

## ◆减污降碳协同与资源全元素高效利用◆

基于AHP法的多产业园区低碳化评价指标体系研究及  
案例分析——以云南省楚雄高新区为例李懿琨<sup>1</sup>, 杨皓澄<sup>1</sup>, 杨绍香<sup>1</sup>, 王 访<sup>1</sup>, 宁 平<sup>2</sup>, 李 彬<sup>2</sup>, 钱文敏<sup>3</sup>, 王 盼<sup>3</sup>, 贾丽娟<sup>1</sup>(1. 云南民族大学 化学与环境学院, 云南 昆明 650504; 2. 昆明理工大学 环境科学与工程学院, 云南 昆明 650500;  
3. 云南省生态环境工程评估中心, 云南 昆明 650228)

**[摘要]** 为实现多产业园区绿色低碳发展目标, 科学评估其低碳化水平对推进减污降碳协同治理具有重要意义。本文基于层次分析法(AHP), 构建包含碳排放标准、资源利用、能源利用、环境管理与低碳管理5个一级指标和24个二级指标的评价体系, 并依据国家园区低碳运行管理规范建立综合评价模型。以云南省楚雄高新技术产业开发区为例, 通过德尔菲法确定指标权重并开展实证分析。结果显示, 权重排名前三的指标依次为单位工业增加值碳排放强度(20.86%)、单位产量碳排放强度(13.41%)和单位工业产值化石能源能耗(12.59%), 表明评价体系重点突出碳排放与能耗控制, 契合园区绿色低碳发展导向。园区低碳化评价结果显示, 46.67%的企业处于中等及以上水平, 不及格率为16.67%, 反映园区碳排放管控初见成效。据此, 建议后续从构建系统化资源循环体系、健全低碳管理机制等方面重点突破, 以提升园区整体低碳发展水平, 为同类产业园区绿色转型提供参考。

**[关键词]** AHP法; 低碳化评价; 多产业园区; 楚雄高新区**[中图分类号]** X321 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 2097-4566 (2026) 02-0078-08**Research on the low-carbon evaluation index system for multi-industrial parks based on the AHP method and a case study: evidence from Chuxiong High-Tech Industrial Development Zone, Yunnan province**LI Yikun<sup>1</sup>, YANG Haocheng<sup>1</sup>, YANG Shaoxiang<sup>1</sup>, WANG Fang<sup>1</sup>, NING Ping<sup>2</sup>, LI Bin<sup>2</sup>, QIAN Wenmin<sup>3</sup>,  
WANG Pan<sup>3</sup>, JIA Lijuan<sup>1</sup>

(1. School of Chemistry and Environment, Yunnan Minzu University, Kunming 650504, China;

2. Faculty of Environmental Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China; 3. Yunnan Appraisal Center for Ecological and Environmental Engineering, Kunming 650228, China)

**Abstract:** To achieve the green and low-carbon development goals of multi-industrial parks, scientifically assessing their low-carbon levels is of great significance for promoting the coordinated governance of pollution reduction and carbon emission reduction. An evaluation system based on the AHP method is constructed, which includes five first-level indicators: carbon emission standards, resource utilization, energy utilization, environmental management and low-carbon management, as well as 24 second-level indicators. It also establishes a comprehensive evaluation model in accordance with the national low-carbon operation and management norms for industrial parks. Taking the Chuxiong High-Tech Industrial Development Zone in Yunnan province as an example, the index weights are determined by the Delphi method and empirical analysis is carried out. The results show that the top three indicators in terms of weight ranking are carbon emission intensity per unit of industrial added value (20.86%), carbon emission intensity per unit of output (13.41%),

收稿日期:2025-12-11

作者简介:李懿琨(2000—),男,四川绵竹人,在读硕士研究生,研究方向为环境分析与污染修复。

通信作者:贾丽娟(1985—),女,河南南阳人,博士,教授,博/硕士研究生导师,研究方向为化工/冶金行业烟气湿法净化技术、有色冶炼行业固体废物资源化。

基金项目:国家自然科学基金面上项目“高氯锌灰碱法提锌协同钢铁生泥焙烧烟气脱硫固碳研究”(22476171);云南省科技计划项目重点研发计划“多产业园区低碳化发展技术路径研究”(202403AC100027-1);云南省科技计划项目重点研发计划“微藻培养基循环使用及生产废水零排放研究”(202303AC100002-03)

and fossil energy consumption per unit of industrial output value (12.59%), indicating that the evaluation system focuses on carbon emission and energy consumption control, which is in line with the green and low-carbon development orientation of the park. The evaluation results of the low-carbonization of the park show that 46.67% of the enterprises are at a medium or above level, and the failure rate is 16.67%, reflecting that the carbon emission control of the park has achieved initial results. Based on this, it is suggested that breakthroughs should be made in key areas such as building a systematic resource recycling system and improving a low-carbon management mechanism in the future, in order to enhance the overall low-carbon development level of the park and provide a reference for the green transformation of similar industrial parks.

**Key words:** analytic hierarchy process (AHP); low-carbon evaluation; multi-industrial parks; Chuxiong High-Tech Industrial Development Zone

## 0 引言

实现碳达峰碳中和是我国推动绿色低碳转型的重大战略决策<sup>[1-2]</sup>。工业园区作为工业企业集聚、产业活动集中的空间载体,能源消耗与温室气体排放高度集中,是落实“双碳”目标、构建绿色低碳产业体系的关键抓手<sup>[3]</sup>。推动工业园区低碳化发展,有助于突破传统“高生产、高消耗、高排放”模式,带动产业结构、能源结构、交通运输结构与用地结构系统转型<sup>[4-6]</sup>,对构建新发展格局、提升园区绿色竞争力、支撑经济社会高质量可持续发展具有重要作用<sup>[7-8]</sup>。云南省作为我国西南生态安全屏障与低碳转型重点区域,其工业园区在促进区域经济增长的同时,也面临能源消耗密集、碳排放强度高、污染排放集中等问题,亟须通过绿色低碳转型实现减污降碳协同增效<sup>[9-10]</sup>。特别是云南地处高原山区,生态环境敏感,工业园区的空间布局与产业结构具有鲜明地域特征,其低碳进程对筑牢区域生态屏障、落实国家战略具有特殊意义。楚雄高新技术产业开发区是云南省首家设立于少数民族自治州的国家级高新区,产业以烟草、冶金、化工、建材、生物医药等为主,初步形成具有高原特色的产业体系,具有较强的典型性与代表性。然而,受高原复杂地形气候条件制约,园区环境承载力有限,仍面临清洁能源供应不稳、传统产业绿色改造滞后、减污降碳协同机制不健全等瓶颈<sup>[11]</sup>。因此,系统开展高原地区多产业园区的低碳化评价研究,构建科学合理的评价指标体系,识别关键问题与转型路径,对形成可复制、可推广的绿色低碳园区建设模式具有重要现实意义。

科学评价工业园区的低碳化水平,是推动其绿色转型的重要基础。当前研究中,系统动力学(System Dynamics)模型<sup>[12]</sup>、拓扑先验模型(Topology Prior Model)<sup>[13]</sup>等方法被广泛用于分析工业园区在减排潜力、工业增加值等绿色发展绩效与经济发展

水平方面的关系<sup>[14-19]</sup>。然而,在面向产业结构复杂、功能多元的复合型工业园区时,现有方法在评价体系的系统性、适用性与可推广性方面仍存在一定局限。系统动力学模型虽能有效模拟多因素交互与动态演化过程,但对数据连续性和模型精度要求较高,操作复杂;拓扑先验模型虽可刻画系统结构关系,但在指标权重确定方面主观性较强,普适性有限。相较而言,层次分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP)具备良好的系统结构与逻辑分层能力,能够将复杂评价问题分解为目标层、准则层和指标层,并结合德尔菲法(Delphi)进行专家意见集成,从而科学确定各层级指标的权重系数,兼顾定性判断与定量分析的优势<sup>[20-23]</sup>。

基于多产业园区低碳评价的实际需求与方法特点,本研究选用AHP法作为核心方法框架,构建包含三级指标的评价体系,实现多产业园区低碳化水平的标准化、可量化评价,为识别薄弱环节、明确提升路径提供方法依据,也为推进同类园区的绿色低碳转型提供实践参考。

## 1 多产业园区低碳化评价指标体系构建

### 1.1 评价体系的指标选取

多产业园区低碳化评价指标体系的构建,应立足于环境、资源与管理等要素之间的系统性、协调性与可持续性,以区域环境承载力为基础,以可持续发展为目标,推动园区实现低碳集约与环境友好型发展。本研究基于上述原则,结合多产业园区集约化与系统化的发展特征,构建包含碳排放标准、资源利用、能源利用、环境管理与低碳管理5个一级指标的分层评价体系。在指标选取过程中,充分参考国家相关标准与政策文件,并紧密结合园区实际发展需求,重点突出碳排放控制、资源与能源高效利用等方向。在碳排放标准方面,参考《碳排放核算与报告要求 第10部分:化工生产企业》(GB/T 32151.10—2023),选取

直接碳排放量、单位工业增加值碳排放强度等指标，以衡量园区碳排放效率<sup>[24-25]</sup>；资源利用维度依据《工业固体废物综合利用技术评价导则》(GB/T 32326—2015)，引入循环水利用率、一般固废综合利用率等指标，反映资源循环利用水平<sup>[26-28]</sup>；能源利用方面参照《能源管理体系分阶段实施指南》(GB/T 15587—2023)，涵盖原煤总能耗、非化石能源占比等指标，评估能源结构优化程度<sup>[29-30]</sup>；环境管理维度依托《工业企业清洁生产审核技术导则》(GB/T 25973—2010)，以企业清洁生产审核和排污许可管理为重点，体现环境管理规范性<sup>[31-32]</sup>；低碳管理方面借鉴《城市和社区可持续发展 低碳发展水平评价导则》(GB/T 41152—2021)，纳入建成区绿化覆盖率、碳达峰碳中和教育培训等指标，综合评价园区低碳治理能力<sup>[33-34]</sup>。最终，本研究共提出24项兼具代表性与可操作性的具体指标，构建了系统的多产业园区低碳化评价指标体系，见图1。

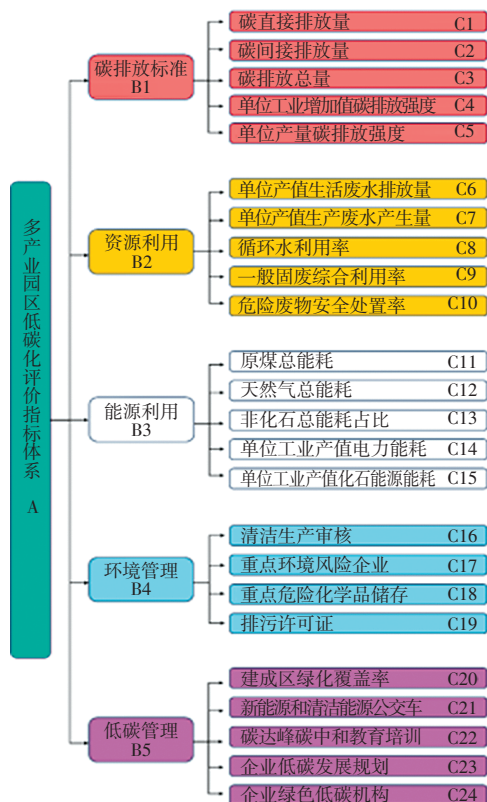


图1 多产业园区低碳化评价指标体系的指标构成

Fig.1 Index composition of low-carbonization evaluation index system for multi-industrial parks

### 1.2 评价体系的指标量化

本研究依据《化工园区低碳运行管理规范》(GB/T 44324—2024)所提出的定性与半定量指

标，并结合云南省生态环境科学研究院与楚雄高新技术产业开发区管理委员会共同编制的《楚雄国家高新技术产业开发区总体规划(2021—2035)环境影响报告书》中关于该开发区减污降碳工作的具体实践，系统梳理了《绿色制造 评价指标》(GB/T 43914—2024)、《城市和社区可持续发展 低碳发展水平评价导则》(GB/T 41152—2021)、《钢铁行业低碳企业评价指南》(GB/T 45004—2024)、《工业园区水回用指南》(GB/T 43742—2024)、《节水型工业园区评价导则》(GB/T 43477—2023)、《产业园区废气综合利用原则和要求》(GB/T 36574—2018)、《一般工业固体废物贮存和填埋污染控制标准》(GB 18599—2020)及《化工园区安全风险评估导则》(GB/T 45233—2025)等一系列标准与规范。通过对初选指标池进行量化筛选，精准识别并提取出影响园区低碳化水平的核心要素，最终构建出一套结构完整、逻辑严谨的量化评价指标体系，能够全面反映园区在能源消耗、产业结构、循环利用及管理机制等多维度的低碳化水平，见表1。

### 1.3 评价指标的权重计算

本研究在构建判断矩阵过程中，采用德尔菲法组织专家打分，邀请来自高校从事环境污染防治、固废处置和污水处理等方向的科研工作者及企业环境部门的科研人员共同参与评价。通过设计结构化问卷，经过多轮匿名征询与反馈，逐步收敛专家意见，确保指标间相对重要性判定的科学性与共识度。在此基础上，采用1-9标度法构建判断矩阵，用于标定各评价指标间的相对重要性，并建立由24个指标构成的判断矩阵A。通过计算权重向量，得出各指标权重结果。为验证评估结果的有效性，依据式(1)和式(2)对各判断矩阵进行一致性检验。

$$C_i = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}; \tag{1}$$

$$C_r = \frac{C_i}{R_i}. \tag{2}$$

本研究一致性通过 $C_i$ (一致性指标)、 $\lambda_{\max}$ (判断矩阵的最大特征根)、 $C_r$ (一致性比例)以及 $R_i$ (平均随机一致性指标)进行检验，其中矩阵阶数记为 $n$ 。通常，当 $C_r < 0.10$ 时，认为判断矩阵满足一致性要求，权重结果有效，否则需对矩阵元素予以调整。本研究所有判断矩阵的 $C_r$ 值均小于0.10，通过一致性检验，表明层次分析所得权重结果可信，见表2至表7。

表1 多产业园区低碳化评价指标体系的指标量化

Table 1 Quantification of indicators for the low-carbonization evaluation index system of multi-industrial parks

准则层(一级指标)	指标层(二级指标)	量化标准
碳排放标准(5个)	C1 碳直接排放量	C1、C2、C3年均增长率 $\leq 1\%$ ,符合记1分,不符合记0分
	C2 碳间接排放量	
	C3 碳排放总量	
	C4 单位工业增加值碳排放强度	C4同比下降率 $\geq 3\%$ ,符合记1分,不符合记0分
	C5 单位产量碳排放强度	C5达到行业清洁生产标准II级水平,符合记1分,不符合记0分
资源利用(5个)	C6 单位产值生活废水排放量	C6、C7同比下降率 $\geq 5\%$ ,符合记1分,不符合记0分
	C7 单位产值生产废水产生量	
	C8 循环水利用率	C8 $\geq 90\%$ ,符合记1分,不符合记0分
	C9 一般固废综合利用率	C9 $\geq 85\%$ ,符合记1分,不符合记0分
	C10 危险废物安全处置率	C10强制达到100%,符合记1分,不符合记0分
能源利用(5个)	C11 原煤总能耗	C11、C12同比下降率 $\geq 1.5\%$ ,符合记1分,不符合记0分
	C12 天然气总能耗	
	C13 非化石总能耗占比	C13 $\geq 40\%$ ,符合记1分,不符合记0分
	C14 单位工业产值电力能耗	C14、C15同比下降率 $\geq 2\%$ ,符合记1分,不符合记0分
	C15 单位工业产值化石能源能耗	
环境管理(4个)	C16 清洁生产审核	C16、C19是否持证,符合记1分,不符合记0分
	C17 重点环境风险企业	C17、C18是否定期自主检查,符合记1分,不符合记0分
	C18 重点危险化学品储存	
	C19 排污许可证	
低碳管理(5个)	C20 建成区绿化覆盖率	C20 $\geq 35\%$ ,符合记1分,不符合记0分
	C21 新能源和清洁能源公交车	C21是否配备新能源和清洁能源公交车,符合记1分,不符合记0分
	C22 碳达峰碳中和教育培训	C22是否定期开展碳达峰碳中和教育培训,符合记1分,不符合记0分
	C23 企业低碳发展规划	C23是否有企业低碳发展规划,符合记1分,不符合记0分
	C24 企业绿色低碳机构	C24是否设立企业绿色低碳机构,符合记1分,不符合记0分

表2 准则层B相对于目标层A的判断矩阵及权重

Table 2 The judgment matrix and weights of criterion layer B relative to target layer A

A	B1	B2	B3	B4	B5	特征向量	权重/%
B1	1	5	3	7	6	3.63	49.14
B2	0.20	1	0.33	5	3	1	13.54
B3	0.33	3	1	6	5	1.97	26.73
B4	0.14	0.20	0.17	1	0.33	0.28	3.73
B5	0.17	0.33	0.20	3	1	0.51	6.86

注: $\lambda_{\max}=5.32, C_I=0.08, R_I=1.11, C_R=0.07$ ,通过一致性检验。

表3 指标层C相对于准则层B1的判断矩阵及权重

Table 3 The judgment matrix and weights of the indicator layer C relative to the criterion layer B1

B1	C1	C2	C3	C4	C5	特征向量	权重/%
C1	1	3	0.33	0.20	0.25	0.42	8.36
C2	0.33	1	0.20	0.14	0.17	0.21	4.19
C3	3	5	1	0.33	0.5	0.89	17.72
C4	5	7	3	1	2	2.12	42.45
C5	4	6	2	0.50	1	1.36	27.28

注: $\lambda_{\max}=5.14, C_I=0.03, R_I=1.11, C_R=0.03$ ,通过一致性检验。

表4 指标层C相对于准则层B2的判断矩阵及权重

Table 4 The judgment matrix and weights of the indicator layer C relative to the criterion layer B2

B2	C6	C7	C8	C9	C10	特征向量	权重/%
C6	1	0.33	0.14	0.11	0.20	0.18	3.50
C7	4	1	0.25	0.14	0.33	0.35	7.06
C8	7	4	1	0.33	3	1.25	25.07
C9	9	7	3	1	5	2.54	50.71
C10	5	3	0.33	0.20	1	0.68	13.66

注: $\lambda_{\max}=5.22, C_I=0.06, R_I=1.11, C_R=0.05$ ,通过一致性检验。

表5 指标层C相对于准则层B3的判断矩阵及权重

Table 5 The judgment matrix and weights of the indicator layer C relative to the criterion layer B3

B3	C11	C12	C13	C14	C15	特征向量	权重/%
C11	1	1	0.25	0.17	0.13	0.24	4.79
C12	1	1	0.25	0.17	0.13	0.24	4.79
C13	4	4	1	0.50	0.25	0.79	15.78
C14	6	6	2	1	0.50	1.38	27.55
C15	8	8	4	2	1	2.36	47.10

注: $\lambda_{\max}=5.06, C_I=0.02, R_I=1.11, C_R=0.01$ ,通过一致性检验。

表6 指标层C相对于准则层B4的判断矩阵及权重

Table 6 The judgment matrix and weights of the indicator layer C relative to the criterion layer B4

B4	C16	C17	C18	C19	特征向量	权重/%
C16	1	9	6	3	2.40	59.88
C17	0.11	1	0.50	0.17	0.21	5.32
C18	0.17	2	1	0.50	0.43	10.67
C19	0.33	6	2	1	0.97	24.13

注： $\lambda_{\max}=4.05, C_r=0.02, R_r=0.88, C_R=0.02$ , 通过一致性检验。

表7 指标层C相对于准则层B5的判断矩阵及权重

Table 7 The judgment matrix and weights of the indicator layer C relative to the criterion layer B5

B5	C20	C21	C22	C23	C24	特征向量	权重/%
C20	1	3	5	7	9	2.51	50.28
C21	0.33	1	3	5	7	1.30	26.02
C22	0.20	0.33	1	3	5	0.67	13.44
C23	0.14	0.20	0.33	1	3	0.34	6.78
C24	0.11	0.14	0.20	0.33	1	0.17	3.48

注： $\lambda_{\max}=5.24, C_r=0.06, R_r=1.11, C_R=0.05$ , 通过一致性检验。

### 1.4 评价指标的赋分与等级划分

多产业园区低碳化评价结果可采用综合指数(P)表征, 其计算基于加权求和模型。具体而言, 该模型表达式为:

$$P = \sum_{i=1}^n X_n A_n \quad (3)$$

式中,  $X_n$  ( $n = 1、2、\dots、24$ ) 代表第  $n$  项评价指标相对于总目标的权重;  $A_n$  ( $n = 1、2、\dots、24$ ) 则为该指标的实际得分。根据我国减污降碳工作的现状, 按表8进行多产业园区低碳化评价的等级评定。

表8 多产业园区低碳化评价等级评定

Table 8 Evaluation and grading of low-carbonization in multi-industrial parks

等级	能力得分	等级	能力得分
优秀	1.00 ~ 0.90	及格	0.69 ~ 0.60
良好	0.89 ~ 0.80	不及格	0.59 ~ 0.00
中等	0.79 ~ 0.70		

## 2 楚雄高新技术产业开发区低碳化评价

### 2.1 楚雄高新技术产业开发区概括

楚雄高新技术产业开发区位于云南省楚雄彝族自治州楚雄市, 是滇中城市经济圈的重要组成部分, 也是云南省建设面向南亚东南亚辐射中心的重要交通枢纽和产业支撑平台。该开发区规划控制区总面积为 84.22 km<sup>2</sup>, 涵盖产城融合区 37.21 km<sup>2</sup>, 以及由赵家湾桃园、富民庄甸和苍岭 3 个片区组成

的工业园区 47.01 km<sup>2</sup>。2018年2月, 经国务院批复, 楚雄高新区升级为国家级高新技术产业开发区, 成为全国第三家、云南省首家设立于少数民族自治州的国家级高新区。楚雄高新区着力提升资源利用效率与产品科技含量, 积极推进清洁生产, 深入践行绿色发展理念, 创新绿色低碳发展机制, 切实推动减污降碳协同增效, 致力于打造滇中地区崛起增长极的核心引擎、全国民族特色创新创业高地以及国家一流高新技术产业开发区。

### 2.2 楚雄高新技术产业开发区低碳化评价结果分析

权重计算结果显示, 准则层中各维度权重排序为碳排放标准 (49.14%)、能源利用 (26.73%)、资源利用 (13.54%)、低碳管理 (6.86%) 和环境管理 (3.73%) (见表9)。这一结果说明, 本研究在兼顾多维度协调性的同时, 将评价重点明确置于碳排放控制与清洁能源转型上, 与当前园区绿色低碳发展的政策要求和实践方向相一致。进一步结合表9中24个二级指标的权重, 识别出6项权重显著高于平均的关键指标, 包括C3 (碳排放总量)、C4

表9 指标层C 24个指标对多产业园区低碳化评价权重值  
Table 9 The weight values of 24 indicators in indicator layer C for the low-carbonization evaluation of multiple industrial parks

二级指标	总权重/%
C1 碳直接排放量	4.11
C2 碳间接排放量	2.06
C3 碳排放总量	8.71
C4 单位工业增加值碳排放强度	20.86
C5 单位产量碳排放强度	13.41
C6 生活废水排放量	0.47
C7 生产废水产生量	0.96
C8 循环水利用率	3.39
C9 一般固废综合利用率	6.87
C10 危险废物安全处置率	1.85
C11 原煤总能耗	1.28
C12 天然气总能耗	1.28
C13 非化石总能耗占比	4.22
C14 单位工业产值电力能耗	7.36
C15 单位工业产值化石能源能耗	12.59
C16 清洁生产审核	2.23
C17 重点环境风险企业	0.20
C18 重点危险化学品储存	0.40
C19 排污许可证	0.90
C20 建成区绿化覆盖率	3.45
C21 新能源和清洁能源公交车	1.78
C22 碳达峰碳中和教育培训	0.92
C23 企业低碳发展规划	0.47
C24 企业绿色低碳机构	0.24

(单位工业增加值碳排放强度)、C5(单位产量碳排放强度)、C9(一般固废综合利用率)、C14(单位工业产值电力能耗)和C15(单位工业产值化石能源能耗)。这些指标的累计权重达69.80%，能够较好地反映多产业园区低碳化转型过程中的核心关切。总体而言，权重分配既突出了碳排放的关键地位，也统筹考虑了能源结构、资源循环和管理机制等多重要素，系统呈现了对园区低碳发展路径的综合评判。

本研究基于《楚雄国家高新技术产业开发区总体规划(2021—2035)环境影响报告书》，选取区内六大片区(桃园、富民、庄甸、产城融合、赵家湾、黄草)共30家企业作为研究样本，对其低碳化水平进行综合评价。评价结果(见表10)显示，园区企业整体以“及格”和“中等”等级为主，其中“良好”级别企业占比约16.67%，“中等”与“及格”级别企业合计占比超过50%，反映出多数企业具备一定低碳基础，但整体提升空间仍较大。从空间分布看，桃园片区涵盖“优秀”至“及格”多个等级，内部差异明显；富民片区除个别企业获评“良好”外，其余多处于“中等”及以下水平，并出现2家“不及格”企业；庄甸与产城融合片区整体表现较为均衡，以“良好”和“中等”为主；赵家湾片区的食品与医药企业等级分布分散，存在“中等”至“不及格”不等情况；黄草片区样本数量较少，但医废处置企业被评为“中等”。从行业类型来看，公用事业类企业(如供水、燃气、污水处理)整体表现较好，医药、食品等行业内部差异显著，部分化工与制造类企业评级偏低。该评价结果从空间与行业维度系统识别了园区低碳化进程中的优势区域与薄弱环节，为后续制定差异化、精准化的低碳提升路径提供了科学依据。

### 3 结论与建议

本研究基于AHP法构建了包含5个一级指标、24个二级指标的多产业园区低碳化评价体系。权重分析表明，准则层中碳排放标准(49.14%)和能源利用(26.73%)占比最高，凸显其在低碳化评价中的核心地位。在二级指标中，单位工业增加值碳排放强度(20.86%)、单位产量碳排放强度(13.41%)及单位工业产值化石能源能耗(12.59%)权重位列前三，累计权重达46.86%，表明碳排放与能耗控制是园区低碳转型的关键。在楚雄高新区的实证应用中，30家样本企业的评价结果显示：20.00%的企业达到“良好”及以上水平，

表10 多产业园区低碳化评价计算结果

Table 10 Calculation results of low-carbonization evaluation for multi-industrial parks

序号	所属片区	企业名称	行业类别	等级
1	桃园片区	楚雄滇中有色金属有限责任公司	铜冶炼	优秀
2		云南天腾化工有限公司	化肥	良好
3		云南楚雄仁恒化肥有限公司	化肥	中等
4		楚雄明强新型耐磨钢制造有限公司	制造业	及格
5		楚雄普发公投商品混凝土有限公司	建材	及格
6		楚雄同磊再生资源回收有限公司	再生资源利用	及格
7	富民片区	宇泽半导体(云南)有限公司	制造业	中等
8		楚雄志达新型建材开发有限公司	水泥	中等
9		云南岭东印刷包装有限公司	印刷	及格
10		红塔烟草(集团)有限责任公司楚雄卷烟厂	烟草	良好
11		云南楚雄恒生化工有限公司	化工	不及格
12		云南领峰机械制造有限公司	制造业	不及格
13	庄甸片区	云南迪能能源科技有限责任公司	热力/燃气供应	中等
14		云南裕丰药业有限公司	医药	及格
15		楚雄中石油昆仑燃气有限公司	热力/燃气供应	良好
16		楚雄老拨云堂药业有限公司	医药	及格
17		楚雄云植药业有限公司	医药	中等
18		云南楚雄天利药业有限公司	医药	不及格
19	产城融合片区	楚雄市供排水有限公司(第二污水处理厂)	污水厂	良好
20		楚雄市供排水有限公司(第一污水处理厂)	污水厂	良好
21		楚雄市永安自来水厂	自来水厂	中等
22		云南盘龙云海药业有限公司	医药	及格
23		云南云开电气股份有限公司	制造业	及格
24	赵家湾片区	云南摩尔农庄生物科技开发有限公司	食品	中等
25		楚雄富民金鹿食品有限公司(赵家湾新厂)	食品	及格
26		楚雄和创药业有限责任公司	医药	及格
27		楚雄绿福鲜农业科技有限公司	食品	不及格
28	昆明市宇斯药业有限责任公司楚雄分公司	昆明市宇斯药业有限责任公司楚雄分公司	医药	及格
29		云南爱尔康生物技术有限公司	食品	不及格
30	黄草片区	楚雄亚太医疗废物集中处置有限公司	医废处置	中等

26.67%为“中等”，36.67%为“及格”，而“不及格”企业占比16.67%，反映出园区整体低碳化建设已取得初步成效，但内部差异显著，尤其在一般

固废综合利用率和低碳管理机制方面存在明显短板。本研究所构建的评价体系通过量化权重与分级评价,为高原地区多产业园区低碳发展提供了系统化、可操作的诊断工具。

基于评价结果所反映的问题,为进一步提升园区低碳化水平,提出以下建议:(1)强化资源循环体系建设。重点提升一般工业固废综合利用率与循环水利用率,借鉴庄甸片区经验,建立跨企业物料交换平台,力争3年内将园区整体固废综合利用率提升至90%以上。(2)完善低碳管理长效机制。将碳减排目标纳入企业绩效考核体系,建立以碳排放强度为核心的动态评估机制,定期开展碳管理能力培训,推动低碳管理从软性引导转向硬性约束。(3)优化能源结构,推动技术协同。制定园区化石能源消费总量管控路径,重点支持光伏、生物质能等清洁能源项目,鼓励企业应用碳捕集与能源智能监控技术,提升系统降碳效能。

#### [参考文献]

- [1] 黄鲁成,郭鑫,苗红,等.双碳科技创新:概念维度、发展路径与政策机制[J].科学管理研究,2023,41(3):37-43.  
HUANG L C, GUO X, MIAO H, et al. Double carbon technology innovation: conceptual dimension and development path [J]. Scientific Management Research, 2023, 41(3): 37-43.
- [2] 谭显春,郭雯,樊杰,等.碳达峰、碳中和政策框架与技术创新政策研究[J].中国科学院院刊,2022,37(4):435-443.  
TAN X C, GUO W, FAN J, et al. Policy framework and technology innovation policy of carbon peak and carbon neutrality [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(4): 435-443.
- [3] 王科,刘春婷,陈翔,等.工业园区碳中和的实现路径及价值创造——基于金风碳中和和智慧园区的案例研究[J].管理案例研究与评论,2025,18(3):295-308.  
WANG K, LIU C T, CHEN X, et al. Pathways to carbon neutrality and value creation in industrial parks: a case study based on goldwind carbon neutral smart industrial park [J]. Journal of Management Case Studies, 2025, 18(3): 295-308.
- [4] 何春,张奥,茹麒月,等.数字经济赋能资源型城市低碳转型的影响研究[J].生态经济,2025,41(8):145-151.  
HE C, ZHANG A, RU L Y, et al. Research on the impact of digital economy on low carbon transformation of resource-based cities[J]. Ecological Economy, 2025, 41(8): 145-151.
- [5] 张莉,陈凯.新质生产力赋能低碳经济转型:作用路径与空间溢出[J].生态经济,2025,41(9):13-24.  
ZHANG L, CHEN K. Empowering low-carbon economic transformation with new quality productive forces: its pathways and spatial spillovers [J]. Ecological Economy, 2025, 41(9): 13-24.
- [6] 周嘉,苏秦.“双碳”目标下数字技术赋能工业低碳转型的突破机制与实现路径[J].西安交通大学学报(社会科学版),2025,45(3):92-103.
- ZHOU J, SU Q. The breakthrough mechanism and implementation path of digital technology empowering industrial low-carbon transformation under the dual carbon goal [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University (Social Sciences), 2025, 45(3): 92-103.
- [7] 廖乐焕,董燕燕,王珏.新质生产力、产业结构升级与低碳经济发展[J].统计与决策,2024,40(21):29-34.  
LIAO L H, DONG Y Y, WANG J. New quality productivity, industrial structure upgrading and low-carbon economic development [J]. Statistics & Decision, 2024, 40(21): 29-34.
- [8] 刘湘.民族地区低碳经济发展现状与路径探析[J].北方民族大学学报,2022(6):154-161.  
LIU X. Probing into the current situation of low-carbon economy development in ethnic areas [J]. Journal of North Minzu University (Philosophy and Social Science), 2022(6): 154-161.
- [9] 陈远翔,刘奕伶,李润,等.全国碳市场扩围下的电解铝行业低碳发展路径研究——以云南省为例[J].有色金属(冶炼部分),2024(8):62-71.  
CHEN Y X, LIU Y L, LI R, et al. Research on low carbon development path of electrolytic aluminum industry under the expansion of national carbon market: taking Yunnan province as an example [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2024(8): 62-71.
- [10] 彭艳玲,郭子豪,王玉.“十四五”云南生态文明建设主要路径研究[J].生态经济,2021,37(6):205-208.  
PENG Y L, GUO Z H, WANG Y. Research on the main path of ecological civilization construction in Yunnan during the “Fourteenth Five Year Plan” [J]. Ecological Economy, 2021, 37(6): 205-208.
- [11] 韩君,葛春瑞.国家低碳工业园区试点政策对企业绿色创新的影响研究[J].江西财经大学学报,2025(3):23-36.  
HAN J, GE C R. Research on the impact of national low carbon industrial park pilot policies on enterprise green innovation [J]. Journal of Jiangxi University of Finance and Economics, 2025(3): 23-36.
- [12] GAO X Y, HUANG X Y, LI Y J, et al. Comprehensive evaluations on carbon emission forecasting and effective emission reduction strategies for industrial parks in China [J]. Energy Reports, 2025, 13: 5864-5883.
- [13] MA S, WANG Q, NIE T, et al. Collaborative optimization model of industrial high-energy consumption park under green and low-carbon transformation [J]. Electronics Letters, 2024, 60(9): e13187.
- [14] 陈梅,黄言秋,孙建飞,等.长三角生态工业园区绿色低碳发展评价[J].环境污染与防治,2024,46(3):360-366.  
CHEN M, HUANG Y Q, SUN J F, et al. Evaluation of green and low-carbon development of eco-industrial parks in the Yangtze River delta [J]. Environmental Pollution & Control, 2024, 46(3): 360-366.
- [15] 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 A, 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.
- [16] ZHAO Y Y, WANG S S, GAO G Y, et al. Exploring the green and low-carbon development pathway for an energy-intensive industrial park in China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 459:142384.
- [17] YAN K, GAO H B, LIU R, et al. Review on low-carbon development in Chinese industrial parks driven by bioeconomy strategies [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2024, 199:114541.
- [18] 杜涵蓓, 邵雅梅, 赵立君, 等. 长三角生态工业园区碳排放特征与深度脱碳路径研究[J]. *生态与农村环境学报*, 2025, 41 (1):11-21.
- DU H B, SHAO Y M, ZHAO L J, et al. The carbon emission characteristics of eco-industrial parks in Yangtze River delta and deep decarbonization path of low-carbon development [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2025, 41 (1): 11-21.
- [19] YU X, HU W, WANG M. The impact of green development of industrial parks on the reduction of carbon emissions in urban areas—Empirical research on green industrial parks in China [J]. *Earth's Future*, 2024, 12(12): e2024EF005161.
- [20] 汪应洛. 系统工程理论、方法与应用[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 1998.
- [21] SAATY T. *The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resource allocation*[M]. New York: McGraw-Hill, 1980.
- [22] SAATY T. Decision making with the analytic hierarchy process [J]. *International Journal of Services Sciences*, 2008, 1(1): 83.
- [23] SAATY T L, VARGAS L G. *Models, methods, concepts & applications of the analytic hierarchy process*[M]. New York: Springer, 2012.
- [24] 王雪婷, 宋丹娜, 曾珂, 等. 氧化铝行业清洁生产评价指标体系研究与应用[J]. *环境工程技术学报*, 2025, 15(4):1443-1452.
- WANG X T, SONG D N, ZENG K, et al. Research and application of cleaner production evaluation index system for alumina industry [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2025, 15 (4):1443-1452.
- [25] 尹杰, 马思媛, 夏杰, 等. 田园综合体低碳绿色发展评价指标体系构建及案例分析[J]. *上海海洋大学学报*, 2025, 34(4): 896-904.
- YIN J, MA S Y, XIA J, et al. Construction and case analysis of low-carbon green development evaluation index system for rural complexes [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2025, 34 (4):896-904.
- [26] 吴海滨, 洪一兵, 李钰, 等. 园区废水处理碳排放分析及低碳路径探索[J]. *给水排水*, 2025, 61(4): 71-76, 83.
- WU H B, HONG Y B, LI Y, et al. Analysis of carbon emissions from wastewater treatment in industrial parks and exploration of pollution reduction and carbon reduction pathway [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2025, 61 (4):71-76, 83.
- [27] 李轶, 徐文筠, 童林林, 等. 面向低碳约束的工业园区水网络优化研究[J]. *环境工程*, 2023, 41(11):154-159.
- LI Y, XU W J, TONG L L, et al. Water network optimization of industrial parks under low-carbon constraints [J]. *Environmental Engineering*, 2023, 41 (11):154-159.
- [28] 陈吕军, 田金平, 吕一铮, 等. 我国化工园区减污降碳技术路径研究[J]. *中国工程科学*, 2024, 26(2):160-173.
- CHEN L J, TIAN J P, LV Y Z, et al. Pathways for reducing pollutants and carbon emissions synergistically targeting chemical industrial parks in China [J]. *Strategic Study of CAE*, 2024, 26 (2):160-173.
- [29] 于群, 郭振宇, 王仕文, 等. 炼化企业绿色低碳转型路径的探索与实践[J]. *石油炼制与化工*, 2025, 56(8):1-6.
- YU Q, GUO Z Y, WANG S W, et al. Exploration and practice of green and low-carbon transition pathways for refining and chemical enterprises [J]. *Petroleum Processing and Petrochemicals*, 2025, 56 (8):1-6.
- [30] 郭禹辰, 王琦, 王猛, 等. 考虑碳流优化的园区综合能源系统低碳经济运行策略[J]. *电力工程技术*, 2025, 44(3):64-75.
- GUO Y C, WANG Q, WANG M, et al. Low carbon economic operation strategy of park integrated energy system considering carbon flow optimization [J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2025, 44 (3):64-75.
- [31] 刘洋, 赵佳玲, 钱依森, 等. 长江经济带中游典型工业园区污碳协同脱钩发展路径研究[J]. *环境污染与防治*, 2022, 44(12): 1676-1681.
- LIU Y, ZHAO J L, QIAN Y S, et al. Strategies of pollution and carbon decouple for the typical industrial park in the Yangtze River economic belt middle reaches [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2022, 44 (12):1676-1681.
- [32] 王文燕, 冯翰林, 郭二民. 减污降碳协同治理纳入生态环境管理体系探讨[J]. *环境工程技术学报*, 2022, 12(6):1882-1889.
- WANG W Y, FENG H L, GUO E M. Discussion on the integration of pollution reduction and carbon reduction collaborative governance into the ecological environment management system [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2022, 12 (6):1882-1889.
- [33] 何承天, 董廷尉, 李昕, 等. 纺织行业低碳园区评价指标体系[J]. *印染*, 2023, 49(12):82-86.
- HE C T, DONG T W, LI X, et al. Evaluation index system for low-carbon industrial parks in textile industry [J]. *China Dyeing & Finishing*, 2023, 49 (12):82-86.
- [34] 刘磊, 丁昱皓, 沈祥信, 等. 产业园区绿色发展规划指标体系的构建与评估[J]. *化工环保*, 2022, 42(3):350-356.
- LIU L, DING Y H, SHEN X X, et al. Construction and evaluation on green development planning index system of industrial park [J]. *Environmental Protection of Chemical Industry*, 2022, 42 (3):350-356.