

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202106034



# 引入熵值法的 GAHP 的综合性园区 绿色发展水平评价

林胜男, 郑亚梅, 荆国华, 申华臻, 吕碧洪

(华侨大学 化工学院, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 以湖北省荆州市荆州经济技术开发区为例,应用《国家生态工业示范区标准(HJ 274—2015)》等资料,利用引入熵值法的灰色层次分析法(GAHP),从污染排放与治理、资源消耗及利用、经济发展、绿色发展潜力 4 个层面量化分析综合性园区绿色发展水平;同时,剖析园区绿色发展的现存问题,并针对性提出优化建议.结果表明:2017—2019 年绿色发展综合评价等级为 6 级,表明该园区的绿色发展水平尚未成熟;荆州经济技术开发区的资源消耗及利用是影响绿色发展水平的主要因素,污染排放与治理次之;研究对比 GAHP 与引入熵值法的 GAHP,进一步验证文中模型的准确性及可行性.

**关键词:** 绿色发展水平;综合性园区;灰色层次分析法;熵值法;荆州经济技术开发区

中图分类号: X 322; F 427

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2022)05-0619-09

## Green Development Level Evaluation of Comprehensive Park Based on GAHP Introduced by Entropy Method

LIN Shengnan, ZHENG Yamei, JING Guohua,  
SHEN Huazhen, LÜ Bihong

(College of Chemical Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** Taking Jingzhou Economic and Technological Development Zone in Jingzhou City, Hubei Province as an example and applying the data of *National Ecological Industry Demonstration Zone Standards* (HJ 274-2015), the green development level of comprehensive park is quantitatively analyzed from four aspects such as pollution emission and governance, resource consumption and utilization, economic development, and green development potential using the grey analytic hierarchy process (GAHP) introduced by entropy method. At the same time, the existing problems of green development in the park are analyzed, and optimization suggestions are put forward. The results show that: the comprehensive evaluation grade of green development from 2017 to 2019 is level 6, indicating that the green development level of the park is not yet mature. Resource consumption and utilization of Jingzhou Economic and Technological Development Zone are the main factors affecting the level of green development, followed by pollution emission and governance. Moreover, the accuracy and feasibility of the model are further verified by comparing GAHP and GAHP introduced by entropy method.

**Keywords:** green development level; comprehensive park; grey analytic hierarchy process; entropy method; Jingzhou Economic and Technological Development Zone

收稿日期: 2021-06-27

通信作者: 吕碧洪(1985-),女,教授,博士,主要从事大气污染控制、新型二氧化碳捕集技术的研究. E-mail: lbh1225@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFC0214304)

综合性工业园区是资金、土地、高新技术的集中地,在促进经济发展、提升创新科技能力及推进城市化进程等方面具有举足轻重的地位<sup>[1]</sup>.然而,随着工业企业活动的集聚性发展,综合性园区环境污染日益凸显,具体表现为废气的间歇性与无组织排放、废水的成分复杂、固废处理困难等.上述污染的复杂性不仅增加了综合性园区环境管理的难度,同时对区域环境污染的管控也提出了新的挑战.

近年来,越来越多学者将绿色发展水平纳入园区的环境管理之中,助力园区实现绿色发展之路.已有文献采用模糊综合评价法<sup>[2-3]</sup>、网络松弛测度<sup>[4]</sup>、灰色关联法<sup>[5]</sup>、熵值法<sup>[6-9]</sup>、层次分析法(AHP)<sup>[10-11]</sup>等方法评估园区绿色发展水平.操露等<sup>[2]</sup>采用模糊评价法,综合评价水路运输企业绿色发展程度,从量化结果中对企业进行指导,改进自身的物流活动.Wang 等<sup>[4]</sup>从环境福利效率(EWE)的角度探讨中国工业的绿色发展水平,在数据包络分析基础上提出网络松弛测度的研究方法,结果表明,EWE 的提高将是实现中国工业绿色转型的关键.许烜等<sup>[5]</sup>采用灰色关联法,从资源、环境、生态、农村发展 4 个维度分析农业绿色发展水平,结果表明,资源指标对农业绿色发展有显著影响.张彩霞等<sup>[8]</sup>运用熵值法,从经济、资源、环境、科技及社会 5 个因素测度区域工业绿色发展水平,揭示 5 个因素对工业发展的影响.孙瑜等<sup>[9]</sup>利用熵值法测算 2004—2018 年苹果主产区的绿色发展水平,结果显示,该产区的绿色发展水平总体呈现 W 型波动.于连超等<sup>[10]</sup>从文化、战略、创新、投入、生产、排放 6 个维度建立工业企业绿色转型指标体系,同时采用 AHP 加权确定绿色转型程度,结果表明,绿色创新是实现绿色转型的关键.

部分学者为解决单一方法存在的主观性问题,采用多方法结合的评价模型,如熵值法-灰色关联法<sup>[12]</sup>、熵值法-层次分析法<sup>[13]</sup>等,或采用灰色理论与层次分析法相结合的灰色层次分析法(GAHP)<sup>[14-15]</sup>.邓建卫<sup>[12]</sup>为推动制造业高质量发展,利用熵值赋权的灰色关联法对苏州制造业进行分析,结果表明,对外开放、绿色发展指标在高质量发展中表现突出.Song 等<sup>[13]</sup>选取环境承载力相关的 3 个因素作为指标体系,运用熵值法和层次分析法评价陕西矿区绿色发展程度,结果显示,浅层地下水为主要影响因素.Qiu 等<sup>[15]</sup>构建经济、环境、资源、原料、科技 5 个维度的工业园区生态水平评价模型,采用 GAHP 对生态园区的生态水平进行定量评价,结果表明,园区可通过政策引导、吸引人才与提高绿色创新技术等策略,提高园区生态水平.

上述研究大多通过建立评价模型来进行绿色发展水平评价,较少使用熵值法与 GAHP 相结合的方法.此外,由于上述评价模型具有受用性广、简单易行等优点,在现阶段使用较为普遍,但仍存在一定的局限.在评价指标性质方面,研究大多偏向经济、资源、环境 3 个维度的评价,缺少绿色发展潜力指标,导致其评价不够全面;在权重分配方面,有的研究过于客观,采用数值繁琐的客观赋权法,有的又相对主观,以经验判断为主.为解决绿色发展水平评价模型的局限性,本文基于熵值法与 GAHP,构建以污染排放与治理、资源消耗及利用、经济发展、绿色发展潜力 4 个维度的绿色发展水平评价模型,以提高评价的全面性及准确性.

# 1 研究区概况与研究方法

## 1.1 研究区概况

荆州经济技术开发区(以下简称为荆经开区)位于湖北省荆州市,该区为装备制造、光电子信息、绿色化工、新能源、新材料、纺织印染及服装六大主导产业的综合性工业园区.根据商务部信息显示,在国家级开发区中,荆经开区在 2016—2019 年的综合排名逐年上升,其中,2019 年的排名为 44 位.

## 1.2 研究方法

GAHP 结合 AHP 和灰色理论的优势,在完成多目标决策的同时,兼顾因素之间的关联性,为决策者提供可靠的评价分析结果,可以有效解决综合性园区多目标决策与多因素评估问题.GAHP 一般通过专家评分构造判断矩阵计算权重值,其主观因素较强,缺乏大数据模式下针对园区绿色发展深度分析与应用的有效手段,因而其评价结果的准确性有待商榷.

熵值法是用以判断指标不确定性及离散程度的一种客观权重赋值法,它能有效利用数据包含的真实性,解决主观赋权法在多指标评价应用中存在的主观性问题.因此,构建熵值法与 GAHP 结合的评价方法对园区绿色发展水平进行评价,可有效降低 GAHP 结果的主观性,提升综合评价结果的可靠性与可信度,引入熵值法的 GAHP 建模步骤,如图 1 所示.

1.2.1 指标筛选 指标体系的构建是进行综合性园区绿色发展水平评价的前提, 基于《国家生态工业示范区标准(HJ 274—2015)》和发改委颁布的《绿色发展指标体系》, 从环境、资源、经济、发展潜力 4 个方面进行绿色发展水平评价指标的筛选, 具体描述如下。

1) 污染排放与治理. 控制好园区污染排放及加强环境治理是园区实现绿色发展的第一步<sup>[16]</sup>, 研究主要从园区废物排放及政府投资治理程度两个方面进行说明. 其下属的二级评价指标包括单位工业增加值废水排放量、固废及废气产生量<sup>[17]</sup>、工业污染治理投资占工业增加值比。

2) 资源消耗及利用. 在减量化、再利用和再循环原则下使资源得以最大程度的开发利用, 是实现综合性生态工业园区的绿色化、可持续化、高质量化<sup>[18]</sup>的重要途径, 主要体现在用地、能耗、用水和固废利用等方面. 其下属的二级评价指标包括单位工业用地面积工业增加值、单位工业增加值综合能耗、工业固体废物综合利用率、再生水回用率。

3) 经济发展. 经济发展用于反映当下园区的经济效益, 评价指标分为园区规模和运行效率两方面, 主要包括财务状况、生产效率和产品销售状况等<sup>[19]</sup>. 其下属的二级评价指标包括单位工业增加值固定资产投资消耗、规上工业增加值增速、社会消费品零售总额增速、出口创汇增速。

4) 绿色发展潜力. 绿色发展潜力可反映园区自身技术创新能力和绿化情况, 体现在园区的创新绩效和未来的创新绩效潜力两个方面<sup>[20]</sup>, 主要考察园区产值、发明专利数、研发经费投入<sup>[21]</sup>、研发人员<sup>[22]</sup>和绿化面积等. 其下属的二级评价指标包括高新企业总产值占工业总产值比、规上企业有效发明专利数、规上企业研发经费支出占主营收入比、规上企业 R&D 人员占从业人员比、绿化覆盖率。

1.2.2 绿色发展水平指标体系构建 根据上述指标筛选与 GAHP 的原理<sup>[23]</sup>, 研究完成综合性园区绿色发展水平指标体系的构建工作, 包含 4 个一级评价指标和 17 个二级评价指标. 绿色发展水平评价模型结构图, 如图 2 所示. 图 2 中:  $U$  为准则层指标  $U_i$  所组成的集合, 记  $U = \{U_1, U_2, U_3, U_4\}$ ;  $V$  为指标层指标  $V_{i,j}$  所组成的集合, 记  $V = \{V_{1,1}, V_{1,2}, \dots, V_{4,5}\}$ . 指标属性分为正向指标(+)和逆向指标(-), 正向指标的值越大, 表示评价结果越好; 逆向指标的值越小, 表示评价越好. 17 项二级指标中, 第 1, 2, 3, 6 项为逆向指标, 其余指标为正向指标。

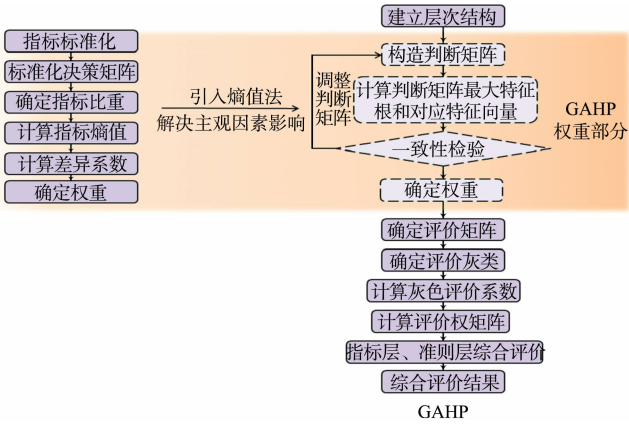


图 1 引入熵值法的 GAHP 建模步骤  
Fig. 1 Modeling steps of GAHP introduced by entropy method

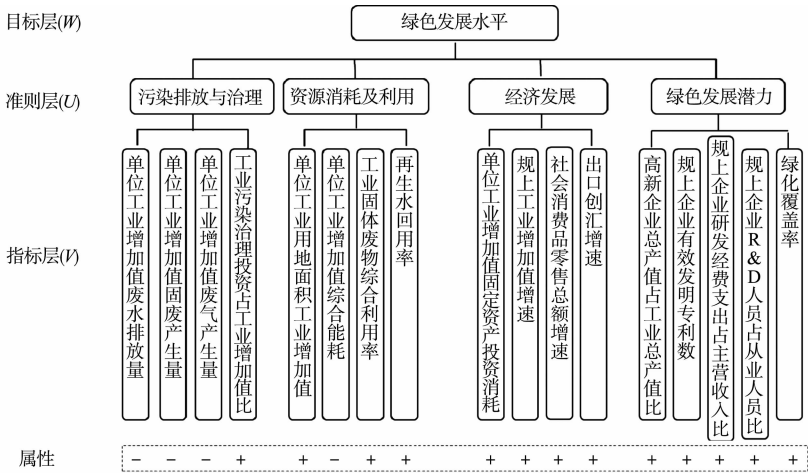


图 2 绿色发展水平评价模型结构图

Fig. 2 Structure chart of green development level evaluation model

1.2.3 GAHP 权重分配 GAHP 权重分配由 AHP 进行计算, 步骤见图 1. 首先, 比较各指标之间的关

系,构造两者重要程度关系的判断矩阵  $\mathbf{A}$ ,引入 1~9 比例标度法,对各指标进行相关度评定,标度值及其含义,如表 1 所示.判断矩阵  $\mathbf{A}$  表达式为

$$\mathbf{A}=\{V_{i,j}\}_{m\times n}=\begin{bmatrix}V_1&\cdots&V_{1,n}\\\vdots&&\vdots\\V_m&\cdots&V_{m,n}\end{bmatrix}.$$

(1)

其次,检验判断矩阵的一致性,计算一致性指标(CI)及判断矩阵的一致性比率(CR),且  $CR<0.10$ ,否则,需要调整判断矩阵,直到符合要求为止.CI 及 CR 的表达式为

$$CI=\frac{\lambda_{\max}-n}{n-1},$$

(2)

$$CR=\frac{CI}{RI}.$$

(3)

式(2),(3)中: $\lambda_{\max}$ 为判断矩阵  $\mathbf{A}$  的最大特征根; $n$  为矩阵阶数;RI 为随机指标.

最后,得到各指标对绿色发展水平评价目标的权重.GAHP 权重分配结果,如表 2 所示.表 2 中: $A_i$  为准则层指标的 GAHP 权重; $A'_i$  为准则层指标的引入熵值法的 GAHP 权重; $a_{i,j}$  为指标层指标的 GAHP 权重; $\omega_j$  为指标层指标的引入熵值法的 GAHP 权重.

表 2 GAHP 与引入熵值法的 GAHP 权重分配结果

Tab. 2 Weight distribution of GAHP and GAHP introduced by entropy method

$U_i$	$A_i$	$A'_i$	$V_{i,j}$	$a_{i,j}$	$\omega_j$	指标属性
污染排放与治理	0.28	0.25	单位工业增加值废水排放量	0.28	0.27	—
			单位工业增加值固废产生量	0.28	0.27	—
			单位工业增加值废气产生量	0.28	0.27	—
			工业污染治理投资占工业增加值比	0.16	0.19	+
资源消耗及利用	0.40	0.47	单位工业用地面积工业增加值	0.40	0.27	+
			单位工业增加值综合能耗	0.23	0.16	—
			工业固体废物综合利用率	0.14	0.29	+
			再生水回用率	0.23	0.28	+
经济发展	0.16	0.14	单位工业增加值固定资产投资消耗	0.33	0.15	+
			规上工业增加值增速	0.33	0.28	+
			社会消费品零售总额增速	0.17	0.29	+
			出口创汇增速	0.17	0.28	+
绿色发展潜力	0.16	0.14	高新企业总产值占工业总产值比	0.22	0.19	+
			规上企业有效发明专利数	0.22	0.19	+
			规上企业研发经费支出占主营收入比	0.22	0.22	+
			规上企业 R&D 人员占从业人员比	0.22	0.20	+
			绿化覆盖率	0.12	0.20	+

1.2.4 引入熵值法的 GAHP 权重分配 1) 指标层指标权重.根据发改委颁布的《绿色发展指标体系》要求,资源利用、环境治理、增长质量、绿色发展由其重要性,按照权数之比为 3 : 2 : 1 : 1 计算,得到污染排放与治理、资源消耗及利用、经济发展及绿色发展潜力的权重值分别为 0.25,0.47,0.14,0.14.

2) 准则层指标权重.基于构建的引入熵值法的 GAHP 建模方法,对二级评价指标进行权重分配.首先,根据图 2 划分的正向和逆向指标,对初始指标值进行标准化处理,并建立标准化决策矩阵  $\mathbf{B}$ ,即

$$\mathbf{B}=\{X_{i,j}\}_{m\times n}=\begin{bmatrix}X_1&\cdots&X_{1,n}\\\vdots&&\vdots\\X_m&\cdots&X_{m,n}\end{bmatrix},$$

(4)

$$X_{i,j}=\frac{x_{i,j}-\min x_j}{\max x_j-\min x_j},$$

(5)

$$X_{i,j}=\frac{\max x_j-x_{i,j}}{\max x_j-\min x_j}.$$

(6)

式(4)~(6)中: $\min x_j$  为  $j$  个指标层中数据的最小值; $\max x_j$  为  $j$  个指标层中数据的最大值; $X_{i,j}$  为第  $i$  项准则层指标第  $j$  个指标层指标经标准化处理后的结果.

在此基础上,计算指标层在准则层中的比重  $P_{i,j}$ ,指标熵值  $e_j$  与差异系数  $d_j$ .若计算中某个指标的熵值  $e_j$  趋于一致或全相等时,则该指标权重值为 0;当  $d_j=0$  时,其指标权重值也为 0,计算过程为

$$P_{i,j} = \frac{X_{i,j}}{\sum_{i=1}^m X_{i,j}}, \tag{7}$$

$$e_j = -\frac{1}{\ln n} \times \sum_{i=1}^m P_{i,j} \ln P_{i,j}, \tag{8}$$

$$d_j = 1 - e_j, \tag{9}$$

$$\omega_j = e_j / \sum_{j=1}^n e_j. \tag{10}$$

各指标的引入熵值法的 GAHP 权重分配结果,如表 2 所示.

1.2.5 绿色发展水平综合评价 首先,邀请专家(序号为  $m, m=1,2,\cdots,p$ )对各个评价指标按评价等级进行打分,并形成样本矩阵  $\boldsymbol{D}$ ,即

$$\boldsymbol{D} = \begin{bmatrix} d_{1,1,1} & d_{1,1,2} & \cdots & d_{1,1,p} \\ d_{i,j,1} & d_{i,j,2} & \cdots & d_{i,j,p} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ d_{4,5,1} & d_{4,5,2} & \cdots & d_{4,5,p} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{1,1} \\ V_{1,2} \\ \vdots \\ V_{4,5} \end{bmatrix}. \tag{11}$$

其次,确定 4 个评价灰类  $e, e$  为 1,2,3,4 分别表示优、良、中、差 4 个评价等级.其中,灰数是知道范围的不确定数,常用符号“ $\boxtimes$ ”表示,如 $\boxtimes(b)$ 表示灰数  $b$  的灰域为 $[b^-, b^+]$ .评价灰类  $e$  的白化权函数表示为  $f_e(d_{i,j,m})^{[24]}$ .通过灰类等级情况确定灰数、白化权函数及图像,结果如表 3 所示.

表 3 灰数、白化权函数及图像

Tab. 3 Gray number, whitening weight functions and images

灰类	灰数	白化权函数表达式	图像
优 ( $e=1$ )	$\boxtimes 1 \in [4, \infty)$	$f_1(d_{i,j,m}) = \begin{cases} d_{i,j,m}/4, & 0 \leq d_{i,j,m} \leq 4 \\ 1, & d_{i,j,m} > 4 \\ 0, & d_{i,j,m} < 0 \end{cases}$	
良 ( $e=2$ )	$\boxtimes 2 \in [3, \infty)$	$f_2(d_{i,j,m}) = \begin{cases} d_{i,j,m}/3, & 0 \leq d_{i,j,m} \leq 3 \\ (6-d_{i,j,m})/3, & 3 < d_{i,j,m} \leq 6 \\ 0, & d_{i,j,m} < 0 \text{ 或 } d_{i,j,m} > 6 \end{cases}$	
中 ( $e=3$ )	$\boxtimes 3 \in [2, \infty)$	$f_3(d_{i,j,m}) = \begin{cases} d_{i,j,m}/2, & 0 \leq d_{i,j,m} \leq 2 \\ (4-d_{i,j,m})/2, & 2 < d_{i,j,m} \leq 4 \\ 0, & d_{i,j,m} < 0 \text{ 或 } d_{i,j,m} > 4 \end{cases}$	
差 ( $e=4$ )	$\boxtimes 4 \in [1, \infty)$	$f_4(d_{i,j,m}) = \begin{cases} 1, & 0 \leq d_{i,j,m} \leq 1 \\ 2-d_{i,j,m}, & 1 < d_{i,j,m} \leq 2 \\ 0, & d_{i,j,m} < 0 \text{ 或 } d_{i,j,m} > 2 \end{cases}$	

在表 3 的基础上,对指标层指标的灰色评价系数  $x_{i,j,e}$ ,总灰色评价系数  $x_{i,j}$ ,4 个灰类等级下的评价系数  $r_{i,j,e}$ ,灰色评价权向量  $\boldsymbol{r}_{i,j}$ ,指标层指标的灰色评价权矩阵  $\boldsymbol{R}_i$ ,指标层综合评价值  $\boldsymbol{Q}_i$ ,准则层指标的灰色评价权矩阵  $\boldsymbol{R}$  和准则层综合评价值  $\boldsymbol{Q}$  进行计算,最终得到综合评价值  $\boldsymbol{W}$ ,即

$$x_{i,j,e} = \sum_{m=1}^p f_e(d_{i,j,m}), \quad x_{i,j} = \sum_{e=1}^4 x_{i,j,e}, \tag{12}$$

$$r_{i,j,e} = \frac{x_{i,j,e}}{x_{i,j}}, \tag{13}$$

$$\boldsymbol{r}_{i,j} = (r_{i,j,1}, r_{i,j,2}, r_{i,j,3}, r_{i,j,4}), \tag{14}$$

$$\mathbf{R}_i = \begin{bmatrix} r_{i,1} \\ r_{i,2} \\ \vdots \\ r_{i,j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{i,1,1} & r_{i,1,2} & r_{i,1,3} & r_{i,1,4} \\ r_{i,2,1} & r_{i,2,2} & r_{i,2,3} & r_{i,2,4} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{i,j,1} & r_{i,j,2} & r_{i,j,3} & r_{i,j,4} \end{bmatrix}, \tag{15}$$

$$\mathbf{Q}_i = a_{i,j} \cdot \mathbf{R}_i = (q_{i,1}, q_{i,2}, q_{i,3}, q_{i,4}) \text{ 或 } \mathbf{Q}_i = \omega_j \cdot \mathbf{R}_i = (q_{i,1}, q_{i,2}, q_{i,3}, q_{i,4}), \tag{16}$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_1 \\ \mathbf{Q}_2 \\ \mathbf{Q}_3 \\ \mathbf{Q}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_{1,1} & q_{1,2} & q_{1,3} & q_{1,4} \\ q_{2,1} & q_{2,2} & q_{2,3} & q_{2,4} \\ q_{3,1} & q_{3,2} & q_{3,3} & q_{3,4} \\ q_{4,1} & q_{4,2} & q_{4,3} & q_{4,4} \end{bmatrix}, \tag{17}$$

$$\mathbf{Q} = A_i \cdot \mathbf{R} = (q_1, q_2, q_3, q_4) \text{ 或 } \mathbf{Q} = A'_i \cdot \mathbf{R} = (q_1, q_2, q_3, q_4), \tag{18}$$

$$\mathbf{W} = \mathbf{Q} \cdot (4, 3, 2, 1)^\top. \tag{19}$$

基于上述综合评价计算步骤,可以得出对应的综合评价结果取值范围与等级划分,如表 4 所示.

表 4 综合评价结果取值范围与等级划分

Tab. 4 Value range and grade division of comprehensive evaluation results

<i>e</i>	等级	<i>W</i>	<i>e</i>	等级	<i>W</i>
[1.0,1.5)	6 级	[1.920,2.353)	[2.5,3.0)	3 级	[2.943,3.111)
[1.5,2.0)	5 级	[2.353,2.769)	[3.0,3.5)	2 级	[3.111,3.319)
[2.0,2.5)	4 级	[2.770,2.943)	[3.5,4.0]	1 级	[3.319,3.600]

2 评价结果与讨论

2.1 模型诊断

基于引入熵值法的 GAHP 的权重分配结果,分别对荆经开区进行绿色发展水平研究.以 2019 年为例,首先由园区管理、审计、规划、环境、安全 5 个部门的专家,对二级评价指标进行打分,形成初步的样本矩阵 *D*,即

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 2.0 & 2.5 & 2.0 & 2.5 & 2.0 \\ 1.0 & 1.0 & 1.5 & 1.0 & 1.5 \\ 1.0 & 1.0 & 1.0 & 1.0 & 1.5 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 2.0 & 2.5 & 2.0 & 2.5 & 2.0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{1,1} \\ V_{1,2} \\ V_{1,3} \\ \vdots \\ V_{4,5} \end{bmatrix}. \tag{20}$$

然后,计算该矩阵的灰色评价权与总灰色评价系数,结果如表 5 所示.

表 5 灰色评价权与总灰评价系数结果

Tab. 5 Results of grey evaluation weight and total grey evaluation coefficient

二级评价指标	灰色评价权				<i>x<sub>i,j</sub></i>	二级评价指标	灰色评价权				<i>x<sub>i,j</sub></i>
	<i>r<sub>i,j,1</sub></i>	<i>r<sub>i,j,2</sub></i>	<i>r<sub>i,j,3</sub></i>	<i>r<sub>i,j,4</sub></i>			<i>r<sub>i,j,1</sub></i>	<i>r<sub>i,j,2</sub></i>	<i>r<sub>i,j,3</sub></i>	<i>r<sub>i,j,4</sub></i>	
<i>V<sub>1,1</sub></i>	0.252	0.336	0.412	0	10.920	<i>V<sub>3,2</sub></i>	0.187	0.250	0.375	0.187	10.670
<i>V<sub>1,2</sub></i>	0.143	0.190	0.286	0.381	10.490	<i>V<sub>3,3</sub></i>	0.120	0.159	0.240	0.481	10.400
<i>V<sub>1,3</sub></i>	0.132	0.174	0.263	0.431	10.445	<i>V<sub>3,4</sub></i>	0.262	0.350	0.388	0	10.995
<i>V<sub>1,4</sub></i>	0.198	0.265	0.397	0.140	10.715	<i>V<sub>4,1</sub></i>	0.294	0.390	0.316	0	11.070
<i>V<sub>2,1</sub></i>	0.165	0.220	0.331	0.283	10.580	<i>V<sub>4,2</sub></i>	0.154	0.205	0.308	0.332	10.535
<i>V<sub>2,2</sub></i>	0.154	0.205	0.308	0.332	10.535	<i>V<sub>4,3</sub></i>	0.177	0.235	0.353	0.235	10.625
<i>V<sub>2,3</sub></i>	0.253	0.373	0.374	0	10.690	<i>V<sub>4,4</sub></i>	0.143	0.190	0.286	0.381	10.490
<i>V<sub>2,4</sub></i>	0.154	0.205	0.308	0.332	10.535	<i>V<sub>4,5</sub></i>	0.154	0.205	0.308	0.332	10.535
<i>V<sub>3,1</sub></i>	0.132	0.174	0.263	0.431	10.345						

在表 5 的基础上,分别对污染排放与治理、资源消耗及利用、经济发展、绿色发展潜力 4 个准则层面进行综合评价计算,即

$$\mathbf{Q}_1 = A'_1 \cdot \mathbf{R}_1 = (0.180, 0.240, 0.335, 0.246), \tag{21}$$

$$Q_2=A'_2\cdot R_2=(0.186,0.258,0.334,0.223),\tag{22}$$

$$Q_3=A'_3\cdot R_3=(0.107,0.142,0.214,0.255),\tag{23}$$

$$Q_4=A'_4\cdot R_4=(0.183,0.244,0.315,0.258),\tag{24}$$

$$Q=(0.173,0.235,0.315,0.238),\tag{25}$$

$$W=Q\cdot(4,3,2,1)^T=2.264.\tag{26}$$

同理,基于上述步骤,使用 GAHP 进行模型验证,计算结果为

$$Q_1=A_1\cdot R_1=(0.179,0.238,0.333,0.250),\tag{27}$$

$$Q_2=A_2\cdot R_2=(0.172,0.235,0.327,0.266),\tag{28}$$

$$Q_3=A_3\cdot R_3=(0.125,0.167,0.251,0.286),\tag{29}$$

$$Q_4=A_4\cdot R_4=(0.187,0.249,0.315,0.248),\tag{30}$$

$$Q=(0.169,0.227,0.314,0.262),\tag{31}$$

$$W=Q\cdot(4,3,2,1)^T=2.249.\tag{32}$$

2017—2019 年园区绿色发展水平综合评价值的变化趋势,如图 3 所示.由图 3 可知:采用引入熵值法的 GAHP 计算得到 2017—2019 年园区绿色发展水平综合评价值分别为 2.256,2.130,2.264;采用 GAHP 计算得到的结果分别 2.311,2.106,2.249,两种方法的评价结果均属于 6 级(1.920<W<2.353)范围,整体趋势均呈现 U 型,且 2018 年绿色发展水平综合评价值最低.

因此,GAHP 与引入熵值法的 GAHP 的等级与趋势具有一致性,可进一步验证引入熵值法的 GAHP 评价模型的准确性和可靠性.同时,引入熵值法的 GAHP 运行简便,且符合园区绿色发展结果的动态性特点,具有更好的适用性.但是该模型仍有不足之处,如数据量偏少,计算结果存在一定的误差等.

2.2 园区绿色发展水平综合评价分析

对引入熵值法的 GAHP 的结果进行分析.由图 3 可知:荆经开区 2017—2019 年绿色发展水平综合评价等级均属于 6 级,表明该园区绿色发展水平尚未成熟.其中,2018 年的综合评价值降为 2.106,主要原因是园区受到中美贸易战负面效应影响显著,招商项目无突破等,使经济受到巨大冲击,导致准则层中经济发展指标的评分在 2018 年降到最低,综合评价结果也随之下降.随后,该园区提出应对中美贸易战策略,提升园区经济,因此,2019 年的综合评价结果得到回升.

结合表 2 指标量化的结果,分析荆经开区绿色发展水平综合评价结果较低的原因有以下 4 个方面.

1) 从污染排放与治理的角度来看,单位工业增加值废水排放量、废气产生量、固废产生量的  $\omega_j$  均为 0.27( $\omega_j$  高于平均权重值 0.25,1/4=0.25);根据《第二次全国污染源普查公报》显示,荆经开区污染物排放量在荆州总污染物排放量中的占比高达 47%,且园区在 2017—2019 年的单位工业增加值三废排放量均未达到绿色发展的合格基准值,表明园区三废污染严重,污染防控措施未得到显著的效果.由此可知,三废污染物的严重排放对绿色发展水平综合评价结果影响较大,是阻碍园区绿色发展水平提升的问题之一.

2) 从资源消耗及利用的角度看,单位工业用地面积工业增加值、工业固体废物综合利用率、再生水回用率的  $\omega_j$  分别为 0.27,0.29,0.28( $\omega_j$  均高于平均权重值 0.25,1/4=0.25),但园区在这 3 个指标中表现良好,对绿色发展结果影响较为稳定.虽然单位工业增加值的综合能耗权重值较低( $\omega_j=0.16$ ),但从实地调研中发现,园区化石能源相对于清洁能源的使用占比更大,化石能源燃烧产生一系列环境问题,会进一步影响园区绿色发展.

3) 从经济发展的角度来看,规上工业增加值增速、社会消费品零售总额增速、出口创汇增速的  $\omega_j$  分别为 0.28,0.29,0.28( $\omega_j$  均高于平均权重值 0.25,1/4=0.25),且荆经开区抵抗外界不良经济因素

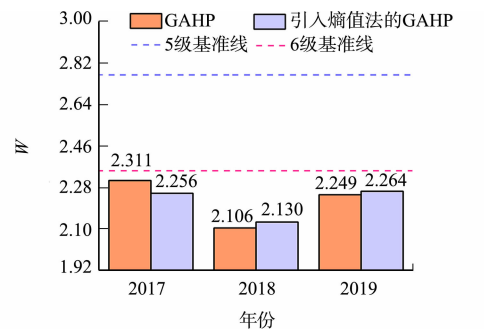


图 3 2017—2019 年园区绿色发展水平综合评价值的变化趋势  
Fig. 3 Change trend of comprehensive evaluation value of green development level in park from 2017 to 2019



影响的能力弱,以上 3 个指标易受到国际贸易战略等外部经济环境的影响,导致评价结果波动较大. 因此,未能有效抵抗外界经济发展阻力是影响园区绿色发展的问题之一.

4) 从绿色发展潜力的角度来看,规上企业研发经费支出占主营收入比的 $\omega_j$ 为 0.22( $\omega_j$  高于平均权重值 0.20,  $1/5=0.20$ ). 且根据《国家生态工业示范区标准(HJ 274—2015)》和文献调研显示,规上企业研发经费支出占主营收入比达到 2%,是园区企业生存的基本,达到 5%以上才符合绿色发展的要求,而园区 2017—2019 年的规上企业研发经费支出占主营收入比分别为 2.81%,2.43%,3.16%. 由此可见,该园区存在研发经费投入不足的问题,导致未能及时学习并利用国内外先进核心技术,因此,园区技术停滞不前,影响园区绿色发展.

2.3 园区绿色发展水平优化建议

基于上述园区存在的污染排放严重、经济发展阻力大、研发经费投入不足等问题,结合园区现有的政策及措施方案,提出以下优化建议.

1) 控制污染排放. 在政策方面,园区企业需严格遵守三废污染物排放标准;在设施方面,升级改造污染物集中治理设施,搭建智慧园区环境管理服务平台,提供污水、固废和烟气治理、管家式环境综合治理服务;并且在能源使用方面,建议考虑使用清洁能源,调整能源结构,实现园区碳中和、碳达峰的目标.

2) 优化经济管理. 为应对国际、国内经济环境突变,首先,应合理规划布局,立足于以国内大循环为主体、畅通国际国内双循环的发展战略,做好规划定位,科学编制规划内容,明确园区建设重点,形成经济战略优势;其次,培养特色产业,园区可采取产业集群式发展模式,突出特色主导产业,形成园区支柱产业的核心竞争力,加速推进经济增长.

3) 合理布局资金投放占比. 首先,园区企业可倡导入驻发展前景好、潜力大的项目,搭建创新创业融资服务平台,以此推动园区实体企业融资效率,提升资本增值能力;其次,形成项目-园区投资资金循环,进而加大园区污染治理投资、研发经费的投放;同时,建议园区企业形成高校、科研机构和企业三方的紧密协作网,促进高校人才引进,为企业提供一定的技术支持,从而加快园区企业技术创新、改善生产工艺,提升对污染物的处理能力,达到绿色发展.

3 结束语

研究依照《国家生态工业示范区标准(HJ 274—2015)》,从污染排放与治理、资源消耗及利用、经济发展、绿色发展潜力 4 个层面进行绿色发展水平评价模型的构建与研究. 通过引入熵值法的 GAHP 进行评价模型的构建,并以荆州经济技术开发区为例,最终计算得到园区 2017—2019 年的综合评价结果分别为 2.256,2.130,2.264,绿色发展水平等级均为 6 级,资源消耗及利用为影响绿色发展水平的主要因素,环境排放与治理次之;将 GAHP 与引入熵值法的 GAHP 两种方法进行对比,进一步验证了文中模型的准确性和可行性;同时,从 4 个准则层面剖析了园区的现存问题,提出了具有针对性的绿色发展建议. 研究从绿色发展的角度出发,为综合性园区的绿色评估提供了理论支撑,同时为其综合管控与优化提供了有效助力,帮助园区实现绿色与可持续发展.

参考文献:

[1] KAHN M E,SUN Weizeng,WU Jianfeng,*et al.* Do political connections help or hinder urban economic growth? Evidence from 1,400 industrial parks in China[J]. *Journal of Urban Economics*,2021,121(C):103289. DOI:10.1016/j.jue.2020.103289.

[2] 操露,刚蕾,金莹. 水路运输企业物流绿色度评价指标研究[J]. *物流科技*,2012,35(3):78-81. DOI:10.3969/j.issn.1002-3100.2012.03.024.

[3] ZHOU Li,GUO Jian,ZHU Jie. Comparative study on the comprehensive evaluation of green logistics development level of China and Beijing[J]. *Journal of Applied Science and Engineering Innovation*,2014,1(7):406-411.

[4] WANG Xiping,LI Yanmei. Research on measurement and improvement path of industrial green development in China: A perspective of environmental welfare efficiency[J]. *Environmental Science and Pollution Research*,2020,27(34):42738-42749. DOI:10.1007/s11356-020-09979-4.



[5] 许烜,宋微.乡村振兴视域下农业绿色发展评价研究[J].学习与探索,2021(3):130-136.

[6] 苏卉,党楠.我国出版产业高质量发展水平测度[J].统计与决策,2021,37(10):57-60. DOI:10.13546/j.cnki.tjyj.2021.10.012.

[7] 纪玉俊,王雪.新时代背景下我国制造业的高质量发展评价研究[J].青岛科技大学学报(社会科学版),2019,35(2):24-34. DOI:10.16800/j.cnki.jqustss.2019.02.024.

[8] 张彩霞,马春旺.区域工业绿色发展水平评价指标体系研究[J].统计与管理,2021,6(1):108-113. DOI:10.16722/j.issn.1674-537x.2021.01.017.

[9] 孙瑜,甘雪,鹿永华.基于熵值法的苹果主产区绿色发展水平评价研究[J].林业经济,2020,42(9):87-96. DOI:10.13843/j.cnki.lyjj.20201217.004.

[10] 于连超,毕茜,张卫国.工业企业绿色转型评价体系构建[J].统计与决策,2019,35(14):186-188. DOI:10.13546/j.cnki.tjyj.2019.14.044.

[11] CHEN Yitong,HU Shanying,CHEN Dingjiang,*et al.* An evaluation method of green development for chemical enterprises[J]. Sustainability,2019,11(22):6491(1-16). DOI:10.3390/su11226491.

[12] 邓建卫.苏州制造业高质量发展研究与展望:基于熵值赋权的灰色关联分析[J].统计科学与实践,2021(1):41-44.

[13] SONG Shijie,ZHANG Jinsuo,ZHANG Wei,*et al.* Study on the measurement index system of green development degree in Coal Mining Area based on comprehensive environmental capacity[J]. Advanced Materials Research,2015,1073/1074/1075/1076:2493-2498. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMR.1073-1076.2493.

[14] 陈红莉.基于灰色多层次评价模型的乳业绿色供应链绩效研究[J].石河子科技,2019(6):22-25. DOI:10.3969/j.issn.1008-0899.2019.06.009.

[15] QIU Baolin,LUO Dongkun. A grey multi-level evaluation of industrial park ecology based on a coefficient of variation-attribute hierarchy model[J]. Sustainability,2021,13(4):1805(1-22). DOI:10.3390/SU13041805.

[16] SONG Li,ZHOU Xiaoliang. Does the green industry policy reduce industrial pollution emissions? : Evidence from China's national eco-industrial park[J]. Sustainability,2021,13(11):6343(1-22). DOI:10.3390/SU13116343.

[17] 魏乾润.化工三废处理及未来化工绿色环保发展方向[J].化工设计通讯,2020,46(7):240,246. DOI:10.3969/j.issn.1003-6490.2020.07.155.

[18] 马卫平,闫亚丽.3R原则下生态工业园区环境评价指标体系的构建[J].节能,2020,39(9):110-112.

[19] 倪颖.长江经济带工业绿色发展水平评价及影响因素研究[D].重庆:重庆工商大学,2020.

[20] 李亨,谷潇磊,张琳,等.2019年国家高新区综合发展与数据分析报告(一)[J].中国科技产业,2020(12):42-53. DOI:10.16277/j.cnki.cn11-2502/n.2020.12.027.

[21] AARSTAD J,KVITASTEIN O A. Enterprise R&D investments, product innovation and the regional industry structure[J]. Regional Studies,2020,54(3):366-376. DOI:10.1080/00343404.2019.1624712.

[22] BAE S J,HAN Sangyun. The impact of R&D workforce diversity on firm's performance in internal and external R&D[J]. European Journal of Innovation Management,2020,23(3):454-473. DOI:10.1108/EJIM-09-2018-0204.

[23] YANG Liguo,LI Chaoling,LU Lin,*et al.* Evaluation of port emergency logistics systems based on grey analytic hierarchy process[J]. Journal of Intelligent and Fuzzy Systems,2020,39(3):4749-4761. DOI:10.3233/JIFS-200674.

[24] 韩嘉炜,陈海群.从层次灰色理论视角探讨化工企业生产安全评价[J].工业安全与环保,2021,47(1):58-61,65.

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:刘源岗)