

历史遗留矿山三维建模的应用研究

——以山东省滕州市界河镇废弃露天矿山为例

张越¹, 杨波^{1*}, 柳晓松¹, 陈晓波², 杨杰³

(1. 山东省煤田地质局第一勘探队, 山东 青岛 266400; 2. 山东省煤田地质局第四勘探队, 山东 潍坊 261200; 3. 山东省煤田地质局第三勘探队, 山东 泰安 271000)

摘要:历史遗留露天矿山作为重要的矿产资源潜在赋存区,亟需开展系统的矿产资源潜力评价与三维空间建模研究。本研究基于地理信息系统(GIS)技术平台,构建了废弃露天矿山高精度三维地质模型,通过融合多源地质数据建立空间数据库,运用数字高程模型(DEM)与地质体素分割技术实现矿体三维可视化表征。采用改进的克里金插值算法对残留矿体进行空间推估,结合 3D 分析法智能化计算剩余资源量。研究成果为自然资源主管部门提供了矿区剩余矿产资源量动态监测技术方案,构建了“资源储量—空间分布—生态修复”三维一体化的决策支持系统,有效解决了传统二维估算方法存在的矿体空间形态失真与资源量统计偏差问题。该技术的应用实现了矿产资源经济开发与生态保护工程的协同规划,为推进矿区生态修复工程精准施策、促进绿色矿山建设提供了科学依据,同时拓展了三维地质建模技术在矿产资源勘查评价领域的应用场景。

关键词:废弃露天矿山; 矿产资源量; 三维模型; 山东滕州界河

中图分类号: TD166

文献标识码: A

doi:10.12128/j.issn.1672-6979.2025.10.010

0 引言

露天矿山矿产资源的绿色开发与生态修复治理,是建设美丽中国高质量发展的底色^[1]。本文以废弃石灰岩矿山为研究对象,利用现有地质、测绘数据,查清历史遗留矿山剩余矿产资源量,指导区域性生态文明建设及矿产资源经济开发,实现经济发展与环境保护的双赢,形成具有中国特色的生态经济系统重构路径^[2-8]。

废弃矿山的调查评估应包括矿产资源的残留情况、地质环境状况、生态环境影响等。废弃矿山治理包括矿产资源的回收利用、地质环境的修复、生态环境的恢复等。

国内许多学者将无人机倾斜摄影数据引入到矿山生态修复现状调查、工程监测及成果评价中,通过无人机航测及三维地质建模^[9-22],重新圈定废弃矿山可开采区域^[23-24],评估剩余石灰岩矿石的经济价

值,以生态修复治理与碳汇产业为主,将生态治理废弃矿山产业融入到地方经济发展大环境中,开展精细化勘探与废石加工线建设,创建废弃露天矿山可持续发展新模式,推动“资源再生—生态修复—碳汇产业增值”闭环系统。

1 废弃露天矿山矿产资源量估算系统

1.1 数据应用原理

1.1.1 三维建模原理

本研究尝试用 GIS 中 TIN 数据集建立三维模型基础数据。创建 TIN 的方法是通过将遥感数据组成三角形网,各折点通过由一系列边进行连接,主要是通过三角测量法或距离排序法等插值方法,更有效地将复杂地形表示出来,对于地形表面变化较大的区域,TIN 能更精确的提供表面模型(图 1)。

1.1.2 资源量自动化估算原理

GIS 中的模型构建器属于功能编程,实现原始

收稿日期:2025-04-05; 修订日期:2025-05-06; 编辑:陶卫卫

基金项目:透视山东一大型矿产地三维模型建设及压覆矿产资源储量模块研发,项目编号:鲁勘字[2022]52 号

作者简介:张越(1982—),女,辽宁阜新人,高级工程师,主要从事三维地质建模研究工作;E-mail:120956031@qq.com

* 通信作者:杨波(1982—),男,辽宁彰武人,高级工程师,主要从事三维地质建模研究工作;E-mail:85756319@qq.com

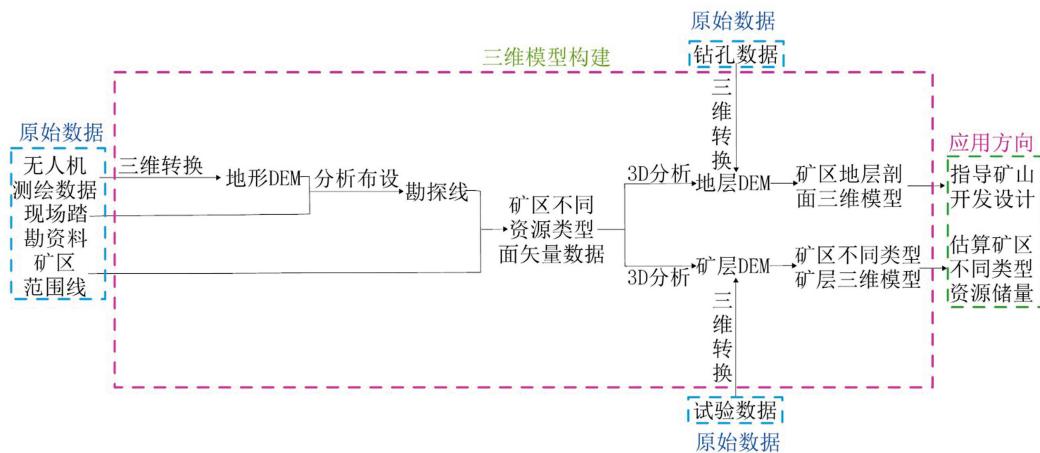


图 1 三维模型构建技术路线示意图

数据输入后块段模型自动生成、计算、统计汇总, 构建一体化资源储量计算模型。

模型构建器中的数据可以是来自不同源的地理数据, 如矢量数据、栅格数据等, 可以通过不同的迭代器工具组织数据, 成为命令的输入数据。对于需要重复执行相同操作的情况, 模型构建器支持迭代功能, 对一组数据或一系列操作进行重复处理。这些数据在模型中被处理, 并通过输出参数传递给下一个工具进行进一步的分析或转换。已设置的输入数据可以再设置为参数, 这些参数可以在模型运行时被修改, 操作灵活、简洁, 实现建模程序重复使用。输入数据的参数化, 可以轻松地调整模型的输入和输出, 根据研究区的复杂程度进行数据传递的调节, 以满足不同的数据处理需求。

1.1.3 数据应用原理

无人机倾斜摄影通过多角度影像采集地表高精度三维信息, 覆盖地形、地表构造及裸露岩层, 分辨率可达厘米级。利用 GIS 软件加密点云及生成纹理映射, 输出高精度实景破损山体地表三维模型。

地质勘探资料中整合钻孔数据、物探成果、岩心样品试验分析及地下构造解译成果, 形成地下地质信息库。运用克里金插值法计算原理, 在 GIS 中通过插值分析, 将钻孔岩性、矿石品位数据分别转化为地层、矿体三维模型, 表征地质体形态与分布。在 GIS 的场景平台中将地表模型与地层、矿体模型叠加, 建立“地上—地下”一体化模型, 开展剖面切割与空间分析。

1.2 技术路线

1.2.1 估算范围

根据土地监测卫片数据确定破损山体方位, 结

合无人机影像及现场调查概况核准破损山体生态修复治理区域, 依据国土空间规划及三区三线保护范围, 确定破损山体矿产资源估算范围。

1.2.2 基础数据库

依据收集的测量、地质数据, 在 Excel 中分别建立数据库, 依据无人机倾斜摄影数据建立地形数据库, 依据勘探报告中的钻孔柱状图数据建立地层数据库, 依据剖面图及岩石样品试验分析结果建立矿体数据库。

1.2.3 矿体块段划分

提取勘探报告中钻孔的位置, 储量估算图中勘探线端点位置的三维矢量数据, 建立矿体、块段估算范围数据库。

1.2.4 自动化建模

运用 GIS 中模型构建器将地理处理工具连接形成可见的逻辑编程, 进行自动的块段划分, 系统化数据统计及资源储量估算, 实现一键化操作控制。

2 实例分析

2.1 研究区现状

研究区位于山东省滕州市, 行政区划隶属于滕州市界河镇, 处于丘陵地貌单元, 岩层呈单斜状产出, 总体矿层产状: $40^{\circ} \angle 13^{\circ}$, 产状平缓, 沿走向、倾向分布稳定。地形切割中等, 地势表现为北高南低, 最高点标高 +130 m, 最低点标高南部 +60 m, 相对高差 70 m。周边地形标高约 +80 m, 当地侵蚀基准面低于 +48 m。北部分布大面积宕口, 最高标高约 +120 m, 现形成陡峭岩壁, 坡度 $35^{\circ} \sim 90^{\circ}$; 山体底部存在多处常年积水坑塘, 坑底最低标高约

+49 m, 原地貌破坏较严重。

区域地处内地北暖温带半湿润大陆性季风气候区, 四季分明, 雨量充沛, 光照充足。春季多风温暖干燥; 夏季高温, 暴雨集中; 秋季湿凉, 天高气爽。冬季多西北风, 空气干冷。

2.2 地质基础数据

根据勘探报告试验数据分析, 研究区内地层由老到新依次为古生代寒武纪九龙群张夏组上灰岩段、崮山组、第四系。分为 3 个矿层, 自下而上编号为 KC1、KC2、KC3。矿层 KC1 顶板为张夏组上灰岩段条带灰岩, 底板为张夏组鲕粒灰岩, 矿层 KC2 顶板为崮山组泥云岩, 底板为张夏组上灰岩段泥质灰岩, 矿层 KC3 顶板为含砾砂质黏土, 底板为崮山组泥云岩。

2.3 基础数据三维建模

2.3.1 地形数据转换

提取无人机测绘地形数据到 Excel, 运用 GIS 构建废弃山体栅格数据文件, 加密点矢量数据转为 TIN 数据, 生成研究区地形三维模型, 结合研究区的遥感影像, 构建研究区的地形地貌三维模型。

2.3.2 地层数据转换

根据勘探报告研究区地层岩性由下到上为 6 种: 亮晶灰岩、泥质灰岩、条带灰岩、泥云岩、薄层灰岩及第四系。根据柱状图提取每个钻孔地层位置三维矢量数据, 按地层从上到下的顺序输入 Excel, 存为.csv 文件导入 GIS, 将所有同一地层岩性钻孔数据建立一个点矢量文件, 按研究区范围转换成栅格文件, 构成该地层的顶面, 与下层地层岩性栅格数据组合, 建立该地层三维模型(图 2)。

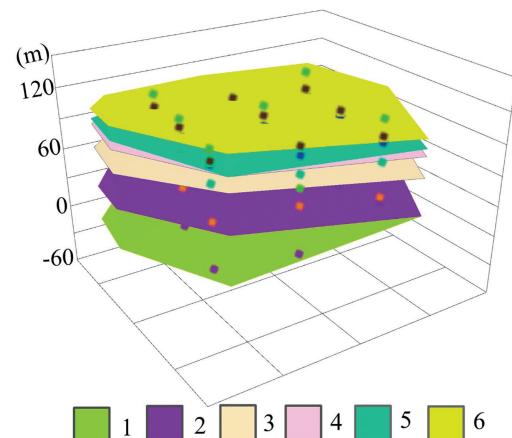
2.3.3 试验数据转换

根据勘探报告研究区划分 3 个矿层, 提取每个试验结果中的矿层点坐标三维矢量数据到 Excel, 导入 GIS 中建立每个矿层层顶、层底点矢量文件, 按矿区范围转换成栅格文件, 建成矿层三维模型(图 3)。

2.3.4 构建块段三维模型

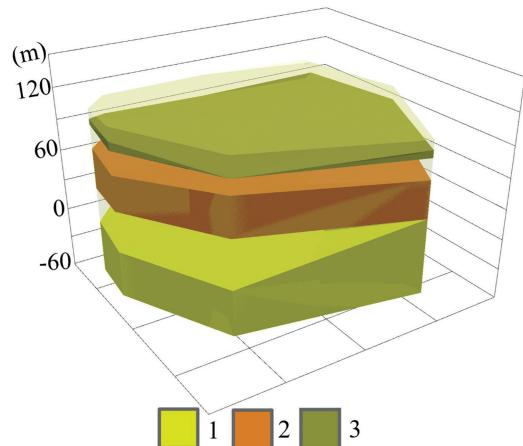
资源储量估算中将资源量分为探明资源量、控制资源量、推断资源量。在计算中运用勘查线, 将矿体划分成探明、控制、推断 3 种块段类型。

本次研究提取范围线节点、勘查线端点矢量数据至 Excel, 输入到 GIS 中, 转换成勘查线、研究区



1—亮晶灰岩地层顶; 2—泥质灰岩地层顶; 3—条带灰岩地层顶;
4—泥云岩地层顶; 5—薄层灰岩地层顶; 6—第四纪地层顶。

图 2 研究区地层三维建模



1—矿层 1; 2—矿层 2; 3—矿层 3。

图 3 研究区矿层三维建模

范围的线矢量文件、面矢量文件, 分别与地层、矿体栅格数据进行 3D 分析, 构建研究区三维剖面体(图 4)。

勘查线与研究区矿层叠加分析, 构建多种类型块段三维模型(图 5), 实现地质勘探中的块段自动化划分。

2.3.5 资源储量模型构建

以矿层 3 资源量模型构建为例: 依据试验数据得出矿层 3 层顶、层底点坐标 X, Y, Z, 生成矿层 3 层顶、层底栅格数据, 与勘查线、研究区边界线组合的面矢量数据叠加, 运用 GIS 中的 3D 分析功能, 自动构建矿层 3 块段三维模型并计算各块段资源量(图 6), 完成矿层 3 资源量估算模型构建(图 7), 实现从地质原始数据输入到自动化输出矿体块段三维模型及资源量参数。

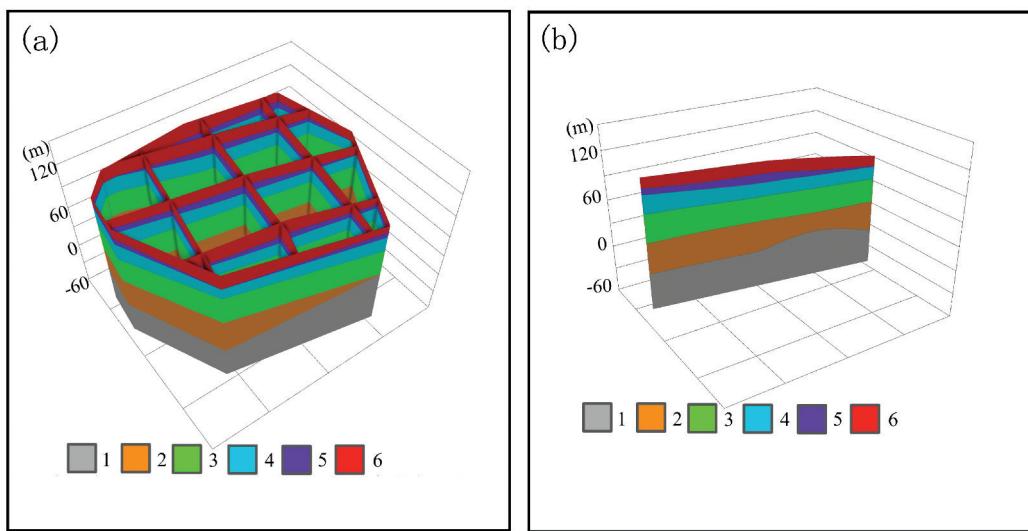


图 4 构建矿区剖面体示意图

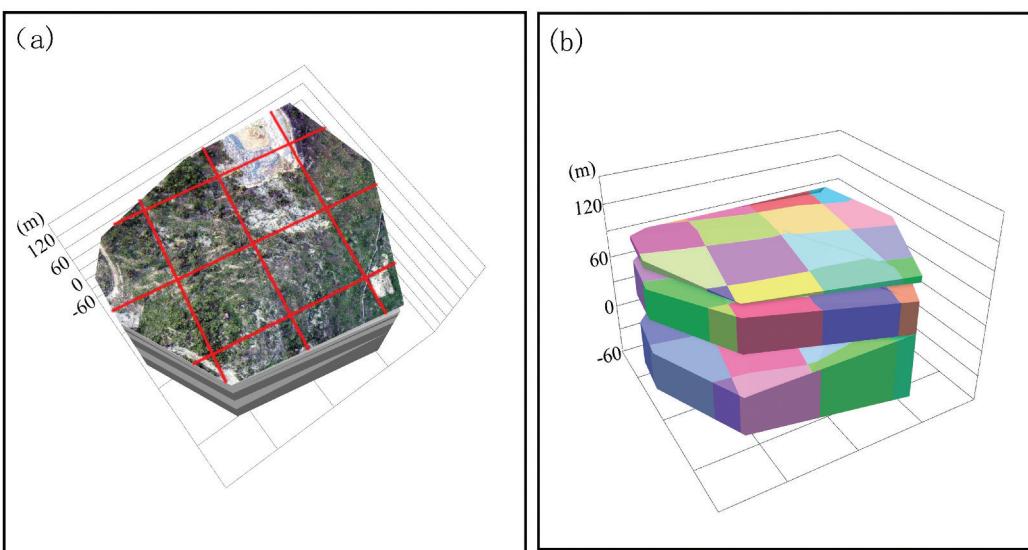


图 5 构建多种块段三维模型示意图

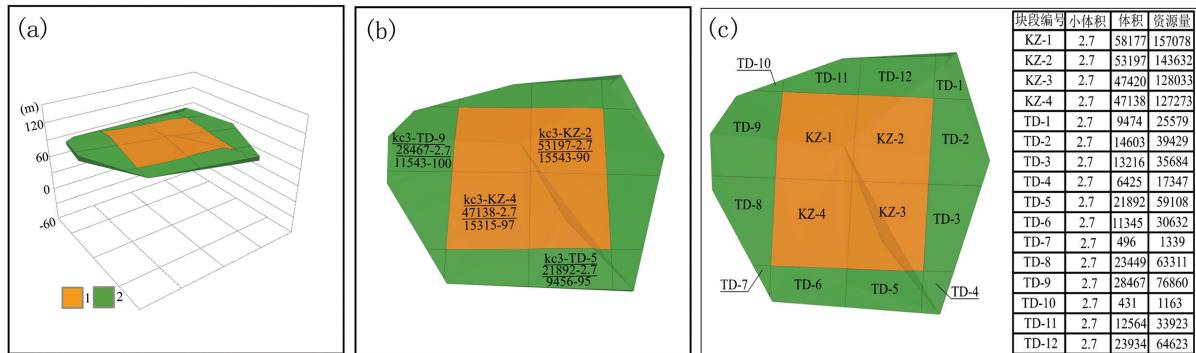
3 结论

(1) 本研究利用山东省某历史遗留矿山无人机航测地形图与地质勘探资料多源数据耦合, 在 GIS 平台上, 通过多层 TIN 表面模型构建矿山地形、地层界面及矿层空间分布模型, 利用三维渲染技术进行地层岩性、矿层厚度的颜色分级与透明化展示, 实现多视角剖切分析与复杂地形特征高保真表达。

(2) 通过 GIS 模型构建器实现矿层建模、块段

划分、资源量估算、报表生成的全流程自动化输出。辅助自然资源部门利用收集到的地形、地质资料快速估算历史遗留露天矿山剩余资源量, 进一步查清废弃矿山可利用矿产资源情况, 统筹规划区域性废弃矿山矿产资源开发与生态修复治理, 推动历史遗留露天矿山生态文明建设。

(3) 以废弃石灰岩矿山为研究对象, 运用现有地质、测绘数据, 快速查清历史遗留矿山剩余矿产资源量, 宏观指导区域性生态文明建设及矿产资源经济开发。在科学合理开发利用废弃矿山矿产资源的同



a—自动化构建的矿层3块段模型,1—矿层3控制资源量KZ块段,2—矿层3推断资源量TD块段;b—矿层3各块段自动输出的资源量参数,KC3-TD-5为矿层3推断资源量块段5,27162-2体积(m^3),小体重(t/m^3),9456-95矿体表面积(m^2),矿体最大标高(m);c—矿层3各块段编号及资源量计算结果,小体积单位(t/m^3),体积单位(m^3),资源量单位(t)。

图6 块段模型构建器示意图

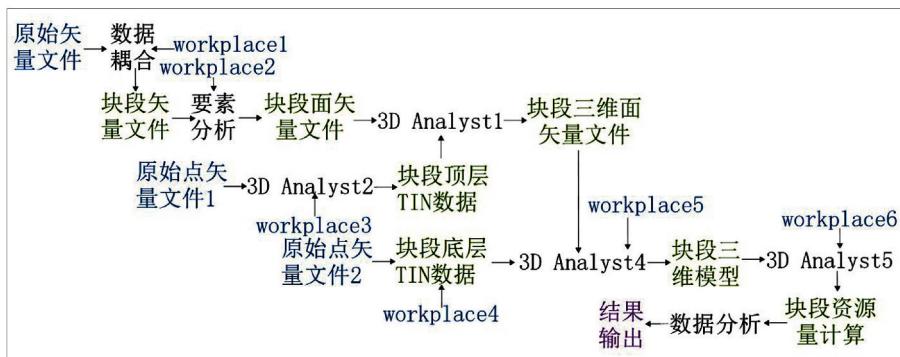


图7 矿层3块段资源储量计算示意图

时,开展矿山的生态修复治理。为废弃矿山带来新的经济发展动力,推动区域性生态建设快速发展。

(4)本次研究仅对废弃石灰岩建筑石料用矿山开展剩余矿石资源量智能化估算,类型较单一,希望有更多学者参与废弃矿山三维建模应用研究,推动三维建模在地质、矿产领域得到更广泛的应用。

参考文献:

- 王根锁,刘宏磊,武强,等.碳中和背景下废弃矿山环境正效应资源化开发利用[J].煤炭科学技术,2022,50(6):321-328.
- 吕前辉,余沛,于磊刚,等.资源整合背景下露天采选地采矿山地质环境治理方法探讨[J].中国矿业,2024,33(7):108-117.
- 贾斌,宋少秋.废弃矿山生态修复治理技术应用:以北京房山区废弃矿山为例[J].矿产勘查,2019,10(11):2831-2834.
- 王少辉,周小雨,刘润胜.无人机航测技术在河南驻马店市废弃矿山生态修复勘查设计中的应用[J].矿产勘查,2020,11(10):2309-2316.
- 李丽,杨金中,陈栋,等.长江经济带江苏段废弃露天矿山分布与生态修复遥感调查研究[J].水文地质工程地质,2022,49(5):80-88.
- (1):183-190.
- [6] 朱利民,庞成宝,贾继成,等.枣庄市破损山体生态修复方式建议浅析[J].山东国土资源,2021,37(7):65-59.
- [7] 刘听哿,安国强,谭绪泉,等.市县级国土空间规划数据库建设存在的问题及相关建议:以山东省为例[J].山东国土资源,2025,41(2):58-63.
- [8] 李超,阎长虹,郭书兰,等.江苏省废弃矿山旅游资源开发利用探析[J].地质论评,2021,67(4):1147-1156.
- [9] 张启慧,王程松,卫石印,等.基于ArcGIS的三维航测成果在露天采坑生态修复与矿山生产中的应用研究[J].山东国土资源,2022,38(10):41-47.
- [10] 姜庆丰,刘德成,曹琛,等.废弃矿山生态环境修复中无人机倾斜摄影技术应用研究[J].化工矿产地质,2024,46(2):242-248.
- [11] 黄宣东.无人机倾斜摄影技术在矿山生态修复的应用[J].现代矿业,2021,37(4):219-222.
- [12] 孙丽红,朱大明,李勇发,等.基于倾斜摄影测量的矿山生态修复规划应用[J].城市勘测,2021(2):87-91.
- [13] 杜子纯,刘镇,明伟华,等.城市级三维地质建模的统一地层序列方法[J].岩土力学,2019,40(1):259-266.
- [14] 岳亚芳,李青元,牛业鹏.基于倾斜摄影地表模型的三维地质

- 填图软件关键技术与应用前景[J].地质学刊,2020,44(4):370-377.
- [15] 张宝一,尚建嘎,吴鸿敏,等.三维地质建模及可视化技术在固体矿产储量估算中的应用[J].地质与勘探,2007,43(2):196-198.
- [16] 刘少华,肖克炎,王新海.地质三维属性建模及其可视化[J].地质通报,2010,29(10):1554-1557.
- [17] 张传玖,李鑫,任建慧,等.神东矿区构建综采工作面三维透视采场技术研究[J].中国矿业,2024,33(8):92-99.
- [18] 宋涛涛,曹瑞,赵闯,等.基于高精度实景三维的矿山智慧监管应用探索[J].山东国土资源,2025,41(2):44-50.
- [19] 刘帅辉,刘超,杨永均,等.基于实景三维的废弃矿山生态修复动态监管方法与实践[J].测绘通报,2025(2):18-22.
- [20] 段伟,郑国龙,李卿,等.三维建模软件在露天矿山生态修复中的应用[J].云南地质,2023,42(3):385-390.
- [21] 唐书君,陈金贤,罗银飞,等.矿山地质勘探场地生态环境恢复的三维建模研究[J].环境科学与管理,2019,12(44):161-165.
- [22] 黄超,郎兴海,娄渝明,等.西藏雄村I号矿体三维地质建模与深部可视化应用[J].地质通报,2021,40(5):753-763.
- [23] 邹文星,周琦,杨成富,等.黔西南者相金矿床三维地质可视化建模及应用[J].地球科学,2023,48(11):4017-4033.
- [24] 包妮沙,叶宝莹,白中科,等.ArcGIS在矿区土地复垦中的应用[J].山西农业大学学报(自然科学版),2009,29(6):501-504.

Application of Three-dimensional Modeling of Mines Left over from History

—Taking Abandoned Open-pit Mines in Jiehe Town in Tengzhou City in Shandong Province as an Example

ZHANG Yue¹, YANG Bo¹, LIU Xiaosong¹, CHEN Xiaobo², YANG Jie³

(1. No.1 Exploration Brigade of Shandong Bureau of Coal Geology, Shandong Qingdao 266400, China; 2. No.4 Exploration Brigade of Shandong Bureau of Coal Geology, Shandong Weifang 261200, China; 3. No.3 Exploration Brigade of Shandong Bureau of Coal Geology, Shandong Taian 271000, China)

Abstract: As an important potential occurrence area of mineral resources, it is urgent to carry out systematic mineral resources potential evaluation and three-dimensional space modeling research. Based on geographic information system (GIS) technology platform, a high-precision three-dimensional geological model of abandoned open-pit mines has been constructed, a spatial database by integrating multi-source geological data has been established, and three-dimensional visualization of ore bodies has been realized by using digital elevation model (DEM) and geological voxel segmentation technology. The improved Kriging interpolation algorithm is used to estimate the residual ore body in space, and the remaining resources are calculated intelligently with 3D analysis method. The research results can provide a dynamic monitoring technology scheme of remaining mineral resources in the mining area for the Department of Natural Resources. A three-dimensional integrated decision support system of resource reserves-spatial distribution-ecological restoration has been constructed. It can effectively solve the problem of distortion of ore body spatial form and statistical deviation of resource quantity by using traditional two-dimensional estimation method. The application of this technology has realized the coordinated planning of economic development of mineral resources and ecological protection projects. It can provide a scientific basis for promoting the precise implementation of ecological restoration projects in mining areas, promote the construction of green mines, and expand the application scenarios of three-dimensional geological modeling technology in the field of mineral resources exploration and evaluation.

Key words: Abandoned open-pit mine; mineral resources quantity; 3D model; Jiehe town in Tengzhou city