

郭杰华, 蒋忠诚, 刘新建, 等. 湘中娄底市岩溶塌陷特征及影响因素研究[J]. 中国岩溶, 2024, 43(4): 911-921.

DOI: 10.11932/karst20240408

湘中娄底市岩溶塌陷特征及影响因素研究

郭杰华¹, 蒋忠诚^{2,3,4}, 刘新建¹, 廖红为^{2,4}, 李程^{2,3}

- (1. 湖南省自然资源调查所, 湖南 娄底 417000; 2. 中国地质科学院岩溶地质研究所, 广西 桂林 541004;
3. 广西平果喀斯特生态系统国家野外科学观测研究站, 广西 平果 531406;
4. 自然资源部、广西岩溶动力学重点实验室, 广西 桂林 541004)

摘要: 湘中娄底市记录有281起岩溶塌陷事件以及上万个塌陷坑, 是我国岩溶塌陷非常严重的城市之一。所有岩溶塌陷中, 矿区岩溶塌陷有222起, 占总数的79%, 此外, 还有地基工程造成的岩溶塌陷和降雨渗透潜蚀造成的岩溶塌陷。由此总结出娄底市具有真空吸蚀、浮托软化、荷载振动、渗透潜蚀4种岩溶塌陷发生模式, 各模式均有4个致塌过程。其中, 真空吸蚀塌陷和浮托软化塌陷主要为矿山活动所致, 分别因矿区抽排水和矿区闭坑后回水所诱发; 荷载振动塌陷主要为桩基施工等荷载外动力作用诱发, 渗透潜蚀塌陷多为强降雨诱发的自然塌陷。岩溶塌陷的影响因素包括基础因素和诱发因素两个方面, 基础因素有地层岩性、岩溶地貌、岩溶水富水性、与矿区相关性等, 构成岩溶塌陷易发区的关键影响因素; 诱发因素主要有矿区抽排水、闭坑矿区回水、工程振动、降雨过程等, 其强度影响岩溶塌陷发生的时间、区域范围和规模。娄底市岩溶塌陷频发、突发, 建议构建岩溶塌陷监测预警系统, 科学编制岩溶塌陷防治规划和灾害应急预案, 强化岩溶塌陷风险管理, 保持岩—土—洞—水—气间的动态平衡。

关键词: 岩溶塌陷; 塌陷模式; 影响因素; 矿山活动; 湘中娄底市

创新点: 梳理了岩溶塌陷事件、岩溶塌陷、塌陷坑三者的时空关系, 总结了市域4种致塌模式, 区分了基础因素与诱发因素, 为岩溶塌陷应急处治、防治规划、风险管控提供了依据。

中图分类号: P642.25 文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2024)04-0911-11

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

岩溶塌陷是岩溶地区特有的地质灾害, 由于岩溶发育, 地下岩溶空间周围易发生岩、土、洞、水、气相互作用, 导致岩溶空隙上方的塌陷体受到的致塌力超过其抗塌力, 从而造成塌陷体失稳。塌陷体的抗塌力易受外部环境的影响, 其影响因素有地下水渗透力、震动液化及空气正负压力等^[1-3]。因此, 岩溶

塌陷主要是在荷载、重力、潜蚀、冲爆、溶蚀及真空吸蚀等多重作用效应下孕育—发展—产生的非线性动力过程^[4]。20世纪80年代中期, 康彦仁、项式均等按塌陷产生的主导因素和受力状态, 将岩溶地面塌陷划分为自然塌陷和人为塌陷两个大类和八种类型及相应八种机理^[5-6]。后续学者进一步研究不同地区岩溶塌陷的影响因素如暴雨、地下水超采、工程施工、矿区疏干排水等对岩溶水及上覆土层甚至岩

基金项目: 国家自然科学基金项目(批准号: U21A2016)中国地质调查局地质调查项目(DD20160254)。

第一作者简介: 郭杰华(1973—), 男, 高级工程师, 研究方向: 水工环地质, E-mail: 806857397@qq.com。

通信作者: 蒋忠诚(1962—), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 岩溶生态学。E-mail: jzhongcheng@mail.cgs.gov.cn。

收稿日期: 2024-03-24

层的动力作用,以及岩溶塌陷地质灾害发生机制及造成的损失^[7-8],推动区域岩溶塌陷发生机理研究。

湘中娄底市为典型的岩溶区,不但岩溶地貌发育,而且素有“百里煤海”、“世界锑都”之称,有15个煤矿区369家煤矿、8个锑矿、少量石膏矿等,岩溶作用叠加矿山活动,导致岩溶塌陷频发多发。据调查,共发生岩溶塌陷事件281起,有记录的塌陷坑超过万个,许多塌陷事件持续几十年、重复几十次,形成的塌陷坑呈集群式分布,大部分在塌陷发生后不久即被回填,但目前仍可见3000多个塌陷坑。岩溶塌陷已造成5人死亡,毁房4333间,毁田5355.21 hm²,毁路2180 m,直接经济损失数亿元,给当地人民造成重大危害及深远影响。虽然前人对湘中娄底市的岩溶塌陷开展了较多的调查研究^[9-11],但以个别典型岩溶塌陷的分析为主,而对整个娄底市岩溶塌陷的发生模式及影响因素缺乏系统性研究。本文拟在整个湘中娄底市岩溶塌陷时空分布规律梳理的基础上,分析总结岩溶塌陷发生模式及其影响因素,以深化典型岩溶塌陷机制和影响因素研究,为研究区及类似地区岩溶塌陷有效防治提供科学依据。

1 研究区概况

湘中娄底市位于湖南省中部,地理位置为110°45'40"-112°31'07"E, 27°12'31"-28°14'27"N,辖1个区,2个县和2个县级市,国土总面积8117 km²,其中可溶岩分布面积5636.5 km²,占国土面积的64.42%(图1)。境内地势西高东低,呈阶梯状倾斜,属于云贵高原向江浙丘陵递降的过渡带,地形海拔高度主要集中于100~500 m。地处中亚热带季风湿润气候区,年平均气温16.5~17.5℃,多年平均降水量1300~1400 mm,降水多集中在4—7月。主要河流有涟水和资水,其中涟水为湘江中游一大支流,流经区域东部,流域面积3906 km²,资水流经区域西部,流域面积3985 km²。

区内地层发育齐全,出露完整,从元古界到新生界均有展布。碳酸盐岩地层主要为泥盆系中统至中生界三叠系下统的12个岩组,分别为棋梓桥组(D₂q)、七里江组(D₃ql)、长龙界组(D₃c)、锡矿山组(D₃x)、孟公坳组(D₃m)、马栏边组(C₁m)、石碇子组

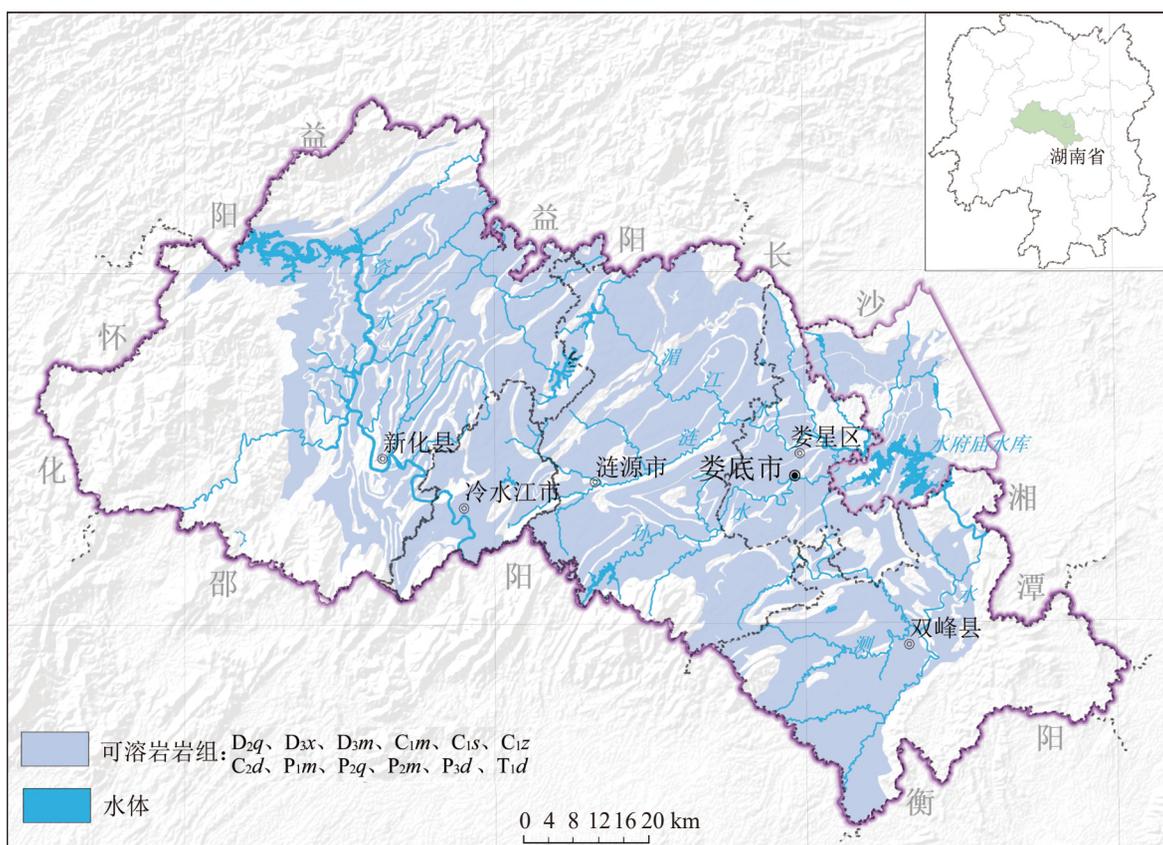


图1 湘中娄底市位置及其岩溶区分布

Fig. 1 Location of Loudi City, central Hunan and distribution of karst areas in Loudi City

(C_{1s})、梓门桥组(C_{1z})、大浦组(C_{2d})、马坪组(P_{1m})、栖霞组(P_{2q})、茅口组(P_{2m})、大隆组(P_{3d})和大冶组(T_1d)。岩性以厚层灰岩为主,部分为泥质灰岩和白云岩,少数夹硅质页岩和钙质页岩,为岩溶地貌和岩溶含水层的发育提供了条件。另外,白垩系戴家坪组(K_2d)为陆源碎屑沉积岩,其胶结物或所含碎屑为可溶物,其底部为灰质砾岩,具有可溶性,能形成“红层岩溶”^[12]。

大地构造属于扬子陆块桂湘早生古生代陆缘沉降带邵阳坳褶带,区域构造以西北向的弧状褶皱和东西向隆起和凹陷为突出特征,冲断层等压性结构面以及张性断裂和扭性断裂发育。复杂多变的地质构造,不但为岩溶发育提供了构造条件,而且造成岩浆活动频繁,带来了丰富的成矿物质,导致矿产资源

非常丰富,已发现47个矿种,其中探明储量的有25种,已探明储量的矿产地58处,其中大中型矿床36个,以煤炭、建材、有色金属为主。

2 岩溶塌陷发生的时空分布

2.1 岩溶塌陷的时间分布

根据有记录的946次塌陷,有如下年变化趋势:岩溶塌陷最早发生于1960年^[3,7-8],至1980年共记录有24次塌陷,之后逐年增多。1988—1990年,共岩溶塌陷80次;2001—2007年,每年均超过10次;2008—2016年,每年达30次,其中2013年93次,达到最高峰;近5年以来,每年岩溶塌陷次数下降明显(图2)。

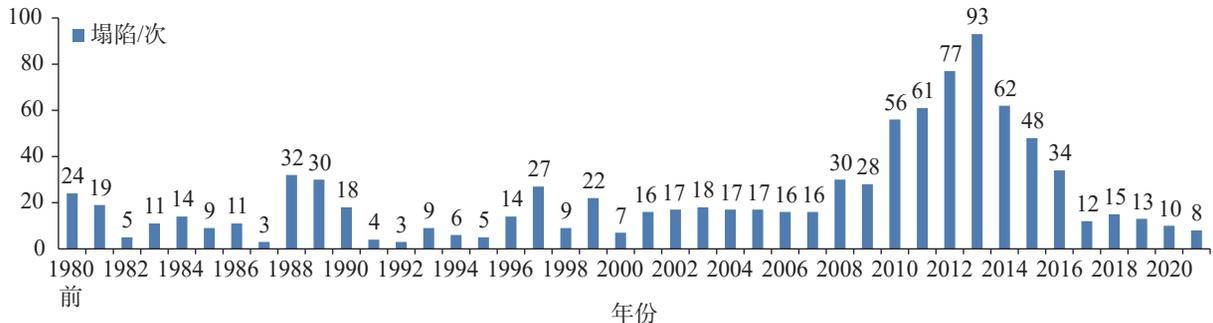


图2 娄底市岩溶塌陷数量年际变化图

Fig. 2 Yearly distribution of karst collapses in Loudi City

有728次塌陷记录了发生月份(图3),统计显示,每年的3—7月是岩溶塌陷的高发期,共记录565次,占比78.04%,其时正值雨季,降雨量占全年的70%;8—11月共发生岩溶塌陷60次,占比8.29%,其时正值旱季,发生次数少;12月份没有发生岩溶塌陷的记录;1月份是岩溶塌陷发生的小高峰,共记录78次,占比10.77%,为长期干旱后的降雨入渗透发的岩溶

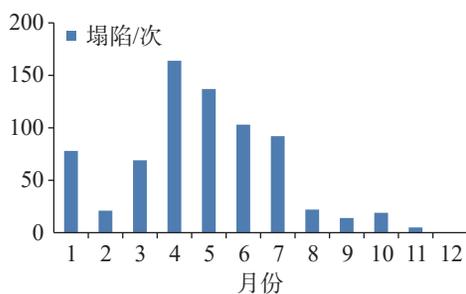


图3 岩溶塌陷月份分布规律图

Fig. 3 Monthly distribution pattern of karst collapses

塌陷。

2.2 岩溶塌陷空间分布规律

娄底市各县市区均有岩溶塌陷事件分布(表1、图4),其中涟源市、新化县、冷水江市和娄星区分别发生岩溶塌陷事件125、75、40、33起,分别占娄底市岩溶塌陷事件总数的43.06%、26.69%、14.23%和11.74%。其余地段,岩溶塌陷事件零星分布,比例不足5%。在面积密度上,以冷水江市、娄星区和涟源市相对比例较高,分别为9.11起/100 km²、7.69起/100 km²、6.33起/100 km²。娄底市平均岩溶塌陷面积密度为3.4起/100 km²,为我国岩溶塌陷的高易发区。

3 娄底岩溶塌陷的发生模式

对娄底的岩溶塌陷发生的原因和过程进行分析,

表 1 娄底各县市区岩溶塌陷情况统计
Table 1 Situation of karst collapses in each county of Loudi City

县市区	岩溶塌陷事件/起	百分比/%	面积/km ²	面积密度/起/100 km ²
娄星区	33	11.74	429	7.69
涟源市	121	43.06	1 912	6.33
冷水江市	40	14.23	439	9.11
新化县	75	26.69	3 620	2.07
双峰县	5	1.78	1 711	0.29
湘乡市壶天镇	7	2.49	144.7	4.84
合计	281	100	8 255.7	3.40

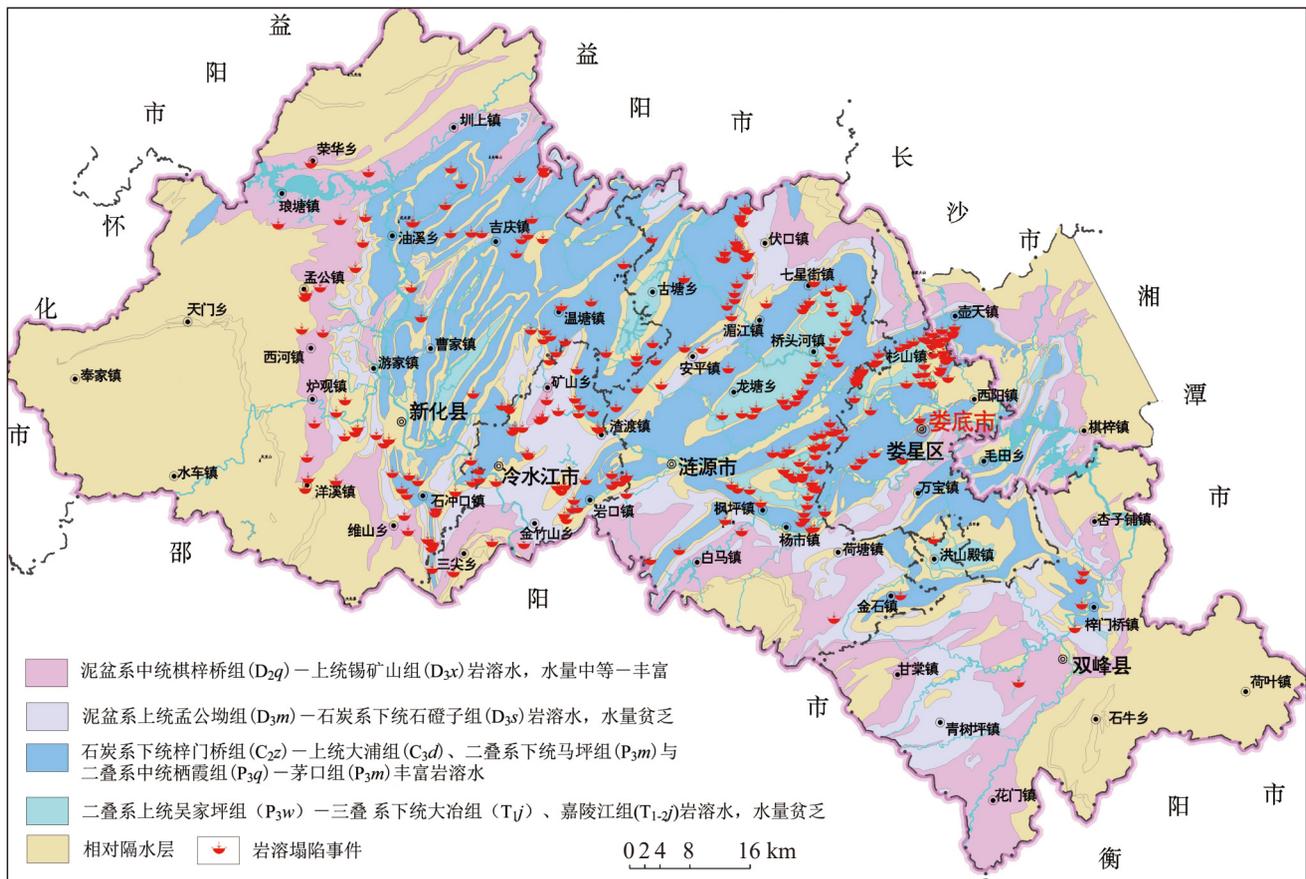


图 4 娄底市岩溶塌陷分布图
Fig. 4 Distribution of karst collapses of Luodi City

可归纳为四类岩溶塌陷模式。

3.1 真空吸蚀塌陷模式

研究区内煤矿周边发生的岩溶塌陷多为该种模式。岩溶塌陷的发生主要为矿山多次抽水所造成。在地下岩溶发育的地区, 土下容易形成地下空洞(a); 随着抽水活动, 地下水急速下降, 上覆土体在岩溶水与孔隙水产生的压强差或真空负压作用, 形成土洞(b); 停止抽水时, 水位快速升, 产生的空洞负压吸蚀土体, 使土洞迅速扩大^[13](c); 再次抽水时, 负压消失,

发生岩溶塌陷(图 5)。

如冷水江市的金山煤矿的托山井田, 1971年8月投产后, 采用斜井开拓、水平分层短壁式开采, 矿坑排水量 100~150 m³·h⁻¹。随着不断向深部开采, 抽水降落漏斗不断扩大, 上覆地层中的岩溶水主要通道沿断裂带向地下采空区中不断涌入, 形成强径流带, 对上部土体、溶洞、土洞等形成真空吸蚀效应, 使地表沿断裂带形成塌陷坑, 至 2015 年, 共发生岩溶塌陷 158 次。

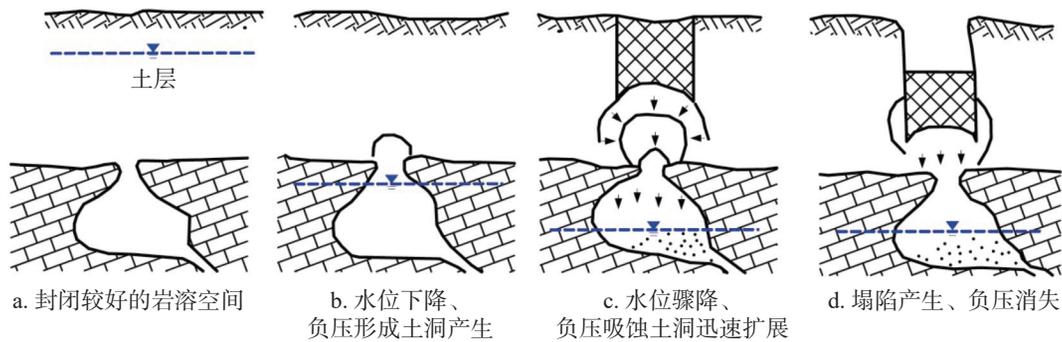


图 5 真空吸蚀型岩溶塌陷模式(据文献^[14]修改)

Fig. 5 Model of karst collapses characterized by vacuum erosion (modified from ^[14])

3.2 浮托软化塌陷模式

主要发生在矿区闭坑后的水位恢复过程中。在矿区闭坑前，土下岩溶管道形成(a)；矿坑闭坑时的疏干排水，岩溶管道与上部土体间产生真空吸蚀作用，形成局部土洞(b)；矿坑闭坑后，排水停止，水位缓慢持续上涨，软化土体，并且压缩地下洞穴空腔中的空气，形成向上的浮托作用，使土洞迅速扩大^[15](c)；当浮托力大于洞顶土体的自重压力与结构力时，疏

松土体发生失稳塌陷(d)(图 6)。

如娄底恩口煤矿区附近的岩溶塌陷，在闭坑前发生的岩溶塌陷主要是真空吸蚀作用造成。矿山于 1997 年闭坑，至 2007 年的 10 年时间，地下水位快速恢复并随季节快速波动，以往疏干的泉、井、断流的河流恢复流水，在此期间共发生岩溶塌陷 125 次。

3.3 荷载振动塌陷模式

主要发生在地基施工工程区，包括 4 个塌陷过

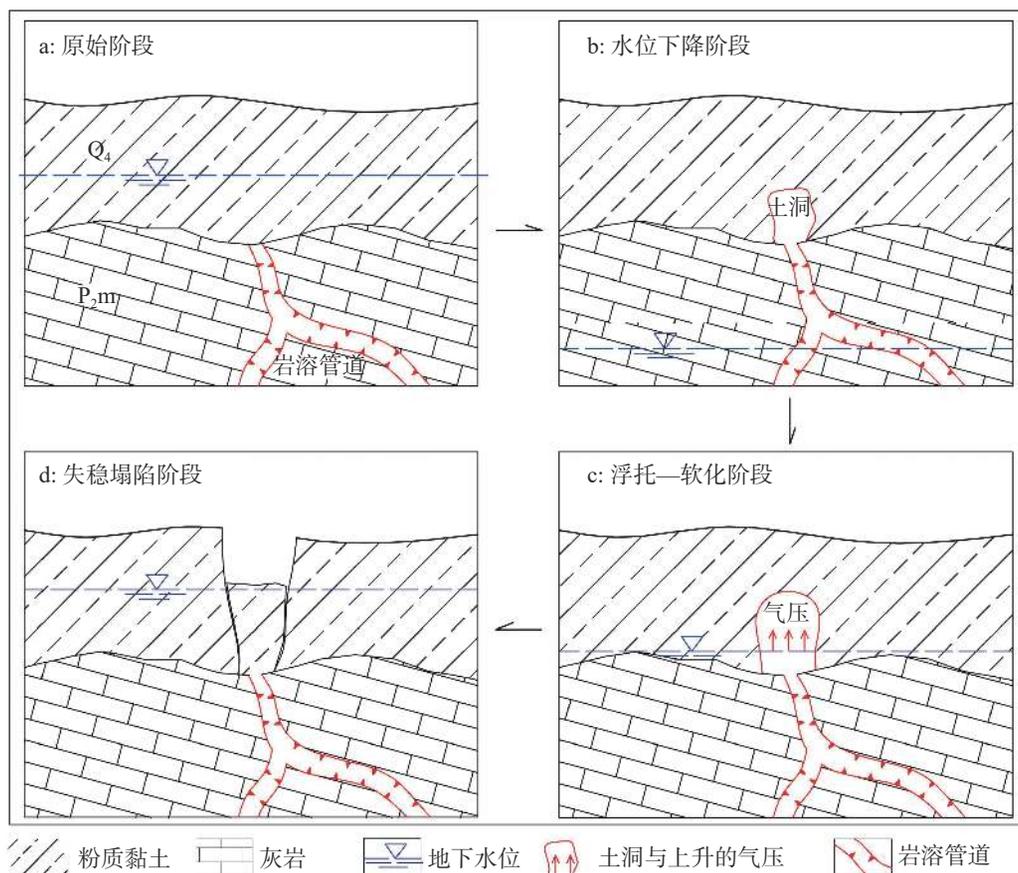


图 6 浮托-软化型岩溶塌陷模式(引自文献^[16])

Fig. 6 Model of floating-softening karst collapses (cited from ^[16])

程: 首先, 由于施工区打井抽水, 地下水位下降形成降落漏斗, 溶洞周围土层形成临空面(a); 施工振动产生附加力, 对土层临空部位产生破坏, 使土层产生位移, 部分土层掉入洞中, 形成土洞(b); 掉入洞中的土层被液化, 随着进一步抽取地下水, 以桩孔为中心

的降落漏斗扩大, 土被地下水带走, 加速土洞扩大(c); 进一步施工使浅部溶洞拱顶振落而发生地面塌陷, 或爆破使土洞拱顶土层疏松而结构破坏, 抗塌力小于自重压力而发生地面塌陷(d)(图 7)。

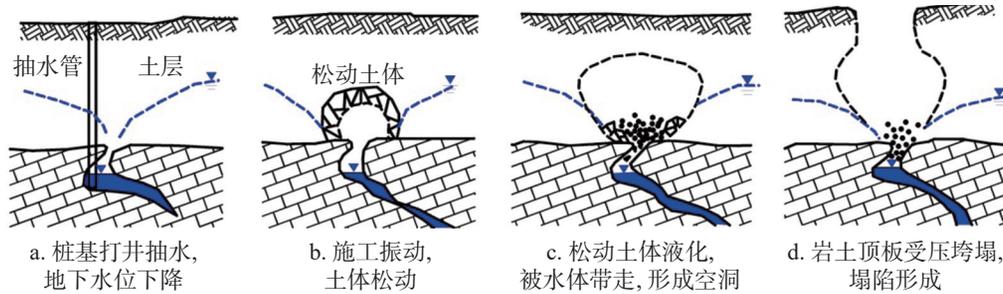


图 7 荷载振动塌陷模式

Fig. 7 Model of karst collapses characterized by load vibration

如娄衡高速公路印塘大桥附近的岩溶塌陷, 发生于 2014 年 11 月—2015 年 6 月的印塘大桥基础施工过程中。桥址周边农田与民房沿公路分布, 地表为厚度 5.0~12.0 m 的第四系全新统冲洪积层(Q_4^{al+pl}), 下伏泥盆系上统长龙界组(D_3ql)厚层灰岩及薄层灰岩, 岩溶强烈发育, 70 个钻孔有 55 个揭露有溶洞, 溶洞总数 98 个, 洞内多有岩溶水, 埋深在 1.0~2.4 m 之间。施工期间陆续发生岩溶塌陷坑 13 个, 分布在面积 0.016 km^2 范围内, 坑口 0.5~3.0 m 不等。2015 年桥梁竣工后岩溶塌陷没有再发生。

水江市禾青镇, 涟源市茅塘镇道童村等山间冲积平原地带。如新化县孟公镇付家村一带, 在北东长约 500 m、宽约 300 m 的区域内, 从 1961 年起至今记录有岩溶塌陷坑 30 多个, 大者直径达 15 m、深约 10 m, 坑壁可见粘性土与砂卵石土的二元结构土体。塌陷区属冲积平原地貌, 海拔 220~230 m, 平坦开阔。上覆为第四系全新统冲洪积层(Q_4^{al+pl}), 厚度 12~26 m。下伏为泥盆系中统棋梓桥组(D_2q)灰岩夹白云质灰岩和少量白云岩, 厚—巨厚层状, 岩溶管道发育(图 8)。区域地下水为松散砂砾层中的孔隙水与下伏岩溶水, 水量丰富, 水位埋深较浅, 季节性波动较大, 因而在降雨过程中渗透潜蚀作用强, 岩溶塌陷。

3.4 渗流潜蚀塌陷模式

主要为第四系土层下伏岩溶管道区降雨过程中发生的自然塌陷, 包括潜蚀过程发生, 土洞形成、土洞扩大和塌陷发生四个阶段^[14]。尤其在集中渗流点(岩溶管道开口、裂缝)附近, 降雨使岩溶水渗流潜蚀作用增强, 土体发生渗透变形, 逐渐形成土洞。土洞再逐渐向上发展, 洞顶土体平衡破坏, 地表形成塌陷。

4 娄底岩溶塌陷的影响因素分析

4.1 娄底岩溶塌陷发生的基础因素

4.1.1 地层岩性

该类塌陷主要分布在新化县孟公镇、洋溪镇, 冷

在地层分布上, 在 13 组可溶性地层中均有塌陷

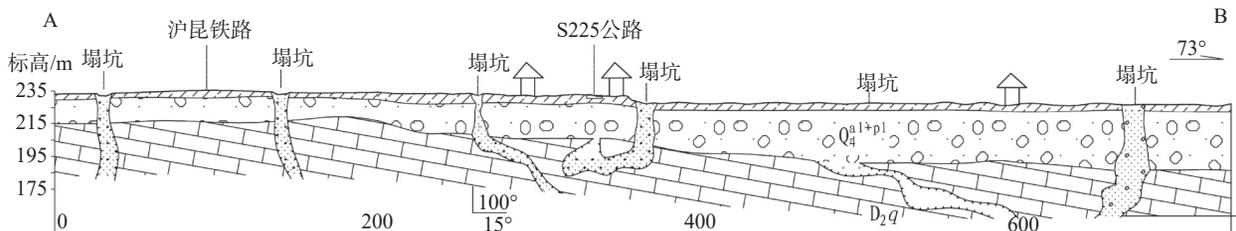


图 8 新化县孟公镇付家村岩溶塌陷区地质剖面

Fig. 8 Geological profile of the karst collapse area in Fujia village, Menggong town, Xinhua county

发生(表 2)。其中, C_2d 、 P_1m 、 P_2m 、 T_1d 、 C_1z 地层分布区发生塌陷事件均超过 20 起, 占比 83.99%, 面积密度也最大, 是区内主要岩溶塌陷地层; D_2q 、 P_2q 、

D_3x 等地层分布区发生塌陷事件超过 10 起, 占比 11.37%; 其它可溶岩地层中极少发生。

表 2 岩溶塌陷地层的特点及塌陷坑数量
Table 2 Features of karst collapse strata and numbers of collapse pits

发育地层	分布面积 /km ²	地层特点			岩溶塌陷坑		
		岩性	富水性	矿山面积 /km ²	数量/个	百分比	面积密度 /个/100 km ²
C_2d	779.5	灰岩夹白云质灰岩	丰富	73.43	979	35.69	125.59
P_2m	534.2	灰岩、生物屑灰岩	丰富	8.13	829	30.22	155.19
T_1d	260.0	薄层状灰岩	贫乏	39.69	159	5.80	61.15
P_1m	410.4	灰岩、白云质灰岩、白云岩	丰富	4.69	284	10.35	69.20
C_1z	265.7	灰岩、泥灰岩、白云岩夹膏盐	中等丰富	6.08	247	9.00	92.96
P_2q	176.7	生物屑灰岩	中等丰富	0	80	2.92	45.27
D_3x	213.0	灰岩夹泥灰岩	中等丰富	7.34	38	1.39	17.84
D_2q	320.9	灰岩夹白云质灰岩	丰富	0.12	71	2.59	22.13
K_2d	154.1	砂岩、泥质砂岩, 底部为灰质砾岩	贫乏	3.03	20	0.73	12.98
D_3ql	158.8	灰岩、泥灰岩、砂岩、页岩互层	中等丰富	1.87	25	0.91	15.74
C_1s	355.8	灰岩夹泥灰岩	中等丰富	8.51	4	0.15	1.12
C_1m	251.3	灰岩	中等丰富	0	6	0.22	2.39
P_3d	69.6	硅质灰岩夹硅质页岩	贫乏	1.30	1	0.04	1.44
合计	3 950			154.19	2 743	100	

4.1.2 岩溶地貌

区内岩溶地貌类型有溶丘、峰丛、峰脊、洼地、谷地、丘陵等, 相互交织组合。其中, 以溶丘洼地谷地岩溶塌陷事件最频繁, 达 124 起, 岩溶塌陷面积密度也最大, 达到 6.35 起/100 km²; 其次为峰丛洼地谷地与峰脊谷地区, 分别为 114 起和 25 起, 岩溶塌陷事件面积密度分别为 3.66/100 km² 和 4.23 起/100 km²; 岩溶河谷阶地区虽然只有岩溶塌陷事件 16 起, 但面积密度达 6.0 起/100 km²; 在红层丘陵区, 岩溶塌陷事件 2 起, 面积密度为 1.32 起/100 km²。

4.1.3 岩溶水富水性

岩溶塌陷事件多发生在碳酸盐岩岩溶水丰富区, 面积密度也最大, 共发生 191 起, 占比 67.97%, 且现存塌陷坑达 2 163 个, 占比达 78.86%; 碳酸盐岩岩溶水和碳酸盐岩间夹非碳酸盐岩岩溶水中等丰富区, 共发生岩溶塌陷事件 53 起, 占比 18.86%, 可见塌陷坑 400 个, 占比 14.59%; 在碳酸盐岩间夹非碳酸盐岩或互层岩溶水类型区, 水量贫乏, 发生 33 起岩溶塌

陷事件, 占比 11.03%, 可见塌陷坑 160 个, 占比 5.83%, 但面积密度大于岩溶水中等丰富区。

4.1.4 与矿区分布的相关性

岩溶塌陷与矿区分布密切相关。在发生的 281 起岩溶塌陷事件中, 有 222 起分布在 14 个矿区^[17-19]及其周边, 占总数的 79%, 其展布范围与矿区基本一致(图 9)。其中恩口、斗笠山、桥头河矿区北东部、建新一冷水江—渣渡—金竹山—毛易、芦茅江、晏家铺等 11 个煤矿区周边共发生岩溶塌陷事件 204 起, 占总数的 72.6%, 有色金属矿区发生岩溶塌陷事件 7 起, 梓门桥石膏矿区发生 4 起, 分别占矿区塌陷总数的 3.2% 和 2.8%。

4.2 娄底岩溶塌陷的诱发因素

4.2.1 矿区抽排水

矿区抽排水是否诱发岩溶塌陷主要取决于矿区排水与岩溶水的水力联系程度、造成岩溶水的动态变化及其对岩土结构的动力作用。而且, 矿区的抽

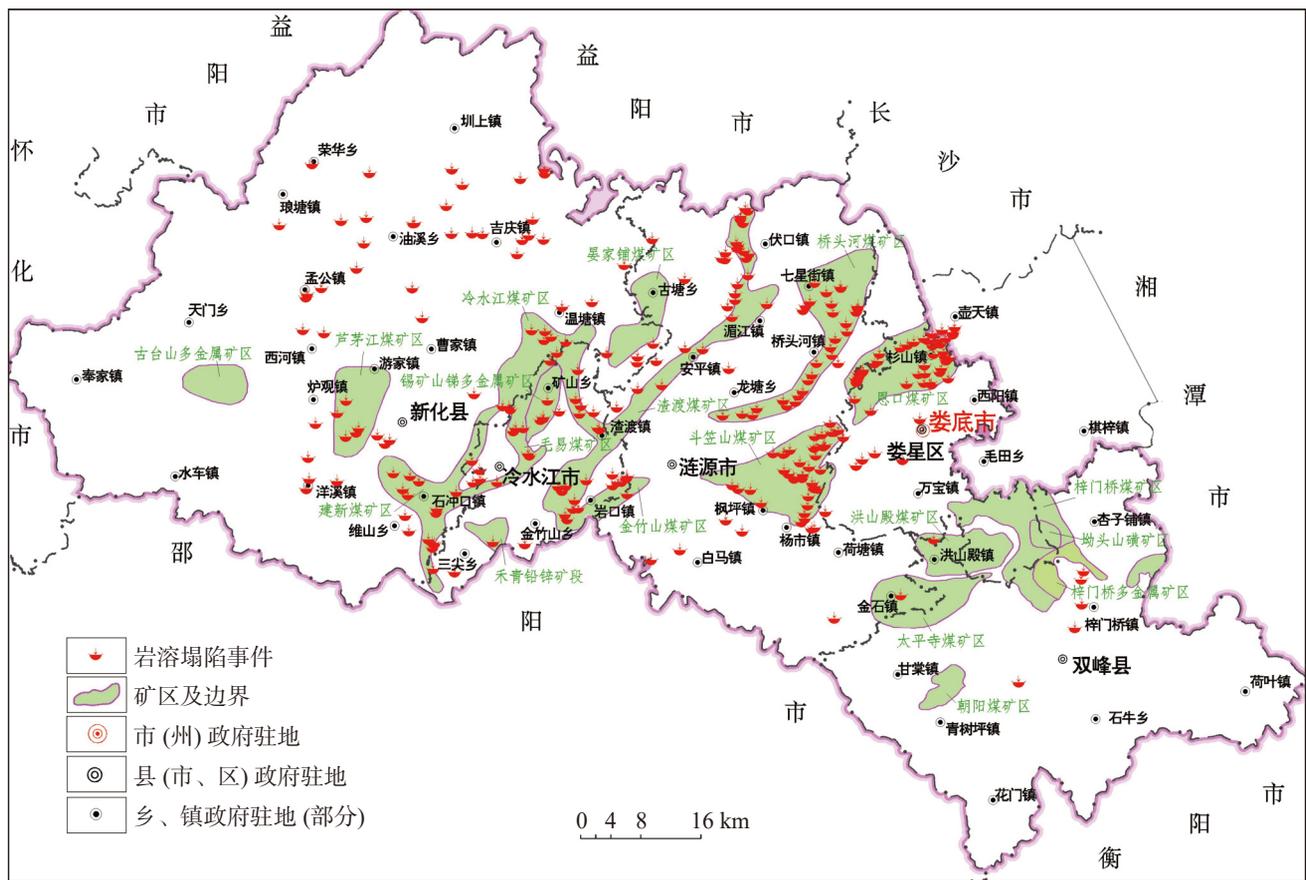


图 9 矿区与岩溶塌陷分布关系图

Fig. 9 Relationship between distribution of mining areas and karst collapses

排水过程会直接影响岩溶塌陷发生的时间、范围和规模。如斗笠山煤矿, 1954 年建矿, 矿区沿斗笠山向斜翼部呈环状分布, 平面面积 68 km², 开采 P₃l 煤层, 煤层最大采深至 -350 m, 采空区、采煤巷道与煤层底板 P₂m 岩溶水存在直接水力联系, 水文地质单元面积 106 km²。在矿区疏排水过程中随着排水位深度增加, 岩溶水降落漏斗迅速扩大, 在水文地质单元内岩溶塌陷数持续增加, 已统计发生塌陷坑 4 800 多个, 最大深度 11 m。

4.2.2 闭坑矿区回水

矿区闭坑后, 地下水和地表水将逐渐使矿坑充水, 形成地下水库, 改变区域水文地质条件, 形成地下水对土层的顶托、潜蚀和真空吸蚀等作用而发生岩溶塌陷。如恩口煤矿, 建矿于 1958 年, 工区沿恩口向斜翼部、北东扬起端呈环带状展布, 开采 P₃l 煤层, 采深达 400 m, 上世纪 70—80 年代为采煤高峰期。采矿疏排煤层底板 P₂m 以及顶板 T₁d 岩溶水, 最大排水量 8 165 t·h⁻¹, 降落漏斗区地表井、泉、山塘、水库

干枯, 溪河断流, 说明矿区与岩溶水及地表水联系密切, 如 1979 年, 矿坑排水量很大, 矿区 25 点发生突水, 水量 1 400 t·h⁻¹, 使岩溶塌陷剧烈发展。1977—1990 年为塌陷高发期, 至 1996 年共发生陷坑 8 757 个, 分布面积 15 km²。1997 年闭矿后仍发生塌陷坑 138 个, 主要发生在矿坑回水强烈时期, 持续时间约 10 年, 地下水水位之所以迅速回升与附近河水大量灌入有关, 干枯的泉、井等逐渐恢复。

4.2.3 工程施工

工程施工诱发岩溶塌陷主要有 2 种作用, 其一为人工挖孔过程中抽取地下水, 如印塘大桥基础施工过程中, 以桩孔为中心形成降深 6~8 m 的降落漏斗, 地下水渗透冲刷、潜蚀能力增加, 加速土体中的土洞形成、扩大; 其二, 在桩底嵌岩与破除溶洞过程中, 炸药爆破、钻机冲击岩层的振动波向周边土体传递, 或引起土体软化、离散等效应, 使土洞拱顶土层疏松而结构破坏, 抗塌力小于自重压力而发生地面塌陷, 或对浅部溶洞拱顶振落, 形成空洞, 向上部土

层传递而发生地面塌陷。

4.2.4 降雨过程

在本区主要有三种诱发机制:一是暴雨引起地下水位迅速上升对土层产生强烈的冲刷和顶托作用而使土层发生塌陷;二是雨季洪水使第四系孔隙水与下伏岩溶水水位剧烈波动加速对土层附近的渗流潜蚀作用;三是枯季后的降雨形成干湿动力条件反差诱发岩溶塌陷。前两种机制是娄底市的岩溶塌陷主要发生在雨季的重要因素,第三种机制可以解释娄底市为什么一月份岩溶塌陷频率也较高。

5 结论与建议

(1)湘中娄底市主要存在四种岩溶塌陷模式:真空吸蚀塌陷模式,多为矿区抽排地下水诱发,在区内分布最广、数量最多、灾情最重;浮托软化塌陷模式,主要发生在矿区闭坑后水位恢复过程中,主要发生在大型矿区;振动荷载塌陷模式,主要源于工程施工时的抽水及岩土荷载振动,虽然目前塌陷数量少,但会随着城市化进程增加;渗透潜蚀塌陷模式,多为降雨过程诱发的自然塌陷,在地形比较平坦的洼地、谷地、平原岩溶区呈集群式分布。

(2)岩溶塌陷的影响因素包括基础因素和诱发因素两个方面,基础因素有地层岩性、岩溶地貌、岩溶水富水性、与矿区相关性等,构成岩溶塌陷的易发区的关键影响因素。研究表明,13组可溶岩地层均发生过岩溶塌陷事件,但以 C_2d 、 P_1m 、 P_2m 、 T_1d 、 C_1z 地层塌陷最严重,共发生236起,占比84%;238起岩溶塌陷发生在溶丘和峰丛地貌区;68%的岩溶塌陷发生在岩溶水富水区;222起岩溶塌陷事件分布在14个矿区,占79%。诱发因素主要有矿区抽排水、矿区闭坑回水、工程施工、降雨过程等,其过程和强度影响岩溶塌陷发生的时间、区域范围和规模。

(3)娄底市岩溶面积广,岩溶地貌和地下岩溶管道发育,岩溶水位浅埋,土层覆盖较厚,具有岩溶塌陷发生的多项条件以及自然及人类活动诱发因素,因此,岩溶塌陷频发多发,是主要的地质灾害类型,且具有突发性。但目前对岩溶塌陷处治的常用措施是充填溶洞、土洞,或封堵岩溶通道,对塌陷坑一填了之,“治标不治本”。建议有关部门加强不同县区岩溶塌陷发生模式及影响因素的深入研究,构

建岩溶塌陷监测预警系统,科学编制岩溶塌陷防治规划和灾害应急预案,强化岩溶塌陷风险管理,控制工程施工的区域、方式和强度,禁采或限采岩溶区煤、石膏、地下水等,保持岩溶区岩—土—洞—水—气间的动态平衡。

参考文献

- [1] 郭维君,崔晓艳,陈学军. 泗顶铅锌矿区岩溶塌陷成因及治理对策分析[J]. 金属矿山, 2009, 39(12): 41-43.
GUO Weijun, CUI Xiaoyan, CHEN Xuejun. Causes of karstic collapse in Lead-zinc mining area and its countermeasures[J]. Metal Mine, 2009, 39(12): 41-43.
- [2] Hosseini S T, Arefi S L, Bitarafan M, Abazarlou S, Zavadskas E K. Evaluation types of exterior walls to reconstruct Iran earthquake areas (Ahar Heris Varzeqan) by using AHP and fuzzy methods[J]. *International Journal of Strategic Property Management*, 2016, 20(3): 328-340.
- [3] Liebermann J, Pelts E J, Matthews J M, Sanchez S R, Rapisarda J, Lederer K. Does artificial collapse of human day 6 blastocysts prior to the cooling steps of vitrification improve their probability of increased outcome?[J]. *Fertility and Sterility*, 2012, 98(3): S127.
- [4] 陈菊艳,朱斌,彭三曦,单慧媚. 基于AHP和GIS的矿区岩溶塌陷易发性评估:以贵州林歹岩溶矿区为例[J]. 自然灾害学报, 2021, 30(5): 226-236.
CHEN Juyan, ZHU Bin, PENG Sanxi, SHAN Huimei. Assessment of susceptibility to karst collapse in mining area based on AHP and GIS: A case study in Lindai karst mining area in Guizhou[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2021, 30(5): 226-236.
- [5] 项式均,康彦仁,刘志云,谢代兴,陈健,阎志为. 长江流域的岩溶塌陷[J]. 中国岩溶, 1986, 5(4): 255-272.
XIANG Shijun, KANG Yanren, LIU Zhiyun, XIE Daixing, CHEN Jian, YAN Zhiwei. Karst collapse in Yangtze River Basin[J]. *Carsologica Sinica*, 1986, 5(4): 255-272.
- [6] 康彦仁. 试论岩溶地面塌陷的类型划分[J]. 中国岩溶, 1984, 3(2): 146-155.
KANG Yanren. Classification of land collapses in karst regions[J]. *Carsologica Sinica*, 1984, 3(2): 146-155.
- [7] 张丽芬,曾夏生,姚运生,廖武林. 我国岩溶塌陷研究综述[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2007, 18(3): 126-130.
ZHANG Lifen, ZENG Xiasheng, YAO Yunsheng, LIAO Wulin. Review on karst collapse in China[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2007, 18(3): 126-130.
- [8] 张宝柱,陈振东. 矿山岩溶塌陷形成机理及综合治理[J]. 中国地质, 1997(3): 27-29.
- [9] 谭克龙,周春光. 湘中恩口—斗笠山矿区岩溶塌陷研究[J]. 西安矿业学院学报, 1996, 16(2): 130-134.
TAN Kelong, ZHOU Chunguang. Research on karst collapse in Enkou-Doulisshan mine district of middle Hunan Province[J].

- Journal of Xi'an of Mining Institute, 1996, 16(2): 130-134.
- [10] 戴长华, 何卫平, 邱猛. 湖南省娄底市矿山地质环境调查评价报告[R]. 湖南省地质环境监测总站, 2008.
- [11] 石益盛. 恩口煤矿区及周边地区地质环境调查报告[R]. 湖南省地勘局四一八队, 1998.
- [12] 贾龙, 吴远斌, 潘宗源, 殷仁朝, 蒙彦, 管振德. 我国红层岩溶与红层岩溶塌陷刍议[J]. 中国岩溶, 2016, 35(1): 67-73.
JIA Long, WU Yuanbin, PAN Zongyuan, YIN Renchao, MENG Yan, GUAN Zhende. A review of the research on karst and sinkhole of red beds in China[J]. *Carsologica Sinica*, 2016, 35(1): 67-73.
- [13] 陈朝贵. 隐伏岩溶区地面塌陷机理分析与建筑物地基基础处理[J]. 中国岩溶, 1988, 7(4): 349-355.
CHEN Chaogui. The analysis of the mechanism of the surface collapse in regions of concealed karst and case studies of the foundation treatment for buildings[J]. *Carsologica Sinica*, 1988, 7(4): 349-355.
- [14] 徐红星. 浅谈隧道施工释能降压法对环境的影响[J]. 铁道勘察, 2013, 39(2): 27-30.
XU Hongxing. Brief talk of the impact of tunnel construction energy-releasing voltage drop method on environment[J]. *Railway Investigation and Surveying*, 2013, 39(2): 27-30.
- [15] 史栾生, 陈敬德. 广花盆地地面塌陷成因与防治[J]. 中国岩溶, 1996, 15(3): 278-283.
SHI Luansheng, CHEN Jingde. Genesis and preventive measure of surface collapse in Guanghua basin[J]. *Carsologica Sinica*, 1996, 15(3): 278-283.
- [16] 刘新建, 郭杰华, 陈英姿. 疏干排水矿区闭坑后岩溶塌陷形成机理探索: 以湘中地区恩口煤矿为例[J]. 中国岩溶, 2017, 36(6): 842-850.
LIU Xinjian, GUO Jiehua, CHEN Yingzi. Formation mechanism of karst collapse after mine closure: A case study of Enkou coal mine in central Hu'nan Province[J]. *Carsologica Sinica*, 2017, 36(6): 842-850.
- [17] 周果, 等. 湖南省娄底市矿山地质环境调查评价报告[R]. 湖南省地勘局四一八队, 2020.
ZHOU Guo, etc. Investigation and Evaluation Report on Mine Geological Environment in Loudi City, Southern Province [R], Bureau of Geology And Mineral Exploration And Development of Hunan Province, 418 Geological Brigade, 2020.
- [18] 戴长华, 何卫平, 邱猛. 湖南省娄底市矿山地质环境调查评价报告[R], 湖南省地质环境监测总站, 2008.
DAI Changhua, HE Weiping, QIU Meng. Survey and Evaluation Report on Mine Geological Environment in Loudi City, Hunan Province[R], Hunan Provincial Geological Environment Monitoring Station, 2008.
- [19] 石益盛. 恩口煤矿区及周边地区地质环境调查报告[R]. 湖南省地勘局四一八队, 1998.7.
SHI Yisheng. Geological Environmental Investigation Report of Enkou Coal Mine Area and Surrounding Areas [R], Bureau of Geology And Mineral Exploration and Development of Hunan Province, 418 Geological Brigade, 1998.7

Genetic models and influence factors of karst collapses in Loudi City of central Hunan, China

GUO Jiehua¹, JIANG Zhongcheng^{2,3,4}, LIU Xinjian¹, LIAO Hongwei^{2,4}, LI Cheng^{2,3}

(1. Institute of Natural Resources Survey of Hunan Province, Loudi, Hunan 417000, China; 2. Institute of Karst Geology, CAGS, Guilin, Guangxi 541004, China; 3. Pingguo Guangxi, Karst Ecosystem, National Observation and Research Station, Pingguo, Guangxi 531406, China; 4. Key Laboratory of Karst Dynamics, MNR & GZAR, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract Loudi City in central Hunan has recorded 281 karst collapse incidents and tens of thousands of collapse pits, which made it one of the cities in China experiencing the most serious karst collapses. Among all these karst collapses, 222 karst collapses occurred in mining areas, accounting for 79% of the total. In addition, some karst collapses were caused by foundation engineering or by rainfall infiltration and erosion. By sorting out the temporal and spatial relationship between karst collapse events, karst collapses and collapse pits, it is concluded that karst collapses in Loudi City can fall into four occurrence modes, namely, vacuum erosion, floating-softening, load vibration and seepage erosion, and each mode has four collapse processes. Among them, vacuum erosion collapses and floating-softening collapses are mainly caused by mining activities, which are induced by drainage from the mining area and backwater after the mine has been closed; load vibration collapses are mainly induced by external dynamic loads such as pile foundation construction; seepage erosion collapses are natural collapses mostly induced by heavy rainfall. The influencing factors of karst collapses include basic factors and inducing factors. The basic factors include stratum lithology, karst landform, karst water abundance, correlation with mining areas, etc., which constitute the key influencing factors in karst collapse-prone areas; the inducing factors mainly include drainage in mining areas,

backwatering in closed mines, engineering vibration, rainfall, etc., and the intensities of these factors can affect the time, scope and scale of karst collapses.

In order to strengthen the risk management of karst collapses, it is recommended to establish a monitoring and early warning system for karst collapses, and scientifically develop risk assessment, prevention and control plans and disaster emergency response plans for karst collapses. Besides, controlling the area, method and intensity of engineering construction, prohibiting or limiting the mining of coal, gypsum, groundwater, etc. in karst areas, and maintaining the dynamic balance between rock, soil, cave, water and air are effective measures to prevent and control karst collapses. In this paper, the distinction between the basic factors and inducing factors of karst collapses can provide a scientific basis for their effective prevention and control in karst areas, and can provide a reference for the construction of harmonious and beautiful villages.

Key words karst collapse, genetic model, influence factors, mining activity, Loudi City of central Hunan

(编辑 张玲)

(上接第 888 页)

within the depth range of 800–1,200 m are 53.5–73.0 °C, and the geothermal gradient is 4.88 °C/100 m. The deep thermal storage temperatures of the Yangmeichong geothermal fields have been measured by both silicon dioxide geothermal temperature scale and potassium magnesium geothermal temperature scale, and temperatures are 92.24 °C and 87.22 °C, respectively. Accordingly, the depths of underground thermal mineral water circulation are 3,292 m and 3,069 m, respectively. The hydrochemical type of geothermal fluid in the geothermal fields in Yangmeichong is HCO₃-Na. Due to the leaching effect of deep groundwater on granite bodies, the contents of silicic acid and sodium ions in underground hot water are relatively high.

The isotopic detection results indicate that the supply of geothermal water in the area comes from precipitation infiltration, and the tritium content of geothermal water is less than 2 TU. It is speculated that geothermal water in Yangmeichong was formed by atmospheric precipitation before 1960. The geothermal energy in Yangmeichong is a fault convection geothermal model. Geothermal water is directly supplied by atmospheric precipitation with fault zones and rock pores as water channels, and it flows deep by both hydraulic and thermal forces. After alternating water thermal convection, geothermal water is formed. Subsequently, the convection of geothermal water took place along the fault of Gupo mountain from deep to shallow and from north to south, which formed the fault convective geothermal model in Yangmeichong. The research results provide a theoretical basis for the exploration and rational utilization of geothermal resources in Yangmeichong, Guangxi.

Key words the geothermal fields in Yangmeichong, fluid geochemistry, depth of geothermal reservoir circulation, geothermal conceptual model

(编辑 杨杨)