

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): 033537.

YUAN Shangzhi, WANG Jinghua, ZHANG Weijie, et al. 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): 033537.

基于组合赋权的TOPSIS-RSR法的煤层底板 注浆效果评价体系

苑尚志¹, 王精华¹, 张伟杰¹, 韩承豪^{1,2}, 王国栋¹, 贾东秀³, 刘磊³, 郭洪运³

(1. 山东科技大学 地球科学与工程学院, 山东 青岛 266590; 2. 山东科技大学 能源与矿业工程学院, 山东 青岛 266590; 3. 山东省邱集煤矿有限公司, 山东 德州 251100)

摘要: 区域地面超前注浆是预防底板水害的有效手段, 如何利用钻探及注浆施工过程的数据对注浆效果进行客观评价, 是目前迫切需要解决的问题。以山东省邱集煤矿1111采区D3, D10, D11和D12地面孔组注浆工程为背景, 结合已有研究与现场经验, 选取钻井液漏失量、注浆终压、渗透系数以及单位注浆量作为评价指标, 建立了注浆效果综合评价体系, 提出一种综合改进后的层次分析法与CRITIC客观赋权法的赋权方式, 利用算术平均法、几何平均法、特征值法等改进AHP, 该方法提高了指标赋权的客观性和科学性; 基于组合赋权方式更新了TOPSIS, RSR排序分档的注浆效果综合评价模型, 利用相对距离优化了TOPSIS相对贴近度的缺陷, 改进了数据处理结果; 将评价结果转换为可视化分区图, 与注浆后井下钻探揭露涌水量结果进行对比, 结果显示该评价方法合理, 与工程实际结果较为吻合。

关键词: 煤层底板注浆; 改进AHP法; 改进TOPSIS法; 超前注浆效果评价

中图分类号: TD82; TD74 文献标志码: A 文章编号: 2096-7187(2024)03-3537-12

Evaluation system of grouting effect of coal seam floor based on TOPSIS-RSR method with combination weighting

YUAN Shangzhi¹, WANG Jinghua¹, ZHANG Weijie¹, HAN Chenghao^{1,2}, WANG Guodong¹,
JIA Dongxiu³, LIU Lei³, GUO Hongyun³

(1. College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2. College of Energy and Mining Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 3. Shandong Qiuji Coal Mine Co., Ltd., Dezhou 251100, China)

Abstract: Karst aquifer in the floor is severe threat to deep coal seam mining. Regional ground pre-grouting is an effective means to prevent floor water inundation. How to use the data of the drilling and grouting construction process to evaluate the grouting effect objectively is an urgent problem to be solved. Taking the grouting project of D3, D10, D11, and D12 surface hole groups in the 1111 mining area of Qiuji Coal Mine in Shandong Province as the background, the comprehensive evaluation system of the grouting effect was established by taking drilling fluid leakage, final grouting pressure, permeability coefficient and unit grouting amount as evaluation indexes. An improved analytic hierarchy process (AHP method) combined with the subjective and objective comprehensive

收稿日期: 2023-11-23

修回日期: 2024-01-16

责任编辑: 张 沛

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(52304239); 山东省自然科学基金资助项目(ZR2021MD016)

作者简介: 苑尚志(2000—), 男, 山东济宁人, 硕士研究生, 主要从事地下工程灾害机理与防控等方面的研究工作。

通信作者: 张伟杰(1984—), 山东菏泽人, 副教授, 硕士生导师。E-mail: sduzhangweijie@126.com

weighting method of CRITIC accurate weighting method is proposed. The arithmetic average method, geometric average method, and eigenvalue method are used to improve AHP method. Based on the combination weighting method, a comprehensive evaluation model of the grouting effect based on TOPSIS sorting and WRSR auxiliary grading is established. The relative distance is used to optimize the defect of TOPSIS relative nearness degree and improve the data processing results. The evaluation results are converted into visual zoning maps and compared with water inflow revealed by underground drilling after grouting. The results show that the evaluation method is reasonable and consistent with the field actual results.

Key words: coal seam floor grouting; improved AHP; improved TOPSIS; evaluation of advanced grouting effect

近年来,我国东部煤炭开发逐步向深部转移,受底板薄层岩溶含水层和奥陶纪灰岩岩溶含水层的严重威胁^[1-2],底板水害事故^[3]时有发生,对煤炭安全开采带来了严峻挑战。以往的研究与实践^[4-7]表明,底板注浆改造技术是一种有效解放受岩溶水威胁的煤炭资源的措施。近年来,在冀北、邯郸、两淮、黄河北等矿区实施的利用地面定向顺层钻孔的岩溶含水层区域地面注浆改造技术^[8],取得了显著的经济效益和社会效益,解放了大量受威胁的煤炭资源。

在实际工程实践^[9-11]中,由于地面区域注浆治理范围较大、定向钻孔距离较长,导致浆液扩散机理较为复杂,给注浆效果的检测与评价^[12]增添了难度。如何评价地面注浆施工的效果,是目前国内外学者关心和亟待解决的问题。期望通过对注浆效果的合理评价,来判断注浆效果是否达到设计要求、能否满足安全需求。如果注浆效果评价与实际偏差较大,可能会造成不必要的安全生产事故,因此,保证注浆效果评价的准确性十分重要。目前广泛应用的注浆效果检测评价方法是物探法、压水试验法^[13]、检查孔取芯法以及P-Q-T曲线法^[14],近年来,专家学者在此基础上与综合评价相结合,形成了一系列系统、全面的评估方法:董书宁等^[15]基于顺层定向钻孔进行注浆改造的超前区域治理技术,构建了煤层底板水害超前区域治理的理论框架与技术体系,提出了注浆全过程的多指标定性、定量效果检验与评价技术;王晓蕾等^[16]利用分段注水法、浆液填充率法、钻孔电视法、力学参数法、取芯检查法、地质雷达法等方法,对煤岩体进行了定量分析,并展开了应用研究;王德明等^[17]构建了一套评价注浆效果的层次化指标体系,并将各个评估因素进行了量化,得到了一次与二次评估指标的模糊综合评判法;后钱峰等^[18]以注浆施工过程

为基础,从注浆过程控制、注浆结束控制、注浆效果检验、注浆可靠性评价等方面,建立了2-3级注浆效果评价体系;陈军涛等^[19]将AHP法与CRITIC法相结合,建立了TOPSIS-RSR评价模型;李金华等^[20]分析了不同水灰比和注浆压力条件下浆液在煤岩体裂隙中的沉积压力特征,提出了一种裂隙动水注浆效果的评价方法;段李宏^[21]在矿井典型2517大采长工作面采用底板注浆改造技术解放受底板太原组灰岩水威胁的煤层,通过3次物探结果来评价底板注浆的改造效果。这些方法充分利用了注浆工程中产生的数据,通过指标权重分配,运用统计学,构建了数学模型,并与工程实际相结合,获得了较好的效果。但这些方法受主观因素的影响较多,评价标准因人而异,客观性上也存在着缺陷。

针对此,笔者以邱集煤矿1111采区D3、D10、D11和D12地面孔组覆盖区域的地面区域注浆改造工程为背景,选取注浆终压^[22]、钻井液漏失量^[23]、单位注浆量^[24]、渗透系数^[25]等作为评价指标,提出了一种改进的AHP^[26-27]和CRITIC^[28-29]赋权的TOPSIS-RSR^[30]地面区域注浆效果综合评价方法。为了提高权值分配的客观性,采用CRITIC法对数据之间的相关性进行分析,利用算术平均法、特征值、几何平均法3个原则来改进AHP,进一步提高评价指标赋权的合理性和客观性;采用优化后的TOPSIS-RSR法排序分档模型,利用相对距离优化了TOPSIS相对贴近度的缺陷,改进了评价指标数据的处理结果,使评价结果更符合实际。提出的注浆效果评估方法可为相似条件下的地面超前注浆效果评估提供参考。

1 工程概况

邱集煤矿位于齐河县马集镇,井田内目前主采

11煤。地下含水层自上而下分布为: 新近系底砾岩含水层, 风氧化带含水层, 太原组的一灰、二灰、三灰、四五灰以及徐灰含水层, 奥陶系的灰岩含水层。其中徐灰含水层上距11煤30.62~39.14 m, 平均35.40 m, 与四五灰、奥灰存在一定的水力联系, 是11煤的间接充水含水层。开采11煤前需对徐灰含水层进行注浆改造治理, 使其成为弱含水层或相对隔水层, 来保证11煤的开采安全。

笔者选取1111采区D3, D10, D11和D12地面孔组覆盖区域作为研究区。注浆材料以水泥浆为主, 胶结料为普通硅酸盐PO32.5水泥, 在注浆量较大且压力升高缓慢的情况下, 适当灌注水泥粉煤灰双液浆。研究区范围及地面孔组设计如图1所示。

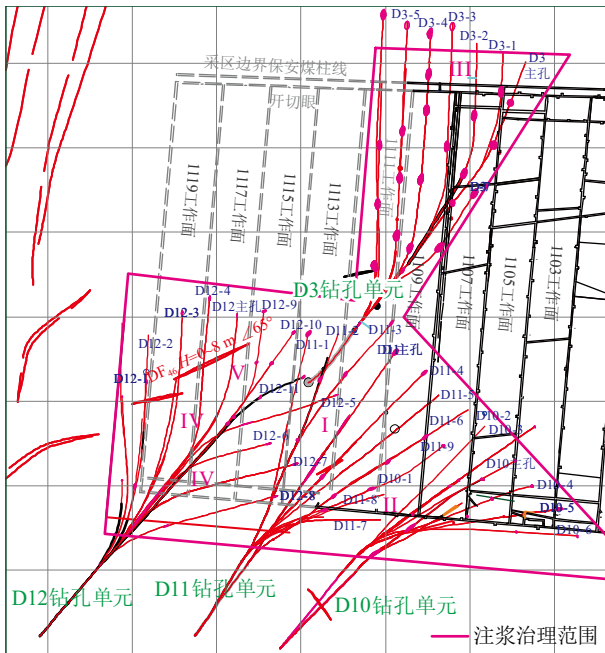


图1 D3, D10, D11, D12 孔组覆盖区域

Fig. 1 Coverage area of D3, D10, D11 and D12 well groups

2 注浆效果评价指标

注浆效果评价是指, 在注浆工程完成之后, 运用特定的技术手段, 对注浆堵水或加固效果进行评估, 以便能够对注浆相对薄弱的区域采取相应的措施, 确保矿井的安全生产。注浆效果评价应选取适当的评价指标。

由前人^[4]的成果可知, 在注浆过程中, 必须要有一定的压力, 来克服诸如静水压力之类的各种阻力, 让浆液能够渗入岩层之中, 这样才能达到浆液扩散的设计要求。注浆压力是注浆施工的主要控

制因素, 它直接影响注浆扩散、裂缝充填和注浆的效果。渗透系数表征流体对岩土体的渗透能力, 能够反映注浆后岩层透水等级。注浆过程中, 钻井液漏失量一定程度上也可以定量评价注浆的效果, 它可以揭露该孔影响范围内的煤层底板地质构造情况, 漏失量多的钻孔, 其覆盖地层地质构造较复杂, 断层或密集岩溶裂隙较发育; 漏失量少的钻孔覆盖区域地质构造较简单。地层构造的复杂程度会影响后续的注浆工程, 越复杂的地层对注浆工艺的要求越高, 施工难度也越大, 因此会对注浆效果产生一定影响。单位注浆量指注孔段平均每米消耗的水泥吨数, 能较客观地反映裂隙发育情况, 单位注浆量数据越均匀, 表明地层裂隙发育越均一, 反之表明空间上地层裂隙发育程度差异越大。

综上所述, 结合邱集矿区的实际情况, 选取4个变量作为评价注浆效果的指标, 即钻井液漏失量、注浆终压、渗透系数以及单位注浆量。注浆终压和单位注浆量在注浆站可直接获取; 钻井液漏失量可在钻探过程中测得; 渗透系数可通过现场压水试验获得。4项指标相互独立, 满足指标选取的客观性、全面性和易收集原则。基于这4项指标, 结合CRITIC客观赋权法和改进后的层次分析法(AHP), 采用优化的TOPSIS和RSR排序分档方法, 建立了改进后的注浆效果评价体系, 包括3个主要部分, 如图2所示。

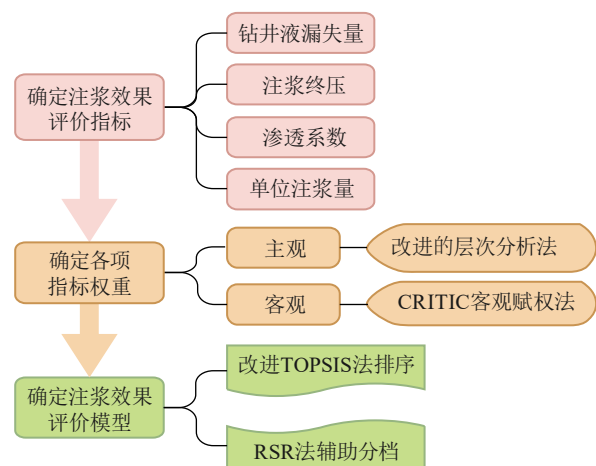


图2 注浆效果评价体系

Fig. 2 Evaluation system of grouting effect

3 注浆效果评价体系

3.1 改进AHP-CRITIC综合赋权法

综合赋权法的关键是对指标进行赋权, 权重反

映了各指标在评估中的相对重要性, 因此, 一种客观而准确的权重分配方法至关重要。为最大程度的发挥数据间的内在联系和专家的经验知识, 采用一种改进AHP-CRITIC综合赋权法对各项指标进行赋权。

3.1.1 改进 AHP 法

层次分析法(AHP)是一种将定性和定量相结合的决策分析方法, 可用来解决复杂问题。因其具有主观性, 所以笔者提出一种改进AHP法, 即通过算术平均法、几何平均法、特征值法等3种方式综合判断, 弥补AHP主观单一的不足。

建立评估指标的综合评判矩阵, 用1~9及其倒数的标度方法来对它进行定义, 在两两比较后, 得到比较判断矩阵

$$\mathbf{A} = (a_{ij})_{n \times n} \quad (1)$$

式中, $a_{ij} = 1/a_{ji}, a_{ii} = 1$ 。

因此判断矩阵必须为正互反矩阵。

算术平均法: 将比较判断矩阵 $\mathbf{A}$ 按列归一化, 得到标准矩阵, 再对归一化的矩阵每行进行算术平均, 从而获得权向量, 计算公式为

$$\alpha_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{a_{ij}}{\sum_{k=1}^n a_{kj}} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

几何平均法: 将比较判断矩阵 $\mathbf{A}$ 按列归一化, 得到标准矩阵, 再对归一化的矩阵每行进行几何平均, 计算公式为

$$\beta_i = \frac{\prod_{j=1}^n a_{ij}^{1/n}}{\sum_{k=1}^n (\prod_{j=1}^n a_{kj})^{1/n}} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

特征值法: 将比较判断矩阵 $\mathbf{A}$ 按列归一化, 得到归一化的标准矩阵, 之后, 在每一行中, 将标准化矩阵求出最大特征根以及与之相对应的特征向量, 并进行归一化, 就可以得到权重向量, 最大特征值计算方法为

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(A\omega)_i}{\omega_i} \quad (4)$$

优化后的AHP把研究对象作为体系, 按照分析、对比、评判等更综合的方法做出决定, 从而更具系统性。通过对问题的本质、影响因素及内在联系的深刻剖析, 实现对多指标、多指标或非结构性决策问题的数学建模, 为其快速、便捷的决策提供理论依据。

3.1.2 CRITIC 客观权重法

CRITIC是根据数据的波动性, 对数据进行客

观赋权的方法。其建立在两个指数上, 即波动性(对比度)和冲突性(关联度)。波动性计算公式为

$$S_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (x_{ij} - \bar{x}_j)^2}{n-1}} \quad (5)$$

式中, $\bar{x}_j$ 为每个指标(列)数据均值。

冲突性计算时要用到指标的相关性矩阵, 计算公式为

$$r_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)(x_{ik} - \bar{x}_k)}{\sqrt{\sum_{j=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)^2 \sum_{k=1}^n (x_{ik} - \bar{x}_k)^2}} \quad (6)$$

则冲突性计算公式为

$$A_j = \sum_{i=1}^n (1 - r_{ij}) \quad (7)$$

由此得到权重计算公式为

$$\eta_j = \frac{S_j A_j}{\sum_{j=1}^n S_j A_j} \quad (8)$$

上述的权重赋予方式全面评估了各指标的不同和联系, 深度挖掘了数据之间潜藏的关联, 因此, 由其得到的权重更为客观和精确。

3.1.3 改进 AHP-CRITIC 综合赋权法

将上述两种赋权方式相结合, 采用改进的AHP和CRITIC法分别求取主客观权重。由于两种方法在权重分配的原理上存在区别, 使用的数据特点也不尽相同, 前者以数据的大小信息为基础, 后者以数据的波动性和冲突性为基础, 因此采用式(9)获得更可靠的综合权重。

$$\omega_i = \frac{v_i \eta_i}{\sum_{i=1}^n v_i \eta_i} \quad (9)$$

式中, v_i 为结合算术平均法、几何平均法和特征值法三者权重之后的平均值, 即第 i 个指标的AHP权重; η_i 为第 i 个指标的CRITIC权重; ω_i 为第 i 个指标的综合权重。

3.2 TOPSIS-RSR组合模型

3.2.1 改进 TOPSIS 方法

TOPSIS是一种面向工程应用的多目标决策方法。TOPSIS决策方法的关键在于: 确定每个评估指标与最佳或最劣矢量的关系, 并在此基础上确定最佳方案。该方法所得到的评价结果在相对贴度接近1的情况下最为理想。并根据结果对各指标进行等级划分。但在两个目标之间的相似性均为1/2时, 则无法评估两个目标的优缺点, 这被称为相

对贴近度缺陷。

为弥补相对贴近度缺陷, 引入相对距离 L 量化评价结果, 即

$$L_i = \sqrt{[D_i^+ - \min(D_i^+)]^2 + [D_i^- - \max(D_i^-)]^2} \quad (10)$$

图3为改进TOPSIS法的基本理念, 图中, X 轴表示评估对象与正理想解的欧氏间隔; Y 轴表示评估对象与负理想解的欧氏间隔; A 点与 C 点表示正理想的参照点; B 点与 D 点表示评估对象与正理想解与负理想解的欧氏间隔具体范围。将相对贴近度改为相对间隔程度, 弥补相对贴近度缺陷, 从而实现客观的量化评估结果, 进一步提高TOPSIS综合评估算法的适用性。

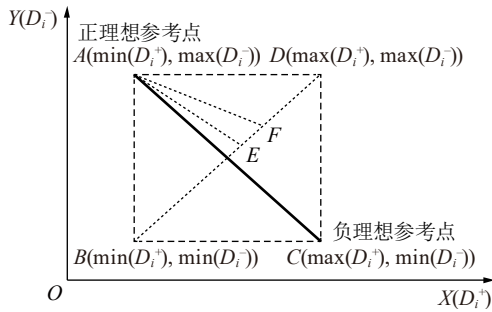


图3 改进 TOPSIS 法原理

Fig. 3 Improved TOPSIS method

结合距离值和相对距离值, 按照式(10)计算综合度得分的 L_i 值, 对其进行排序, 得到TOPSIS排序结果。

3.2.2 秩和比法(RSR)

秩和比法是一种统计分析方法, 它可以更全面地分析数据, 适用于综合评价列表数据, 也适用于分类及计量数据。

采用秩和比法将 n 个评价目标分为 m 个评价级别, 构建评价矩阵, 计算RSR值, 综合加权, 得到WRSR值。

WRSR值的计算公式为

$$WRSR_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^m \omega_j R_{ij} \quad (11)$$

式中, R_{ij} 为矩阵第 i 行第 j 列元素的秩。

将排序累计频次转化为Probit, 并将其作为自变量, WRSR作为因变量, 得到一个回归方程, 即

$$WRSR = a + b \times \text{Probit} \quad (12)$$

依据回归方程计算得到的WRSR值, 对评价对象进行排序、分档, 并验证其有效性。评价对象根据回归公式得到的WRSR进行排序和分类。

4 注浆效果评价模型建立与应用

4.1 确定各指标权重

采用CRITIC与改进AHP法相结合的方法分配指标权重。通过咨询国内防治水专家意见和参考以往学者研究成果可知, 钻井液漏失量数据在钻探工程中得到, 可判断一定范围内地质构造的复杂程度; 渗透系数通过压水试验测得, 可判断岩层阻隔水能力; 注浆终压和单位注浆量也是衡量浆液的扩散、裂隙充填、注浆效果好坏的重要参数。再结合邱集、赵官和淮南等多个区域地面超前注浆的实际工程经验, 得到4项指标的相对重要程度, 并以此构建判断矩阵, 见表1。

表1 AHP判断矩阵

Table 1 AHP judgment matrix

指标	注浆终压	渗透系数	单位注浆量	漏失量
注浆终压	1	1/4	3	1/3
渗透系数	4	1	5	1/2
单位注浆量	1/3	1/5	1	1/6
漏失量	3	2	6	1

依据式(1)~(9), 计算得到各类指标权重见表2。

表2 各指标权重

Table 2 Indicator weights

指标	改进AHP法权重/(CR值=0.051 187)			CRITIC 权重/%	综合 权重/%
	算术平均法	几何平均法	特征值法		
注浆终压	13.98	13.44	13.45	23.64	18.63
渗透系数	33.83	33.81	34.20	23.67	28.81
单位注浆量	6.20	6.17	6.07	22.77	14.46
漏失量	45.99	46.57	46.28	29.92	38.10

由此得出注浆终压、渗透系数、单位注浆量、漏失量等4项指标的综合权重分别为18.63%, 28.81%, 14.46%和38.10%。

4.2 模型建立

施工钻孔的设计注浆终压不小于9 MPa, 实际注浆终压为9.0~13.1 MPa; 平均单位注浆量为4.96 t/m, 最大单位注浆量为10.83 t/m; 煤层底板徐灰的最大渗透系数为0.000 613 m/d, 平均渗透系数为0.000 305 m/d。研究区钻井液漏失点共计101处, 其中漏失量<10 m³/h的有7处; 10~30 m³/h的有17处; 30~50 m³/h的有39处; ≥50 m³/h(含全漏)的有38处。根据表2得到的各指标权重, 按照TOPSIS方

法步骤计算得到综合得分的 L_i 值。钻孔表示形式为: 主孔-分支孔-注浆段, 如D3-4-3。基于秩和比法的原理, 通过计算WRSR值, 生成Probit值的分布表格。将Probit值作为自变量, 将WRSR值作为因

变量, 进行回归方程计算。在拟合验算后, 得到RSR法计算结果。TOPSIS和RSR计算结果分别如图4、5和表3、4所示。

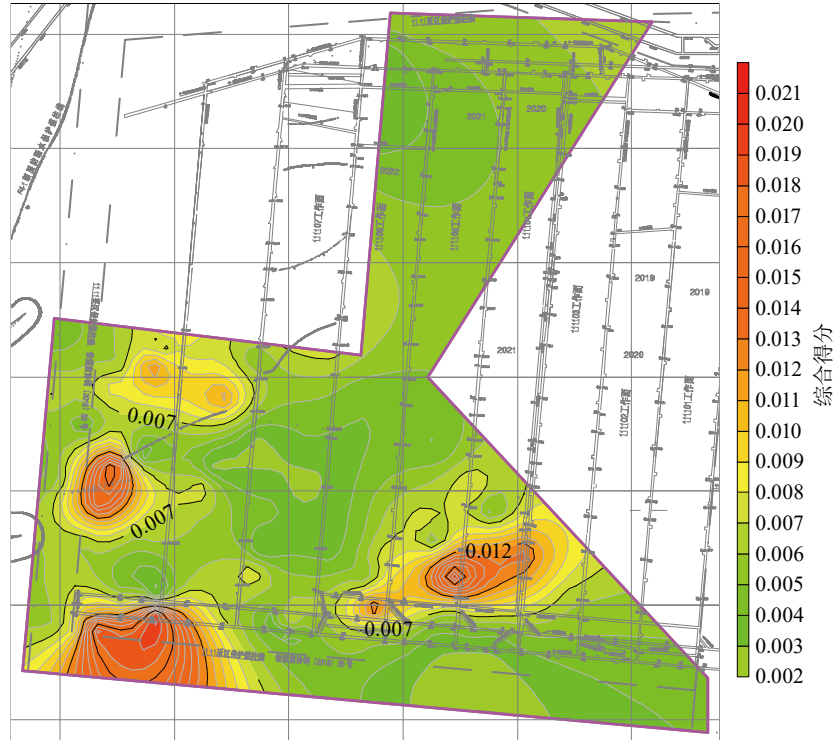


图4 TOPSIS法综合得分等值线图

Fig. 4 Isoline map of comprehensive score of TOPSIS method

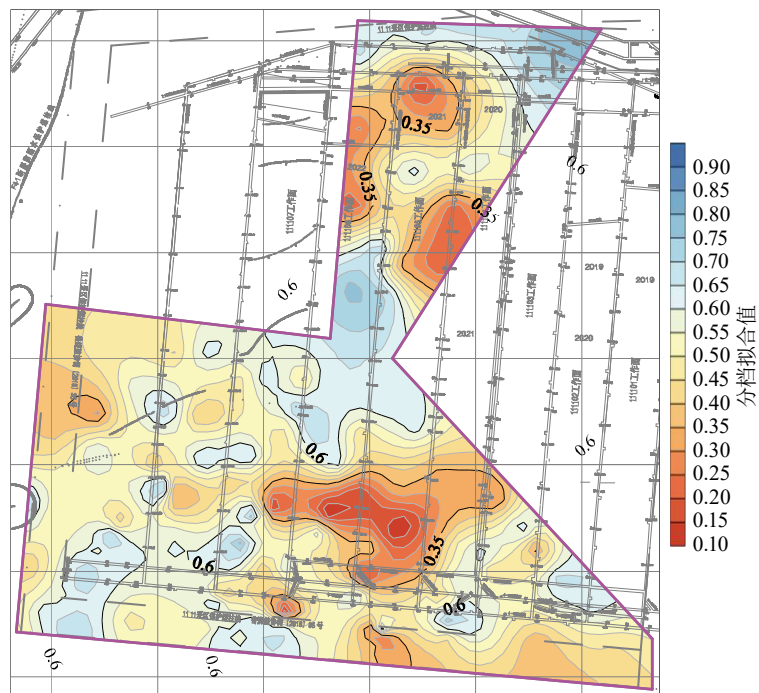


图5 RSR法分档拟合值等值线图

Fig. 5 RSR method fitting value contour map

表3 TOPSIS计算结果
Table 3 TOPSIS calculation results

注浆孔编号	得分	排序	正理想距离 D^+	负理想距离 D^-	注浆孔编号	得分	排序	正理想距离 D^+	负理想距离 D^-	注浆孔编号	得分	排序	正理想距离 D^+	负理想距离 D^-
D3主孔-1	0.005 4	86	0.261 2	0.046 4	D10-5-2	0.008 2	32	0.234 4	0.070 3	D11-9-3	0.008 7	25	0.230 6	0.074 5
D3主孔-2	0.006 9	57	0.246 5	0.059 1	D10-5-3	0.006 0	74	0.260 8	0.052 4	D11-9-4	0.002 4	147	0.236 2	0.082 2
D3主孔-3	0.008 0	37	0.236 2	0.068 5	D10-5-4	0.006 4	65	0.252 3	0.055 6	D11-9-5	0.002 8	145	0.232 3	0.072 2
D3主孔-4	0.003 1	138	0.295 3	0.028 0	D10-6-1	0.006 2	70	0.258 4	0.053 8	D12主孔-1	0.009 2	21	0.293 7	0.021 5
D3主孔-5	0.005 6	82	0.264 7	0.049 8	D10-6-2	0.004 0	123	0.278 3	0.035 4	D12主孔-2	0.009 3	18	0.224 5	0.079 0
D3主孔-6	0.008 5	28	0.233 6	0.073 2	D10-6-3	0.005 8	78	0.258 8	0.050 6	D12主孔-3	0.006 0	72	0.254 8	0.051 9
D3-1-1	0.006 9	58	0.246 9	0.059 2	D10-6-4	0.004 4	115	0.271 8	0.038 2	D12主孔-4	0.010 9	16	0.211 3	0.092 6
D3-1-2	0.006 9	56	0.246 2	0.059 3	D10-6-5	0.003 8	131	0.281 0	0.033 3	D12主孔-5	0.004 8	102	0.272 1	0.042 3
D3-2-1	0.006 6	64	0.249 3	0.056 4	D10-6-6	0.004 8	100	0.278 4	0.043 7	D12主孔-6	0.007 7	40	0.259 9	0.072 1
D3-2-2	0.004 5	113	0.271 6	0.039 4	D11主孔-1	0.006 3	67	0.260 6	0.056 4	D12主孔-7	0.008 9	24	0.240 0	0.079 6
D3-2-3	0.013 4	10	0.189 6	0.113 9	D11主孔-2	0.008 0	38	0.243 3	0.070 3	D12主孔-8	0.004 3	117	0.278 5	0.038 3
D3-3-1	0.004 0	125	0.298 6	0.025 5	D11主孔-3	0.011 8	14	0.220 4	0.108 9	D12主孔-9	0.009 9	17	0.219 5	0.084 1
D3-3-2	0.013 7	9	0.187 5	0.116 5	D11主孔-4	0.004 8	99	0.269 5	0.042 3	D12主孔-10	0.005 2	91	0.264 7	0.045 6
D3-4-1	0.003 9	127	0.278 2	0.034 3	D11主孔-5	0.009 2	20	0.229 6	0.080 3	D12主孔-11	0.006 3	69	0.260 9	0.056 1
D3-4-2	0.007 0	54	0.245 6	0.060 0	D11-1-1	0.006 8	61	0.251 0	0.059 1	D12-1-1	0.005 4	85	0.261 1	0.046 4
D3-4-3	0.002 8	142	0.224 7	0.078 8	D11-1-2	0.008 4	30	0.233 3	0.071 5	D12-1-2	0.004 5	110	0.271 5	0.039 6
D3-4-4	0.008 5	29	0.298 2	0.025 4	D11-1-3	0.007 2	51	0.244 1	0.061 6	D12-1-3	0.009 3	19	0.297 4	0.025 8
D3-4-5	0.004 7	104	0.271 1	0.041 0	D11-2-1	0.005 8	79	0.257 2	0.050 0	D12-1-4	0.006 7	63	0.293 5	0.026 7
D3-5-1	0.007 1	52	0.246 7	0.061 0	D11-2-2	0.015 8	6	0.195 8	0.155 7	D12-2-1	0.005 2	92	0.265 0	0.045 0
D3-5-2	0.004 8	101	0.268 6	0.042 1	D11-2-3	0.017 3	5	0.208 2	0.196 7	D12-2-2	0.005 1	93	0.267 3	0.045 0
D3-5-3	0.003 9	129	0.298 0	0.027 0	D11-2-4	0.019 1	4	0.156 2	0.180 7	D12-2-3	0.005 3	90	0.263 7	0.045 7
D3-5-4	0.005 5	84	0.261 6	0.047 7	D11-2-5	0.012 4	12	0.213 4	0.113 7	D12-2-4	0.004 1	122	0.277 1	0.035 9
D3-6-1	0.008 2	33	0.235 5	0.070 1	D11-2-6	0.011 0	15	0.209 6	0.093 9	D12-3-1	0.007 4	46	0.246 3	0.064 6
D3-6-2	0.003 3	136	0.287 1	0.029 3	D11-2-7	0.008 1	34	0.247 0	0.072 4	D12-3-2	0.009 0	22	0.236 2	0.080 1
D3-6-3	0.003 8	132	0.285 4	0.033 8	D11-3-1	0.006 8	60	0.247 5	0.058 4	D12-3-3	0.007 4	45	0.244 9	0.064 6
D3-6-4	0.007 7	41	0.238 6	0.066 0	D11-3-2	0.006 0	73	0.256 3	0.051 5	D12-3-4	0.003 5	133	0.284 4	0.031 2
D3-6-5	0.004 6	108	0.269 3	0.040 1	D11-3-3	0.007 7	43	0.240 7	0.065 8	D12-3-5	0.004 9	98	0.275 4	0.043 5
D3-7-1	0.003 3	135	0.297 2	0.025 5	D11-3-4	0.006 1	71	0.255 1	0.052 5	D12-4-1	0.006 3	66	0.253 6	0.054 9
D3-7-2	0.005 1	94	0.298 4	0.025 4	D11-4-1	0.007 5	44	0.241 7	0.064 3	D12-4-2	0.004 7	106	0.270 3	0.040 7
D10主孔-1	0.003 4	134	0.285 0	0.030 2	D11-4-2	0.006 3	68	0.251 7	0.054 3	D12-5-1	0.004 2	118	0.274 2	0.036 7
D10主孔-2	0.005 0	96	0.265 3	0.043 0	D11-4-3	0.007 8	39	0.249 1	0.069 7	D12-5-2	0.004 9	97	0.268 0	0.042 5
D10主孔-3	0.004 7	103	0.268 7	0.040 7	D11-4-4	0.002 8	143	0.286 4	0.029 6	D12-5-3	0.003 9	126	0.279 6	0.034 7
D10主孔-4	0.004 0	124	0.276 3	0.035 1	D11-4-5	0.003 0	141	0.284 0	0.034 6	D12-6-1	0.005 7	80	0.259 3	0.049 5
D10-2-1	0.003 2	137	0.297 4	0.029 0	D11-4-6	0.007 3	47	0.251 7	0.065 3	D12-6-2	0.005 7	81	0.259 2	0.049 2
D10-2-2	0.003 9	128	0.282 1	0.034 6	D11-5-1	0.004 5	114	0.273 1	0.039 5	D12-7-1	0.007 0	55	0.245 9	0.059 7
D10-2-3	0.004 5	111	0.262 7	0.038 3	D11-5-2	0.005 9	76	0.270 5	0.053 4	D12-7-2	0.003 0	139	0.260 6	0.060 3
D10-2-4	0.005 9	75	0.255 7	0.050 7	D11-5-3	0.004 1	120	0.277 2	0.036 1	D12-7-3	0.002 8	144	0.284 4	0.035 5
D10-2-5	0.003 8	130	0.276 3	0.033 3	D11-5-4	0.004 1	119	0.275 8	0.036 2	D12-8-1	0.007 3	48	0.244 1	0.062 4
D10-3-1	0.008 1	35	0.235 8	0.068 7	D11-6-1	0.005 3	89	0.262 6	0.045 7	D12-8-2	0.005 4	87	0.263 2	0.046 7
D10-3-2	0.005 6	83	0.259 1	0.048 4	D11-6-2	0.004 5	112	0.272 4	0.039 6	D12-8-3	0.006 9	59	0.293 9	0.026 7
D10-3-3	0.007 3	49	0.248 3	0.063 4	D11-6-3	0.002 8	146	0.263 8	0.044 3	D12-9-1	0.005 0	95	0.266 4	0.043 6
D10-3-4	0.007 7	42	0.238 6	0.065 9	D11-6-4	0.003 0	140	0.258 6	0.061 8	D12-9-2	0.004 1	121	0.279 9	0.036 5
D10-3-5	0.008 6	27	0.231 8	0.073 2	D11-6-5	0.004 3	116	0.272 8	0.037 8	D12-9-3	0.008 7	26	0.235 4	0.076 0
D10-3-6	0.007 0	53	0.245 3	0.060 2	D11-7-1	0.020 8	1	0.164 2	0.229 9	D12-10-1	0.009 0	23	0.237 4	0.080 3
D10-4-1	0.004 6	109	0.269 5	0.039 9	D11-7-2	0.006 8	62	0.247 3	0.058 1	D12-10-2	0.012 2	13	0.199 3	0.103 1
D10-4-2	0.013 8	7	0.193 4	0.121 8	D11-8-1	0.020 1	3	0.177 3	0.228 5	D12-10-3	0.004 7	105	0.269 5	0.040 7
D10-4-3	0.020 2	2	0.173 7	0.227 8	D11-8-2	0.008 0	36	0.247 4	0.072 0	D12-10-4	0.005 3	88	0.266 3	0.046 9
D10-4-4	0.013 7	8	0.194 4	0.121 3	D11-9-1	0.008 3	31	0.233 6	0.071 1	D12-11-1	0.007 2	50	0.243 8	0.062 1
D10-5-1	0.004 7	107	0.269 9	0.040 6	D11-9-2	0.012 7	11	0.211 7	0.116 6	D12-11-2	0.005 8	77	0.259 8	0.050 9

表4 RSR计算结果
Table 4 RSR calculation results

注浆孔编号	WRSR	Probit	RSR 拟合值	排名	注浆孔编号	WRSR	Probit	RSR 拟合值	排名	注浆孔编号	WRSR	Probit	RSR 拟合值	排名
D3主孔-1	0.517 1	5.008 5	0.501 5	74	D10-5-2	0.651 3	5.876 1	0.647 5	29	D11-9-3	0.653 2	5.901 5	0.651 8	28
D3主孔-2	0.627 0	5.565 9	0.595 3	43	D10-5-3	0.515 5	4.974 4	0.495 7	76	D11-9-4	0.062 0	2.532 5	0.084 7	147
D3主孔-3	0.695 8	6.270 0	0.713 8	16	D10-5-4	0.613 3	5.468 5	0.578 9	48	D11-9-5	0.120 9	3.175 2	0.192 9	143
D3主孔-4	0.202 5	3.559 3	0.257 5	137	D10-6-1	0.466 6	4.732 5	0.455 0	90	D12主孔-1	0.559 7	5.232 3	0.539 1	61
D3主孔-5	0.563 0	5.249 8	0.542 1	60	D10-6-2	0.305 1	3.837 2	0.304 3	130	D12主孔-2	0.692 9	6.232 7	0.707 6	17
D3主孔-6	0.800 4	7.208 5	0.871 8	3	D10-6-3	0.450 7	4.606 4	0.433 8	97	D12主孔-3	0.574 1	5.320 9	0.554 1	56
D3-1-1	0.674 3	6.067 6	0.679 8	22	D10-6-4	0.559 4	5.214 8	0.536 2	62	D12主孔-4	0.765 3	6.741 3	0.793 2	7
D3-1-2	0.570 7	5.285 2	0.548 1	58	D10-6-5	0.350 1	3.990 9	0.330 2	125	D12主孔-5	0.397 4	4.413 9	0.401 4	107
D3-2-1	0.607 4	5.449 5	0.575 7	49	D10-6-6	0.446 3	4.587 9	0.430 7	98	D12主孔-6	0.508 6	4.957 4	0.492 9	77
D3-2-2	0.453 9	4.643 0	0.440 0	95	D11主孔-1	0.394 1	4.352 0	0.391 0	110	D12主孔-7	0.571 3	5.303 0	0.551 0	57
D3-2-3	0.863 6	7.928 9	0.993 1	1	D11主孔-2	0.542 0	5.128 2	0.521 6	67	D12主孔-8	0.381 9	4.265 4	0.376 4	114
D3-3-1	0.339 3	3.962 1	0.325 3	126	D11主孔-3	0.650 4	5.827 1	0.639 3	31	D12主孔-9	0.704 7	6.440 7	0.742 6	12
D3-3-2	0.810 4	7.467 5	0.915 4	2	D11主孔-4	0.453 4	4.624 8	0.436 9	96	D12主孔-10	0.558 0	5.197 4	0.533 3	63
D3-4-1	0.329 8	3.901 8	0.315 2	128	D11主孔-5	0.643 2	5.712 4	0.620 0	36	D12主孔-11	0.432 5	4.531 5	0.421 2	101
D3-4-2	0.636 8	5.690 6	0.616 3	37	D11-1-1	0.493 0	4.871 8	0.478 5	82	D12-1-1	0.482 5	4.820 0	0.469 7	85
D3-4-3	0.144 8	3.396 6	0.230 1	140	D11-1-2	0.691 5	6.197 0	0.701 5	18	D12-1-2	0.387 4	4.309 4	0.383 8	112
D3-4-4	0.664 7	5.981 1	0.665 2	25	D11-1-3	0.644 6	5.757 1	0.627 5	34	D12-1-3	0.749 2	6.603 4	0.770 0	9
D3-4-5	0.477 5	4.785 2	0.463 9	87	D11-2-1	0.490 3	4.854 5	0.475 6	83	D12-1-4	0.471 3	4.750 2	0.458 0	89
D3-5-1	0.699 6	6.350 5	0.727 4	14	D11-2-2	0.772 3	6.824 8	0.807 2	6	D12-2-1	0.518 5	5.025 6	0.504 4	73
D3-5-2	0.503 0	4.923 2	0.487 1	79	D11-2-3	0.507 8	4.940 3	0.490 0	78	D12-2-2	0.520 5	5.042 6	0.507 2	72
D3-5-3	0.371 5	4.220 0	0.368 7	116	D11-2-4	0.780 8	7.045 4	0.844 4	4	D12-2-3	0.532 2	5.093 9	0.515 9	69
D3-5-4	0.584 1	5.357 0	0.560 1	54	D11-2-5	0.466 1	4.714 8	0.452 0	91	D12-2-4	0.402 4	4.434 1	0.404 8	106
D3-6-1	0.772 6	6.923 5	0.823 8	5	D11-2-6	0.697 2	6.309 2	0.720 4	15	D12-3-1	0.645 6	5.803 4	0.635 3	32
D3-6-2	0.198 1	3.509 4	0.249 1	138	D11-2-7	0.463 3	4.679 1	0.446 0	93	D12-3-2	0.534 6	5.111 1	0.518 7	68
D3-6-3	0.233 0	3.690 8	0.279 7	134	D11-3-1	0.650 6	5.851 4	0.643 4	30	D12-3-3	0.606 1	5.430 7	0.572 6	50
D3-6-4	0.684 1	6.162 8	0.695 8	19	D11-3-2	0.613 5	5.487 6	0.582 1	47	D12-3-4	0.278 3	3.803 0	0.298 5	131
D3-6-5	0.428 6	4.493 1	0.414 7	103	D11-3-3	0.703 4	6.394 2	0.734 7	13	D12-3-5	0.481 8	4.802 6	0.466 8	86
D3-7-1	0.204 6	3.605 8	0.265 4	136	D11-3-4	0.634 8	5.648 0	0.609 1	39	D12-4-1	0.570 4	5.267 5	0.545 1	59
D3-7-2	0.395 5	4.393 6	0.398 0	108	D11-4-1	0.656 4	5.927 4	0.656 2	27	D12-4-2	0.464 3	4.697 0	0.449 0	92
D10主孔-1	0.218 9	3.649 5	0.272 7	135	D11-4-2	0.589 7	5.393 6	0.566 3	52	D12-5-1	0.366 9	4.123 9	0.352 6	120
D10主孔-2	0.412 7	4.454 0	0.408 1	105	D11-4-3	0.589 3	5.375 2	0.563 2	53	D12-5-2	0.385 5	4.287 6	0.380 1	113
D10主孔-3	0.438 4	4.569 3	0.427 5	99	D11-4-4	0.136 6	3.331 6	0.219 2	141	D12-5-3	0.369 5	4.148 6	0.356 7	119
D10主孔-4	0.308 8	3.870 1	0.309 8	129	D11-4-5	0.147 3	3.455 4	0.240 0	139	D12-6-1	0.597 0	5.412 1	0.569 4	51
D10-2-1	0.278 3	3.767 3	0.292 5	132	D11-4-6	0.621 7	5.506 9	0.585 4	46	D12-6-2	0.516 0	4.991 5	0.498 6	75
D10-2-2	0.370 2	4.196 6	0.364 8	117	D11-5-1	0.435 3	4.550 5	0.424 4	100	D12-7-1	0.634 8	5.669 1	0.612 7	38
D10-2-3	0.377 7	4.242 9	0.372 6	115	D11-5-2	0.459 2	4.661 1	0.443 0	94	D12-7-2	0.125 0	3.258 7	0.206 9	142
D10-2-4	0.493 3	4.888 9	0.481 4	81	D11-5-3	0.350 3	4.018 9	0.334 9	124	D12-7-3	0.100 1	2.791 5	0.128 3	146
D10-2-5	0.275 7	3.730 0	0.286 3	133	D11-5-4	0.369 8	4.172 9	0.360 8	118	D12-8-1	0.709 2	6.490 6	0.751 0	11
D10-3-1	0.643 5	5.734 6	0.623 7	35	D11-6-1	0.494 4	4.906 1	0.484 2	80	D12-8-2	0.475 2	4.767 7	0.460 9	88
D10-3-2	0.523 0	5.059 7	0.510 1	71	D11-6-2	0.423 6	4.473 6	0.411 4	104	D12-8-3	0.365 2	4.072 6	0.343 9	122
D10-3-3	0.576 7	5.338 9	0.557 1	55	D11-6-3	0.119 7	2.954 6	0.155 7	145	D12-9-1	0.365 4	4.098 5	0.348 3	121
D10-3-4	0.644 9	5.780 0	0.631 4	33	D11-6-4	0.119 7	3.076 5	0.176 3	144	D12-9-2	0.391 9	4.330 9	0.387 4	111
D10-3-5	0.667 0	6.009 1	0.669 9	24	D11-6-5	0.331 0	3.932 4	0.320 3	127	D12-9-3	0.630 7	5.586 1	0.598 7	42
D10-3-6	0.670 2	6.037 9	0.674 8	23	D11-7-1	0.633 8	5.627 1	0.605 6	40	D12-10-1	0.662 9	5.953 9	0.660 6	26
D10-4-1	0.394 9	4.372 9	0.394 5	109	D11-7-2	0.555 0	5.180 0	0.530 3	64	D12-10-2	0.757 5	6.668 4	0.780 9	8
D10-4-2	0.745 6	6.544 6	0.760 0	10	D11-8-1	0.553 6	5.162 7	0.527 4	65	D12-10-3	0.430 9	4.512 4	0.418 0	102
D10-4-3	0.542 8	5.145 5	0.524 5	66	D11-8-2	0.631 5	5.606 4	0.602 1	41	D12-10-4	0.484 3	4.837 3	0.472 7	84
D10-4-4	0.675 6	6.098 2	0.684 9	21	D11-9-1	0.626 3	5.546 0	0.592 0	44	D12-11-1	0.684 0	6.129 9	0.690 3	20
D10-5-1	0.360 3	4.046 1	0.339 5	123	D11-9-2	0.624 1	5.526 4	0.588 7	45	D12-11-2	0.529 8	5.076 8	0.513 0	70

按照WRSR值的拟合顺序和相应的合理分级方法中的常用数分级方法^[21], 利用德尔菲法将注浆效果分为两个级别, 即相对薄弱区与合格区, 见表5。

表5 等级划分标准
Table 5 Classification criteria

分档	百分位临界值/%	Probit	RSR拟合临界值
相对薄弱区-1	<15.866 0	<4	<0.444 2
合格区-2	≥15.866 0	≥4	≥0.444 2

拟合后, 得到模型的表达式为

$$y = -0.341\ 6 + 0.168\ 3 \times \text{Probit} \tag{13}$$

拟合效果如图6所示, 根据RSR评价结果, 模型的拟合优度为0.824, 考虑到工人施工标准、钻孔注浆工艺以及钻孔范围内地质条件的差异都会影响拟合标准差, 认为该模型满足了评价的基本需求。

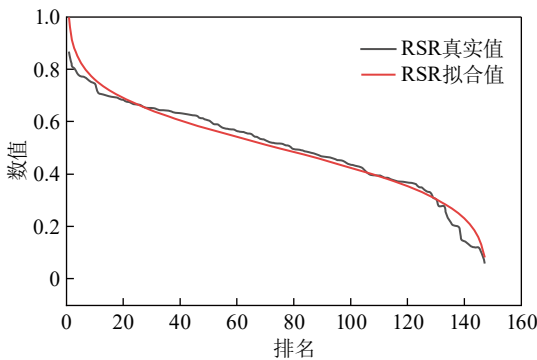


图6 RSR法拟合曲线
Fig. 6 Fitting curve by RSR method

4.3 评价结果及对比

笔者通过主客观相结合的赋权方式, 优化的TOPSIS法、RSR法排序分档方法, 构建了注浆效果综合评价模型, 并对研究区的注浆工程展开评价和分析, 以模型评价结果为依据, 绘制出注浆效果评价分区, 如图7所示。

其注浆效果不佳的注浆孔数量和分布情况见表6。

由分析可知, 注浆相对薄弱区分布在研究区边缘处及中南部(对应111105, 111106, 111107工作面南部)。该研究区的注浆工程大部分区域属于合格区域, 小部分属于相对薄弱区, 薄弱区内基本无断层穿过。将该评价结果与煤层底板实际涌水量相结合, 进行论证, 以证明该评价模型的科学性。

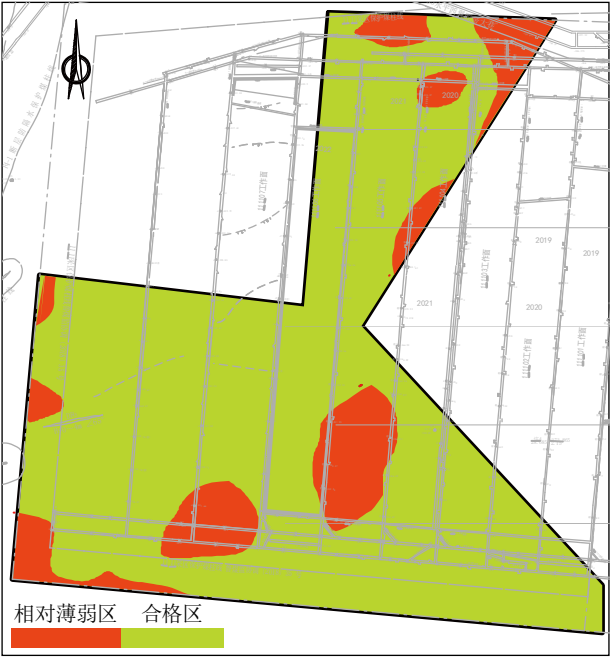


图7 注浆效果评价分区
Fig. 7 Zoning diagram of grouting effect evaluation

表6 注浆效果较差钻孔数据
Table 6 Drilling data with poor grouting effect

钻孔	TOPSIS 得分值	TOPSIS 排序	RSR 拟合值	RSR 排序	RSR 分档
D3主孔-4	0.003 1	138	0.257 5	137	1
D11-4-5	0.003 0	141	0.240 0	139	1
D3-4-3	0.002 8	142	0.230 1	140	1
D11-4-4	0.002 8	143	0.219 2	141	1
D12-7-2	0.003 0	139	0.206 9	142	1
D11-9-5	0.002 8	145	0.192 9	143	1
D11-6-4	0.003 0	140	0.176 3	144	1
D11-6-3	0.002 8	146	0.155 7	145	1
D12-7-3	0.002 8	144	0.128 3	146	1
D11-9-4	0.002 4	147	0.084 7	147	1

4.4 井下探查验证

为进一步验证D3, D10, D11, D12孔组地面区域注浆改造效果, 邱集煤矿开展了井下钻探工作, 探查底板徐灰富水区域改造后的情况。研究区共施工钻孔372个, 钻孔进尺合计53 275.5 m, 探查结果显示, 区内大部分涌水量<20 m³/h, 部分超过30 m³/h, 局部超过50 m³/h; 钻孔广泛覆盖划定的研究区域, 井下钻探揭露涌水量等值线图如图8所示。

综合分析可知, 涌水量较大的区域主要集中于111104~111107工作面南部和111104工作面上部。研究区北部由111105胶2-1, 111105胶4-1, 111105胶



图8 井下钻探揭露涌水量等值线图

Fig. 8 Contour diagram of water inflow revealed by downhole drilling

4-3等钻孔, 揭露最大涌水量为 $50 \text{ m}^3/\text{h}$; 南部由111106胶10-5, 111105胶10-6, 111105胶14-2等钻孔, 揭露最大涌水量超过 $100 \text{ m}^3/\text{h}$ 。两处区域最大涌水量均超出邱集煤矿注浆工程检验钻孔涌水量的标准, 属于相对薄弱区域。对比图7和图8可知, 本次评价结果中的合格区大部分涌水量 $<20 \text{ m}^3/\text{h}$, 相对薄弱区大部分涌水量超过 $30 \text{ m}^3/\text{h}$, 井下钻探工程所揭露的涌水区域与评价模型分区基本一致, 表明采用提出的注浆效果综合评价体系对地面注浆改造工程进行评价, 与现场井下钻探实际验证效果吻合度较好, 证明了该方法具有一定的合理性和科学性, 可为类似条件的地面区域注浆效果评价工作提供参考。

5 结论

(1)针对区域地面注浆改造工程效果评价, 选取钻井液漏失量、注浆终压、渗透系数、单位注浆量等作为评价指标, 提出了一种综合改进后的AHP与CRITIC法的主客观赋权方式, 通过算术平均法、几何平均法、特征值法等3种方法综合改进AHP, 弥补了AHP主观单一的不足。

(2)对TOPSIS-RSR组合评价模型进行改进, 针

对TOPSIS评价法中的相对贴近度缺陷, 使用相对距离替代相对贴近度, 增强了TOPSIS综合评价算法的适用性。同时利用RSR法避免了不能分档的问题, 计算简单, 结果更加合理、准确。

(3)针对邱集煤矿D3, D10, D11, D12孔组, 提出的注浆效果评价方法得到的结果与井下钻探揭露涌水量情况相吻合, 进一步证明了该评价模型的可靠性。未来可以通过增加其他的评价指标, 进一步完善此方法, 同时通过统一施工标准来降低评价结果的标准差。

参考文献(References):

- [1] 范立民, 马雄德, 冀瑞君. 西部生态脆弱矿区保水采煤研究与实践进展[J]. 煤炭学报, 2015, 40(8): 1711-1717. FAN Limin, MA Xiongde, JI Ruijun. Progress in engineering practice of water-preserved coal mining in western eco-environment frangible area[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(8): 1711-1717.
- [2] 靳德武, 刘英锋, 刘再斌, 等. 煤矿重大突水灾害防治技术研究新进展[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(1): 25-29. JIN Dewu, LIU Yingfeng, LIU Zaibin, et al. New progress of study on major water inrush disaster prevention and control technology in coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(1): 25-29.
- [3] 靳德武. 我国煤层底板突水问题的研究现状及展望[J]. 煤炭科学技术, 2002, 30(6): 1-4. JIN Dewu. Research status and outlook of water outburst from seam floor in China coal mines[J]. Coal Science and Technology, 2002, 30(6): 1-4.
- [4] 罗平平, 何山, 张玮, 等. 岩体注浆理论研究现状及展望[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2005, 24(1): 46-48. LUO Pingping, HE Shan, ZHANG Wei, et al. Research status and prospects of rock mass grouting theory[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2005, 24(1): 46-48.
- [5] 南生辉. 邯邢矿区奥陶系灰岩上部注浆改造技术[J]. 煤田地质与勘探, 2010, 38(3): 37-40. NAN Shenghui. Technical feasibility of grouting reform for upper part of ordovician limestone in Xingtai and Handan coal mining areas[J]. Coal Geology & Exploration, 2010, 38(3): 37-40.
- [6] 牛秀清, 王桦, 刘书杰. 华北煤田下组煤底板岩溶含水层注浆改造技术应用及发展趋势[J]. 建井技术, 2017, 38(3): 24-30. NIU Xiuqing, WANG Hua, LIU Shujie. Application and development trends on grouting reconstruction technology for floor karst aquifers of lower group coal seam in

- Northern China coal field[J]. *Mine Construction Technology*, 2017, 38(3): 24–30.
- [7] 杨雪, 田乐, 邓昀, 等. 注浆技术在华北奥灰水害防治中的应用与发展[J]. *建井技术*, 2023, 44(1): 18–22.
YANG Xue, TIAN Le, DENG Yun, et al. Development and application of grouting technology to prevention and control of ordovician limestone water disaster in North China[J]. *Mine Construction Technology*, 2023, 44(1): 18–22.
- [8] 丁亚恒, 李少华, 陈卫. 地面定向顺层钻孔注浆改造技术在新桥煤矿水害治理中的应用[J]. *能源与环保*, 2023, 45(12): 108–114, 120.
DING Yaheng, LI Shaohua, CHEN Wei. Application of ground directional bedding drilling and grouting transformation technology in water damage control of Xinqiao Coal Mine[J]. *China Energy and Environmental Protection*, 2023, 45(12): 108–114, 120.
- [9] 徐香庆, 郭文喜. 松软破碎围岩巷道注浆加固技术应用研究[J]. *煤炭工程*, 2012, 34(7): 29–31.
XU Xiangqing, GUO Wenxi. Applied study on grouting reinforcement technology of mine roadway with soft broken surrounding rock[J]. *Coal Engineering*, 2012, 34(7): 29–31.
- [10] 谢龙, 张德兵, 梁顺. 回采巷道注浆锚索超前支护优化及效果模拟[J]. *采矿与岩层控制工程学报*, 2022, 4(3): 033011.
XIE Long, ZHANG Debing, LIANG Shun. Optimisation and simulation of the effect of grouted cable bolts as advanced support in longwall entries[J]. *Journal of Mining and Strata Control Engineering*, 2022, 4(3): 033011.
- [11] 罗平平, 李志平, 范波, 等. 倾斜单裂隙宾汉浆液流动模型理论研究[J]. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 2010, 29(1): 43–47.
LUO Pingping, LI Zhiping, FAN Bo, et al. Theoretical study on flow model for tilted single fracture binghamian grouts[J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science)*, 2010, 29(1): 43–47.
- [12] 王兵强. 深部条带采空区注浆效果综合评价技术与应用[J]. *煤炭工程*, 2021, 53(8): 98–104.
WANG Bingqiang. Comprehensive evaluation of grouting effect in goaf of deep strip mining[J]. *Coal Engineering*, 2021, 53(8): 98–104.
- [13] 杨志斌, 董书宁. 压水试验定量评价单孔注浆效果影响因素分析[J]. *煤矿安全*, 2018, 49(6): 187–194.
YANG Zhibin, DONG Shuning. Influence factors analysis of quantitative evaluation of single borehole grouting effect by water pressure test[J]. *Safety in Coal Mines*, 2018, 49(6): 187–194.
- [14] 唐道增, 王永宝, 陈建刚, 等. 黄河北煤田定向钻孔注浆效果的全周期评价方法[J]. *煤炭技术*, 2023, 42(1): 151–156.
- TANG Daozeng, WANG Yongbao, CHEN Jiangang, et al. Full cycle evaluation of grouting effect of directional drilling in Huanghe North Coalfield[J]. *Coal Technology*, 2023, 42(1): 151–156.
- [15] 董书宁, 刘其声, 王皓, 等. 煤层底板水害超前区域治理理论框架与关键技术[J]. *煤田地质与勘探*, 2023, 51(1): 185–195.
DONG Shuning, LIU Qisheng, WANG Hao, et al. Theoretical framework and key technology of advance regional control of water inrush in coal seam floor[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2023, 51(1): 185–195.
- [16] 王晓蕾, 姬治岗, 罗文强. 破碎煤岩体注浆加固效果综合评价技术及应用[J]. *煤田地质与勘探*, 2019, 47(6): 92–97.
WANG Xiaolei, JI Zhigang, LUO Wenqiang. Comprehensive evaluation technology and application of grouting reinforcement effect for broken coal and rock mass[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2019, 47(6): 92–97.
- [17] 王德明, 张庆松, 张霄, 等. 隧道及地下工程注浆效果模糊评价方法的研究与应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, 36(S1): 3431–3439.
WANG Deming, ZHANG Qingsong, ZHANG Xiao, et al. Research and application on tunnel and underground engineering grouting effect of the fuzzy evaluation method[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(S1): 3431–3439.
- [18] 后钱峰, 陈颖辉, 欧明喜, 等. 运营隧道注浆堵漏效果的GRA模糊综合评价[J]. *隧道建设(中英文)*, 2020, 40(5): 755–761.
HOU Qianfeng, CHEN Yinghui, OU Mingxi, et al. GRA fuzzy comprehensive evaluation of grouting sealing effect in operating tunnels[J]. *Tunnel Construction*, 2020, 40(5): 755–761.
- [19] 陈军涛, 李文昕, 薛峰, 等. 主客观组合赋权的TOPSIS-RSR注浆效果综合评价方法[J/OL]. *煤炭科学技术*, <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1695>, 2023–08–26.
CHEN Juntao, LI Wenxin, XUE Feng, et al. The TOPSIS-RSR grouting effect comprehensive evaluation method based on subjective and objective combination weighting[J/OL]. *Coal Science and Technology*, <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1695>, 2023–08–26.
- [20] 李金华, 孙冠临, 苏培莉, 等. 动水注浆沉积压力特征与注浆效果试验研究[J]. *矿业安全与环保*, 2017, 44(6): 21–24.
LI Jinhua, SUN Guanlin, SU Peili, et al. Test study on dynamic water grouting sedimentary pressure characteristics and grouting effect[J]. *Mining Safety & Environmental Protection*, 2017, 44(6): 21–24.

- [21] 段李宏. 大采长工作面高承压水底板注浆改造技术研究[J]. 矿业安全与环保, 2023, 50(4): 110–115.
DUAN Lihong. Study on grouting transformation technology of high-confined water floor in working face with large mining length[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2023, 50(4): 110–115.
- [22] 周文武, 韩承豪, 张伟杰, 等. 井筒冻结孔环形通道注浆扩散机制及注浆封堵设计方法[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2021, 40(1): 17–26.
ZHOU Wenwu, HAN Chenghao, ZHANG Weijie, et al. Grouting diffusion mechanism and plugging design method of annular channel in shaft freezing hole[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2021, 40(1): 17–26.
- [23] 郭小铭, 刘英锋, 谷占兴. 彬长矿区煤层开采导水裂隙带高度探测及计算[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2023, 5(5): 053526.
GUO Xiaoming, LIU Yingfeng, GU Zhanxing. Detection and calculation of the height of water flowing fractured zone of coal roof in Binchang mining area[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2023, 5(5): 053526.
- [24] 石志远. 地面顺层孔注浆技术在帷幕截流工程中的应用[J]. 煤炭工程, 2022, 54(3): 68–72.
SHI Zhiyuan. Application of ground bedding borehole grouting in curtain closure project[J]. Coal Engineering, 2022, 54(3): 68–72.
- [25] 高家平, 祝汉京, 朱术云, 等. 深部工作面底板太灰水可疏放性评价及防治措施[J]. 煤炭工程, 2022, 54(11): 95–100.
GAO Jiaping, ZHU Hanjing, ZHU Shuyun, et al. Water drainage feasibility of floor limestone aquifer of Taiyuan Formation in deep working face floor and the water hazard control measures[J]. Coal Engineering, 2022, 54(11): 95–100.
- [26] 陈勇, 范钢伟, 殷聪, 等. 基于改进AHP-熵权法耦合的淋涌水巷道顶板富水性评价与应用[J]. 煤炭工程, 2023, 55(12): 141–146.
CHEN Yong, FAN Gangwei, YIN Cong, et al. Evaluation of roof water richness of water-drenching roadway based on improved AHP-Entropy weight coupling[J]. Coal Engineering, 2023, 55(12): 141–146.
- [27] 张官进, 权玲, 李新伟, 等. 基于组合赋权和云化物元模型的公路穿越采空区场地稳定性评价[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2022, 4(2): 023013.
ZHANG Guanjin, QUAN Ling, LI Xinwei, et al. Evaluation of site stability of highway passing through goaf based on combined weighting and the cloud matter-element model[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2022, 4(2): 023013.
- [28] 陈嘉阳, 卜宪海, 陈殿称, 等. 顾及地形复杂度因子权重的多波束点云抽稀算法[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2022, 41(5): 21–29.
CHEN Jiayang, BU Xianhai, CHEN Dianchen, et al. A thinning algorithm of multibeam point cloud considering weight of terrain complexity factor[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2022, 41(5): 21–29.
- [29] 张科学, 闫星辰, 何满潮, 等. 基于ANP-MEA模型的智能化开采工作面适应性评价研究[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2023, 5(2): 023037.
ZHANG Kexue, YAN Xingchen, HE Manchao, et al. Study on intelligent adaptability evaluation of intelligent coal mining working face based on ANP and matter-element extension model[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2023, 5(2): 023037.
- [30] 唐猛, 康向涛, 高璐, 等. 基于博弈论与TOPSIS法煤与瓦斯突出危险性评价研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2021, 40(5): 77–86.
TANG Meng, KANG Xiangtao, GAO Lu, et al. Study on risk assessment of coal and gas outburst based on game theory and TOPSIS[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2021, 40(5): 77–86.
- [31] 田凤调. RSR法中的分档问题[J]. 中国卫生统计, 1993(2): 26–28.
TIAN Fengdiao. Classification problem in RSR method[J]. Chinese Journal of Health Statistics, 1993(2): 26–28.