

doi:10.3969/j.issn.1007-3701.2018.02.008

## 地下水疏干区岩溶塌陷微地貌效应浅谈

彭祖武<sup>1,2</sup>, 潘宗源<sup>1</sup>, 尹欧<sup>2</sup>, 杨帆<sup>2</sup>

PENG Zu-Wu<sup>1,2</sup>, PAN Zong-Yuan<sup>1</sup>, YIN Ou<sup>2</sup>, YANG Fan<sup>2</sup>

(1.中国地质科学院岩溶塌陷防治重点实验室, 桂林 541004; 2.湖南省地质调查院, 长沙 410116)

(1.Key Laboratory of Karst Collapse Prevention, CAGS, Guilin 541004; 2.Hunan Institute of Geological Survey, Changsha 410116)

**摘要:**岩溶塌陷是湘中地区常见的地质灾害类型之一。结合“湘中地区岩溶塌陷调查”工作项目调查成果,通过对湘中斗笠山、恩口、煤炭坝矿区地下水疏干漏斗影响范围内岩溶塌陷空间展布位置进行分析研究,归纳出该地区有别于断裂、岩性等控制因子的三种典型岩溶塌陷微地貌效应,分别为水源效应、老塌陷坑效应(简称老坑效应)和陡坎效应;同时利用工程地质分析法,对该三种微地貌效应原因进行了简要分析探讨。最后指出水源、老塌陷坑和陡坎微地貌可以作为岩溶塌陷地貌指示标志,建议具有类似工程地质条件的地下水疏干区在岩溶塌陷防灾减灾方面或土地开发利用方面可提前对此三种微地貌区加以规避或采取针对性预防措施。

**关键词:**湘中地区;地下水疏干区;岩溶塌陷;水源效应;老坑效应;陡坎效应

**中图分类号:**P642, P694

**文献标识码:**A

**文章编号:**1007-3701(2018)02-160-008

Peng Z W, Pan Z Y, Yin O, Yang F. Brief research on karst collapse's micro-relief effects in groundwater drainage area. *Geology and Mineral Resources of South China*, 2018, 34 (2):160–167.

**Abstract:** Karst collapse is one of the common disasters in Middle Hunan area. Three typical micro-relief effects are proposed based on the study of karst collapse's spatial distribution characters about “Middle Hunan Karst Collapse Survey” Project in Doulishan syncline, Enkou syncline, Meitanba syncline and Qiaotouhe syncline area, such as water effect, older collapse hole effect and scarp effect. At the same time, the reasons of three micro-relief effects were discussed by analysis of engineering geology method. Finally, we concluded that water, older collapse hole and scarp can be seen as relief guide signs of karst collapse. And proposed that it needs to take some targeted measures to avoid the three micro-relief effects when land developing & disaster preventing and mitigating of karst collapse.

**Key words:** Middle Hunan Province; groundwater drainage area; karst collapse; water effect; older collapse hole effect; scarp effect

岩溶塌陷是可溶岩分布区常见的地质灾害类型之一,尤其是存在抽排地下水活动时、岩溶塌陷往往成为主要的地质灾害类型。因此,研究并总结地下水抽排致灾规律是一项关乎岩溶塌陷防灾减灾成败的重要课题。根据中国地质调查局“湘中地区岩溶塌陷调查”项目调查成果可知,抽排地下水

收稿日期:2018-3-14 修回日期:2018-4-10

基金项目:中国地质调查局项目湘西鄂东皖北地区岩溶塌陷1:5万环境地质调查(DD20160254),湘中地区岩溶塌陷调查(1212011220190)。

第一作者:彭祖武(1987—),男,工程师,主要从事水工环地质工作,E-mail:616317808@qq.com.

所引发的岩溶塌陷并不普遍存在整个降落漏斗区域;而是集中在一些特定的区域或条带上。本文利用该项目调查数据,对集中塌陷区内单体塌陷坑的空间展布位置进行归纳统计,发现微地貌对塌陷坑空间展布具有一定影响。

地貌对岩溶塌陷的影响,已有不少文献进行过分析研究。其研究成果大致可分为两个方面:一是认为地形地貌决定了地表水的汇集和入渗、地下水的径流方向及循环交替强度等,对岩溶发育及地下水活动程度具有重要影响、从而间接对岩溶塌陷具

有影响<sup>[1-11]</sup>;二是从地貌条件出发,按地貌类型对岩溶塌陷进行分类或空间位置分区<sup>[12-19]</sup>。同时,这些文献大多基于较大一级的地貌单元类型对岩溶塌陷进行描述或统计,其成果在研究区面积较大时适用;当研究区所处地貌单元单一时或对岩溶塌陷空间预警预测需进一步细分时,很难起到相应的指导作用。

为了较好的解决该问题,依托中国地质调查局“湘中地区岩溶塌陷调查”项目调查数据统计成果,本文基于第二个方面从微地貌着手并通过对湘中斗笠山向斜、恩口向斜、煤炭坝向斜及桥头河向斜

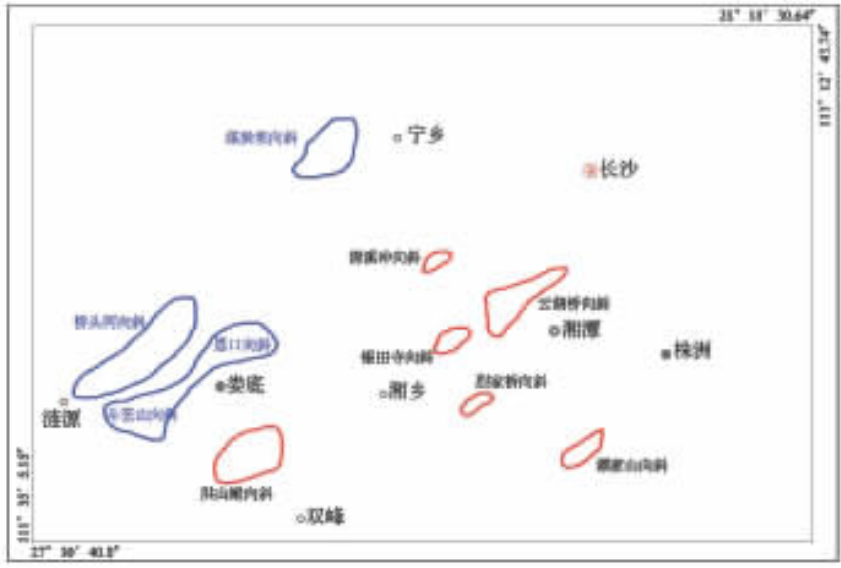


图1 研究区位置简图(图中蓝字位置)  
Fig. 1 Location of Study Area

等地区(图 1)岩溶塌陷空间展布位置进行统计分析,总结该地区岩溶塌陷发育的三种较为典型的微地貌效应:水源效应、陡坎效应、老坑效应。如以娄底幅典型区金玲村区域塌陷坑为例(图 2),该区共调查到大小塌陷坑 92 个;与水源效应有关的有 16 个(含水渠、水塘、小溪)、与陡坎效应有关的有 26 个、与老坑效应有关的 29 个。可归入水源效应、陡坎效应、老坑效应的塌陷坑数量为 71 个、占塌陷坑调查总数的 77.17%。

1 研究区岩溶塌陷地质环境背景

1.1 地形地貌概况

研究区海拔一般在 100–500 m,相对高差随构

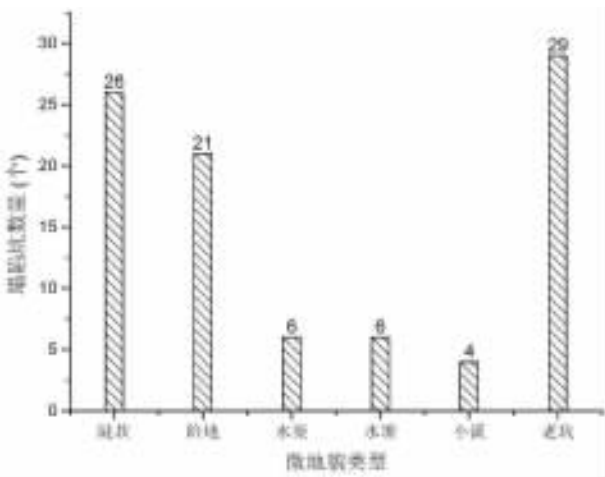


图2 金玲村区域岩溶塌陷微地貌效应统计图  
Fig. 2 Statistical graph of karst collapse’s micro-relief effects in Jinling village

造部位及地层岩性差异而异,大致由南往北、由向斜翼部向核部逐渐变小。局部由于受构造、岩性、地形、河流(冲沟)、人类活动等多种因素的综合影响,微地貌发育;其中冲沟、陡坎、凹地(水塘)最为常见



照片1 研究区典型地貌类型之一

Picture 1 One of typical geomorphic in study area

(照片1)。

## 1.2 已有塌陷概况

自上世纪五六十年代煤矿开采活动的兴起,研究区内便开始进入岩溶塌陷时期、尤其是部分地方出现数起塌陷暴发高峰期。据相关资料统计,整个湘中地区塌陷坑可以万计,具体情况可参考相关论文<sup>[5-6, 15, 17]</sup>,本文不再赘述。

## 1.3 地表水体概况

研究区内大部分地区降水时空分布不均,加上农村种植业经济占有很大比例、人口又密集,因此人工改造的水(山)塘、水库较多;同时,研究区属于亚热带季风气候区、降雨较多,地表水系较为发育;另外该区碳酸盐岩地层岩溶普遍较为发育,岩溶水点众多,在水点流量较大的区域往往能形成地表常年性水流。

# 2 岩溶塌陷微地貌效应浅析

## 2.1 水源效应

### 2.1.1 水源效应名词解释

水源效应为受地下水疏干影响的岩溶区,塌陷易发生在河流、小溪、水渠(沟)、水塘、水库、泉点及湿地等地方之现象(照片2),即凡是地表存在自由水面的水体或包气带滞水,其覆盖或受其反向补给的地方一般都属于岩溶塌陷高易发区。如益阳市赫山区泉交河,宁乡县大成河、欧家冲溪、麻枣冲溪,涟源市香花台小溪、碧林桥小溪,湘乡市壶天河等地带,都属于典型“水源效应”致塌区。

### 2.1.2 水源效应原因

在地下水疏干区,地表水体(水源)是地下水的主要补给源之一。地表水在水头压力的驱动下向下垫面渗透并转换成地下水。水体在转换过程中不但能疏通土体原有空隙,而且通过渗压破坏作用能产生新的空隙。加之地表水体是一种良好的大气密封层,水体在土体空隙与岩体空隙中渗流速度的差异性不可避免的会在两种渗透介质的界面附近造成水流不连续,从而间接形成真空对界面上游土体产生真空吸蚀作用。另外水源区属于地表水、地下水交换活跃区域,也是地质环境敏感区域<sup>[20]</sup>。地表水体及其变化不仅可以对浸润线以下土体进行饱和软化<sup>[21]</sup>、造成土体发生蚀变<sup>[22]</sup>,而且受重力水的流动可以在土体中进一步形成孔隙或裂隙而对土体强度进行再次弱化;该过程将导致土体遭受渗压破坏或潜蚀破坏<sup>[23-25]</sup>。因此,在受地下水疏干影响的岩溶区就表现为塌陷易发生在河流、小溪、水渠(沟)、水塘、水库、泉点及湿地等地方。

### 2.1.3 水源效应实例

水源效应中最为典型的是“地上悬河或悬挂滞



照片2 岩溶塌陷所表现出来的水源效应

Picture2 Karst collapse about water effect

水体”现象(图 3),即人工降落漏斗边界越过了地表水体或滞水体赋存范围,在降落漏斗内地表水体浸润线(滞水体水面)与地下水潜水面脱离;地表水体(滞水体)近水平向径流消失、垂向径流加强或完全转变为垂向径流。同时,原来地下水补给地表水(滞水)区域,补给方向发生反转,径流通道内的松散颗粒受力状态也随之变化;受力状态的变化导致松散颗粒运动方向由指向地表水体(滞水体)变为指向地下潜水面。该变化对逆反滤层结构或无反滤

层结构土体及先期存在薄弱面、裂隙、孔洞的土体的破坏作用最为明显并能在该过程中较为迅速的孕育出土洞。最终在地面加载、振动、大气降水(或干旱)、洪水等事件的触发下,形成地面塌陷。

现以益阳市桃江县灰山港镇天子坡村为例。天子坡村下伏基岩为石炭系大埔组  $C_2d$  白云质灰岩,受当地水泥厂需求刺激,该区存在数个规模不一的露天采石场(图 4)。尤其是天子坡东侧采石场规模最大,而且还在继续开采。受采石场长时间不间断

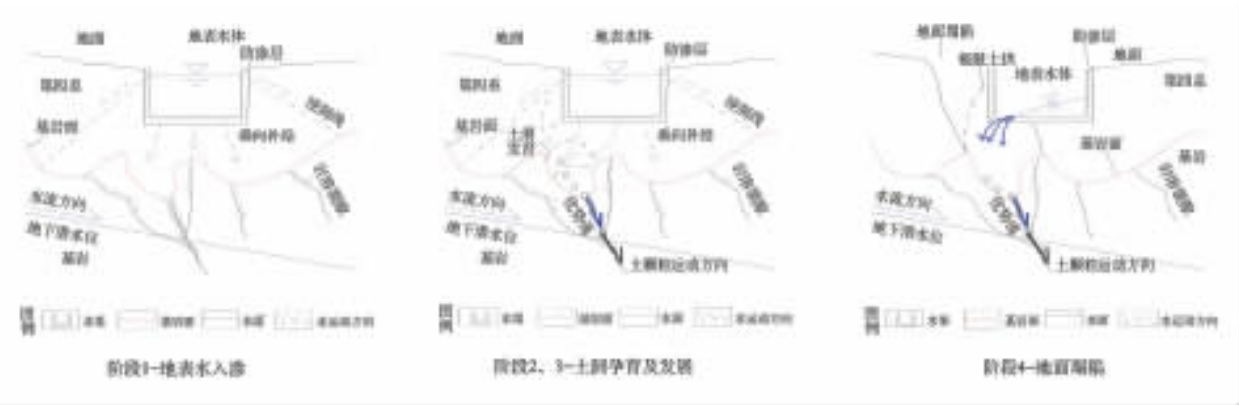


图3 典型水源效应-地上悬河现象

Fig.3 Typical water effect—the aboveground river

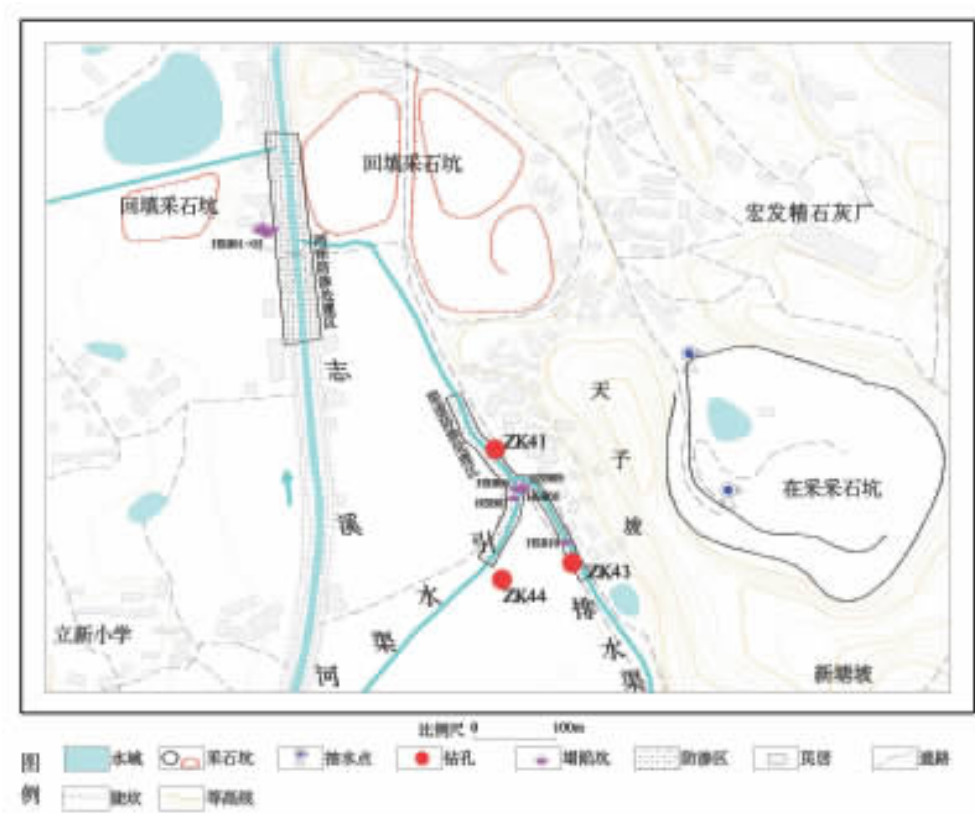


图4 天子坡村2016年7月塌陷坑分布图

Fig. 4 Distribution of karst collapse in Tizipo Village, in July 2016



抽排地下水影响,区内已发生超过百起塌陷;地下下降漏斗西侧边界也已延伸到志溪河河床位置,导致天子坡一带的排水渠和引水渠已演变成真正的“地上悬河”。

2016年7月益阳市桃江县地区普降大雨,导致天子坡村一带出现10个新塌陷坑,分别为HSB01至HSB10。其中HSB01至HSB05塌陷坑发生在志溪河左岸,HSB06至HSB09塌陷坑发生在引水渠渠道及右岸,HSB10塌陷坑发生在排水渠左岸。经调查,天子坡村其他地方未发现一起新塌陷坑,可见地表水对塌陷的触发还是很明显的。

## 2.2 老坑效应

### 2.2.1 老坑效应名词解释

老坑(老塌陷坑)效应是指在受地下水疏干影响的岩溶区,新塌陷坑的发生与老塌陷坑存在某种时间、某种方向或某种位置关系的现象(照片3)。老坑效应最为典型的表现形式就属“串串型”塌陷坑群和“子母型”塌陷坑群。

“串串型”塌陷坑群主要由线状岩溶形态所控制,如岩溶管道、地下河、溶沟、岩溶裂隙等;“子母型”塌陷坑群主要由点状岩溶形态所控制,如岩溶漏斗、岩溶洼地、竖洞、岩溶陷落柱及岩溶水点出口



照片3 岩溶塌陷所表现出来的老坑效应

Picture 3 Karst collapse about older collapse hole effect

等。同时,“串串型”塌陷坑群在其形成过程中,不管是呈条带状还是树枝状,大多迁移方向比较明确;而“子母型”塌陷坑群在其形成过程中除子坑(新坑)沿母坑(老坑)径向迁移外,子坑与子坑间并没

有明显的迁移方向性(图5)。

### 2.2.2 老坑效应原因

已有的塌陷坑不仅可以指示下部隐伏开口裂隙或管道的大概位置,而且可以指示地下水降落漏斗边界扩展的大致位置、速度及方向。同时,部分已有的塌陷坑可成为大气降水、地表水、上层滞水补给地下潜水的直接通道,又可演变为局部小范围内的汇水点。一方面不仅地表水体和大气降水可以直接通过其倒灌补给地下水,而且土壤水和上层滞水也可在其坑内周缘顺岩土接触面渗出;另一方面其又可增强地下水对渗流通道内填充物的潜蚀作用,表现为洗空渗流通道内填充物和扩大有效渗流通道截面。相较之前,其就间接缩短了渗流通道某点地表水体、土壤水或上层滞水对地下水补给的路径。在该点水头不变情况下,水体垂直下渗的渗压

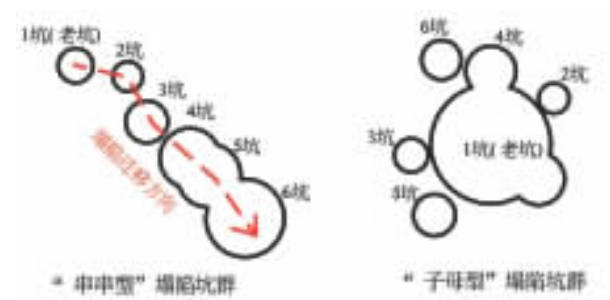


图5 老坑效应最为典型的塌陷坑平面组合形式

Fig. 5 Typical older collapse hole effect

破坏作用将得到有效增强,该点土体受厚度减薄影响、发生整体渗透变形破坏的临界水力梯度也相应减小。最终孕育土洞并形成地面塌陷。

2.2.3 老坑效应实例

涟源市斗笠山镇金玲村位于斗笠山向斜东北角,发育有两条较大的近北东向断裂,下伏可溶岩为二叠系茅口组  $P_2m$  灰岩、岩溶发育。受其西侧斗笠山煤矿抽排地下水影响,该区自上世纪五六十年代就有塌陷事件的发生。随着上世纪九十年代煤矿私有化进程的影响,地下水降落漏斗不断向北东扩展,塌陷事件也由西南向北东(金玲村方向)逐渐增多。其中某些塌陷坑在平面上表现出明显的“串串型”塌陷坑群和“母子型”塌陷坑群形式。现以 2014 年 10 月某塌陷事件为例(图 6)。

2014 年 10 月 25 日早晨在金玲村境内碧林桥小溪发生 LX80 号坑塌陷,随后不久在其西南方向发生 LX81 号坑塌陷,在该过程中可见小溪溪水从 LX80 坑涌入 LX81 号坑。第二天,即 10 月 26 日继续沿西南方向发生 LX82 号坑塌陷,塌陷发生后溪水不断涌入 LX82 坑内,直至该村一位老农及时将 LX80 与 LX81 间涌水通道封堵之后,才见 LX82 坑内积水逐渐消失干涸。至第三天,即 10 月 27 日在西南方向紧挨 LX82 号坑又发生 LX90 号塌陷。最

后经调查及物探分析研究发现, LX80、LX81、LX82 及 LX90 四个塌陷坑处在同一条西南-北西方向的溶沟之上。

该事件中的四个塌陷坑,在平面上组成明显的“串串型”塌陷坑群(图 6、照片 3 右上幅),在时间上也有严格的先后顺序,在塌陷迁移方向上也具有明显的承袭性;呈现出明显的老坑效应。

2.3 陡坎效应

2.3.1 陡坎效应名词解释

陡坎效应是指受地下水疏干影响的可溶岩区,岩溶塌陷易发生在斜坡坡面线突变的陡坎位置之现象。陡坎效应以斜坡中下部(即斜坡中前缘地带)较为明显,所引发的塌陷多集中在坎肩位置,少数分布在坎面或坎脚处(照片 4)。该型塌陷往往较塌陷区主要塌陷事件滞后,是塌陷区中后期塌陷趋势发展的一种重要表现形式。在涟源市杨家滩镇七甲村-龙凼村、斗笠山镇碧林村-金玲村、渡头塘镇泉塘村,娄星区石井镇山泉村等地方,可以见到较多例子。

2.3.2 陡坎效应原因

裸露型岩溶区,岩质陡坎位置一般是不同尺度溶蚀面的分界位置(照片 5),也是地形突变位置。覆盖型岩溶区其土质陡坎的分布,一般也是地下岩

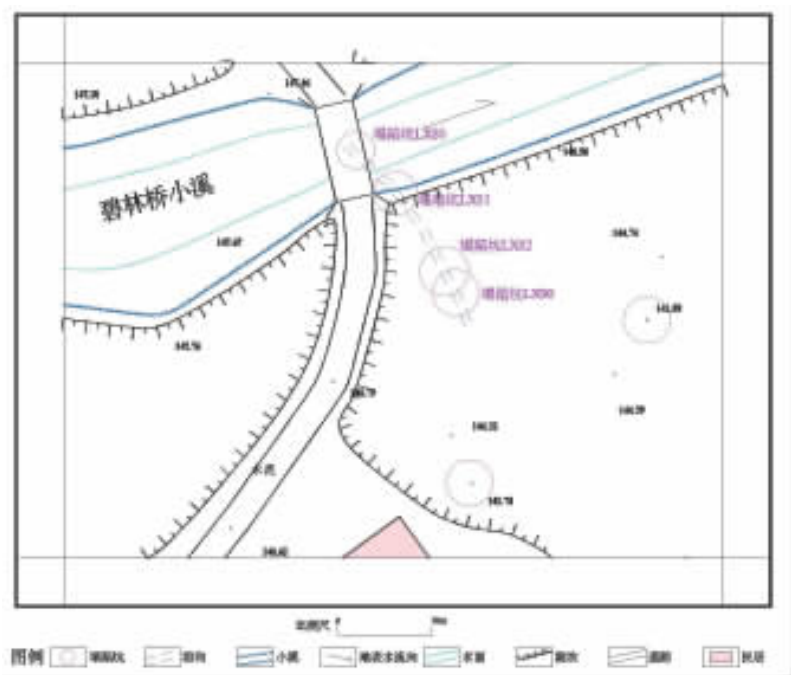


图6 金玲村2014年10月某塌陷事件塌陷坑分布图

Fig. 6 Distribution of Karst Collapse in Jinling Village, in October 2014



照片4 岩溶塌陷所表现出来的陡坎效应

Picture 4 Karst collapse about scarp effect

质陡坎在地表间接表现形式。同时,不管是裸露区还是覆盖区,可溶岩表层(岩土接触面附近基岩部分)都会形成厚薄不均的表层岩溶带。根据相关研究,表层岩溶带是岩溶地区水分重要的赋存与运移空间,是连接地表与深部可溶岩石的纽带<sup>[26]</sup>,而且久旱暴雨后表层岩溶带可成为饱和含水带<sup>[27]</sup>。渗入表层岩溶带的径流,一部分沿表层岩溶带顺坡裂隙流动,一部分沿垂向裂隙向下入渗<sup>[28]</sup>。自然成因的岩质陡坎多受层面、裂隙或断裂的控制,其往往构成岩溶和地下水流初始发育的优先部位<sup>[29]</sup>。因此,大气降水渗入表层岩溶带顺坡面流动过程中,会趋向于在陡坎位置附近渗入地下;间接造成陡坎位置附近土体颗粒的不断流失而发育土洞,最终引发地面塌陷。

### 2.3.3 陡坎效应实例

涟源市渡头塘镇泉塘村位于涟水河左岸,下伏可溶岩为二叠系茅口组  $P_{2m}$  厚层状灰岩;区内冲沟发育、斜坡上陡坎状微地貌明显。受桥溪港煤矿抽

排地下水影响,该区从2008年开始岩溶塌陷事件增多,2009年和2014年分别为两次塌陷高峰期;2014年11月桥溪港煤矿因故关停。根据调查资料,该村在2008–2014年间共发现塌陷坑30个,其中处在陡坎位置的塌陷坑有14个(表1),占总数的46.67%。另外从表1可知,总体上陡坎效应在后期有增强的趋势,是后期塌陷空间分布的一种重要形式。

## 3 结论及建议

依托中国地质调查局“湘中地区岩溶塌陷调查”项目成果<sup>[30]</sup>,本文归纳出工作区三种典型的岩溶塌陷微地貌效应,分别为水源效应、老坑(老塌陷坑)效应和陡坎效应;并对该三种效应进行了名词阐述、成因分析及实例举证。根据文章初步分析结论,在受地下水疏干影响的岩溶区,水源、老塌陷坑及陡坎不仅对岩溶塌陷空间位置分布具有一定的影响,而且还可作为岩溶塌陷防灾减灾工作中一种较为直观的预警预报微地貌指示标志。

同时需指出,不管上述三种微地貌效应原因如何,都是以岩溶发育的基本条件为前提,其不能脱离该前提而独立存在。另外在实践中还必须认识到塌陷事件的发生往往是不同因素综合作用的结果,仅是表现为某一个或几个因素为主导;因此某个塌陷坑也可受不同微地貌效应综合影响。

另外本文对岩溶塌陷微地貌效应的分析研究深度有限,该结论还需要与国内具有类似工程地质条件地区的岩溶塌陷空间位置加以对比分析,以判定是否真正具有普遍性。但本文的初步结论仍不失为岩溶塌陷影响区或具有类似工程地质条件地区



照片5 裸露型岩溶区阶梯状溶蚀地貌

Picture 5 Step-like dissolution landform in exposed karst region



表1 每年发生在陡坎位置的塌陷坑数据统计表

Table 1 Statistical data of collapse pit occurring at the location of steep slopes each year

| 年份       | 2008 年 | 2009 年 | 2010 年 | 2011 年 | 2012 年 | 2013 年 | 2014 年 |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 塌陷总数/个   | 1      | 8      | 3      | 3      | 3      | 3      | 9      |
| 陡坎位置塌陷/个 | 1      | 1      | 1      | 2      | 2      | 2      | 5      |

进行岩溶塌陷防灾减灾工作的重要参考。建议工作中对水源、老塌陷坑及陡坎等微地貌区给予足够的重视,条件允许情况下加以规避或提前采取针对性预防措施,尽量避免不必要的生命财产损失。

参考文献

[1] 陈宁. 云南临沧某机场岩溶发育规律及地基稳定性研究[D]. 成都理工大学硕士论文, 2012.

[2] 卢耀如, 杰显义, 张上林, 赵成樑, 刘福灿. 中国岩溶(喀斯特)发育规律及其若干水文地质工程地质条件[J]. 地质学报, 1973,(1): 121-136.

[3] 邵如九, 司绍敏, 黄桂光. 地面岩溶塌陷规律的探讨[J]. 铁道工程学报, 1985,2(1): 101-106.

[4] 康彦仁. 岩溶地面塌陷的形成条件 [J]. 中国岩溶, 1988,7(1): 11-20.

[5] 周治国. 湖南娄底地区岩溶塌陷特征及防治探讨 [J]. 水文地质工程地质, 1993,20(3): 18-20.

[6] 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,(2): 130-134.

[7] 万志清, 秦四清, 祁生文. 桂林市岩溶塌陷及防治[J]. 工程地质学报, 2001, 9(2): 199-203.

[8] 朱庆杰, 苏幼坡, 刘廷全. 唐山市岩溶塌陷安全评价[J]. 中国安全科学学报, 2004,14(2): 94-97.

[9] 肖明贵. 桂林市岩溶塌陷形成机制与危险性预测 [D]. 吉林大学博士论文, 2005.

[10] 谷永磊. 新建铁路线路方案岩溶塌陷灰色模糊综合评判研究[D]. 北京交通大学硕士论文, 2007.

[11] 褚学伟, 党爽, 丁坚平. 贵州岩溶塌陷分布及其影响因素分析[J]. 人民长江, 2015,46(12): 42-44, 71.

[12] 康彦仁. 试论岩溶地面塌陷的类型划分 [J]. 中国岩溶, 1984,3(2): 151-160.

[13] 刘凯栋. 贵州省岩溶塌陷类型及形成分布规律探讨[J]. 贵州地质, 1990,7(3): 204-215.

[14] 陈佳云, 孙福元. 斗笠山矿区岩溶塌陷分布规律及成因探讨[J]. 煤炭科学技术, 2000,28(9): 22-24.

[15] 王三丁, 张令明. 湖南省涟源市岩溶地面塌陷特征分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2007,18(2): 122-126.

[16] 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.

[17] 谭松林, 尹金香, 王晓燕. 湖南煤炭坝矿区岩溶塌陷的形成与易发性分区 [J]. 煤田地质与勘探, 2009,37(6): 39-42.

[18] 陆红, 刘剑峰, 胡家新. 湖南省斗笠山煤矿区岩溶塌陷分布规律及成因分析 [J]. 西部探矿工程, 2012, 24(12): 121-125, 130.

[19] 魏永耀, 孙树林, 黄敬军, 姜素, 缪世贤. 徐州岩溶塌陷时空分布规律及成因分析 [J]. 中国岩溶, 2015,34(1): 52-57.

[20] 蒋忠诚, 袁道先. 表层岩溶带的岩溶动力学特征及其环境和资源意义[J]. 地球学报, 1999,20(3): 302-308.

[21] 刘秀敏, 陈从新, 沈强, 陈建胜. 覆盖型岩溶塌陷的空间预测与评价[J]. 岩土力学, 2011,32(9): 2785-2790.

[22] 陈明晓. 岩溶覆盖层塌陷的原因分析及其半定量预测 [J]. 岩石力学与工程学报, 2002,21(2): 285-289.

[23] 郭永春, 王清海, 谢强, 文江泉, 任新红. 覆盖型岩溶潜蚀塌陷裂隙开度与透水性定量关系 [J]. 水文地质工程地质, 2014,41(6): 82-86.

[24] 任新红, 郭永春, 王清海, 孙金辉, 彭辉. 覆盖型岩溶潜蚀塌陷临界裂隙开度模型试验研究 [J]. 水文地质工程地质, 2012,39(5): 84-87.

[25] 张海坦, 李庆华, 邓书金. 歌乐山岩溶地面塌陷发育特征[J]. 中国岩溶, 2015,34(1): 58-63.

[26] 张志才, 陈喜, 刘金涛, 彭韬, 石朋, 严小龙. 喀斯特山体地形对表层岩溶带发育的影响——以陈旗小流域为例[J]. 地球与环境, 2012,40(2): 137-143.

[27] A. Mangin. Sur la dynamique des transferts en aquifere karstique[M]. Olomouc: Proc. 6th Internat. Cong. 1973.

[28] 张信宝, 刘再华, 王世杰, 陈喜. 锥峰和塔峰溶丘地貌的表层喀斯特带径流溶蚀形成机制[J]. 山地学报, 2011,29(5): 529-533.

[29] 陈宏峰, 张发旺, 何愿, 夏日元, 邹胜章, 苏春田, 罗书文. 地质与地貌条件对岩溶系统的控制与指示 [J]. 水文地质工程地质, 2016,43(5): 42-47.

[30] 尹欧, 杨帆, 彭祖武, 等. 湘中地区岩溶塌陷调查报告 [R]. 湖南省地质调查院, 2016.