

刘庆澳,张立秋,冀云卿,等.“双碳”目标下工业园区低碳发展水平评价研究:以华东地区A园区为例[J].环境工程技术学报,2024,14(2):379-388.
LIU Q G,ZHANG L Q,JI Y Q,et al.Research on the evaluation of low-carbon development level of industrial parks under carbon peak and carbon neutrality target: taking A park in East China as an example[J].Journal of Environmental Engineering Technology, 2024, 14(2): 379-388.

“双碳”目标下工业园区低碳发展水平评价研究

——以华东地区A园区为例

刘庆澳^{1,2},张立秋^{1,2*},冀云卿³,封莉^{1,2}

1.北京林业大学环境科学与工程学院,水体污染源控制技术北京市重点实验室

2.北京林业大学环境科学与工程学院,污染水体源控制与生态修复技术北京市高等学校工程研究中心

3.生态环境部环境规划院

摘要 “双碳”目标下工业园区低碳发展的需求愈发紧迫,科学合理地评价工业园区低碳发展水平是促进工业园区低碳发展的关键一步。从低碳产业、能源资源利用、减污降碳、低碳基础设施、长效管理5个层面选取24个指标构建工业园区低碳发展评价指标体系,采用层次分析法结合改进CRITIC法(基于指标相关性的权重确定法)为指标赋权,运用TOPSIS(优劣解距离法)-灰色关联分析模型和障碍度模型分析了2018—2022年华东地区A园区的低碳发展水平与障碍因子。结果表明:2018—2022年A园区低碳发展水平呈逐年上升趋势,其中低碳产业、能源资源利用、长效管理准则的低碳发展趋势向好,而减污降碳、低碳基础设施准则的低碳发展受阻。从障碍度角度看,准则层中减污降碳和能源资源利用是制约A园区低碳发展水平提高的关键障碍因素,其中单位工业增加值碳排放量、单位工业增加值综合能耗、工业用水重复利用率、单位工业增加值废水排放量、新建工业建筑中绿色建筑比例的阻碍作用较为突出。

关键词 工业园区;指标体系;低碳发展;优劣解距离法;障碍度

中图分类号:X321 文章编号:1674-991X(2024)02-0379-10 doi:10.12153/j.issn.1674-991X.20230606

Research on the evaluation of low-carbon development level of industrial parks under carbon peak and carbon neutrality target: taking A park in East China as an example

LIU Qingao^{1,2}, ZHANG Liqiu^{1,2*}, JI Yunqing³, FENG Li^{1,2}

1.Beijing Key Lab for Source Control Technology of Water Pollution, College of Environmental Science and Engineering, Beijing Forestry University

2.Engineering Research Center for Water Pollution Source Control & Eco-remediation, College of Environmental Science and Engineering, Beijing Forestry University

3.Chinese Academy of Environmental Planning, Ministry of Ecology and Environment

Abstract Under the goal of carbon peak and carbon neutrality, the demand for low-carbon development of industrial parks is becoming more and more urgent. Scientific and reasonable evaluation of the low-carbon development level of industrial parks is a key step to promote the low-carbon development of industrial parks. From the five levels of low-carbon industry, energy resource utilization, pollution reduction and carbon reduction, low-carbon infrastructure, and long-term management, 24 indicators were selected to construct a low-carbon development evaluation index system for industrial parks. The analytic hierarchy process (AHP) combined with the improved criteria importance through intercriteria correlation (CRITIC) method was used to assign weights to indicators, and the technique for order preference by similarity to ideal solution (TOPSIS) - grey correlation analysis model and obstacle degree model were used to analyze the low-carbon development level and obstacle factors of A park in East China from 2018 to 2022. The results showed that the low-carbon development level of A park was

收稿日期:2023-08-19

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFC3706401);浙江省科技计划项目(2022C03028)

作者简介:刘庆澳(1999—),男,硕士研究生,研究方向为环境规划与管理,1293042350@qq.com

* 责任作者:张立秋(1972—),男,教授,博导,研究方向为环境规划与管理,zhangliqiu@163.com

increasing year by year from 2018 to 2022, among which the low-carbon development trend of low-carbon industry, energy resource utilization and long-term management criteria was better, while the low-carbon development of pollution reduction and low-carbon infrastructure criteria was hindered. From the perspective of obstacle degree, pollution reduction and carbon reduction, and energy resource utilization in the criterion layer were the key obstacle factors restricting the improvement of the low-carbon development level of A park. Among them, the carbon emission per unit of industrial added value, the comprehensive energy consumption per unit of industrial added value, the reuse rate of industrial water, the wastewater discharge per unit of industrial added value, and the proportion of green buildings in new industrial buildings were more prominent.

Key words industrial park; index system; low-carbon development; TOPSIS; obstacle degree

2021年9月,生态环境部印发《关于推进国家生态工业示范园区碳达峰碳中和相关工作的通知》,将碳达峰、碳中和纳入国家生态工业示范园区建设的重要内容。2021年10月,国务院发布《2030年前碳达峰行动方案的通知》,提出“打造一批达到国际先进水平的节能低碳园区”“选择100个具有典型代表性的城市和园区开展碳达峰试点建设”。工业园区低碳发展已成为实现“双碳”目标的重要组成部分。推动工业园区低碳发展,首要任务是准确评估工业园区低碳发展水平、识别优势与劣势,从而作出低碳决策。因此,建立科学的评价指标体系及评价方法,是扎实推进工业园区低碳发展的关键一步。

目前,工业园区低碳发展评价相关研究已取得一定成果。如谢华生等^[1]从低碳能源、碳汇建设、低碳技术、低碳建筑、低碳交通、低碳管理6个方面提出了生态工业园低碳发展指导性指标体系。伍肆等^[2]构建了包含能源利用、温室气体排放控制、循环经济与环保、园区建设管理4个准则层的工业园区低碳发展水平评价指标体系,利用层次分析法(AHP)赋权,以模糊综合评价法测度了中部某工业园区低碳发展水平。周娟^[3]在实地调研和理论研究的基础上建立了以压力-状态-响应模型为框架的低碳工业园区评价指标体系,结合层次分析法、德尔菲法确定权重,以综合指数法为评价方法在湖北省黄金山工业园区进行应用。李晓静^[4]通过查阅文献与深度专家访谈的方式建立了工业园区低碳发展评价指标体系,用熵权法计算指标权重,用综合指数法对青岛市16个典型的工业园区进行评价。马桂华^[5]采用驱动力-压力-状态-响应模型构建了工业园区低碳评价指标体系,通过层次分析法结合综合指数法评价了南宁市高新区低碳发展水平。霍震^[6]从经济、能源、碳汇、技术、环境、建设和管理6个维度设计低碳园区评价指标体系,以层次分析法赋权,以综合指数法对江苏省10个低碳经济试点园区进行评价。Liu等^[7]基于驱动-压力-状态-影响-响应框架构建了海洋工业

园区可持续性评价指标体系,采用层次分析法和熵权法计算各指标的权重,并对石狮海洋生物科技园2013—2016年的可持续性进行了评价。

综上所述,既有研究在指标体系构建方面已经较为完善,为合理评价工业园区低碳发展水平提供了良好的参考借鉴,但仍然存在以下不足:1)“双碳”目标下,工业园区节能降碳的要求越来越高,现有指标体系中多数指标的标杆值相对较低,缺乏时效性;2)现有研究大多选择单一赋权法,例如层次分析法或熵权法,而兼顾主观和客观赋权法优点的组合赋权法在工业园区绿色低碳评价中鲜有应用;3)以往研究较少识别制约园区低碳发展的主导障碍因素,难以精准、全面地提出对策建议。鉴于此,本研究采用理论分析法、频度统计法、专家咨询法,构建以低碳产业、能源资源利用、减污降碳、低碳基础设施、长效管理为准则的工业园区低碳发展评价指标体系,同时从时效性和先进性出发合理设置指标标杆值,增强指标的实用性;然后利用层次分析法和改进CRITIC法确定指标的组合权重,提高赋权过程的合理性;最后选取华东地区A园区为研究案例,运用TOPSIS-灰色关联分析法测度其低碳发展水平,采用障碍度模型识别制约A园区低碳发展的障碍因素,并提出针对性的低碳发展建议。

1 研究方法

1.1 评价指标体系构建

1.1.1 框架构建

在充分考虑工业园区低碳发展系统的组成要素以及影响因素的基础上,借鉴前人研究^[1-9],从低碳产业、能源资源利用、减污降碳、低碳基础设施、长效管理5个维度构建工业园区低碳发展评价指标体系(图1)。其中,减污降碳是工业园区低碳发展的核心目标,也是工业园区低碳发展水平的直接体现,主要考察二氧化碳及污染物的排放水平;低碳产业是工业园区低碳发展的基础,主要考察产业结构和产业

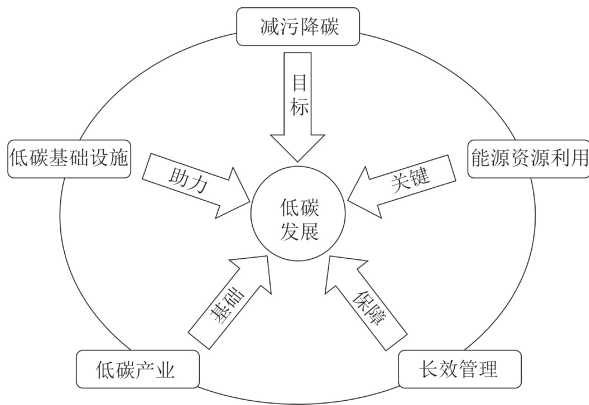


图 1 指标体系框架

Fig.1 Framework of the indicator system

效益；能源资源利用是工业园区低碳发展的关键，其中能源消费更是碳排放的主要来源，主要考察能源结构、能源效率、资源效率；低碳基础设施是工业园区低碳发展的重要助力，基础设施共享本就是园区

区别于企业的重要特征，主要考察绿化、交通、环境、建筑等基础设施的低碳化程度；长效管理是工业园区低碳发展的保障，主要考察碳排放相关运行管理制度的完善情况。

1.1.2 指标筛选

在遵循全面性、可操作性、前瞻性^[8]、可比性、低碳性原则的前提下，通过 Web of Science、中国知网、政府官方网站等渠道，收集大量相关指标体系，采用理论分析法、频度统计法筛选指标，结合前述指标框架，建立初始指标体系，然后通过 2 轮专家咨询形成最终的工业园区低碳发展评价指标体系（表 1），共计 1 个一级指标、5 个二级指标、24 个三级指标。指标筛选过程与马桂华^[5]提出的流程基本一致，具备可行性。对比类似研究中的评价指标^[1-6]，本研究所选指标更具低碳特征，例如“编制碳达峰行动方案”。

表 1 工业园区低碳发展评价指标体系

Table 1 Evaluation index system for low-carbon development of industrial parks

一级指标	二级指标	三级指标	正负性	类型	权重	
工业园区低碳发展水平(A)	低碳产业(B ₁)	园区工业增加值增速(C ₁)	正	二选一	0.021 2	
		人均工业增加值(C ₁)	正			
		绿色产业增加值占工业增加值的比例(C ₂)	正	二选一		0.060 0
		高新技术企业工业总产值占园区工业总产值比例(C ₂)	正			
		能源资源利用(B ₂)	单位工业增加值综合能耗(C ₃)	负		
	可再生能源使用比例(C ₄)		正	二选一	0.096 4	
	煤炭消费总量下降率(C ₄)		正			
	能源技术应用情况(C ₅)		正	必选		0.050 7
	工业用水重复利用率(C ₆)		正	必选		0.060 0
	工业固体废物综合利用率(C ₇)	正	必选	0.033 0		
	减污降碳(B ₃)	园区二氧化碳排放量下降率(C ₈)	正	必选	0.060 0	
		单位工业增加值碳排放量(C ₉)	负	必选	0.096 4	
		单位工业增加值碳排放量下降率(C ₁₀)	正	必选	0.096 4	
		主要污染物排放弹性系数(C ₁₁)	正/负 ¹⁾	必选	0.033 0	
	低碳基础设施(B ₄)	单位工业增加值废水排放量(C ₁₂)	负	必选	0.042 8	
		绿化覆盖率(C ₁₃)	正	必选	0.021 2	
		节能与新能源公交车比例(C ₁₄)	正	必选	0.032 8	
		新建工业建筑中绿色建筑的比例(C ₁₅)	正	二选一	0.033 0	
		新建公共建筑中绿色建筑的比例(C ₁₅)	正			
	长效管理(B ₅)	污水集中处理设施(C ₁₆)	正	必选		0.042 8
		重点企业环境信息公开率(C ₁₇)	正	必选		0.008 6
		企业清洁生产审核实施率(C ₁₈)	正	必选		0.021 2
		购买绿电或碳抵消(C ₁₉)	正	必选	0.012 7	
		能源在线监测平台(C ₂₀)	正	必选	0.032 8	
碳排放管理能力完善度(C ₂₁)		正	必选	0.032 8		
编制低碳发展规划或碳达峰行动方案(C ₂₂)		正	必选	0.021 2		
绿色低碳信息平台完善程度(C ₂₃)		正	必选	0.010 9		
绿色低碳主题宣传活动(C ₂₄)		正	必选	0.006 0		

1)当工业增加值年均增长率大于0时，为负向；当工业增加值年均增长率小于0时，为正向。

1.1.3 标杆值的设定

以往研究^[9]设置指标标杆值时,往往参考《低碳园区发展指南(2012年)》、HJ 274—2015《国家生态工业示范园区标准》等,这些指标体系发布较早,部分指标标杆值缺乏时效性,无法代表现阶段的工业发展水平。因此,需合理更新一些关键指标的标杆值(表 2),标杆值的来源有 3 方面:1)近年颁布的工业园区低碳评价指标体系(更具时效性);2)发达地区出台的工业园区低碳评价指标体系(更具先进性);3)根据国家和各省市中长期发展规划文件进行合理推断。对比其他研究^[3,5,9],本研究中的指标标杆

值要求更严格,能更好地服务于新形势下的工业园区低碳评价。

标杆值的一个重要作用是用于原始数据的标准化处理,即基于标杆值采用目标值标准化法将指标实际值转化为标准化值,消除不同单位数据量纲的影响,使不同单位量值的评价指标具有可比性,以用于后续的定量分析。另外,定性指标需进行定量化处理(表 2)。此处采用的目标值法已经在高新区低碳评价^[5]、低碳城市建设成熟度评价^[10]、经开区绿色评价^[11]等方面得到广泛应用,并取得良好效果。目标值法计算公式如下。

表 2 各项指标的标杆值及来源

Table 2 Benchmark values and sources of various indicators

三级指标	标杆值	来源	三级指标	标杆值	来源
园区工业增加值增速(C ₁)	15%	《山东省省级生态工业园区管理办法》(2022年)	节能与新能源公交车比例(C ₁₄)	30%	《浙江省绿色低碳工业园区建设评价导则》(2022年)
人均工业增加值(C ₁)	20万元/人	T/CIECCPA 010—2023《工业园区绿色低碳评价导则》	新建工业建筑中绿色建筑的比例(C ₁₅)	30%	《浙江省绿色低碳工业园区建设评价导则》(2022年)
绿色产业增加值占工业增加值的比例(C ₂)	45%	《江苏省省级生态工业园区建设规范(征求意见稿)》(2021年)	新建公共建筑中绿色建筑的比例(C ₁₅)	60%	
高新技术企业工业总产值占园区工业总产值比例(C ₂)	45%			污水集中处理设施(C ₁₆)	1分
单位工业增加值综合能耗(C ₃)	0.33 t/万元	DB21/T 3662—2022《绿色工业园区评价规范》	重点企业环境信息公开率(C ₁₇)	100%	HJ 274—2015《国家生态工业示范园区标准》
可再生能源使用比例(C ₄)	15%	《绿色园区评价要求》(2016年)	企业清洁生产审核实施率(C ₁₈)	100%	HJ 274—2015《国家生态工业示范园区标准》
煤炭消费总量下降率(C ₄)	2%	《“十四五”节能减排综合工作方案》	购买绿电或碳抵消(C ₁₉)	1分	《深圳近零碳排放放园区试点主要指标体系》(2021年)(具备得1分,反之0分 ¹⁾)
能源技术应用情况(C ₅)	1分	T/ACEF 038—2022《工业园区碳中和评价方法》(每应用1例,得0.1分,满分1分 ¹⁾)	能源在线监测平台(C ₂₀)	1分	T/CSPSTC 51—2020《智慧零碳工业园区设计和评价技术指南》(具备得1分,反之0分 ¹⁾)
工业用水重复利用率(C ₆)	90%	《浙江省绿色低碳工业园区建设评价导则》(2022年)	碳排放管理能力完善度(C ₂₁)	1分	T/CSPSTC 51—2020《智慧零碳工业园区设计和评价技术指南》(根据完善程度在0~1之间打分 ¹⁾)
工业固体废物综合利用率(C ₇)	95%	DB31/T 946—2021《绿色工业园区评价导则》	编制低碳发展规划或碳达峰行动方案(C ₂₂)	1分	《浙江省绿色低碳工业园区建设评价》(2022年)(具备得1分,反之0分 ¹⁾)
园区二氧化碳排放量下降率(C ₈)	0%	《成都市近零碳排放放园区试点建设评价指标》(2022年)	绿色低碳信息平台完善程度(C ₂₃)	1分	HJ 274—2015《国家生态工业示范园区标准》(根据完善程度在0~1之间打分 ¹⁾)
单位工业增加值碳排放量(C ₉)	0.35 t/万元	T/CSPSTC 51—2020《智慧零碳工业园区设计和评价技术指南》	绿色低碳主题宣传活动(C ₂₄)	1分	HJ 274—2015《国家生态工业示范园区标准》(具备得1分,反之0分 ¹⁾)
单位工业增加值碳排放量下降率(C ₁₀)	5%	《“十四五”工业绿色发展规划》SZDB/Z 308—2018《低碳园区评价指南》			
主要污染物排放弹性系数(C ₁₁)	0.3	HJ 274—2015《国家生态工业示范园区标准》			
单位工业增加值废水排放量(C ₁₂)	5 t/万元	《绿色园区评价要求》(2016年)			
绿化覆盖率(C ₁₃)	30%	DB31/T 946—2021《绿色工业园区评价导则》			

1)定性指标的定量化方法。

正向指标:

$$P_{ij} = \frac{X_{ij}}{X_{ib}} \quad (1)$$

负向指标:

$$P_{ij} = \frac{X_{ib}}{X_{ij}} \quad (2)$$

式中: P_{ij} 为第 j 个样本中第 i 个指标的标准化值 (当 $P_{ij} > 1$ 时, P_{ij} 取 1; 当 $P_{ij} < 0$ 时, P_{ij} 取 0); X_{ij} 为第 j 个样本中第 i 个指标的实际值; X_{ib} 为该指标的标杆值。

1.2 评价模型

1.2.1 组合赋权法

主观赋权和客观赋权法^[12]在单独使用时局限性较为明显^[13], 而组合使用时更为有效^[14]。因此采用层次分析法与改进 CRITIC 法相结合的组合赋权方法来确定指标权重^[15], 既融入了层次分析法的主观经验^[16], 又兼顾改进 CRITIC 法的客观性。

(1) 层次分析法计算主观权重^[17]。

基于表 1 的评价指标体系建立层次分析结构及判断矩阵, 借助 Yaahp 软件得到各指标的主观权重 (α)^[18]。

(2) 改进 CRITIC 法计算客观权重。

传统 CRITIC 法虽综合考虑了数据间的对比强度和冲突性^[19], 但在指标 i 与 h 的相关系数 (r_{ih})^[20] 和数据间的离散程度^[21] 等方面存在不足。因此, 借鉴前人研究^[21-22], 用 $(1-|r_{ih}|)$ 代替原方法中的 $(1-r_{ih})$, 引入冗余信息熵反映指标间的离散性, 使得赋权过程更加合理。相关步骤如下。

第一步, 数据标准化处理 [式 (1) 和式 (2)]。

第二步, 计算第 i 项指标的信息量 (C_i):

$$C_i = (S_i + \delta_i) \times \sum_{h=1}^n (1 - |r_{ih}|) \quad (3)$$

式中: S_i 为指标 i 的标准差; δ_i 为通过熵权法确定的指标 i 的冗余信息熵; n 为指标数量; $|r_{ih}|$ 为指标 i 与 h 的相关系数的绝对值。

第三步, 计算第 i 项指标的客观权重 (β_i):

$$\beta_i = \frac{C_i}{\sum_{i=1}^n C_i} \quad (4)$$

(3) 组合赋权优化模型计算组合权重。

常见的权重组合法具有一定不足^[23], 本文在兼顾序信息和强度信息的基础上, 建立组合赋权优化模型计算组合权重^[24-27]。一方面在“序信息”上优先兼顾主观权重, 使得组合权重的大小排序与主观权重一致; 另一方面在“强度信息”上优先兼顾客观权重, 使得组合权重的数值最大程度接近客观权重。

该模型如下所示:

$$\begin{aligned} \min & \sum_{i=1}^n (\omega_i - \beta_i)^2 \\ \text{s.t.} & \begin{cases} \omega_i \geq \omega_h, i < h \\ \mu_i^- \leq \omega_i \leq \mu_i^+ \\ \sum_{i=1}^n \omega_i = 1 \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

式中: ω_i 和 ω_h 分别为第 i 项和第 h 项指标的组合权重; μ_i^- 为第 i 项指标的主观权重和客观权重中的较小者; μ_i^+ 为第 i 项指标的主观权重和客观权重中的较大者。

根据上述公式, 最终计算得到的各项指标权重见表 1。对比类似研究^[5,9], 指标权重的整体排序较为一致, 其中单位工业增加值综合能耗 (C_3)、单位工业增加值碳排放量 (C_9)、单位工业增加值碳排放量下降率 (C_{10}) 等指标的权重排名均位于前列, 而管理类指标的权重排名均较为靠后。

1.2.2 TOPSIS-灰色关联分析法

本文综合 TOPSIS 法^[28] 和灰色关联分析法^[29] 的优点^[30], 建立 TOPSIS-灰色关联分析模型, 联合欧氏距离与灰色关联度来反映工业园区低碳发展水平现实状态与理想状态的接近程度。该方法的可行性和有效性已经在乡村振兴评价^[31]、水资源承载力评价^[32]、城市幸福指数评价^[33]、风险评估^[34] 等方面得到充分验证。

另外, 传统 TOPSIS 法和灰色关联分析法存在 2 个缺点: 1) 正负理想解或参考序列往往来自样本数据, 缺少稳定性, 仅能对多个评价对象进行内部排序; 2) 权重的确定往往是简单平均。对此本文将正负理想解和参考序列固定化, 评价结果不受样本数据变动的影 响, 并以前文计算得到的组合权重作为指标权重。相关步骤如下。

第一步, 数据标准化处理 [式 (1) 和式 (2)]。

第二步, 构建加权规范化矩阵 (V):

$$V = (v_{ij})_{m \times n} = (P_{ij} \times \omega_i)_{m \times n} \quad (6)$$

式中: v_{ij} 为标准化加权后的指标值; m 为样本数量。

第三步, 确定正理想解 (优序列) Y^+ 和负理想解 (劣序列) Y^- 。所有指标正理想解均取 1, 负理想解均取 0 (1 和 0 为标准化值), 经加权处理后, 正理想解即为各项指标权重, 负理想解均为 0。

第四步, 计算样本 j 与正理想解的欧氏距离 (D_j^+)、与负理想解的欧氏距离 (D_j^-):

$$D_j^+ = \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^+ - v_{ij})^2} \quad (7)$$

$$D_j^- = \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^- - v_{ij})^2} \quad (8)$$

式中 Y_i^+ 、 Y_i^- 分别为第 i 项指标的正、负理想解。

第五步, 计算第 j 个样本与正、负理想解关于第 i 个指标的灰色关联系数及关联度:

$$E_{ij}^+ = \frac{\min_i \min_j (|Y_i^+ - v_{ij}|) + \xi \max_i \max_j (|Y_i^+ - v_{ij}|)}{|Y_i^+ - v_{ij}| + \xi \max_i \max_j (|Y_i^+ - v_{ij}|)} \quad (9)$$

$$E_{ij}^- = \frac{\min_i \min_j (|Y_i^- - v_{ij}|) + \xi \max_i \max_j (|Y_i^- - v_{ij}|)}{|Y_i^- - v_{ij}| + \xi \max_i \max_j (|Y_i^- - v_{ij}|)} \quad (10)$$

$$F_j^+ = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_{ij}^+ \quad (11)$$

$$F_j^- = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_{ij}^- \quad (12)$$

式中: E_{ij}^+ 、 E_{ij}^- 为灰色关联系数; ξ 为分辨系数, 一般取 0.5; F_j^+ 、 F_j^- 为灰色关联度。

第六步, 计算灰色关联相对贴适度^[35]。分别对欧氏距离和灰色关联度进行无量纲化处理:

$$Q_i = \frac{T_i}{\max_{1 \leq i \leq n} T_i} \quad (13)$$

式中: T_i 代表 D_j^+ 、 D_j^- 、 F_j^+ 、 F_j^- ; Q_i 代指无量纲化处理后的值 d_j^+ 、 d_j^- 、 f_j^+ 、 f_j^- 。

综合欧氏距离与灰色关联度, 定义 2 个新型距离测度 G_j^+ 、 G_j^- :

$$G_j^+ = a \times d_j^- + (1-a) \times f_j^+ \quad (14)$$

$$G_j^- = a \times d_j^+ + (1-a) \times f_j^- \quad (15)$$

式中: G_j^+ 越大则该评价对象越优, G_j^- 越大则评价对象越差; a 的大小反映了决策者对距离和形状的偏好程度, $0 \leq a \leq 1$, 本文取 0.5。

利用 2 个新型距离测度, 计算灰色关联相对贴适度 O_j , O_j 越大, 则评价对象越优。

$$O_j = \frac{G_j^+}{G_j^+ + G_j^-} \quad (16)$$

1.3 障碍度模型

为进一步识别工业园区低碳发展的薄弱环节, 采用障碍度模型分析工业园区低碳发展的障碍因子及其影响程度大小, 为制定针对性的低碳政策措施提供依据^[36]。障碍度模型^[36-39]通过计算因子贡献度、指标偏离度和障碍度 3 个指标对障碍因素进行分析诊断^[40], 因子贡献度表示单一指标对工业园区低碳发展水平的影响程度, 一般用单个指标的权重 ω_i 表示; 指标偏离度 I_i 表示各指标的实际值与最优值之间的差距, 一般用指标标准化值 P_i 与 1 的差值代替; 障碍度 U_i 表示各项指标对工业园区低碳发展

的阻碍程度。相关计算公式如下:

$$I_i = 1 - P_i \quad (17)$$

$$U_i = \frac{I_i \times \omega_i}{\sum_{i=1}^n I_i \times \omega_i} \times 100\% \quad (18)$$

2 实证研究

2.1 研究区域及数据来源

A 园区位于我国华东地区, 交通便利, 区位优势明显。其成立于 2009 年, 是由省政府批准成立的省级工业园区, 总面积约 160 km², 常住人口近 10 万人。A 园区内主导行业以传统产业为主, 包括纺织印染、食品加工、高端化工等, 同时大力培育新兴产业, 包括生物医药、医疗器械、新能源、电子信息等。

选取 A 园区 2018—2022 年的相关指标数据, 主要来自 A 园区的《园区统计年鉴》(2019—2022 年)、《园区国民经济和社会发展统计公报》(2018 年)、官方网站、发放调查问卷等。对于统计年鉴或统计公报中缺失的极个别数据, 采用线性回归法进行补齐。

2.2 低碳发展水平评价结果与分析

根据上述评价指标及研究方法, 可测算出 2018—2022 年 A 园区低碳发展评价中目标层评价结果变化趋势(图 2)、准则层的评价结果变化趋势(图 3)。

2.2.1 综合评价分析

由图 2 可以看出, 2018—2022 年 A 园区低碳发展水平整体呈上升趋势, 贴适度从 2018 年的 0.457 3 升至 2022 年的 0.558 8, 年均上升速度为 5.25%, 可见园区在 5 年间开展了有效的低碳行动。2018—2019 年, 园区低碳发展水平上升最为迅速, 贴适度从 0.457 3 提高到 0.519 4, 增速为 13.58%, 主要原因是园区在低碳产业、能源资源利用方面取得一定进步, 李晓静^[4]的研究结果同样表明了产业发展和资源利用水平的提高能够促进工业园区的低碳发展。2019—2022 年, 园区低碳发展水平虽稳步增长, 但贴适度年均增速仅为 2.47%, 这是因为在准则层中仅有长效管理的低碳水平提升较快, 说明 A 园区近年采取了有效的低碳管理措施, 但未来应当同步推进其他指标的低碳发展。

2.2.2 准则层评价分析

由图 3 可以看出, 低碳产业、能源资源利用、长效管理准则的低碳发展趋势向好, 贴适度的 5 年年均上升速度分别为 9.89%、17.19%、8.63%, 说明园区近 5 年较为重视产业、能源资源、管理方面的低碳发展。其中, 低碳产业准则的低碳水平在 5 年内

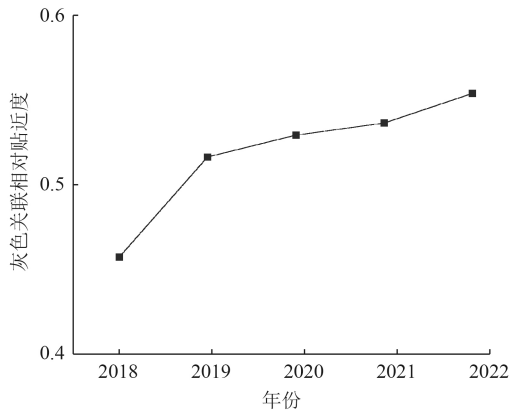


图2 2018—2022年A园区低碳发展综合评价结果变化

Fig.2 Change trend of the comprehensive evaluation results of low-carbon development in A park from 2018 to 2022

呈先波动上升后稳定的趋势,唯一一次下降是在2020年,主要是由于人均工业增加值(C_1)的下降导致的,可能是新冠疫情影响了经济发展^[41]。能源资源利用准则的低碳水平在5年内呈波动上升的态势,贴近度从2018年的0.3637升至2022年的0.6389,低碳成效显著,这主要得益于园区严控新增耗煤项目、压减高耗能行业产能、加快煤炭清洁高效利用,并大力推行光伏发电项目、清洁取暖改造工程。长效管理准则的低碳水平在2018—2019年较为稳定,在2019年后快速提高,贴近度从2019年的0.4109升至2022年的0.5656,这得益于3个方面:1)园区持续推动企业参与自愿性清洁生产审核;2)园区于2021年建立了能源管理平台,初步实现对用能单位和建筑物的能耗数据进行实时采集、汇总、计算分析,有助于能耗的降低;3)园区不断完善碳排放管理制度,自2020年起将低碳发展工作纳入园区行政管理机构领导班子政绩考核内容,并建立相应的考核机制。周娟^[3]认为良好的低碳管理对于低碳工业园区的发展至关重要,因此A园区应当继续维持低碳管理方面的优势,建议在能源管理平台的基础上实现碳排放的监测、计算、分析,为低碳发展提供基础数据支撑。

减污降碳、低碳基础设施准则的低碳发展受阻,贴近度的5年年均上升速度分别仅为1.29%、0.04%,说明园区在这2方面的重视程度有待提高。减污降碳准则的低碳水平在5年内增长缓慢,究其原因,尽管园区已经采取各种措施推动能源结构调整、污水减排,使得碳排放总量和强度、单位工业增加值废水排放量有所下降,但是相关指标的基数过大,仍需进一步加大推进力度。低碳基础设施准则的低碳水平在5年内的增长几乎停滞,贴近度仅上升了0.0009,分析发现,2018—2022年间园区虽积

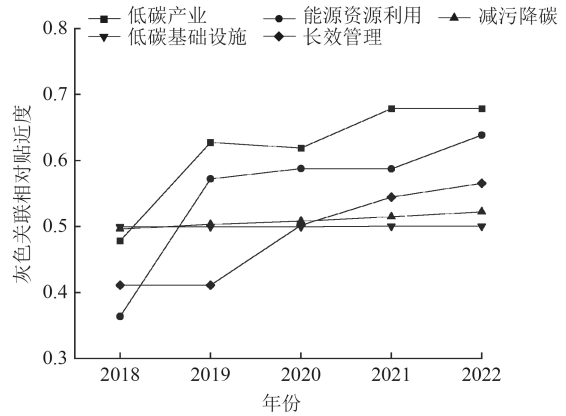


图3 2018—2022年A园区低碳发展准则层评价结果变化

Fig.3 Change trend of the evaluation results of the low-carbon development criteria layer of A park from 2018 to 2022

极开展绿化养护工作并出台相关管理制度,使得绿化覆盖率小幅提高,但严重忽视了低碳交通工具的推广以及绿色建筑的建设,阻碍了低碳基础设施准则的发展,宁晓刚^[42]认为绿色出行等低碳交通因素会制约园区低碳发展,胡恩生^[43]认为低碳建筑建设不足易成为园区低碳发展的短板,这与本文研究结果较为一致,后续园区应当在交通、建筑方面及时采取绿色低碳行动。

2.3 障碍因素诊断

2.3.1 准则层障碍因子分析

通过障碍度模型,计算得到2018—2022年各准则对A园区低碳发展的障碍度(图4)。从5个准则各自的变化趋势上看,能源资源利用、长效管理的障碍度在5年间波动下降,年均下降速度分别为10.87%、0.94%,虽然能源资源障碍度的下降速度较快,但其障碍度排名始终位于前2位,说明园区在这方面采取了有效措施但仍需加强。低碳产业障碍度从2018年的1.48%波动降至2021年的0%,并在2022年继续保持了零障碍度,5年间障碍度排名始终位于末位,说明产业发展是园区降碳的优势所在。减污降碳与低碳基础设施的障碍度在5年内持续上升,年均上升速度分别为9.21%、11.96%,减污降碳障碍度排名自2019年起便稳居第1位,而低碳基础设施障碍度排名从第4位提高到第3位,说明减污降碳与低碳基础设施成为了园区低碳发展的薄弱之处。从整体来看,2018—2022年制约A园区低碳发展的关键因素是减污降碳和能源资源利用,平均障碍度分别达到34.2%、28.61%,后面依次为长效管理、低碳基础设施、低碳产业,均值分别为19.07%、17.7%、0.43%。对比类似研究^[44],制约园区绿色低碳发展的因素也主要集中在减污降碳和能源资源利用方面。可见,提高A园区低碳发展水平必

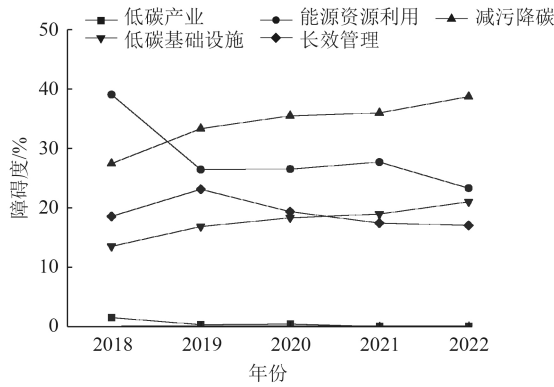


图 4 2018—2022 年 A 园区低碳发展评价准则层障碍因子变化

Fig.4 Variation of obstacle factors in the evaluation criteria layer of low-carbon development in A park from 2018 to 2022

须优先从减污降碳和能源资源利用准则入手, 同时也要关注减污降碳、长效管理、低碳基础设施准则的发展情况。

2.3.2 指标层障碍因子分析

仅根据准则层障碍度分析 A 园区低碳发展障碍因子可能会掩盖具体指标之间的障碍度差异, 因此, 计算并筛选出 2018—2022 年各年障碍度排名前 5 的指标作为主要障碍因子(表 3)。

整体上看, 制约 A 园区低碳发展的主要障碍因子均来自能源资源利用、减污降碳、低碳基础设施 3 个准则, 共计 8 项指标, 说明这些指标对 A 园区低碳发展的阻碍作用最大。按照出现频率排序, 前 5 名依次为单位工业增加值碳排放量(C_9) (5 次)、单位工业增加值综合能耗(C_3) (5 次)、工业用水重复利用率(C_6) (4 次)、单位工业增加值废水排放量(C_{12}) (4 次)、新建工业建筑中绿色建筑的比例(C_{15}) (4 次)。以上指标与相关文献研究结果中的园区低碳发展主要障碍因素较为一致^[43-44]。

从时间看, 2018 年主要障碍因子包括煤炭消费总量下降率(C_4)、单位工业增加值碳排放量(C_9)、单位工业增加值综合能耗(C_3)、工业用水重复利用率(C_6)、单位工业增加值废水排放量(C_{12}), 指标均属于能源资源利用和减污降碳准则, 低碳基础设施中的指标暂未进入主要障碍因子行列。2019—2021 年, 各年份的主要障碍因子及排名完全相同, 依次为单位工业增加值碳排放量(C_9)、单位工业增加值综合能耗(C_3)、工业用水重复利用率(C_6)、单位工业增加值废水排放量(C_{12})、新建工业建筑中绿色建筑的比例(C_{15}), 其中新建工业建筑中绿色建筑的比例(C_{15})为新增的主要障碍因子, 隶属于低碳基础设施准则, 而曾在 2018 年位居障碍度排名第 1 位的煤炭消费总量下降率(C_4)自 2019 年退出了主要障碍因

表 3 2018—2022 年 A 园区低碳发展评价指标层主要障碍因子、障碍度及其排序

Table 3 Main obstacle factors, degree of obstacle and their ranking in the evaluation index layer of low-carbon development in A park from 2018 to 2022

排序	项目	年份				
		2018	2019	2020	2021	2022
1	障碍因素	C_4	C_9	C_9	C_9	C_9
	障碍度/%	16.52	18.37	19.51	19.70	21.14
2	障碍因素	C_9	C_3	C_3	C_3	C_3
	障碍度/%	15.32	11.40	11.66	10.93	10.10
3	障碍因素	C_3	C_6	C_6	C_6	C_{15}
	障碍度/%	10.32	8.52	8.99	10.66	8.84
4	障碍因素	C_6	C_{12}	C_{12}	C_{12}	C_{11}
	障碍度/%	7.00	7.93	8.33	8.32	8.84
5	障碍因素	C_{12}	C_{15}	C_{15}	C_{15}	C_{14}
	障碍度/%	6.48	7.06	7.66	7.97	8.79

子行列, 可见这一时期园区在能源结构调整方面取得了一定成效, 但忽视了绿色建筑的建造。2022 年, 单位工业增加值碳排放量(C_9)、单位工业增加值综合能耗(C_3)障碍度排名继续保持在第 1、2 位, 新建工业建筑中绿色建筑的比例(C_{15})从第 5 位上升至第 3 位, 而工业用水重复利用率(C_6)、单位工业增加值废水排放量(C_{12})被主要污染物排放弹性系数(C_{11})、节能与新能源公交车比例(C_{14})所替代。这一阶段, 园区持续提高水资源利用效率, 但碳排放强度、能耗强度依然偏高, 同时在污染物排放、交通基础设施低碳化方面暴露出了新的问题, 建议 A 园区在相关领域适当增加绿色低碳发展资金。

2.4 建议

(1) 大力推动能源低碳转型。一是严格控制纺织印染、化工等主要用煤行业煤炭消费, 积极开发低能耗纺织、化工产品, 推广应用低温前处理、冷轧堆前处理和染色等节能技术。二是充分利用 A 园区所在区域的太阳能及风力资源较丰富、尚存大量可开发利用的土地这一优势积极发展可再生能源, 大力推广分布式光伏、分散式风电, 逐步提高可再生能源使用比重。

(2) 有序推进基础设施低碳化升级。低碳交通、建筑基础设施建设是 A 园区的一大弱项, 建议在交通方面大力推广新能源交通工具, 逐步提高充电桩覆盖范围, 持续调整和优化园区内公共交通网络。在建筑方面, 严格按照绿色建筑标准建设新建筑, 稳妥推进既有建筑的绿色低碳改造, 有序推广光伏发电与建筑一体化。

(3) 全面加强水资源节约高效利用。一是严格遵循以水定产的原则, 加强对纺织、食品等主要用水

企业定额管理,推动纺织、食品企业开展水平衡测试、水效对标及用水审计。二是优化取水结构,因华东地区降水充沛,建议A园区建立雨水集蓄利用、雨污分流等设施,加强管网建设,有效利用雨水资源。

3 结论

(1)从低碳产业、能源资源利用、减污降碳、低碳基础设施、长效管理5个维度构建了包含24个指标的工业园区低碳发展评价指标体系,将组合赋权法、TOPSIS-灰色关联分析模型、障碍度模型引入工业园区低碳发展评价领域,所形成的指标体系及评价方法符合工业园区低碳发展特征,可为“双碳”目标下工业园区低碳发展评价提供重要参考。

(2)将该指标体系及方法应用于A园区,结果表明,2018—2022年A园区低碳发展水平整体呈上升趋势,其中低碳产业、能源资源利用、长效管理准则的低碳发展趋势向好,减污降碳、低碳基础设施准则的低碳发展受阻。从障碍因素诊断结果来看,准则中制约A园区低碳发展的关键因素是减污降碳和能源资源利用,指标层中单位工业增加值碳排放量(C_9)、单位工业增加值综合能耗(C_3)、工业用水重复利用率(C_6)、单位工业增加值废水排放量(C_{12})、新建工业建筑中绿色建筑的比例(C_{15})的阻碍作用较为突出。研究结果客观,可为A园区制定低碳发展规划提供决策支持。

(3)本文构建的是一套具有普适性的工业园区低碳发展评价体系,所选指标多为工业园区共性指标,并未针对工业园区的产业特点设置更具针对性的评价指标,建议未来的相关研究可在本评价体系的基础上,按照产业类型对工业园区进行分类,为不同类型的工业园区增设一定的个性指标,以兼顾工业园区低碳发展评价的共性基础和个性特色。

参考文献

- [1] 谢华生, 常文韬, 樊在义, 等. 生态工业园低碳发展的指标与途径[J]. *中国环保产业*, 2010(10): 42-45.
XIE H S, CHANG W T, FAN Z Y, et al. Indicators and approaches of low-carbon development in eco-industrial parks[J]. *China Environmental Protection Industry*, 2010(10): 42-45.
- [2] 伍肆, 周宁, 王松林. 基于模糊评价集的工业园区低碳评价体系构建[J]. *中国人口·资源与环境*, 2013, 23(增刊2): 276-279.
WU S, ZHOU N, WANG S L. Establishment of low-carbon industrial parks evaluation system by fuzzy comprehensive evaluation set[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2013, 23(Suppl 2): 276-279.
- [3] 周娟. 低碳工业园区评价指标体系研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
- [4] 李晓静. 青岛市工业园区低碳发展评价与对策研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2015.
- [5] 马桂华. 广西工业园区低碳评价指标体系研究[D]. 南宁: 广西师范学院, 2017.
- [6] 霍震. 江苏省低碳园区评价指标体系研究[J]. *中国资源综合利用*, 2018, 36(8): 108-110.
HUO Z. Explore the evaluation system of low-carbon industrial parks in Jiangsu Province[J]. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2018, 36(8): 108-110.
- [7] LIU X, LIU H, CHEN J, et al. Evaluating the sustainability of marine industrial parks based on the dpsir framework[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 188: 158-170.
- [8] 张明博, 于梓涵, 高照琴, 等. “两高”产业园区规划环境影响评价指标体系构建研究[J]. *环境工程技术学报*, 2022, 12(6): 1788-1795.
ZHANG M B, YU Z H, GAO Z Q, et al. Development of the environmental impact assessment (EIA) index system for high-pollution and energy-intensive industrial park planning[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2022, 12(6): 1788-1795.
- [9] 王晶晶. 武汉市低碳产业园区指标体系研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2016.
- [10] 郑倩婧. 低碳城市建设成熟度评价研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
- [11] 邢雅因, 冯彬. 江苏省工业园区绿色发展评价方法及其应用[J]. *环境保护科学*, 2019, 45(6): 39-43.
XING Y N, FENG B. An evaluation method and its application of green development for the industrial parks in Jiangsu Province[J]. *Environmental Protection Science*, 2019, 45(6): 39-43.
- [12] 熊向艳, 韩永伟, 孟晓杰, 等. 黄河流域国家生态文明建设示范区发展水平测度及其时空差异[J]. *环境工程技术学报*, 2023, 13(4): 1304-1314.
XIONG X Y, HAN Y W, MENG X J, et al. Measurement of the development level and spatial-temporal differences of the National Ecological Civilization Construction Demonstration Areas in the Yellow River basin[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2023, 13(4): 1304-1314.
- [13] SUN F, LUO Y, SHEN J. Research on drainage rights allocation based on game combination weight-improved matter-element extension model[J]. *Water*, 2023, 15(11): 2044.
- [14] 杨占斌, 徐亚. 建设项目对文物遗迹综合环境影响的组合赋权方法研究[J]. *环境工程技术学报*, 2019, 9(3): 320-324.
YANG Z B, XU Y. A combination weighting method to evaluate the comprehensive environmental influence of construction project on cultural heritage[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2019, 9(3): 320-324.
- [15] 向治锦, 张庆, 吕庆, 等. 锌冶炼用氧化锌富集物再生综合效益评价[J]. *环境工程技术学报*, 2022, 12(4): 1245-1252.
XIANG Z J, ZHANG Q, LÜ Q, et al. Comprehensive benefit evaluation of zinc oxide enrichment regeneration for zinc smelting[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2022, 12(4): 1245-1252.
- [16] SHEN L, ZHANG Y, YAO M, et al. Combination weighting integrated with topsis for landscape performance evaluation: a case study of microlandscape from rural areas in southeast China[J]. *Sustainability*, 2022, 14(15): 9794.
- [17] 杨敏慧, 袁培炎, 罗天烈, 等. 基于层次分析法评估长江上游宜宾段工业园区环境风险[J]. *环境工程技术学报*, 2022, 12(2): 624-632.
YANG H M, YUAN P Y, LUO T L, et al. Assessment of the environmental risk of the industrial parks of Yibin section of the upper reaches of the Yangtze River based on analytic hierarchy process[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2022, 12(2): 624-632.
- [18] 易文杰, 李庄, 罗竹燕, 等. 水泥行业环境影响评价低碳技术选择与应用[J]. *环境工程技术学报*, 2022, 12(6): 1905-1914.
YI W J, LI Z, LUO Z Y, et al. Selection and application of low carbon technologies in environmental impact assessment of

- cement industry[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2022, 12(6): 1905-1914.
- [19] ROSTAMZADEH R, GHORABAEI M K, GOVINDAN K, et al. Evaluation of sustainable supply chain risk management using an integrated fuzzy topsis-critic approach[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 175: 651-669.
- [20] 张立军, 张潇. 基于改进 CRITIC 法的加权聚类方法[J]. *统计与决策*, 2015(22): 65-68.
- [21] 刘淑茹, 魏晓晓. 基于改进 CRITIC 法的西部地区新型城镇化水平测度[J]. *生态经济*, 2019, 35(7): 98-102.
LIU S R, WEI X X. Measurement of new urbanization level in western china based on improved CRITIC method[J]. *Ecological Economy*, 2019, 35(7): 98-102.
- [22] 刘传修, 张菁, 刘小康, 等. 基于 IVIF-AHP 与改进 CRITIC 法的配电网规划方案综合评估[J]. *控制工程*, 2022, 29(2): 322-329.
LIU C X, ZHANG J, LIU X K, et al. Comprehensive evaluation of distribution network planning scheme based on IVIF-AHP and improved CRITIC method[J]. *Control Engineering of China*, 2022, 29(2): 322-329.
- [23] 李刚, 李建平, 孙晓蕾, 等. 主客观权重的组合方式及其合理性研究[J]. *管理评论*, 2017, 29(12): 17-26.
LI G, LI J P, SUN X L, et al. Research on a combined method of subjective-objective weighing and the its rationality[J]. *Management Review*, 2017, 29(12): 17-26.
- [24] 李刚, 李建平, 孙晓蕾, 等. 兼顾顺序信息和强度信息的主客观组合赋权法研究[J]. *中国管理科学*, 2017, 25(12): 179-187.
LI G, LI J P, SUN X L, et al. Research on a combined method of subjective-objective weighting based on the ordered information and intensity information[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2017, 25(12): 179-187.
- [25] 阙剑锋, 蒋栋辉, 侯茂林, 等. 高铁车站新线引入施工与车站工作组织协同评价研究[J]. *中国铁路*, 2022(11): 115-122.
KAN J F, JIANG D H, HOU M L, et al. Research on synergetic evaluation of new line introduction and station operation organization of high speed railway station[J]. *China Railway*, 2022(11): 115-122.
- [26] 黄亚江, 李书全, 项思思. 基于 AHP-PSO 模糊组合赋权法的地铁火灾安全韧性评估[J]. *灾害学*, 2021, 36(3): 15-20.
HUANG Y J, LI S Q, XIANG S S. Evaluation of subway fire safety resilience based on AHP-PSO fuzzy combination weighting method[J]. *Journal of Catastrophology*, 2021, 36(3): 15-20.
- [27] 张群淑. 考虑全生命周期的深圳港绿色竞争力研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2021.
- [28] DING L, SHAO Z, ZHANG H, et al. A comprehensive evaluation of urban sustainable development in China based on the topsis-entropy method[J]. *Sustainability*, 2016, 8(8): 746.
- [29] 武春友, 郭玲玲, 于惊涛. 基于 TOPSIS-灰色关联分析的区域绿色增长系统评价模型及实证[J]. *管理评论*, 2017, 29(1): 228-239.
WU C Y, GUO L L, YU J T. Evaluation model and empirical study of regional green growth system based on TOPSIS and grey relational analysis[J]. *Management Review*, 2017, 29(1): 228-239.
- [30] 李海东, 王帅, 刘阳. 基于灰色关联理论和距离协同模型的区域协同发展评价方法及实证[J]. *系统工程理论与实践*, 2014, 34(7): 1749-1755.
LI H D, WANG S, LIU Y. Evaluation method and empirical research of regional synergetic development degree based on grey relational theory and distance collaborative model[J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2014, 34(7): 1749-1755.
- [31] 李刚, 李双元, 平建硕. 基于改进熵值 TOPSIS 灰色关联度模型的青海省乡村振兴评价及障碍因子分析[J]. *中国农业资源与区划*, 2021, 42(12): 115-123.
LI G, LI S Y, PING J S. Evaluation and obstacle factor analysis of rural revitalization in Qinghai Province based on improved entropy topsis gray correlayion model[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2021, 42(12): 115-123.
- [32] 许杨, 陈菁, 夏欢, 等. 基于 DPSIR-改进 TOPSIS 模型的淮安市水资源承载力评价[J]. *水资源与水工程学报*, 2019, 30(4): 47-52.
XU Y, CEHN J, XIA H. Evaluation of water resource carrying capacity in Huaian City based on DPSIR- improved TOPSIS model[J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2019, 30(4): 47-52.
- [33] 陈志霞, 徐杰. 基于 TOPSIS 与灰色关联分析的城市幸福指数评价[J]. *统计与决策*, 2021, 37(9): 59-62.
- [34] 王利利, 贾梦雨, 韩松, 等. 基于 TOPSIS-灰色关联度的农网投资效益与风险能力综合评价[J]. *电力科学与技术学报*, 2020, 35(4): 76-83.
WANG L L, JIA M Y, HAN S, et al. Synthesized evaluation of investment efficiency and risk ability of rural network based on TOPSIS-gray incidence[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2020, 35(4): 76-83.
- [35] 刘启君, 黄旻, 宋艺欣, 等. 基于灰色关联 TOPSIS 模型的武汉市环境承载力评价及障碍因子诊断[J]. *生态经济*, 2016, 32(5): 191-195.
LIU Q J, HUANG M, SONG Y X, et al. Evaluation on environmental carrying capacity of Wuhan City based on the gray correlation TOPSIS method and diagnosis of its obstacle indicators[J]. *Ecological Economy*, 2016, 32(5): 191-195.
- [36] 乐晖, 金文龙, 陈亢利. 长三角地区生态承载力评价: 以苏州市为例[J]. *环境工程技术学报*, 2023, 13(2): 725-732.
YUE H, JIN W L, CHEN K L. Evaluation of ecological carrying capacity in Yangtze River Delta: a case study of Suzhou City[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2023, 13(2): 725-732.
- [37] 徐志青, 刘雪瑜, 肖书虎, 等. 珠江三角洲地区水环境承载力评价及障碍因素研究[J]. *环境工程技术学报*, 2019, 9(1): 44-52.
XU Z Q, LIU X Y, XIAO S H, et al. Evaluation and obstacle factors study of water environmental carrying capacity in the Pearl River Delta[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2019, 9(1): 44-52.
- [38] 王君萍, 刘亚倩, 李善桑. “双碳”目标下区域绿色金融发展时空特征及障碍因子诊断[J]. *生态经济*, 2022, 38(10): 53-61.
WANG J P, LIU Y Q, LI S S. Spatio-temporal characteristics and diagnosis of obstacle factors of regional green finance development under the "double carbon" goal[J]. *Ecological Economy*, 2022, 38(10): 53-61.
- [39] 雷勋平, QIU R. 基于熵权 TOPSIS 模型的中国粮食安全评价及障碍因子诊断[J]. *中国农业大学学报*, 2022, 27(12): 1-14.
LEI X P, QIU R. Evaluation of food security in China based on entropy TOPSIS model and the diagnosis of its obstacle factors[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2022, 27(12): 1-14.
- [40] XIANG K, ZHENG N, CHEN J, et al. Evaluation and obstacle degree analysis of low-carbon development level in Fujian Province: based on entropy weight topsis method[J]. *Frontiers in Energy Research*, 2022, 10: 948893.
- [41] 毛峥. 后疫情时代, 产业园区何去何从: 2020 年产业园区发展报告[J]. *中国科技产业*, 2021(2): 47-49.
- [42] 宁晓刚. 太原市高新区低碳评价指标体系研究[D]. 太原: 山西大学, 2015.
- [43] 胡恩生. 江西省工业园区低碳化发展路径研究[D]. 南昌: 江西师范大学, 2015.
- [44] 高婕, 曾悦. 绿色经济理念的生态工业园区综合评价指标体系[J]. *华侨大学学报(自然科学版)*, 2015, 36(6): 698-703.
SHANG J, ZENG Y. Reserch on comprehensive evaluation of eco-industrial parks based on green economy[J]. *Journal of Huaqiao University (Natural Science)*, 2015, 36(6): 698-703. ⊕