

姚克追, 黄继有, 许模, 等. 广西马山县溶蚀平原区岩溶塌陷分布规律及形成机制[J]. 中国岩溶, 2025, 44(1): 159-169, 198.  
DOI: [10.11932/karst20250111](https://doi.org/10.11932/karst20250111)

## 广西马山县溶蚀平原区岩溶塌陷分布规律及形成机制

姚克追<sup>1</sup>, 黄继有<sup>2</sup>, 许模<sup>2</sup>, 文振兴<sup>1</sup>, 卢丹美<sup>1</sup>, 覃常<sup>1</sup>, 康小兵<sup>2</sup>  
(1. 广西壮族自治区水文地质工程地质队, 广西柳州 545000; 2. 成都理工大学  
环境与土木工程学院, 四川成都 610059)

**摘要:** 广西溶蚀平原区岩溶塌陷灾害频发、危害巨大, 开展塌陷分布规律与形成机制研究是进行灾害预警与防控的基本前提。本文以广西马山县古零镇石丰村新石屯岩溶塌陷区为研究对象, 通过对研究区地形地貌、地质构造、地层岩性以及气象条件等自然条件进行综合分析, 同时结合物探和钻探等方法的验证, 探讨了溶蚀平原区岩溶塌陷的分布规律、影响因素及成因机制, 并深入研究了溶蚀平原区岩溶塌陷的成因机制。研究结果显示, 岩溶地面塌陷主要集中于断层构造带岩溶强烈发育区域、覆盖层厚度中等地区以及地下水位剧烈波动区域。研究区岩溶塌陷的成因机制主要有真空吸蚀和潜蚀两种, 其中约 88% 的岩溶塌陷是由真空吸蚀作用引起的, 12% 的岩溶塌陷由潜蚀作用引起的。研究结果为同类溶蚀平原地区岩溶地面塌陷预防和研究提供参考依据。

**关键词:** 岩溶塌陷; 分布规律; 真空吸蚀; 溶蚀平原; 断层效应

**创新点:** 从岩溶塌陷与断层构造带之间的距离、与地下水位动态变化及与覆盖层厚度三个方面, 总结了广西溶蚀平原区岩溶塌陷的分布规律, 进而分析了形成机制。

**中图分类号:** P642.25    **文献标识码:** A

**文章编号:** 1001—4810 (2025) 01—0159—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的一种主要地质灾害类型, 广泛分布于溶蚀平原地区, 由于其具有突发性和隐蔽性<sup>[1-3]</sup>, 给岩溶区人们的生命财产安全造成威胁。深入认识岩溶地面塌陷灾变机理及分布规律是进行灾害防控的基本前提<sup>[4-7]</sup>。

溶蚀平原区岩溶塌陷主要分布在我国西南地区, 对其分布规律及诱发因素等方面已有一些相关研究。在岩溶塌陷分布规律上, 吴远斌等<sup>[8]</sup>通过对重庆市

龙泉村与庆丰山村之间岩溶塌陷现象及其与地形地貌、地表水系之间的关系分析, 得出岩溶塌陷主要集中分布在槽谷与横向冲沟交汇区、槽谷中地势较为低洼的区域以及接近地表溪沟周边的区域。张杰等<sup>[9]</sup>通过对栖霞中桥地区的研究, 总结出岩溶塌陷通常发生在覆盖型岩溶区的岩溶水流通道两侧, 特别是地下水水力坡度剧烈变化的区域。江思义等<sup>[10]</sup>通过对相关资料的收集以及对岩溶地质调查结果的分析, 揭示了桂林市岩溶塌陷主要分布于溶蚀堆积孤峰平原地貌区, 以及地势低、地下水位浅或集中径流

资助项目: 广西矿山水文地质勘查评价关键技术研究人才高地建设(桂地矿办[2023]55 号文)

第一作者简介: 姚克追(1975—), 男, 高级工程师, 主要从事水工环地质、岩土工程研究。E-mail: [706639240@qq.com](mailto:706639240@qq.com)。

通信作者: 康小兵(1981—), 男, 副教授, 从事水文地质专业的教学和研究工作。E-mail: [Kangxiaobing09@cdut.cn](mailto:Kangxiaobing09@cdut.cn)。

收稿日期: 2024—03—01

的区域。高宗军等<sup>[11]</sup>等通过构建岩溶地面塌陷水岩耦合模型,验证了岩溶地面塌陷与地下水的变化和岩溶上覆岩土体力学性质之间存在联系。关于塌陷成因机制,众多学者从多个角度探讨了不同的致塌模式<sup>[12-17]</sup>,常见的有潜蚀论、真空吸蚀论、共振论等基本理论,近年来熊启华等<sup>[18]</sup>等结合塌陷成因建立真空吸蚀、潜蚀相关力学模型,并对岩溶塌陷进行深入的分析与预测。罗小杰等<sup>[19]</sup>依据土体塌陷模式之间的关系,总结了由土洞型、沙漏型和泥流型组成的岩溶塌陷三种机理理论。综上,目前针对马山县溶蚀平原岩溶塌陷的分布规律及形成机制还未有详细的研究。

2015年12月,马山县古零镇石丰村新石屯一带发生岩溶地面塌陷,造成了大量的经济财产损失。本文通过对马山县古零镇岩溶地面塌陷区进行全面的地质调查、高密度电阻率法勘探、钻探、岩溶塌陷致灾因素监测等多项工作,对该地区的岩溶塌陷进行系统地分析研究,总结溶蚀平原岩溶塌陷分布规律,分析岩溶塌陷形成过程及成因机制。以期为溶

蚀平原区岩溶塌陷防治提供参考。

## 1 研究区概况

### 1.1 自然地理

研究区位于广西中部马山县,属南亚热带湿润性季风气候,气候温暖,雨量充沛,多年平均降雨量为1700~1800 mm。季风影响显著,雨量分布不均,尤其是在夏季容易出现洪涝现象。区内无大的地表水体,周边大明山和岩溶山区地表水多排泄于谷地。

马山县地貌主要为碳酸盐岩峰丛洼地谷地地貌和碎屑岩低山丘陵地貌(图1)。研究区位于大明山西南侧岩溶峰林谷地地貌区,谷地南北长约20 km,宽3~4 km,整体上为北西-南东走向。该区处于东北侧大明山脉、西南侧三叠系(T)碎屑岩低山丘陵的夹持之间,谷地不对称。谷地多为第四系覆盖,起伏不平。碳酸盐岩地层出露形成孤立的较低矮的峰林。

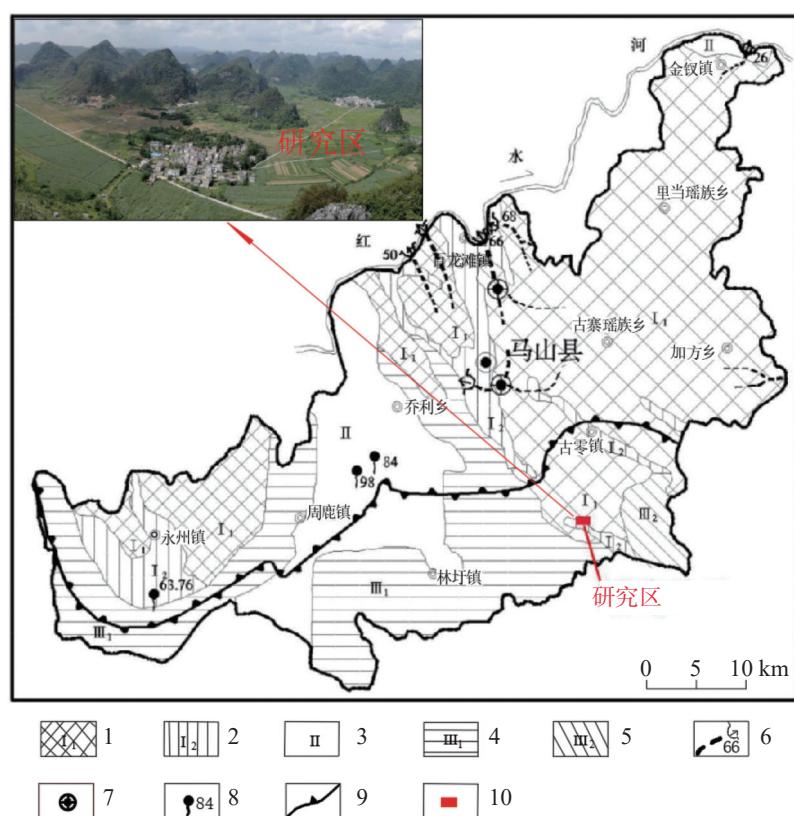


图1 研究区地理位置与地形地貌

1.峰丛洼地谷地 2.峰林谷地 3.溶岭谷地 4.丘陵谷地 5.低山 6.地下河出口(数字为流量( $L\cdot s^{-1}$ )) 7.地下河天窗 8.下降泉(数字表示流量( $L\cdot s^{-1}$ )) 9.分水岭 10.研究区

Fig. 1 Geographical location and topographic of the study area

## 1.2 地质环境特性

区内出露的地层主要有第四系(Q)、三叠系下统(T<sub>1</sub>)、石炭系中统(C<sub>2</sub>)、石炭系下统(C<sub>1</sub>)、泥盆系中统(D<sub>2</sub>)及泥盆系下统(D<sub>1</sub>)。第四纪以来, 研究区长期处于抬升状态, 其抬升具有间歇性, 这形成了红水河的多级阶地。研究区位于大明山构造亚区, 主要由大明山背斜和里当构造盆地组成。研究区西侧为杨圩-地苏断层, 区内发育一条呈北西至东南方向延伸的主要断层(F5)。此外, 还发育有东西向和南北

向的次级断层(F1~F15)。

根据地下水的赋存条件、水理性质、水力特征及各含水岩组的空间分布情况, 研究区域地下水类型可分为碳酸盐岩类裂隙溶洞水, 基岩裂隙水两类, 其分布及富水性如图2。区内岩溶区主要为白云岩连续分布区, 含水介质结构多以裂隙、溶孔、溶洞为主, 由于断层构造发育, 控制着地下岩溶发展、发育方向, 沿着构造线走向, 形成强岩溶发育区, 该区地下水径流存在隙流、管道并存局面, 形成较为复杂的地下水

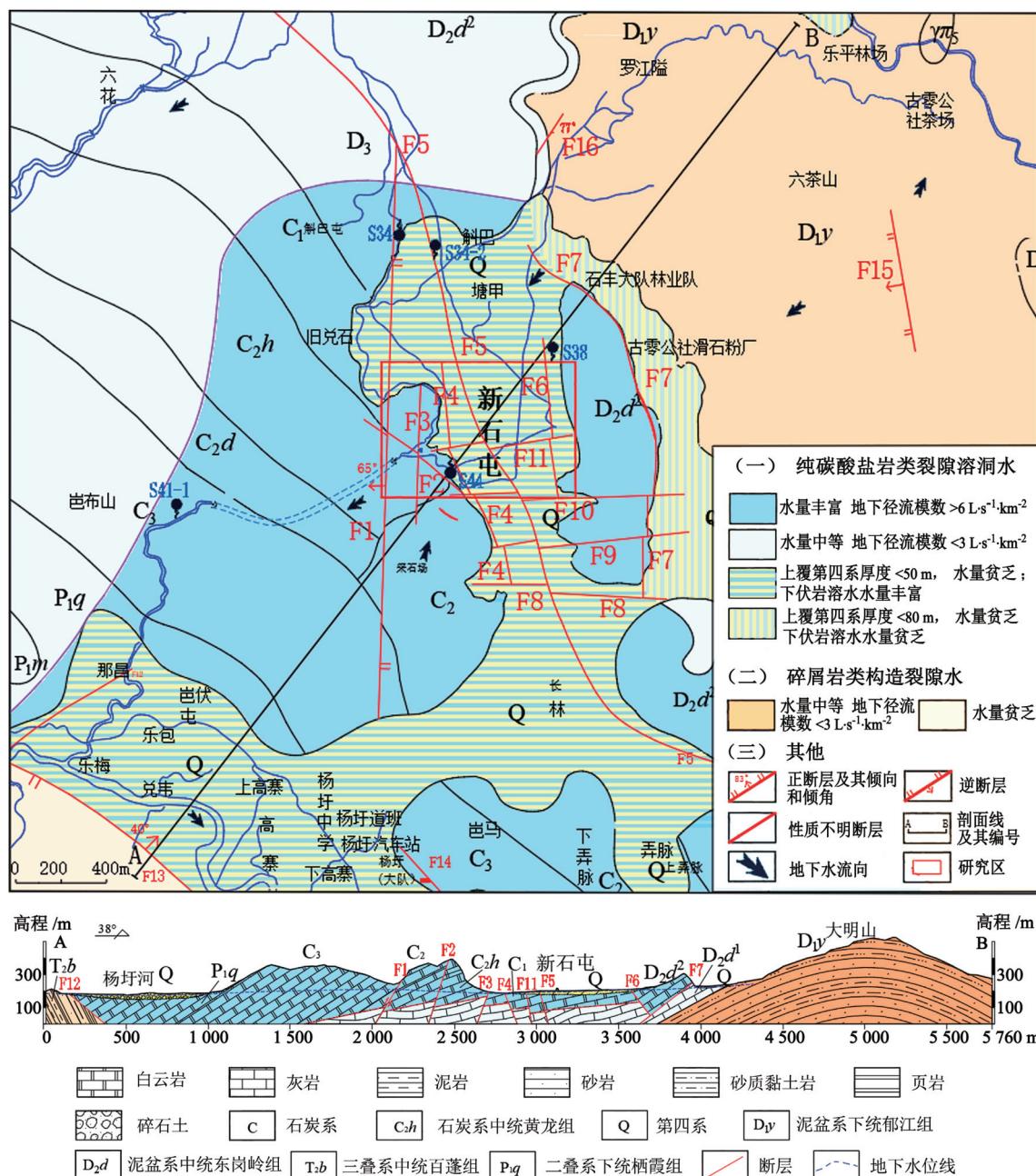


图2 研究区区域岩溶水文地质图

Fig. 2 Regional karst hydrogeological map of the study area

径流系统, 加剧区内水文地质条件变化, 从而引发各种环境地质问题。

## 2 岩溶塌陷灾害特征及分布规律

### 2.1 岩溶塌陷灾害特征

2015年12月4日起, 研究区发现有地面开裂现象, 部分房屋有倾斜下沉、围墙出现裂缝(图3), 同一时间民井干涸, 岩溶大泉、水塘水位持续下降, 最终下降幅度达15 m。西南侧岩溶大泉(S44)至塘甲滑石矿区边缘一线开始出现数个塌陷坑。12月7日后, 塌陷坑数量逐渐增多, 发生范围扩大。在

监测过程中发现多数塌陷坑30天以后仍继续塌陷, 仍未达到稳定状态。2016年5月至7月仍有新塌陷点出现。

研究区内共发生97处岩溶地面塌陷(图4), 塌陷平面形态多呈似圆形—椭圆形, 剖面形态多呈漏斗状。塌陷坑总面积为1367 m<sup>2</sup>, 最大254 m<sup>2</sup>, 最小0.5 m<sup>2</sup>。地面裂缝通常为环形或弧形, 主要分布在塌陷坑周边区域。地面裂缝最宽处可达10 cm, 长度范围在9.87~17.75 m之间。

经统计, 此次岩溶地面塌陷地质灾害造成一幢3层楼房严重倾斜, 1座水塔倒塌, 5处附属建筑沉陷, 1栋建筑基础塌陷造成地基出露, 多处房屋及围墙开



图3 岩溶塌陷照片

Fig. 3 Photos of karst collapses

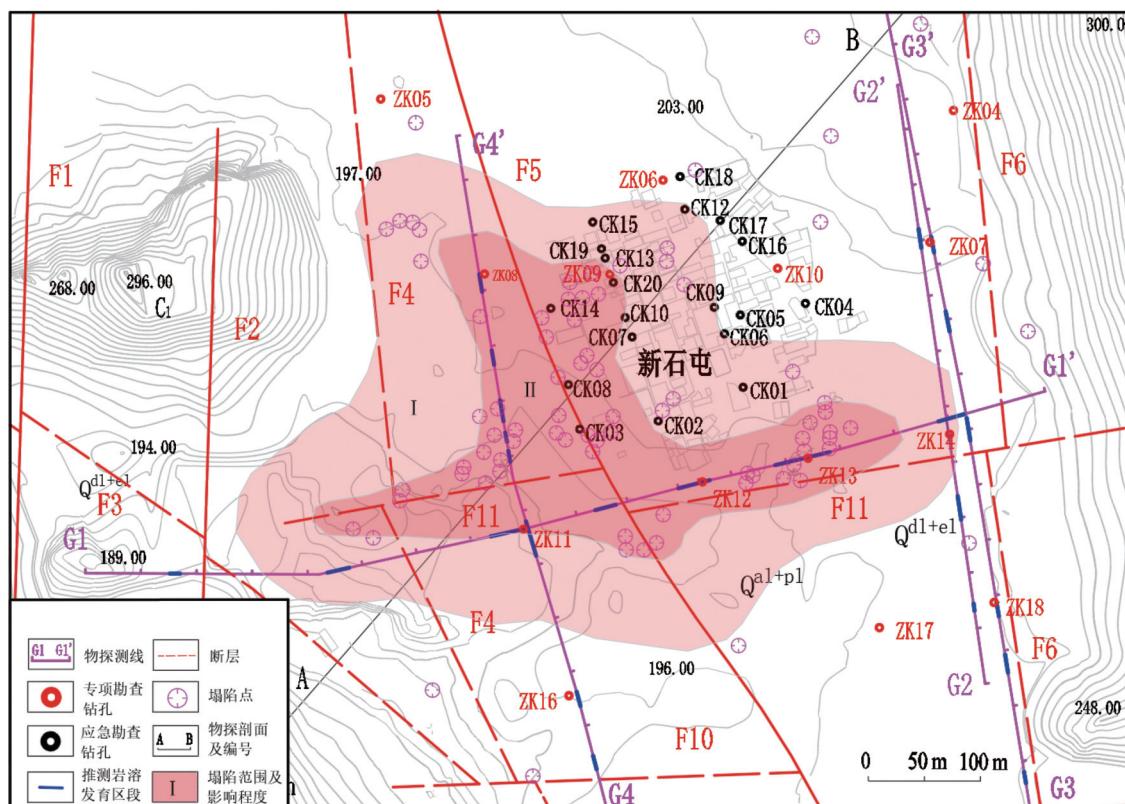


图4 研究区塌陷分布及勘探布置图

Fig. 4 Layout of collapse distribution and exploration

裂,部分交通受限制。严重威胁研究区约四百七十多生命财产安全,直接经济损失大于1000万元。

## 2.2 岩溶塌陷分布规律

为了探究岩溶塌陷的分布规律,在研究区进行了详细的塌陷地面调查,进一步结合物探、钻探成果进行了研究(图4)。

### 2.2.1 集中分布于断层构造发育区

研究区塌陷大部分位于F6断层及以西地带,该区域断层发育,其塌陷数量明显高于其他区域。其中在断层带上分布的岩溶地面塌陷就有46个,占全部塌陷的47%。从图4中可知,塌陷主要分布在断层F5和F11周边。其中塌陷距断层距离0~50 m的有46处,占47.4%,距断层50~100 m的有32处,占33%,距离大于100 m的有19处,占19.6%。随着与断层相隔的距离越大,塌陷明显减少。

构造决定了可溶岩地层的空间展布及构造应力的性质和分布,而构造应力的性质和分布,又直接影响岩层的断裂发育特点与发育程度,从而控制了岩溶的发育方向<sup>[20]</sup>。根据该岩溶塌陷区域高密度电阻率法及钻探结果显示,研究区共计勘探钻孔30个,有20个钻孔遇溶洞,共遇溶洞50个,岩溶发育强烈。布置高密度电法4条测线(G1、G2、G3、G4),共探测

出29个异常点,测线G1探测出7个,测线G2探测出6个,测线G3探测出4个,测线G4探测出12个(表1),推测为岩溶发育带及溶蚀裂隙发育带。

其中G1测线横跨谷地,位于研究区南部,呈东西向布置。该测线附近构造发育,沿途三处有南北向构造通过,测线东侧有东西向构造与之近距离平行。该测线区域分布着25个塌陷坑,在所有测线区域数量最多,其物探结果显示在该测线以下,存在着多个地下岩溶发育区,推测有12处之多。G4线位于研究区西侧村边,有三处断层构造通过。在测线上段500~700号点段,有两处断层通过,断层构造发育、岩溶洞隙发育、岩溶塌陷数量多。而在测线下段300~500号点段,远离断层构造带,岩溶洞隙较少,塌陷也较少(图5)。综上可知,断层构造带区域的溶槽、溶洞发育,加上地下水动力条件强,易诱发岩溶塌陷,已发生的岩溶塌陷多集中分布于此区域。

### 2.2.2 集中分布于覆盖层厚度中等的区域

据新石屯塌陷坑高程数据显示,位于研究区最低处(标高195~200 m)的塌陷坑占比达83%(图6)。根据钻探信息绘制该研究区的覆盖层等值线图(图7),从图中可知,塌陷主要集中在覆盖层厚度在10~20 m之间,共有73处,占比75.3%,而在覆盖层厚度为0~10 m、20~30 m的塌陷均较少,分别占

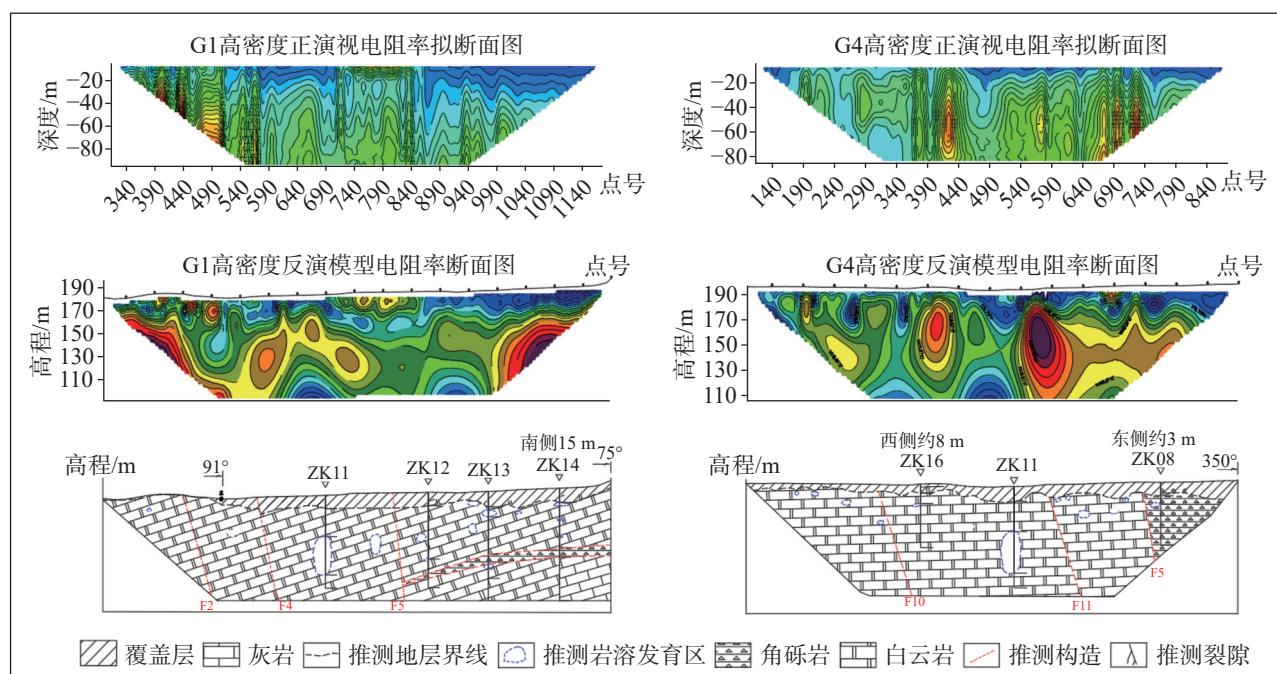


图5 G1、G4测线物探结果及地质剖面图

Fig. 5 Geophysical results and geological section of survey line G1 and G4

表 1 G1、G4 测线解析结果  
Table 1 Analytical results of lines G1 and G4

线号	异常点号	异常形态	推断解释结果
G1	376~385	“V”字型低阻异常	岩溶发育区, 发育深度为11~14 m
	518~538	“W”字型低阻异常	岩溶发育区, 发育深度为27~33 m
	668~701	“W”字型低阻异常	岩溶发育区, 发育深度为36~69 m
	768~788	“U”字型低阻异常	岩溶发育区, 发育深度为35~54 m
	850~880	“W”字型低阻异常	岩溶发育区, 发育深度为35~59 m
	940~990	“W”字型低阻异常	岩溶发育区, 发育深度为7~36 m
	1089~1115	低阻异常	岩溶发育区, 发育深度为12~44 m
G4	368~381	等值线不均匀	岩溶发育区, 发育深度为15~23 m
	508~541	中段等值线不均匀	岩溶发育区, 发育深度为36~69 m
	595~605	等值线不均匀	岩溶发育区, 发育深度为11~14 m
	613~621	等值线不均匀	岩溶发育区, 发育深度为9~13 m
	632~651	“V”字型低阻异常	岩溶发育区, 发育深度为20~27 m
	683~696	“V”字型低阻异常	岩溶发育区, 发育深度为20~25 m
	708~714	“V”字型低阻异常	岩溶发育区, 发育深度为13~17 m
	749~765	“V”字型低阻异常	岩溶发育区, 发育深度为16~20 m

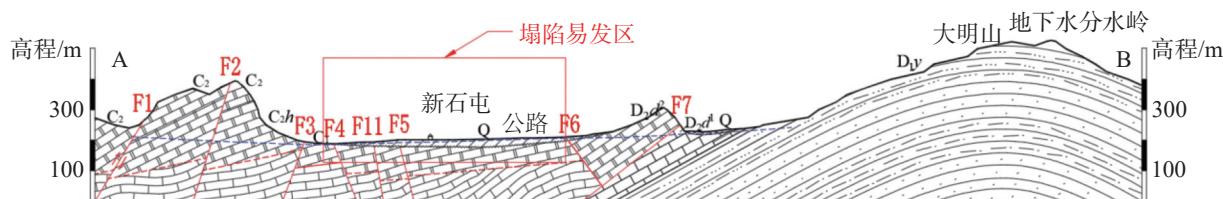


图 6 研究区塌陷发育高程图  
Fig. 6 Elevation map of collapse development of the study area

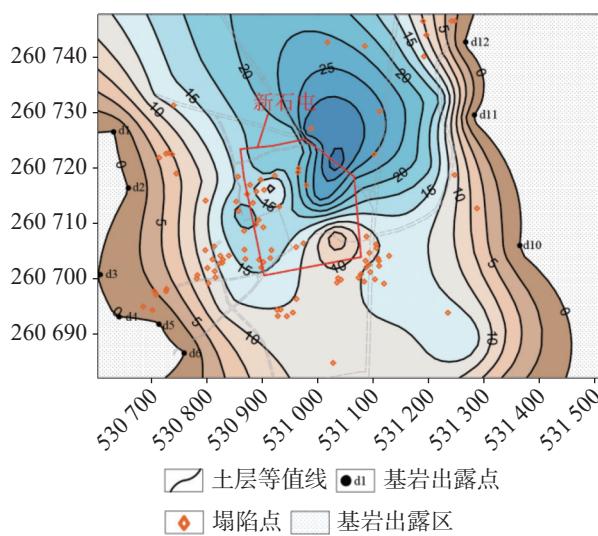


图 7 研究区覆盖层等值线图

Fig. 7 Contour map of overburden layers

18.5%、6.2%(图 8)。

据钻探资料可知,研究区地层结构一般为上覆厚10~20 m的第四系含碎石粉质黏土及部分砂砾石,

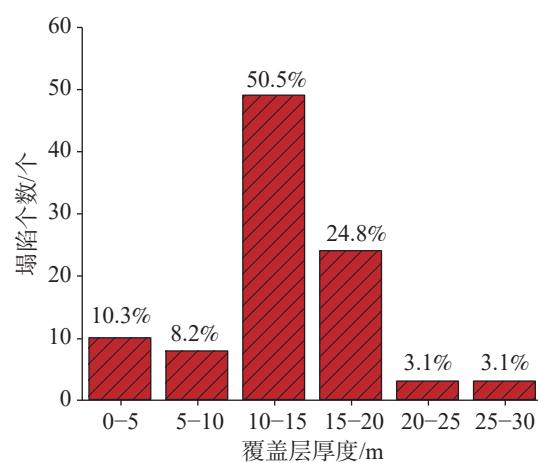


图 8 覆盖层厚度与塌陷数量关系  
Fig. 8 Relationship between thickness and quantity of collapses

该层属弱—微透水层。研究区地势低洼处10~20 m的上覆松散堆积物为塌陷提供了物质基础。其次,地势低洼处雨水易于汇聚,大量积聚的水体自身重力形成了作用于土洞顶板土体的静态荷载,致塌力

增加<sup>[21]</sup>。而且该区域地下水埋深均比周围地势高的地区地下水埋深浅, 在入渗时易形成上层滞水并下渗储存在地下岩溶管道裂隙中, 通过溶沟槽、天窗与基岩面土体接触产生浸泡。地下水长期的渗入、浸泡使土体多呈可—软塑状基岩面, 局部土体呈流塑状, 土体力学强度降低, 为土洞形成、岩溶地面塌陷产生创造了天然的物质条件。

### 2.2.3 集中分布于地下水位强烈变动区域

研究区地下水类型为裂隙溶洞水, 年水位埋深一般 8~15 m(图 9), 接受大气降雨补给和东部大明山碎屑岩区侧向补给, 自东向西径流, 于研究区西侧通过岩溶泉及伏流进行排泄。该区岩溶发育, 地下水丰富, 地下水变幅较大。塌陷区土层厚度一般 10~22 m, 雨季水位埋深一般 3~10 m, 地下水位波动较平缓; 枯季地下水水位埋深一般 12~15 m, 地下水水位一般位于基岩面附近波动, 利于土洞形成和发展。2015 年 12 月 4 日勘探区水位急剧下降至基岩面以下, 降幅超过 15 m, 12 月 6 日开始缓慢恢复到正常水位, 剧烈的水位波动以及由此产生的渗透潜蚀加强、浮托力减小和负压, 是引发岩溶塌陷灾害发生的诱发因素之一。

选取岩溶塌陷较多的区域进行地下水监测(ZK09、ZK13), 从图 10 可知, 地下水位在塌陷发生的 12 月到 1 月之间地下水水位出现强烈的变动。在溶蚀平原区, 当水位上升时, 水与岩石的接触面积增大, 加速了岩石的溶解过程, 导致地下溶洞的形成和扩大。相反, 水位下降时, 溶解速度减慢, 但地下溶洞的暴露可能导致上覆岩层失去支撑, 从而引发

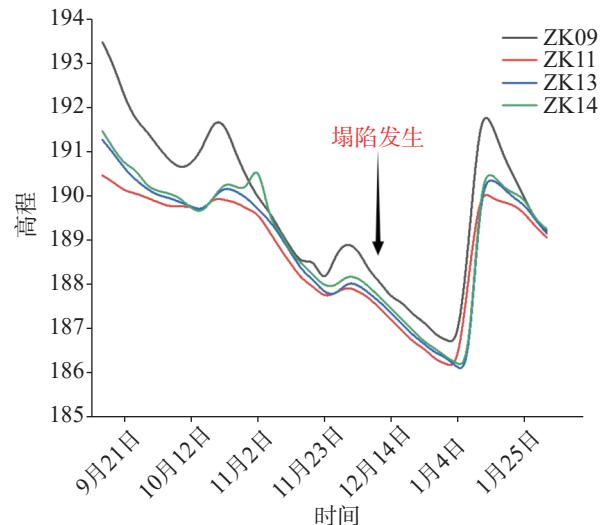


图 10 地下水位动态曲线图

Fig. 10 Contour map of groundwater levels

塌陷。地下水位的快速下降使原本由地下水支撑的岩溶洞顶失去支撑力, 从而引发塌陷。这种塌陷通常会突然发生, 主要是由于洞顶在失去水的浮力支持后, 无法承受上覆岩层的重量。

综上所述, 研究区岩溶地面塌陷主要受构造、覆盖层厚度以及地下水位三个因素控制, 即主要分布在断层构造带岩溶强烈发育区域、覆盖层厚度中等地区及地下水位强烈变动区域, 在这三个控制因素影响叠加区域发生的塌陷更为集中。

## 3 岩溶塌陷成因机制

岩溶塌陷的形成, 通常具备三个基本条件: 首先, 存在可溶性岩石层, 在地下水的作用下发生溶解, 形成溶洞和通道; 其次, 上方覆盖有一定厚度的岩层或土层; 最后, 地下水位波动等因素是导致岩溶塌陷的主要驱动力。从力学角度分析, 研究区的塌陷成因机制主要以真空吸蚀作用和潜蚀作用为主。

### 3.1 真空吸蚀作用

地下水沿裂隙发育带溶蚀形成宽大的溶蚀裂隙和溶蚀沟槽, 并与岩溶地下洞穴连通形成复杂的地下岩溶体系。在地下水水位频繁变化的情况下, 使基岩面附近土体不断被地下水潜蚀运移带走, 在土体底部形成了较大空洞, 地下水位的急剧下降, 导致浮力消失并产生真空吸蚀作用, 在重力共同作用下空洞上部土体超过土体支撑的临界值后产生岩溶地面塌陷, 其塌陷过程如图 11, 塌陷下来的松散土体主

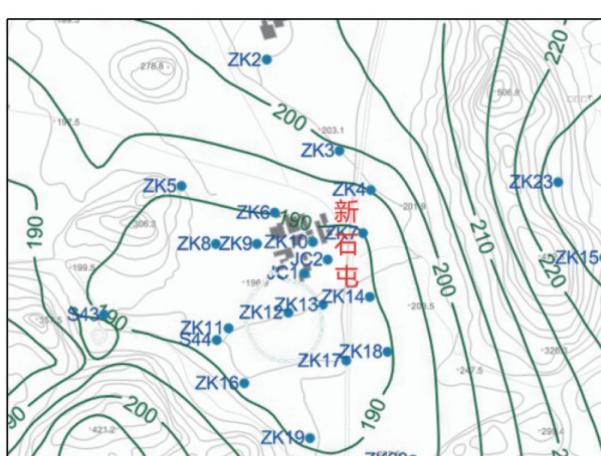


图 9 地下水位等值线图

Fig. 9 Curves of fluctuations in groundwater levels

要堆积在地下浅部洞穴及裂隙中。

分布于研究区 283°方向 260 m 及北东, 研究区东部及南部, 主要为浅覆盖层区, 断层构造发育。在地下水的强烈变动下, 水位能够降至基岩以下, 使其在空洞形成负压吸蚀, 造成塌陷。该类型的塌陷在研究区大范围分布, 调查到有 86 个, 约占现场调查塌陷点的 88%。其主要特征为: 覆盖层厚度一般在 15 m 左右, 如图 12, 塌陷已形成塌坑, 塌坑规模小—中等, 分布集中, 剖面形态上呈漏斗状、筒状等。坑底未见有孔洞和基岩出露, 周边裂缝基本稳定。平面沿断层呈带状分布, 塌陷点之间距离较近, 部分已相互连通。

### 3.2 潜蚀作用

由潜蚀作用形成的岩溶地面塌陷的成因除与地下水水位的反复变化有联系外, 还与土体的结构有着密切的联系。新石屯上覆土层主要为第四系洪积成因的含碎石粉质黏土及砂砾石, 抗侵蚀及潜蚀

能力相对较弱, 土体中的微小颗粒容易在地下水的作用下被冲刷走, 从而导致土洞的形成。土洞在正常的时候呈稳定状态, 经过长期地下水位的交替与周期性变化, 使覆盖层内软弱土层因潜蚀作用逐渐被掏空而形成土洞并扩大发展达到上部土层顶板的临界稳定状态时, 地下水急剧下降导致土洞上部土体失稳从而产生瞬间的塌陷。其塌陷过程如图 13, 塌陷发生后上部塌落的土体堆积土原土洞内。

基岩上部岩溶发育程度高, 溶孔、溶洞发育, 覆盖层黏结性差, 地下水位变幅大。该类型的塌陷在研究区谷地零星分布, 调查到有 11 个, 约占现场调查塌陷点的 12%。其主要特征为: 覆盖层厚度一般在 20 m 左右, 如图 14, 已形成塌陷坑, 规模小, 分布无规律, 呈零星分布, 周边无明显的地裂缝, 稳定性较好, 剖面形态一般经历从“坛”状→“筒”状→“漏斗”状的过程, 塌陷坑壁光滑。坑底部为塌陷壁崩塌而堆积的土体。

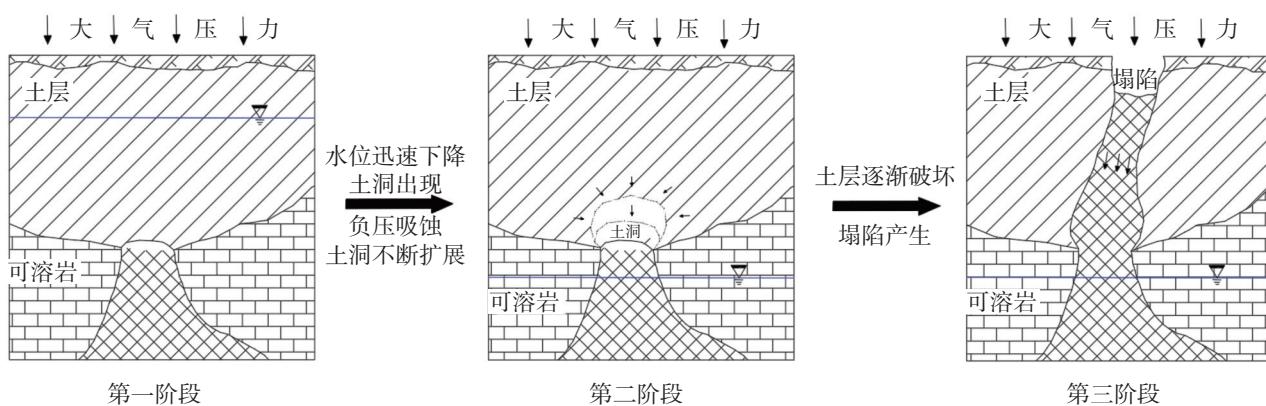


图 11 TX51 真空吸蚀作用引起塌陷过程  
Fig. 11 Collapse process caused by vacuum erosion of TX51

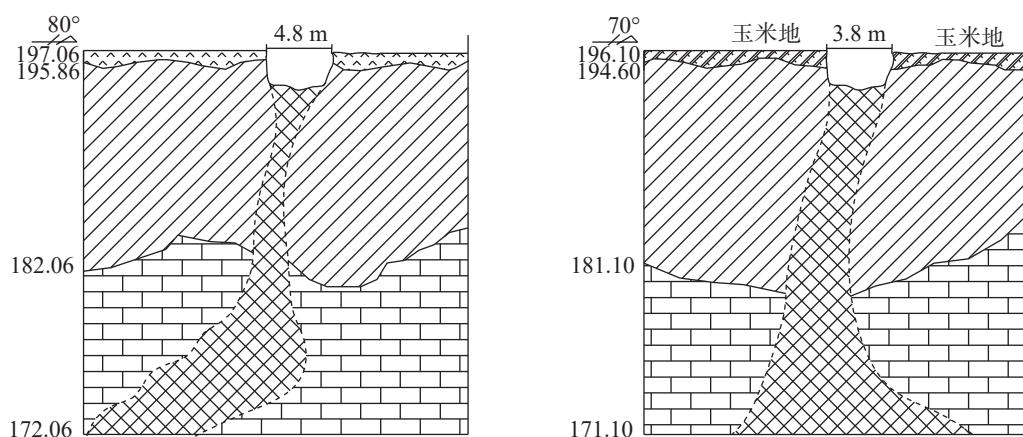


图 12 TX22(左)、TX51(右)塌陷剖面示意图  
Fig. 12 Schematic diagram of collapse profiles TX61(left);TX71(right)

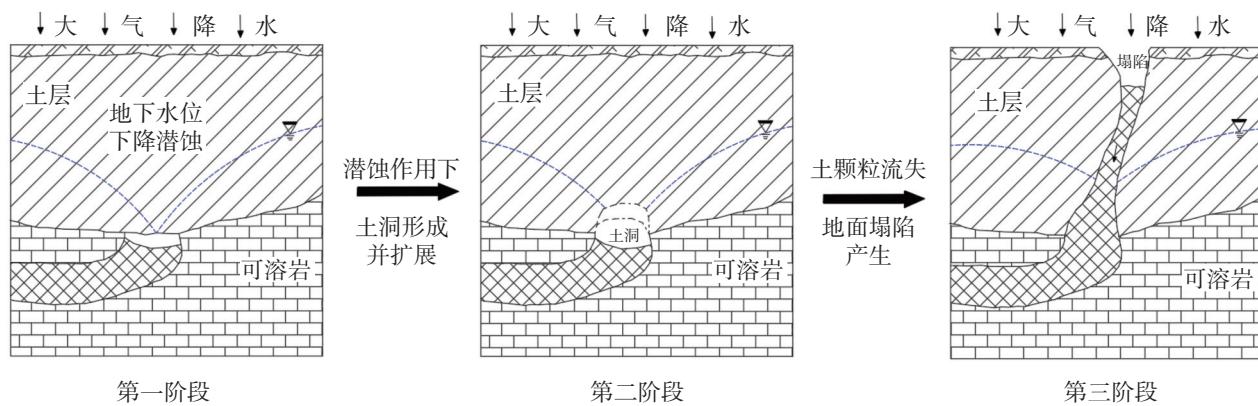


图 13 TX61 潜蚀作用引起塌陷过程

Fig. 13 Collapse process caused by suffosion of TX61

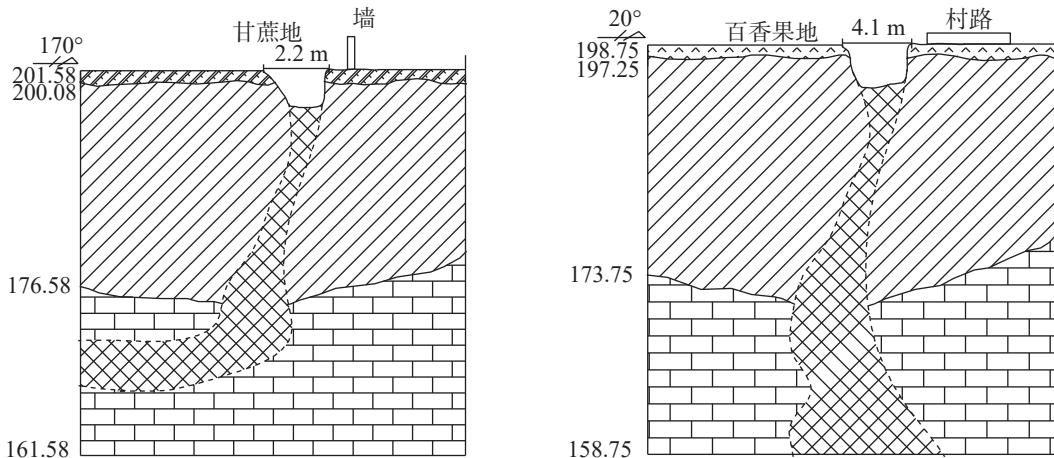


图 14 TX61(左)、TX71(右)塌陷剖面示意图

Fig. 14 Schematic diagram of collapse profiles TX61(left),TX71(right)

## 4 结 论

(1) 岩溶地面塌陷主要分布在断层构造带岩溶强烈发育区域、覆盖层厚度中等地区及地下水位强烈变动区域。分布区域覆盖层厚度主要在10~20 m, 岩溶较发育, 地下水活动剧烈, 在基础条件及空间条件相辅相成的情况下, 岩溶地面产生塌陷。

(2) 研究区地面塌陷的成因机制以真空吸蚀作用和潜蚀作用为主, 其中大部分岩溶塌陷为真空吸蚀作用引起, 约占现场调查塌陷点的88%, 少部分为潜蚀作用引起, 约占现场调查塌陷点的12%。

(3) 真空吸蚀作用形成的塌陷区主要为浅覆盖层区, 透气性差, 地下水强烈变动, 水位能够降至基岩以下。潜蚀作用形成的塌陷区, 岩溶发育程度高, 溶洞发育, 覆盖层黏结性差, 地下水位变幅大, 易冲刷土层颗粒。两者均是溶蚀平原岩溶塌陷的主要成因机制。

## 参考文献

- [1] 雷明堂, 蒋小珍. 岩溶塌陷研究现状、发展趋势及其支撑技术方法[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1998(3): 1-6.  
LEI Mingtang, JIANG Xiaozhen. Research status, development trend and supporting technical methods of karst collapse[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1998(3): 1-6.
- [2] 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(3): 126-130.  
ZHANG Lifen, ZENG Xiasheng, YAO Yunsheng, LIAO Wulin. Summary of karst collapse research in China[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2007(3): 126-130.
- [3] 邓启江, 李星宇, 吕琼, 李坚峰. 昆明市岩溶塌陷发育特征和防治措施[J]. 中国岩溶, 2009, 28(1): 23-29.  
DENG Qijiang, LI Xingyu, LYU Qiong, LI Jiaofeng. Development characteristics and prevention measures of karst collapse in Kunming City[J]. Carsologica Sinica, 2009, 28(1): 23-29.
- [4] 金晓文, 陈植华, 曾斌, 张文慧, 史婷婷. 岩溶塌陷机理定量研究的初步思考[J]. 中国岩溶, 2013, 32(4): 437-446.  
JIN Xiaowen, CHEN Zhihua, ZENG Bin, ZHANG Wunhui, SI Tingting. Preliminary thinking on quantitative study of karst col-

- lapse mechanism[J]. *Carsologica Sinica*, 2013, 32(4): 437-446.
- [5] 杨忠平, 高宇豪, 何科均, 卢丙清, 杨发祥. 基于易发性和降雨阈值的岩溶塌陷风险预测[J/OL]. 地下空间与工程学报, 1-12, 2024-07-26.
- YANG Zhongping, GAO Yuhao, HE Kejun, LU Bingqing, YANG Faxiang. Risk prediction of karst collapse based on susceptibility and rainfall threshold[J/OL]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 1-12 [2024-07-26].
- [6] 刘国文, 李涛, 徐鹏程, 王梦茜, 郑壹越, 胡望水, 齐东岩. 鄂尔多斯盆地大牛地西北部地区古岩溶形成机理[J]. *科学技术与工程*, 2024, 24(15): 6181-6189.
- LIU Guowen, LI Tao, XU Pengcheng, WANG Mengxi, ZHENG Yiyue, HU Wangshui, QI Dongyan. Formation mechanism of paleokarst in northwestern Daniudi area, Ordos Basin[J]. *Science Technology and Engineering*, 2024, 24(15): 6181-6189.
- [7] 杨磊, 张耀磊, 宋光啸, 覃剑文, 潘光明. 覆盖型岩溶区地面塌陷灾变规律与影响因素研究[J/OL]. 应用基础与工程科学学报, 1-16 2024-07-26]. YANG Lei, ZHANG Yaolei, SONG Guangxiao, QIN Jianwen, PAN Guangming. Study on the disaster law and influencing factors of ground collapse in covered karst area[J/OL]. *Journal of Basic Science and Engineering* 1-16 [2024-07-26].
- [8] 吴远斌, 罗伟权, 殷仁朝, 刘之葵, 戴建玲, 潘宗源, 周富彪. 重庆市龙泉村: 庆丰山村岩溶塌陷分布规律与成因机制[J]. 中国岩溶, 2021, 40(6): 932-942.
- WU Yuanbin, LUO Weiquan, YIN Renchao, LIU Zhikui, DAI Jianling, PAN Zongyuan, ZHOU Fubiao. Distribution law and genetic mechanism of karst collapse in Longquan Village-Qingfengshan Village, Chongqing City[J]. *Carsologica Sinica*, 2021, 40(6): 932-942.
- [9] 张杰, 张生海. 栖霞中桥地区岩溶塌陷时空分布规律及成因分析[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(1): 109-117.
- ZHANG Jie, ZHANG Shenghai. Temporal and spatial distribution and genesis analysis of karst collapse in Qixia Zhongqiao Area[j]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(1): 109-117.
- [10] 江思义, 吴福, 刘庆超, 黄希明, 李海良. 广西桂林市规划中心城区岩溶塌陷时空分布规律及成因分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(3): 65-72.
- JIANG Siyi, WU Fu, LIU Qingchao, HUANG Ximing, LI Hailiang. Spatial-temporal distribution and causes of karst collapse in Guilin planning center, Guangxi Province[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2020, 31(3): 65-72.
- [11] 高宗军, 王敏, 成世才, 钱丽丽. 岩溶地面塌陷的水-岩耦合模型[J]. 昆明理工大学学报(理工版), 2009, 34(3): 6-11, 23.
- GAO Zongjun, WANG Min, CHENG Shicai, QIAN Lili. Water-rock coupling model of karst ground collapse[J]. *Journal of Kunming University of Science and Technology*, 2009, 34(3): 6-11, 23.
- [12] 高宗军. 岩溶地面塌陷形成机理与成因模式研究: 以山东泰安一莱芜为例[J]. *中国工程科学*, 2008(4): 38-43.
- GAO Zongjun. Study on the formation mechanism and genetic model of karst ground collapse: Taking Tai'an-Laiwu in Shandong Province as an example[J]. *Strategic Study of Chinese Academy of Engineering*, 2008(4): 38-43.
- [13] 周正, 李大华, 廖云平, 林军志, 张烨, 陈洪凯, 祁永爱, 王贺. 重庆中梁山岩溶地面塌陷特征及形成机理[J]. 中国岩溶, 2022, 41(1): 67-78.
- ZHOU Zheng, LI Dahua, LIAO Yunping, LIN Junzhi, ZHANG Ye, CHEN Hongkai, QI Yonghai, WANG He. Characteristics and formation mechanism of karst ground collapse in Zhongliangshan, Chongqing[J]. *Carsologica Sinica*, 2022, 41(1): 67-78.
- [14] 李前银. 再论岩溶塌陷的形成机制[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2009, 20(3): 52-55.
- LI Qianyin. Re-discussion on the formation mechanism of karst collapse[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2009, 20(3): 52-55.
- [15] 徐卫国, 赵桂荣. 试论岩溶矿区地面塌陷的真空吸蚀作用[J]. 地质论评, 1981(2): 174-180, 183.
- XU Weiguo, ZHAO Guirong. Discussion on vacuum suction erosion of ground collapse in karst mining area[J]. *Geological Review*, 1981(2): 174-180, 183.
- [16] 徐卫国, 赵桂荣. 论岩溶塌陷形成机理[J]. 煤炭学报, 1986(2): 1-11.
- XU weiguo, ZHAO guirong. On the formation mechanism of karst collapse[J]. *Journal of Coal Science*, 1986(2): 1-11.
- [17] 代群力. 岩溶矿区地面塌陷成因新说: 共振论[J]. 中国煤田地质, 1991(3): 66-68.
- DAI Qunli. A new theory on the genesis of ground collapse in karst mining area-resonance theory[J]. *Coal Geology of China*, 1991(3): 66-68.
- [18] 熊启华, 曾嘉, 王芮琼, 汪维芳, 李静, 杨琛, 陶良. 武汉长江 I 级阶地覆盖型岩溶塌陷成因及力学模型研究[J]. 资源环境与工程, 2020, 34(3): 408-412.
- XIONG Qihua, ZENG Jia, WANG Ruiqiong, WANG Weifang, LI Jing, YANG Chen, TAO Liang. Study on the causes and mechanical model of covered karst collapse in the first terrace of Yangtze River in Wuhan[J]. *Resources Environment and Engineering*, 2020, 34(3): 408-412.
- [19] 罗小杰, 罗程. 岩溶地面塌陷三机理理论及其应用[J]. 中国岩溶, 2021, 40(2): 171-188.
- LUO Xiaojie, LUO Cheng. Three-mechanism theory of karst ground collapse and its application[J]. *Carsologica Sinica*, 2021, 40(2): 171-188.
- [20] 吴远斌, 刘之葵, 殷仁朝, 杨建兴, 罗伟权, 雷明堂, 戴建玲, 潘宗源. 湖南怀化盆地岩溶发育特征与分布规律[J]. 中国岩溶, 2022, 41(5): 759-772, 807.
- WU Yuanbin, LIU Zhikui, YIN Renchao, YANG Jianxing, LUO Weiquan, LEI Mingtang, DAI Jianling, PAN Zongyuan. Karst development characteristics and distribution law in Huaihua

- Basin, Hunan Province [J]. Carsologica Sinica, 2022, 41(5): 759-772, 807.
- [21] 万志博, 武雄, 徐晨, 李元仲, 杨蕊英, 陈鸿汉, 高明显, 张顺风. 枣庄市中区岩溶塌陷特征与成因分析[J]. 中国岩溶, 2006, 25(2): 146-151.
- WAN zhibo, WU xiong, XU sheng, LI Yuanzhong, YANG Ruiying, CHEN Honghan, GAO Mingxian, ZHANG Shunfeng. Analysis on characteristics and causes of karst collapse in central district of Zaozhuang City [J]. Carsologica Sinica, 2006, 25(2): 146-151.

## Distribution law and formation mechanism of karst collapses in karst plains of Mashan county, Guangxi

YAO Kezhui<sup>1</sup>, HUANG Jiyou<sup>2</sup>, XU Mo<sup>2</sup>, WEN Zhenxing<sup>1</sup>, LU Danmei<sup>1</sup>, QIN Chang<sup>1</sup>, KANG Xiaobing<sup>2</sup>

( 1. Hydrogeological and Engineering Geological Team of Guangxi Zhuang Autonomous Region, Liuzhou, Guangxi 545000, China;

2. College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China )

**Abstract** Karst collapse disasters occur frequently and cause huge hazards in the karst dissolution plain of Guangxi. Research on the distribution law and formation mechanism of collapses is the basic premise for disaster early warning, prevention, and control. A total of 97 karst ground collapses have occurred in Xinshitun, Shifeng village, Guling town, Mashan county, Guangxi. The plane morphology of collapses is mostly approximately circular to elliptical, and the cross-sectional morphology is mostly funnel-shaped. The total area of collapse pits is 1,367 m<sup>2</sup>, with a maximum of 254 m<sup>2</sup> and a minimum of 0.5 m<sup>2</sup>. Ground collapses have damaged buildings, restricted traffic, and severely threatened the safety of nearly 500 people's lives and property, resulting in direct economic exceeding 10 million yuan. In this paper, the Xinshitun karst collapse in Shifeng Village is taken as the research object. Through a comprehensive analysis of the natural conditions, including topography, geological structure, stratigraphic lithology, and meteorological conditions in the study area, along with the verification of geophysical prospecting and drilling methods, this study discusses the distribution law, influencing factors, and genetic mechanisms of karst collapses in the dissolution plain. Furthermore, it delves deeply into the genetic mechanisms of karst collapses in this area.

The distribution of collapses in this area indicates as follows, (1) Ground collapses are mainly distributed in areas with strong karst development in fault tectonic belts. Of these collapses, 46 occur 0–50 m away from the fault, representing 47.4%; 32 are located 50–100 m away from the fault, accounting for 33%; and 19 are situated more than 100 m away from the fault, comprising 19.6%. Notably, as the distance from the fault increases, the frequency of collapses decreases significantly. (2) Ground collapses are distributed in areas with moderate thickness of overburden layers. Most of these collapses are concentrated in the areas where the thicknesses of overburden layers range from 10 m to 20 m, totaling 73 incidents, accounting for 75.3% of the cases. In contrast, collapses occurring in overburden layers with thicknesses of 0–10 m and 20–30 m are less frequent, representing 18.5% and 6.2% of the total, respectively. (3) Ground collapses are distributed in the areas where there are significant fluctuations in groundwater levels. A rapid decline of groundwater level can cause the roof of a karst cave, which is originally supported by groundwater, to lose its supporting force, thus ultimately leading to a collapse.

In general, the karst ground collapses in the study area are mainly influenced by three factors: geological structure, overburden thickness, and groundwater level. Specifically, these collapses are mainly distributed in areas with strong karst development within fault tectonic zones, areas with moderate overburden thickness, and areas where groundwater levels exhibit substantial fluctuations. Furthermore, the collapses occurring in the area where the three control factors jointly affect are more concentrated. In the study area, collapses are mainly caused by vacuum suction and suffusion. Most of these karst collapses, approximately 88% of the investigated collapse points, are caused by vacuum suction, while a small proportion, around 12%, is attributed to suffusion. The collapse zones created by vacuum suction erosion are mainly found in shallow overburden area characterized by poor permeability. Significant

(下转第 198 页)

internal strengths to enhance the tourism image, managing the underground river to restore the unique characteristics of the tourism brand, leveraging policy opportunities to establish demonstration zones for sustainable development, taking advantage of market opportunities to create diversified tourism products, capitalizing on the opportunities presented by the establishment of demonstration zones to build an ecological tourism circle, using the advantages of the cooperations to improve corporate competitiveness, strengthening management and enforcing strict protection, cultivating tourism talent to improve the quality of tourism services, and encouraging local residents to participate in the development to enhance their sense of belonging to the scenic area.

Based on the actual tourism development of Guanyan cave, the application of the SWOT-AHP method to determine the strategic direction for sustainable development of cave tourism enables the precise formulation of sustainable development countermeasures. This approach holds significant reference to the sustainable tourism development of similar cave projects.

**Key words** SWOT-AHP model, tourism cave, strategic analysis, sustainable development strategy, Guanyan cave

(编辑 黄晨晖)

(上接第 169 页)

fluctuations in groundwater levels can lead to a drop in water levels below the bedrock, resulting in the loss of buoyancy within the cavities and the generation of negative pressure suction erosion within them. When combined with gravitational effects, this phenomenon may cause the overlying soil above the cavities to exceed the critical support threshold, ultimately resulting in karst collapses at the ground surface. The collapse zones formed by suffusion exhibit a high degree of karst development, development of karst caves, weak adhesion of overburden layers, substantial fluctuations in groundwater levels, and susceptibility of soil particles to erosion. When the roof of an upper soil layer reaches its critical stability, the upper soil becomes unstable, leading to instantaneous collapses. Both factors are the main mechanisms responsible for the formation of karst collapses in karst plains. This study examines the spatial relationship between collapses and fault tectonic belts, fluctuations in groundwater levels, and thicknesses of overburden layers to summarize the distribution laws and formation mechanisms of karst collapses in the Guangxi karst plains. The research findings provide a reference for the prevention and investigation of karst ground collapses in similar karst plain areas.

**Key words** karst collapse, distribution law, vacuum suction erosion, karst plain, fault effect

(编辑 杨杨)