中国地质灾害与防治学报
THE CHINESE JOURNAL OF GEOLOGICAL HAZARD AND CONTROL
中国科技核心期刊
《中国科学引用文数据库》来源期刊
Caj-cd规范获奖期刊

湖北应城石膏矿区地面塌陷发育规律及成因机制分析

晏智伟，苏　昌，张国栋，徐志华，杨晓红，张　晨，盛　灿

Analysis on the distribution and formation mechanism of ground collapse in gypsum mining area in Yingcheng of Hubei Province

YAN Zhiwei, SU Chang, ZHANG Guodong, XU Zhihua, YANG Xiaohong, ZHANG Chen, and SHENG Can

在线阅读 View online: https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202307031

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

综合勘察方法在蒙华铁路石膏矿采空区选线勘察中的应用

Application of comprehensive survey methods in the gypsum mine goaf for Mengxi-Huazhong railway route selection

谢猛　中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(1): 58-64

广州夏茅村岩溶地面塌陷成因机理与塌陷过程分析

Analysis on formation mechanism and process of karst collapse in Xiamao Village, Guangzhou City of Guangdong Province

郭宇, 周心经, 郑小战, 李晶晶　中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(5): 54-59

广东佛山市高明区三洲盆地岩溶塌陷发育特征与时空分布规律

Characteristics and spatial-temporal distribution law of karst collapse in Sanzhou basin in Gaoming District of Foshan City, Guangdong Province

韩庆定, 罗锡宜, 易守勇, 邹杰　中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(3): 131-139

山东平邑“12·25”石膏矿坍塌事故救灾中的水文地质保障

${suggestArticle.titleEn}

常允新, 徐希强, 王振涛, 杨培杰, 刘洪亮, 张永伟　中国地质灾害与防治学报. 2018, 29(1): 67-71

西南红层地区地质灾害发育规律与成灾模式

Developing law and disaster modes of geohazards in red bed region of southwestern China: A case study of Yiliang County of Yunnan Province

徐伟, 冉涛, 田凯　中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(6): 127-133

三峡库区巫峡剪刀峰顺层岩质岸坡破坏模式分析

An analysis on the destruction mode of Wuxia scissors peak down the shore slope in the Three-Gorges Reservoir area

王平, 胡明军, 黄波林, 张枝华, 郑涛, 吴坤达, 毛博　中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 52-61

关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202307031
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 Zhiwei, SU Chang, ZHANG Guodong, 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.

湖北应城石膏矿区地面塌陷发育规律及成因机制分析

晏智伟[1,2], 苏　昌[1,2], 张国栋[3], 徐志华[3], 杨晓红[1,2], 张　晨[1,2], 盛　灿[1,2]
(1. 资源与生态环境地质湖北省重点实验室(湖北省地质局), 湖北 武汉　430034; 2. 湖北省地质局第六地质大队, 湖北 孝感　432100; 3. 湖北长江三峡滑坡国家野外科学观测研究站, 湖北 宜昌　443002)

摘要: 矿区地面塌陷地质灾害对道路、管道等基础设施及居民生命财产和矿区安全生产具有重要的影响。湖北应城石膏矿距今有近400年的开采历史, 长期地下开采形成了较大范围的采空区和地面塌陷。在系统收集矿区前期资料和补充调(勘)查的基础上, 采取多因子综合分析和地质分析法, 分析了地面塌陷类型及发育分布规律, 基于“三带”理论, 对老窿型和采空型地面塌陷的成因机制进行了分析。研究表明, 应城石膏矿地面塌陷主要为小-中型, 地面塌陷分为采空型和老窿型。采空型地面塌陷主要包含矿柱破坏型和弯曲沉降型两类, 矿柱破坏型主要为房柱法开采导致矿柱和顶板的破坏垮落, 弯曲沉降型主要为长壁式充填法开采充填率不足导致顶板垮落。采空型地面塌陷的主要控制因素为采空区充填情况和采深采厚比, 当采深采厚比小于60时, 地表多发育塌陷现象, 而随着采深采厚比的增大, 采空区地面塌陷逐渐减少; 老窿型地面塌陷变形程度取决于老窿是否与规模化采空区连通及是否充水。研究成果对石膏矿风险管理、安全评估、监测预警体系构建等具有指导意义。

关键词: 石膏矿; 采空区; 地面塌陷; 发育规律; 成因机制
中图分类号: P694　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1003-8035(2025)01-0057-08

Analysis on the distribution and formation mechanism of ground collapse in gypsum mining area in Yingcheng of Hubei Province

YAN Zhiwei[1,2], SU Chang[1,2], ZHANG Guodong[3], XU Zhihua[3], YANG Xiaohong[1,2], ZHANG Chen[1,2], SHENG Can[1,2]
(1. *Hubei Key Laboratory of Resources and Eco-Environment Geology* (*Hubei Geological Bureau*), *Wuhan*, *Hubei*, 430034, *China*; 2. *The Sixth Geological Brigade of Hubei Geological Bureau*, *Xiaogan*, *Hubei*, 432100, *China*; 3. *National Field Observation and Research Station of Landslides in Three Gorges Reservoir Area of Yangtze River*, *Yichang*, *Hubei*, 443002, *China*)

Abstract: Geological disasters of ground collapse in mining area have a significant impact on infrastructure, such as roads, pipelines, residents' lives and property, and safety production in mining area. Yingcheng gypsum mine in Hubei Province has a

收稿日期: 2023-07-23; **修订日期:** 2023-10-20　　**投稿网址:** https://www.zgdzzhyfzxb.com/
基金项目: 应城市膏盐矿区地面塌陷成因机制及防控技术研究项目(KJ2022-23); 应城市膏盐矿区地面塌陷及地面沉降地质灾害勘查项目(鄂地质环境[2019]1号)
第一作者: 晏智伟(1996—), 男, 江西鹰潭人, 水文地质学专业, 硕士, 助理工程师, 主要从事地质灾害防治、调查评价与地质环境保护等工作。E-mail: 1768607167@qq.com
通讯作者: 苏　昌(1980—), 男, 湖北钟祥人, 地质工程专业, 硕士, 正高级工程师, 主要从事地质灾害调查评价与监测预警等相关工作。E-mail: 82925492@qq.com

mining history of nearly 400 years, and long-term underground mining has formed a large range of goaf and ground collapse. Based on the systematic collection of pre-mining data and supplementary survey, the types and distribution rules of ground collapse were analyzed by multi-factor comprehensive and geological method. Based on the theory of "three zones", the cause mechanism of ground collapse of old hole type and mining cavity type were studied. The research shows that the ground collapse of gypsum mine is mainly small to medium in Yingcheng, and the geological hazards of ground collapse are divided into mining cavity type and old hole type. The caving type of ground collapse mainly includes two types: pillar breakage type and bending settlement type. Pillar breakage type is mainly the pillar and roof collapse caused by room and pillar mining, and bending settlement type is mainly the roof collapse caused by insufficient filling rate of longwall filling method mining. The main controlling factors of goaf-type surface collapse are the goaf filling condition and the ratio of depth to thickness. When the ratio of depth to thickness is less than 60, the surface collapse occurs more often, and with the increase of the ratio of depth to thickness, the ground collapse gradually decreases. The degree of subsidence deformation in the old hole type depends on whether the old hole is connected with the large-scale goaf and whether it is filled with water. The research results have guiding significance for gypsum mine risk management, safety assessment, monitoring and early warning system construction.

Keywords: gypsum mine；goaf；ground collapse；distribution law；genetic mechanism

0 引言

矿产开采诱发的地面塌陷现象十分普遍，加强对矿区地面塌陷研究已成为矿区可持续发展的重要课题之一。矿区地面塌陷与区域地质背景、矿床特征、开采方式和深度、采空区处置措施、水文地质条件等密切相关[1−2]。应城石膏矿位于湖北省云梦应城盆地的西北缘，面积约 30 km^2，距今已有近 400 年开采历史。1949 年以前多为老窿开采，1960—1970 年，老窿塌陷发育最多，2013—2016 年，采空塌陷发育最多，早期的老窿型开采和后期的规模化开采相续形成了应城矿区地面塌陷。矿区内多处地面塌陷，表现为陷坑和地面不均匀沉降，造成道路和管线破坏、房屋开裂、农田毁坏等，对当地居民生产生活、道路和管道基础设施安全运营等造成了较大的影响。针对膏盐矿区地面塌陷，何伟等[3]根据采动岩层内冒落带、裂隙带和弯曲带的“三带”理论，结合实测资料，建立数值模型，对地下开采诱发的地表变形进行了分析。刘硕等[4] 基于 Hoek-Brown 强度准则，建立数值仿真模型，结合山东肥城某石膏矿工程实践，评价了硬石膏采房群的整体稳定性。夏开宗等[5]针对采用房柱法开采石膏矿体，将石膏矿柱简化为满足西原模型的黏弹塑性体流变模型，建立了石膏矿矿柱−护顶层支撑体系的流变力学体模型，认为矿柱的塑性大变形流变特性对采空区的失稳起着至关重要的作用。陈乐求等[6]针对矿柱法开采石膏矿体，开展了石膏矿采空区充填加固技术的试验研究。刘轩廷等[7]针对充填开采法矿区，在考虑了充填体对间柱侧压作用的基础上，建立了顶板−间柱支撑体系的力学模型，探究了充填体作用下支撑体系的破坏机制。魏军才[8] 对邵东县城石膏矿老采空区地面变形的成因进行了分析，认为顶板岩性、地质构造是地面变形的基础条件，不规范开采是导致地面变形的主要诱发因素，地面不断加载及地下水动力作用加剧了地面变形的产生。郑怀昌等[9] 通过对石膏矿采空区顶板大面积冒落情况的调查，发现矿区水文地质和工程地质对顶板的冒落有很大影响，冒落也多集中于丰雨季，认为隔离矿柱对控制顶板大面积冒落及向相邻采空区扩展作用重大。章求才等[10]针对衡山石膏矿经过多年开采，于 2009 年发生了大面积地面塌陷，分析了顶板破断机理及其影响因素。郑怀昌等[11]结合岩体力学的相关理论和数值模拟技术，认为石膏矿柱流变特性使其强度变低，采区扩大，石膏矿柱应力增大，诱发了石膏矿采场顶板冒落及大规模采空区顶板冒落。张向阳[12] 基于 Kachanov 蠕变损伤理论对采空区顶板的蠕变损伤过程进行了解析分析，采空区顶板的蠕变损伤断裂经历断裂孕育和裂隙扩展两个阶段。贺桂成等[13]采用 FLAC^{3D} 对衡山县石膏矿闭坑前后空区引发的地面塌陷机理进行了分析，认为闭坑后矿柱不足以支承上覆围岩压力而引起采空区顶板垮落，形成垮落拱，最终在地表形成“漏斗型”塌陷区。Castellanza 等[14]针对废弃矿山遗留矿柱会受到风化作用的特性，根据膏岩试验数据拟合结果，建立风化模型对矿柱失稳时间预测。

上述工作为膏盐矿区地面塌陷地质灾害研究奠定了较好的基础，然而，仍然存在有不足之处：对诱发石膏矿地面塌陷地质灾害成因机制的分析还存在不足，尤其

是老窿对地面塌陷地质灾害影响的成因机制分析成果较少，由于不同区域的石膏矿，受膏组成矿特征、开采历史、开采方式等影响，地面塌陷地质灾害特征和成因机制具有明显的差异性，还需要结合实际情况进一步开展研究。

为此，针对应城石膏矿区开展野外补充调查、工程地质测绘，进一步掌握矿区地质灾害的实际情况，采取内外动力多因子关联分析法和地质分析法，基于采动岩层内冒落带、裂隙带和弯曲带的“三带”理论，分析地面塌陷类型及发育分布规律，研究采空型地面塌陷地质灾害的主要影响因素，对老窿型和采空型地面塌陷的成因机制进行分析，对石膏矿风险管理和安全评估、监测预警体系构建具有一定的参考意义。

1　应城石膏矿分布及成矿特征

1.1　石膏矿分布特征

应城市地处鄂中丘陵与江汉平原的过渡地带，整体地势为西北高，东南低，地貌类型按成因划分为河流冲积平原和丘陵两类。应城石膏矿位于湖北省云应盆地的西北缘，应城市现有 10 个膏矿开采区，矿区主要分布于丘陵地区，主要开采膏组为 G-1—G-3、G-5 和 G-7—G-11，开采矿区分布如图 1 所示。矿区目前主要开采的含矿层位是谢家湾下含矿层和谢家湾上含矿层，谢家湾下含矿层含纤维石膏膏组五层 G-1—G-5，总厚 15.90 ~ 91.10 m；谢家湾上含矿层含纤维石膏膏组八层 G-6—G-13，总厚 23.92 ~ 181.51 m。

1.2　成矿特征

应城石膏矿膏组矿体总体产状比较平缓，一般倾角为 6° ~ 8°，部分倾角近于或大于 10°，与较深色的围岩接触界线较为明显，接触面较平整，极易从接触界面与围岩分开，其产状与围岩大体一致，见图 2(a)，局部与围岩有极微小角度斜交，见图 2(b)，在红色地层中，有时穿过层理插入不同围岩中，见图 2(c)。

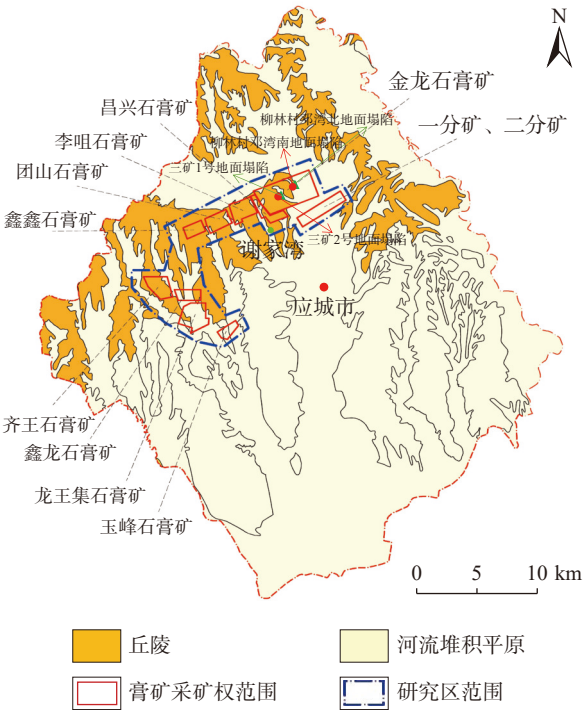
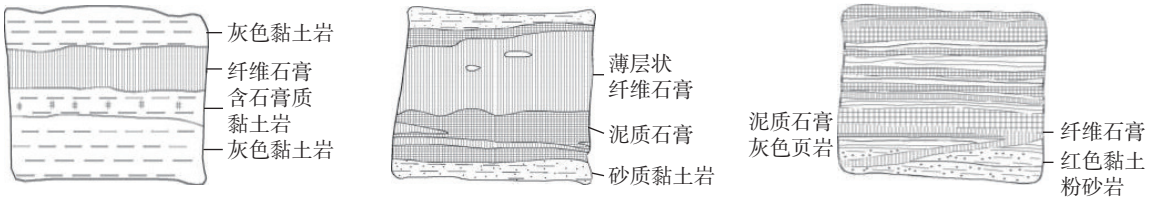


图 1　矿区地形地貌及矿区分布图

Fig. 1　The distribution map of landforms in the mining area

膏组矿体主要是薄层状、似层状纤维石膏矿层，厚度稳定，一般为 2 ~ 25 cm，最厚可达 47 cm 左右，延长较远，相邻两个膏组间距 8 ~ 17 m。矿体围岩以泥质粉砂岩和泥质石膏岩为主，单轴抗压强度为 2.5 ~ 20.7 MPa，岩石强度较低，属软岩、极软岩。



（a）纤维石膏与围岩平整接触　　（b）纤维石膏与围岩极微小角度接触　　（c）纤维石膏斜插入围岩中

图 2　应城市石膏矿膏组成矿特征

Fig. 2　The characteristics of gypsum composition in Yingcheng City

2　地面塌陷发育特征及分布规律分析

根据调查，应城市膏矿开采区共发育有 27 处地面塌陷，主要分布于城北街道办事处和杨岭镇境内（图 1），规模以小—中型为主，其中小型 11 处，中型 16 处，如图 3b 所示。

2.1　老窿型地面塌陷坑

由于私人无序开采，导致矿区内留下许多废弃的井筒、巷道，截至 1960 年已形成大小老窿约 240 处，私人矿井开采面大都呈扇形展布且开采层埋深浅，一般小

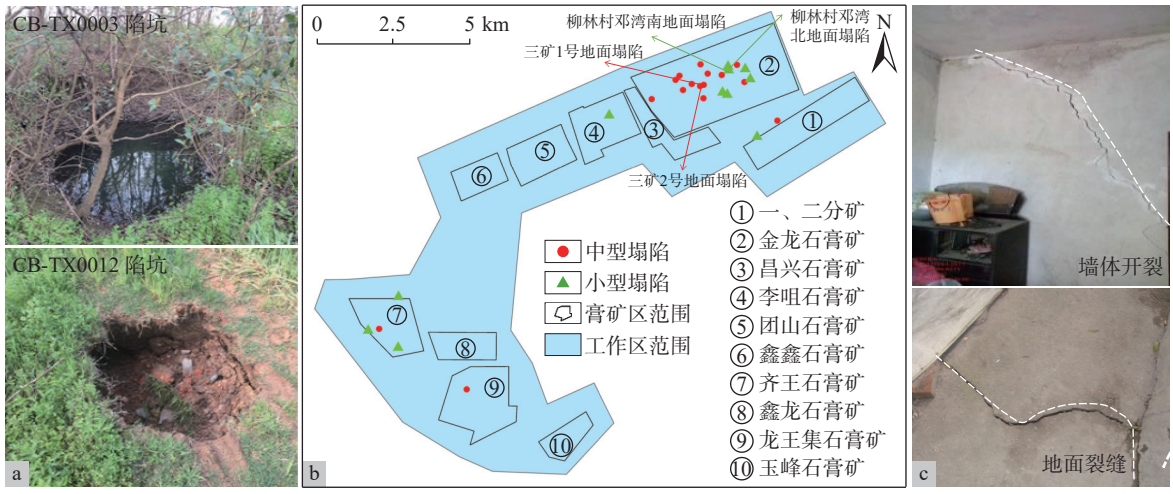


图 3 应城市膏矿区塌陷规模等级分布图及典型塌陷坑

Fig. 3 The grade distribution and typical collapse pit in the mining area in Yingcheng City

于 100 m, 由于开采深度较浅, 采空区顶板变形对地面的影响较大, 上覆岩体破坏后容易在地面产生塌陷坑。应城市老窿型塌陷共 18 处, 陷坑整体呈 NE 向分布, 与坑道展布方向基本一致, 在地表多呈近圆形或不规则状, 一般上大下小, 上口直径 2 ~ 2.5 m, 大者达 5 m, 坑深 2 ~ 3 m, 大者达 10 m, 表现为直径大小和深度不等的陷坑单体或群体, 主要发育在浅埋采空区和老窿分布范围内, 如柳林村邓湾南塌陷点(图 3a 中 CB-TX0003), 为椭圆形塌陷单坑, 发育在老窿周边, 邹郭村黄花山水库塌陷点(图 3a 中 CB-TX0012), 为圆形单坑, 地下开采深度仅 35 m。

2.2 采空型地面塌陷

采空型地面塌陷主要表现为地面不均匀沉陷, 其变形强度较低, 主要表现为地基下沉, 地面房屋和道路出现开裂变形、农田毁坏等。应城市采空型塌陷共 9 处, 其变形通常较为缓慢, 但通过逐年累积, 这些破坏日趋严重, 部分房屋已成为危房, 直接影响居民住户的居住和生产生活条件。有的裂缝贯穿墙体, 严重危及房屋整体安全(图 3c)。另外, 区内由于不均匀地面沉降使部分农田出现倾斜, 失水现象较为严重。这类变形在矿区分布十分普遍, 主要出现在深埋采空区范围内或陷坑周边。

2.3 地面塌陷发育规律分析

通过调查和统计分析, 应城市企业规模化开采形成采空区面积约 16 km^2, 由于历史开采形成的老窿大约 240 处, 应城市老窿及规模化开采采空区空间分布如图 4 所示, 统计分析表明, 下方为规模化开采采空区的老窿共 128 个, 其中发生老窿型塌陷共 18 处, 占比约 12.5%; 下方无规模化开采采空区的老窿共 112 个, 未发

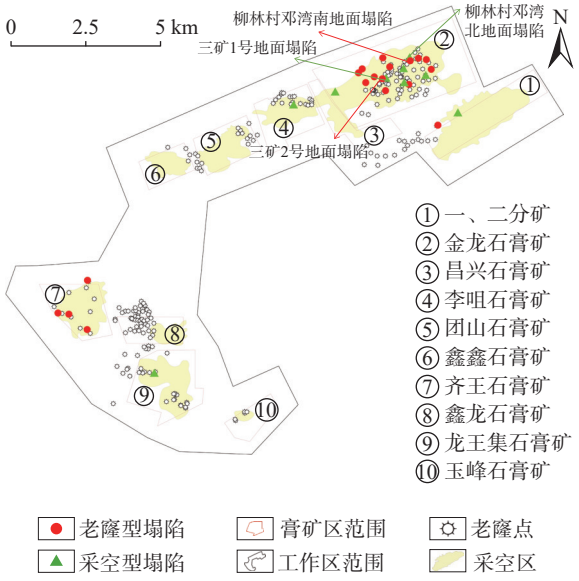


图 4 地面塌陷与老窿及采空区空间分布

Fig. 4 The spatial distribution of collapse and old holes and goaf

生老窿型地面塌陷, 说明老窿型地面塌陷与下方大范围采空区密切相关。

通过统计分析, 应城市共发育 9 处采空型地面塌陷, 其中 6 处地面塌陷采深采厚比小于 60, 2 处地面塌陷采深采厚比为 60 ~ 80, 1 处地面塌陷采深采厚比为 80 ~ 100, 该处地面塌陷发育于李咀石膏矿区, 虽然采深采厚比较大, 推测是由于其他扰动因素的增强, 或者李咀石膏矿区的开矿时间比较早, 回填率较低, 导致了该地面塌陷的发育(图 5)。随着采深采厚比的减小, 采空区地面塌陷逐渐增多, 且采空型塌陷主要发育在采深采厚比小于 60 的区域, 且采深采厚比越小, 地面塌陷越容易发育, 地表变形越强烈, 塌陷影响越大。

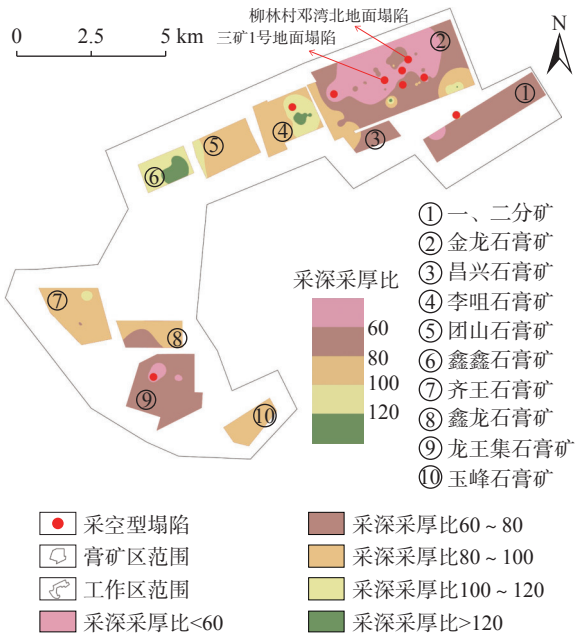


图 5　采空型地面塌陷与采深采厚比分布图

Fig. 5　The distribution of ground collapse and mining depth to thickness ratio

3　地面塌陷成因机制分析

石膏矿开采工作面初次来压后，在其不断推进过程中，上覆岩体的破坏主要可分为三带：冒落带、断裂带和弯曲带。冒落带是采出空间顶板岩层在自重力作用下垮塌，堆积在采空区，形成冒落带；断裂带随着井下石膏矿采区的扩大而逐步向上发展，当到一定范围时，断裂带高度达到最大；弯曲带即弯曲下沉带，位于断裂带之上直至地表，弯曲带中的岩体移动基本上是成层的、整体性移动。

3.1　老窿型地面塌陷成因机制分析

3.1.1　充水型老窿塌陷

充水型老窿塌陷下方规模化开采巷道采空区多有充填且埋深较深，下方规模化开采采空区冒裂带向上发展，但由于规模化开采采空区与老窿埋深间隔较大，冒落带、断裂带之和小于两者之间埋深间隔，规模化采空区并未与老窿连通(图 6)。老窿采空后，采区内是半充填状态，或局部未充填状态，闭坑后，洞口被回填，但回填土并没有填满采区，仅填满老窿竖井，地下水通过透水的竖井回填土以及裂隙不断流入采空区，直至采空区完全饱水。采空区内的石膏层与泥岩夹层是隔水层，此时，老窿采空区内是饱水的，老窿回填后经过多年的沉积压密作用下处于相对平衡状态，老窿塌陷地表变形表现为小水坑常年积水无明显变化、周边地表无明显变形及农田无漏水现象，如图 3a 中 CB-TX0003 所示柳林村邓湾南地面塌陷点。

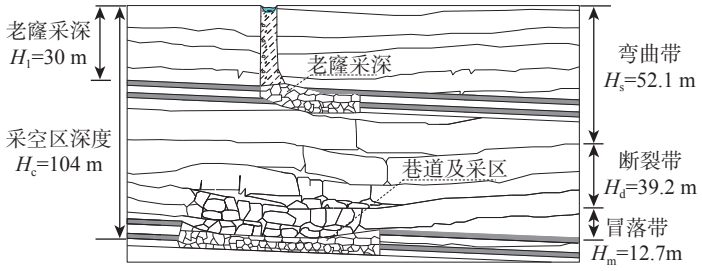


图 6　充水型老窿型地面塌陷成因示意图

Fig. 6　The genetic diagram of ground collapse with water filled old holes

3.1.2　不充水型老窿塌陷

不充水型老窿塌陷下方存在规模化开采巷道采空区，且下方规模化开采采空区与老窿埋深间隔较小，冒落带、断裂带之和远大于两者之间埋深间隔，规模化采空区直接与老窿连通(图 7)，大都表现为老窿洞口缓慢塌陷，具有发展性。由于老窿底部与规模化采空区连通，地下水的流动带动土中的细颗粒运移，导致老窿内负压，竖井中的土体向下垮落变形，慢慢扩展到地表，表现为地表塌陷坑持续扩大。此外，由于部分膏矿企业持续对规模化开采采空区进行抽水，老窿内的积水被疏干后，连接第四系潜水层、承压含水层以及基岩裂隙水与规模化开采采空区的通道，地下水缓慢的在此通道中不断的流动，从地表通过老窿到采空区，再被抽出到地表，老窿中回填的细颗粒也不断地发生移动，导致此类塌陷，经回填后一段时间还会再次产生塌陷，如图 8 所示新建街社区三矿 2 号地面塌陷点。

3.2　采空型地面塌陷成因机制分析

应城石膏矿规模化开采形成的采空区，开采深度较深，这种采空区造成的塌陷一般表现为地面的不均匀沉降，弯曲带影响地表，伴随地面下沉的一些表现形式为房屋裂缝、地表裂缝变形、农田失水等现象，影响范围一般比较大，如新建街社区三矿 1 号地面塌陷点。

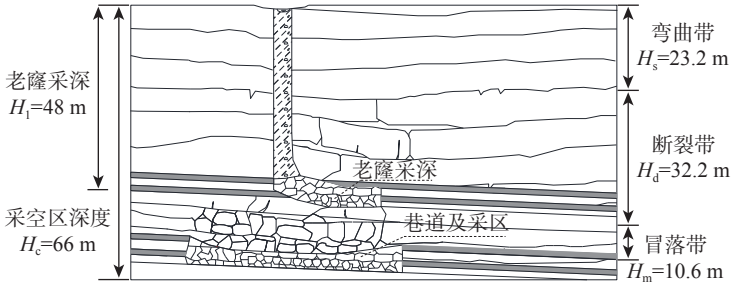


图 7　不充水型老窿型地面塌陷成因示意图

Fig. 7　The genetic diagram of ground collapse with water unfilled old holes

图 8　新建街社区三矿 2 号地面塌陷

Fig. 8　The ground collapse No.2 in Xinjian street community

3.2.1　矿柱破坏型采空塌陷

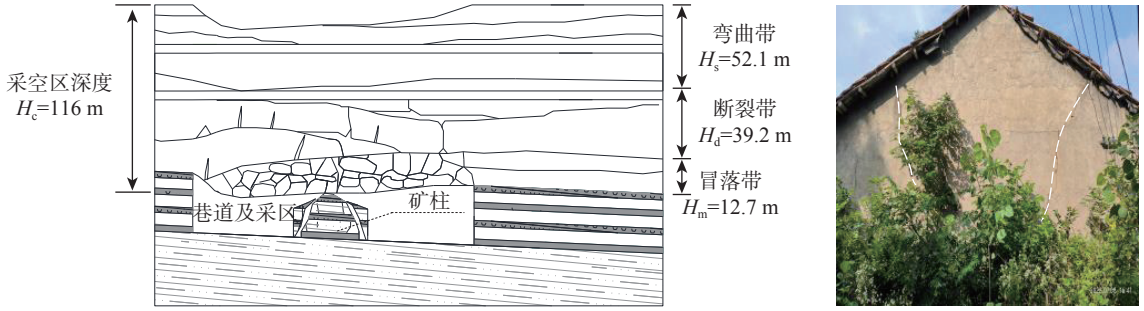
房柱法开采导致的采空区失稳主要表现为矿柱和顶板的破坏垮落。采用房柱式采矿过程中，随着矿石不断采出和矿柱侧向应力的逐渐消减，采场上覆岩层的应力转移到矿柱上，使矿柱应力增加并产生压缩变形。当矿山企业闭坑后，由于矿柱被回采破坏导致矿柱强度降低，个别或局部矿柱破坏从而引起顶板冒落。该采场顶板及上覆岩层压应力逐渐转移到相邻矿柱，导致相邻矿柱也相继遭到破坏，顶板冒落范围进一步扩大，从而引起采空区顶板垮落并通过三带影响逐渐传递到地面，地表主要见地面沉降、隆起和建筑物开裂等，如柳林村邓湾北地面塌陷点(图 9)。

3.2.2　弯曲沉降型采空塌陷

长壁式充填法开采的采空区主要采用矸石充填，将开采洗选过程中产生的矸石固体废物作为骨料充填入采空区，进而改善采场围岩变形和覆岩沉降程度，有效控制地表沉陷。因此采空区充填体的充填率及其强度对上覆岩层的运动状态起着至关重要的作用，不同充填率会导致上覆岩层运移结构形态和特征都存在明显区别。当采空区充填率低时，充填体不能对顶板下沉起到支撑作用，随着采空区范围的扩大，采空区顶板逐渐垮落破碎，与采空区固体充填体相互混合形成新的支撑体，直到采空区充填体被压密实，支撑体的压缩和采空区顶板的下沉达到平衡状态。此过程中采空区顶板随开采范围的扩大发生持续破断，形成的冒落带、断裂带及弯曲带随着工作面的推进而不断向上覆岩层传递，直到这种变形发展到地面，地表主要表现为建筑物开裂、地表裂缝等，如新建街社区三矿 1 号地面塌陷点(图 10)。

4　结论

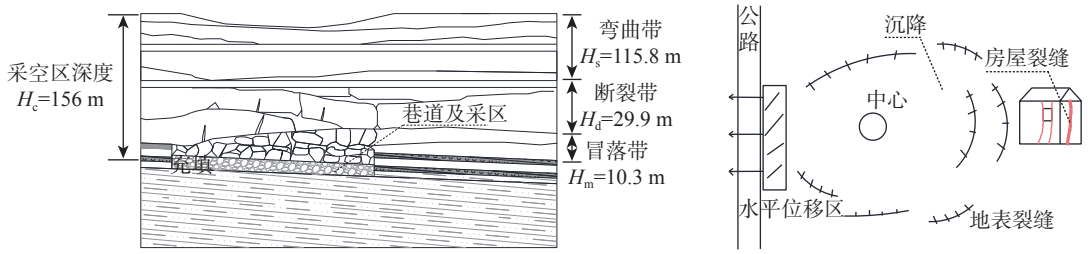
(1)地面塌陷主要表现两种形式：一种是塌陷坑，在地表多呈近圆形或不规则状，表现为直径大小和深度不



（a）矿柱破坏型　　（b）房屋裂缝

图 9　矿柱破坏型采空塌陷成因机制

Fig. 9　The formation mechanism of goaf collapse caused by pillar failure



（a）弯曲沉降型　　（b）地表变形

图 10　弯曲沉降型采空塌陷成因机制

Fig. 10　The formation mechanism of bending goaf collapse

等的陷坑单体或群体，主要发育在浅埋采空区和老窿分布范围内；另一种是地面不均匀沉陷，其变形强度较低，主要表现为地基下沉，地面房屋、道路等地物出现开裂变形、农田毁坏。

（2）地面塌陷发育规律：老窿型地面塌陷与下方大范围采空区密切相关，当老窿下方存在规模化开采采空区且埋深较浅时，老窿与采空区连通，老窿井口附近形成地面塌陷；采空型地面塌陷的发生则受采深采厚比的影响较大，随着采深采厚比的减小，采空区地面塌陷逐渐增多，且采空型地面塌陷主要发育在采深采厚比小于 60 的区域。

（3）老窿型地面塌陷包含充水型和不充水型两种类型，充水型老窿塌陷下方规模化开采巷道采空区多有充填且埋深较深，冒裂带未影响至老窿，老窿与大范围采空区不连通，塌陷后表现为小水坑常年积水且塌陷趋于稳定；不充水型老窿塌陷下方存在规模化开采巷道采空区，且由于冒裂带的影响与老窿采空区连通，塌陷后表现为地表塌陷坑持续扩大，或者人工充填后一段时间又再次塌陷，重复回填又塌陷。

（4）采空型地面塌陷主要与矿柱破坏和充填率相关。矿柱破坏主要是矿柱在闭坑前被回采导致强度降低，局部破坏垮塌，采空区顶板垮落并通过三带影响逐渐传递到地面，主要表现为地面沉陷、隆起和建筑物开裂等；在充填率低的情况下，上覆岩土体在重力作用下，逐渐形成冒落带、断裂带以及弯曲带并随着工作面的推进而不断向上覆岩层传递，直至变形发展到地面，主要表现为建筑物开裂、地表裂缝等。

参考文献（References）：

［1］ 汤志刚，蔡承刚，王艳红，等. 基于光纤传感的石膏矿地面塌陷监测预警系统[J]. 中国地质灾害与防治学报，2022，35(5)：93-101. ［TANG Zhigang，CAI Chenggang，WANG Yanhong，et al. Monitoring and warning system for ground subsidence of gypsum mine based on fiber sensing[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control，2022，35(5)：93-101.（in Chinese with English abstract）］

［2］ 杨宜军，侯轶攀，李业. 荆门市石膏矿采空地面塌陷破坏模式及影响因素分析［J］. 资源环境与工程，2023，37(1)：73－81. ［YANG Yijun，HOU Yipan，LI Ye. Failure mode and influencing factors of mined-out ground collapse in gypsum mine in Jingmen City［J］. Resources Environment and Engineering，2023，37(1)：73－81.（in Chinese with English abstract）］

［3］ 何伟，王星，李同鹏. 某石膏矿地下开采诱发的地表沉降分析［J］. 金属矿山，2021(6)：210－215. ［HE Wei，

WANG Xing, LI Tongpeng. Analysis of surface subsidence induced by underground mining in a gypsum mine [J]. Metal Mine, 2021(6): 210－215. (in Chinese with English abstract)]

[4] 刘硕, 王汉勋, 张彬, 等. 基于 Hoek-Brown 强度准则的硬石膏采房群稳定性分析 [J]. 长江科学院院报, 2020, 37(3): 162－169. [LIU Shuo, WANG Hanxun, ZHANG Bin, et al. Stability analysis of anhydrite cavern group based on hoek-brown failure criterion [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2020, 37(3): 162－169. (in Chinese with English abstract)]

[5] 夏开宗, 陈从新, 刘秀敏, 等. 石膏矿矿柱-护顶层支撑体系的流变力学模型分析 [J]. 岩土力学, 2017, 38(10): 2923－2930. [XIA Kaizong, CHEN Congxin, LIU Xiumin, et al. Rheological mechanical model of pillar-protective roof supporting system in gypsum mines [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(10): 2923－2930. (in Chinese with English abstract)]

[6] 陈乐求, 彭振斌, 徐力生, 等. 石膏矿采空区充填加固技术的试验研究 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2009, 20(4): 72－77. [CHEN Leqiu, PENG Zhenbin, XU Lisheng, et al. Experimental study on the filling reinforcement techniques in gypsum mined-out area [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2009, 20(4): 72－77. (in Chinese with English abstract)]

[7] 刘轩廷, 陈从新, 刘秀敏, 等. 充填开采下顶板-间柱支撑体系的突变失稳分析 [J]. 岩土力学, 2021, 42(9): 2461－2471. [LIU Xuanting, CHEN Congxin, LIU Xiumin, et al. Analysis of catastrophic instability of roof-rib pillar support system under backfill mining [J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(9): 2461－2471. (in Chinese with English abstract)]

[8] 魏军才. 邵东县城石膏矿老采空区地面变形原因及防治对策 [J]. 湖南地质, 2001, 20(1): 47－52. [WEI Juncai. Discussing about the reasons of surface deformation in the empty area of gypsum deposit in Shaodong, Hunan and how to prevent them [J]. Hunan Geology, 2001, 20(1): 47－52. (in Chinese with English abstract)]

[9] 郑怀昌, 张晓君, 王劼, 等. 采空区顶板大面积冒落规律研究 [J]. 化工矿物与加工, 2005, 34(1): 8－11. [ZHENG Huaichang, ZHANG Xiaojun, WANG Jie, et al. Study on the rule caused by roof fall over great extent of worked-out area in mine [J]. Industrial Minerals and Processing, 2005, 34(1): 8－11. (in Chinese with English abstract)]

[10] 章求才, 贺桂成, 黄炳香, 等. 浅埋石膏矿顶板破断机理及应用研究 [J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(4): 773－779. [ZHANG Qiucai, HE Guicheng, HUANG Bingxiang, et al. Investigation on the fracture mechanism of the immediate roof in shallow buried gypsum mine and its application [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2018, 35(4): 773－779. (in Chinese with English abstract)]

[11] 郑怀昌, 张晓君, 刘志河. 石膏矿山顶板破坏机理探讨 [J]. 金属矿山, 2007(7): 23－24. [ZHENG Huaichang, ZHANG Xiaojun, LIU Zhihe. Discussion on roof failure mechanism of gypsum mines [J]. Metal Mine, 2007(7): 23－24. (in Chinese with English abstract)]

[12] 张向阳. 采空区顶板蠕变损伤断裂分析 [J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2009, 28(5): 777－780. [ZHANG Xiangyang. Analysis of creep damage fracture of upper roof [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2009, 28(5): 777－780. (in Chinese with English abstract)]

[13] 贺桂成, 刘永, 张志军, 等. 衡山石膏矿地面塌陷机理的 FLAC^{3D} 模拟 [J]. 矿业研究与开发, 2013, 33(1): 73－76. [HE Guicheng, LIU Yong, ZHANG Zhijun, et al. FLAC^{3D} simulation of mechanism of surface subsidence in a gypsum mine, Hengshan [J]. Mining Research and Development, 2013, 33(1): 73－76. (in Chinese with English abstract)]

[14] CASTELLANZA R, GEROLYMATOU E, NOVA R. An attempt to predict the failure time of abandoned mine Pillars [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2008, 41(3): 377－401.