

杨元丽,孟凡涛,李明惠.黔中地区浅覆盖型岩溶塌陷成因机制与防治对策:以紫云县白云小学岩溶塌陷为例[J].中国岩溶, 2020,39(1):80-87.
DOI:10.11932/karst20200103

黔中地区浅覆盖型岩溶塌陷成因机制与防治对策 ——以紫云县白云小学为例

杨元丽^{1,2},孟凡涛³,李明惠^{1,2}

(1. 贵州省地质环境监测院, 贵阳 550008; 2. 贵州省环境地质研究所, 贵阳 550008; 3. 贵州省地矿局 111 地质大队, 贵阳 550008)

摘 要:黔中地区处于贵州省第二阶梯,平均海拔 800~1600 m。具有可溶岩分布面积广、岩溶极其发育、第四系土层覆盖薄、地下水埋深浅、地下水动力条件强等特点。岩溶地面塌陷是该区主要地质灾害之一。为了查明贵州省紫云县白云小学岩溶塌陷的成因及发育机制,在塌陷区开展了水文地质调查、地球物理勘探、水文地质工程地质钻探、岩土样测试等多项工作。综合研究表明,白云小学岩溶塌陷是特殊的“水—土—岩”不良因素共同作用的产物。根据塌陷区的岩土组构特征,建议在黔中岩溶地区进行工程选址前,采用“监测预防+控水+工程治理”综合防治措施。

关键词:黔中;浅覆盖型岩溶塌陷;成因机制;防治对策

中图分类号:P642.25 **文献标识码:**A

文章编号:1001-4810(2020)01-0080-08 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



0 引 言

岩溶塌陷又称岩溶地面塌陷,是指隐伏岩溶洞隙上的岩、土体在自然或人为因素的作用下,引起变形破坏,并在地面形成塌陷坑洞的一种岩溶动力地质作用和现象^[1],是岩溶地区的主要地质灾害之一。其具有突发性和隐蔽性^[2],危害大,且在岩溶地区广泛分布。贵州省处于世界喀斯特最复杂、类型最齐全、分布面积最大的东亚岩溶区域中心^[3]。岩溶塌陷发生范围极广。根据贵州省 2011-2013 年重点地区重大地质灾害详细调查情况初步统计,全省塌陷地质灾害共 843 处,其中,非矿山引发的岩溶塌陷地质灾害 257 处^[4]。严重威胁着当地居民的生命和财产安全。岩溶塌陷致使工程设施,如工业、学校、民用建筑、交通干线,通讯设施、电力设施、矿山及水利设施等遭到破坏,并加重了本就土层薄的贵州岩溶山区

水土流失问题,成为贵州省主要地质灾害之一^[5-6]。

贵州省岩溶塌陷的研究起步相对较早,上世纪八十年代末就有关岩溶塌陷形成机制的论文发表^[7]。但大多集中于人为因素作用下的岩溶塌陷致塌因子和发育机制的定量讨论上^[8-15],随着研究资料积累,苏维词等^[16-18]从贵州省主要城市及全省的角度分析了岩溶塌陷的成因,影响因素和防治对策。随着研究的深入,学者们开始从数学模型方面解释岩溶塌陷的形成机制及稳定性评价^[19-20]。

据黔中地区岩溶塌陷调查综合评价报告^[21],研究区内共调查 37 处岩溶塌陷,均为粘性土土洞塌陷,83.8% 发育于峰丛谷地和溶丘谷地地貌之中,97.5% 分布于土层厚度 1~10 m 的覆盖层地带,83.7% 发育于三叠系中下统安顺组、中统关岭组、杨柳井组等白云岩、灰岩、灰岩间夹白云质灰岩等纯碳酸盐岩岩溶地层中,地下水是区内最主要的触发因素。本文研

资助项目:黔科合平台人才[2017]5402 号
第一作者简介:杨元丽(1981—),女,工程硕士,高级工程师,主要从事水文地质与环境地质工作。E-mail:474642620@qq.com。
通信作者:孟凡涛(1983—),男,工程硕士,高级工程师,主要从事水文地质与环境地质工作。E-mail:474642620@qq.com。
收稿日期:2019-03-20

究的贵州省紫云县白云小学岩溶地面塌陷处于黔中地区的核心部位,其地质环境条件在区内具有典型的代表性,因此,以白云小学完整水文地质单元内典型岩溶塌陷野外和室内分析资料为依据,深入剖析其成因机制,提出针对黔中特殊地质条件下的岩溶塌陷防治对策,以期为黔中浅覆盖型岩溶塌陷区的防治提供科学依据。

1 岩溶塌陷地质环境概况

研究区属亚热带季风湿润型气候,雨水充沛。多年平均气温 15.3℃,多年平均降雨量 1 337 mm,区内河流属珠江流域红水河水系。地貌属峰丛谷地,山体多基座相连,少部分为孤峰,海拔为 1 115~1 553 m,相对高差约 438 m。谷地地势平坦,主要呈北东向展布,第四系松散堆积物分布较为连续,且多为黄黏土,厚度 3~5 m,整体厚度较薄,偶夹碎石,结构紧密,硬塑状。

区内发育三叠系永宁镇组、夜郎组、二叠系长兴—大隆组、吴家坪组、栖霞—茅口组、石炭系马平—黄龙组,主要控制性岩组为二叠系中统栖霞—茅口组(P_2q-m)灰岩,岩性较纯,岩溶发育,溶洞、溶穴、溶孔、溶蚀裂隙等较发育,构成网状含水系统。区内构造活动较为强烈,主要以 NE—SW 向的压性断裂为主。受构造活动影响,褶皱发育,其方向为 SN 向

和 NW 向(图 1)。

地下水主要来源于北东地区的降水补给,在网状溶洞、裂隙含水系统中由北东至南西径流,地下水埋深较浅,一般小于 5 m,水位变幅 2~5 m,最终于马坡最低排泄基准面以地下河出口的形式排泄。

2 岩溶塌陷特征及成因分析

2.1 岩溶塌陷形态及发育规律

2.1.1 岩溶塌陷形态

通过实地调查,历史上白云小学所处的水文地质单元内曾发生过多处岩溶塌陷,塌陷形成时间约为二十世纪八十年代,具体时间不详。塌陷坑平面形态有圆形、椭圆形及不规则形,其中以圆形为主,占总数的 80%;椭圆形和不规则形则为零星分布,二者约占总数的 20%;在剖面形态上,则以漏斗状、柱状、坛状为主,深约 4~10 m(表 1、图 2)。

本文重点研究区紫云县白云小学岩溶塌陷(TX01),发生于 2018 年 7 月 14 日下午,塌陷坑位于白云小学操场,平面形态近似圆形,直径约 13 m,初始发生时其深度约为 60 cm,至 9 月份深度达到 4 m 左右;剖面形态为漏斗状,上大下小,为黄色、褐黑色黏土夹碎石、卵石充填及表层人工填土充填,未见基岩,底部有积水。

表 1 研究区内岩溶塌陷一览表
Table 1 Karst collapses existing in the study area

编号	规模	塌陷坑形态	备注
TX01	直径约 13 m,深度 4 m 左右	圆形	坑底有水,水位深度约 3 m
TX02	长轴约 40 m,短轴约 16 m	椭圆形	未见地下水
TX03	直径约 50 m,深度 10 m 左右;坑底有一溶洞,洞高约 3 m、宽约 1.5 m,洞口方向 315°,该洞为一消水溶洞	圆形	洪水时既会出水,同时也消水;调查期间未见水,其埋深大于 15 m
TX04	内外两层,内外高差约 3 m。外层呈不规则形,宽约 40 m;内坑呈葫芦形(20 m×15 m)	不规则形	内坑呈竖井状,内外坑台阶为耕地,洪水期间有水溢出;调查期间未见水,其埋深大于 12 m
TX05	该塌陷坑为多层状,共 3 层,直径分别为 27 m、11 m、5 m,台阶高度约 1.5 m	圆形	洪水期间有水溢出,水位变化最大 5 m 左右;调查期间未见水,其埋深大于 5 m
TX06	直径约 15 m,深 1.5 m,坑内为杂草	圆形	未见地下水
TX07—1	塌陷坑为 2 层,外坑直径约 33 m,内坑直径 2.5 m,深 2.5 m	圆形	丰水期有水溢出,最高水位 2.5 m 左右,高过坑边的村公路;调查期间未见水,其埋深大于 3 m
TX07—2	近似矩形,24 m×20 m,深度 2.5 m 左右	矩形	
TX07—3	直径约 32 m,深度 2.5 m 左右	圆形	
TX08	直径 25 m 左右,深度 3 m 左右	圆形	该塌陷点位于白云小学教学楼后侧 12 m 左右,与 TX01 距离约 30 m;其埋深大于 5 m

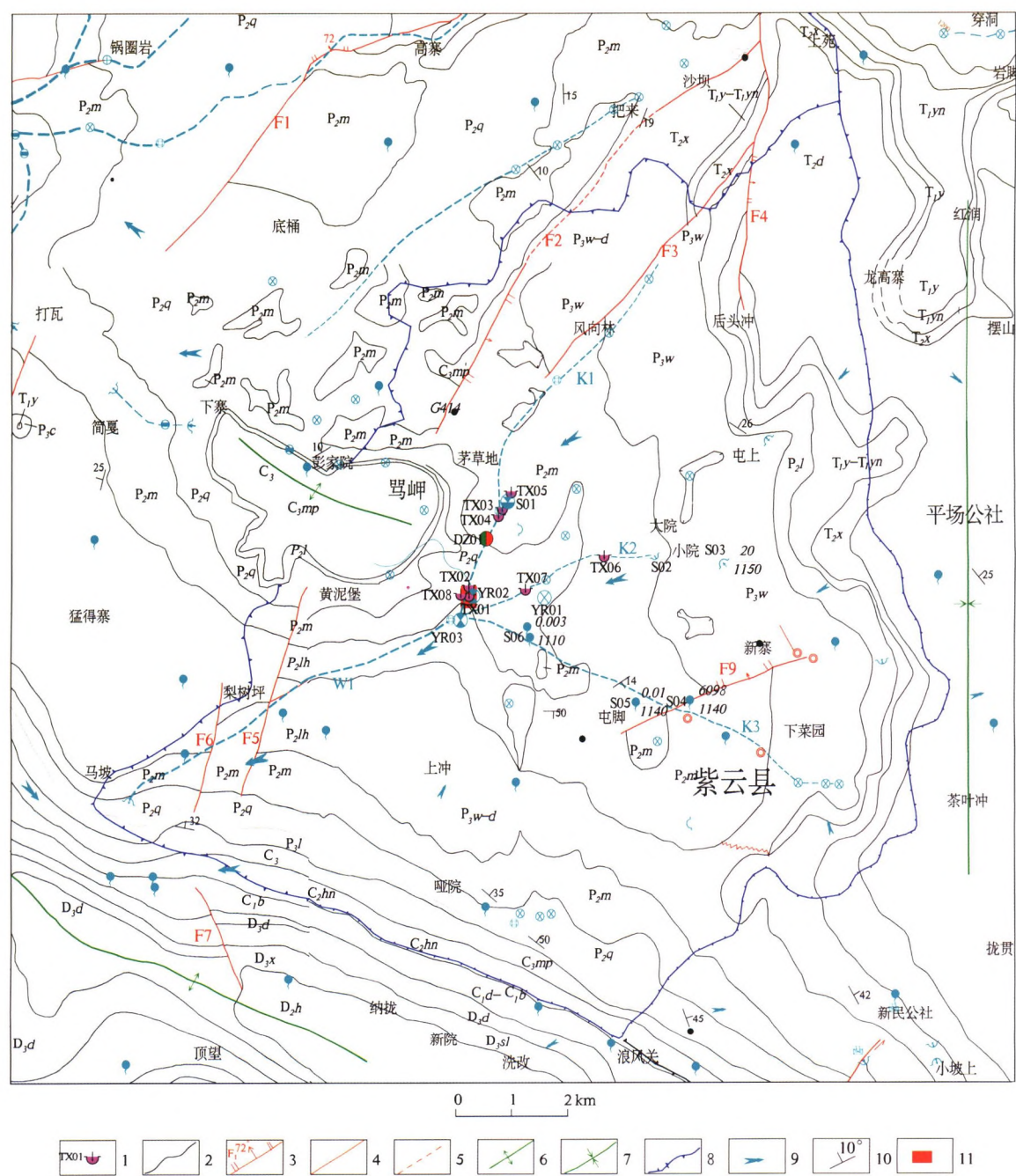


图1 研究区地质环境条件略图

Fig. 1 Sketch of geological and environmental conditions of the study area
1—岩溶塌陷 2—地层界线 3—正断层 4—不明性质断层 5—推测断层 6—背斜 7—向斜 8—分水岭 9—地下水流向 10—岩层产状

2.1.2 岩溶塌陷发育规律

研究区内岩溶塌陷的发生与岩溶的发育程度有着密切地联系。从图1可知,研究区中部主要出露二叠系栖霞-茅口组灰色块状含燧石灰岩地层,为质纯的碳酸盐岩分布区,地表岩溶极其发育,仅白云小学附近0.4 km²范围内发育了多种地表岩溶形态,岩溶洼地、落水洞、竖井等极其发育,属岩溶强发育区。且第四系土层厚度一般3~5 m,部分区域大于10 m,岩溶地表水与地下水密切联系。因此,在研究区中部发育了三条岩溶地下河管道(K1、K2、K3),地下河

分布呈树枝状,K1流向为东北至南西向,长度约10 km,埋藏深度在10~200 m之间,沿线在茅草地至白云小学一带,落水洞、塌陷坑呈串珠状分布;K2流向由东向西,长度约3.5 km,埋藏深度在10~50 m之间,塌陷坑、落水洞等沿下院、大院一线发育;K3流向由南东至北西,长度约7 km,埋藏深度在10~150 m之间,在紫云县城至屯脚一带发育串珠状落水洞,主管道长约7 km,沿途有零星泉点出露。三条管道在白云小学南约300 m处汇集为一条地下河(W1),最终于系统西面马坡最低排泄基准面以地下河出口的形

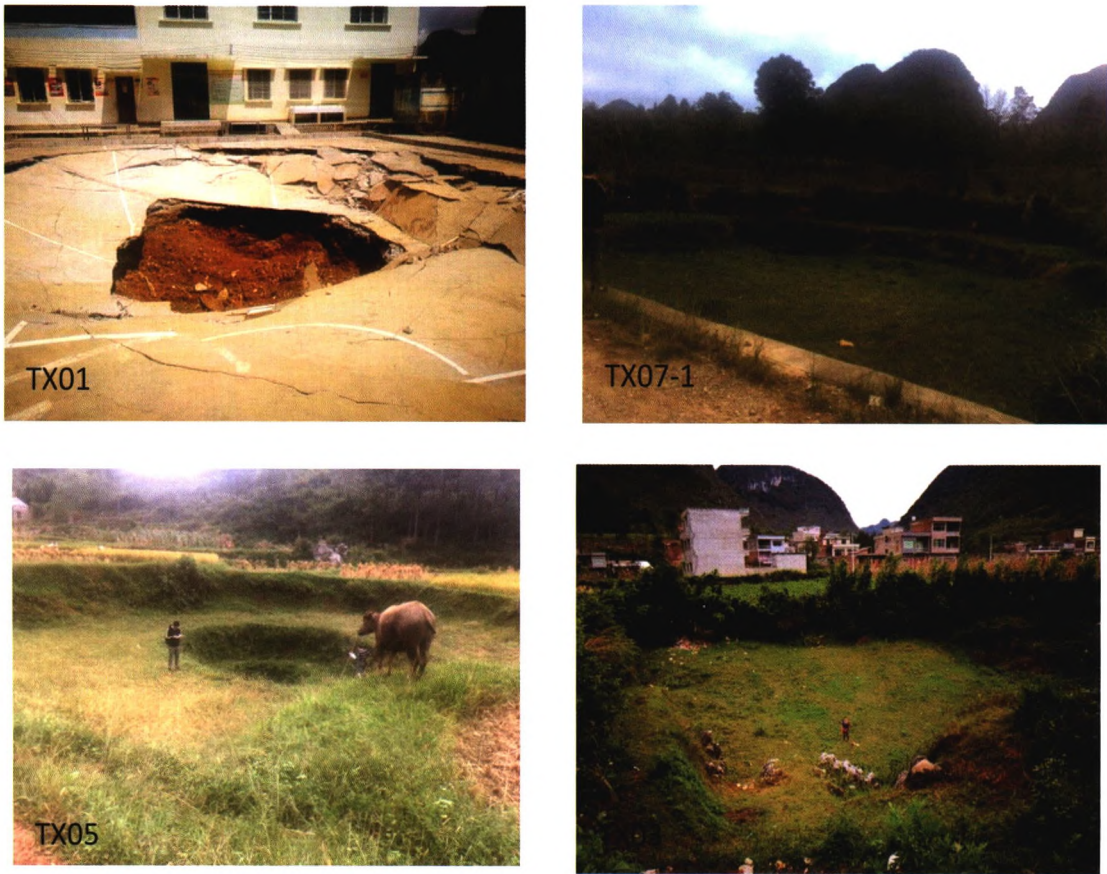


图2 典型岩溶塌陷照片
Fig. 2 Photos of typical karst collapses

式排泄出地表,其出口流量在750~1 960 L·s⁻¹。
研究区内岩溶塌陷受地下河发育的控制,主要发育于地下水强径流带,呈串珠状分布于岩溶管道附近200 m范围。

2.2 岩溶塌陷的成因分析

岩溶塌陷的形成必须具备3个条件:①可溶性基岩具有开口的岩溶形态(如溶洞、竖井、深溶隙等),这是地下水和塌陷物质的储存场所或运移通道;②盖层为松散土层或软弱岩层,绝大多数塌陷发生于土体中,极少数发生于软弱地层中,这是岩溶塌陷产生的物质条件;③产生塌陷的主导因素——致塌作用力(如潜蚀作用、真空吸蚀、振动论等)^[17]。

2.2.1 开口岩溶洞隙是岩溶塌陷的前提

白云小学塌陷区下伏基岩为质纯层厚的二叠系栖霞-茅口组灰岩,CaCO₃含量在95%以上。为充分研究下伏岩溶发育情况,采用了物探、钻探综合调查手段共同探测验证,探测施工布设情况见图3。从图3可知,高密度电法6条测线共探测出8个(A、B、C、D、E、F、Y6-1、Y6-2)异常点,推测为岩溶发育带及溶

蚀裂隙发育带,其中A、B、D、E、F异常点构成一个近南北向的岩溶管道(推测通道1),其他异常带总体呈南北向发育,是地下水富集和径流的主要通道,溶蚀作用强烈,浅部岩层在节理较发育地带易受到溶蚀作用影响,发育成规模大小不一的溶洞(推测通道2)。由图4可知,4条地质雷达剖面均有异常带出现,其异常处于不均质的土层地段、岩石破碎带、溶洞裂隙等地带。

综合钻探资料分析,白云小学附近浅部岩层中的岩溶呈面状发育,局部垂向裂隙发育,而深度在15 m左右则是水平发育,推测其浅部发育细小的面状裂隙,局部垂向裂隙发育,15 m左右为水平的岩溶管道。白云小学塌陷区下部发育一条NW-SE向溶槽,溶槽内为冲洪积黏土充填,塌陷坑西侧发育一条近南北向的岩溶管道,且与东侧落水洞(YR02)存在连通的溶蚀裂隙。该岩溶管道对塌陷的产生起到控制作用,由于其水动力条件较好,浅部岩溶洞隙成为不稳定土体的储集空间和运移通道。

2.2.2 上覆土层是岩溶塌陷产生的物质基础

钻探结果显示,塌陷区土层以粘性土为主,厚度

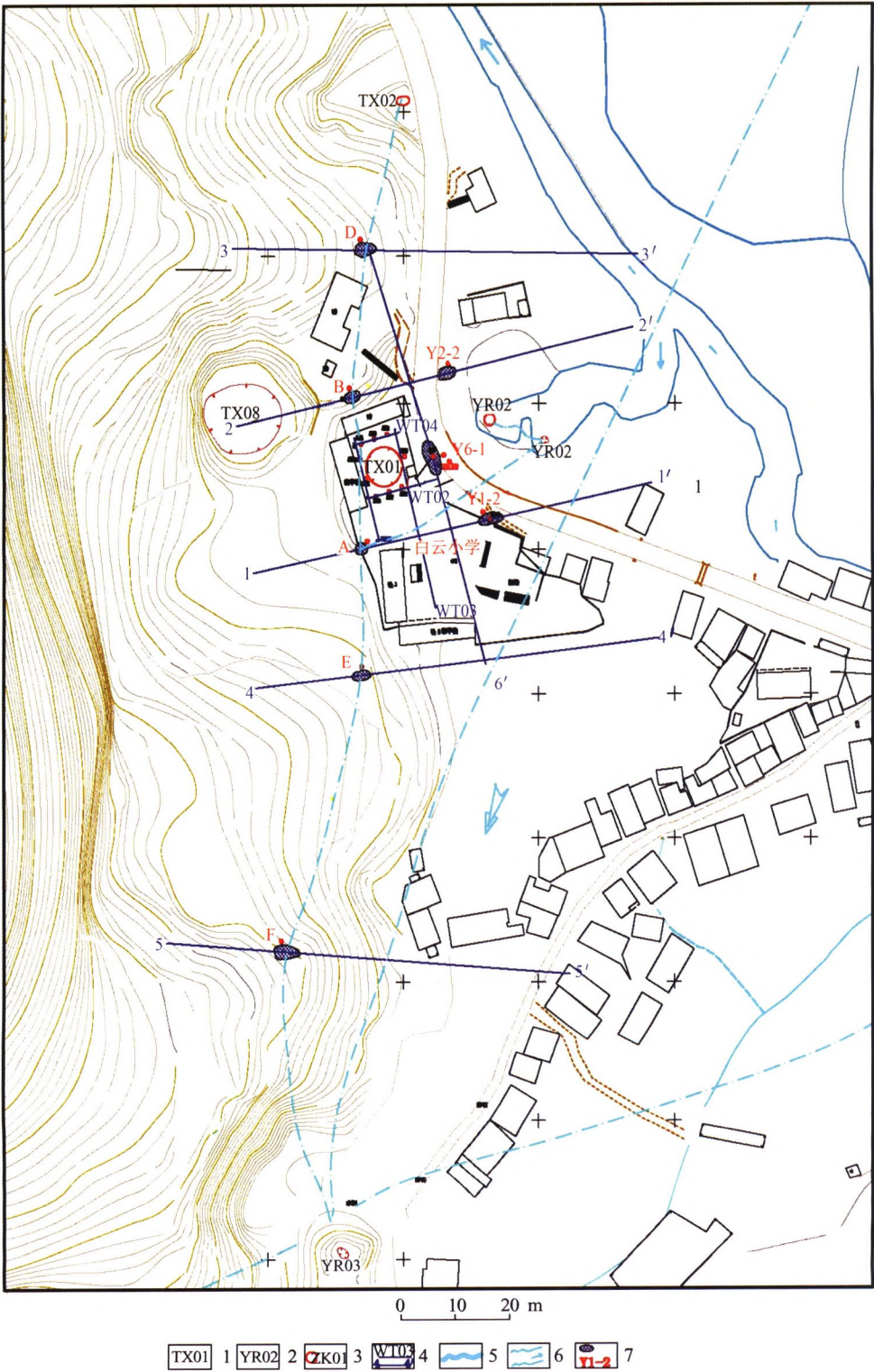


图3 岩溶塌陷空间分布与物探测线位置图

Fig. 3 Spatial distribution of karst collapses and location of geophysical survey lines

1—塌陷点编号 2—岩溶点编号 3—钻孔及编号 4—物探线及编号 5—推测地下河 6—地表河流 7—物探异常点及编号

在3~19.6 m之间。从上至下细分为三层,A层为表层混凝土,厚10 cm;B层为杂填土,厚0.7~1.2 m,由黏土、块石等组成,含有机质;C层为冲洪积黏土(Q^{al+pl}),厚3~19.6 m,杂色,含有机质,由黏土夹卵石、块石等组成,卵石粒径小于10 cm,黏土含量大于80%。

由于塌陷区处于地下水强径流带上,在天然状态下,地下水位长年在基岩面上下波动,当上覆土体充水后处于饱和状态时,多处于可塑状态,力学强度较低,且自重较大,稳定程度较低。通过对塌陷区7个钻孔土样测试结果分析(表2),可看出覆盖层天然

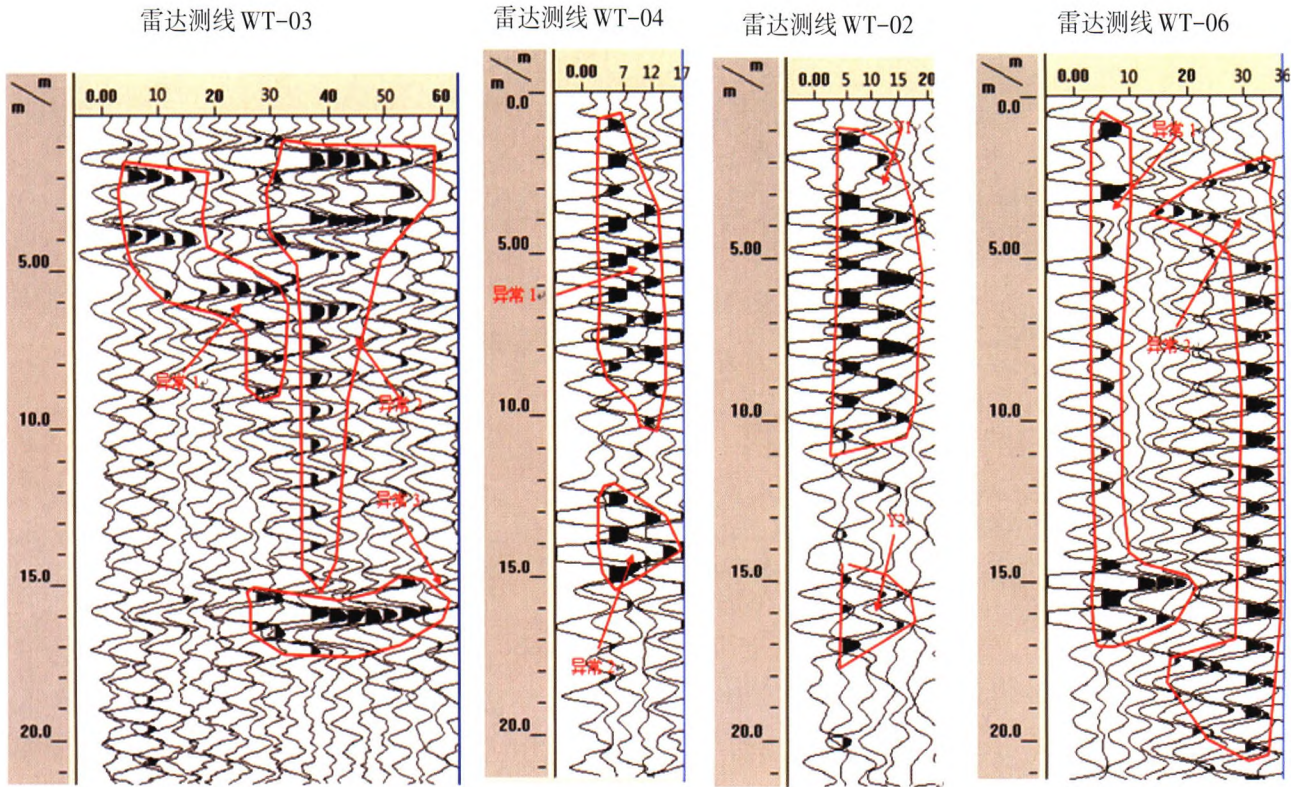


图4 地质雷达测线剖面图
Fig4 Profile of GPR survey line

含水量(w)较高、孔隙比(e)大、液性指数(IL)低等特点;而内摩擦角(C)、粘聚力(φ)低、压缩性(α 1.0~2.0、 E_s 1.0~2.0)中等等特点。由于下伏岩溶发育,为地表土壤漏失提供了前提条件,当上覆土层自重

较大时,必然形成一定大小的土洞,当土洞上部土层的承受力大于自重应力时即发生塌陷;当土洞或溶洞继续扩大,上部土层的自重及外部荷载超过土层所能承受的抗剪强度后,即形成岩溶地面塌陷。

表2 红黏土物理力学指标表
Table 2 Physical and mechanical indexes of red clay

指标	天然含水量/%	孔隙比(e)	液性指数(IL)	压缩系数(a) (1.0~2.0)/ MPa ⁻¹	压缩模量 (E_s)(1.0~ 2.0)/MPa	内摩擦角(φ)/°	内聚力(c)/kPa
区间值	41.6~45.4	1.155~1.300	0.17~0.24	0.31~0.38	6.1~7.1	10.0~15.1	35.1~40.4
平均值	43.5	1.238	0.20	0.35	6.5	12.2	37.2

2.2.3 地下水活动是岩溶塌陷的触发因素

白云小学塌陷区位于板母地下水系统的径流带上,为多条地下河的汇集处,地下水活动频繁,属地下水强活动区。地下水位随季节变化,与其东侧的地表河流水位变化密切相关,2018年9月下旬至10月上旬,地表河流水深约1.5 m,河流底部高程为1 113.5 m,塌陷坑(TX01)底部有积水(高程1 115 m),10月中旬后,塌陷坑东侧地表河流干涸,落水洞(YR02)水位在1 110 m以下,此时塌陷坑无积水。塌陷区地下水位变幅一般在3~10 m,水位最高时位于

土层中,水位最低时低于下伏基岩面,水位在基岩面上下波动。

岩土体中的含水量随地下水位的变化而变化,含水量的增加使岩土体的自重增大,当达饱和时,重度可增加15%~25%;由于地下水位频繁的升降变化,裂隙中的土粒被地下水不断地掏蚀、冲刷带走;另外,由于地下水的浮托作用,地下水位上升,浮托力随其增加的水头值增大,产生正压效应,当上覆盖层较薄、上升水头较高时,可能顶破盖层产生塌陷;当水位下降时浮托力消减,产生吸附作用,使盖层的

稳定性降低,甚至直接导致失稳产生塌陷。在地下水位的升降过程中,对岩溶洞隙中的充填物产生潜蚀、冲刷、掏蚀作用,致使地下通道不断扩大,其结果是岩溶洞隙中的充填物被带走,洞隙开口处形成空洞,而在地下水下降过程中土壤或充填物继续受到潜蚀、冲刷,从而空间进一步扩大,最后发育成塌陷。

3 岩溶塌陷防治对策

针对黔中地区碳酸盐岩分布广泛,地下岩溶发育强烈,第四系土层覆盖较薄,地下水活动强烈等特点,在对岩溶塌陷成因机制深入研究的基础上,综合国内外岩溶塌陷防治工程实践经验,提出黔中地区岩溶塌陷的防治措施。

3.1 监测预防措施

岩溶塌陷的监测预防是在查明塌陷发生原因及影响因素的基础上,为消除或消减塌陷发生、发展的主导因素而采取的措施^[22]。

(1)首先要高度重视水文地质调查和物探工作,以查明塌陷区水文地质条件。通过水文地质调查,结合高密度电法、地质雷达、浅层地震、电磁波、声波等新技术、新方法圈定溶洞发育带,尤其是近地表段的岩溶发育程度和规律、不同地段的富水性等问题,全面掌握研究区的地质结构、岩溶发育情况、富水特征及塌陷发育规律。

(2)对已确定的岩溶发育区开展地下水动态观测、孔隙水压力监测、地面沉降与变形监测、地球物理探测和遥感技术监测等组成的综合岩溶塌陷监测工作,长期监测其发展变化情况,为岩溶塌陷预防及治理提供科学依据。

3.2 工程治理措施

3.2.1 控水措施

针对黔中地区岩溶塌陷发育规律及特点,地下水是区内发生岩溶塌陷最主要的触发因素,因此,为防止地表水进入塌陷区,应在塌陷坑周边修建截排水沟,防治地表水通过岩溶漏斗、落水洞、岩溶洼地等汇入地下,减少地下水对土层的冲刷、掏蚀。

3.2.2 地下加固措施

(1)清除填堵法。先清除埋藏较浅的土洞或相对较浅的塌陷坑中的松土,再填入碎石、块石等形成

反滤层,并在其上覆盖黏土夯实。

(2)跨越法。对于塌陷坑或土洞较深大、开挖回填有困难的,一般以梁板跨越,两端支撑在可靠的岩土体上,采用梁板跨越,防止塌陷发生。

(3)灌注填充法。对埋藏较深的溶洞,通过钻孔将灌注材料(水泥、碎料和速凝剂等)注入,以充填岩溶空隙或阻隔地下水流,及时回填已发生的地面塌陷,避免塌陷坑对周边地面牵再进行灌浆固结。

(4)深基础法。对于一些较大的土洞或者塌陷坑,无法采用跨越法防治塌陷的,通常应采用桩基工程将上部荷载传递到基岩上。

4 结 语

黔中地区具有第四系土层覆盖薄、岩溶极其发育、地下水埋深浅、地下水动力条件强等特点,其岩溶塌陷主要为自然因素作用下的覆盖层中的土洞顶板塌陷,因此,在岩溶分布区建设重要建筑物时,必须在选址阶段进行以岩溶塌陷为主的水文地质调查及详细勘查,划分岩溶塌陷易发区,并制订科学合理的综合治理方案,及时采取相应措施进行治理,从根本上减少岩溶塌陷带来的经济损失。

参考文献

- [1] 岩溶地面塌陷调查规范[S]. 中国地质调查局,2013.
- [2] 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,1998,9(3):1-6.
- [3] 张殿发,邹永廖.喀斯特地质灾害的形成条件及其环境背景:以贵州省为例[J].矿物岩石地球化学通报,2002,21(1):39-42.
- [4] 褚学伟,党爽,丁坚平.贵州岩溶塌陷分布及影响因素分析[J].人民长江,2015,46(12):42-44.
- [5] 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.
- [6] 张丽芬,曾夏生,姚运生,等.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.
- [7] 郭强.遵义金塘谷地岩溶塌陷形成机理初步探讨[J].贵州地质,1989,6(2):163-171.
- [8] 徐文.贵州牛场岩溶地面塌陷的形成及其防治[J].中国岩溶,1991,10(3):214-219.
- [9] 梁国印,何游.贵州省德江县大顶山岩溶塌陷成因及防治措施[J].贵州大学学报(自然科学版),2012,29(2):67-71.
- [10] 吴桂武,梁国印,高建平,等.贵州省德江县大湾岩溶塌陷成因及防治措施[J].中国煤炭地质,2011,23(6):28-32.
- [11] 雷国良,周济祚,邓自民,等.贵州水城工业区覆盖型岩溶塌陷研究[J].中国地质灾害与防治学报,1996,7(4):39-46.
- [12] 肖攀,万军伟,喻望.贵州水城盆地岩溶地面塌陷成因分析及

防治对策[J]. 桂林理工大学学报, 2015, 35(2): 263-268.

[13] 邓自民. 水城岩溶地面塌陷的特征及形成机理[J]. 贵州地质, 1991, 8(2): 155-162.

[14] 王勇. 遵义市仁江岩溶塌陷机制形成模式分析[J]. 勘察科学技术, 2011, 8: 22-56.

[15] 杨元丽, 杨荣康, 孟凡涛, 等. 黔中高原台面浅覆盖型岩溶塌陷分布及影响因素浅析[J]. 中国岩溶, 2017, 36(6): 801-807.

[16] 苏维词. 贵州主要城市的岩溶塌陷灾害及其防治[J]. 水文地质工程地质, 1998(3): 40-42.

[17] 丁坚平, 褚学伟, 等. 贵州岩溶塌陷[M]. 北京: 地质出版社, 2017.

[18] 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, 6(46): 44.

[19] 冯福, 蒲文斌, 丁力, 等. 贵阳乌当区定扒岩溶塌陷评价[J]. 化工矿物与加工, 2013(8): 46-48.

[20] 杨荣康, 杨元丽, 蒋镇涛, 等. 基于两级模糊数学综合评判法的岩溶塌陷危险性评价[J]. 贵州地质, 2017, 34(2): 109-114.

[21] 杨荣康, 杨元丽, 等. 黔中地区岩溶塌陷调查综合评价报告[R]. 2016.

[22] 韩淑朋, 严新冻. 广西岩溶塌陷类型、影响因素、成因机制及其防治措施[J]. 资源调查与环境, 2012, 2(33): 133.

Study on the genesis mechanism and prevention and control measures of shallow overburden karst collapse in central Guizhou area: An example of Baiyun primary school, Ziyun county, Guizhou Province

YANG Yuanli^{1,2}, MENG Fantao³, LI Minghui^{1,2}

(1. Guizhou Geological Environment Monitoring Institute, Guiyang, Guizhou 550008, China; 2. Guizhou Institute of Environmental Geology, Guiyang, Guizhou 550008, China; 3. 111 Geological Brigade, Guizhou Geological and Mineral Exploration & Development Bureau, Guiyang, Guizhou 550008, China)

Abstract Central Guizhou Province lies in the second topographic step of the plateau, with average altitudes 800–1,600 m, characterized by widely distributed soluble rocks, extremely developed karst landscapes, thin Quaternary soil layers and shallow groundwater with strong groundwater flow dynamics. Karst ground collapse is one of the major geological hazards in this area. In order to clarify the cause and mechanism of karst collapse in the Baiyun primary school, Ziyun county, Guizhou Province, this work carried out field investigations, geophysical exploration, geological drilling of hydrogeology engineering, and tests on rock and soil samples. Comprehensive research indicates that the karst collapse in the Baiyun primary school was a combined effect of special “water-soil-rock” adverse factors. According to the characteristics of geotechnical structure of the collapse area, it is suggested that the comprehensive prevention and control measures of “monitoring prevention+water control+engineering treatment” should be adopted before the site selection of future projects in karst areas of central Guizhou.

Key words central Guizhou, shallow overburden type karst collapse, genesis mechanism, prevention and control measures

(编辑 张玲)