

# 云南省丘北县温浏集镇区岩溶塌陷成因分析与防治

蒋学广

(云南地质工程第二勘察院有限公司,昆明 650218)

**摘要:** 云南岩溶区分布较广,建设工程遭受岩溶塌陷危害的较多,为了探索岩溶塌陷成因及治理技术,以云南省丘北县温浏集镇岩溶塌陷应急治理项目为例,通过调查、勘察、综合测绘,分析塌陷区的地质环境条件、岩溶发育特征、形成机理等,判断地层稳定性,进行岩溶塌陷易发性、危险性分区及防治分区,提出针对性的防治措施。温浏集镇区处于清水江左岸猴爬岩岩溶水系统之内,地层主要由第四系黏性土和下覆灰岩组成,溶洞、土洞及溶蚀裂隙发育,地下溶洞大致分为3层,岩溶受裂隙产状和断裂控制以垂向发育为主。岩溶塌陷受地形地貌、地层岩性、地质构造、地下水运动及人类活动等多种因素影响,演化过程分为6个阶段,塌陷区不稳定,扩展趋势明显,采用高压旋喷桩加固处理,外围地段理顺区内排水系统,建立长期地面变形和地下水水位监测措施。

**关键词:** 温浏集镇;岩溶塌陷;分布特征;成因机理;防治措施

**中图分类号:** P642.25;P642.26 **文献标识码:** A

## ANALYSIS ON THE CAUSES OF KARST COLLAPSE AND ITS CONTROL METHODS IN WENLIUJI TOWN, QIUBEI COUNTY, YUNNAN PROVINCE

JIANG Xue-guang

(Yunnan Geological Engineering Second Survey Institute Co., LTD., Kunming 650218, China)

**Abstract:** The Karst areas in Yunnan are widely distributed, and construction projects are more susceptible to Karst collapse hazards. In order to explore the causes and treatment technologies of Karst collapse, taking the emergency treatment project of Karst collapse in Wenliuji Town, Qibei County, Yunnan Province as an example, through investigation, survey, and comprehensive surveying, the geological environment conditions, Karst development characteristics, formation mechanisms, etc. of the collapsed areas are analyzed to determine the stability of the strata, and the susceptibility, danger, and prevention and control zones of Karst collapse are divided, Propose targeted prevention and control measures. Wenliuji Town is located within the monkey climbing rock Karst water system on the left bank of the Qingshui River. The strata are mainly composed of Quaternary cohesive soil and underlying limestone, with Karst caves, soil caves, and dissolution fractures developed. The underground Karst caves are roughly divided into three layers, and Karst is mainly developed vertically due to the occurrence of fractures and fault control. Karst collapse is influenced by various factors such as terrain, lithology, geological structure, groundwater movement, and human activities. The evolution process can be divided into six

stages. The collapse area is unstable and has a clear expansion trend. High pressure rotary jet grouting piles are used for reinforcement treatment, and the drainage system in the surrounding area is streamlined. Long term ground deformation and groundwater level monitoring measures are established.

**Key words:** Wenliuji town; Karst collapse; distribution characteristics; genetic mechanism; prevention and control measures

云南省岩溶区主要分布于东经 $102^{\circ}$ 以东、元江以北的滇东岩溶高原区,滇西北横断山中段至南缘的高山中山峡谷盆地,以及滇西保山至沧源等褶皱带中山宽谷盆地<sup>[1]</sup>,面积达 $11.09 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,占云南省总面积的28.14%,区域上分布零星,地段上呈现“点状”特征,主要集中发育于岩溶断陷盆地、岩溶槽谷(洼)地、岩溶台地或古高原面等特定的岩溶地质环境单元<sup>[2]</sup>。建设在岩溶区的城镇、村庄,时有岩溶塌陷的发生。近年来,因重大工程建设搬迁、地质灾害搬迁、新农村建设的村庄较多,部分搬迁新址就选在地形平缓的隐伏岩溶区,建成后即遭受岩溶塌陷危害。当在人员密集区域发生塌陷后,就需要紧急处理塌陷位置,尽快恢复场地使用功能<sup>[3]</sup>。前人对岩溶塌陷和治理技术进行了大量的研究<sup>[4-10]</sup>,普遍认为岩溶塌陷发育演化包括孕育、形成、稳定3个时期,地质构造、覆盖土层与水文地质条件为发生岩溶塌陷的主导因素,大气降雨和人类活动为诱发因素。岩溶塌陷的形成条件为可溶岩分布、岩溶洞隙存在、一定厚度的松散盖层及易于改变的岩溶地下水动力条件的共同作用。岩溶塌陷多发生在地下水位变化幅度大、水动力条件易发生急剧变化的地段,强降雨、过度采排地下水以及连续干旱,特别是水位在灰岩面上方2 m内持续波动超过5 d以上更易触发塌陷,塌陷区土层厚度均小于30 m。岩溶塌陷防治首先要合理规划地下水采排方案,对地下水位埋深具承压性、隐伏溶洞充填率高的复杂岩溶区,加强基岩面上覆土层抗渗强度、管控岩溶地下水降深,独立工程宜采用深基础法和跨越法进行工程治理。前人对岩溶塌陷的研究重视理论探讨的较多,具体指导生产实践的较少。本文通过工程案例,介绍岩溶分布规律,分析岩溶塌陷形成机制和稳定性,拟定相应的防治措施,为后续村庄搬迁和新农村建设的选址提供借鉴,为村庄、集镇区岩溶塌陷防治提供参考,对岩溶塌陷灾害的防治具有现实意义。

## 1 工程背景

丘北县温浏洼地内近年发现的塌陷有两处,相

距约400 m,一处是2015年10月发生在洼地南侧山麓部位耕地内的塌陷坑,直径10 m,深5.5 m;另一处是2022年2月在洼地南西部的集镇区发生的民房开裂变形,强烈变形区整体呈不规则椭圆形,短轴长24 m,长轴长30 m,面积 $720 \text{ m}^2$ ,发育12条地面裂缝和7条墙体裂缝。外围变形影响区整体呈不规则椭圆形,短轴长65 m,长轴长80 m,面积 $5\,000 \text{ m}^2$ ,发育1条墙体裂缝。应急勘察查明变形区土层厚度11.6~39.7 m,基岩顶面溶蚀槽谷发育,地下水在土石界面径流强度较大,潜蚀作用强烈。温浏洼地长约2 000 m,宽约350~650 m,是温浏集镇的主要建设区和居民生产生活区(图1),结合应急勘察及综合地质测绘资料,将洼地内的集镇建设区和规划区作为重点研究对象。



图1 温浏集镇区地貌

## 2 区域地质背景

丘北县温浏洼地位于南盘江支流清水江流域内,汇流面积 $9.83 \text{ km}^2$ ,地形平缓,地势南西高北东低,海拔高程在1 440~1 500 m之间,相对高差60 m,自然地形坡度 $3^{\circ} \sim 5^{\circ}$ 。洼地周边可见高程大致为1 600 m和1 500 m的两级侵蚀溶蚀台面,地貌大致可分为峰丛洼地地貌、溶丘溶斗地貌、侵蚀溶蚀峡谷地貌。地层岩性主要有石炭系下统灰岩( $C_1$ )、中统威宁组灰岩( $C_2w$ )、上统马平组生物碎屑灰岩( $C_3m$ )、二叠系栖霞茅口组( $P_{1q+m}$ )、侵入岩体辉绿岩( $\beta_1$ )。洼地北西侧边缘发育一条 $35^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 方向

延伸的断层,南西侧集镇区发育一条  $290^{\circ}\sim 340^{\circ}$  方向延伸的断层,地质构造复杂,新构造运动较强,下伏基岩节理裂隙发育,局部地段岩石较破碎。气候类型属南亚热带高原季风气候类型,多年平均降雨量 1 300 mm,年最大降雨量 1 467.5 mm,最小降雨量 731.8 mm,日最大降雨量为 149.5 mm。地表水体不发育,无地下水开采,仅有洼地北西侧靠降雨补给的温浏水库,径流面积为  $5.37\text{ km}^2$ ,洼地内降雨以渗流、落水洞等方式进入岩溶管道及暗河系统汇入清水江。

### 3 地层结构

洼地总体倾向北东,覆盖层厚  $2\sim 42\text{ m}$  不等,

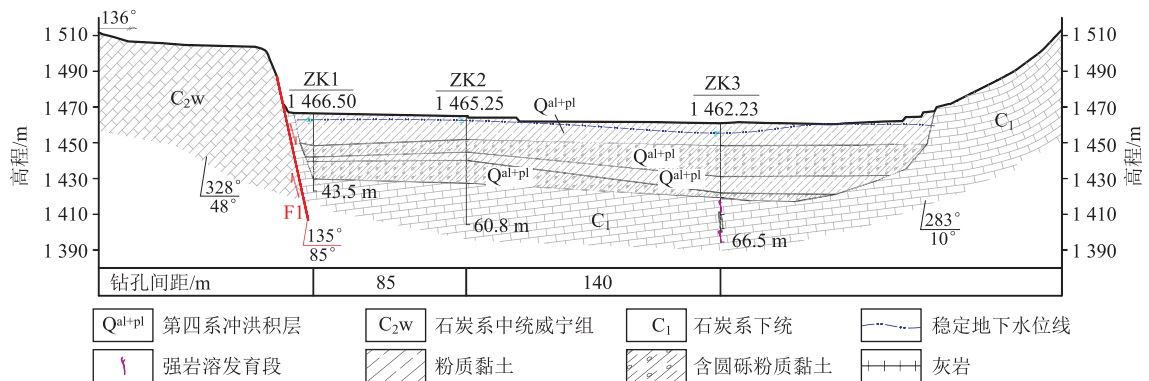


图2 洼地中部横向工程地质剖面图

## 4 水文地质条件

### 4.1 岩溶水系统

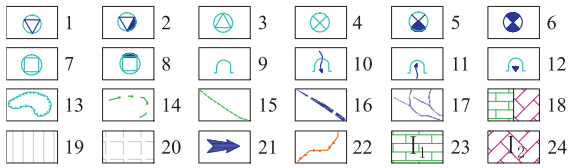
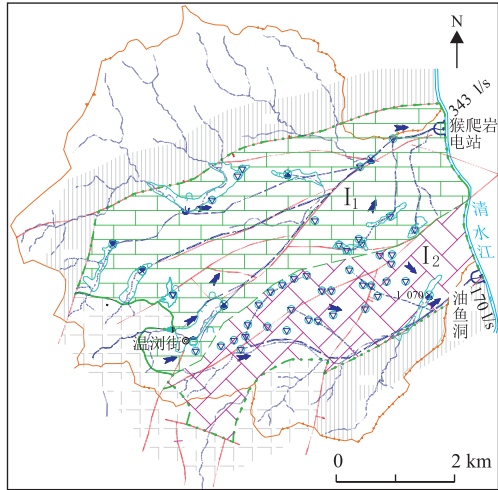
温浏洼地处于清水江左岸猴爬岩岩溶水系统之内,含水岩组为泥盆系、石炭系和二叠系的碳酸盐岩,其南东、北及北西侧与三叠系中统碎屑岩呈断层接触,南西侧边界为二叠系上统玄武岩不整合超覆,东侧清水江为排泄边界,系统边界清晰(图3),地表汇水区面积  $182\text{ km}^2$ ,岩溶区面积  $107.5\text{ km}^2$ ,枯季排泄量约为  $513\text{ l/s}$ 。系统中部中泥盆统东岗岭组灰岩和上泥盆统榴江组碎屑岩背斜褶皱凸起,导致系统内的岩溶地下水形成了南北分流,分别形成猴爬岩电站暗河系统( $I_1$ )和油鱼洞暗河系统( $I_2$ ),温浏洼地处于岩溶地下水补给区,洼地长轴两侧边缘干枯的落水洞呈串珠状排列。

猴爬岩电站岩溶暗河系统( $I_1$ )岩溶区面积  $71\text{ km}^2$ ,暗河平均纵坡降  $46\%$ 。地貌组合岩溶形态为峰丛洼地,个体形态以落水洞、溶井、北东向槽谷多见,清水江自南而北横切,形成深切槽谷。系统内汇集了若干个岩溶洼地、漏斗的水流,综合多种因素推

测该系统的岩溶主管道在上游分为左、中、右3支,在大落水一带汇集,至清水江左岸排泄地表。油鱼洞岩溶暗河系统( $I_2$ )岩溶区面积  $36.5\text{ km}^2$ ,暗河平均纵坡降  $27.5\%$ 。地貌组合形态为溶丘洼斗,亦有断层溶蚀平台向南东倾斜,南东侧与碎屑岩的断裂接触带有深切侵蚀溶蚀槽谷发育。系统内地面岩溶形态以溶丘、溶斗为主,溶丘之间的基座地形平缓、残坡积层厚度大,地势总体向六独坝子(溶蚀槽谷)方向倾斜,综合多种因素推测该区岩溶裂隙溶洞水在向六独坝子方向汇集后,形成暗河向清水江排泄地表。

### 4.2 地下水径流分带

地下水活动以垂直入渗为主,地下水径流划分为垂直径流区与水平径流区。垂直径流区主要为上部第四系覆盖层以及基岩顶部,标高  $1\ 400\sim 1\ 450\text{ m}$ 。区内基岩主要发育垂向溶蚀裂隙,覆盖层土体受大气降雨或人为排水入渗至基岩顶部,经溶蚀裂隙产生垂向径流区。根据地下暗河发育条件推算,水平径流区标高在  $1\ 350\sim 1\ 400\text{ m}$  之间,  $1\ 350\text{ m}$  标高以下基岩可能仍存在垂向径流区与水平径流



1. 干枯的岩溶漏斗; 2. 充水的岩溶漏斗; 3. 塌陷岩溶漏斗; 4. 干枯的落水洞; 5. 季节性充水落水洞; 6. 常年充水落水洞; 7. 无水的岩溶竖井; 8. 有水的岩溶竖井; 9. 干溶洞; 10. 出水溶洞; 11. 消水溶洞; 12. 充水溶洞; 13. 岩溶洼地; 14. 清水江左岸猴爬岩岩溶水系统边界(I<sub>1</sub>); 15. 次级岩溶水系统边界; 16. 推测地下暗河; 17. 地表水系; 18. 碳酸盐岩; 19. 碎屑岩; 20. 玄武岩; 21. 地下水流向; 22. 地表分水岭; 23. 猴爬岩电站暗河系统(I<sub>1</sub>); 24. 油鱼洞岩溶大泉系统(I<sub>2</sub>)

图 3 温浏洼地地下水系统分布图

区。

## 5 岩溶土洞塌陷发育分布特征

### 5.1 溶洞发育特征及分布规律

洼地底面以上的溶洞分布于洼地边缘山麓地带, 高程为 1 470~1 485 m 和 1 600 m, 位置最高的老石洞高出洼地约 150 m。溶洞洞口高 5~15 m, 宽 5~13 m, 洞深 15~35 m。洼地南部边缘低洼地段分布 2 个溶井 3 个消水洞, 均与地下溶洞或宽大溶蚀裂隙连通。洼地边缘沿多组溶蚀裂隙面形成地下岩溶管道, 收集大气降水, 汇集后顺斜坡脚的分支管道进入猴爬岩电站岩溶系统, 在猴爬岩电站排出地表汇入清水江。

钻探揭露地下溶洞大致分布在 1 375~1 385 m、1 390~1 405 m、1 430~1 440 m 这 3 个高程段, 钻探见洞率 31.67%, 揭露溶洞高度 0.3~16.1 m, 顶板埋深 15.91~90 m, 顶板厚度 0.3~63.5 m。大部分溶洞全充填, 局部溶洞少量充填-半充填。上层溶洞充填物质较下层溶洞更加紧密, 普遍轻微胶结。北部充填物以圆砾、卵石为主, 南部以粉质黏土

为主。取单位面积溶洞顶板计算极限抗剪厚度值为 0.16~1.28 m, 与实际溶洞顶板厚度进行对比分析, 溶洞顶板均稳定。地震映象法异常推断深度在 4~22 m 范围内, 多处波速较低, 推测岩土层较软弱或潮湿含水, 典型剖面如图 4 所示。高密度电法剖面推断表层第四系松散层厚度在 2~60 m 之间, 视电阻率较低; 中部低阻异常区推测为软弱带或溶沟溶槽; 底部视电阻率值较高区为基岩, 典型剖面如图 5 所示。

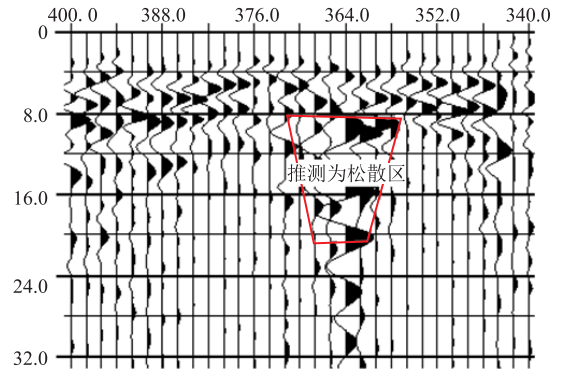


图 4 浅层地震勘察剖面示意图

### 5.2 土洞发育特征及分布规律

钻探揭露土洞 14 个, 见洞率 18.33%, 形态多呈竖井状。土洞充填物为含砾粉质黏土、圆砾和卵石, 松散, 高压缩性, 多呈饱和状。按“洞顶坍塌自行填塞估算算法”计算土洞顶板稳定性, 2 个土洞处于不稳定状态, 土洞继续发展将会导致地面发生沉降变形或发生塌陷, 其余土洞顶板稳定, 但有部分土洞顶板发展上限高度已接近土洞顶板高度, 今后在地下水的继续潜蚀作用下仍可能导致地面变形。土洞基本沿 4 个潜蚀作用强的区域分布: 一是地下岩溶洼地、溶蚀侵蚀槽谷附近, 地下水沿基岩顶面长期向洼地或槽谷底面径流, 于最近的消水裂隙处补给岩溶水, 形成局部强潜蚀流; 二是地表低洼地段, 长期或长时间积水区域, 地表水长期渗入地下, 同时也增强潜蚀水力坡度; 三是隔水层分布厚度较小且均匀性较差区域, 上下层之间地下水补给条件较好, 可形成持续性的潜蚀作用; 四是基岩顶面以上地层为黏聚力较小的含砾粉质黏土, 潜蚀作用会先将细粒土带至基岩溶蚀裂隙内并随岩溶水进入更深的岩溶通道, 形成空隙后将潜蚀更大颗粒物, 并逐渐增强潜蚀效果。

### 5.3 现状岩溶地面塌陷分布规律

岩溶地面塌陷主要有集镇区塌陷和集镇南侧山麓地带的塌陷坑, 两个塌陷存在较大差异性, 但形成机制基本相同。集镇区岩溶塌陷规模为小型, 其中

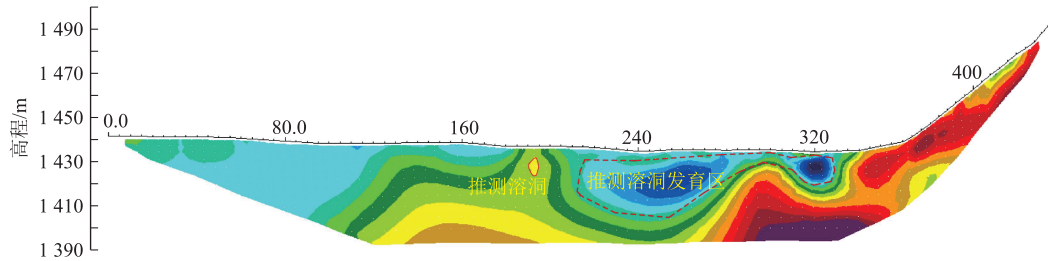


图5 高密度电法剖面图

强变形区  $720 \text{ m}^2$ , 变形影响区  $5\,000 \text{ m}^2$ 。塌陷区土层厚度  $11.6 \sim 39.7 \text{ m}$ , 覆盖层厚度差异较大, 基岩顶面溶蚀槽谷发育, 地下水在土石界面径流强度较大, 潜蚀作用强烈。南侧山麓部位塌陷坑直径  $10 \text{ m}$ , 深  $5.5 \text{ m}$ , 规模为小型。

## 6 岩溶塌陷成因机理和演化规律

### 6.1 岩溶塌陷成因机理分析

岩溶塌陷的产生主要受地形地貌、地层岩性、地质构造、地下水运动、人类活动等多种因素影响<sup>[11]</sup>。

**地貌因素:** 温浏洼地地貌类型为峰丛洼地, 溶峰基座多相连, 洼地面积  $0.2 \sim 1.2 \text{ km}^2$ 。在与非碳酸盐岩接触线附近地表水源较多的地段形成的洼地规模较大。洼地形态多呈北东-南西向的长条形, 受断裂控制明显, 洼地底部平坦, 坡洪积、冲洪积堆积, 洼地周边溶井、溶洞较多。洼地西侧为铁厂河, 洪水流向洼地内, 同时洼地自身就是一汇流积水的地形, 洼地内多处地势低洼, 排水不畅, 形成内涝区, 使地表水长期入渗地下。钻探揭露温浏洼地内基岩顶面起伏变化大, 最大高差  $144.82 \text{ m}$ , 地下溶洞和土洞发育。地下地貌形态(隐伏岩溶漏斗、溶槽、古河道)是土洞发育的决定性条件之一, 其控制了地下水的径流、汇集和排泄方向, 地形低洼处往往形成长时间积水区, 增加了地表水的入渗补给量。地下基岩顶面形态则决定了上层地下水补给下层岩溶水的径流形态, 即地下水在土石界面的短距离径流带, 往往在基岩顶面形成的低洼、洼地一带通过汇集后径流强烈或水力坡度增大, 形成强潜蚀带, 从而促使土洞的发育。

**地层岩性:** 温浏洼地土体抵抗地下水潜蚀能力弱, 容易被地下水潜蚀形成空隙并逐渐发展成土洞。下伏灰岩地层氧化钙含量高, 属易被溶蚀地层, 垂向宽大溶蚀裂隙发育。岩溶洞隙数量众多, 连通性好。地下水活动频繁, 交替强烈, 浅部岩溶洞隙成为塌陷物质的储集空间和运移通道<sup>[12]</sup>。钻探揭露地下隐

伏岩溶漏斗和槽谷地段形成 3 个主要降落漏斗, 说明地下水垂向径流通道畅通性好, 地下水径流强度大, 为地下水发生潜蚀和真空吸蚀强烈区。

**地质构造:** 温浏洼地西北侧缘断裂属猴爬岩断裂南分支, 断裂倾角大于  $80^\circ$ , 沿断裂两侧, 挤压破碎现象显著, 岩体溶蚀强烈, 溶洞和宽大溶蚀裂隙发育。沿断裂可见洼地北西缘断崖发育, 多呈直立状, 断崖上常见溶洞和溶孔发育。构造带及断层带两侧易形成带状或块状的强岩溶化地块, 形成沿断层走向的强岩溶发育带和地下水强迳流带。构造裂隙十分发育且集中, 岩石破碎, 有利于地表水和地下水的渗入和迳流, 地下水活动强烈, 岩溶发育, 易发生地面塌陷。

**地下水运动:** 水平运动的水流具搬运作用, 把岩土体内的颗粒带走, 使地下岩溶裂隙、溶洞腔体不断扩大, 不断的冲刷与溶蚀作用, 使碳酸盐岩顶板变薄, 支撑力降低; 垂直向运动的水流具潜蚀和搬运作用, 淘蚀土体形成土洞, 并且把细颗粒送至水平运动水流中, 产生水土流失, 随地下土洞、溶隙及溶洞体不断发展扩大, 顶板支撑力小于地面岩土体自重时引发了岩溶地面塌陷<sup>[13-14]</sup>。温浏洼地地下水主要接受上部松散层孔隙水入渗补给, 枯季因缺少补给和垂直渗漏而疏干; 雨季水源补给充足, 水位又会上涨。地下水位的反复涨落和垂直入渗, 部分土粒会随水流入渗入深部岩溶空隙内, 地下水位在垂直方向上的交替与周期性变化使基岩面附近的土层因潜蚀作用逐渐被掏空而形成土洞。

**人类活动:** 集镇区大量的民房和高层建筑物的修建, 加大了地面荷载, 改变了原始地面稳定平衡, 道路的过往车辆振动荷载打破土洞的极限平衡状态。雨水和生活污水集中排泄至低洼区域, 导致地表水入渗量加大, 加速了地下水运动, 地表水与地下水交替频繁, 营运、搬运作用加强。两者都会加速塌陷的形成。

### 6.2 岩溶塌陷演化规律

塌陷的演化规律主要受地下水垂向径流的影

响,在重力作用下,地下水的垂向径流相对水平径流更容易形成强烈的潜蚀流,随着细粒土的不断带走,土壤空隙逐渐增加,潜蚀作用也逐渐加强,从而能带走更大颗粒的土粒,逐渐形成土洞,土洞坍塌后坍塌体松散,抗潜蚀能力进一步降低。钻探揭露的土洞底部堆积物多为较大颗粒的圆砾或卵石,就是因为

细粒土已基本被垂向径流的地下水潜蚀或真空吸蚀作用运移至下部溶蚀裂隙或溶洞内。在土洞内伴随着土洞的不断坍塌和细粒土的不断向深部运移,其发展结果是土洞规模逐渐扩大,土洞顶板稳定性逐渐降低从而形成塌陷。土洞的形成可分为 6 个演化过程(图 6)。

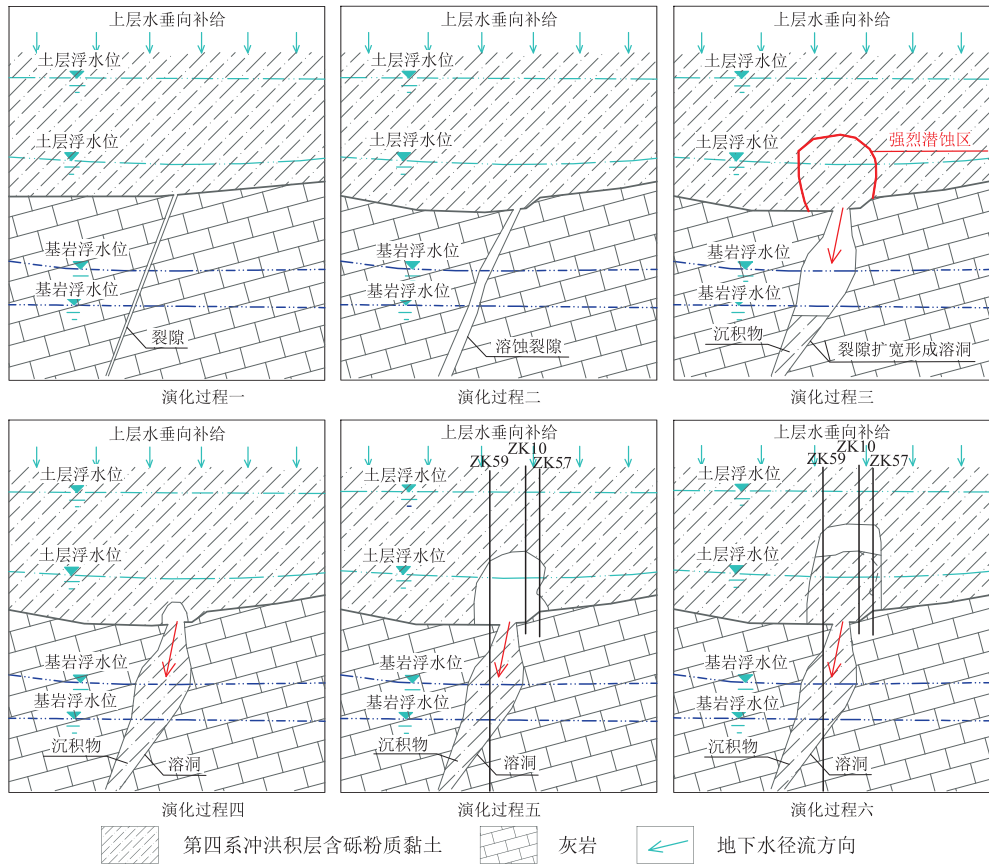


图 6 土洞演化过程示意图

演化过程一:形成于地壳间歇性抬升初期,地下水开始垂向径流,部分地下水沿灰岩裂隙间径流,岩溶活动较微弱。

演化过程二:形成于地壳抬升后的稳定时期,溶蚀活动逐渐加强,地下水以垂向径流为主,溶蚀裂隙加宽,裂隙数量增加,毛细岩溶通道逐渐形成,基岩顶面逐渐溶蚀形成凹坑。此时已有微弱潜蚀活动,小部分土粒被带入岩溶裂隙内。

演化过程三:随着溶蚀的逐渐增强,部分宽大溶蚀裂隙逐渐形成溶洞,深层的岩溶管道基本形成。土岩界面裂隙处或基岩顶面低洼处径流活动变得更加强烈,土岩界面附近的土层内发生强烈潜蚀,在基岩顶面低洼处形成强烈潜蚀区。土层内部空隙增加,区内的细粒土大部分被带入下部岩溶通道,形成流塑状的溶洞堆积物。

演化过程四:随着潜蚀活动的深入,较大颗粒物

因缺乏支撑随水流进入下部溶洞或裂隙内,小规模土洞基本形成。此时潜蚀活动和土洞坍塌常相伴发生,土洞发育速度逐渐加快。

演化过程五:随着时间的推移,土洞规模逐渐扩大,地下水在土洞洞壁处排泄进入土洞,随后进入岩溶水系统,此时为潜蚀活动强烈期。土洞扩大速率与覆盖层内地下水位埋深关系十分密切,地表水的长时间大量入渗增加地下水径流的水力坡度,长时间的强降雨活动很可能导致土洞发生剧烈坍塌和扩展。土洞坍塌后坍塌体孔隙度增大,地下水在坍塌体内径流时水力坡度大,潜蚀活动强烈,在此后的一段时间内,坍塌体逐渐被潜蚀流带入下部溶洞并进入深层的岩溶管道内。

演化过程六:揭露土洞遭遇强降雨入渗时,会在短期内加速土洞坍塌,洞顶向上延伸,坍塌体结构变得松散,更易于被地下水潜蚀。土洞越大,地下水补

给越丰富,土的黏聚力越小,则土洞发展速度越快。

## 7 集镇区地面塌陷稳定性分析

### 7.1 分析计算方法

(1) 采用“洞顶坍塌自行填塞估算法”,计算公式如下:

$$H = 2h_0/3(k-1) \quad (1)$$

式中, $H$  为土洞顶板发展厚度上限值(m); $h_0$  为土洞半径,取钻探揭露土洞、溶洞洞穴高度(m); $k$  为松胀系数,土层取 1.10。

当溶洞、土洞位于地下水强烈变化带时,直接判定为不稳定状态;当土洞顶板发展的上限高度  $H$  大于顶板实际厚度时,判定为不稳定,反之为稳定状态。

(2) 取单位面积溶洞顶板作为研究对象,求得顶板极限抗剪厚度与实际溶洞顶板厚度进行对比,若极限厚度小于实际顶板厚度,则该溶洞处于稳定状态,反之,溶洞处于不稳定状态。钻孔发育多个溶洞时,最顶部溶洞顶板受力考虑上部土体与顶板自重,下部溶洞只考虑顶板本身自重进行验算。溶洞顶板极限抗剪承载力计算公式如下:

$$H = T/S \quad (2)$$

式中, $H$  为溶洞顶板极限抗剪厚度(m); $T$  为溶洞顶板所受总荷载(kN/m); $S$  为顶板基岩抗剪强度(kPa)。

经过计算,钻探揭露的 12 个溶洞均处于稳定状态;1 个土洞处于不稳定状态;2 个土洞处于稳定状态。

### 7.2 地面塌陷稳定性分析

2022 年 2 月集镇区发生岩溶土洞地面塌陷,根据监测数据,在之后的半年内,地面裂缝一直处于发展变形阶段,尚未达到稳定,且局部时段存在变形加剧的情况,并有新的裂缝产生,表面塌陷处于前期变形阶段,稳定性差。土洞稳定性计算中,1 个土洞处于不稳定状态,随时间推移,雨季地下水位起伏变化过程中,土洞顶部土层塌陷变形进一步扩大,地表变形进一步加剧,与强烈变形区内尚未完全探明土洞共同作用下,可能导致强烈变形区持续变形下沉;变形影响区内 2 处土洞现状处于稳定状态,但随土洞发展变化,稳定性状态将由稳定状态演变至不稳定状态,影响变形影响区整体稳定性。此外,发育土洞均位于土岩接触面,基岩面岩体完整性较差,溶蚀节理裂隙发育,松散细颗粒土易沿溶蚀裂隙流失,加剧土洞发育。场地第四系覆盖层平均厚度 25 m,假设土洞发育位置位于基岩面附近,按“洞顶坍塌自行填

塞估算法”反算土洞发育安全高度为 3.75 m,即场地基岩面附近土洞高度超过 3.75 m,则处于不稳定状态。塌陷变形区基岩埋深 11.6~39.7 m,钻孔揭露溶洞 12 个,洞内均有充填,溶洞溶蚀裂隙以垂向发育为主,宽度不大,稳定性评价均为稳定;综合评价地下伏基岩稳定,不会产生岩溶洞穴塌陷风险。在时间线上,塌陷的变形特征可概括为强烈沉降变形-变形趋缓-变形停歇-再次强烈变形-变形趋缓-变形停歇,依此周而复始,其结果是塌陷范围逐渐扩大,沉降幅度逐次增加。

## 8 岩溶地面塌陷防治分区及防治措施

### 8.1 防治分区

岩溶塌陷环境是非常复杂的系统环境,其影响因素众多而且往往是多种效应的复合叠加,各因素的影响和作用大小不同,且具有很强的不确定性<sup>[14]</sup>。综合多种因素后将温浏集镇区划分为 3 个高易发区、3 个中等易发区和 1 个低易发区。按照现状土地使用类型划分不同地类发生岩溶地面塌陷时的社会经济影响程度,将集镇区划分为 6 个高易损区、4 个中等易损区和 5 个低易损区。在易发性分区、易损性分区评价的基础上,将集镇区划分为 4 个高风险区、3 个中等风险区和 3 个低风险区。根据温浏集镇区既有建筑的分布情况和未来建设规划情况,将集镇区划分为 2 个重点防治区、1 个次重点防治区和 5 个一般防治区(图 7)。

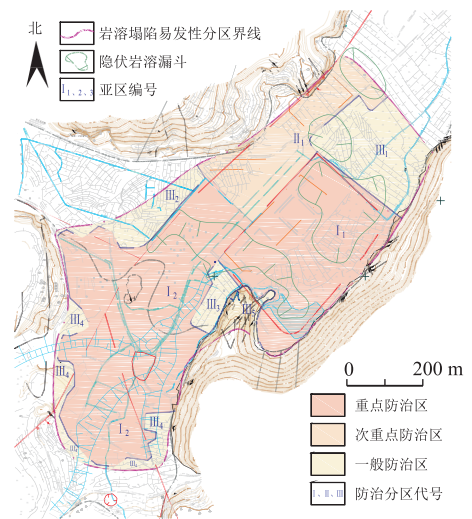


图 7 温浏集镇区岩溶塌陷防治分区图

### 8.2 防治措施

重点防治区 I<sub>1</sub> 区:首先是理顺区内排水系统,修建排水沟渠,将内涝区内雨水和生活污水及时排至北侧自然沟道内,达到及时疏干地表水的目的,避

免地表水长期入渗地下。其次区内应采取长期地面变形和地下水位监测措施,出现地面变形时及时预警。集镇建设规划区以避让为主调整建设规划方案。无法避让时可考虑采用高压旋喷加固法、注浆填充法或深基础法等措施。存在地下隐伏漏斗区以耕地、林地、园地和草地等低易损性用地类型为最优防治方案。

重点防治区 I<sub>2</sub> 区:区内建筑密集,整体应以地面长期变形监测和地下水位监测为主,在有条件情况下宜采取搬迁避让措施。变形区建筑物拆除后采取高压旋喷桩注浆加固,高压旋喷桩钻孔直径 50 mm,设计注浆加固体直径 1.0 m,注浆钻孔按桩距 1.0 m,排距 1.0 m,呈梅花状布设。共布置高压旋喷注浆钻孔 949 棵,单桩长 19~29 m,总长 20 569 m。强烈变形区西侧及集镇道路段北侧采用加长高压旋喷桩,共计 109 棵,强烈变形区内部采用底部高压旋喷桩,注浆段以基岩面为主,设计注浆加固长度 5.0~13.7 m,共计 788 棵,设计高压注浆段总长度 8 528.9 m。非高压注浆段采用水泥浆封孔,封孔段总长度 12 040.1 m。注浆材料选用采用 42.5# 普通硅酸盐水泥(高强无收缩注浆料)M30 水泥浆。

次重点防治区 II 区:以地面变形监测为主。村民避灾搬迁安置用地采用筏板基础。乡政府拟安置用地内存在两个隐伏岩溶漏斗,主体建筑应避开,隐伏岩溶漏斗范围做绿地使用。西侧陡崖存在危岩体,建筑与崖脚距离保持 15 m 以上。

一般防治区 III 区:该区均为耕地,应保留现状,采取有效措施疏干地表水,水田改旱地使用。区内不应规划建设用地,不宜圈批农村宅基地。

## 9 结语

(1) 温浏集镇处于岩溶水系统与玄武岩风化裂隙水的交接部位,岩溶洞穴水平方向连通性差、规模小、垂向延伸大。洼地内隐伏溶洞、土洞、溶蚀侵蚀槽谷发育。土洞和塌陷主要沿地下隐伏溶蚀侵蚀槽谷发育。

(2) 温浏集镇既有建筑区和既有规划区以外区域应重点参照岩溶塌陷易发性进行地块规划。塌陷区的勘察要采用综合地质测绘、钻探、物探等多种手段相结合,查清岩溶水文地质条件、工程地质条件、发育特征、分布规律、形成机理、塌陷区的稳定性和发展趋势等,才能有针对性地设计具体的防治措施,

防范风险,减少浪费。

(3) 拟在还未发生地面塌陷的岩溶地貌区开展工程建设时,应做好地面给排水工程,尽量减少地表水下渗。建筑物布置应尽可能避开岩溶塌陷易发区(段),在查清岩溶基本特征和分布规律的基础上做好建设规划。对岩溶塌陷及其隐患区可采取消除或改变形成岩溶塌陷条件、影响因素的工程措施进行防治,主要包括防渗封闭、结构物跨越和地下加固处理等。

(4) 需要开采地下水时,要合理布置开采工程,防止地下水位大幅波动。搬迁选址和新农村建设选址时应做好选址调查,尽量避开松散覆盖层厚度较小的隐伏岩溶区。

## 参考文献

- [1] 王宇. 西南岩溶地区岩溶水系统分类、特征及勘查评价要点[J]. 中国岩溶, 2002, 21(2): 44-49.
- [2] 王宇. 云南省地质灾害防治与研究历史评述[J]. 灾害学, 2019, 34(3): 134-139.
- [3] 汪旭. 贺州某校园地面塌陷成因分析及治理方法[J]. 砖瓦, 2022, (3): 74-77.
- [4] 孙伟. 广东省英德市城南社区岩溶塌陷发育特征及成因分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34(5): 74-80.
- [5] 姜巽, 曹聪, 刘智, 等. 歌乐山地区隧道工程诱发的岩溶塌陷发育规律与形成条件[J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(5): 181-191.
- [6] 韩振玉, 张仁勇, 吴英梅, 等. 烟台市栖霞中桥岩溶塌陷特征成因与综合治理措施研究[J]. 地下水, 2023, 45(4): 182-185.
- [7] 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/OL]. 中国地质, 1-25 [2023-12-18] <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20230313.1704.010.html>.
- [8] 吴亚楠, 杨云涛, 焦玉国, 等. 山东省岩溶塌陷发育特征及诱因分析[J]. 中国岩溶, 2023, 42(01): 128-138+148.
- [9] 刘昭京, 蒋小珍, 冯涛, 等. 湘桂铁路二塘车站路基岩溶塌陷成因与防治对策[J]. 中国岩溶, 2023, 42(01): 109-118.
- [10] 王有智, 杨宁, 于林弘, 等. 烟台中桥岩溶塌陷发育特征及防治对策[J]. 中国岩溶, 2022, 41(6): 1007-1015.
- [11] 杨建成. 地质灾害易发性区划的系统概念模型研究[J]. 防灾减灾学报, 2012, 28(2): 34-38.
- [12] 赵九辉. 广西柳州白云岩强岩溶发育区天然地基稳定性研究[D]. 广西科技大学, 2015.
- [13] 李海良, 王举平, 兰干江, 等. 从研究岩溶地下水角度分析评价岩溶塌陷的危险性——以南宁坛洛塌陷为例[J]. 山东国土资源, 2014, 30(4): 82-85.
- [14] 于景宗, 史海燕, 杨瑞刚. 大藤峡水利枢纽岩溶工程地质问题研究与实践[J]. 黑龙江水利科技, 2021, 49(9): 83-85.

作者简介: 蒋学广(1974—),男,汉族,云南宣威市人,高级工程师,从事地质工程、地质环境与生态修复研究工作。

E-mail: 1019606180@qq.com