25**(9): 2700-2708.
- [34] 李崧, 邱微, 赵庆良, 等. 层次分析法应用于黑龙江省生态环境质量评价研究[J]. 环境科学, 2006, **27**(5): 1031-1034.  
Li S, Qiu W, Zhao Q L, *et al.* Applying analytical hierarchy process to assess eco-environment quality of Heilongjiang province[J]. Environmental Science, 2006, **27**(5): 1031-1034.
- [35] 于宗绪, 马东春, 范秀娟, 等. 基于 AHP 法和模糊综合评价法的城市水环境治理 PPP 项目绩效评价研究[J]. 生态经济, 2020, **36**(10): 190-194.  
Yu Z X, Ma D C, Fan X J, *et al.* Research on the performance evaluation of PPP project of urban water environment treatment based on AHP and fuzzy comprehensive evaluation[J]. Ecological Economy, 2020, **36**(10): 190-194.
- [36] 杨磊, 任健. 基于层次分析法的燃煤发电企业低碳综合评价[J]. 发电技术, 2019, **40**(1): 66-70.  
Yang L, Ren J. Low carbon comprehensive evaluation of coal-fired power plants based on analytic hierarchy process[J]. Power Generation Technology, 2019, **40**(1): 66-70.
- [37] 朱保昌, 马豆豆, 胡淑恒, 等. 基于层次分析法的区域低碳城市发展评价研究——以安徽省为例[J]. 环境科学与管理, 2018, **43**(10): 34-39.  
Zhu B C, Ma D D, Hu S H, *et al.* Evaluation of regional development of low-carbon city in Anhui province based on analytic hierarchy process[J]. Environmental Science and Management, 2018, **43**(10): 34-39.
- [38] 唐笑飞, 鲁春霞, 安凯. 中国省域尺度低碳经济发展综合水平评价[J]. 资源科学, 2011, **33**(4): 612-619.  
Tang X F, Lu C X, An K. Development levels of low-carbon economy at provincial scales in China[J]. Resources Science, 2011, **33**(4): 612-619.
- [39] 郑伟, 宋春燕, 张璐, 等. 我国上市公司碳信息披露评价研究——基于层次分析法和熵权法综合模型[J]. 财务研究, 2017, (6): 53-61.  
Zheng W, Song C Y, Zhang L, *et al.* Evaluation of carbon information disclosure of listed companies in China—based on analytic hierarchy process and entropy weighting method[J]. Finance Research, 2017, (6): 53-61.
- [40] 张立坤, 李令军, 姜磊, 等. 北京建筑施工裸地时空变化及扬尘污染排放[J]. 环境科学, 2019, **40**(1): 135-142.  
Zhang L K, Li L J, Jiang L, *et al.* Spatial and temporal distribution characteristics and fugitive dust emission of building sites in Beijing[J]. Environmental Science, 2019, **40**(1): 135-142.
- [41] 孙红卫, 吕春燕, 祁爱琴, 等. 综合评价中数据标准化的原理研究[J]. 中国卫生统计, 2015, **32**(2): 342-344, 349.
- [42] 张楠, 张保留, 吕连宏, 等. 碳达峰国家达峰特征与启示[J]. 中国环境科学, 2022, **42**(4): 1912-1921.
- [43] Zhang N, Zhang B L, Lü L H, *et al.* Peaking characteristics and enlightenment based on carbon peak countries[J]. China Environmental Science, 2022, **42**(4): 1912-1921.
- [43] 张建云, 刘九夫, 金君良, 等. 青藏高原水资源演变与趋势

- 分析[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(11): 1264-1273.  
Zhang J Y, Liu J F, Jin J L, *et al.* Evolution and trend of water resources in Qinghai-Tibet Plateau [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(11): 1264-1273.
- [44] 刘豹, 许树柏, 赵焕臣, 等. 层次分析法—规划决策的工具[J]. 系统工程, 1984, (2): 23-30.
- [45] 邓雪, 李家铭, 曾浩健, 等. 层次分析法权重计算方法分析及其应用研究[J]. 数学的实践与认识, 2012, 42(7): 93-100.  
Deng X, Li J M, Zeng H J, *et al.* Research on computation methods of AHP Wight vector and its applications [J]. Mathematics in Practice and Theory, 2012, 42(7): 93-100.

## 《环境科学》征稿简则

1. 来稿报道成果要有创新性, 论点明确, 文字精炼, 数据可靠. 全文不超过8 000字(含图、表、中英文摘要及参考文献). 国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目、国际合作项目或其它项目请在来稿中注明(在首页以脚注表示). 作者投稿时请先登陆我刊网站([www.hjcx.ac.cn](http://www.hjcx.ac.cn))进行注册, 注册完毕后以作者身份登录, 按照页面给出的提示信息投稿即可.

2. 稿件请按 GB 7713-87《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》中学术论文的规范撰写. 论文各部分的排列顺序为: 题目; 作者姓名; 作者工作单位、地址、邮政编码; 中文摘要; 关键词; 中图分类号; 英文题目; 作者姓名及单位的英译名; 英文摘要; 关键词; 正文; 致谢; 参考文献.

3. 论文题目应简练并准确反映论文内容, 一般不超过 20 字, 少用副标题.

4. 中文摘要不少于 300 字, 以第三人称写. 摘要内容包括研究工作的目的、方法、结果(包括主要数据)和结论, 重点是结果和结论. 英文摘要与中文对应, 注意人称、时态和语言习惯, 以便准确表达内容.

5. 前言包括国内外前人相关工作(引文即可)和本工作的目的、特点和意义等. 科普知识不必赘述.

6. 文中图表应力求精简, 同一内容不得用图表重复表达, 要有中英文对照题目. 图应大小一致, 曲线粗于图框, 图中所有字母、文字字号大小要统一. 表用三线表. 图表中术语、符号、单位等应与正文一致.

7. 计量单位使用《中华人民共和国法定计量单位》(SI). 论文中物理计量单位用字母符号表示, 如 mg(毫克), m(米), h(小时)等. 科技名词术语用国内通用写法, 作者译的新名词术语, 文中第一次出现时需注明原文.

8. 文中各级标题采用 1, 1.1, 1.1.1 的形式, 左起顶格书写, 3 级以下标题可用(1), (2)……表示, 后缩 2 格书写.

9. 文中外文字母、符号应标明其大小写, 正斜体. 生物的拉丁学名为斜体. 缩略语首次出现时应给出中文全称, 括号内给出英文全称和缩略语.

10. 未公开发表资料不列入参考文献, 可在出现页以脚注表示. 文献按文中出现的先后次序编排. 常见文献书写格式为:

期刊: 作者(外文也要姓名列名前). 论文名[J]. 期刊名, 年, 卷(期): 起页-止页.

图书: 作者. 书名[M]. 出版地: 出版社, 年. 起页-止页.

会议文集: 作者. 论文名[A]. 见(In): 编者. 文集名[C]. 出版地: 出版社(单位), 年. 起页-止页.

学位论文: 作者. 论文名[D]. 保存地: 保存单位, 年份.

报告: 作者. 论文名[R]. 出版地: 出版单位, 出版年.

专利: 专利所有者. 专利题名[P]. 专利国别: 专利号, 出版日期.

11. 来稿文责自负, 切勿一稿多投. 编辑对来稿可作文字上和编辑技术上的修改和删节. 在 3 个月内未收到本刊选用通知, 可来电询问.

12. 投稿请附作者单位详细地址, 邮编, 电话号码, 电子邮箱等. 编辑部邮政地址: 北京市 2871 信箱; 邮编: 100085; 电话: 010-62941102; E-mail: [hjcx@rcees.ac.cn](mailto:hjcx@rcees.ac.cn); 网址: [www.hjcx.ac.cn](http://www.hjcx.ac.cn)

## CONTENTS

Assessing the Environmental and Health Co-benefits of Accelerated Energy Transition and Industrial Restructuring: A Case Study of the BTHS Region .....	YANG Xi, SUN Yi-sheng, CHANG Shi-yan, <i>et al.</i> (3627)
Synergistic Paths of Reduced Pollution and Carbon Emissions Based on Different Power Demands in China .....	XIANG Meng-yu, WANG Shen, LÜ Lian-hong, <i>et al.</i> (3637)
Evaluation Method and Application for Urban Carbon Peaking & Neutrality Performance .....	ZHANG Bao-liu, BAI Zi-han, ZHANG Nan, <i>et al.</i> (3649)
Revealing Driving Factors of Urban O <sub>3</sub> Based on Explainable Machine Learning .....	DONG Jia-qi, HU Dong-mei, YAN Yu-long, <i>et al.</i> (3660)
Sensitivity Analysis of Ozone Formation Using Response Surface Methodology .....	ZHU Yu-huan, CHEN Bing, ZHANG Ya-ru, <i>et al.</i> (3669)
Analysis of O <sub>3</sub> Sources in Yulin City in Summer Based on WRF-CMAQ/ISAM Model .....	WANG Yi-fan, TONG Ji-long, CHEN Yu-xiang, <i>et al.</i> (3676)
Atmospheric Ozone Concentration Prediction in Nanjing Based on LightGBM .....	ZHU Jia-ying, AN Jun-lin, FENG Yue-zheng, <i>et al.</i> (3685)
Meteorological Formation Mechanisms and Potential Sources of an Ozone Pollution Process in Winter of 2022 in Guangdong Province .....	LI Ting-yuan, CHEN Jing-yang, GONG Yu, <i>et al.</i> (3695)
Impact of Summer Tropospheric Ozone Radiative Forcing on Meteorology and Air Quality in North China .....	DU Nan, CHEN Lei, LIAO Hong, <i>et al.</i> (3705)
Identification of Impacts from Meteorology and Local and Transported Photochemical Generation on Ozone Trends in Changsha from 2018 to 2020 .....	YANG Jun, YANG Lei-feng, DING Hua, <i>et al.</i> (3715)
Spatio-temporal Variation and Multi-dimensional Detection of Driving Mechanism of PM <sub>2.5</sub> Concentration in the Chengdu-Chongqing Urban Agglomeration from 2000 to 2021 .....	XU Yong, GUO Zhen-dong, ZHENG Zhi-wei, <i>et al.</i> (3724)
Estimation of PM <sub>2.5</sub> Hourly Concentration in Sichuan Province Based on GTWR-XGBoost Model .....	WU Di, DU Ning, WANG Li, <i>et al.</i> (3738)
Transmission and Growth Characteristics of Severe PM <sub>2.5</sub> Pollution Events from 2013 to 2021 in Xingtai, Hebei .....	JIANG Qi, SHENG Li, JIN Yu-chen, <i>et al.</i> (3749)
Chemical Characteristics and Source Apportionment of Organic Aerosols in Urban Shanghai During Cold Season Based on High Time-resolution Measurements of Organic Molecular Markers .....	ZHU Shu-hui (3760)
Emission Factors of Carbonaceous Aerosol and Stable Carbon Isotope for In-use Vehicles .....	YU Ming-yuan, WANG Qian, FU Ming-liang, <i>et al.</i> (3771)
Composition Characteristics of Volatile Organic Compounds and Associated Contributions to Secondary Pollution in Shenyang Industrial Area in Summer .....	GUAN Lu, SU Cong-cong, KU Ying-ying, <i>et al.</i> (3779)
Characteristics of VOCs and Assessment of Emission Reduction Effect During the Epidemic Lockdown Period in Shenzhen Urban Area .....	YUN Long, LIN Chu-xiong, LI Cheng-liu, <i>et al.</i> (3788)
Characteristics of Organic Matter Composition and Oxidation Potential in Road Dust in Winter in Xi'an .....	WANG Qing-wen, CHEN Qing-cai, WANG Chao, <i>et al.</i> (3797)
Contamination Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Compounds in Surface Dust of Suntuan Mining Area in Huaibei .....	XU Zhen-peng, QIAN Ya-hui, HONG Xiu-ping, <i>et al.</i> (3809)
Spatio-temporal Variation in Water Quality and Its Response to Precipitation and Land Use in Baiyangdian Lake in the Early Stage of the Construction of Xiong'an New Area .....	WANG Zi-ming, YANG Li-hu, SONG Xian-fang (3820)
Simulation of Pollution Apportionment and Optimization of Control Methods in Watershed Scale: A Case Study of the Shun'an Watershed in Tongling City .....	LIU Guo-wangchen, CHEN Lei, LI Jia-qi, <i>et al.</i> (3835)
Evaluation of Shallow Groundwater Quality and Optimization of Monitoring Indicators in Nanchang .....	ZHENG Zi-yin, CHU Xiao-dong, XU Jin-ying, <i>et al.</i> (3846)
Hydrogen and Oxygen Isotopic Characteristics and Influencing Factors of "Three Waters" in Shandian River Basin .....	YANG Li-na, JIA De-bin, GAO Rui-zhong, <i>et al.</i> (3855)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Abundant and Rare Planktonic Microeukaryotes in Jinsha River .....	YAN Bing-cheng, CUI Ge, SUN Sheng-hao, <i>et al.</i> (3864)
Bacterial Community Diversity in Channel Sediments of Different Disturbance Sections of the Jialing River .....	ZHU Lan-ping, ZHANG Tuo, LI Jia-ning, <i>et al.</i> (3872)
Effects of Reservoir Water Depth on Different Plankton Communities and Keystone Species of Network Interaction .....	WANG Xun, LIAO Qin, WANG Pei-fang, <i>et al.</i> (3881)
Correlation Between the Diversity Characteristics of Groundwater Bacterial Community and Environmental Factors in Typical Industrial Areas .....	WU Jian-qiang, ZHANG Shu-yuan, WANG Min, <i>et al.</i> (3892)
Effects of Fertilizer Application Strategy Adjustments on Nitrogen and Phosphorus Loss from Typical Crop Systems in Taihu Lake Region .....	YU Ying-liang, WANG Yi-zhi, YANG Bei, <i>et al.</i> (3902)
Estimation of Cropland Nitrogen Runoff Loss Loads in the Yangtze River Basin Based on the Machine Learning Approaches .....	ZHANG Yu-fu, PAN Zhe-qi, CHEN Ding-jiang (3913)
Classification and Identification of Non-point Source Nitrogen Pollution in Surface Flow of the Shangwu River Watershed in the Qiandao Lake Region .....	YU Ke, YAN Yan, TANG Zhang-xuan, <i>et al.</i> (3923)
Spatial Distribution of Nitrogen and Phosphorus Nutrients in the Main Stream and Typical Tributaries of Tuojiang River and Fujiang River .....	LI Zi-yang, ZHOU Ming-hua, XU Peng, <i>et al.</i> (3933)
Sediment Pollution and Dredging Effect of Waiqinhuai River .....	ZHANG Mu, REN Zeng-yi, ZHANG Man, <i>et al.</i> (3945)
Critical Review on Environmental Occurrence and Photochemical Behavior of Substituted Polycyclic Aromatic Hydrocarbons .....	GE Lin-ke, WANG Zi-yu, CAO Sheng-kai, <i>et al.</i> (3957)
Cadmium and Arsenic Interactions During Co-adsorption onto Goethite .....	SU Zi-xian, LIU Sai-hong, GUAN Yu-feng, <i>et al.</i> (3970)
Preparation of Catalyst Cyclodextrin-Fe-TAML to Activate H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> and Oxidize Organic Micropollutants in Water .....	LIU Qing-quan, CAI Ben-zhe, CAI Xi-yun (3978)
Performance and Reaction Mechanism of Co(II) Mediated Activation of Peroxymonosulfate for Degrading Nitrotriazole (Methylene Phosphonic Acid) .....	ZHU Jing-lin, WANG Shu (3990)
Change in Granulation Potential and Microbial Enrichment Characteristics of Sludge Induced by Microplastics .....	XIE Qing-fan, YU Nan, ZHANG Ni, <i>et al.</i> (3997)
Accumulation Characteristics and Probabilistic Risk Assessment of Cd in Agricultural Soils Across China .....	WANG Jing, WEI Heng, PAN Bo (4006)
Source Analysis and Pollution Assessment of Soil Heavy Metals in Typical Geological High Background Area in Southeastern Chongqing .....	JIANG Yu-lian, YU Jing, WANG Rui, <i>et al.</i> (4017)
Integrated Analysis on Source-exposure Risk of Heavy Metals in Farmland Soil Based on PMF Model: A Case Study in the E-waste Dismantling Area in Zhejiang Province .....	FANG Jia, HE Ying, HUANG Nai-tao, <i>et al.</i> (4027)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Farmland Soil and Crops in the Suburbs of Urumqi .....	FAN Yue, CAO Shuang-yu, Nuerla Ailijiang, <i>et al.</i> (4039)
Distribution and Driving Mechanisms of Antibiotic Resistance Genes in Desert-Oasis Continuum .....	HUANG Fu-yi, ZHOU Shu-yidan, SU Jian-qiang, <i>et al.</i> (4052)
Characteristics of Antibiotic Contamination of Soil in China in Past Fifteen Years and the Bioremediation Technology: A Review .....	ZHAO Xiao-dong, QIAO Qing-qing, QIN Xiao-rui, <i>et al.</i> (4059)
Modified Biochar for Remediation of Soil Contaminated with Arsenic and Cadmium: A Review .....	LÜ Peng, LI Lian-fang, HUANG Xiao-ya (4077)
Effect of Biogas Slurry Return to Field on Heavy Metal Accumulation in Soil-crop System: A Meta-analysis .....	ZHAO Qi-zhi, YANG Zhi-min, KONG Fan-jing, <i>et al.</i> (4091)
Remediation Effect of Two Iron-modified Biochars on Slightly Alkaline Arsenic and Cadmium Contaminated Soil .....	LIANG Xin-ran, HE Dan, ZHENG Zhao-hua, <i>et al.</i> (4100)
Effects of Straw Removal Measure on Soil Cd Bioavailability and Rice Cd Accumulation .....	WANG Zi-yu, ZHOU Hang, ZHOU Kun-hua, <i>et al.</i> (4109)
Application of Desulfurized Gypsum with Straw to Improve Physicochemical Properties of Saline-alkali Land in Yellow River Delta .....	ZHAO Hui-li, YU Jin-yi, LIU Tao, <i>et al.</i> (4119)
Biological Evaluation and Key Stress Factor Diagnosis of Compound Contaminated Soil Based on Environmental DNA .....	HUANG Xiang-yun, ZHONG Wen-jun, LIU Xun-jie, <i>et al.</i> (4130)
Comprehensive Quality Assessment of Soil-Maize Heavy Metals in High Geological Background Area .....	ZHANG Chuan-hua, WANG Zhong-shu, LIU Li, <i>et al.</i> (4142)
Ecological Risk and Health Risk of Heavy Metal Pollution in Vegetable Production System of Zhejiang Province .....	ZHANG Shu-min, LIU Cui-ling, YANG Gui-ling, <i>et al.</i> (4151)
Effect of Biochar with Phosphorus Fertilizer on Soil Nutrients, Enzyme Activity, and Nutrient Uptake of <i>Alfalfa</i> .....	LIU Xin-yu, WANG Dong-mei, ZHANG Ze-zhou, <i>et al.</i> (4162)
Effects of Low-density Polyethylene Microplastics on the Growth and Physiology Characteristics of <i>Ipomoea aquatica</i> Forsk .....	ZHOU Ying, JIANG Wen-ting, LIU Xun-yue, <i>et al.</i> (4170)
Effects of Biogas Slurry Application on Soil Microbial Communities Structure and Function During Wheat-rice Stubble Period .....	QIAO Yu-ying, XI Hui, LI Na, <i>et al.</i> (4179)
Analysis of Soil Bacterial Community Structure and Ecological Function Characteristics in Different Pollution Levels of Lead-zinc Tailings in Datong .....	LIU Ze-xun, ZHUANG Jia-yao, LIU Chao, <i>et al.</i> (4191)
Effect of Fire-deposited Charcoal on Soil Organic Carbon Pools and Associated Enzyme Activities in a Recently Harvested <i>Pinus massoniana</i> Plantation Subjected to Broadcast Burning .....	YAO Zhi, JIAO Peng-yu, WU Xiao-sheng, <i>et al.</i> (4201)