

基于多案例的数据中心绿色算力综合发展报告

周语绚, 梁瑞佳, 刘晶凯, 黄洁琳, 赵康

长沙理工大学数学与统计学院, 湖南 长沙

收稿日期: 2026年4月7日; 录用日期: 2026年5月10日; 发布日期: 2026年5月21日

摘要

在“东数西算”战略深入实施与“双碳”目标持续推进的背景下, 数据中心绿色转型成为关键议题。本文选取东、中、西部9个典型数据中心, 构建包含PUE、制冷技术、绿电使用、规模水平、政策战略五个维度的评价体系, 综合运用相关性分析、熵权-TOPSIS、多维尺度分析及六重稳健性检验, 对样本数据中心的绿色发展水平进行量化评价与路径识别。作为数据中心绿色发展水平量化评价的一次初步探索, 本文可为“东数西算”战略的优化布局和存量数据中心的绿色转型提供参考。

关键词

数据中心, 绿色转型, 熵权-TOPSIS, 东数西算

Evaluation of Data Center Green Transformation Based on Multi-Dimensional Analysis and Robust Testing

Yuxuan Zhou, Ruijia Liang, Jingkai Liu, Jielin Huang, Kang Zhao

School of Mathematics and Statistics, Changsha University of Science and Technology, Changsha Hunan

Received: April 7, 2026; accepted: May 10, 2026; published: May 21, 2026

Abstract

With the in-depth implementation of the “East Data West Computing” project and the continuous promotion of the “dual carbon” goals, the green transformation of data centers has become a key issue. This paper selects nine typical data centers in the eastern, central, and western regions, and constructs an evaluation system covering five dimensions: PUE, cooling technology, green electricity usage, scale level, and policy strategy. By comprehensively applying correlation analysis, entropy weight-TOPSIS, multidimensional scaling analysis, and six-fold robustness tests, the green development level of the sample data centers is quantitatively evaluated and their paths are identified.

As a preliminary exploration of the quantitative evaluation of the green development level of data centers, this paper can provide reference for the optimized layout of the “East Data, West Computing” project and the green transformation of existing data centers.

Keywords

Data Center, Green Transformation, Entropy Weight-TOPSIS, East Data West Computing Project

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着“东数西算”工程与“双碳”目标持续推进，数据中心绿色转型已成为可持续发展的关键议题。当前对数据中心绿色发展的评估多聚焦于 PUE 等单一能效指标，尚未形成涵盖技术路线、能源结构、政策支持等多维度的系统评价共识。本文选取东、中、西部 9 个典型数据中心为样本，首先构建包含 PUE、制冷技术、绿电使用、规模水平、政策支持五个维度的评价指标体系，然后综合运用相关性分析、熵权-TOPSIS 与多维尺度分析对样本数据中心的绿色发展水平进行量化评价与发展路径识别，并通过六重稳健性检验验证结论的可靠性。

2. 方法设计

2.1. 案例选取

本文选取的数据中心样例如表 1 所示，在区域上均衡覆盖该工程的东、中、西部，在类型上包含国家超级计算中心与商业智算中心。同时，案例数据整理自网络公开信息。为便于后文叙述，各案例统一采用“城市 + 中心”的简称形式，如“西安中心”指代国家超级计算西安中心。

Table 1. Description of selected data centers

表 1. 选取数据中心说明

地域	类型	省市	名称
西部	国家	陕西省西安市	国家超级计算西安中心
	商业	甘肃省庆阳市	中国电信庆阳中心智能算力中心
	国家	四川省成都市	国家超级计算成都中心
东部	商业	河北省张家口市	数据港 - 阿里巴巴张北中都草原数据中心
	国家	江苏省无锡市	国家超级计算无锡中心
	商业	上海市	万国数据浦江数据中心
中部	国家	河南省郑州市	国家超级计算郑州中心
	商业	湖北省武汉市	武汉超算中心
	商业	湖南省郴州市	郴州东江湖绿色算力基地

2.2. 指标构建

参考中国信通院相关研究，本文从能效、技术、能源、规模、政策五个维度构建评价体系[1][2]。各

指标说明与赋分规则如下：

(1) 电能利用效率(PUE)：数据中心总能耗与 IT 设备能耗之比，数值越小能效越高。

针对 PUE 公开数据多为范围值、最值问题，设计多情景分析，减少数据不确定性对评价结果的影响 [3] [4]。在主分析采用 PUE 中值情景，保守和乐观情景用于稳健性检验。三情景取值步长取 0.025，参考 ASHRAE 标准的能效测量误差范围规范 [5]。

保守情景：取范围值的上限，代表能效水平的最低估计；

中值情景：取范围值的中值或明确值，代表最可能的实际水平；

乐观情景：取范围值的下限，代表能效水平的最高估计。

(2) 制冷技术：依据中国信息通信研究院《绿色算力发展研究报告(2025 年)》中对液冷、间接蒸发冷却等技术的能效排序 [1]，结合 Cho 等(2013)、Yuan 等(2024)对不同冷却技术能效的定量比较研究 [6] [7]，采用 5 分制评分，如表 2 所示。

Table 2. Scoring criteria for cooling technology

表 2. 制冷技术赋分说明

制冷技术说明	赋分
浸没式液冷	5
冷板式液冷及间接蒸发冷却	4
传统水冷	3
传统风冷	2 及以下

(3) 绿电使用水平：依据财政部等三部门联合发布的《绿色数据中心政府采购需求标准(试行)》，数据中心可再生能源最低使用率在 2027 年目标为 50% [8]。参考该目标，本文根据公开信息采用 3 分制评分，如表 3 所示。

Table 3. Scoring criteria for green electricity usage level

表 3. 绿电使用水平赋分说明

绿电使用水平说明	赋分
绿电比例 $\geq 50\%$ 或有明确绿色能源实践案例	3
绿电比例 $< 50\%$ 或已参与绿电交易/入选国家/省级绿色数据中心	2
无公开绿电信息	1

(4) 规模水平：依据国家标准 GB/T 43331-2023《互联网数据中心(IDC)技术和分级要求》及工信部数据中心规模划分标准 [9]，结合行业实践综合评定，本文根据公开信息采用 3 分制评分，如表 4 所示。

Table 4. Scoring criteria for scale level

表 4. 规模水平赋分说明

规模水平说明	赋分
总算力超 10 万 P，或机架数超 5000 架	3
算力在 100~1000 P 区间，或机架数在 1000~5000 架区间	2
无公开具体算力或规模信息	1

(5) 政策支持力度：根据每个数据中心具体的政策文件、批复函、入选名单等公开信息，本文对应归纳为“国家级”或“省级”，采用 2 分制评分，如表 5 所示。

Table 5. Scoring criteria for policy support

表 5. 政策支持力度赋分说明

政策支持力度说明	赋分
国家级：已获得国家部委(科技部、国家发改委、工信部等)正式批复、认定或入选国家级名单的数据中心	2
省级：已获得省级政府部门正式认定，或列为省级重点布局项目的数据中心	1

2.3. 分析方法

2.3.1. 相关性分析

采用 Pearson 相关系数衡量各指标间的线性相关程度，计算公式为：

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

2.3.2. 熵权法

为客观确定各指标权重，采用熵权法赋权。设标准化后的矩阵为 $\mathbf{R} = (r_{ij})_{n \times m}$ ，其中为第 i 个样本在第 j 项指标上的标准化值。计算第 j 项指标下第 i 个样本的比重 $P_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{i=1}^n r_{ij}}$ ，然后计算信息熵

$$e_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln p_{ij}, \text{ 差异度 } d_j = 1 - e_j, \text{ 最后得权重 } w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^m d_j}。$$

2.3.3. TOPSIS

采用逼近理想解排序法(TOPSIS)计算各数据中心的绿色发展水平得分。基于标准化矩阵及权重构造加权规范矩阵 $v_{ij} = w_j r_{ij}$ ，确定正理想解 A^+ 和负理想解 A^- ，计算各样本到理想解的距离 $D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (v_{ij} - v_j^+)^2}$ 和 $D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (v_{ij} - v_j^-)^2}$ ，最后得相对贴近度 $C_i = \frac{D_i^-}{(D_i^+ + D_i^-)}$ ， C_i 值越大，表示绿色发展水平越高。

2.3.4. 多维尺度分析

为直观展示数据中心在绿色发展模式上的相似类型，采用多维尺度分析(MDS)将高维指标空间降维至二维平面。基于 Z-score 标准化后的数据计算欧氏距离矩阵，通过 PROXSCAL 算法拟合出样本在二维空间中的坐标，应力系数(Stress)用于评估拟合优度。MDS 图可揭示潜在的聚类结构，与 TOPSIS 排名形成互补。

3. 结果分析

3.1. 样本统计

根据公开数据统计处理，分类赋分，结果见表 6，数值处理见表 7。

Table 6. Summary table of scores
表 6. 赋分总表

数据中心简称	西安中心	庆阳中心	成都中心	张家口中心	无锡中心	上海中心	郑州中心	武汉中心	郴州中心
PUE-中值	1.07	1.167	1.065	1.21	1.22	1.26	1.015	1.15	1.135
制冷技术	5	4	5	4	3	4	5	4	4
绿电使用	3	3	2	3	2	3	2	1	3
规模水平	2	3	2	2	2	1	2	2	2
政策支持	2	2	2	2	2	1	2	1	1

Table 7. Mean, maximum, minimum and standard deviation of indicators
表 7. 指标均值、标准差、最值

指标	均值	最大值	最小值	标准差
PUE-中值	1.14	1.26	1.02	0.08
制冷技术	4.22	5.00	3.00	0.63
绿电使用	2.44	3.00	1.00	0.68
规模水平	2.00	3.00	1.00	0.47
政策支持	1.67	2.00	1.00	0.47

此外, 本文收集数据计算冷却度日数(CDD)和自然冷源潜力, 分析气候条件对能效的影响, 结果见表 8。

冷却度日数(CDD): 指一年中日均温度高于制冷基准温度 26℃的累计值, 反映机械制冷的理论需求量。CDD 越高, 夏季制冷压力越大。

自然冷源潜力: 指全年日均温度低于 15℃的天数占比, 该阈值参考 ASHRAE 关于自然冷却可用条件的技术规范[3], 用于评估数据中心利用外界低温环境实现节能的潜在能力。

Table 8. Estimation of CDD and natural cooling potential
表 8. CDD 和自然冷源潜力估算

市	夏季(6~8月) 平均温度(℃)	冬季(12~2月) 平均温度(℃)	全年 CDD 估算(℃)	自然冷源潜力估算
西安	27.5	2.5	118	41%
庆阳	26.5	-7.5	0	58%
成都	28	8.5	0	25%
郑州	33.5	-1.5	0	58%
武汉	33	1	124	25%
郴州	27.5	8	124	25%
张家口	30	-12.5	31	41%
无锡	31	1	155	25%
上海	30	3.5	155	25%

从气候特征看, 张家口、庆阳中心自然冷源潜力高达 58%, 夏季基本无需机械制冷; 而武汉、郴州、

上海等南方地区 CDD 超过 120，夏季制冷压力较大。样本在气候条件上存在较大差异。

3.2. 相关性分析

为探究各指标间的内在关系，计算了 5 个核心指标及 3 个气候指标间的 Pearson 相关系数，相关结果见表 9。

Table 9. Correlation coefficient matrix
表 9. 相关系数矩阵

	PUE-中值	制冷技术	绿电使用	规模水平	政策支持
PUE-中值	1.00				
制冷技术	-0.83	1.00			
绿电使用	0.25	0.03	1.00		
规模水平	-0.29	0.00	0.00	1.00	
政策支持	-0.35	0.25	0.11	0.50	1.00
年均温度	-0.21	0.04	-0.44	-0.45	-0.51
CDD	0.32	-0.46	-0.07	-0.22	-0.70
自然冷源潜力	-0.03	0.13	0.46	0.58	0.57

可得出如下结论：

(1) **制冷技术与 PUE 呈强负相关($r = -0.83$)**。这表明技术先进性对数据中心能效具有决定性影响——采用浸没式液冷的数据中心，西安、成都、郑州中心 PUE 普遍低于 1.07，而采用传统水冷的无锡中心 PUE 高达 1.22。这一发现印证了技术投入是提升绿色算力水平的关键驱动力。

(2) **政策支持与规模水平呈中等正相关($r = 0.50$)**。政策支持力度大的数据中心往往规模也更大，反映国家层面规划对算力基础设施布局的引导作用。工程的核心承载区项目通常伴随大规模投资和产业集聚，政策与规模的协同效应显著。

(3) **绿电使用与 PUE 相关性较弱($r = 0.25$)**。表示绿电比例高的数据中心不一定具有更低的 PUE，而 PUE 极低的成都中心(1.065)绿电信息只赋得 2 分。说明绿电与能效是两个相对独立的绿色发展维度，Radovanovic 等(2023)的发现也同样印证[10]，一个数据中心可能绿电做得好但能效一般，也可能能效极致但绿电表现一般。

(4) **气候指标与 PUE 的关系：CDD 与 PUE 呈中等正相关($r = 0.32$)**，表明夏季制冷需求越大的地区，数据中心能效压力越大。**但自然冷源潜力与 PUE 几乎无关($r = -0.03$)**，而**自然冷源潜力与绿电($r = 0.46$)、规模($r = 0.58$)、政策($r = 0.57$)均呈正相关**。这揭示了西部地区绿色算力发展的多元路径：气候优势并未直接转化为更低的 PUE，而是通过赋能绿电、规模和政策，间接提升了综合绿色发展水平。西部地区的绿色算力优势，不是自然的能效优势，而是借助气候和绿电、政策的系统优势。

(5) **值得关注的负相关：年均温度与绿电($r = -0.44$)、规模($r = -0.45$)、政策($r = -0.51$)均呈负相关，CDD 与政策($r = -0.70$)强负相关**。这说明相对处于温暖地区的数据中心在绿电应用、规模扩张和政策支持上相对滞后，这与郭远游等(2025)指出的数据中心碳排放空间向西部地区转移的趋势是一致的[11]。

3.3. 绿色发展水平排名

采用熵权法计算各指标的客观权重，结果如表 10 所示。

Table 10. Weight distribution in main analysis
表 10. 主分析权重分布

PUE-中值	制冷技术	绿电使用	规模水平	政策支持
1.76%	8.65%	33.89%	22.25%	33.44%

从权重分布看，绿电使用和政策支持是区分样本的最主要维度，表明 9 个数据中心在清洁能源应用和政策支持力度上差异较大，是当前衡量其绿色发展水平的关键因素。规模水平权重次之，反映产业规模重要性。PUE 和制冷技术权重较低，并不是因为不重要，而是由于选取案例的 PUE 和制冷技术赋分差异较小，因此熵权法赋予较低权重。

基于熵权法权重，采用 TOPSIS 方法计算各数据中心与理想解的相对贴适度 C，C 值介于 0~1 之间，越接近 1 表示绿色发展水平越高。结果如表 11 所示。

Table 11. Ranking results of main analysis
表 11. 主分析排名

数据中心	贴适度 C	排名
庆阳中心	0.951	1
西安中心	0.763	2
张家口中心	0.759	3
郑州中心	0.604	4
成都中心	0.604	5
无锡中心	0.594	6
郴州中心	0.565	7
上海中心	0.479	8
武汉中心	0.241	9

从排名结果分析：

第一梯队——庆阳、西安、张家口中心。庆阳中心凭借 100%绿电、超大规模和重要政策地位稳居榜首，是“绿电 + 规模 + 政策”协同发展的典范；西安中心以顶尖的浸没式液冷技术和极低 PUE，展现了技术驱动路径的竞争能力；张家口中心尽管制冷技术不突出，但依托坝上地区寒冷气候，自然冷源潜力 58%和高比例绿电，揭示了气候优势与清洁能源结合的独特路径。

第二梯队——郑州、成都、无锡中心。郑州和成都中心均为技术领先型，制冷技术、PUE 得分高，但绿电评级拉低了综合得分。无锡中心作为神威·太湖之光所在地，技术却为传统水冷，PUE 较高，导致排名居中。

第三梯队——郴州、上海、武汉中心。郴州中心绿电优势突出，但规模和政策评分较低，反映了中小规模绿色算力基地的特点。上海中心虽绿电比例 100%，但 PUE 高，呈现“高绿电、低能效”特征。武汉中心 PUE 中等，但政策略低。

3.4. 数据中心类型分析

TOPSIS 排名给出了数据中心绿色发展水平的“高低顺序”，但未能呈现各案例在特征结构上的相似性与差异性。为揭示这种内在结构，本文采用 MDS 分析将 5 维指标空间降维至二维平面，结果见表 12。

MDS 基于样本间的欧氏距离进行拟合, 点的空间距离越小, 表示数据中心在绿色发展特征上越相似。应力系数(Stress)为 10.0161%, 略高于 10% 的拟合良好阈值, 但考虑到样本量较小时, 应力值更敏感, 处于可接受范围。

Table 12. MDS coordinates
表 12. MDS 坐标

数据中心	维度 1 (X)	维度 2 (Y)
西安中心	-1.721	-0.442
庆阳中心	-0.636	-2.433
张家口中心	-1.773	0.621
郑州中心	0.417	-1.112
武汉中心	1.85	-1.588
成都中心	2.894	1.092
无锡中心	-2.354	0.771
上海中心	0.381	2.549
郴州中心	0.942	0.542

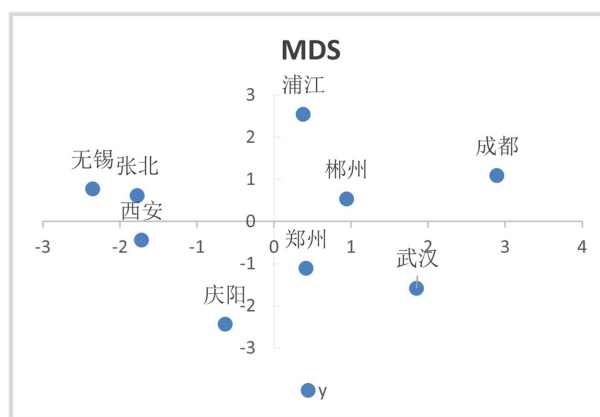


Figure 1. MDS configuration plot of data centers
图 1. 数据中心 MDS 配置图

从图 1 中可以看出, 9 个数据中心在二维空间中的分布呈现以下特征: 沿 x 轴呈现明显的地理气候梯度。左侧集中了无锡、张家口等冷凉地区的数据中心; 右侧分布着成都、武汉等温暖地区的案例。沿 y 轴呈现出政策规模与能源结构的组合特征。下方聚集了庆阳、郑州中心等政策支持力度较强、规划规模较大的案例; 上方分布的上海、郴州中心等绿电使用比例普遍较高。

此外, 空间邻近关系反映了发展路径的相似性。无锡与张家口中心在图中位置接近, 二者同属技术能效领先且自然冷源条件较好的北方数据中心; 庆阳与郑州中心距离较近, 均为政策 - 规模双优型的中部及西北地区。

TOPSIS 给出了数据中心绿色发展的“绩效排名”, MDS 揭示了其发展特征空间结构。综合对比两种方法的结果发现:

① **标杆集群具有稳定性。**庆阳、西安、张家口中心位于 TOPSIS 排名前三, 在 MDS 空间中相对邻

近，构成稳定的第一梯队。政策支持、技术领先、绿电优势、规模效应的多重叠加。这一集群为其他数据中心提供了可参照的标杆范式。

② **技术应用的关键性。**无锡与张家口中心都是拥有自然冷源优势的数据中心，在气候条件、发展基础上高度相似，但因技术应用的差异导致排名相差较大。这表明相似的发展模式，可能因关键技术的水平不同而产生分化。

③ **发展路径的多样性。**无锡、郴州、上海中心三地排名接近，却分处 MDS 空间的不同区域，分别代表北方技术型、南方绿电型、高绿电高 PUE 型三种不同的发展路径。

综上所述，TOPSIS 排名与 MDS 配置并不完全对应。正好说明相同的路径不一定导致相同的排名，相同的排名也不一定来自相同的路径。这验证了多维度综合评价的必要性，单一维度的片面强调都会失之偏颇，只有综合考量才能全面反映数据中心的绿色发展水平。

3.5. 稳健性检验

为检验评价结果的可靠性，本文设计敏感性分析，考察 PUE 取值、指标评分标准变化对排名的影响；同时用稳健性检验考察不同赋权方法、缺失值处理方式下结论的一致性。

3.5.1. PUE 敏感性

为检验 PUE 取值方式对排名的影响，设计保守、中值、乐观三种情景，结果如表 13 所示。三种情景下排名完全一致，表明结果对 PUE 取值不敏感。

Table 13. Sensitivity test of PUE value scenarios

表 13. PUE 敏感性检验

数据中心	排名		
	PUE-中值	PUE_保守	PUE_乐观
庆阳中心	1	1	1
西安中心	2	2	2
张家口中心	3	3	3
郑州中心	4	4	4
成都中心	5	5	5
无锡中心	6	6	6
郴州中心	7	7	7
上海中心	8	8	8
武汉中心	9	9	9

3.5.2. 权重敏感性

为检验权重设定对排名的影响，现作等权重排名，结果如表 14 所示。

Table 14. Sensitivity test of weight setting

表 14. 权重敏感性检验

数据中心	原排名	等权	变化
庆阳中心	1	2	-1
西安中心	2	3	-1

续表

张家口中心	3	4	-1
郑州中心	4	5	-1
成都中心	5	6	-1
无锡中心	6	9	-3
郴州中心	7	7	不变
上海中心	8	8	不变
武汉中心	9	1	+8

对比发现，权重调整引发了排名的结构性变化。其中，武汉中心的变动最为剧烈，上升 8 位；无锡中心下降 3；其他数据中心后退一位。这一变化源于两种赋权方法的本质差异。等权法弱化了各个指标的差异化程度，而熵权法是根据指标数据的离散程度赋权，放大了“绿电使用”和“政策支持”这两个在样本中差异显著的指标权重。武汉中心在这两项指标上得分低，因此在等权重排名中变化最大；无锡中心则因“制冷技术”得分较低而排名后退。此外，其他数据中心排名梯队在两种方法下保持基本稳定，表明了一定的稳健性。

3.5.3. 绿电敏感性

为检验其评分方式对排名的影响，设计了放大差异方案：将原评分(3/2/1)调整为(4/2/0)，重新计算熵权法权重及 TOPSIS 排名，结果如表 15 所示。

Table 15. Sensitivity test of green electricity scoring
表 15. 绿电敏感性检验

数据中心	原排名	换绿电评分	变化
庆阳中心	1	1	不变
西安中心	2	2	不变
张家口中心	3	3	不变
郑州中心	4	7	-3
成都中心	5	8	-3
无锡中心	6	4	+2
郴州中心	7	5	+2
上海中心	8	6	+2
武汉中心	9	9	不变

检验结果显示，前三名保持稳定，仅中后部排名发生符合预期的调整：郴州、上海等绿电优势型数据中心排名上升，郑州、成都中心等技术领先但绿电一般的案例排名下降。这一变化印证了绿电指标的区分度，且梯队排名格局仍然稳定。

3.5.4. 政策敏感性

为检验政策支持力度细化对排名的影响，设计细化方案。将为工程核心承载区的案例设为 3 分，其他国家超算保持 2 分，区域级保持 1 分。重新计算权重和排名，结果如表 16 所示。

Table 16. Sensitivity test of policy scoring**表 16.** 政策敏感性检验

数据中心	原排名	换政策评分	变化
庆阳中心	1	1	不变
西安中心	2	3	-1
张家口中心	3	2	+1
郑州中心	4	4	不变
成都中心	5	5	不变
无锡中心	6	6	不变
郴州中心	7	7	不变
上海中心	8	8	不变
武汉中心	9	9	不变

排名变化中，张家口中心因政策支持得分上升而与西安中心发生位次互换，其余数据中心排名不变。因此，主分析结果对政策评分方式不敏感。

3.5.5. 规模敏感性

规模水平原为 3 分制。为考察规模内部差异对排名的影响，进行精细化分档：无锡中心(神威·太湖之光)设为 2.5 分，西安、成都、郴州中心(150~200 P)设为 2.2 分，郑州、武汉中心(100 P 左右)保持 2 分，张家口中心(算力信息缺失但有大量机架)设为 1.8 分。重新计算权重和排名，结果如表 17 所示。

Table 17. Sensitivity test of scale scoring**表 17.** 规模敏感性检验

数据中心	原排名	换规模评分	变化
庆阳中心	1	1	不变
西安中心	2	2	不变
张家口中心	3	3	不变
郑州中心	4	5	-1
成都中心	5	4	+1
无锡中心	6	6	不变
郴州中心	7	7	不变
上海中心	8	8	不变
武汉中心	9	9	不变

规模评分细化后，仅郑州与成都中心发生位次互换，其余不变。郑州中心规模评分不变；成都中心因规模评分从 2 分微调至 2.2 分，排名上升。整体结构仍然稳定，因此，可以认为主分析结果对规模评分方式不敏感。

3.5.6. 缺失值处理

本文的原始数据中，上海中心数据中心的规模水平、武汉中心的绿电使用存在信息缺失。在主分析

中，对缺失项采取保守赋分。为检验这一处理方式对排名的影响，现采用均值插补法赋值：以其余 8 个数据中心的均值，分别填充缺失得分。计算得上海中心数据中心规模得分 2.1 分，武汉中心绿电得分 2.6 分，重新计算熵权法权重及 TOPSIS 排名，结果如表 18 所示。

Table 18. Sensitivity test of missing data handling

表 18. 数据缺失检验

数据中心	原排名	缺失检验	变化
庆阳中心	1	1	不变
西安中心	2	3	-1
张家口中心	3	2	+1
郑州中心	4	4	不变
成都中心	5	5	不变
无锡中心	6	6	不变
郴州中心	7	7	不变
上海中心	8	8	不变
武汉中心	9	9	不变

结果显示，仅西安与张家口中心发生位次互换，其余排名完全不变。原本数据缺失的上海和武汉中心，排名均未发生变化。由此说明，主分析对缺失值的保守处理未造成系统性偏差，可以认为主分析结果对缺失数据的处理方式具有稳健性。

综上所述，六重稳健性检验表明，核心排名稳定，结论可靠。

4. 案例分析

4.1. 第一梯队：庆阳、西安、张家口中心

第一梯队的共同特征是在政策支持、绿电应用、技术能效或规模效应中至少两项具有明显优势，形成了多维度协同格局。在 MDS 空间中也相对邻近，在稳健性、敏感性检验中始终保持前列，构成稳定的第一梯队。

庆阳中心的核心优势在于政策、规模与绿电的深度协同。作为工程十大集群之一，政策支持带来超大规模投资，智能算力超 11.4 万 P，机架规划超 4.9 万架，在规模指标上获满分。当地丰富的风光资源支撑实现 100%绿电目标，绿电使用同样获满分。形成政策引导资源、资源支撑规模、规模赋能绿电的良性循环，在政策、规模、绿电三项指标上均处顶尖水平，同时印证了前文“政策与规模显著正相关”的发现。

西安中心呈现鲜明的技术特征，作为国家超算中心，单机柜功率密度达 168 kW，全浸没式相变液冷技术的应用使 PUE 极低，制冷技术获满分。技术投入成为提升绿色发展水平的核心抓手，同时带动绿电应用达到较高水平，显示出技术优势向综合绿色发展的延伸。

张家口中心的突出特点在于气候与绿电的协同。坝上寒冷气候赋予 58%的自然冷源潜力，全年干冷器利用率达 8000 小时，制冷能耗降低 59%。同时，张北丰富的可再生能源支撑高水平的绿电使用。气候和绿电的双重优势，使其在技术投入相对适中的情况下，仍能排名靠前。

庆阳中心的“政策-规模-绿能”协同、西安中心的“技术极致”驱动、张家口中心的“气候-绿

能”复合，展示了绿色发展的三种不同范式。未来，可考虑进一步优化方向：庆阳中心在保持绿电与规模优势的同时，可关注 PUE 的持续优化；西安中心可在技术领先的基础上，探索提升绿电使用比例的可能；张家口中心可逐步提高可再生能源占比，并向更高绿电目标迈进。

4.2. 第二梯队：郑州、成都、无锡中心

第二梯队的共同特征是均存在明显短板。排名居中，贴适度差距较小，但内部呈现出清晰的路径分化。

郑州中心制冷技术获满分，PUE 低至 1.015，为选取样本中最低，能效表现极为优异。然而，其绿电使用仅得 2 分，成为关键问题。侧面印证，绿电与能效是相对独立的维度，技术极致并不能自动带来绿电优势。与同样技术领先的西安中心相比，郑州中心绿电相对一般使其排名落后。

成都中心同样是技术领先的代表，制冷技术满分(5 分)，PUE 低至 1.065。此外，成都中心还面临气候挑战，自然冷源潜力仅 25%，夏季高温带来较大冷却压力。这代表着在技术投入不仅要追求能效，还要抵消气候的不利影响。诠释 PUE 与自然冷源潜力无关，但与制冷技术强相关。成都与郑州中心的对比表明，即使技术水平相当，气候条件和绿电应用的差异也会导致排名分化。

无锡中心作为“神威·太湖之光”所在地，制冷技术采用传统水冷，PUE 达 1.22，技术滞后成为主要短板。但在绿电、规模、政策上表现均衡。稳健性检验显示，在等权法下无锡中心排名可升至第 4 位，说明运用熵权法赋权，放大了制冷技术的负面影响。与张家口相比，两者同处寒冷地区，排名相差主要因为技术差异。

排名中等往往源于“优势不足、短板明显”的组合困境。对于技术领先但绿电一般的郑州、成都中心，补齐绿电短板是关键，如争取参与绿电交易或建设园区光伏设施；对于其他均衡但技术偏弱的无锡中心，单点提升，关注制冷技术的升级改造更重要。

4.3. 第三梯队：郴州、上海、武汉中心

第三梯队的共同特征是未形成多维度协同的优势组合，各有不同困境。且在 MDS 空间中分布较为分散，反映了不同的发展特征。

郴州中心绿电单一指标强但其他偏弱，绿电应用得分处于样本前列，绿电评分放大检验中排名可跃升至第 5 位，印证了其绿电敏感型特征；但规模水平和政策支持相对较弱，作为地方性绿色算力基地，投资体量和政策层级有限，单点突破尚难以完全弥补其他维度的不足。

上海中心呈现高绿电、高 PUE 的组合特征，绿电采购比例较高，但 PUE 为样本中最大值，能效表现相对靠后，可能与南方气候、建筑限制等因素有关，同时也印证了绿电和能效是两个相对独立的维度。

武汉中心则表现为多项偏弱，PUE、制冷技术、规模等指标表现中等，但绿电应用和政策支持得分偏低，稳健性检验显示，即使补上平均水平的绿电，排名仍无变化，提示其排名靠后的原因可能是结构性的，而非单一信息缺失所致。

三个数据中心面临的困境各不相同，其改进路径也应根据自身短板有所侧重。郴州中心在巩固绿电优势的同时，积极争取政策支持以扩大规模；上海中心需在保持高绿电比例的基础上，着力降低 PUE；武汉中心可系统性地加强绿电引入与政策对接，推动多维度协同发展。这些案例共同说明，绿色发展需要多维度协同，单一优势虽能带来一定提升，但难以完全弥补其他维度的不足。

5. 总结

本研究发现制冷技术与 PUE 的强负相关关系($r = -0.83$)，与 Cho 等(2013)针对不同气候条件下冷却技术能效的结论一致，但进一步证实了技术因素对能效的主导作用远超气候条件。与信通院《综合算力

评价研究报告(2024年)》[2]对我国各省级行政区及城市算力水平的评价相比,本文聚焦于典型数据中心个体,揭示了“殊途同归”的多元路径,补充了微观层面的实证证据。此外,本研究中绿电与PUE的弱相关性($r = 0.25$)与Radovanovic等(2023)关于碳感知计算中绿电与能效解耦的观察相吻合,说明能源结构优化与能效提升应并行推进。

在算力需求持续攀升与“双碳”目标双重背景下,为科学评价“东数西算”工程下数据中心的绿色发展水平,本文构建了涵盖PUE、制冷技术、绿电使用、规模水平、政策支持的五维评价体系,利用熵权-TOPSIS方法得到9个典型数据中心的综合排名,并结合多维尺度分析识别出三类发展路径。考虑到公开数据存在范围值、缺失值等不确定性,本文设计了多情景分析与六重稳健性检验,增强了评价结果的可靠性。研究成果可为优化国家算力资源布局、推动存量数据中心绿色转型提供量化决策参考。

基金项目

长沙理工大学大学生创新训练项目“‘东数西算’政策下绿色算力发展调查”。

参考文献

- [1] 中国信息通信研究院, 内蒙古和林格尔新区管委会. 绿色算力发展研究报告(2025年)[R]. 北京: 中国信息通信研究院, 2025. https://www.caict.ac.cn/kxyj/qwfb/ztbg/202507/t20250724_686833.htm, 2026-03-07.
- [2] 中国信息通信研究院. 综合算力评价研究报告(2024年)[R]. 北京: 中国信息通信研究院, 2024. http://www.caict.ac.cn/kxyj/qwfb/bps/202412/t20241231_649676.htm, 2026-03-07.
- [3] The Green Grid (2011) Recommendations for Measuring and Reporting Overall Data Center Efficiency. The Green Grid, (May), 1-14.
- [4] ASHRAE (2014) PUE: A Comprehensive Examination of the Metric. ASHRAE.
- [5] ASHRAE (2021) Thermal Guidelines for Data Processing Environments (TC 9.9). American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- [6] Cho, J., Park, W., Shin, S., et al. (2013) Development of the Cooling Energy Analysis Tool for Green Data Centers and Evaluation of Alternatives for Different Climate. *Journal of the Architectural Institute of Korea Planning & Design*, **29**, 289-298.
- [7] Yuan, L., Wang, Y., Kosonen, R., Yang, Z., Zhang, Y. and Wang, X. (2024) Comparative Study on Heat Dissipation Performance of Pure Immersion and Immersion Jet Liquid Cooling System for Single Server. *Buildings*, **14**, Article No. 2635. <https://doi.org/10.3390/buildings14092635>
- [8] 财政部等三部门印发《绿色数据中心政府采购需求标准(试行)》[J]. 中国政府采购, 2023(5): 5.
- [9] 全国通信标准化技术委员会(SAC/TC 485). 互联网数据中心(IDC)技术和分级要求: GB/T 43331-2023 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.
- [10] Radovanović, A., Koningstein, R., Schneider, I., Chen, B., Duarte, A., Roy, B., et al. (2023) Carbon-Aware Computing for Datacenters. *IEEE Transactions on Power Systems*, **38**, 1270-1280. <https://doi.org/10.1109/tpwrs.2022.3173250>
- [11] 郭远游, 叶玉瑶, 王长建, 等. “东数西算”战略背景下中国数据中心碳排放空间转移研究[J]. 地理科学, 2025, 45(3): 459-471.