

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2024.365

引用格式: 杨帆, 范毅, 徐定芳, 等. 湘潭某大型锰矿矿区地面塌陷成因及危险性评估与防治策略[J]. 中国地质调查, 2025, 12(3): 85–96. (Yang F, Fan Y, Xu D F, et al. Causes, risk assessment and prevention strategies of ground collapse in a large manganese mine in Xiangtan[J]. Geological Survey of China, 2025, 12(3): 85–96.)

湘潭某大型锰矿矿区地面塌陷成因及危险性 评估与防治策略

杨帆, 范毅, 徐定芳, 何阳, 向锋

(湖南省地质调查所, 湖南长沙 410114)

摘要: 为探究矿区地面塌陷灾害精准防治, 以湘潭锰矿区为研究对象, 收集了研究区地质环境、水文地质及工程地质资料, 分析了地面塌陷地质灾害的发育特征、影响因素及成因机理。根据岩溶塌陷主控因素(地层岩性、构造、覆盖层厚度、结构和性质、水动力条件)及采空塌陷主控因素(矿层埋藏条件、采矿方法与开采程度、地下水、断层), 分别建立了易发性和危险性评价的因子矩阵, 对岩溶塌陷及采空塌陷地质灾害进行了易发性和危险性评价, 针对性提出了防治措施。结果表明: 研究区存在3个岩溶塌陷危险性大区, 需对该区地下岩溶区进行地面填堵裂缝和塌陷洞、注浆充填地下岩溶区等处理方式; 研究区存在8个采空塌陷危险性大区, 需减少区内抽、排水量, 控制水位升降, 必要时进行围幕灌浆或回填、充水。研究结果可为湘潭锰矿区地面塌陷的防治提供参考, 也可为其他地区地面塌陷危险性评价提供借鉴。

关键词: 岩溶塌陷; 采空塌陷; 岩溶发育特征; 成因机理; 危险性评价

中图分类号: P642.26

文献标志码: A

文章编号: 2095-8706(2025)03-0085-12

0 引言

受矿山开采活动影响, 矿区地面塌陷事件日益频繁^[1-3], 急需开展地面塌陷地质灾害的发育特征、影响因素、成因机理及危险性评价方面的研究^[4-6]。目前, 国内外学者针对地面塌陷地质灾害进行了大量研究^[7-20], 在地面塌陷诱发因素的研究方面取得了较多成果。Klimchouk等^[12]认为, 地下水潜蚀是引发地面塌陷的重要因素; Ouyang^[13]将地面塌陷的整个过程可分为地下水位下降、土壤空洞形成、土壤空洞扩张和地面塌陷外露4个阶段; 汤志刚等^[14]认为, 地面塌陷主要由人类开采矿产资源和地下水资源等工程活动引起。除此之外, 在理论、试验模型及数值仿真方面也取得较多成果^[15-20]。张晨等^[19]通过矿区三维地质模型可视化建模, 实现了矿区复杂地质条件与矿体、采空区以及地面塌陷之间的三维

可视化; 苏永华等^[20]为研究岩溶区地下双空洞诱发地面塌陷演化过程的一般规律, 进行了室内物理模型的正交试验, 结果表明双空洞的洞口宽度、间距及连通强度会导致岩溶发育的空间形态不同。

上述研究虽然对岩溶塌陷及采空塌陷开展了一些研究, 但由于矿区地面塌陷具有较强的隐蔽性, 为实现对矿区岩溶塌陷及采空塌陷的有效治理, 需综合考虑目前的受灾情况、危险性影响因素及物探资料, 判断其存在的风险。本文以湘潭某锰矿区为研究对象, 分别对岩溶塌陷及采空塌陷进行了易发性和危险性评价, 旨在为其后期治理与规划提供技术支撑。

1 研究区概况

1.1 水文气象

湘潭锰矿区位于湘中丘陵区东部, 主干河流由西南向东北方向汇入湘江, 地貌形态总体西高东

收稿日期: 2024-11-26; 修订日期: 2025-04-26。

基金项目: 湖南省财政厅“湘潭锰矿区地下水资源调查评价(编号: 201703010)”和国家自然科学基金委“易风化软岩边坡服役性能演变机理与长期稳定性研究(编号: 42077270)”项目联合资助。

第一作者简介: 杨帆(1983—), 男, 高级工程师, 主要从事水工环地质研究方面的工作。Email: ll542310@163.com。

低,中部高南北低。区内最高点位于矿区东侧鹤岭村,标高 165 m,最低处位于矿区东北部湾田村一带,标高约 44 m,相对高差 121 m,如图 1 所示。山坡坡度一般为 $10^{\circ} \sim 20^{\circ}$,丘顶一般呈圆状或椭圆状。地表水系较发育,东北部地表水往东流入白泉

小溪,西北部地表水往北汇入柴山水库后流向靳江河,西南部地表水往南流向涟水河,其余大部分地表水向南汇入牟渠。研究区属亚热带季风湿润气候区,气候温暖潮湿。据湘潭市气象资料^[21],多年降水量为 1 046.2 ~ 1 923.3 mm。

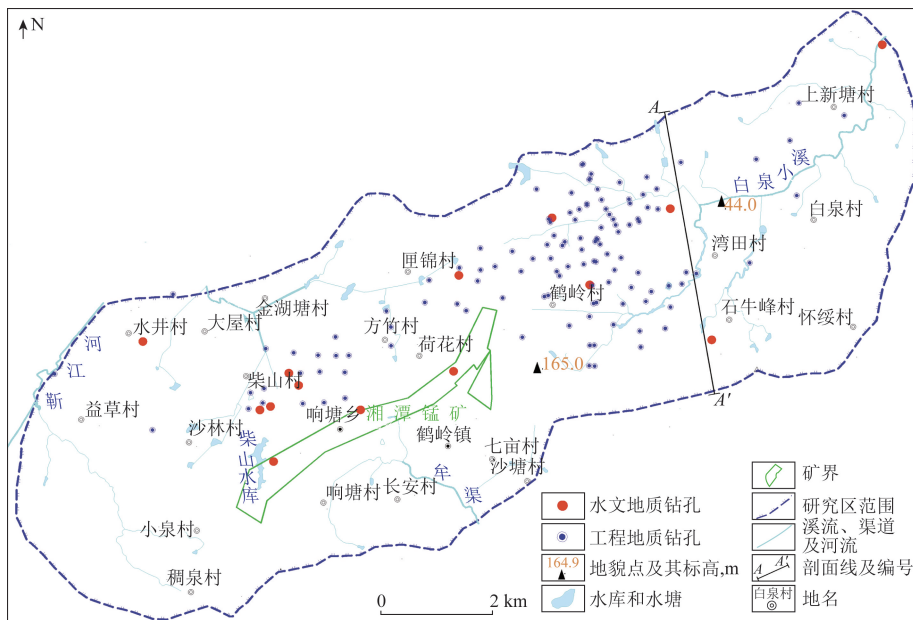


图1 研究区地理位置、地层及钻孔分布

Fig.1 Geographical location, strata and borehole distribution of the study area

1.2 地质构造

据统计,前人实施的水文地质钻孔、工程地质钻

孔共 180 个,为分析矿区地质结构、水文地质条件及岩溶发育特征提供了重要的基础数据(图 1,图 2)。

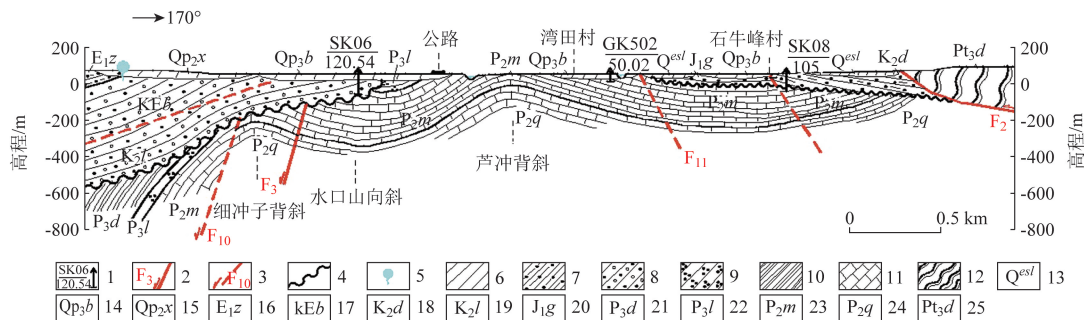


图2 研究区钻孔剖面(AA')

Fig. 2 Borehole section (AA') of the study area

研究区属鹤岭断褶带,位于仙女山背斜北翼,表现为鹤岭—冷水冲推覆构造,板溪群—震旦系往北东逆掩推覆于下侏罗统高家田组之上,使侏罗系及其下伏二叠系深埋于老地层之下。

总体上看,研究区地质构造较复杂,历次主要构造运动在该区均有强度不一的反应。雪峰运动主要形成了宽缓的 NE 向褶皱雏形,造成了南华系假整合于青白口系之上;加里东运动主要表

现为褶皱运动,先期褶皱雏形得到了强化和改造,形成了由青白口系、南华系组成的 NE 向、

NEE 向及 NW 向褶皱。区域地质构造简图见图 3。

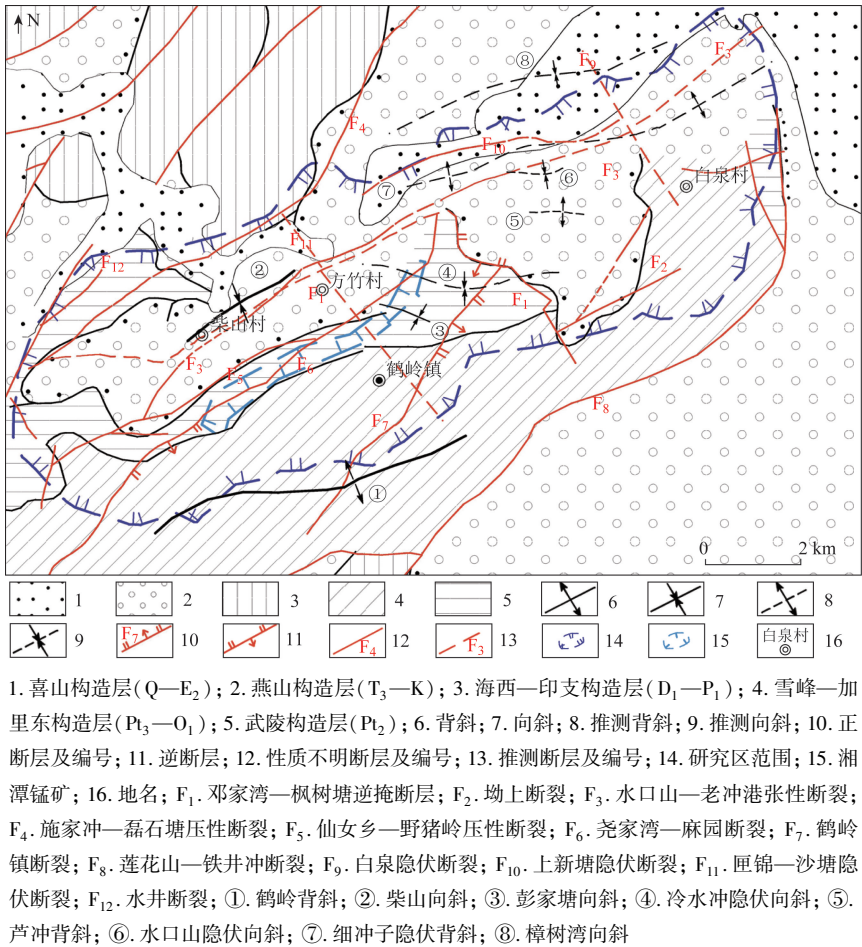


图3 研究区地质构造略图

Fig.3 Geological structure sketch of the study area

1.3 地面塌陷分布

根据形成原因及诱发因素,区内地面塌陷主要分为采空地​​面塌陷和岩溶地面塌陷两种类型。综合调查资料和收集资料^[22],区内地面塌陷多发、群发,地面塌陷共有 150 处,其中岩溶塌陷 118 处,采空塌陷 42 处。

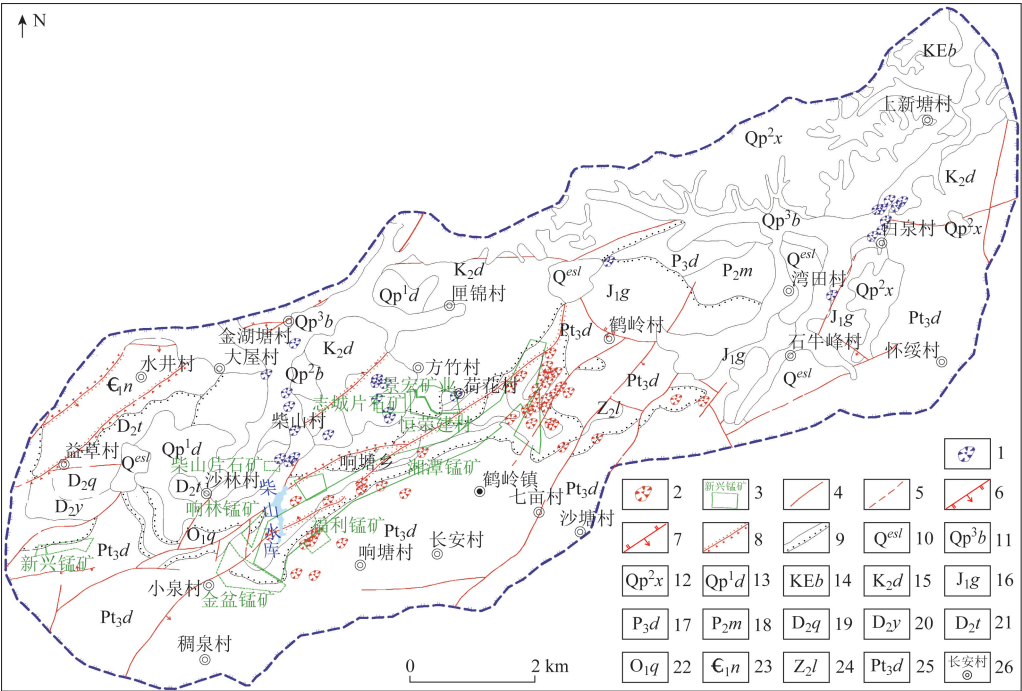
2 岩溶塌陷

2.1 分布及发育特征

研究区可溶岩主要包括中二叠统茅口组 (P_2m)及中泥盆统棋梓桥组 (D_2q)及上白垩统罗镜滩组 (K_2l),其次为中二叠统栖霞组 (P_2q)。岩性主要为灰岩、白云岩、泥灰岩、灰质砾岩。埋藏条件可划分为裸露型、覆盖型、埋藏型 3 类。裸露型可溶岩分布于益草村、柴山村、荷花村、湾田村西部等地,由二叠系和泥盆系灰岩、白云质灰岩、硅质灰

岩、泥灰岩等组成,主要为栖霞组及茅口组灰岩;覆盖型可溶岩主要分布在柴山村一方竹村一片、湾田村西部,由栖霞组及茅口组灰岩组成,覆盖层为第四系冲洪积土层;埋藏型可溶岩主要分布在柴山村西部、方竹村—匣锦村—鹤岭村—湾田村—石牛峰村—白泉村大片地区,由栖霞组及茅口组灰岩组成。

研究区岩溶塌陷多分布于第四系松散覆盖层较薄的地段。在泥盆系碳酸盐岩分布区,由于岩溶作用,形成构造溶蚀丘陵、平原地貌,地形总体较为平缓,起伏不大。覆盖层厚度小于 10 m 时塌陷可能性极大,厚度大于 30 m 时塌陷可能性极小。境内岩溶塌陷均属土洞型,塌陷洞深度一般为 4 ~ 6 m,上部覆盖层主要为含碎石黏性土,厚度一般为 4 ~ 8 m,结构松散,密实度较差。岩溶塌陷多位于地下水主要径流方向上,属于地下水主要补给区。研究区岩溶塌陷分布于西南部柴山村、方竹村和东北部白泉村(图 4)。



1. 岩溶塌陷; 2. 采空塌陷; 3. 矿区及矿界; 4. 断层; 5. 推测断层; 6. 正断层; 7. 逆断层; 8. 富水断层; 9. 地质界线; 10. 第四系残积 + 洪积层; 11. 第四系白水江组; 12. 第四系新开铺组; 13. 第四系洞井铺组; 14. 白垩系—古近系百花亭组; 15. 上白垩统戴家坪组; 16. 下侏罗统高家田组; 17. 上二叠统大隆组; 18. 中二叠统茅口组; 19. 中泥盆统棋梓桥组; 20. 中泥盆统易家湾组; 21. 中泥盆统跳马涧组; 22. 下奥陶统桥亭子组; 23. 下寒武统牛蹄塘组; 24. 震旦系留茶坡组; 25. 青白口系多益塘组; 26. 地名

图 4 研究区地面塌陷分布

Fig. 4 Distribution of ground collapse in the study area

2.2 影响因素分析

岩溶发育是产生岩溶地面塌陷的基础条件,是产生岩溶地面塌陷的内因。当岩溶水自然动态变化较大且频繁时,岩溶水具备渗透破坏的水动力条件,成为主要诱发因素,是产生岩溶地面塌陷的外因。因此,岩溶地面塌陷的发育形成与地层岩性、构造、一定厚度的松散覆盖土层和水动力条件等有着密切的关系。

就地层岩性而言,区内岩溶地面塌陷主要发育于泥盆系—二叠系碳酸盐岩中,岩性主要为棋梓桥组、茅口组灰岩、灰质砾岩,岩溶随深度变化的情况见表 1。可溶岩地层为岩溶塌陷提供了地质基础

表 1 研究区钻孔线岩溶率统计

Tab.1 Statistics of linear karst rate for boreholes in the study area

标高/m	揭露灰岩长度/m	溶洞总高/m	线岩溶/%	钻孔见洞率/%
[0,32]	96.25	5.06	5.300	100.00
[-50,0)	80.31	0.07	0.087	20.00
[-100,-50)	385.20	4.93	1.280	36.36
[-150,-100)	839.88	14.35	1.710	4.35
[-200,-150)	906.13	0.00	0.000	0.00

条件,发育程度随着深度增加而逐渐减弱,从上而下可分为:①分布于地面至标高 32 m 范围,溶洞高度一般为[1,5] m,溶孔、溶隙、溶蚀面较发育,岩溶作用以水平为主转化为以垂直为主;②分布于标高[-50,0) m范围,溶洞高度以(0,1] m 居多,溶孔、溶隙发育,为水平与垂直交替的溶蚀作用带;③分布于标高[-200,-50) m 范围,其中标高-150 m 以上,岩溶相对发育,标高-150 m 以下,溶洞稀少,且规模很小;④分布于标高-200 m 以下,仅发育少量溶孔及溶隙。

就构造而言,区内邓家湾—枫树塘逆掩断层(F_1)及水口山—老冲港张性断裂(F_3)走向 NE,与地层走向大体一致。在断裂带及其邻近,尤其是上盘岩石破碎,节理裂隙发育,有利于地表水下渗和地下水活动,加快了岩溶的发育进程。

就覆盖层厚度、结构和性质而言,区内岩溶塌陷地段覆盖层主要为黏性土,厚度一般为 5~20 m,结构松散,密实度较差,是岩溶塌陷形成的必要条件。

就水动力条件而言,研究区岩溶水丰富,岩溶水与地表水交替变换频繁。主要含水层的溶洞、裂隙

受到强烈疏通,地下水位变化幅度大,极易引发地面塌陷。采矿抽排地下水加剧了岩溶地面塌陷的发生,研究区岩溶发育的层位,地下溶洞水赋存其中,亦是矿山开采的层位。矿山地下开采,大量抽排地下水,引起地下水位变化,加剧岩溶地面塌陷的发生。

2.3 易发性评价

通过野外调查及室内综合分析,确定勘查区塌

陷危险性影响因素主要有岩溶基础条件、覆盖层条件、构造条件、地下水条件、地形地貌条件、人类工程活动、塌陷坑条件。因此,此次评价将上述7个条件作为岩溶塌陷易发性评价指标,各个因子指标的划分标准参照《DZ/T 0447—2023 岩溶塌陷调查规范(1:50 000)》^[23],岩溶塌陷易发性评价指标分级见表2。

表2 研究区岩溶塌陷易发性评价指标分级划分

Tab.2 Classification of karst collapse susceptibility evaluation indexes in the study area

条件层	因子层	低易发区	中易发区	高易发区
岩溶基础条件	可溶岩地层	$D_2q/P_2m/K_2l$	P_2m	D_2q
	岩溶发育程度	弱发育	中等发育	强烈发育
覆盖层条件	覆盖层厚度/m	(20, 30]	(10, 20]	[0, 10]
	覆盖层性质	残积黏性土	冲洪积黏性土	粉质黏土
	覆盖层结构	多元结构	二元结构	单一及均匀结构
构造条件	距断层距离/m	(100, 150]	(50, 100]	[0, 50]
	断层性质	张扭性	张扭性	张性
地下水条件	地下水波动	弱	中	强
	地下水径流强度	弱承压水,水力坡度较小,地下水流速较慢	弱承压水向潜水转变,水力坡度中等,地下水流速中等	潜水、水力坡度大,地下水流速快
地形地貌条件	地貌单元	岗丘	阶地	洼地、谷地
	地形变化	坡地	平坦地	低洼地、沟谷
人类工程活动条件	开采抽排地下水	弱	中	强
	矿山抽水影响半径/m	[300, 500]	(100, 300)	[0, 100]
塌陷坑条件	地面地质灾害点/个	[0, 2]	(2, 5]	(5, 10]
	地面塌陷规模/m	直径[0, 1]、深度[0, 1]	直径(1, 3]、深度(1, 2]	直径(3, 10]、深度(2, 10]

综合考虑岩溶塌陷的形成条件、诱发因素等,将柴山水库南侧塌陷区、柴山村一带塌陷区、白泉塌陷区

划分为: 高易发区(I₁、I₂、I₃ 区)、中易发区(II 区)、低易发区(III₁、III₂ 区)。岩溶塌陷易发性分区见图5。

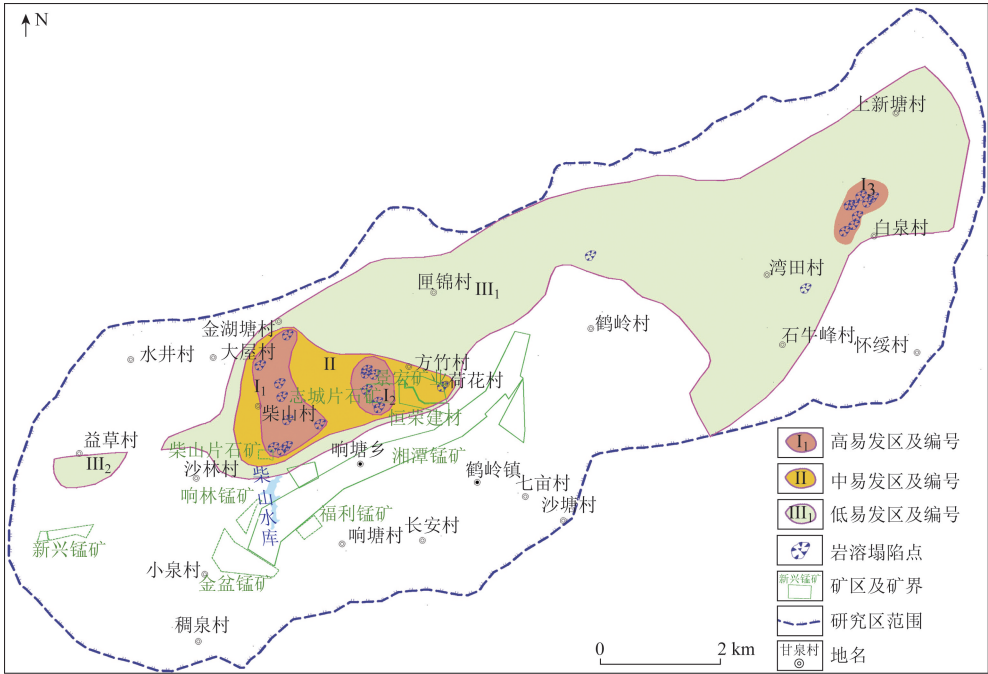


图5 研究区岩溶塌陷易发性分区

Fig.5 Karst collapse susceptibility zoning in the study area

2.4 危险性评价

按照《DZ/T 0286—2015 地质灾害危险性评估规范》^[24]将研究区分为 3 个岩溶塌陷地质灾害危险性大区(I₁、I₂、I₃ 区)、1 个岩溶塌陷地质灾害危险性中区(II 区)、1 个岩溶塌陷地质灾害危险性小区(III 区)。表 3 为岩溶塌陷危险性综合分区评判表,图 6 为岩溶塌陷危险性分区。在危险性大区对现有塌陷一般可采用地面填堵裂缝和塌陷洞、注浆充填地下岩溶区等处理方式:①农田及荒地的塌

陷坑采取清除填堵法处理即可,道路、居民区的塌陷坑则需要注浆治理隐伏土洞或布设钢筋骨架加固塌陷坑基底,在渠道新近发生的塌陷坑,需先加固河堤,再进行塌陷坑回填治理;②建立监测网,区内设立地表水、地下水、岩溶塌陷区变形监测、居民区土层受扰动监测点等;③禁止区内进行大规模开采地下水。在危险性中区可采取以下措施:①对现有塌陷坑进行夯实回填治理;②禁止区内进行大规模开采地下水。危险性小区不设防。

表 3 研究区岩溶塌陷危险性综合分区评判表

Tab.3 Comprehensive zoning evaluation table of karst collapse risk in the study area

岩溶塌陷危险性 稳定性评价	分布位置	危害对象和危害程度	岩溶塌陷危险性 分区分级
岩溶塌陷危险性大 地基不稳定	柴山村一带(I ₁ 区)	危害对象为村民居住区;危害程度为民房、地基开裂变形,部分损毁,地面变形及塌陷坑发育,危害程度大	大
	方竹村、志诚片石矿区一带(I ₂ 区)	危害对象为村民居住区、工业建筑分布区;危害程度为民房、地基开裂变形,民房严重损毁,工业建筑开裂变形,地面变形、开裂,危害程度大	大
	白泉塌陷区(I ₃ 区)	危害对象为村民居住区;危害程度为民房、地基开裂变形,民房受影响,危害程度大	大
岩溶塌陷危险性中 地基基本稳定	柴山村北部一带(II 区)	危害对象为少量居民楼房;危害程度为民房及地基开裂,地面变形及塌陷坑发育,危害程度中等	中
岩溶塌陷危险性小 地基稳定	沙林村至白泉村一带(III 区)	岩溶发育微弱或非岩溶区;危害对象为少量民房,危害程度较小	小

注:地面塌陷易发性评价遵循就高不就低的原则。

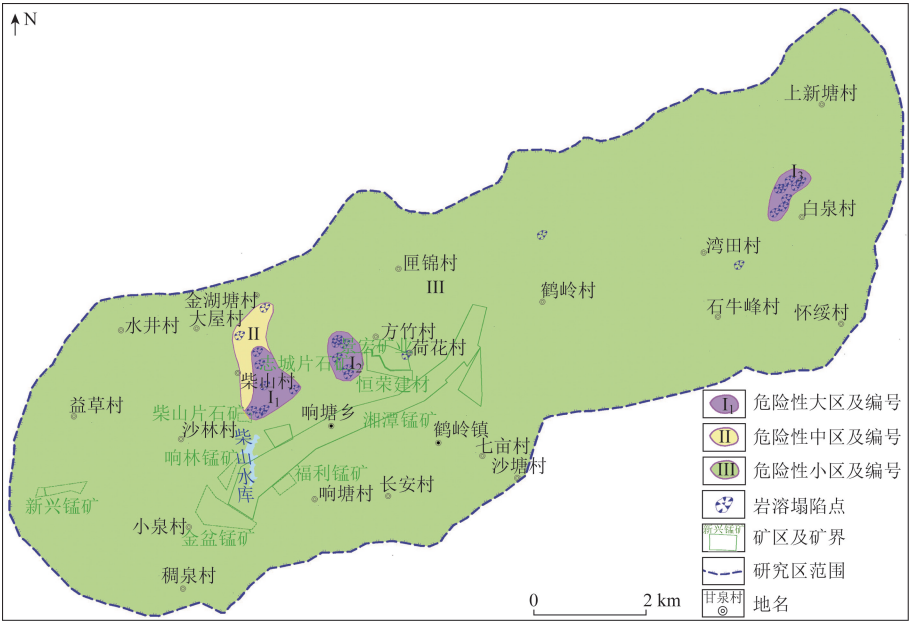


图 6 研究区岩溶塌陷危险性分区

Fig.6 Karst collapse risk zoning in the study area

3 采空塌陷

3.1 分布及发育特征

根据收集资料和实地调查,区内采空塌陷平

面上按可分为响塘中学—鹅公塘片区、方塘片区、匣锦片区 3 大片区,区内共有 4 处塌陷坑(群)(图 7),分别为鹅公塘水库塌陷坑、方塘塌陷坑、熊家冲塌陷坑以及匣锦村塌陷坑。图 8 为采空塌陷现场图。

鹅公塘水库塌陷坑位于原鹅公塘水库东南部,该塌陷坑面积为 50 ~ 60 m²,呈平行水库堤坝的椭圆形展布,最大可见深度达 5 m,塌陷坑四周呈近似直立的陡壁,底部见巷道支护木板,属于漏斗形塌

陷坑。
方塘塌陷坑位于水塘方塘中,该塌陷坑塌陷面积约 20 m²,塌陷深度约 3.5 m,塌陷坑四周侧壁约 70°。

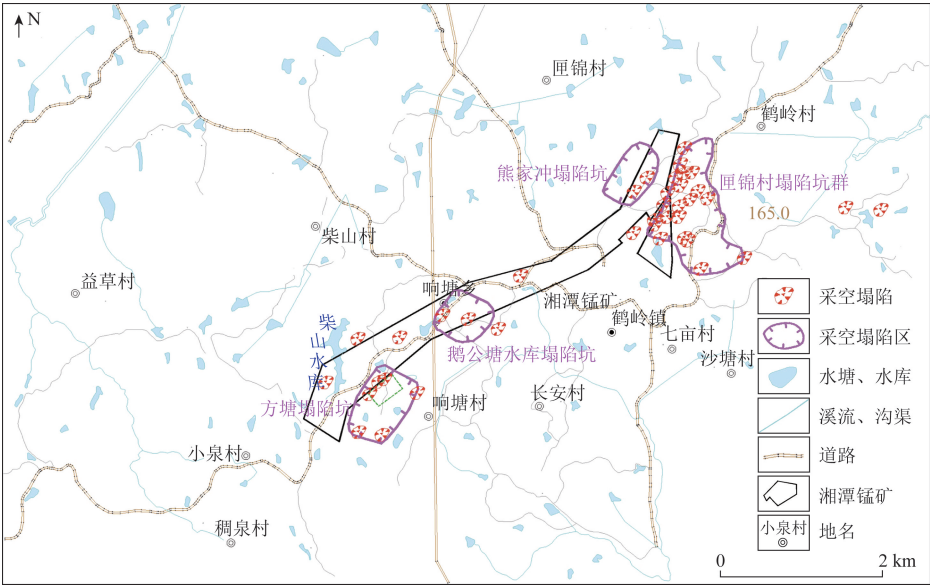
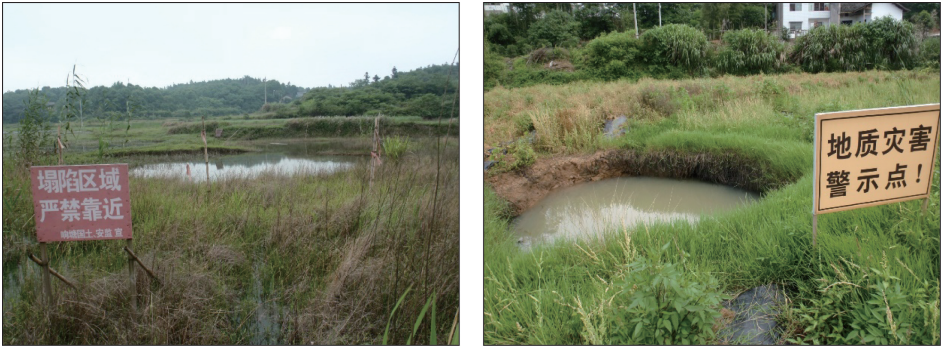


图7 研究区采空塌陷坑(群)分布

Fig.7 Distribution of goaf collapse (pit group) in the study area



(a) 鹅公塘水库塌陷坑

(b) 方塘塌陷坑

图8 研究区采空塌陷现场图

Fig.8 Goaf collapse site in the study area

熊家冲塌陷坑位于匡锦村社山村,该塌陷坑平面呈近似椭圆长方形,南北长约 2.8 m,东西长约 7.6 m,面积 2 130 m²。塌陷坑周边地势平坦、开阔,中部最低标高 63.11 m,外围最高标高 69.41 m,相对高差 6.30 m。
匡锦村塌陷坑群位于湘潭锰矿二期区青山矿段匡锦村,出现约 8 个塌陷坑,塌陷坑一般呈圆形,直径约 5 m,塌陷坑深 6 m。
3.2 影响因素分析
采空塌陷的程度受多种因素的控制,如矿层埋藏条件、岩性、地质构造、地下水、开采条件等。

就矿层埋藏条件而言,矿层埋深越大,变形扩展到地表所需要的时间越长。开采深厚比越小,采空塌陷发展速率越快,地面变形值越大,往往形成塌陷坑、地裂缝。
就采矿方法与开采程度而言,湘潭锰矿主要采用两种采矿方法,即壁式崩落法和水砂充填法。壁式崩落法开采使覆岩破坏最为严重,能使上覆岩层的垮落断裂带得到充分的发展,地面变形较大;水砂充填法采矿填充后填充料存在被压缩的过程,在矿层-采空填充料完全被压实的过程中岩层已开始移动。矿区氧化锰开采持续

时间长、规模大,是由原生碳酸锰矿石经过溶解迁移而形成的锰帽与淋滤型两种次生氧化锰矿石,分布于所有露头或其附近以及大小断裂带

中,一般氧化锰存在深度为地表至地表以下 25 ~ 35 m,已开采殆尽,图 9 为开拓系统示意图。

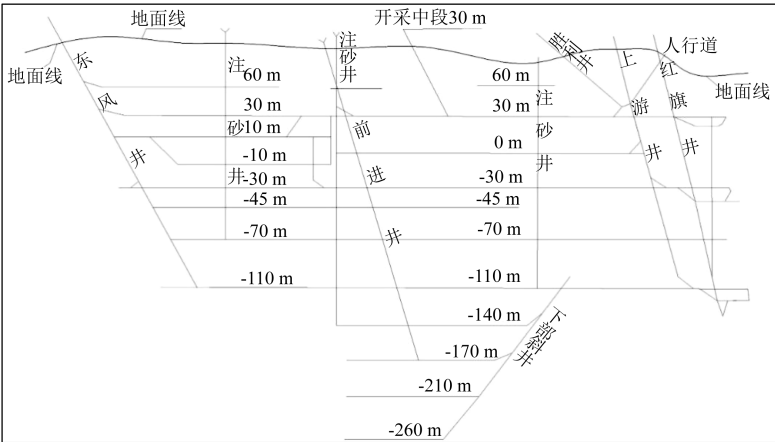


图 9 湘潭锰矿开拓系统示意图

Fig.9 Schematic diagram of the development system of Xiangtan manganese mine

就地下水而言,矿区长期抽排地下水,疏干了上部含水层,在松散层易发生固结沉降,引起地面变形。另外雨季后已疏干的上部岩土层重新充水,研究区内炭质页岩、页岩遇水易软化,地下水对矿柱及顶板均起到软化作用。根据调查,采空区曾因大量地下水,至水位降深 60 余米,在大气降水诱发下,同时产生 4 个塌洞。

就断层而言,断层带处岩层的力学强度大大地

低于周围岩层的力学强度,使该处成为岩层变形集中的有利位置。岩体被切割形成的岩块向左侧发生悬臂式弯曲并断裂,同时岩层沿断层面呈现滑动趋势。

3.3 易发性评价

采空塌陷易发区划分主要考虑采空塌陷分布密度、矿层特征、不规范开采范围、矿层顶板、矿区地质构造、矿区水文地质条件等因素,采空塌陷地质灾害易发区判别特征表如表 4 所示。

表 4 采空塌陷易发区判别特征

Tab.4 Discrimination characteristics of goaf collapse susceptibility zones

判别因素	判别特征			
	高易发区	中易发区	低易发区	不易发区
采空塌陷分布密度 (个/100 km ²)	[20, 10)	[3, 10]	(0, 3)	0
矿层特征	矿层厚 4 m 以上,埋深约 50 m,倾角 0° ~ 15°	矿层厚 1 ~ 4 m 以上,埋深约 80 m,倾角 15° ~ 30°	矿层厚小于 1 m,埋深 80 m 以上,倾角大于 30°	矿层厚小于 0.5 m,埋深大于 100 m
不规范开采范围	不规范开采范围大,影响范围广	不规范开采范围较大,影响范围较大	不规范开采范围小,影响范围有限	尚未开采,对地面无影响
矿层顶板	矿层顶板岩石坚硬,抗剪强度大	矿层顶板岩石较坚硬,抗剪强度较大	矿层顶板岩石软硬相间,抗剪强度较小	矿层顶板岩石软弱,抗剪强度小
矿区地质构造	矿区地质构造复杂,断层节理裂隙发育	矿区地质构造较复杂,断层节理裂隙较发育	矿区地质构造较简单,断层节理裂隙不发育	矿区地质构造简单
矿区水文地质条件	水文地质条件不良,对矿区影响大	水文地质条件差,对矿区影响较大	水文地质条件较差,对矿区影响小	水文地质条件良好,对矿区无影响

由于长期的地下采矿活动,造成采空区规模大,分布于整个矿床。矿区地质构造较复杂,节理裂隙发育,在地下水作用、重力及爆破震动影响下,地面塌陷的形成。结合当前情况,将湘潭锰矿、福

利锰矿、响林锰矿、金盆锰矿以及新兴锰矿一带采空区塌陷区划分为: 高易发区(I₁、I₂ 区)、中易发区(Ⅱ₁、Ⅱ₂ 区)、低易发区(Ⅲ区)。采空塌陷易发性分区见图 10。

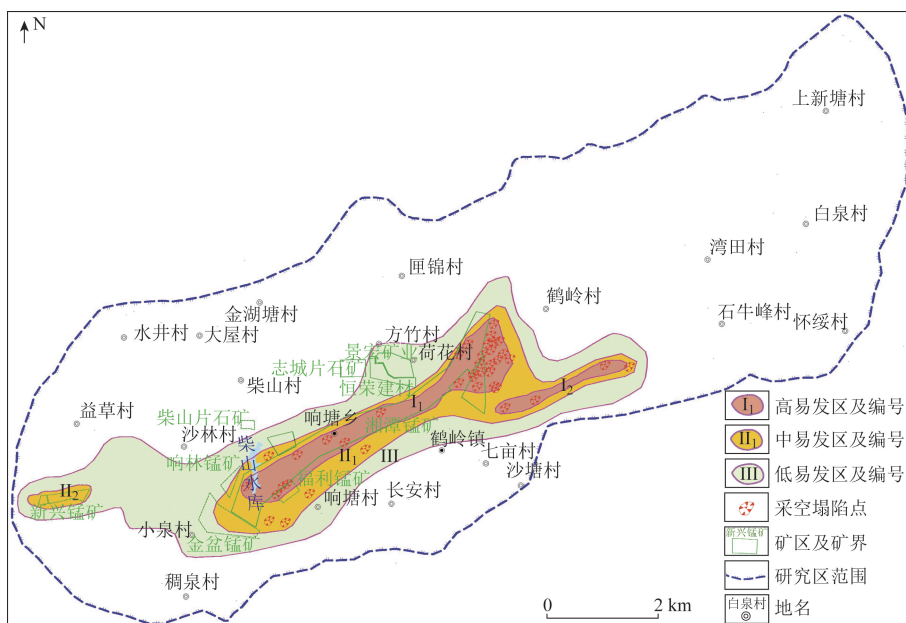


Fig. 10 Goaf collapse susceptibility zoning in the study area

3.4 危险性评价

根据《DZ/T 0286—2015 地质灾害危险性评估规范》^[24],将范围内采空区划分为危险性大、中、小

3个区,采空塌陷程度如表5所示,具体危险性分区见图11及表6。对8个采空塌陷危险性大区,宜减少抽、排水量,控制水位升降,对出水点进行堵水,

表5 采空塌陷发育程度

Tab.5 Development degree of goaf collapse

发育程度	参考指标				开采深厚比	采空区及其影响带占建设场地面积/%
	地表移动变形值					
	下沉量/(mm·a ⁻¹)	倾斜/(mm·m ⁻¹)	水平变形/(mm·m ⁻¹)	地形曲率/(mm·m ⁻²)		
强	<60	>6	>4	>0.3	<80	>10
中等	[20,60]	[3,6]	[2,4]	[0.2,0.3]	[80,120]	[3,10]
弱	<20	<3	<2	<0.2	>120	<3

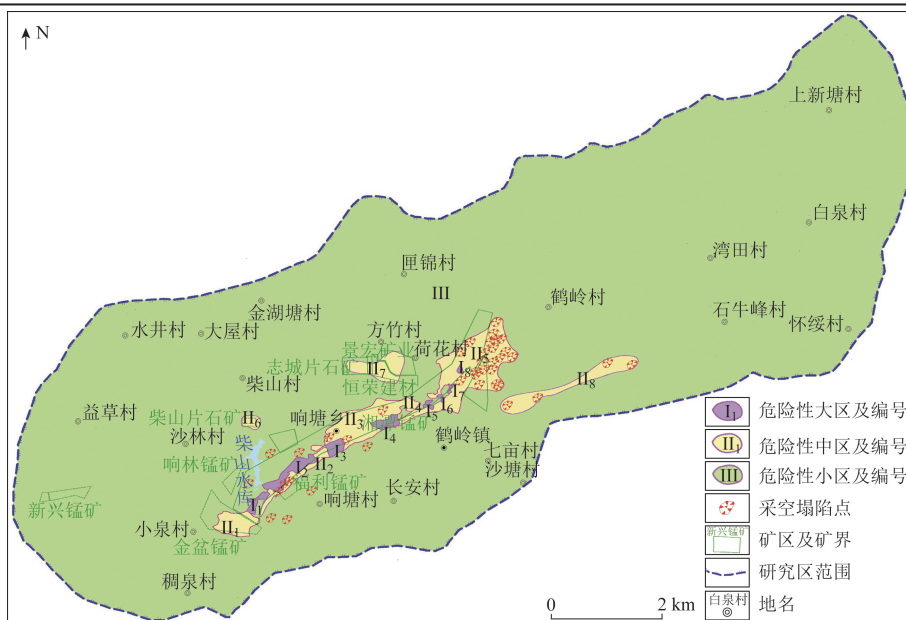


图 11 研究区采空塌陷危险性分区

Fig. 11 Goaf collapse risk zoning in the study area

表 6 研究区采空塌陷危险性分区发育特征及其稳定性和危害程度

Tab.6 Development characteristics, stability level and hazard degree for goaf collapse risk zones in the study area				
危险性等级	分区编号	采空塌陷发育特征	采空区地基稳定性	危害对象和危害程度
大	I ₁	物探异常,地质综合解译为移动盆地形成过程中在岩土中形成裂缝、裂隙,采空塌陷发育强	基本稳定	危害居民生命财产安全,危害大
大	I ₂	有较大规模的房屋开裂,采空塌陷发育强	基本稳定	危害居民生命财产安全,危害大
大	I ₃	采空塌陷发育强	基本稳定	危害居民生命财产安全,危害大
大	I ₄	分布大量非法矿洞,井巷上下重叠,水砂充填法开采区留有的保安矿柱被大量盗采,清水塘区域变形明显,采空塌陷发育强	清水塘处为欠稳定,其余地块为基本稳定	危害居民生命财产安全,危害大
大	I ₅	房屋开裂明显,分布大量民井井巷,采空塌陷发育强	欠稳定	危害居民生命财产安全,危害大
大	I ₆	分布大量非法矿洞,井巷上下重叠,采空塌陷发育中等	基本稳定	危害居民生命财产安全,危害大
大	I ₇	大量采空区,采空塌陷发育中等	基本稳定	危害居民生命财产安全,危害大
大	I ₈	采空塌陷发育中等	基本稳定	危害居民生命财产安全,危害大
中	II ₁	未见明显地面变形,采空塌陷发育中等	基本稳定	危害居民生命财产安全,危害中等
中	II ₂	采空塌陷发育强,多为荒地及林地	基本稳定	危害小,采空塌陷发育强,危险中等
中	II ₃	房屋开裂,采空区分布浅,采空塌陷发育强	基本稳定	危害居民生命财产安全,危害中等
中	II ₄	采空塌陷发育强	基本稳定	分布林地、荒地
中	II ₅	物探异常,地质综合解译为移动盆地形成过程中在岩土中形成裂缝、裂隙	基本稳定	危害生命财产安全,危害中等
中	II ₆	采空区较大,多为荒地及林地	基本稳定	分布林地、荒地
中	II ₇	采空区较大,多为荒地及林地	基本稳定	分布林地、荒地
中	II ₈	采空塌陷发育强,多为荒地及林地	基本稳定	分布林地、荒地
小	III	采空塌陷不发育或弱发育,主要为鱼塘、水田、荒地、林地等	基本稳定	危害程度小

围幕灌浆,尽可能不揭露主要含水层。此外,对已开采坑道可进行回填或充水等工程。

4 结论

- (1)研究区地面塌陷分为岩溶塌陷和采空塌陷,其中岩溶塌陷 118 处,采空塌陷 42 处。地层岩性、构造、覆盖层厚度、结构和性质、水动力条件是岩溶塌陷主控因素;矿层埋藏条件、采矿方法与开采程度、地下水、断层是采空塌陷主控因素。
- (2)研究区岩溶塌陷划分了 3 个危险性大区、1 个危险性中区、1 个危险性小区。危险性大区可采用地面填堵裂缝和塌陷洞、注浆充填地下岩溶区等处理方式。
- (3)研究区采空塌陷划分了 8 个危险性大区、8 个危险性中区、1 个危险性小区。对于危险性大区,宜减少抽、排水量,控制水位升降,对出水点进行堵水,围幕灌浆,尽可能不揭露主要含水层。另外,对已开采坑道可进行回填或充水等工程。

参考文献 (References):

[1] 汤志刚,景佳俊,颜士顺,等. 基于 InSAR 监测数据的石膏矿采空塌陷特征分析——以邳州平台矿和希州矿为例[J]. 中国地质调查,2020,7(4):112 – 117.

[2] 周丹,景佳俊,邢雪. 江苏省邳州石膏矿区采空地面塌陷发育特征与防治对策研究[J]. 中国地质调查,2018,5(4):99 – 106.

[3] 罗伟奇,刘拥军,李同生,等. 湖南省界牌岭矿区矿坑充水途径研究[J]. 水文地质工程地质,2024,51(3):57 – 68.

[4] 戴建玲,雷明堂,蒋小珍,等. 长江经济带岩溶塌陷分布、成因及其对工程建设的影响[J]. 中国地质,2024,51(1):184 – 202.

[5] 王忠忠,黄文龙,庄卓涵,等. 珠三角丘陵山区岩溶塌陷发育特征及地质模式——以广州北部为例[J]. 地质与勘探,2023,59(6):1304 – 1314.

Zhou D, Jing J J, Xing X. Study on the development characteristics and control countermeasure of ground collapse in gypsum mining area of Pizhou, Jiangsu province[J]. Geological Survey of China, 2018, 5(4): 99 – 106.

Dai J L, Lei M T, Jiang X Z, et al. Distribution and causes of karst collapse in Yangtze River Economic Belt and its influence on engineering construction[J]. Geology in China, 2024, 51(1): 184 – 202.

- Wang Z Z, Huang W L, Zhuang Z H, et al. Development features and geological models of karst collapse in hilly areas of the Pearl River Delta: A case study of northern Guangzhou[J]. *Geology and Exploration*, 2023, 59(6): 1304–1314.
- [6] 晏智伟, 苏昌, 张国栋, 等. 湖北应城石膏矿区地面塌陷发育规律及成因机制分析[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2025, 36(1): 57–64.
- Yan Z W, Su C, Zhang G D, et al. Analysis on the distribution and formation mechanism of ground collapse in gypsum mining area in Yingcheng of Hubei province[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2025, 36(1): 57–64.
- [7] 李京天, 朱凯, 肖先焯, 等. 水位下降诱发覆盖型岩溶塌陷发育机理[J]. *中国岩溶*, 2024, 43(2): 406–420.
- Li J T, Zhu K, Xiao X X, et al. Development mechanism of covered karst collapses induced by groundwater drawdown[J]. *Carsologica Sinica*, 2024, 43(2): 406–420.
- [8] 刘江, 姚院峰, 李银平. 工程建设中涉及盐矿采空区和压覆问题的讨论[J]. *矿业研究与开发*, 2013, 33(6): 58–62.
- Liu J, Yao Y F, Li Y P. Discussions on problems of goaf and overlaid resources in salt mine below construction projects[J]. *Mining Research and Development*, 2013, 33(6): 58–62.
- [9] 罗小杰, 沈建. 我国岩溶地面塌陷研究进展与展望[J]. *中国岩溶*, 2018, 37(1): 101–111.
- Luo X J, Shen J. Research progress and prospect of karst ground collapse in China[J]. *Carsologica Sinica*, 2018, 37(1): 101–111.
- [10] 宋二祥, 徐明, 吴志轩, 等. 某盾构施工岩溶场地地面塌陷机理和数值分析[J]. *地下空间与工程学报*, 2019, 15(6): 1874–1880.
- Song E X, Xu M, Wu Z X. Mechanism analysis and numerical simulation of ground collapse in a karst site under shield tunneling construction[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2019, 15(6): 1874–1880.
- [11] 薛芬芬, 谢婉丽, 王昱琛, 等. 土洞型地面塌陷数值模拟分析与机理研究[J]. *西北大学学报: 自然科学版*, 2024, 54(1): 84–92.
- Xue F F, Xie W L, Wang Y C. Numerical simulation analysis and mechanism study of soil cave type ground subsidence[J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2024, 54(1): 84–92.
- [12] Klimchouk A, Andrejchuk V. Karst breakdown mechanisms from observations in the gypsum caves of the Western Ukraine: implications for subsidence hazard assessment[J]. *Environmental Geology*, 2005, 48(3): 336–359.
- [13] Ouyang Z H. The role of potential soil cavity on ground subsidence and collapse in coal mining area[J]. *Journal of Coal Science and Engineering (China)*, 2010, 16(3): 240–245.
- [14] 汤志刚, 闫士民, 蔡承刚, 等. 徐州市地质灾害特征与防治研究[J]. *中国地质调查*, 2020, 7(1): 71–77.
- Tang Z G, Yan S M, Cai C G, et al. Characteristics and prevention of geological hazards in Xuzhou City[J]. *Geological Survey of China*, 2020, 7(1): 71–77.
- [15] 罗先启, 毕金锋. 地质力学模型试验理论与应用[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2016.
- Luo X Q, Bi J F. *Geomechanics Model Test Theory and Application*[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2016.
- [16] 程星, 黄润秋. 岩溶塌陷的地质概化模型[J]. *水文地质工程地质*, 2002, 29(6): 30–34.
- Cheng X, Huang R Q. Geological conceptive models of karst collapse[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2002, 29(6): 30–34.
- [17] 郭思源, 苏永华, 刘煌海, 等. 地下水位线倾斜的地面塌陷演化过程试验研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2023, 20(5): 1774–1785.
- Guo S Y, Su Y H, Liu H H, et al. Experiments on collapse evolution process of karst stratum with inclined groundwater level[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2023, 20(5): 1774–1785.
- [18] 徐坤, 苏永华, 刘煌海, 等. 深水位地下渗流诱发的地面塌陷模型试验[J]. *实验力学*, 2022, 37(2): 221–233.
- Xu K, Su Y H, Liu H H, et al. Model test of ground collapse induced by groundwater seepage at deep water level[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2022, 37(2): 221–233.
- [19] 张晨, 苏昌, 徐光黎, 等. 应城市金龙石膏矿区三维地质可视化模型的建立与应用[J]. *安全与环境工程*, 2024, 31(5): 146–152.
- Zhang C, Su C, Xu G L, et al. Establishment and application of 3D geological visualization model for Yingcheng Jinlong gypsum mining area[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2024, 31(5): 146–152.
- [20] 苏永华, 杨忠武, 刘阳阳, 等. 岩溶区地下双空洞诱发地面塌陷演化过程的试验研究[J]. *安全与环境学报*, 2024, 24(11): 4194–4205.
- Su Y H, Yang Z W, Liu Y Y, et al. Experimental study on the evolution process of ground collapse induced by underground double hollow cavities in karst regions[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2024, 24(11): 4194–4205.
- [21] 卢伟, 杨荣丰, 朱晓青, 等. 湖南湘潭某岩溶地面塌陷特征及成因分析[J]. *华南地质与矿产*, 2018, 34(3): 229–235.
- Lu W, Yang R F, Zhu X Q, et al. Analysis on the characteristics and cause of a karst ground collapse in Xiangtan, Hunan province[J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 2018, 34(3): 229–235.
- [22] 曹创华, 邓专, 康方平, 等. 地球物理信息在湘潭锰矿地质灾害评价中的作用[J]. *物探与化探*, 2018, 42(3): 631–639.
- Cao C H, Deng Z, Kang F P, et al. The evaluation of geological hazard of Xiangtan manganese ore deposit based on geophysical information[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2018, 42(3): 631–639.
- [23] 中华人民共和国自然资源部. DZ/T 0447—2023 岩溶塌陷调查规范(1:50 000)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.
- Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. DZ/T 0447—2023 Specification for Investigation of Karst Col-

lapse (1: 50 000) [S]. Beijing: Standards Press of China, 2023.

[24] 中华人民共和国国土资源部. DZ/T 0286—2015 地质灾害危险性评估规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.

Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. DZ/ T0286—2015 Specification of Risk Assessment for geological hazard[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015.

Causes, risk assessment and prevention strategies of ground collapse in a large manganese mine in Xiangtan

YANG Fan, FAN Yi, XU Dingfang, HE Yang, XIANG Feng
(Geological Survey Institute of Hunan Province, Changsha Hunan 410114, China)

Abstract: To investigate the precise prevention and control measures for ground collapse in mining areas, the authors in this study selected Xiangtan Manganese mining area as the study object. Geological environmental, hydrogeological, and engineering geological data for the study area were collected to analyze the developmental characteristics, influencing factors, and genetic mechanisms of ground collapse. The factor matrices for susceptibility and risk assessments were established, according to the main control factors of karst collapse (stratigraphic lithology, structure, overburden thickness, configuration and properties, hydrodynamic conditions) and the main control factors of goaf collapse (seam burial conditions, mining methods and mining degree, groundwater, faults). And susceptibility and risk assessments for karst collapse and goaf collapse were conducted, and targeted prevention and control measures were proposed. The results show that the study area contains 3 high risk areas of karst collapse, which can be treated by ground filling for cracks and collapse holes, grouting and filling of underground karst regions. Additionally, there are 8 high risk areas of goaf collapse that require reducing pumping and drainage volumes, managing water level fluctuations, and implementing curtain grouting or backfilling and water filling if necessary. The research results could provide references for the prevention and control of ground collapse in Xiangtan Manganese mining area, serving as a guide for risk assessment of ground collapse in other areas.

Keywords: karst collapse; goaf collapse, karst development characteristics; genetic mechanism; risk assessment
(责任编辑: 刘丹)