花岗岩最优用途决策模型的构建与应用研究*

伍小雄[1]，习文琴[2]，杜坤[2]，唐国军[1]，周健[2]

（1.中电建路桥集团有限公司， 北京 100048；
2.中南大学 资源与安全工程学院， 湖南 长沙 410083）

摘要：建材矿山开采普遍存在高质低用、优劣混用等问题，造成产品品质不均、价值降低以及资源严重浪费。为此，以花岗岩为研究对象，构建了包含外观质量/化学性能、物理机械性能、经济效益、生态效益在内的4项一级指标和19项二级指标的多维度花岗岩最优用途综合评价体系，同时建立融合理化性能、经济效益和环境影响等多维度因素于一体的花岗岩最优用途决策模型。为验证模型的实用性与可靠性，选取云浮花岗岩、罗田花岗岩、黄金麻花岗岩作为研究案例，得出云浮花岗岩、罗田花岗岩、黄金麻花岗岩的最优用途分别为广场（道路或人行道）使用的天然石材、家具用天然石板、建筑用卵石碎石。采用VIKOR法、灰色关联度法进一步对计算结果进行对比分析，证实了AHP-EWM-TOPSIS决策模型的可行性。同时通过敏感性分析验证了所提出的AHP-EWM-TOPSIS决策模型具有良好的排序稳定性。研究成果可为花岗岩资源的最优用途规划提供科学依据，所构建的决策模型和开发的决策分析工具具有广阔的应用前景，可有效支持花岗岩产品的优化配置。

关键词：花岗岩用途；层次分析法（AHP）；熵权法（EWM）；TOPSIS法；决策模型

中图分类号：TD872^{+}.2　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1005-2763(2026)06-0289-09

Research on the Development and Application of an Optimal Use Decision Model for Granite

Wu Xiaoxiong[1], *Xi Wenqin*[2], *Du Kun*[2], *Tang Guojun*[1], *Zhou Jian*[2]

(1.Power China Road Bridge Group Co., Ltd., Beijing, 100048, China;
2.School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China)

Abstract: The mining of building material quarries generally suffers from problems such as the use of high-quality resources for low-end applications and the indiscriminate mixing of superior and inferior materials, resulting in inconsistent product quality, diminished value, and severe resource waste. To address this, taking granite as the research object, a multi-dimensional comprehensive evaluation system for the optimal use of granite was constructed. This system comprised four first-level indicators, namely appearance quality/chemical performance, physical and mechanical properties, economic benefits, and ecological benefits, along with 19 second-level indicators. Concurrently, a decision model for the optimal use of granite was established, integrating multi-dimensional factors including physical and chemical properties, economic benefits, and environmental impact. To verify the practicability and reliability of the model, Yunfu granite, Luotian granite, and Golden Ma granite were selected as case studies. The results determined that the optimal uses for Yunfu granite, Luotian granite, and Golden Ma granite are natural stone for plazas (roads or pavements), natural stone slabs for furniture, and pebbles and crushed stone for construction, respectively. Further comparative analyses of the calculation results were conducted using the VIKOR method and the grey correlation degree method, which confirmed the feasibility of the AHP-EWM-TOPSIS decision model. Meanwhile, sensitivity analysis verified that the proposed AHP-EWM-TOPSIS decision model possesses good ranking stability. The research results can provide a scientific basis for the optimal use planning of granite resources. The constructed decision model and the developed decision analysis tools have broad application prospects and can effectively support the optimized allocation of granite products.

Key words: Granite use, Analytic hierarchy process, Entropy weight method, TOPSIS method, Decision model

---

* **收稿日期**：2025-06-24
基金项目：国家自然科学基金项目(52374150)
作者简介：伍小雄(1985—)，男，湖南怀化人，博士，高级工程师，主要研究方向为矿业工程、石油与天然气工程。E-mail:736898609@qq.com
通信作者：习文琴(1999—)，女，江西吉安人，硕士，主要研究方向为建材矿山。E-mail:2353555273@qq.com

0 引言

建材矿山是我国矿产资源开发的重要组成部分,主要包括砂石矿、石灰石矿、花岗岩矿等。随着国家对绿色矿山建设和资源节约型社会建设的深入推进,建材矿山开发正由粗放式向高效、环保方向转型。但实际开发过程中,仍存在资源利用率低、原材料流向单一、用途决策缺乏科学支撑等问题,这些问题在花岗岩开发中尤为突出。花岗岩广泛应用于建筑结构、装饰装修、道路工程等领域,其物理力学性能直接决定了用途适配性。不同矿区花岗岩在品质、色泽、耐久性等方面差异显著,如何科学规划最优用途、杜绝资源错配,已成为建材矿山高质量发展的核心难题。

花岗岩作为一种重要的建材矿产,凭借其高强度、耐候性及美观性,广泛应用于建筑饰面、园林景观、道路工程等领域。全球建材矿产资源丰富,我国是全球最大的石材生产国和消费国之一,2023 年花岗岩市场规模达 5 834 亿元,占规格石材市场总量的 43%[1]。但我国建材矿山开发长期存在结构性矛盾:一方面,资源禀赋不均,优质大型矿山占比不足 30%,中小型矿山技术装备落后,开采效率低下;另一方面,行业准入门槛低,企业规模化程度低,资源浪费与生态环境问题突出[2]。数据显示,我国建材矿山资源综合利用率不足 50%,部分矿区因无序开采引发水土流失、景观破坏等问题,严重制约绿色矿山建设。

以花岗岩为例,其开采过程中存在“高质低用”问题。由于缺乏科学的用途决策体系,部分高抗压强度、低吸水率的优质花岗岩常被用作碎石骨料等低附加值产品,而低品质石材却用于装饰板材,造成产品价值与资源禀赋严重错配。为破解此类资源错配难题,国内外学者围绕材料替代、循环经济开展了大量研究。Salari 等[3]融合 BIM 与粒子群优化(PSO)等智能算法,构建建筑材料替代决策框架,提升了选材效率与资源配置合理性。Olaiya 等[4]验证了香蕉叶灰(BLA)替代水泥的可行性,证实其对机械性能、耐久性和可持续性的影响,有助于打造更绿色、资源利用更高效的建筑环境。Chiang 等[5]提出了基于生命周期碳排放、人工成本等多目标优化模型,实现建筑运维期材料的低成本高效配置。Pham 等[6]统筹考虑建筑预算、总劳动工日以及绿色建筑的要求,优化了建筑材料组合方案。

然而,随着多准则决策方法的快速发展,该方法已广泛应用于矿山开采方案与工艺流程优选。王滔等[7]采用 AHP-TOPSIS 法优选采矿方法及采场结构参数;刘大可等[8]基于模糊层次分析法优选帕鲁特金矿开采方案;苑尚志等[9]采用组合赋权 TOPSIS-RSR 法评价煤层底板注浆效果。但多维决策模型在花岗岩最优用途规划领域的研究尚未见报道。

基于此,结合建材矿产资源开发实际需求,本文构建多维度花岗岩用途评价指标体系,集成主客观赋权与 TOPSIS 决策方法,提出 AHP-EWM-TOPSIS 综合决策模型。通过量化分析花岗岩的理化性能、经济价值及环境影响,为建材矿山资源的高效配置与可持续开发提供理论支撑与实践指导,助力行业向集约化、绿色化转型升级。

1 理论与方法

花岗岩最优用途的决策流程为:首先构建其评价指标体系,其次确定其各项指标的权重,最终开展方案综合评价。

1.1 花岗岩最优用途评价指标体系的构建

参照国家标准《天然花岗石建筑板材》(GB/T 18601—2024)[10]、《建设用砂》(GB/T 14684—2022)[11]、《建筑用卵石、碎石》(GB/T 14685—2022)[12]及行业标准《饰面石材矿产地质勘察规范》(DZ/T 0291—2015)[13]等,筛选得到关键理化指标,综合考虑环境、经济等因素,其中环境维度的二级指标参考绿色矿山评价体系进行构建。据此分别构建建筑饰面类、建筑辅料类花岗岩用途评价指标体系,如图 1 和图 2 所示。

1.2 层次分析法和熵权法组合权重计算原理

1.2.1 层次分析法(AHP)赋权原理

层次分析法采用 1 ~ 9 标度法,经专家两两比较打分构建判断矩阵 $\boldsymbol{X}$,求解各指标权重[14],具体步骤如下。

(1) 构建判断矩阵。

设各层次包含 n 个评价指标,构建判断矩阵 $\boldsymbol{X}$ 见式(1)。

$$\boldsymbol{X}=[x_{ij}]_{n\times n}=\begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nn} \end{bmatrix} \tag{1}$$

式中,x_{ij} 代表指标 i 相对于指标 j 的重要程度。

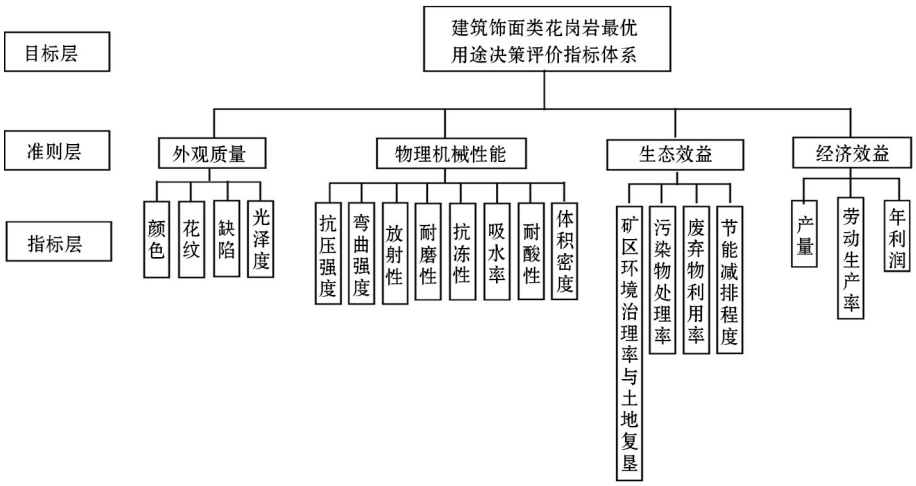


图 1　建筑饰面类花岗岩最优用途决策模型评价指标体系

Fig.1　Evaluation index system of decision model for optimal use of granite for architectural finishes

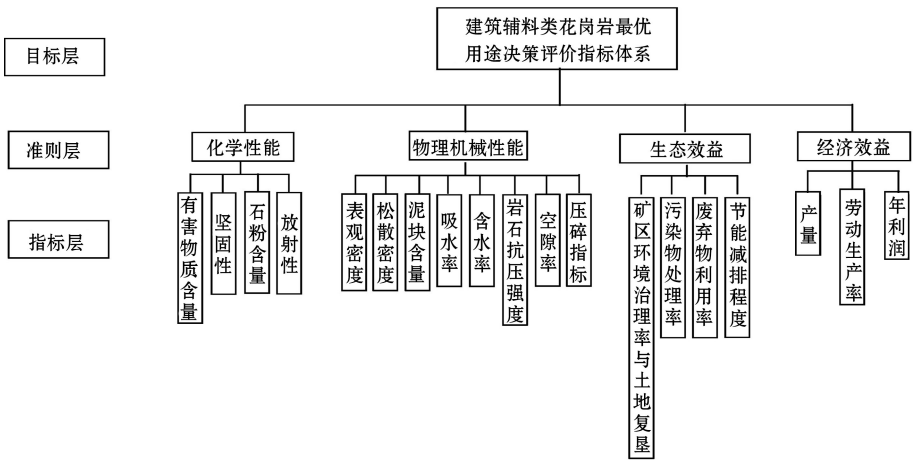


图 2　建筑辅料类花岗岩最优用途决策模型评价指标体系

Fig.2　Evaluation index system of decision model for optimal use of granite for architectural auxiliary materials

(2) 计算权重系数。

矩阵数值标准化后,根据式(2) 计算指标权重,式(3) 对指标权重归一化。

$$\bar{\omega}_i = \sum_{k=1}^{n} \bar{x}_{ik} \tag{2}$$

$$\omega_{1i} = \frac{\bar{\omega}_i}{\sum_{k=1}^{n} \bar{\omega}_{1i}} \tag{3}$$

式中:$\bar{x}_{ik}$ 为指标 i 相对于指标 k 标准化后的重要程度;$\bar{\omega}_i$ 为归一化前第 i 个指标的权重;ω_{1i} 为第 i 个指标归一化后的权重。

(3) 一致性检验。

为检验判断矩阵中各指标之间重要性是否存在相互矛盾,按照式(4) 开展一致性检验。若 $CR < 0.1$,则认为计算的权重值合理,否则需要重新构建判断矩阵。

$$CR = \frac{\lambda_{max} - N}{RI(N-1)} \tag{4}$$

式中:CR 为检验矩阵 $\boldsymbol{X}$ 的一致性;λ_{max} 为矩阵 $\boldsymbol{X}$ 的最大特征根;RI 为同阶平均随机一致性指标;N 为矩阵阶数。

1.2.2　熵权法(EWM) 获取原理

指标熵值越大,数据离散度越低,所能提供的信息量就越少,对应指标赋权权重越小[15],主要步骤如下。

(1) 原始数据处理。

设存在 m 个用途,n 个评价指标,构建判断矩阵 $\boldsymbol{R} = [r_{ij}]_{m\times n}$。对矩阵 $\boldsymbol{R}$ 进行正向化和逆向化归一化处理,得到标准矩阵 $\boldsymbol{R}' = [r'_{ij}]_{m\times n}$。

(2) 计算熵值。

根据式(5) 计算第 i 个指标下第 j 个用途的比

重 u_{ij}：

$$u_{ij}=\frac{r'_{ij}}{\sum_{i=1}^{n}r'_{ij}} \tag{5}$$

式中，r'_{ij} 为归一化从处理后第 i 个评价指标下第 j 个用途的评价值。

根据式(6)计算第 i 个指标熵值 e_i：

$$e_i=-\frac{1}{\ln n}\sum_{i=1}^{n}u_{ij}\ln u_{ij} \tag{6}$$

(3)计算权重。

根据式(7)计算指标权重 ω_{2i}：

$$\omega_{2i}=\frac{1-e_i}{\sum_{i=1}^{n}(1-e_i)} \tag{7}$$

1.2.3 组合权重获取原理

基于博弈论的思想，即主客观权重双方在不断冲突中找寻平衡点，实现最优权重组合[16]。

设 AHP 权重为 $w_{1i}=(w_{11},w_{12},\cdots,w_{1n})$，熵权法权重为 $w_{2i}=(w_{21},w_{22},\cdots,w_{2n})$，组合权重 w_i 参照式(8)进行耦合：

$$\omega_i=\alpha_1\omega_{1i}+\alpha_2\omega_{2i} \tag{8}$$

式中：ω_{1i} 为 AHP 法第 i 个指标的权重；ω_{2i} 为熵权法第 i 个指标的权重；α_1 为 AHP 法的组合权重系数；α_2 为熵权法的组合权重系数。

为保证组合权重达到最优，即组合权重与各权重之间的偏差平方和最小，由此建立式(9)所示的目标函数：

$$\min\omega=\sum_{i=1}^{n}[(\omega_i-\omega_{1i})^2+(\omega_i-\omega_{2i})^2] \tag{9}$$

当 $\alpha=0.5$ 时，组合权重达到最优，即 $\omega_i=0.5\omega_{1i}+0.5\omega_{2i}$。

1.3 基于 TOPSIS 法的决策模型

(1)原始数据处理。

原始数据归一化、标准化后得到标准化矩阵 $\boldsymbol{Z}$，将计算的组合权重矩阵 $\boldsymbol{W}$ 与标准化矩阵 $\boldsymbol{Z}$ 相乘，得到加权决策矩阵 $\boldsymbol{U}=[u_{ij}]_{m\times n}$。

(2)计算各用途与正负理想解的距离。

基于式(10)计算第 j 个用途与正理想解的距离 D_j^+：

$$D_j^+=\sqrt{\sum_{i=1}^{m}\omega_i(U_i^+-u_{ij})^2} \tag{10}$$

基于式(11)计算第 j 个用途与负理想解的距离 D_j^-：

$$D_j^-=\sqrt{\sum_{i=1}^{m}\omega_i(U_i^--u_{ij})^2} \tag{11}$$

式中：U_i^+ 为第 i 行的最大值，即正理想解；U_i^- 为第 i 行的最小值，即负理想解。

(3)用途与最优方案的接近程度。

计算各用途与正负理想解的距离后，计算贴合度来对各方案进行排序，其计算公式如式(12)所示。贴合度越大即该方案越优。

$$C_j=\frac{D_j^-}{D_j^++D_j^-} \tag{12}$$

式中，C_j 为第 j 个用途的贴合度。

2 案例分析

为验证模型的可行性与鲁棒性，选取中粒云浮花岗岩、细粒罗田花岗岩、粗粒黄金麻花岗岩为试样，获取其客观物理数据。同时结合国标理化指标要求，初步筛选出不符合相关标准的用途方案。

2.1 花岗岩基本性能测试

2.1.1 试样制备与测试

本次试验所用花岗岩为粗粒黄金麻花岗岩、中粒云浮花岗岩、细粒罗田花岗岩。试样尺寸及测试标准见表 1，开展单轴压缩测试、四点弯弯曲强度测试、三点弯弯曲强度测试、吸水率测试、耐酸性测试、耐磨性测试、硬度测试、抗冻性测试、放射性测试等。

表 1 试样尺寸及测试标准

Table 1 Specimen size and test standard

测试指标	尺寸/mm	测试标准
单轴抗压强度	Φ50×50	GB/T 9966.1—2020[17]
四点弯测弯曲强度	250×100×20	GB/T 9966.2—2020[18]
三点弯测弯曲强度	250×50×50	GB/T 9966.2—2020[18]
吸水率、体积密度	Φ50×50	GB/T 9966.3—2020[19]
耐磨性	50×50×30	GB/T 9966.4—2020[20]
硬度	100×100×50	GB/T 9966.5—2020[21]
耐酸性	80×60×20	GB/T 9966.6—2020[22]
抗冻性	Φ50×100	GB/T 9966.3—2020[19]
放射性	粒径 0.16	GB 6566—2010[23]

2.1.2 试验结果

将上述试验所得结果汇总于表 2。由表 2 可知，云浮、罗田花岗岩抗压强度高，密度大，结构稳定性优异；同时其具备良好的抗弯曲性，切割后不易破裂；吸水率较低，可使产品长期保持稳定性与装饰性，不易产生水渍缺陷；硬度为饰面石材的核心指标，高硬度的花岗岩耐划伤、耐磨损、耐腐蚀，抗风化能力强；耐磨性高，高耐磨性意味着耐摩擦能力强，适用于地面、台面等高流量区域。

综上,云浮、罗田花岗岩装饰性能突出,更适用于建筑装饰类用途;黄金麻花岗岩的弯曲强度低,无法适用于饰面石材、建筑板材,但其放射性偏低,可考虑用于建筑辅料。

表 2 花岗岩物理化学参数汇总

Table 2 Summary of physical and chemical parameters of granite

试样类别	干燥单轴抗压强度/MPa	水饱和单轴抗压强度/MPa	干燥弯曲强度/MPa	水饱和弯曲强度/MPa	吸水率/%	体积密度/(g/cm³)	耐磨性/cm⁻³	肖氏硬度/HSD	耐酸性/%	放射性		冻融系数
										内照射指数	外照射指数	
云浮花岗岩	143.48	135.17	10.54	9.98	0.56	2.59	66.75	85	0.04	0.81	0.96	0.82
罗田花岗岩	228.65	226.87	17.43	15.92	0.40	2.57	69.75	96	0.04	0.10	0.67	0.91
黄金麻花岗岩	116.02	90.19	4.13	1.73	0.71	2.53	36.25	75	0.12	0.02	0.47	0.87

2.2 指标权重的计算

为获取花岗岩最优用途决策模型基础数据,邀请企业及高校石材方向的 10 名专家对各指标进行综合打分,结合评分结果和客观数据计算指标权重。

基于层次分析法、熵权法和组合权重计算原理,各组合权重结果见表 3。表 3 结果表明,建筑饰面类指标中,组合权重最大的为硬度(13.11%)、体积密度(10.11%)、抗压强度(7.41%),该 3 种指标为建筑饰面类用途的核心控制指标。在建筑辅料类中,组合权重最大的为有害物质含量(10.27%)、岩石抗压强度(9.95%)、坚固性(8.79%)、,表明在建筑辅料类中主要考虑的是安全性(有害物质)、结构功能(坚固性、抗压强度)。两类指标对比显示:建筑饰面类更侧重硬度与体积密度,建筑辅料类更侧重有害物质及结构功能。

表 3 花岗岩最优用途评价指标组合权重值

Table 3 Combination weighting values for the optimal use evaluation index of granite

建筑饰面类指标	组合权重/%	建筑辅料类指标	组合权重/%
颜色	3.52	有害物质含量	10.27
花纹	2.86	坚固性	8.79
缺陷	4.79	石粉含量	4.81
光泽度	2.87	放射性	4.98
硬度	13.11	表观密度	7.11
抗压强度	7.41	松散密度	5.47
放射性	4.58	泥块含量	4.44
耐磨性	5.95	吸水率	6.08
抗冻性	3.77	含水率	3.93
吸水率	5.66	岩石抗压强度	9.95
耐酸性	3.54	空隙率	3.63
体积密度	10.11	压碎指标	5.09
产量	4.28	产量	4.14
劳动生产率	3.60	劳动生产率	3.51
年利润	5.09	年利润	3.91
矿区环境治理率与土地复垦率	6.22	矿区环境治理率与土地复垦率	3.20
污染物处理率	4.83	污染物处理率	3.81
废弃物利用率	4.22	废弃物利用率	4.21
节能减排程度	3.59	节能减排程度	2.67

2.3 综合评价

结合 3 种花岗岩的理化指标,初步优选云浮花岗岩的用途为天然石材墙地砖(A)、广场(道路或人行道)使用的天然石材(B)、石雕石刻品(C)、异型装饰石材(D);罗田花岗岩的用途为天然石材墙地砖(A)、卫生间用天然石材台面板(E)、广场(道路或人行道)使用的天然石材(B)、石雕石刻品(C)、家具用天然石板(F)、异型装饰石材(D);黄金麻花岗岩的用途为高性能混凝土用细骨料(G)、建筑用卵石碎石(H)、建筑用砂(I)、高性能混凝土用粗骨料(J)。

基于 TOPSIS 的计算原理,3 种花岗岩的评价结果见表 4 至表 6。结果表明,云浮花岗岩、罗田花岗岩、黄金麻花岗岩最优用途编号依次为 B、F、H。

表 4 云浮花岗岩评价结果

Table 4 Evaluation results of Yunfu granite

用途	相近贴近度
A	0.555
B	0.961
C	0.279
D	0.023

表 5 罗田花岗岩评价结果

Table 5 Evaluation results of Luotian granite

用途	相近贴近度
A	0.458
E	0.788
B	0.572
C	0.409
F	0.902
D	0.166

表 6 黄金麻花岗岩评价结果

Table 6 Evaluation results of Golden Ma granite

用途	相近贴近度
J	0.809
G	0.002
H	0.999
I	0.71

2.4 决策模型可行性分析

为验证 TOPSIS 法进行花岗岩最优用途决策的可行性,采用 AHP-EWM-TOPSIS 决策模型计算的结果与 VIKOR 法、灰色关联度法计算结果进行对比分析。

2.4.1 基于 VIKOR 法花岗岩用途评价

为保证计算结果更具可比性,权重和基础数据与 TOPSIS 法保持一致,得到的云浮花岗岩、罗田花岗岩、黄金麻花岗岩用途排序结果见表 7 至表 9。排序结果依据利益比率 Q 值的大小进行排序,利益比率 Q 值越小,用途优先级越高。云浮花岗岩的用途从最优到最劣排序依次为 B、A、C、D,最优用途为 B;罗田花岗岩用途从最优到最劣排序依次为 F、E、B、A、C、D,最优用途为 F;黄金麻花岗岩用途从最优到最劣排序依次为 H、J、I、G,最优用途为 H。

表 7 云浮花岗岩 VIKOR 法评价结果

Table 7 Evaluation results of Yunfu granite using the VIKOR method

用途	利益比率 Q 值	排序结果
A	0.565 2	2
B	0.001 0	1
C	0.764 8	3
D	0.850 5	4

表 8 罗田花岗岩 VIKOR 法评价结果

Table 8 Evaluation results of Luotian granite using the VIKOR method

用途	利益比率 Q 值	排序结果
A	0.193 0	4
E	0.101 5	2
B	0.159 1	3
C	0.243 8	5
F	0.077 1	1
D	0.289 0	6

表 9 黄金麻花岗岩 VIKOR 法评价结果

Table 9 Evaluation results of Golden Ma granite uning the VIKOR method

用途	利益比率 Q 值	排序结果
J	0.470 3	2
G	0.786 9	4
H	0.270 9	1
I	0.640 2	3

2.4.2 基于灰色关联度法花岗岩用途评价

灰色关联度法以关联度为排序指标,关联度越大,排名越靠前。权重和数据的选择与 TOPSIS 法一致,得到云浮花岗岩、罗田花岗岩、黄金麻花岗岩的用途排序见表 10 至表 12。结果表明,基于灰色关联度法计算的花岗岩最优用途排序与上述 TOPSIS 法、VIKOR 法计算的花岗岩最优用途结果排序相同。

表 10 云浮花岗岩灰色关联度法评价结果

Table 10 Evaluation results of Yunfu granite using the grey correlation method

用途	关联度	排名
A	0.965	2
B	0.990	1
C	0.954	3
D	0.945	4

表 11 罗田花岗岩灰色关联度法评价结果

Table 11 Evaluation results of Luotian granite using the grey correlation method

用途	关联度	排名
A	0.720	4
E	0.782	2
B	0.770	3
C	0.616	5
F	0.788	1
D	0.581	6

表 12 黄金麻花岗岩灰色关联度法评价结果

Table 12 Evaluation results of Golden Ma granite using the grey correlation method

用途	关联度	排名
J	0.991	2
G	0.965	4
H	1.000	1
I	0.981	3

2.4.3 3 种评价方法结果对比分析

图 3、图 4 和图 5 分别为不同模型计算云浮花岗岩、罗田花岗岩、黄金麻花岗岩的用途结果,研究结果表明:3 种花岗岩用途评价结果一致,云浮花岗岩评价结果从最优到最劣排序依次为 B、A、C、D,最优用途为 B;罗田花岗岩评价结果从最优到最劣排序依次为 F、E、B、A、C、D,最优用途为 F;黄金麻花岗岩评价结果从最优到最劣排序依次为 H、J、I、G,最优用途为 H。多方法结果一致性证明了本文提出的决策模型的可行性。

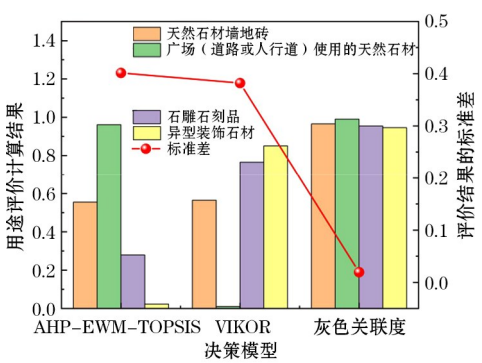


图 3 不同模型计算云浮花岗岩用途结果

Fig.3 Results of Yunfu granite use calculated by different models

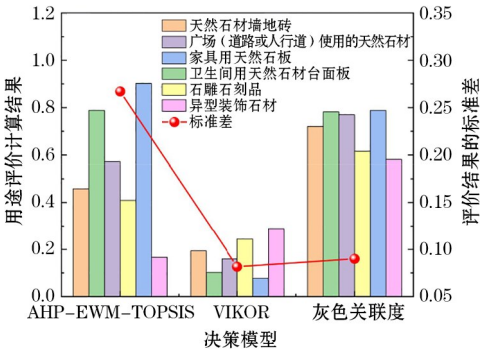


图 4 不同模型计算罗田花岗岩用途结果

Fig.4 Results of Luotian granite use calculated by different models

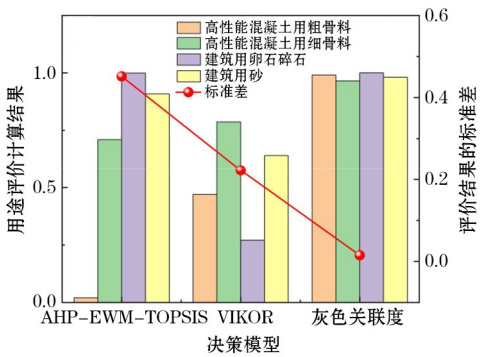


图 5 不同模型计算黄金麻花岗岩用途结果

Fig.5 Results of Golden Ma granite use calculated by different models

2.5 AHP-EWM-TOPSIS 决策模型敏感性分析

为检验模型的指标权重扰动敏感性与排序鲁棒性,本文采用±5%的随机扰动模拟实际权重波动,经 50 轮扰动迭代后,重新计算各方案 TOPSIS 得分及排序,结果如图 6 所示。结果表明,3 种花岗岩用途的排序结果基本保持不变。云浮花岗岩仅在第 18 轮、第 33 轮、第 38 轮扰动中改变了石雕石刻品和异型装饰石材的排名,但前 2 位的用途排序结果保持不变;罗田花岗岩前 4 位排序结果保持不变,仅在第 16 轮、第 33 轮、第 34 轮、第 46 轮权重扰动改变了家具用天然石板和异型装饰石材的排名;黄金麻花岗岩在权重扰动下前 2 位用途的排序保持不变,仅在第 22 轮、第 44 轮的权重变化改变了建筑用卵石碎石和建筑用砂的排名。

综上,3 种花岗岩的用途排名基本上保持不变,各花岗岩的用途在 50 轮扰动中排名波动不超过 1 位,整体前列与末位用途在各轮次中排名保持相对恒定。这表明扰动前后的排序结果高度一致,证实了 AHP-EWM-TOPSIS 决策模型具有较强的鲁棒性。

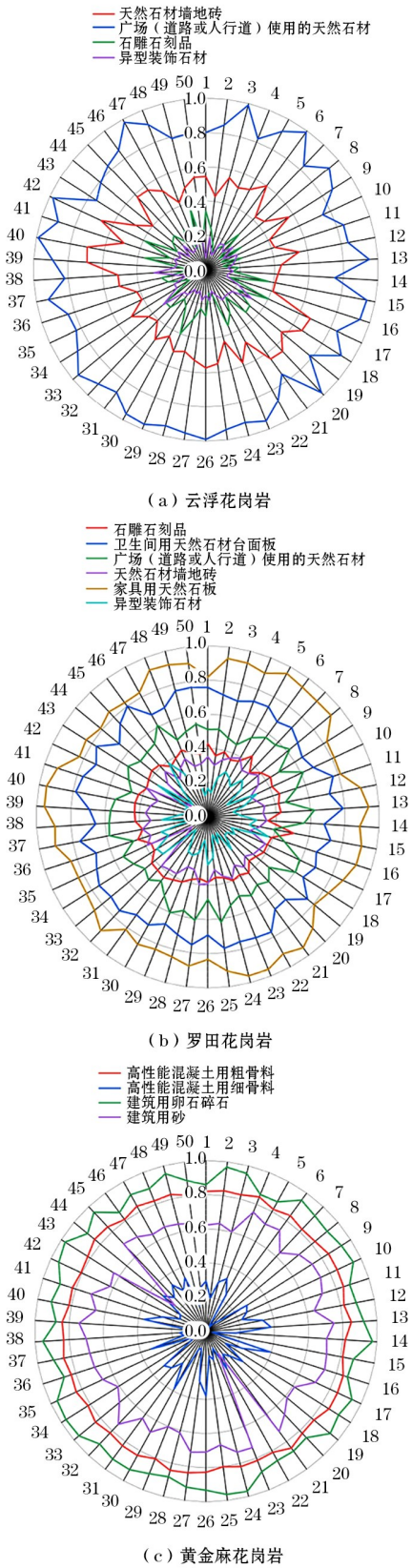


图 6 AHP-EWM-TOPSIS 决策模型敏感性分析结果

Fig.6 Sensitivity analysis results of AHP-EWM-TOPSIS decision model

3 结论

(1) 参照相关行业和国家标准,综合考虑花岗岩的经济效益和生态效益等多个维度因素,构建了建筑饰面类和建筑辅料类花岗岩最优用途的评价指标体系,包括外观质量/化学性能、物理性能、经济效益和生态效益4项一级指标和19项二级指标。

(2) 通过与VIKOR法、灰色关联度法进行对比分析,结果显示花岗岩最优用途一致;敏感性分析采用±5%的随机扰动模拟实际权重波动,经50轮扰动后,三种花岗岩的用途排名波动不超过1位,整体上前列与末位用途在各轮次中的排名保持相对恒定,这表明模型对输入参数变化不敏感,从而证明决策模型的可行性和鲁棒性。该模型为花岗岩资源的高效、可持续配置提供了强有力的决策支持工具。

(3) 以云浮花岗岩、罗田花岗岩、黄金麻花岗岩为例,利用基于AHP-EWM-TOPSIS方法的花岗岩最优用途决策模型,得到3种花岗岩的用途优先级排序,最终得到云浮花岗岩、罗田花岗岩、黄金麻花岗岩的最优用途分别为广场(道路或人行道)使用的天然石材、家具用天然石板、建筑用卵石碎石。

参考文献(References):

[1] 贺姣阳,田静,孙卫星.2023年中国石材行业发展报告[J].中国建材,2024(4):78-84.
He Jiaoyang, Tian Jing, Sun Weixing. Development report of China's stone industry in 2023 [J]. China Building Materials,2024(4):78-84.

[2] 寿立永,李向阳,欧阳友和,等.我国石材矿山绿色开发存在的问题与思考[J].中国非金属矿工业导刊,2020(6):41-44.
Shou Liyong, Li Xiangyang, Ouyang Youhe, et al. Problems and suggestions on green mining of stone mines in China[J]. China Non-metallic Minerals Industry,2020(6):41-44.

[3] Salari M, Ghanbari M, Skitmore M, et al. Developing a framework for selecting alternative materials for construction projects using BIM and the particle swarm optimization algorithm [J]. Construction Innovation-england,2024,26(3):745-767.

[4] Olaiya B C, Lawan M M, Olonade K A, et al. Banana leaf ash as sustainable alternative raw material for the production of concrete: a review[J]. Discover Materials,2025,5(1):16.

[5] Chiang Yat Hung, Li Jing, Zhou Lu, et al. Achieving sustainable building maintenance through optimizing life-cycle carbon, cost, and labor: case in Hong Kong[J]. Journal of Construction Engineering and Management,2014,140(3):10.

[6] Pham A D, Nguyen Q T, Luong D L, et al. The Development of adecision support model for eco-friendly material selection in vietnam[J]. Sustainability, 2020, 12(7):19.

[7] 王滔,孙刚友,杨江坤,等.基于AHP-TOPSIS的急倾斜薄矿脉采矿方法及采场结构参数优选[J].铀矿冶,2025,44(2):38-51.
Wang Tao, Sun Gangyou, Yang Jiangkun, et al. Mining methods and structural parameter optimization for steeply inclined thin ore veins based on AHP-TOPSIS [J]. Uranium Mining and Metallurgy,2025,44(2):38-51.

[8] 刘大可,张浩强,郭翔,等.基于模糊层次分析法的帕鲁特金矿开采方法优选[J].现代矿业,2025,41(3):109-114.
Liu Dake, Zhang Haoqiang, Guo Xiang, et al. Optimization of pakrut gold mine based on fuzzy analytic hierarchy process[J]. Modern Mining,2025,41(3):109-114.

[9] 苑尚志,王精华,张伟杰,等.基于组合赋权的TOPSIS-RSR法的煤层底板注浆效果评价体系[J].采矿与岩层控制工程学报,2024,6(3):140-151.
Yuan Shangzhi, Wang Jinghua, Zhang Weijie, Evaluation system of grouting effect of coal seam floor based on TOPSIS-RSR method with combination weighting [J]. Journal of Mining And Strata Control Engineering,2024,6(3):140-151.

[10] 全国石材标准化技术委员会(SAC/TC 460).天然花岗石建筑板材:GB/T 18601—2024[S].北京:中国标准出版社,2024.

[11] 中国建筑材料联合会.建设用砂:GB/T 14684—2022[S].北京:中国标准出版社,2022.

[12] 中国建筑材料联合会.建设用卵石、碎石:GB/T 14685—2022[S].北京:中国标准出版社,2022.

[13] 全国国土资源标准化技术委员会(SAC/TC93).饰面石材矿产地质勘查规范:DZ/T 0291—2015[S].北京:地质出版社,2015.

[14] 张桂香.基于AHP法及综合指数法的城市地下空间利用地质环境条件适宜性评价:以深圳西部重点片区为例[J].城市勘测,2025(1):197-201.
Zhang Guixiang. Suitability evaluation of urban underground space using geological environment conditions based on AHP method an comprehensive index method-take the western district of Shenzhen as an example[J]. Urban Geotechnical Investigation & Surveying,2025(1):197-201.

[15] 王一冰,高鸽,安洪岩,等.基于熵权优化综合污染评价法的河南省典型湖泊水质评价与污染因子识别[J].中国地质,2026(1):190-202.
Wang Yibing, Gao Ge, An Hongyan, et al. Water quality evaluation and pollution factor identification of typical lakes in Henan Province based on entropy weight optimization comprehensive pollution assessment method[J]. Geology in China,2026(1):190-202.

[16] 陈伟,夏建华.综合主、客观权重信息的最优组合赋权方法[J].数学的实践与认识,2007(1):17-22.

Chen Wei, Xia Jianhua. An optimal weights combination method considering both subjective and objective weight information[J]. Mathematics in Practice and Theory,2007(1):17-22.

[17] 全国石材标准化技术委员会(SAC/TC 460).天然石材试验方法 第1部分:干燥、水饱和、冻融循环后压缩强度试验:GB/T 9966.1—2020[S].北京:中国标准出版社,2020.

[18] 全国石材标准化技术委员会(SAC/TC 460).天然石材试验方法 第2部分:干燥、水饱和、冻融循环后弯曲强度试验:GB/T 9966.2—2020[S].北京:中国标准出版社,2020.

[19] 全国石材标准化技术委员会(SAC/TC 460).天然石材试验方法 第3部分:吸水率、体积密度、真密度、真气孔率试验:GB/T 9966.3—2020[S].北京:中国标准出版社,2020.

[20] 全国石材标准化技术委员会(SAC/TC 460).天然石材试验方法 第4部分:耐磨性试验:GB/T 9966.4—2020[S].北京:中国标准出版社,2020.

[21] 全国石材标准化技术委员会(SAC/TC 460).天然石材试验方法 第5部分:硬度试验:GB/T 9966.5—2020[S].北京:中国标准出版社,2020.

[22] 全国石材标准化技术委员会(SAC/TC 460).天然石材试验方法 第6部分:耐酸性试验:GB/T 9966.6—2020[S].北京:中国标准出版社,2020.

[23] 中国建筑材料联合会.建筑材料放射性核素限量:GB 6566—2010[S].北京:中国标准出版社,2010.