基于 PCA-EWM-TOPSIS 的入炉块矿综合性能评价模型

朱 颖[1]，陈生利[2]，凌志宏[2]，陈 鑫[1]，杨家俊[1]，秦跃林[1]
（1. 重庆科技大学 冶金与动力工程学院，重庆 401331；2. 广东中南钢铁股份有限公司，广东 韶关 512123）

摘要：为科学评价高炉入炉块矿的综合性能，克服现有评价方法中指标冗余及权重分配主观性强等局限性，本文构建了一种基于主成分分析－熵权法－逼近理想解排序法（PCA-EWM-TOPSIS）的入炉块矿综合性能评价模型。首先，利用主成分分析（PCA）对入炉块矿的 17 项性能指标实施降维处理，消除指标间相关性干扰，提取出 3 个关键主成分（F_1、F_2、F_3）。接着，应用熵权法（EWM）依据数据自身离散程度客观确定各主成分权重（F_1：0.503，F_2：0.281，F_3：0.216）。随后，运用逼近理想解排序法（TOPSIS）计算 11 种实际块矿样本与理想解的相对贴近度（C 值），据此进行综合性能排序。研究结果表明：11 种入炉块矿样本综合性能排序为：$I_4 > I_3 > I_1 > I_8 > I_2 > I_{11} > I_6 > I_7 > I_5 > I_{10} > I_9$。模型结果与现有评价方法结论较为一致，证实了其可靠性。

关键词：块矿；综合性能评价；主成分分析；应用熵权法；逼近理想解排序法
中图分类号：TF046.4 **文献标志码**：A **文章编号**：1000－8764(2026)03－0119－07
doi：10.13403/j.sjqt.2026.03.054

Comprehensive performance evaluation model for in-furnace lump ore based on PCA-EWM-TOPSIS

ZHU Ying[1], CHEN Shengli[2], LING Zhihong[2], CHEN Xin[1], YANG Jiajun[1], QIN Yuelin[1]
(1. School of Metallurgy and Power Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China; 2. Guangdong Zhongnan Iron & Steel Co., Ltd., Shaoguan 512123, Guangdong, China)

Abstract: To scientifically evaluate the comprehensive performance of lump ore entering the blast furnace and overcome such limitations as indicator redundancy and strong subjectivity in weight allocation in existing evaluation methods, a comprehensive performance evaluation model for lump ore entering the furnace based on PCA-EWM-TOPSIS is constructed. Firstly, PCA is used to reduce the dimensionality of the 17 performance indicators of the lump ore entering the blast furnace, eliminate the interference caused by correlations between various indicators, and extract three key principal components (F_1, F_2, F_3). Next, the Entropy Weight Method (EWM) is applied to objectively determine the weights of each principal component (F_1: 0.503, F_2: 0.281, F_3: 0.216) based on the dispersion of the data. Subsequently, the TOPSIS method is used to calculate the relative proximity (C-value) of 11 actual lump ore samples to the ideal solution, and based on these results, a comprehensive performance ranking is established. The results show that the comprehensive performance ranking of the 11 sample blocks in the furnace is: $I_4 > I_3 > I_1 > I_8 > I_2 > I_{11} > I_6 > I_7 > I_5 > I_{10} > I_9$. The model results are consistent with the conclusions of existing evaluation methods, confirming their reliability.

Key words: lump ore; comprehensive performance evaluation; PCA; EWM; TOPSIS

收稿日期：2025－09－26；**修回日期**：2025－12－23
基金项目：重庆自然科学基金创新与发展联合基金资助项目（CSTB2024NSCQ-LZX0052）、硕士研究生创新计划项目—重庆科技大学项目（YKJCX2520227）
作者简介：朱 颖（2001—），女，硕士研究生，从事钢铁生产原燃料评价体系构建方面的研究。
通信作者：秦跃林（1986—），男，博士，教授，从事钢铁固废资源循环、钢铁生产原燃料评价体系构建、富氢冶炼等方面的研究。

近年来，随着进口铁矿石价格持续攀升及环保压力日益严峻，钢铁企业为降低生产成本，在高炉炉料结构中不断提高块矿配比已成为重要技术方向。统计数据显示，国内大型企业如宝钢、韶钢的块矿入炉配比已提升至20%以上[1-2]，显著降低了铁水成本并有效减少了烧结工序的能源消耗与污染排放。

然而，块矿配比的增加亦引发诸多技术挑战。其固有特性会对高炉炼铁过程产生多维度影响：① 软化温度较低、软熔带较宽、软熔性能较差、熔滴区间较大，导致高炉软熔带透气性恶化，下部压差升高；② 热爆裂性能不足，在中温区爆裂后产生大量粉末，严重劣化料层透气性与煤气流分布；③ 较高的 $w(Al_2O_3)/w(SiO_2)$ 比值显著影响高炉造渣过程，特别是初成渣特性扰动炉内气流分布，促使边缘气流增强，同时渣中 Al_2O_3 含量升高降低炉渣流动性，削弱脱硫能力，进而影响生铁质量；④ 部分块矿品种还原性能不佳，则导致高炉燃料消耗增加[3]。因此，全面、准确评估入炉块矿综合性能，对优化高炉炉料结构与保障高炉稳定高效运行至关重要。

当前块矿评价主要聚焦化学成分、物理性能及冶金性能三大核心维度。化学成分评价方面，许满兴等[4]指出，优质块矿应具备高铁品位、低 SiO_2 及 Al_2O_3 含量特征，同时需严格控制 S、P、K、Na 等有害元素及烧损。刘正平[5]提出“经济价值”概念，主张结合冶金价值与到厂价格进行综合评价，即经济价值等于冶金价值减去到厂价格，以更客观反映矿石的成本效益。物理性能层面，邸丽卿[6]基于宣钢块矿研究，强调水分、粒度及粒度组成、热爆裂指数等指标的关键性。不同产地块矿物理性能差异显著，如宝钢所用 A、B、C 三类块矿在热爆裂指数与粒度组成上均存在明显区别。而周明顺等[7]虽在铁矿石综合品位法及模拟单烧计算法中考虑了部分物理性能，但对不同产地块矿物理性能波动性的系统分析尚显不足。祁成林等[8]通过在高温还原气氛下引入转鼓试验，提出了一种模拟高炉内挤压与摩擦作用的动态热裂指数评价新方法，克服了国标法仅能表征块矿瞬时热爆裂行为，但忽略其内部裂纹在炉料下降过程中因机械应力而二次破碎产生粉末的潜在能力的不足。冶金性能评价方面，李新宇等[9]普遍认为块矿还原性、低温还原粉化性能、软化开始温度(通常要求 >900 ℃)及熔滴性能为核心指标。研究表明，高铁品位、低 SiO_2、Al_2O_3 和 TiO_2 含量且还原性良好的块矿通常具备更优的熔滴性能。李云飞等[10]针对高块矿配比工况研究炉料软熔滴落性能，提出软熔滴落性能指数，指出该指数值越小表征块矿软熔滴落性能越优，但该指数仅聚焦单一性能，难以全面评估块矿整体冶金性能。

为构建更科学全面的评价体系，诸多学者开发了综合评价模型。李新宇等[11]在青钢高炉5种块矿研究中，基于化学成分、热爆裂性能、还原性及熔滴性能建立综合性能评价公式，通过指标评分与排序确定巴西块矿与 FMG 块矿综合性能最优。谈承麟等[3]针对宝钢 N 块矿与 F 块矿，系统分析其热爆裂、低温还原粉化、还原性及熔滴性能，为特定块矿评价提供了典型案例。胡启晨等[12]则揭示了铁矿石冶金性能与高炉透气性、燃料比间的内在关联。然而，现有综合评价模型存在显著局限：多数模型(如青钢、宝钢案例)仅适用于特定企业高炉条件，普适性受限；模型构建中指标权重确定主观性强，例如李新宇等[9]使用每个综合特性指标所对应的贡献率占所提取主成分总的贡献率之和的比例作为权重，不够客观；青钢综合性能评价公式中，基准数值、权重比例、变化幅度、影响因子均为自行设定，主观性较强，这都会导致评价结果的准确性与适用性不足[11]。

针对现有块矿评价方法在指标体系完备性、模型普适性及评价过程客观性等方面的不足，本文旨在构建一种科学、全面的块矿综合性能评价模型。通过主成分分析(PCA)对多维度性能指标进行降维处理，消除指标间相关性干扰；采用熵权法(EWM)客观确定各指标权重，规避主观偏差；结合逼近理想解排序法(TOPSIS)实现块矿综合性能的量化评价。该 PCA-EWM-TOPSIS 融合模型有望为钢铁企业入炉块矿优选及炉料结构优化提供精准可靠的决策支持，进而提升高炉炼铁效率与经济效益。

1　综合性能评价模型的建立

入炉块矿综合性能评价本质上是一个多属性决策问题。其核心目标在于，通过构建科学的评价模型，计算出一个能够全面反映入炉块矿整体性能优劣的综合评价值。该综合评价值本身即蕴含了所有样本间的相对优劣关系。最终，直接依据该综合评价值的大小对所有块矿样本进行排序，即可得到清晰、客观的性能优劣序列。

首先利用主成分分析(PCA)对入炉块矿的多个性能指标进行降维处理，提取出关键性能指标，然后利用熵权法(EWM)对各个评价指标进行权重计算，得到加权矩阵，将其代带入逼近理想解排序法(TOPSIS)中进行关键性能指标的评价标定值计算，按照标定值对入炉块矿的综合性能进行排序，流程如图 1 所示。

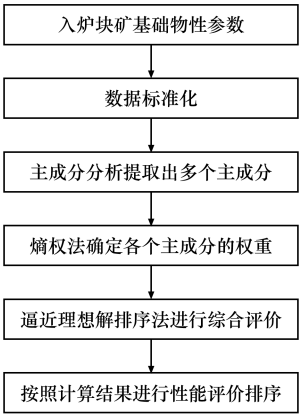


图 1　综合性能评价流程

Fig. 1　Comprehensive performance evaluation process

2　综合性能评价过程

2.1　模型初始条件

试验采用的 11 种入炉块矿(I_1 ~ I_{11})样本均取自国内某大型钢铁厂不同批次入炉原料，每批次取样 3 次，平行检测 3 次，取平均值以消除批次波动；检测严格遵循国家标准：① 还原指数采用《铁矿石还原性的测定方法》(GB/T 13241—2017)；② 低温还原粉化指数采用《铁矿石低温粉化试验静态还原后使用冷转鼓的方法》(GB/T 13242—2017)；③ 热裂指数采用《铁矿石热裂指数的测定方法》(GB/T 10322.6—2022)；④ 软化软熔滴落性能采用《铁矿石高温荷重还原软熔滴落性能测定方法》(GB/T 34211—2017)。表 1 所示为入炉块矿的性能检测结果。

高炉生产的各参数性质不同导致其拥有不同的量纲级别。为了使得各数据之间具有一定的可比性，需要使用制定统一的标准化处理规则，以此来消除不同量纲之间的影响。因此，采用 Z-Score方法作为标准化处理的原则，见式(1)。

表 1　入炉块矿性能检测结果

Table 1　Test results of the performance of lump ore charged into the furnace

种类	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{15}	X_{16}	X_{17}
I_1	63.25	0.50	3.34	0.10	62.37	77.39	11.82	7.86	6.00	77.48	988	1 183	1 201	1 370	195	169	19.78
I_2	50.68	0.95	10.01	0.65	84.19	89.50	5.86	9.63	11.00	92.25	1 030	1 235	1 246	1 384	205	138	15.40
I_3	58.16	6.05	4.51	0.10	66.91	83.21	4.93	18.18	8.48	89.30	971	1 157	1 207	1 361	186	154	9.94
I_4	62.27	0.48	3.55	0.07	65.40	79.36	9.80	19.75	6.66	84.63	1 011	1 219	1 245	1 378	208	133	19.10
I_5	57.17	0.77	5.58	0.34	80.20	87.81	6.64	6.48	8.77	95.63	933	1 064	1 124	1 436	131	312	21.39
I_6	43.50	11.98	21.02	1.90	91.79	95.38	1.78	9.10	6.25	77.55	1 070	1 169	1 162	1 250	99	88	13.11
I_7	52.49	0.23	12.95	0.10	83.53	90.54	3.81	10.47	11.40	98.20	939	1 057	1 177	1 281	118	104	6.10
I_8	60.68	2.88	9.98	0.10	66.70	76.50	14.44	6.22	1.27	51.99	1 176	1 255	1 262	1 373	79	111	19.87
I_9	60.00	0.50	11.00	0.10	93.75	94.93	3.00	0.20	11.04	53.49	1 005	1 114	1 103	1 600	109	497	19.16
I_{10}	61.08	0.50	4.03	0.10	94.28	95.73	3.14	0.08	9.45	59.07	1 004	1 116	1 106	1 567	112	461	22.53
I_{11}	61.25	0.21	3.80	0.09	70.10	83.42	5.29	20.12	7.54	79.90	1 008	1 141	1 202	1 348	133	146	34.98

注：X_1为 TFe 质量分数，%；X_2为 FeO 质量分数，%；X_3为 SiO_2质量分数，%；X_4为 CaO 质量分数，%；X_5为低温还原粉化指数(>6.3 mm)，%；X_6为低温还原粉化指数 RDI(>3.15 mm)，%；X_7为低温还原粉化指数(<0.5 mm)，%；X_8为热裂指数，%；X_9为烧损值，%；X_{10}为还原性指数，%；X_{11}为软化开始温度，℃；X_{12}为软化终了温度，℃；X_{13}为熔化开始温度，℃；X_{14}为滴落温度，℃；X_{15}为软化区间温度；X_{16}为软融区间温度，℃；X_{17}为最大压差，kPa。

$$Z_{X_i}=\frac{X_i-\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}X_i}{\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(X_i-\overline{X})^2}} \quad (1)$$

式中：X_i为入炉块矿的性能指标，$\overline{X}$为X_i的平均值，Z_{X_i}为标准化处理后的X_i。

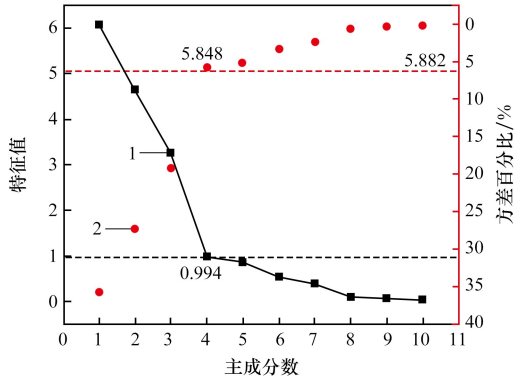
对各参数列X_i进行变换，使得新序列 Z_{X_i}放至[0,1]区间。

2.2 模型运行

入炉块矿存在不同种类性能差异较大的问题，不同块矿在高炉冶炼中产生的影响不同，因此非常有必要对入炉块矿进行综合性能评价。

通过 PCA 对标准化处理后的数据进行降维处理，提取出关键性能指标。本次入炉块矿特性指标主成分分析采用 SPSS 27.0 软件。通过软件分析得到主成分的提取见图 2 和表 2，主成分初始载荷矩阵见表 3。

主成分个数提取原则为主成分对应的特征值大于 1 的前 m 个主成分。特征值可以被看成是表示主成分影响力的指标，特征值小于 1，说明该主成分的解释力度不如原变量的解释力度大。如图 2 所示，第 4 主成分特征值小于 1 为 0.994，其解释力度低于原始变量的平均解释力度，且本研究前 3 个主成分累计贡献率达 82%，因此，第 4 主成分不予保留，只提取前 3 个主成分即可完全满足要求。



1—特征值；2—方差百分比。

图 2 主成分提取

Fig. 2 Principal component extraction

表 3 可知，得到的主成分初始载荷矩阵结合特征解即可求解得到主成分特征向量，与标准化后的天然块矿特性指标数据相乘，从而得出主成分表达式。通过主成分表达式计算出入炉块矿的综合特性指标，如表 4 所示。

将表 4 中的 3 种综合特性指标值进行无量纲化处理。再利用熵权法得到综合特性指标 F_1、F_2 和 F_3的客观评价权重值，如表 5 所示。

为验证熵权法对极端值的敏感性，采用极端

表 2 入炉块矿特性指标主成分提取

Table 2 Principal component extraction of the characteristic indices of lump ore charged into the furnace

主成分	初始特征值			提取载荷平方和		
	特征值	方差百分比	累积量/%	特征值	方差百分比	累积量/%
F_1	6.067	35.686	35.686	6.067	35.686	35.686
F_2	4.648	27.341	63.027	4.648	27.341	63.027
F_3	3.260	19.179	82.206	3.260	19.179	82.206

表 3 入炉块矿综合性能指标提取主成分初始载荷矩阵

Table 3 Initial factor loading matrix of the extracted principal components for the comprehensive performance indices of lump ore charged into the furnace

主成分	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9
F_1	0.440	−0.137	−0.452	−0.330	−0.946	−0.966	0.846	0.611	−0.667
F_2	−0.866	0.813	0.785	0.832	0.102	0.136	−0.185	0.251	−0.191
F_3	0.103	0.223	0.278	0.163	0.161	−0.007	0.294	−0.536	−0.618
主成分	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{15}	X_{16}	X_{17}	
F_1	0.092	0.348	0.681	0.874	−0.410	0.458	−0.636	0.199	
F_2	0.316	0.319	0.259	0.327	−0.789	−0.094	−0.701	−0.515	
F_3	−0.900	0.847	0.415	−0.025	0.294	−0.632	0.224	0.281	

表 4　入炉块矿的综合特性指标值

Table 4　Comprehensive characteristic index values of lump ore charged into the furnace

主成分	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	I_6	I_7	I_8	I_9	I_{10}	I_{11}
F_1	1.015	0.066	0.459	1.237	−0.550	−0.929	−0.628	1.359	−1.425	−1.198	0.593
F_2	−0.544	0.615	0.255	−0.234	−0.549	2.415	0.528	0.214	−1.047	−1.203	−0.451
F_3	−0.135	−0.534	−0.985	−0.533	−0.628	0.735	−1.276	2.167	0.793	0.688	−0.291

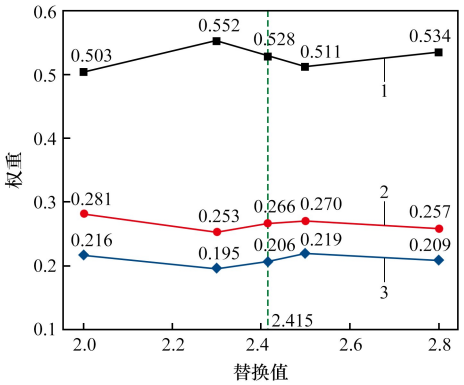
表 5　评价指标权重值

Table 5　Evaluation indicator weight values

F_1	F_2	F_3
0.503	0.281	0.216

值替换法：将样本 I_6 的 F_2 值 2.415 分别替换为 2.0、2.3、2.5、2.8，重新计算 F_1 ~ F_3 的权重，结果见图 3。由图 3 可知，替换后主成分 F_1 的权重均在 90% 置信区间[0.453,0.553]内，主成分 F_2 的权重均在 90% 置信区间[0.253,0.309]内，主成分 F_3 的权重均在 90% 置信区间[0.194,0.238]内，表明熵权法在本研究中具有良好稳健性，极端值对权重分配影响极小。

根据得到的权重值，利用逼近理想解排序法



1—F_1；2—F_2；3—F_3。

图 3　熵权法稳健性检验结果

Fig. 3　Results of robustness test for entropy weighting method

计算不同入炉块矿的综合评价值 C，C 越大，说明入炉块矿的综合性能越好。表 6 为块矿综合性能评价排名结果。

3　结果分析

3.1　综合性能评价分析

基于 PCA-EWM-TOPSIS 模型的综合评价结果（表 6）清晰展示了 11 种入炉块矿的综合性能排序：$I_4 > I_3 > I_1 > I_8 > I_2 > I_{11} > I_6 > I_7 > I_5 > I_{10} > I_9$。该排序直接反映了不同块矿在降维后的关键性能指标空间内，与理想解的相对接近程度（C 值越大越优）。

主成分 F_1 的权重占比为 50.36%，在表 3 提取主成分初始载荷矩阵中可以看出：对于主成分 F_1，块矿的 X_5、X_6、X_7、X_{13} 的系数绝对值大于 0.800，说明这 4 个指标在主成分指标 F_1 有很高的载荷，故主成分指标 F_1 主要代表这 4 个指标的信息。此外，X_8、X_9、X_{12} 和 X_{16} 等指标均有一定的体现，且初始载荷矩阵的系数绝对值均大于 0.600。这凸显了块矿在低温还原阶段的抗粉化能力以及在高炉软熔带初期的熔融行为对其综合性能评价的极端重要性。

主成分 F_2 的权重占比为 28.07%，在表 3 提取主成分初始载荷矩阵中可以看出：对于主成分指标 F_2，X_1、X_2、X_3、X_4、X_{14} 和 X_{16} 的系数绝对值大于 0.700，说明 X_1、X_2、X_3、X_4、X_{14} 和 X_{16} 这 6 个指标上有很高的载荷，故主成分指标 F_2 主要代

表 6　入炉块矿综合排名

Table 6　Comprehensive Ranking of Lump Ore Charged into the Furnace

种类	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	I_6	I_7	I_8	I_9	I_{10}	I_{11}
D^+	0.883	0.840	0.760	0.763	1.279	1.232	1.132	0.966	1.763	1.694	0.917
D^-	1.338	1.079	1.237	1.487	0.769	1.091	0.974	1.457	0.300	0.339	1.165
C	0.602	0.562	0.620	0.661	0.376	0.470	0.462	0.601	0.145	0.167	0.560
排序	3	5	2	1	9	7	8	4	11	10	6

注：D^+ 为目标值到正理想解的距离；D^- 为目标值到负理想解的距离；C 为综合评价值。

表这6个指标的信息。此外，X_{17}指标也有一定的体现，且初始载荷矩阵的系数绝对值大于0.500。这表明块矿的品位、铁的存在形态、脉石成分以及其在软熔带后期的熔融滴落特性(T_d)和整体软熔区间宽度是决定其性能的第二大关键因素。

主成分F_3的权重占比为21.58%，由表3提取主成分初始载荷矩阵中可以看出：对于主成分指标F_3，X_9、X_{10}，X_{11}和X_{15}的系数绝对值大于0.600，说明X_9、X_{10}、X_{11}和X_{15}这4个指标在主成分指标F_3上有很高的载荷，故主成分指标F_3主要代表这4个指标的信息。这说明块矿在受热过程中的质量损失、还原性以及在软熔带初期软化起始点和软化区间对其综合性能的重要影响。

3.2 模型验证与分析

使用综合性能评价模型对参考文献[11]中的3种天然块矿进行评价，结果见表7。通过使用综合性能评价模型所得3种天然块矿的评价结果与文献[5]和[11]中结果一致，表明综合性能评价模型对于天然块矿的评价较准确，可作为评价天然块矿性能时的重要参考。在使用该模型时，需要注意把涉及的变量进行标准化处理，并且尽量保证为同一次试验数据，这样可以提高模型使用时的准确性与可靠性。

表7 各种评价方法计算结果比较排序

Table 7 Comparative ranking of calculation results from various evaluation methods

块矿名称	C	$TFe_{评}$	综合评价
FMG块	0.697	60.57	92.57
纽曼块	0.637	60.38	90.37
PB块	0.558	55.09	79.53

注：$TFe_{评}$为铁矿石综合评价方法之一[5]；综合评价为根据化学成分、物理性能和冶金性能进行评价的评价方法[11]。

4 结 论

（1）通过主成分分析法对高炉入炉块矿的众多性能指标进行降维，得到影响冶炼的关键主成分；结合熵权法赋予关键主成分权重，得到综合评价指标；采用逼近理想解排序法对矿种综合评价指标进行排序。依此构建了基于主成分分析－熵权法－逼近理想解排序法(PCA-EWM-TOPSIS)的入炉块矿综合性能评价模型。

（2）采用该评价方法对11种国内某大型钢企常用块矿综合性能进行评价，从优至劣排名依次为：I_4、I_3、I_1、I_8、I_2、I_{11}、I_6、I_7、I_5、I_{10}、I_9；并对FMG块矿、纽曼块矿、PB块矿3种主流块矿进行验证，评价结果与文献报道一致，进一步验证了模型的可靠性和科学性。

（3）尽管本模型在块矿综合评价方面表现出良好的应用价值，但尚未将经济指标及环保指标纳入评价体系，同时也未考虑块矿与烧结矿、球团矿在混合炉料条件下的交互效应，与高炉实际复杂的炉料结构环境存在一定差异，仍存在一定局限性，这也是后续研究应重点完善的方向。

参考文献：

[1] 朱勇军,徐辉,王士彬. 宝钢4号高炉提高块矿比例实践[J]. 炼铁,2019,38(1):32－35.
ZHU Yongjun, XU Hui, WANG Shibin. Production practice under higher lump ore ratio in baosteel No. 4 BF [J]. Ironmaking,2019,38(1):32－35.

[2] 刘立广,陈生利. 韶钢6号高炉提高块矿比攻关实践[J]. 南方金属,2019(5):37－39.
LIU Liguang,CHEN Shengli. Practice on increasing lump ore ratio in No. 6 blast furnace of shaoguan iron & steel [J]. Southern Metals,2019(5):37－39.

[3] 谈承麟,毛晓明,徐万仁. 块矿配比对高炉配合炉料冶金性能影响规律研究[J]. 宝钢技术,2021(2):37－42.
TAN Chenglin, MAO Xiaoming, XU Wanren. Effect of lump ore ratio on metallurgical properties of blast furnace burden[J]. Baosteel Technology,2021(2):37－42.

[4] 许满兴,冯根生. 二十种进口铁块矿的质量及分析[C]//2006年度全国烧结球团技术交流年会论文集. 长沙:烧结球团编辑部,2006:10－13.
XU Manxing, FENG Gensheng. Quality and analysis of twenty types of imported lump iron ore[C]//Proceedings of the 2006 National Annual Conference on Sintering and Pelletizing Technology. Changsha: Editorial Office of Sintering and Pelletizing,2006:10－13.

[5] 刘正平. 铁矿石经济价值合理评价方法的探讨[J]. 烧结球团,2004,29(5):1－5.
LIU Zhengping. The study on rational evaluating methods of economic value of iron ores[J]. Sintering and

Pelletizing,2004,29(5):1 – 5.

[6] 邸丽卿. 宣钢外购块矿性能评价[J]. 冶金信息导刊,2014,51(4):6 – 10.
DI Liqing. The performance evaluation of outsourcing block ore in Xuanhua iron and steel[J]. Metallurgical Information Review,2014,51(4):6 – 10.

[7] 周明顺,韩淑峰,王义栋,等. 铁矿石综合评价方法及其在鞍钢的应用[J]. 鞍钢技术,2017(2):1 – 7.
ZHOU Mingshun, HAN Shufeng, WANG Yidong, et al. Comprehensive evaluation method for iron ore and its application in ansteel[J]. Angang Technology,2017(2):1 – 7.

[8] 祁成林,冯根生,许满兴,等. 高炉冶炼条件下天然块矿热裂指数评价新方法[J]. 烧结球团,2022,47(2):67 – 73.
QI Chenglin,FENG Gensheng,XU Manxing,et al. A new method for evaluating decrepitation index (DI) of natural lump ore under BF ironmaking[J]. Sintering and Pelletizing,2022,47(2):67 – 73.

[9] 李新宇,张建良,苏步新,等. 基于主成分分析的高炉用天然块矿性能评价[J]. 中南大学学报(自然科学版),2016,47(9):2943 – 2950.
LI Xinyu, ZHANG Jianliang, SU Buxin, et al. Performance evaluation of lump ores for blast furnace based on principle component analysis[J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2016,47(9):2943 – 2950.

[10] 李云飞. 高块矿比条件下含铁炉料软熔滴落性能新方法评价及应用研究[D]. 鞍山:辽宁科技大学,2021.
LI Yunfei. New method evaluation and application research on soft-melt dripping performance of iron-bearing charges under high lump ore ratio condition[D]. Anshan:University of Science and Technology Liaoning,2021.

[11] 李新宇,张建良,闫志武,等. 青钢高炉用 5 种块矿的综合性能评价[C]//第十四届全国炼铁原料学术会议论文集. 兰州:中国金属学会,2015:239 – 244.
LI Xinyu, ZHANG Jianliang, YAN Zhiwu, et al. Comprehensive performance evaluation of five lump ores for qingdao ironworks blast furnaces[C]//Proceedings of the 14th Nation A Cademic Conference on Ironmaking Raw Materials. Lanzhou:The Chonese Society for Metals,2025:239 – 244.

[12] 胡启晨,吴春亮,史文礼,等. 铁矿石冶金性能对高炉生产的影响[J]. 矿冶,2019,28(1):42 – 46.
HU Qichen, WU Chunliang, SHI Wenli, et al. Effect of iron ore metallurgical properties on blast furnace production[J]. Mining and Metallurgy, 2019, 28(1): 42 – 46.

(上接第 89 页)

[19] SPREITZER D,SCHENK J. Reduction of iron oxides with hydrogen: A review[J]. Steel Research International, 2019,90(10):1900108.

[20] 赵满祥,刘嘉雯,贾国利,等. 高强度生物质含碳球团制备及性能优化[J]. 中国冶金,2024,34(4):96 – 105.
ZHAO Manxiang, LIU Jiawen, JIA Guoli, et al. Preparation and performance optimization for biomass carbon-bearing pellets with high strength[J]. China Metallurgy,2024,34(4):96 – 105.

[21] 黄柱成,沈雪华,朱顺伟,等. 还原回转窑中的粉末黏结特性及其固结机理[J]. 金属矿山,2018(1):73 – 78.
HUANG Zhucheng,SHEN Xuehua,ZHU Shunwei,et al. Bonding characteristics of powder and its consolidation mechanism in rotary kiln of reduction[J]. Metal Mine, 2018(1):73 – 78.