

地下采矿诱发地表塌陷的数值模拟与预测研究

——以普朗铜矿为例

王会云¹, 孙熙宁^{1*}, 王旭¹, 李同²

¹中国有色金属工业昆明勘察设计研究院有限公司迪庆分公司, 云南 香格里拉

²中南大学地球科学与信息物理学院, 湖南 长沙

收稿日期: 2026年3月29日; 录用日期: 2026年4月30日; 发布日期: 2026年5月28日

摘要

采矿活动引起的地表沉降与塌陷是矿产资源开发过程中面临的重要地质灾害之一, 严重威胁矿区生态环境及人员生命财产安全。地表塌陷不仅会破坏地层结构, 还会造成地表建筑物、构筑物及工程设施的损伤, 具有显著的工程与环境效应。本研究以云南普朗铜矿自然崩落法开采过程中产生的地表沉降现象为研究对象, 采用三维数值模拟方法系统分析采矿活动对地表变形的作用机制, 重点探讨首采区开采完成后南部矿区持续开采条件下地表塌陷的演化过程。模拟结果表明, 南部矿区采矿活动导致其上覆地表逐渐发生塌陷, 且塌陷范围随开采推进不断扩大。通过将数值模拟得到的地表位移及塌陷范围与实测数据进行对比, 验证了所建立数值模型及模拟方法的可行性。在此基础上, 进一步预测了后续采矿可能引起的地表塌陷范围, 可为矿区安全生产与生态环境保护提供科学依据。

关键词

采矿塌陷, 数值模拟, 塌陷预测

A Study on Numerical Simulation and Prediction of Surface Subsidence Induced by Underground Mining

—A Case Study of the Pulang Copper Mine

Huiyun Wang¹, Xining Sun^{1*}, Xu Wang¹, Tong Li²

¹Diqing Branch, China Nonferrous Metal Industry Kunming Exploration and Design Research Institute Co., Ltd., Shangri-la Yunnan

²School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha Hunan

*通讯作者。

文章引用: 王会云, 孙熙宁, 王旭, 李同. 地下采矿诱发地表塌陷的数值模拟与预测研究[J]. 矿山工程, 2026, 14(3): 797-811. DOI: 10.12677/me.2026.143078

Abstract

Surface subsidence and collapse induced by mining activities are among the major geological hazards encountered during mineral resource exploitation, posing serious threats to the ecological environment of mining areas as well as to human life and property safety. Surface collapse not only damages the geological structure but also causes significant deterioration to surface buildings, structures, and engineering facilities, exhibiting pronounced engineering and environmental impacts. In this study, the surface subsidence induced during the block caving mining process at the Pulang Copper Mine in Yunnan Province is taken as the research object. A three-dimensional numerical simulation method is employed to systematically investigate the mechanisms of surface deformation caused by mining activities, with a particular focus on the evolution of surface collapse under the condition of continued mining in the southern mining area after the completion of extraction in the initial mining zone. The simulation results indicate that mining activities in the southern mining area lead to progressive surface collapse above the mined-out region, and the extent of collapse continuously expands with the advancement of mining. By comparing the simulated surface displacement and collapse extent with field monitoring data, the reliability and applicability of the established numerical model and simulation approach are validated. On this basis, the potential extent of surface collapse induced by subsequent mining is further predicted, providing a scientific basis for safe production and ecological environmental protection in the mining area.

Keywords

Mining Subsidence, Numerical Simulation, Subsidence Prediction

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着资源需求增长, 矿山开采给人类带来巨大利益的同时也不可避免地带来一系列的安全与环境问题[1]-[3]。其中, 地下采矿引起的地表沉降与塌陷破坏地表基础设施, 影响生态系统, 是矿区常见且危害较大的地质灾害, 严重制约矿山的可持续发展。

采矿导致地表沉降的研究可追溯至 19 世纪中叶, 当时比利时工程师 Gonot 提出了垂直曲线理论, 这是最早用于定量描述采矿沉降范围的数学模型之一。此后, 众多学者不断推动地表变形理论的发展。Steve 等[4]对美国及其他地区地下硬岩金属矿山的案例进行了综述, 评估了由此产生的地表沉降、环境效应及水文影响, 并提出了相应的缓解策略。Luo 等[5]通过改进 Knothe 影响函数提高了沉降预测精度; Dai 等[6]采用积分概率法阐明了厚黄土层下地表沉降变形机理; Wang 等[7]基于 Knothe 时间函数建立了煤矿动态沉降模型; Yan 等[8]提出了一种用于倾斜沉降预测的对数正态模型; Zhang 等[9]进一步改进了 Knothe 时间函数, 用于预测随时间变化的地表沉降。此外, Nasiri 等[10]利用普通最小二乘模型对影响地表沉降的参数进行了空间分析。

由于物理模型存在成本高、耗时长, 以及模型尺度和参数条件受限等问题, 学者们开始在沉降区地表布设监测设备以研究地表沉降的影响。现场监测技术为研究地表变形与岩层运动提供了一种直接而有

效的手段[11]-[13]。通过监测获得的数据能够准确反映采矿区的地表位移情况,从而为采矿活动提供及时指导,并为工程设计提供依据。Guéguen 等[14]人利用永久散射体干涉测量和差分合成孔径雷达干涉测量对一个开采 15 年的采空区在 1992~2007 年期间的沉降进行了监测。Zhao 等[15]通过监测结果从不同角度揭示了地表变形的滞后响应机制。Xia 等[16]采用超深多点位移计研究深部岩体运动机制。Gong 等[17]在华北平原利用传统 GPS 与水准测量方法监测地表沉降。Wempen 等[18]使用 DInSAR 技术对地表沉降进行监测。Ma 等[19]研制了一种三维试验装置,用于模拟煤炭开采对岩层运动的影响。Peng 等[20]结合多时相 InSAR 与 ICA 方法研究地下水盆地的地表变形。Muhetaer 等[21]基于 PS-InSAR 技术分析了北京地面沉降的演化规律。

近年来,随着大容量、高速计算机的出现,数值分析方法被广泛应用于地下岩层运动及地表变形的模拟研究。得益于计算机技术的不断创新与发展,对复杂地质结构进行高精度建模和精细数值分析已成为可能,从而显著提高了采矿沉降预测的准确性与可靠性[22]-[24]。Helm 等[25]利用 FLAC^{3D} 参数化建模研究地下水位变化对废弃矿山的影响。Huang 等[26]通过离散元方法讨论了洛河矿区采矿与充填引起的地表沉降估算问题。Salmi 等[27]采用 DEM 研究 Nattai North 矿区采矿诱发边坡失稳的机理。Hamdi 等[28]利用有限元/离散元耦合方法研究结构面不连续性、延续性及间距对地表沉降的影响。Wu 等[29]通过数值方法分析地质参数对 CSG 采矿沉降的影响。Liu 等[30]利用 3DEC 数值软件模拟工作面沉降的发展过程。Chen 等[31]通过对比 SBAS-InSAR 与水准测量数据验证了采矿变形机理。Parmar 等[32]利用 FLAC^{3D} 软件模拟分层崩落法引起的地表沉降。Zhao 等[33]构建 FLAC^{3D} 三维模型,用于评估露天矿地下转采过程中竖井稳定性及地表变形。Cai 等[34]提出一种基于 InSAR-FLAC^{3D} 概率积分法的综合预测方法,用于预测薄煤层开采引起的地表变形。

总体而言,现有研究表明,采矿沉降研究正由传统的经验分析和单一观测方法,逐步向融合多源数据与高精度数值模拟的方向发展,为采矿诱发地表变形的定量评估与灾害防控提供了重要技术支撑。然而,在复杂地质条件及持续开采背景下,地表沉降的演化机制及其预测仍有待进一步深入研究。基于此,本文以云南普朗铜矿为研究对象,开展三维数值模拟分析,以期揭示采矿活动驱动下地表塌陷的演化规律。

2. 工程概况

普朗铜矿位于云南省西北部,迪庆藏族自治州香格里拉市东北部,地处青藏高原东南缘与滇西北横断山脉东北部的交界地带,毗邻三江并流世界自然遗产保护区,该矿区地处人迹罕至的原始山林之中,这里群峰耸峙,森林茂密,海拔落差显著,最高点 4702 米,而最低点 3450 米。矿区地质构造相对均匀,主要由硬岩构成的块状岩组成,局部发育断裂带。

普朗铜矿采用自然崩落法采矿。首先在矿体底部开挖形成初始切割槽,破坏矿体的原始应力平衡。随后通过系统布置的拉底工程不断扩大暴露面积,使矿体顶部逐渐产生张拉裂隙。随着拉底范围的扩展,裂隙网络不断发育并相互贯通,最终导致矿体在自重作用下发生大规模崩落。崩落的矿石通过底部布置的放矿系统运出,同时崩落范围持续向上扩展形成崩落带。自然崩落法在能够显著降低开采成本,提高生产效率的同时,也不可避免地会引发显著的地表沉降问题。其沉降机制主要是矿体崩落形成的采空区导致上覆岩层失去支撑,在重力作用下发生弯曲变形,这种变形自下而上传递至地表,形成沉降盆地。其塌陷示意图如图 1 所示。

普朗铜矿开采以来,随着首采区采矿活动的进行,矿区的地表逐渐地陷落。普朗铜矿已在地表形成直径约 400 米的主塌陷区,塌陷区位于首采区的正上方,塌陷区位置卫星图如图 2 所示。

地下采矿区域及采矿引起的地表塌陷范围如图 3 所示,蓝色区域为首采矿区,红色边界线代表由采矿活动引起的地表塌陷的边界。黄色区域则为位于首采区以南的南部采矿区。

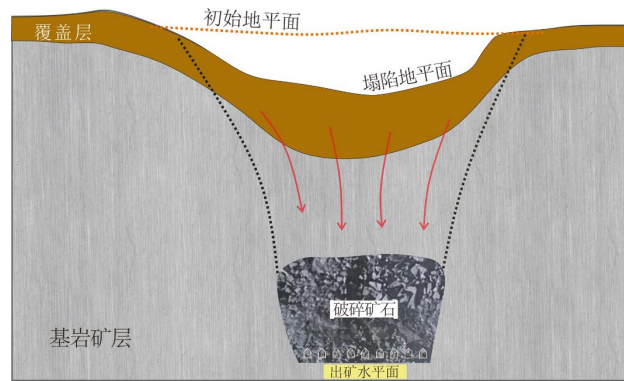


Figure 1. Schematic of collapse in block caving mining
图 1. 自然崩落法塌陷示意图



Figure 2. Location of the collapse area on a satellite image
图 2. 塌陷区位置卫星图

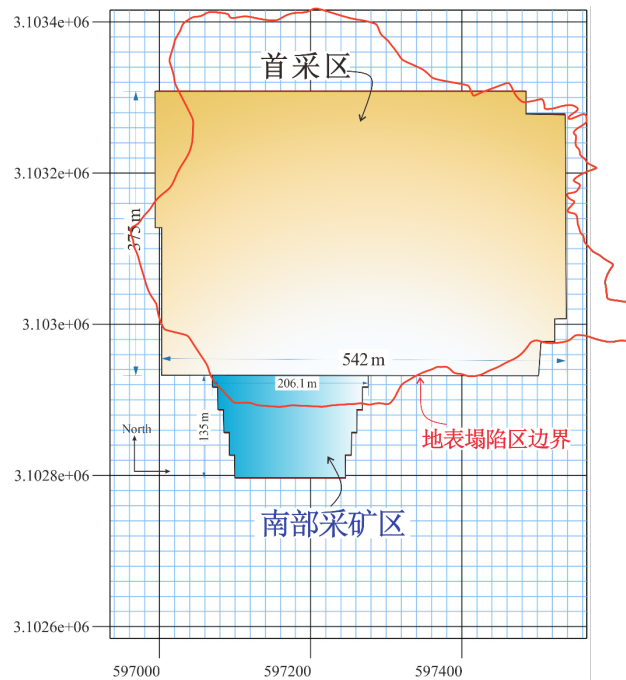


Figure 3. Mining extent and initial collapse extent
图 3. 采矿范围及初始塌陷范围

3. 数值模拟研究

3.1. 三维模型建立

基于地表沉降区的等高线数据,借助 Rhino 7.0、Griddle 2.0 构建了包含地形特征的三维模型。模型采用全六面体网格,网格大小为 4 米,总计 370.5 万个网格单元和 286.2 万个节点,模型的三维网格如图 4 所示。

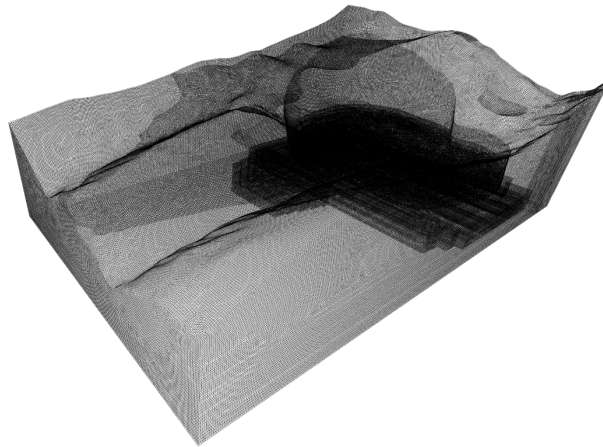


Figure 4. Three-dimensional model mesh
图 4. 三维模型网格

如图 5 所示,塌陷区的数值模型被简化为三部分组成:覆盖层、塌陷层和完整基岩。坐标系规定 X 轴正方向为东、Y 轴正方向为北。模型整体尺寸为 821 m(东西向)×1420 m(南北向),模型底部高程设为 3691 m。如图 5 所示,绿色部分表示沉降区,其平均厚度约 60 m,最大厚度可达 180 m。黄色部分表示上覆层,平均厚度约 16 m,局部最厚可达 80 m。随着塌陷不断发展,塌陷持续向下移动,大量冰碛物逐渐充填进入空隙。由于充填冰碛物的实际厚度尚不确定,模型中假定 3820 m 的高程作为边界,用以区分上覆冰碛物与下伏基岩。塌陷区下方的白色部分表示首采区矿体,而其南侧的棕色部分表示南部采区矿体。

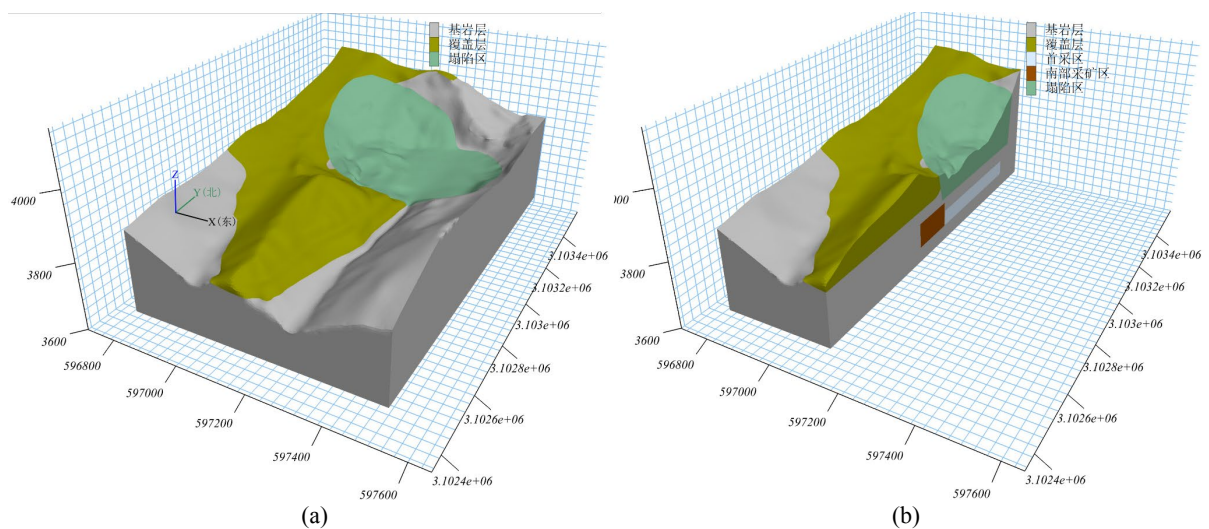


Figure 5. Three-dimensional geological model
图 5. 三维地质模型

3.2. 模型参数选择

矿区的岩石主要包括石英二长斑岩、闪长玢石和大理岩，其中矿石主要赋存于石英二长斑岩中，该岩石类型也是塌陷区的主要岩石种类。鉴于三类岩石在物理力学参数上的差异较小，为简化模型，本文以石英二长斑岩的参数代表整体岩层。数值计算采用 Mohr-Coulomb 弹塑性本构模型。该模型在岩土工程与地质力学领域被广泛应用，可有效描述土体与岩石类材料的强度特征及塑性行为：材料在弹性阶段遵循线弹性应力 - 应变关系；一旦应力状态满足屈服条件，即进入不可逆塑性变形阶段。其屈服面由 Mohr-Coulomb 准则定义，表达式见式(1)。

$$F = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \sin \varphi - c \cos \varphi \quad (1)$$

其中， σ_1 和 σ_3 为最大和最小主应力， c 为内聚力， φ 为内摩擦角。

受节理裂隙等结构面及多种复杂环境因素影响，实验室测得的岩石力学参数往往不能直接代表原位岩体的真实特性，因此需对参数进行折减。Hoek-Brown 强度准则是一种在岩土工程与采矿工程中被广泛运用的经验性岩体强度模型，尤其适用于预测节理或各向异性岩体的强度[35][36]。该准则由 E. Hoek 与 E. T. Brown 于 1980 年提出，基于地质强度指标(GSI)及岩石单轴抗压强度等参数，用以评估岩体的非线性强度特征，并据此折减实验室测得的岩石参数。其基本形式见式(2)。

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (2)$$

其中， σ_1 和 σ_3 为测得最大和最小主应力， σ_{ci} 为完整岩石的单轴抗压强度， m_b 、 s 、 a 为岩体参数，与地质强度指标和扰动因子相关。经过折减后的参数如表 1。

Table 1. Geotechnical mechanical parameters

表 1. 岩土力学参数

	岩石	覆盖层	塌陷层
$\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	2760	2100	2100
$E/(\text{GPa})$	4.5	0.46	0.40
ν	0.25	0.11	0.1
$c/(\text{MPa})$	0.88	0.056	0.051
$\sigma/(\text{MPa})$	1.06	0.126	0.110
$\varphi/(\text{°})$	27.8	34.9	32.1

3.3. 边界条件与模拟方法

数值模拟中，模型上部设为自由面，在模型侧面施加法向的位移约束，并在模型底部施加全方向的位移约束。模拟计算时仅考虑自重应力的影响。鉴于首采区已经基本完成开采并且地表仍在持续下陷，为更贴合实际工程状况，在已采首矿区顶板施加恒定下沉速度以模拟塌陷的过程。但由于塌陷坑的改造及其他工程活动的进行，塌陷坑的沉降速度无法准确获得。数值模拟中，结合模拟得到的南部采矿区的沉降情况，经多次调试，确定在首矿区顶板施加 Z 方向 5×10^{-3} 米/步的下沉速度。

在完成边界条件设置的基础上，对南部矿区开展开挖数值模拟，模型位移变化及其演化规律进行分析。同时在模型内部设置一条位移监测线，该监测线位于南部矿区上方，旨在记录开挖过程中南部矿区内覆岩体的位移演化特征，具体位置如图 6 所示，监测线上均匀设置 21 监测点。监测点 1 的空间坐标为

(597,186, 3.10293 × 106, 3874.91); 相邻监测点之间沿 Y 方向相差 10 m, 监测点 21 的空间坐标为(597,186, 3.10273 × 106, 3874.91)。

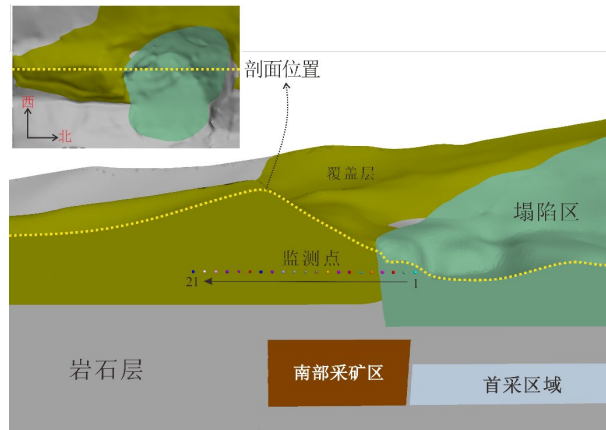


Figure 6. Locations of monitoring points
图 6. 监测点位置

3.4. 模拟结果分析

对初始状态下的模型开挖南部采矿区模拟采矿的过程, 在自重应力的作用下模拟 4000 步。如图 7 所示, 展示了模型在 1000 步、2000 步、3000 步和 4000 步四个阶段模型剖面的竖向位移云图。

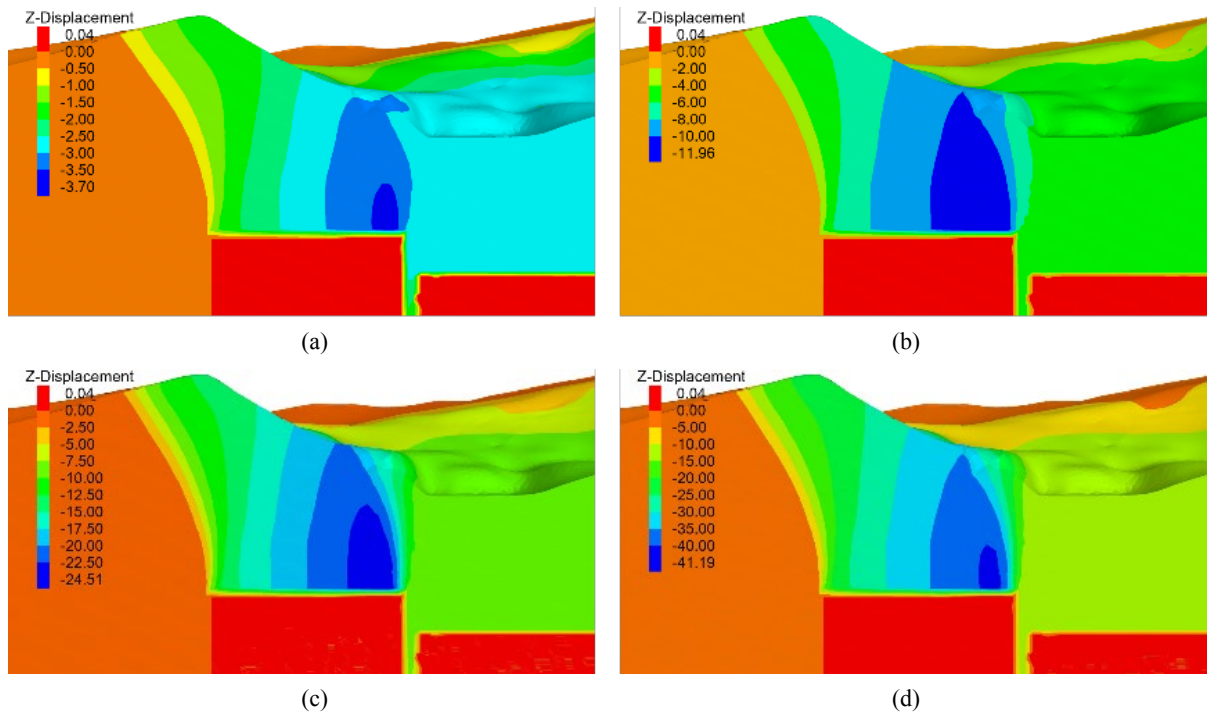


Figure 7. Z-direction displacement contours of the model section: (a) 1000 steps; (b) 2000 steps; (c) 3000 steps; (d) 4000 steps
图 7. 模型的剖面的 Z 向位移云图: (a) 1000 步; (b) 2000 步; (c) 3000 步; (d) 4000 步

从图 7 所示的结果表明, 由于南部采矿区的北侧为首采区, 靠近这一侧围岩的侧向约束很弱, 其上覆的岩体更易下沉, 其竖向的位移量明显地大于南侧。随着计算的进行, 位移不断地累计使两侧的位移

差距越来越明显。比较各阶段竖向位移云图可见, 尽管位移幅值随时间显著变化, 发生位移的空间范围基本一致, 说明在 1000 步以前地表塌陷边界已趋于稳定, 后续变化主要体现为塌陷区位移量的增大。至模型运行 4000 步后, 部分采空区顶板的最大竖向位移超过了 41 m, 地表的最大竖向位移也达到了 39 m。

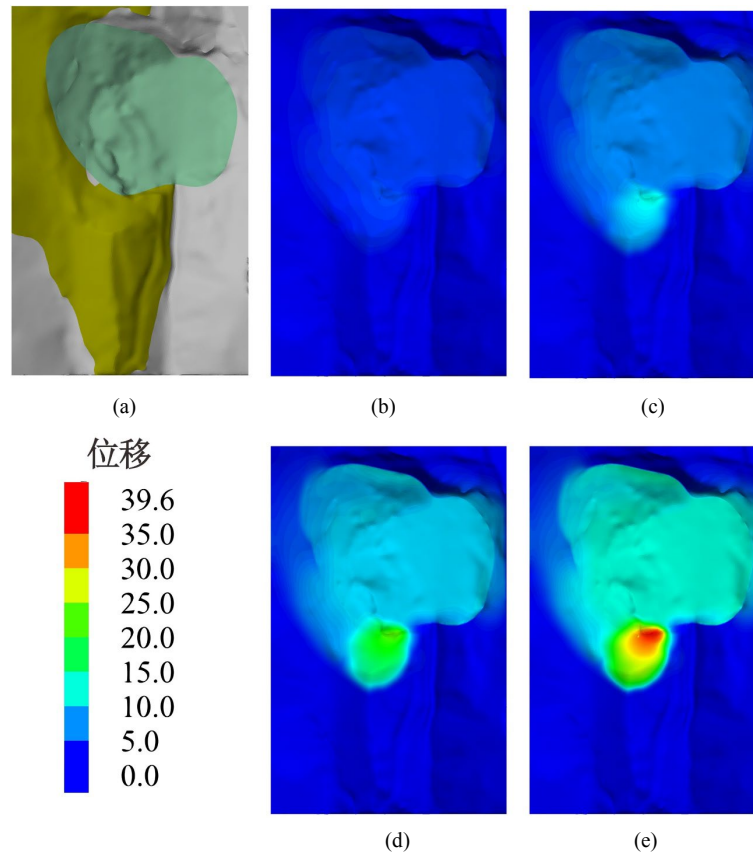


Figure 8. Surface displacement contours: (a) numerical model; (b) 1000 steps; (c) 2000 steps; (d) 3000 steps; (e) 4000 steps

图 8. 地表位移云图: (a) 数值模型; (b) 1000 步; (c) 2000 步; (d) 3000 步; (e) 4000 步

结合图 3 中地下采矿范围观察图 8 所示的地表位移云图发现, 计算到 1000 步时, 尽管采空区顶板已经一定量的位移, 但此时的位移向上传递到地表, 造成地表的沉降还不太明显。这表明地下采矿引起的地表沉降存在滞后效应。模型设置中, 在首采区顶部施加恒定速度, 以模拟现有塌陷区的继续塌陷。根据 1000 步的模拟结果看, 南部采矿区顶部的位移小于首采区的位移, 表明前 1000 步期间, 南部矿区的沉降速率低于设置的首采区塌陷速率。然而, 到了 2000 步及之后的模拟结果, 南部采矿区顶部的位移超过了首采区的位移, 并且两者之间的差距逐渐加大。从地表位移云图的形态来看, 南部采矿造成的地表沉降呈现近似圆形, 且靠近北部的区域沉降量较大。

图 9 展示了模拟中设置的监测点在 Z 方向的位移情况, 监测点位移范围从 0 到 37 m 不等。除了 18、19、20 和 21 号监测点未明显受到采矿作用的影响外, 其他的监测点的竖向位移均随着计算的进行呈现非线性的增长, 且沉降的速度逐渐加快。与位移云图的结果一致, 位于采空区的北部 3~10 监测点的位移量最大, 沉降速度也最快。观察 4~17 监测点的位移变化, 虽然所有相邻监测点仅在 Y 方向上相差 10 m, 但不同相邻监测点最终得到的位移量差异很大, 且呈现出南侧监测点位移差距更大、沉降竖向位移梯度更明显的趋势。

图 10 展示了监测点所在监测直线在各阶段的 Z 位移模拟结果。模型运行 1000 步时, 位移较小, 且

不同部位沉降值差异不大。到模型计算到 2000 步，监测点的位移变得更加明显，在不同的监测位置出现不同的变化情况。50 m 到 70 m 处于塌陷的边界部位，这段监测线上的沉降速度很快，而在 70 m 到 170 m 之间，监测线的位移变化变得平缓。到达 170 m 时，沉降的位移最大，竖向位移达到了 10 m。到模型计算

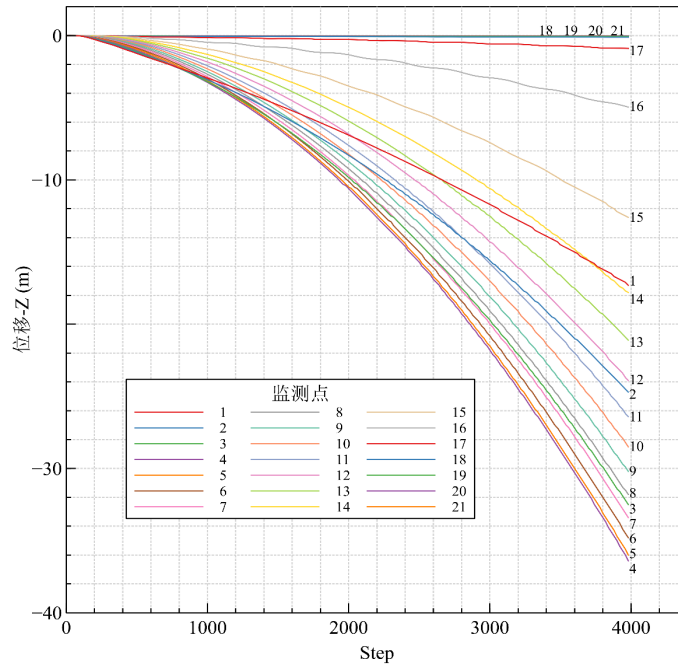


Figure 9. Z-displacement of monitoring points in the numerical simulation
图 9. 数值模拟中监测点 Z 位移

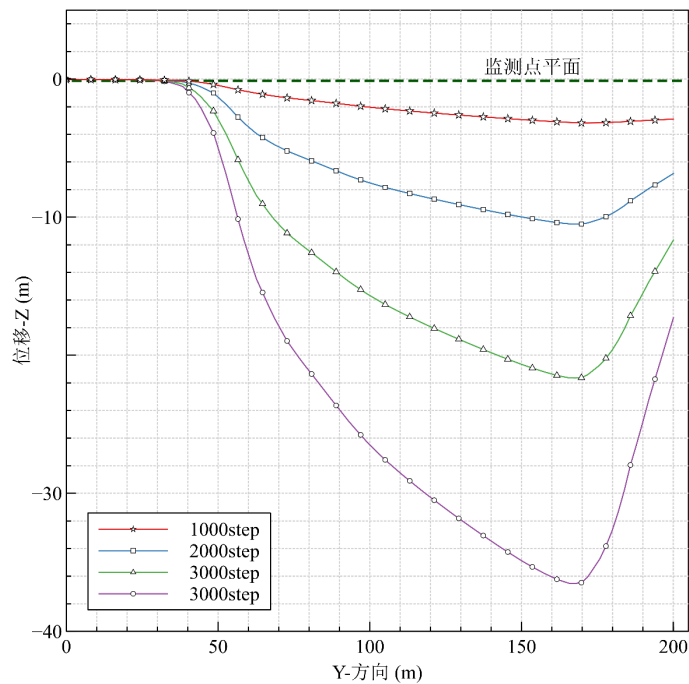


Figure 10. Z-displacement along the line of monitoring points at different simulation stages
图 10. 监测点所在直线模拟各阶段的 Z 位移

到 3000 步、4000 步时沉降进一步增加，监测线的位移变化梯度进一步增加。2000 步时，50~70 m 的南侧塌陷边界处的位移梯度很大，3000 步、4000 步时仍然存在这一阶段，而且该阶段的长度变得越来越大。

对研究区的地表塌陷情况进行现场调查，得到近期的塌陷边界情况，如图 11 所示。图(a)中的蓝色边界为塌陷边界在无人机俯视图中的情况，图(b)为塌陷边界在由等高线图构建的数值模型中的情况。

将 4000 步的数值模拟结果与图 11(b)中的实际塌陷边界范围对比，如图 12 所示。从模拟结果图可以看出，模拟的塌陷区域与实际塌陷区域表现出良好的一致，尤其是南部塌陷区域的边界，模拟结果与实际塌陷边界十分吻合，验证了数值模拟方法的可行性。然而，由于数值模拟中通过给首采区的底部施加恒定的下

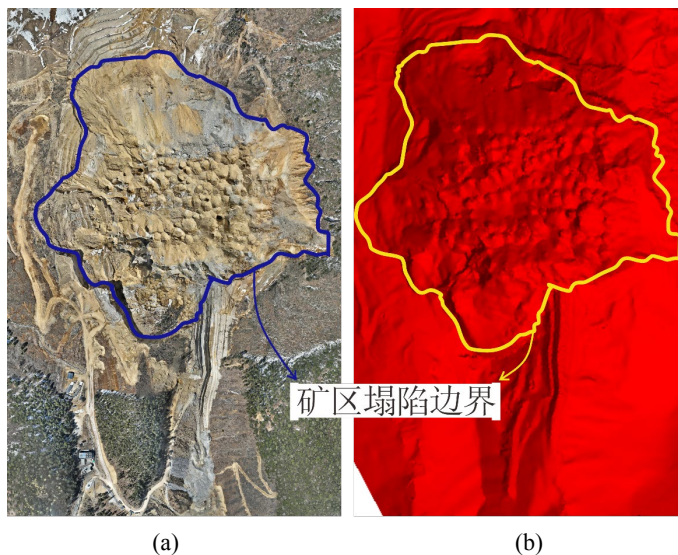


Figure 11. Surface collapse boundary in 2025: (a) aerial view; (b) numerical model

图 11. 2025 年地表塌陷边界：(a) 航拍俯视图；(b) 数值模型图

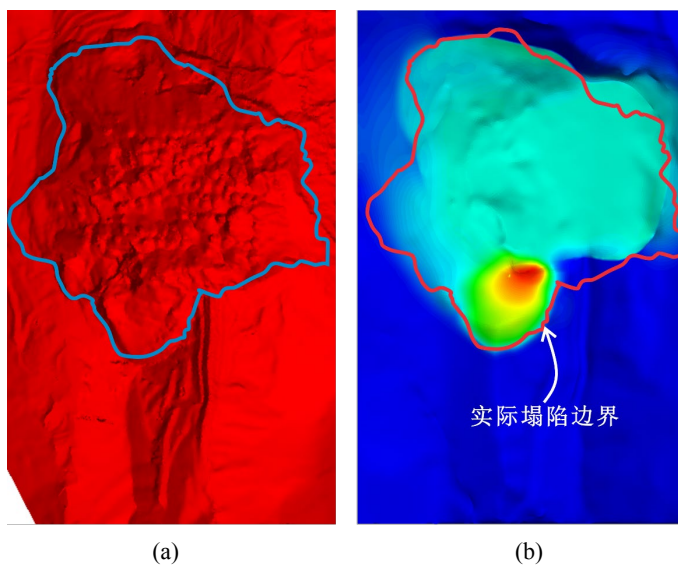


Figure 12. Comparison between simulated and observed collapse results: (a) observed collapse; (b) numerical simulation

图 12. 模拟与实际塌陷结果对比：(a) 实际塌陷结果；(b) 数值模拟结果

降速度从而简化了首采区的塌陷过程,导致模拟的结果与实际的塌陷结果仍存在一定差异。例如模拟中中东北区域表现出明显的塌陷位移,但实际这部分区域位于塌陷范围之外,这可能是由于实际的采矿和放矿过程中,这部分区域放矿数量较少造成的。另外,数值模拟的结果显示南部矿区塌陷东部未表现出明显的位移,但实际这部分位于塌陷边界之内。总的来说,虽然地下的采矿区域设计在一定的范围内,但实际地下的采矿和出矿过程相当的复杂,各个地区的出矿进程并不均匀,导致模拟的结果与实际的塌陷结果存在一定差异。但通过对模拟结果与实际塌陷结果进行对比分析,模拟的结果仍然具有很强的参考性。

3.5. 沉降预测

对地下采矿引起的地表塌陷进行有效的预测对矿区的工程建设和生命财产安全具有重要的意义。前面的结果已经表明,数值模拟方法得到塌陷的边界与实际的塌陷边界表现出良好的一致性。在本章节中,对地下新的采矿活动进行数值模拟,预测新的采矿活动引起的地表塌陷范围的变化。具体的模拟过程中,依据新的采矿需要,在南部矿区南部设计新的采矿区域,范围如图 13 所示,红色区域即为设计的新矿区。

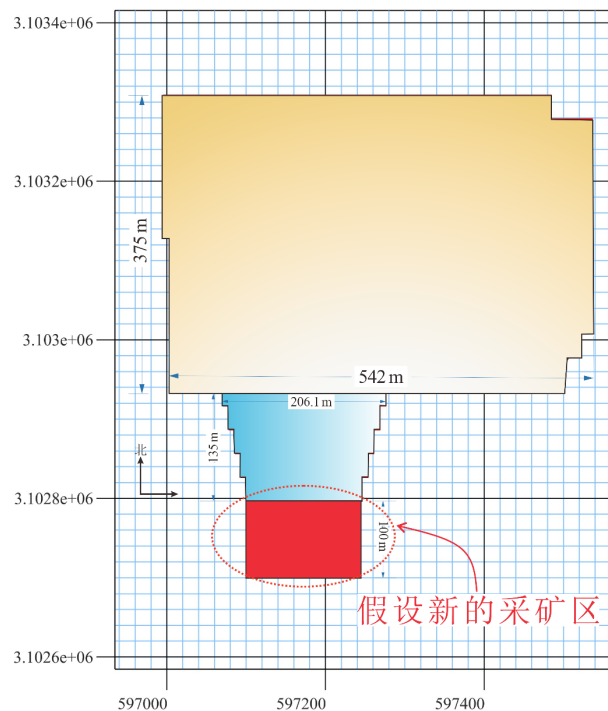


Figure 13. Extent of the new mining area

图 13. 新采矿区域范围

对新的采矿情况进行地下采矿的数值模拟,模拟得到的地表位移见图 14 所示。数值模拟的结果与图 8 南部采矿的结果类似,随着数值模拟的进行,采矿区上部呈现出的塌陷的位移越来越大,塌陷区的范围逐渐向南部延伸。不同位置的塌陷位移呈现明显的梯度变化,到模型计算到 4000 步时,塌陷的核心区的位移达到了 40 m。

依据图 14 数值模拟的结果得到的塌陷区的边界,结合实际的塌陷给出预测的塌陷边界,将边界结果映射到塌陷区的图上,如图 15 所示。此时的边界继续向南延伸,最南端的 Y 坐标来到了 3.10267e6,此时塌陷已经波及到南侧的排水沟工程的大部分区域,很可能造成排水沟工程的失效,应该引起重视。另外塌陷的扩展导致地表地形变化,很可能造成滑坡、泥石流等地质灾害的发生。

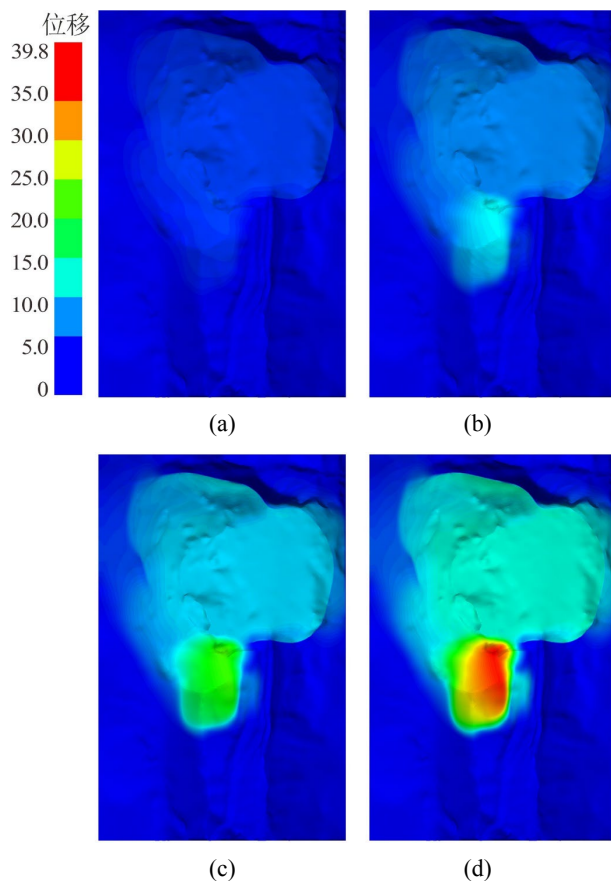


Figure 14. Surface displacement contours of the new mining area: (a) 1000 steps; (b) 2000 steps; (c) 3000 steps; (d) 4000 steps

图 14. 新采矿地表位移云图; (a) 1000 步; (b) 2000 步; (c) 3000 步; (d) 4000 步

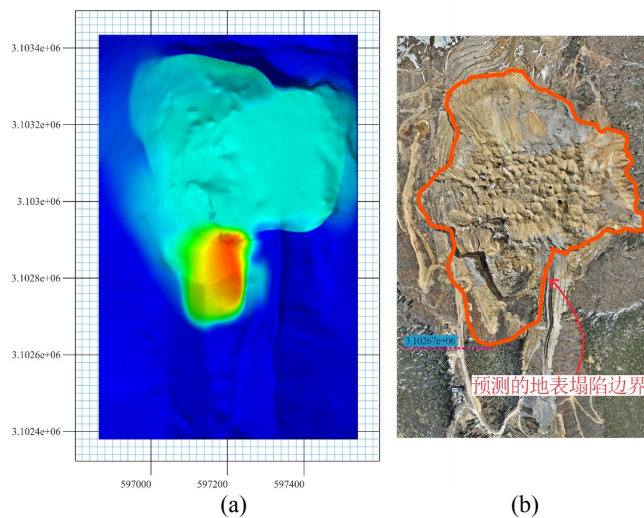


Figure 15. Predicted collapse extent induced by mining activities: (a) displacement contours at 4000 steps; (b) collapse boundary

图 15. 预测采矿活动引起的塌陷范围; (a) 4000 步位移云图; (b) 塌陷边界位置

4. 讨论

本研究通过三维数值模拟方法,研究了云南普朗铜矿自然崩落开采引起的地表沉降演化过程。模拟结果表明,地下开采引起的采空区上盘岩体变形与位移,会使岩体变形逐渐向上传递,从而导致地表逐渐发生沉降。多次数值模拟结果显示,在一定的模拟步数之后,塌陷区内的竖向位移持续增大,而沉降区边界则逐渐趋于稳定。最终模拟得到的塌陷边界与实际沉降区边界较为吻合,验证了所建数值模型及模拟方法的可行性。

然而,本研究仍存在一定的局限性。尽管地下矿山在设计阶段规划了具体的采区,但不同位置的实际开采过程并不完全一致,实际采矿条件与数值模型设计存在一定差异,这可能是导致模型预测结果与部分区域实测边界存在差别的原因之一。此外,本研究仅模拟了采矿引起的沉降过程。在实际沉降区中,还存在诸如塌陷区治理和地质灾害防治等工程建设活动,这些因素同样可能对地表沉降的形成与发展产生影响。因此,上述因素共同引入了模型参数及边界条件的不确定性,使得本文预测结果具有一定的不确定性特征,应理解为在既定假设条件下的一种可能响应情景,而非唯一确定结果。未来研究中,将结合敏感性分析结果,引入不确定性分析方法,对塌陷影响范围进行概率分区评价,以提高预测结果的工程适用性。

综上所述,本文利用 FLAC^{3D} 构建的三维地质模型为普朗铜矿南部采区地表沉降预测提供了理论依据,并为类似地质条件下的地下开采工程提供了一套可复现的数值模拟及参数设置流程。未来研究可结合实时监测数据,探索多源数据融合方法,以进一步提高沉降预测的精度和响应效率。

5. 结论

本文结合普朗铜矿工程条件,采用数值模拟方法对自然崩落法采矿所引起的地表沉降现象进行了系统深入的分析研究,并在此基础上对后续采矿活动可能引起的地表塌陷进行了预测,为矿区生产活动及灾害防治提供了重要的科学依据。

数值模拟结果表明,紧邻首采区的区域由于围岩侧向支撑较弱,首先发生明显沉降。此外,地下矿体崩落所引起的位移逐步向上传递,导致地表沉降呈现显著的滞后效应。随着采矿活动的持续推进,沉降范围不断扩大,部分区域沉降速度显著加快。整体而言,数值模拟的结果与实际的地表沉降情况吻合较好,尤其在南部矿区,模拟方法对未来采矿引发的地表沉降趋势具有较高的预测精度和实用性。

进一步的数值模拟预测结果显示,在新的采矿条件下,南部矿区的持续开采将导致塌陷区进一步扩展,可能对现有排水沟工程等设施构成严重影响。这为矿区后续的工程建设规划及灾害防控措施制定提供了重要依据。

综上所述,本研究提出了一种适用于矿山开采过程中地表沉降问题的有效数值模拟方法,不仅为矿区安全管理、工程优化设计和环境保护提供了科学参考,也为矿山开采过程中风险评估及减灾措施的实施提供了技术支持。

致 谢

作者们对来自中国有色金属工业昆明勘察设计研究院有限公司的工程师王必成等表示衷心的感谢,感谢他们所提供的帮助。

基金项目

本研究得到了普朗铜矿井下采动条件下高寒岩质边坡变形机理与智能诊断研究(HFW202400274)的财政支持。

参考文献

- [1] Zhang, Q., Zhang, B. and Wang, D. (2022) Environmental Benefit Assessment of Blended Cement with Modified Granulated Copper Slag. *Materials*, **15**, Article 5359. <https://doi.org/10.3390/ma15155359>
- [2] 王侃. 金属矿山土壤重金属污染现状及修复治理分析[J]. 生态环境与保护前言, 2023, 6(3): 111.
- [3] 刘杨. 矿山地质环境问题及恢复治理工程措施研究[J]. 地矿测绘, 2024, 7(10): 61.
- [4] National Research Council (1983). *Underground Hard-Rock Mining: Subsidence and Hydrologic Environmental Impacts*. National Academy Press.
- [5] Luo, Y. and Cheng, J. (2009) An Influence Function Method Based Subsidence Prediction Program for Longwall Mining Operations in Inclined Coal Seams. *Mining Science and Technology (China)*, **19**, 592-598. [https://doi.org/10.1016/s1674-5264\(09\)60110-1](https://doi.org/10.1016/s1674-5264(09)60110-1)
- [6] Dai, H.Y., Lian, X.G., Liu, J.Y., Liu, Y.X., Zhou, Y.M., Deng, W.N., et al. (2010) Model Study of Deformation Induced by Fully Mechanized Caving Below a Thick Loess Layer. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **47**, 1027-1033. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2010.06.005>
- [7] Wang, B., Xu, J. and Xuan, D. (2018) Time Function Model of Dynamic Surface Subsidence Assessment of Grout-Injected Overburden of a Coal Mine. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **104**, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2018.01.044>
- [8] Yan, W., Chen, J. and Yan, Y. (2019) A New Model for Predicting Surface Mining Subsidence: The Improved Lognormal Function Model. *Geosciences Journal*, **23**, 165-174. <https://doi.org/10.1007/s12303-018-0008-1>
- [9] Zhang, L., Cheng, H., Yao, Z. and Wang, X. (2020) Application of the Improved Knothe Time Function Model in the Prediction of Ground Mining Subsidence: A Case Study from Heze City, Shandong Province, China. *Applied Sciences*, **10**, Article 3147. <https://doi.org/10.3390/app10093147>
- [10] Nasiri, A., Shafiee, N. and Zandi, R. (2021) Spatial Analysis of Factors Influencing Land Subsidence Using the OLS Model (Case Study: Fahlian Aquifer). *Earth Science Informatics*, **14**, 2133-2144. <https://doi.org/10.1007/s12145-021-00688-1>
- [11] 黄庆享, 李星亮, 郭强. 采动覆岩破断运动与地表沉陷智能监控进展与展望[J]. 西安科技大学学报, 2026, 46(1): 1-14.
- [12] 王鹏, 程海强, 王翔. D-InSAR 技术与 SBAS-InSAR 技术在矿区地面沉降监测中的应用研究[J]. 中国矿业, 2024, 33(3): 133-141.
- [13] 张帆, 常乐, 荀张媛. 基于 SBAS-InSAR 技术的杨伙盘矿区地表形变监测[J]. 中国矿业, 2024, 33(3): 152-159.
- [14] Guéguen, Y., Deffontaines, B., Fruneau, B., Al Heib, M., de Michele, M., Raucoules, D., et al. (2009) Monitoring Residual Mining Subsidence of Nord/Pas-De-Calais Coal Basin from Differential and Persistent Scatterer Interferometry (Northern France). *Journal of Applied Geophysics*, **69**, 24-34. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2009.02.008>
- [15] Zhao, H., Ma, F., Zhang, Y. and Guo, J. (2012) Monitoring and Mechanisms of Ground Deformation and Ground Fissures Induced by Cut-And-Fill Mining in the Jinchuan Mine 2, China. *Environmental Earth Sciences*, **68**, 1903-1911. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-1877-7>
- [16] Xia, K., Chen, C., Deng, Y., Xiao, G., Zheng, Y., Liu, X., et al. (2018) In Situ Monitoring and Analysis of the Mining-Induced Deep Ground Movement in a Metal Mine. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **109**, 32-51. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2018.06.014>
- [17] Gong, H., Pan, Y., Zheng, L., Li, X., Zhu, L., Zhang, C., et al. (2018) Long-Term Groundwater Storage Changes and Land Subsidence Development in the North China Plain (1971-2015). *Hydrogeology Journal*, **26**, 1417-1427. <https://doi.org/10.1007/s10040-018-1768-4>
- [18] Wempen, J.M. (2020) Application of Dinsar for Short Period Monitoring of Initial Subsidence Due to Longwall Mining in the Mountain West United States. *International Journal of Mining Science and Technology*, **30**, 33-37. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2019.12.011>
- [19] Ma, X., Fu, Z., Li, Y., Zhang, P., Zhao, Y. and Ma, G. (2022) Study on Surface Subsidence Characteristics Based on Three-Dimensional Test Device for Simulating Rock Strata and Surface Movement. *Energies*, **15**, Article 1927. <https://doi.org/10.3390/en15051927>
- [20] Peng, M., Lu, Z., Zhao, C., Motagh, M., Bai, L., Conway, B.D., et al. (2022) Mapping Land Subsidence and Aquifer System Properties of the Willcox Basin, Arizona, from InSAR Observations and Independent Component Analysis. *Remote Sensing of Environment*, **271**, Article ID: 112894. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.112894>
- [21] Muhetaer, N., Yu, J., Wang, Y. and Yue, J. (2021) Temporal and Spatial Evolution Characteristics Analysis of Beijing Land Subsidence Based on InSAR. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **658**, Article ID: 012050.

- <https://doi.org/10.1088/1755-1315/658/1/012050>
- [22] 王雨萌, 关凯, 朱万成, 等. 基于现场监测与数值模拟结合的采动诱发围岩失稳与地表沉降研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2024, 45(2): 234-243.
- [23] 杨泰华, 廖炳文, 朱元广, 等. 上覆采空区对掘进巷道围岩应力场影响规律研究[J]. 中国矿业, 2026, 35(3): 89-98.
- [24] 王志民, 秦越强, 柴晨晖, 等. 基于 FLAC^{3D} 与无人机航测的全部垮落法采煤塌陷分析[J]. 地质科技通报, 2024, 43(1): 204-215.
- [25] Helm, P.R., Davie, C.T. and Glendinning, S. (2013) Numerical Modelling of Shallow Abandoned Mine Working Subsidence Affecting Transport Infrastructure. *Engineering Geology*, **154**, 6-19. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.12.003>
- [26] Huang, G., Kulatilake, P.H.S.W., Shreedharan, S., Cai, S. and Song, H. (2017) 3-D Discontinuum Numerical Modeling of Subsidence Incorporating Ore Extraction and Backfilling Operations in an Underground Iron Mine in China. *International Journal of Mining Science and Technology*, **27**, 191-201. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2017.01.015>
- [27] Fathi Salmi, E., Nazem, M. and Karakus, M. (2017) Numerical Analysis of a Large Landslide Induced by Coal Mining Subsidence. *Engineering Geology*, **217**, 141-152. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.12.021>
- [28] Hamdi, P., Stead, D., Elmo, D. and Töyrä, J. (2018) Use of an Integrated Finite/Discrete Element Method-Discrete Fracture Network Approach to Characterize Surface Subsidence Associated with Sub-Level Caving. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **103**, 55-67. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2018.01.021>
- [29] Wu, G., Jia, S., Wu, B. and Yang, D. (2018) A Discussion on Analytical and Numerical Modelling of the Land Subsidence Induced by Coal Seam Gas Extraction. *Environmental Earth Sciences*, **77**, Article No. 353. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7526-z>
- [30] Liu, X. and Cheng, Z. (2019) Changes in Subsidence-Field Surface Movement in Shallow-Seam Coal Mining. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, **119**, Article No. 12. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/2019/v119n2a12>
- [31] Chen, D., Chen, H., Zhang, W., Cao, C., Zhu, K., Yuan, X., *et al.* (2020) Characteristics of the Residual Surface Deformation of Multiple Abandoned Mined-Out Areas Based on a Field Investigation and SBAS-InSAR: A Case Study in Jilin, China. *Remote Sensing*, **12**, Article 3752. <https://doi.org/10.3390/rs12223752>
- [32] Parmar, H., Yarahmadi Bafghi, A. and Najafi, M. (2019) Impact of Ground Surface Subsidence Due to Underground Mining on Surface Infrastructure: The Case of the Anomaly No. 12 Sechahun, Iran. *Environmental Earth Sciences*, **78**, Article No. 409. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8424-8>
- [33] Zhao, X., Yu, W., Zhao, Y. and Fu, S. (2023) Numerical Estimation of Shaft Stability and Surface Deformation Induced by Underground Mining Transferred from Open-Pit Mining in Jinfeng Gold Mine. *Minerals*, **13**, Article 196. <https://doi.org/10.3390/min13020196>
- [34] Cai, W., Li, L., Lin, M., Wang, J., Wang, P., Li, Q., *et al.* (2024) Prediction of Surface Deformation Induced by Mining Thin Coal Seam: A Case Study of Guanshan Coalfield in Sichuan. *Natural Hazards Research*, **4**, 255-264. <https://doi.org/10.1016/j.nhres.2023.09.011>
- [35] Brown, E.T. (1970) Strength of Models of Rock with Intermittent Joints. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, **96**, 1935-1949. <https://doi.org/10.1061/jsfeaq.0001479>
- [36] Hoek, E. (1965) Rock Fracture under Static Stress Conditions. Ph.D. Thesis, University of Cape Town, Cape Town.