中关铁矿岩体质量空间分布预测*

王志国[1,2],吴仪慧[1,2],方博然[1,2],卢聚强[1,2],王瑞[3]

(1.华北理工大学 矿业工程学院, 河北 唐山市 063210;
2.河北省矿山绿色智能开采技术创新中心, 河北 唐山市 063210;
3.山东省路桥集团有限公司, 山东 济南 250014)

摘要:获取岩体稳定性级别,对矿体深度开采、围岩支护以及采空区的充填具有十分重要的意义。基于中关铁矿的工程地质条件,通过室内岩石力学基本性质试验、现场岩石力学测试、现场岩体节理调查、地应力测试等,确定了测点位置岩石基本质量BQ值;利用ArcGIS软件的数据处理和空间分析功能,通过克里金插值技术建立了研究区域岩体质量的空间分布预测模型,应用该模型预测分析-230 m水平矿体的岩体质量,并进行现场实测验证。结果表明:岩体质量空间分布预测结果与实际情况具有较好的一致性,中关铁矿-230 m水平矿体基本质量BQ值为57.843~347.573,处于第Ⅳ和第Ⅴ等级,矿体质量较差,易破碎、不稳定。研究获取的岩体质量空间分布预测模型为研究岩体工程未完全揭露情况下岩体稳定性级别提供了方法,也为后续中关铁矿的安全开采提供了理论依据。

关键词:岩体基本质量;BQ空间分布;ArcGIS;克里金插值

中图分类号:TD853 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2025)03-0111-08

Prediction of Spatial Distribution of Rock Mass Quality in Zhongguan Iron Mine

WANG Zhiguo[1,2], *WU Yihui*[1,2], *FANG Boran*[1,2], *LU Juqiang*[1,2], *WANG Rui*[3]

(1.College of Mining Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan, Hebei 063210, China;
2.Green Intelligent Mining Technology Innovation Center of Hebei Province, Tangshan, Hebei 063210, China;
3.Shandong Luqiao Group Co., Ltd., Jinan, Shandong 250014, China)

Abstract: Obtaining the stability level of rock mass is of great significance to the deep mining of ore body, surrounding rock support and filling of goaf. Based on the engineering geological conditions of Zhongguan Iron Mine, the basic quality BQ values of rock mass at the measuring points were determined through laboratory rock mechanics basic property test, field rock mechanics test, field rock joint investigation and in-situ stress test. Using the data processing and spatial analysis function of ArcGIS software, the spatial distribution prediction model of rock mass quality in the study area was established through Kriging interpolation technology. The rock mass quality of -230 m horizontal ore body was predicted and analyzed using the model, and the field measurement verification was carried out. The results show that the prediction results of the spatial distribution of rock mass quality are in good agreement with the actual situation. The basic quality BQ value of the -230 m level ore body in Zhongguan Iron Mine is 57.843-347.573, which is in the fourth and fifth grades. The ore body quality is poor, easy to break and unstable. The spatial distribution prediction model of rock mass quality can provide a method for studying the stability level of rock mass under the condition that rock mass engineering is not fully exposed, and also can build a theoretical basis for the safe mining of Zhongguan Iron Mine in the future.

Key words: Basic quality of rock mass, BQ spatial distribution, ArcGIS, Kriging interpolation

0 引言

岩石基本质量指标BQ在工程实践中是评估岩体性质的一项重要指标,直接反映了岩体最基本的属性[1-2]。为充分利用现存的矿产资源,满足社会需求,深部开采已经逐渐成为地下开采的主流趋势,地

* **收稿日期**:2024-05-10
基金项目:河北省中央引导地方科技发展资金项目(246Z4207G,246Z4101G)
作者简介:王志国(1969—),男,河北香河人,博士,教授,研究方向为采矿与岩石力学。E-mail:wzg@ncst.edu.cn

下矿体的赋存情况以及矿体稳定性都存在很大程度的不确定性,预知地下矿岩赋存情况尤为重要。通过测量整个空间的岩体质量评价岩体稳定性是不切实际的,可通过有限的数据点对整个岩体空间进行预测分析,根据预测结果对区域岩体质量进行评价分级[3-5]。各国学者的多年研究使得岩体质量评价指标由单一指标向多指标发展,取得了丰富的研究成果,岩体质量的评价精度越来越高,评价结果也越来越接近岩体实际赋存现状,这无疑为矿产资源的开采和利用提供了更好的理论支持和技术手段。

空间插值作为空间分析的手段,也逐渐成为研究和分析岩体质量分布的重要方法[6-10]。TAO等[11]采用指标克里金(Kriging)插值对西南采场地质勘探钻芯 RQD 数据进行分析,通过插值对采场岩体质量进行预测;刘仰鹏等[12]在有限且离散 RQD 值的基础上使用 Kriging 插值法预测空间区域 RQD 值的分布情况;杨凯等[13]使用简单克里格对岩体质量进行估值并与 SGS 随机实现的结果进行比较;任凤玉等[14]使用距离幂次反比法对岩体基本质量 BQ 进行预测并划分等级;贾明涛等[15]借助区域化变量最优无偏估值方法,使用空间插值建立了三维可视化 RMR 评价模型;冯武等[16]基于局部 RMR 值,采用克里格插值,近似表征整个区域岩体质量;王照亚等[17]使用克里金插值对矿区地质岩芯 RQD 进行了研究。

本文通过室内岩石力学基本性质试验、现场岩石力学测试、现场岩体节理调查、地应力测试等,确定了矿区内某些测点位置的岩体基本质量 BQ 值,利用 ArcGIS 软件的数据处理和空间分析功能,通过空间插值技术建立了研究区域岩体质量的空间分布模型,为评估中关铁矿岩体质量的稳定性提供了理论支持。

1 工程概况

中关铁矿矿体主要赋存于地面 300 m 以下位置,矿体长约 2 km,宽度 100～300 m,属于缓倾斜矿体,倾角为 10°～15°。该矿体主要产于新奥陶系碳酸盐岩层中和似斑状辉石闪长岩侵入物的带上以及周围的碳酸盐岩层中,在不同的接触环境下,相应的有利位置就产生了磁铁矿体。中关铁矿以厚大矿体为主,矿体采用阶段空场嗣后充填法进行开采充填,中厚及薄矿体也占一部分,矿岩及充填体的稳定性是决定该采矿方法成功的关键因素。中关铁矿岩石主要为结晶灰岩或大理岩,具有较好的稳定性;局部为矽卡岩、角砾状灰岩及破碎带,稳定性差。

当前该矿山处于开采阶段,开展工程岩体稳定性的预测研究对后期矿体深度开采、围岩支护以及采空区的充填和后期维护都有十分重要的意义。

2 岩体基本质量

2.1 岩体基本质量指标

工程岩体稳定性不仅会影响矿床采矿方法的选择,而且会影响地下工程支护形式的选择,是地下矿体合理、安全、高效、充分开采的重要依据。本研究采用《工程岩体分级标准》(GB/T 50218—2014)中的公式,计算得到了岩体基本质量指标。岩体的基本质量指标值越高,表示岩体稳定性越好;反之,岩体稳定性较差。

根据《工程岩体分级标准》(GB/T 50218—2014)提出的岩体基本质量计算公式,岩体基本质量指标采用综合指标方法,以两个分级因素 R_c 和 K_v 的定量指标为参数,通过计算得出岩体基本质量指标 BQ,并将其作为定量指标用于等级划分,进行评估,计算公式见式(1)。

$$BQ=100+3R_c+250K_v \tag{1}$$

式中:K_v 表示岩体的完整性指数;R_c 表示岩石饱和状态下的单轴抗压强度,MPa。

通过点荷载试验和结构面数字识别系统 ShapeMetriX3D 研究分析可以得到 R_c 和 K_v,当 $R_c>90K_v+30$ 时,使用 $R_c=90K_v+30$ 和 K_v 代入式(1)计算 BQ 值;当 $K_v>0.04R_c+0.4$ 时,使用 $K_v=0.04R_c+0.4$ 和 R_c 代入式(1)计算 BQ 值。

根据计算出的不同位置的岩体基本质量 BQ 值,结合空间坐标,使用插值分析——克里金空间插值,可对整个岩体的基本质量进行大范围的预测,图 1 为矿区内所取测点的分布位置。

2.2 岩石单轴抗压强度

采用首采区地质勘探采集的－230 m 水平的岩芯试件进行单轴抗压强度试验,使用现场拣选的岩块和岩芯劈件进行点荷载试验。部分试件的单轴抗压强度见表 1。点荷载强度 $I_{S(50)}$ 与岩石抗压强度 R_c 之间的关系如下:

$$R_c=22.82I_{S(50)} \tag{2}$$

式中,$I_{S(50)}$ 为直径 50 mm 的圆柱试件径向加载时的点荷载强度。

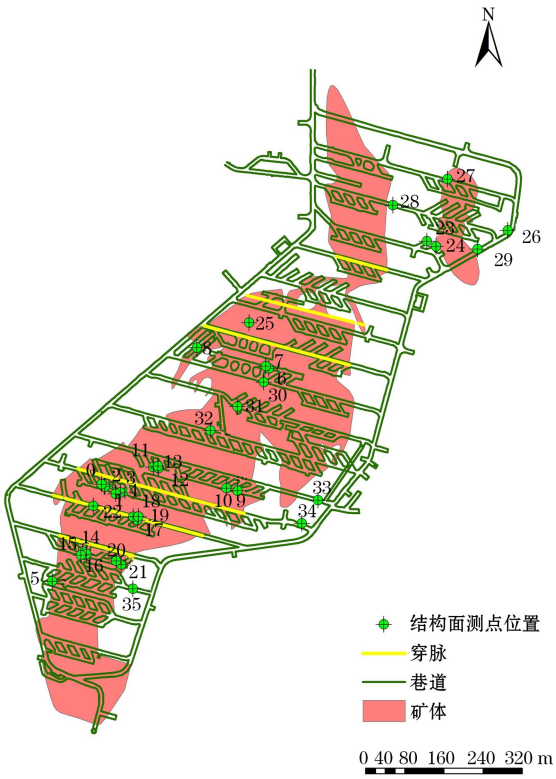


图 1　中关铁矿－230 m 水平测点布置

Fig.1　Layout of measuring points at －230 m horizontal in Zhongguan Iron Ore

表 1　部分试件的单轴抗压强度

Table 1　Uniaxial compressive strength of some specimens

岩石编号	最终抗压强度/MPa	普氏硬度
29#	23.089	2.309
30#	15.300	1.530
33#	98.025	9.803
36#	26.982	2.698
37#	16.238	1.624
40#	56.667	5.667
ZKJ230-2	43.360	4.336
ZKJ230-3	69.760	6.976
ZKJ230-4	76.790	7.679
ZKJ230-5	42.380	4.238

按照国家岩石力学试验规程，试验采用圆柱形试件，直径 50 mm，高 100 mm，将岩石以上盘、下盘、矿体为三组试件，进行饱和与自然状态单轴抗压强度试验。

试验采用 TAW-3000 微机控制电液伺服岩石三轴试验机，进行单轴加载试验，并配合轴向、径向应变规程进行试件轴向和径向应变测量，表 2 是－230 m 水平岩石单轴抗压强度试验结果。

表 2　－230 m 水平岩石单轴抗压强度试验结果

Table 2　Results of rock uniaxial compressive strength test in －230 m horizontal

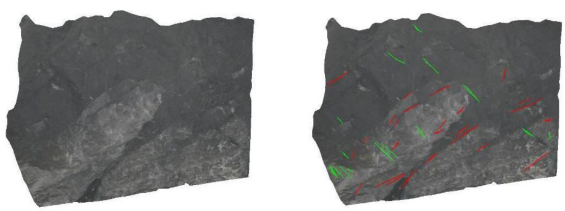
位置	破坏荷载/kN	强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比
上盘	226.721	121.918	67.747	0.281
下盘	350.343	187.760	51.200	0.240
矿体	86.747	46.803	15.011	0.210

2.3　岩体完整性指数

为确定岩体完整性指数，使用 ShapeMetriX3D 软件对中关铁矿暴露岩体进行结构面调查分析，获得所研究岩体的结构面参数。岩体完整性指数利用公式进行计算，以获取本研究所需的岩体质量分布数据值。

将采集到的左视图和右视图导入分析系统中，在关键测量区域进行标注。以测点 32 为例，系统通过像素点匹配和图像校正等技术手段，合成三维模型，生成岩体表面的三维图，如图 2(a)所示。

按照 3GSM 分组原则、主要节理裂隙的分布特征，在合成的三维图中对不同组进行着色标识，以区分不同组别，该测点的结构面被划分为两个不同的组。测点 32 优势结构面产状分别为：251.72°∠42.49°，104.56°∠48.64°，如图 2(b)中的红绿面所示(颜色标识见电子版)。



(a) 三维图　　(b) 三维模型节理分布

图 2　测点 32 的视图

Fig.2　Views of measuring point 32

分析系统能够自动生成赤平极射投影，如图 3 所示。从赤平极射投影图中可直观地看到测点 32 的结构面倾向、倾角的分布信息以及整体分布情况，进行数理统计并结合经验公式计算岩体完整性指数。

在实际应用中，常利用结构面密度来评估岩体的力学特性和稳定性状况，其数值决定了岩体的完整性状况和结构面的发育程度，在岩体质量研究和分析评价中占据重要地位。

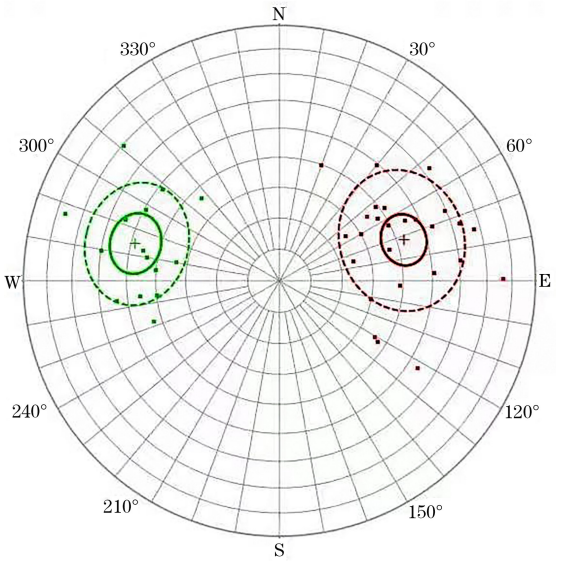


图 3 测点 32 的赤平极射投影

Fig.3 Polar projection map of measuring point 32

岩体完整性指数计算公式见式(3)：

$$K_v=\begin{cases}1.0-0.083J_v(J_v\leqslant 3)\\0.75-0.029(J_v-3)(3<J_v\leqslant 10)\\0.55-0.02(J_v-10)(10<J_v\leqslant 20)\\0.35-0.001\ 3(J_v-20)(20<J_v\leqslant 35)\\0.15-0.007\ 5(J_v-35)(J_v>35)\end{cases}\quad(3)$$

式中，J_v 表示单位体积内所包含的节理条数，条/m³，公式如下：

$$J_v=N_1/L_1+N_2/L_2+\cdots+N_n/L_n\quad(4)$$

式中：$L_1,L_2,\cdots,L_n$ 为垂直于结构面的测线长度；$N_1,N_2,\cdots,N_n$ 为测线长度内同组结构面的数目；$1,2,\cdots,n$ 为测线序号。

依照岩体结构面的空间展布情况，使用统计方法得出结构面的面密度，并根据公式(4)得出测试位置结构面体密度。测得测点 32 结构面的体密度为 $J_v=3.73$ 条/m³，依据此方法可获取整个－230 m 水平岩体的结构面参数(见表 3)。

表 3 －230 m 水平岩体结构面参数

Table 3 Rock mass structural plane parameters of －230 m horizontal

取样点号	岩性	产状 倾向∠倾角	线密度/(条/m)	结构面条数	体密度/(条/m³)
1	矿体	284.17°∠ 59.44°	4.207 0	83	12.05
		106.35°∠64.51°	2.466 3	42	
		191.33°∠14.61°	5.379 3	80	
2	围岩	116.96°∠ 53.00°	2.283 0	158	6.14
		291.51°∠62.67°	1.782 6	102	
		237.56°∠11.99°	2.073 7	65	
3	矿体	120.46°∠ 46.28°	2.829 6	89	8.06
		341.62°∠9.09°	2.612 6	59	
		317.06°∠59.67°	2.614 0	56	

3 岩体质量空间分布预测模型

地理信息系统(GIS)技术是利用计算机技术存储、分析和表达地理空间信息的重要方法[18-19]。GIS 在管理、分析、处理空间数据和与空间数据相关的数据方面具有非常强大的功能。以计算机软硬件以及网络为基础的 GIS 可以实现对海量数据的采集、存储、检索、管理、分析等，与其他信息系统的区别以及最大的优势在于地理信息系统能够实现空间数据的分析与处理。该方法的应用领域十分广泛，不仅应用于农业、工业、军事、医疗卫生，也渗透到了各个学科。

空间插值的实质就是利用已知空间点的数据值预测研究区域内未知点的数据值或者整个研究区域的数据值，是空间分析中区域预测的一种常用手段。一般来说，获取的已知空间点的数量越多、点分布越均匀，插值的结果也就越精确，预测效果就越好；反之，预测效果差。本文使用已获取的岩石试件 BQ 值结合钻孔空间坐标进行插值分析。

3.1 克里金插值原理

克里金插值的核心在于运用变量理论和机构分析技术，实现对有限空间区域内变量的最优且无偏估计。类似于确定性插值方法，克里金插值也是基于预测点周围的观测值，通过生成相应的权重系数来进行估计。克里金插值与其他插值的重要区别在于，克里金插值的权重系数更为复杂，是根据计算半变异图来反映数据空间结构获得的。克里金插值计算公式为：

$$Z_0=\sum_{i=1}^{N}\lambda_i Z_i\quad(5)$$

式中：λ_i 为权重系数；N 为已知点的个数；Z_0 为 (x_0,y_0) 处的估计值，即预测的 BQ 值；Z_i 为各测点的 BQ 值。

运用克里金插值法，可以研究邻域内观测值的半变异图及空间分布特点，对研究区中尚未知晓的点的值进行预测。

3.2 半变异函数

半变异函数是一种用于形容区域化变量随机性及结构性的分析工具，通过数据点之间的半变异值与距离的函数来揭示空间相关关系。在克里金插值中，半变异函数用于衡量各个位置之间的相似性或差异性，进而影响插值结果的准确性。半变异函数 $\gamma(h)$ 反映了区域变化量的空间相关性。

半变异函数可由下式进行估计：

$$\gamma(h)=\frac{1}{2N(h)}\sum_{i=1}^{N(h)}[Z_i-Z_{i+h}]^2 \qquad (6)$$

式中：Z_i 和 Z_{i+h} 分别为空间位置 i 和 $i+h$ 上的观测值，$[i=1,2,\cdots,N(h)]$；$N(h)$ 是分隔距离为 h 的样本量。

3.3　ArcGIS 建模及分析

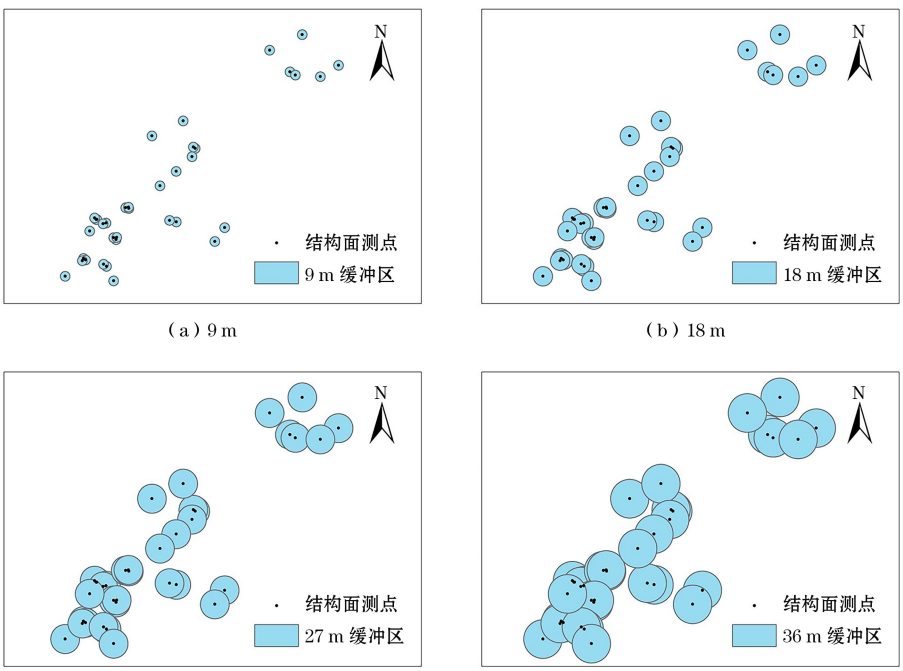
为了维护岩石工程的稳定性，及时对岩体做出质量预测和加固，经常对岩石工程进行实时监测尤为重要，而 3S 技术是实现该监测的重要手段之一。3S 技术中的 GIS 是数据处理和数据更新的重要手段，可对空间数据进行复杂分析处理、预测。由于所获取的空间数据点数量有限，为提高插值结果的准确性和精确性，且便于后续数据的分析处理，需要对上述空间数据进行预处理。基于各测点的 BQ 值，在 ArcGIS 软件中通过建立缓冲区、数据格式转化、点提取、点赋值等方法实现数据点的有效扩展。

(1) 将计算得到各测点位置的 BQ 值结合空间坐标导入 ArcGIS 软件中，实现数据的预处理，将其转化为 ArcGIS 可操作的矢量点数据。

(2) 使用上述矢量点数据，依据矿房大小，以 BQ 值点为圆心分别建立 9 m、18 m、27 m 和 36 m 的缓冲区(见图 4)。缓冲区分析是 ArcGIS 中用于分析空间对象与周边事物环境的关联程度和影响范围的一种空间分析方法，以 3 种矢量数据点、线、面为基础，可以创建不同尺度的多边形。

(3) 转换数据格式。将(2)中的面数据转化为栅格，并进一步转化为点数据，提取点数据，并给提取后的点赋值，如图 5 所示。

(4) 插值结果是预测岩体质量的关键，而地质统计分析是评价克里金插值结果精确性的重要手段，将上述 4 组数据分别进行地质统计分析。

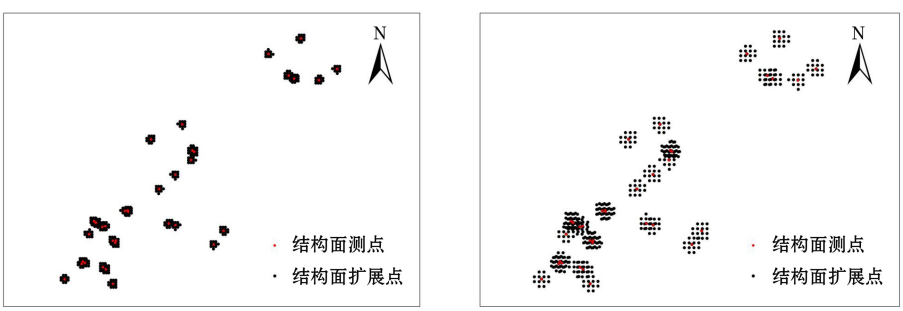


(a) 9 m　　(b) 18 m

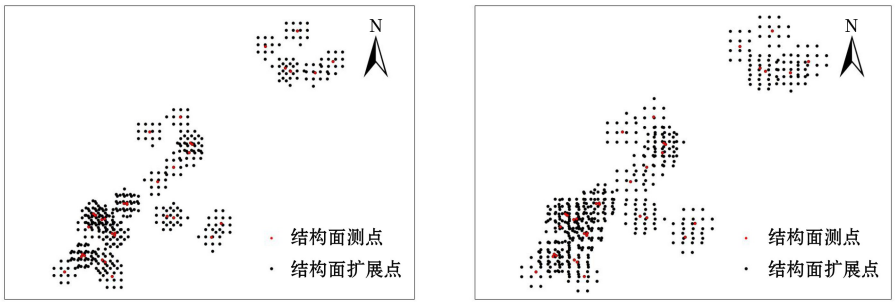
(c) 27 m　　(d) 36 m

图 4　缓冲区分析

Fig.4　Buffer analysis



(a) 9 m　　(b) 18 m



(c) 27 m (d) 36 m

图 5 基于缓冲区的扩展点分布

Fig.5 Distribution of spread points based on buffer

任意一种插值方法都存在偏差。不能要求其预测的数值与实际值完全一致,只能尽可能减小偏差,提高预测精度和准确度。上述数据扩展方法能在一定程度减小偏差,使预测结果更接近矿体真实的赋存情况。

地质统计分析结果见表 4[20]。由表 4 可知,18 m 缓冲区尺度的标准平均值最接近于 0、均方根误差较小、平均标准误差最接近于均方根预测误差、标准均方根预测误差最接近于 1。这表明以 18 m 为缓冲区尺度扩展点后插值的结果最好,精度也最高,可视为本次插值最优模型。

表 4 地质统计分析结果

Table 4 Results of geostatistical analysis

缓冲区尺度	标准平均值	均方根预测误差	平均标准误差	标准均方根预测误差
原始	−0.050 653	78.934 0	88.427 2	0.890 7
9 m	0.008 176	35.058 5	49.299 4	0.744 1
18 m	0.001 197	47.782 4	50.908 7	0.962 8
27 m	−0.010 723	58.089 1	62.480 7	0.929 9
36 m	−0.005 637	59.108 4	64.113 9	0.930 1

根据表 4 地质统计分析的结果以及上述最优模型标准,本文选择以 18 m 缓冲区为基础提取的 BQ 值点作为克里金插值分析的源数据,插值后 BQ 值的范围为 57.843～347.573,按照岩石基本质量分级标准,中关铁矿矿体−230 m 水平岩石处于第Ⅳ和第Ⅴ等级,矿体岩石质量相对较差,易破碎、稳定性较低,图 6 可以直观地看到预测矿体质量的空间分布。

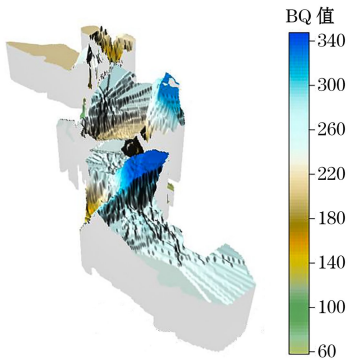
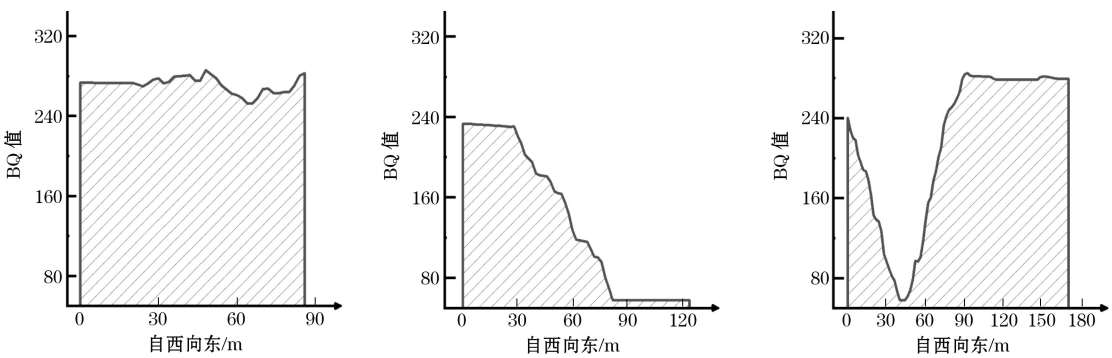


图 6 岩体质量空间预测三维图(18 m)

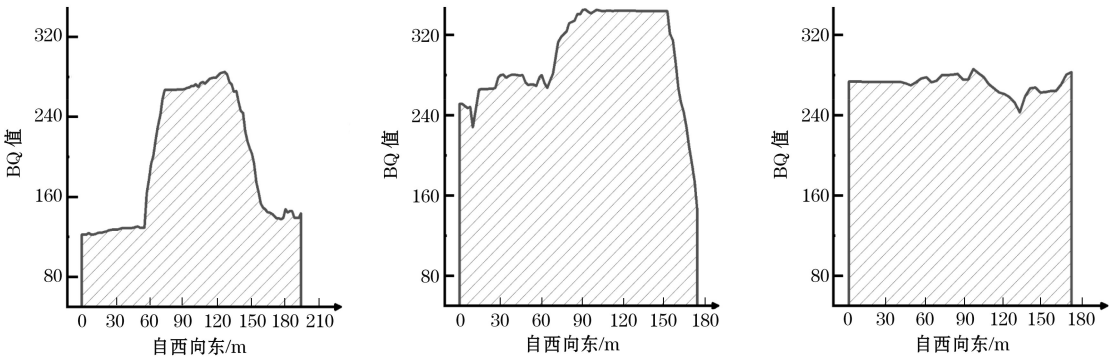
Fig.6 Three-dimensional map of spatial prediction of rock mass quality (18 m)

3.4 预测结果验证

为验证预测数据的准确性,从现场采集实际现状图进行比对。因获取的现场资料有限,基于预测结果,与现场部分情况进行对照,分别提取了 5#、7#、8#、13#、14#、15# 穿脉的剖面数据,BQ 值大致处于 60～350 之间,处于第Ⅳ和第Ⅴ等级,表明矿体易破碎,稳定性处于不稳定与极不稳定之间,如图 7 所示。



(a) 5# 穿脉 (b) 7# 穿脉 (c) 8# 穿脉



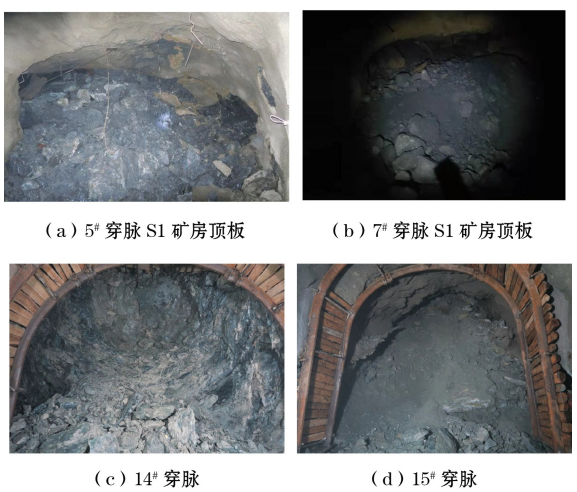
(d) 13# 穿脉　(e) 14# 穿脉　(f) 15# 穿脉

图 7　现场岩体质量剖面

Fig.7　Profile of on-site rock mass quality

其中，位于 5# 穿脉的 S1 矿房拉底范围为距离矿体下盘边界 6～9 m 处，－170 m 水平凿岩硐室下盘端部局部冒落(见图 8(a))。位于 7# 穿脉的 S1 矿房自－170 m 水平向下分阶段落矿，－230 m 水平距矿体下盘边界 66～88 m 范围落矿时，约 48 h 后矿房出现片帮垮落，施工中发现矿房顶板存在两条断层破碎带，冒落位置正好处于上盘冒落带内(见图 8(b))。上述实际情况反映了两个矿房矿体较为破碎、易冒落，与图 7(a)、图 7(b)预测的岩体质量是对应的。14# 穿脉掘进约 10 m 时，端部情况如图 8(c)所示，顶板易冒落，矿体较破碎，与图 7(e)对应。15# 穿脉距离下盘西端约 20 m 处的实地勘探情况如图 8(d)所示，顶板矿体质量较差，较为破碎，预测结果与现场勘探情况较为一致。

依据预测的中关铁矿岩体质量三维空间分布图，结合现场实测，可知中关铁矿－230 m 水平矿体稳定性差，易破碎，易发生冒落。



(a) 5# 穿脉 S1 矿房顶板　(b) 7# 穿脉 S1 矿房顶板

(c) 14# 穿脉　(d) 15# 穿脉

图 8　实地勘探图

Fig.8　Field exploration maps

4　结论

(1) 通过室内岩石力学试验与现场岩体力学实测获取了研究区域内不同位置测点 BQ 值；基于 ArcGIS 空间分析功能，使用克里金插值方法和半变异函数建立了岩体空间质量分布研究的综合方法，构建了岩体质量空间分布预测模型。

(2) 基于预测模型，－230 m 水平矿体基本质量 BQ 值的范围为 57.843～347.573，表明中关铁矿－230 m 水平矿体处于第Ⅳ和第Ⅴ等级，矿体质量较差，易破碎，稳定性低。

(3) 预测模型与现场实测验证对比结果表明二者具有较好的一致性；依据预测模型和地质统计分析最优模型构建－230 m 水平矿体岩石质量空间分布图，为中关铁矿充填开采提供了理论依据。

参考文献(References)：

[1] 焦文宇，廖文景.地下矿山岩体质量分级三维可视化应用研究[J].矿业研究与开发，2023，43(5)：197-202.
JIAO Wenyu，LIAO Wenjing. Study on Three-dimensional visualization application of rock mass quality classification in underground mines[J]. Mining Research and Development，2023，43(5)：197-202.

[2] 杨泽良，吕庆，沈佳轶，等.考虑节理影响的岩体基本质量指标定量评价[J].岩石力学与工程学报，2023，42(增刊 1)：3219-3225.
YANG Zeliang，LYU Qing，SHEN Jiayi，et al. Quantitative evaluation of rock mass basic quality index considering influence of joint surface[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2023，42(Suppl.1)：3219-3225.

[3] 容富.基于广义 RQD_t 的岩石质量空间分布规律研究[J].工程地质学报，2016，24(2)：246-251.
RONG Fu. Study of spatial distributing of rock mass quality g-eneralized RQD_t [J]. Journal of Engineering Geology，2016，24(2)：246-251.

[4] 李继明,左三胜.裂隙岩体岩石质量指标(RQD)的空间变化特征[J].吉林大学学报(地球科学版),2014,44(3):946-953.
LI Jiming, ZUO Sansheng. Spatial variation of rock quality designation (RQD) in fractured rock masses[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition),2014,44(3):946-953.

[5] 杨子超,张绍国,钟炮,等.铜坑矿92号矿体巷道顶板岩体质量评价[J].矿冶工程,2023,43(2):26-29+34.
YANG Zichao, ZHANG Shaoguo, ZHONG Pao, et al. Roof rock quality evaluation for roadway of No.92 ore body in Tongkeng Mine [J]. Mining and Metallurgical Engineering,2023,43(2):26-29+34.

[6] 邹林志,任光明,杨曦璃,等.基于ArcGIS空间插值分析的三维地质可视化[J].世界有色金属,2020(19):195-196.
ZOU Linzhi, REN Guangming, YANG Xili, et al.Research of 3D geological visualization method based on ArcGIS space interpolation analysis[J]. World Nonferrous Metals, 2020 (19):195-196.

[7] 孟宇豪.钻孔数据空间插值方法的比较分析[J].智能城市,2023,9(1):16-18.
MENG Yuhao. Comparative analysis of spatial interpolation me-thods for borehole data[J]. Intelligent City,2023,9(1): 16-18.

[8] 刘亚静,赵秀梅,甘德清,等.基于钻孔数据进行矿体克里金插值分析[J].中国钨业,2021,36(4):31-37.
LIU Yajing, ZHAO Xiumei, GAN Deqing, et al. Kriging interpolation analysis of orebody based on borekole data[J]. China Tungsten Industry,2021,36(4):31-37.

[9] 王圆文,丘永富,杨天鸿,等.基于钻孔数据库和RMR法的露天矿非均匀性岩体质量参数表征及应用[J].金属矿山,2023(6):192-199.
WANG Yuanwen, QIU Yongfu, YANG Tianhong, et al. Characterization and application of non-uniform rock mass quality parameters in open-pit mine based on borehole database and RMR method[J]. Metal Mine,2023(6):192-199.

[10] 段海澎,黄健敏,成涛,等.基于克里金方法的掌子面前方围岩RMR预测[J].中国公路,2018,21 (23):92-93.
DUAN Haipeng, HUANG Jianmin, CHENG Tao, et al. RMR prediction of surrounding rock in front of tunnel face based on Kriging method[J]. China Highway,2018,21 (23):92-93.

[11] TAO Z G, CUI X B, SUN X M, et al. Rock mass quality prediction of open-pit gold mine slope based on the Kriging interpolation method [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2020,38(3):5851-5865.

[12] 刘仰鹏,贺少辉,汪大海,等.基于空间插值的工程岩体RQD预测方法[J].岩土力学,2015,36(11):3329-3336.
LIU Yangpeng, HE Shaohui, WANG Dahai, et al. RQD prediction method for engineering rock mass based on spatial interpolation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36 (11): 3329-3336.

[13] 杨凯,晏鄂川,陈武,等.地下水封洞库围岩质量的空间变异性分析与三维表征[J].安全与环境工程,2020,27(3):163-177.
YANG Kai, YAN Echuan, CHEN Wu, et al. Analysis and three-dimensional display of spatial variability of surrounding rock quality of underground water-sealed caverns[J]. Safety and Environmental Engineering,2019,27 (3):163-177.

[14] 任凤玉,刘欢,何荣兴,等.基于SURPAC软件构建罗卜岭铜钼矿岩体基本质量的空间分布[J].中国矿业,2019,28(9):80-84.
REN Fengyu, LIU Huan, HE Rongxing, et al. The spatial distribution of rock mass basic quality of the Luoboling copper-molybdenum mine based on SURPAC software[J]. China Mining Industry,2019,28(9):80-84.

[15] 贾明涛,王李管.基于区域化变量及RMR评价体系的金川Ⅲ矿区矿岩质量评价[J].岩土力学,2010,31(6):1907-1912.
JIA Mingtao, WANG Liguan. Evaluation of rock mass quality based on regionalization variable optimal estimation theory and RMR system in Jinchuan mine No.3[J]. Rock and Soil Mechanics,2010,31(6):1907-1912.

[16] 冯武,王李管,彭平安,等.自然崩落法矿岩质量三维数字化评价方法[J].矿冶工程,2014,34(2):4-9.
FENG Wu, WANG Liguan, PENG Ping'an, et al. Evaluation of rock mass quality in block caving with 3D digitalization method [J]. Mining and Metallurgical Engineering,2014,34(2):4-9.

[17] 王照亚,白夜,张武,等.三山岛金矿西岭矿区地质岩芯RQD三维可视化建模方法[J].有色矿冶,2023,39(3):12-17.
WANG Zhaoya, BAI Ye, ZHANG Wu, et al. RQD 3D visualization modeling method for geological core in Xiling mining area, Sanshandao Gold Mine[J]. Non-ferrous Mining and Metallurgy,2023,39(3):12-17.

[18] 盛雷,孙洋,于千桐,等.基于ArcGIS的三维地质建模方法研究[J].江西建材,2023,43(1):145-147.
SHENG Lei, SUN Yang, YU Qiantong, et al. Research on 3D geological modeling method based on ArcGIS[J]. Jiangxi Building Materials,2023,43(1):145-147.

[19] 魏忠侠.三维地理信息系统在矿山中的技术研究与应用[J].世界有色金属,2023(23):22-24.
WEI Zhongxia. Technical research and application of three-dimensional geographic information System in mines[J]. World Nonferrous Metals,2023(23):22-24.

[20] 郑向向,帅向华.基于地质统计方法与DEM的地震灾情空间插值研究[J].地震学报,2013,35(4):573-583+2.
ZHENG Xiangxiang, SHUAI Xianghua. Research on spatial interpolation of earthquake disaster information based on geostatistics and DEM[J]. Acta Seismologica Sinica,2013, 35(4):573-583+2.