

戴建玲, 罗伟权, 吴远斌, 等. 广西来宾市良江镇吉利村岩溶塌陷成因机制分析[J]. 中国岩溶, 2017, 36(6): 808-818.
DOI: 10. 11932/karst2017y59

广西来宾市良江镇吉利村岩溶塌陷成因机制分析

戴建玲, 罗伟权, 吴远斌, 蒋小珍

(中国地质科学院岩溶地质研究所/中国地质科学院岩溶塌陷防治重点实验室, 广西 桂林 541004)

摘要: 2010年6月, 一场极端暴雨事件过后, 广西来宾市良江镇吉利村发生大规模岩溶塌陷, 一个月内陆续产生了17处塌陷坑, 其中3个塌陷坑逐渐扩大发展, 最终形成一长约170 m, 深约38 m的大塌陷坑, 被称为“广西第一塌”。此次塌陷事件影响面积约1 500 m², 导致70户298人搬离家园。为了弄清吉利村岩溶塌陷的成因机制, 在塌陷发生地区开展了地面调查、三维激光扫描、地球物理勘探、水文地质工程地质钻探、岩溶塌陷动力条件监测、降雨量监测等多项工作。分析结果表明: 吉利岩溶塌陷为自然塌陷, 是多种不良因素共同作用的结果, 这些因素包括特殊的“水—土—岩”组合和极端暴雨, 其中极端暴雨引起的地下水气压力的急剧变化是其主要动力因素; 特殊的地质条件, 决定了该区岩溶塌陷发生的特殊性, 分析其形成过程, 认为主要受气爆效应、水击效应和渗流潜蚀效应的综合作用。

关键词: 岩溶塌陷; 影响因素; 成因机制; 极端暴雨

中图分类号: P642. 26

文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2017)06-0808-11

0 引言

岩溶塌陷是指岩溶洞隙上方的岩、土体在自然或人为因素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与现象^[1], 是岩溶区主要地质灾害之一。岩溶塌陷是全球广泛分布的地质灾害, 国内外学者对岩溶塌陷发育条件调查与勘测技术、岩溶塌陷形成演化机理、岩溶塌陷危险性预测与风险评估, 以及岩溶塌陷监测预警技术等方面开展了大量的工作, 取得了丰富的研究成果^[2-12]。在岩溶塌陷的成因机理方面, 绝大多数的岩溶塌陷都是发生在地下水动力条件剧烈变化的情况, 国内学者将其成因归纳为潜蚀成因、崩解成因、真空吸蚀成因、气爆成因等。

2010年6月, 一场极端暴雨事件过后, 广西来宾市良江镇吉利村发生大规模岩溶塌陷, 产生了17处塌陷坑, 影响面积约1 500 m², 其中两个塌坑逐渐扩

大发展, 最终形成一长约170 m, 深约38 m的大塌坑, 被称为“广西第一塌”。塌陷造成吉利村70户298人搬离家园, 损坏农田约100亩, 蓄水池、电力设备损毁, 经济损失巨大。如此规模、损失巨大的岩溶塌陷在广西尚属首例。本文通过对在吉利村开展地面调查、地球物理勘探、水文地质工程地质钻探、岩溶塌陷动力条件监测等多项工作, 对吉利村岩溶塌陷进行系统研究, 甄别了致塌因子、总结了发育模式、分析了成因机制, 以期为该岩溶塌陷防治提供科学依据。

1 研究区概况

研究区位于来宾市兴宾区良江镇南约6 km的吉利村, 距来宾市约16.3 km。中心地理位置为东经109°10′50″, 北纬23°35′34″, 柳南高速公路位于吉利村西, 沿吉利水库边缘通过, 最近处距吉利村约150 m; 来武高速公路从吉利村北, 南广高铁位于吉利村东(图1)。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41472298); 中国地质调查项目(1212011220191、DD20160254); 国土资源部公益专项(201211083)

第一作者简介: 戴建玲(1981—), 女, 助理研究员, 主要从事岩溶地质灾害防治工作。E-mail: daijianling@karst. ac. cn。

通信作者: 罗伟权(1964—), 男, 工程师, 主要从事岩溶水文地质研究工作。E-mail: lwq@karst. ac. cn。

收稿日期: 2017-07-10



图1 研究区交通位置图

Fig.1 Traffic map of the study area

研究区属亚热带季风气候区,靠近北回归线,夏季盛行海洋气流,炎热多雨;冬季受大陆气流控制,寒冷干燥。日照充足、雨量充沛,但旱涝寒害频率也高。据来宾市气象局最近12年的水文气象资料,1998年至2009年12年间,最多年平均降水量1594~1616 mm,最少年平均降水量为934~991 mm,4~9月为雨季,降雨量占全年的75%以上,是洪涝多发季节;年平均气温为20.5~21.5℃。地貌类型属溶蚀堆积—残峰残丘平原地貌,吉利屯和山背屯分别位于大头山东西各一侧,总体地势南高北低,丘包与孤峰相伴发育,总体上地表平坦,稍呈波状起伏。

研究区按新到老出露地层有:第四系(Q)、白垩系下统(K_1)、石炭系中统(C_2)和石炭系下统(C_1)(图2)。第四系(Q)分布于山坡及岩溶平原(谷地),为粉质黏土、含碎石粉质黏土或碎石土,碎石成分为强风化状硅质岩、燧石,棱角~次棱角状,粒径一般1~4 cm。白垩系下统(K_1)分布于吉利水库坝下游及山背村东新开挖的铁路路基一带,仅是底部砾岩,为一套紫灰色、灰色、杂色的砾岩、砂砾岩,偶夹砂岩透镜体。石炭系中统(C_2)分布于大头山向斜轴部及山背屯东侧残丘,下部为浅灰色薄层—中层状灰岩、白云质灰岩及白云岩,上部为浅灰色厚层状灰岩夹白云质灰岩。石炭系下统(C_1)分布于吉利村、吉利水库及南柳高速公路一带及大头山山麓。因覆盖多,无连续剖面,根据路线调查资料初步确定其岩石组合层序:下

部为浅灰、灰色、浅紫色薄层状硅质岩夹泥质硅质岩、硅质泥岩,局部夹泥质粉砂岩偶夹灰岩透镜体或薄层,在本区受构造应力作用岩体破碎多呈全~强风化状。中部为中层夹薄层状硅质条带灰岩、灰岩,与下部断层接触。上部薄层状硅质岩夹含锰硅质岩或含锰灰岩。

红水河位于吉利村北约25 km,为当地地下水排泄基准面。流域地下水总体呈由南向北的径流运动,以岩溶泉的形式排泄地表,或以地下潜流的形式向北运动,最终排泄于红水河中。

2 吉利岩溶塌陷现状

吉利村的岩溶塌陷分为古塌陷、老塌陷和新塌陷。古塌陷分布在山背屯南马山北侧坡上,共计10个,规模为直径10~22 m,深1.5~7 m。老塌陷为发生在1994年大头山西坡上(TX037)以及1998年发在山背屯中的TX026,老塌陷规模小,直径1.5~3 m,已回填。新塌陷发生在2010年以后。2010年6月3日早上约7时,吉利村东南面约300 m处甘蔗地中开始出现弧形裂缝(TX035);下午约15时,在吉利村东面山脚突然发生三处较大的塌陷坑,调查时有两个塌陷坑扩大发展变为一个(TX044—045)(图3),通过三维激光扫描,塌陷坑长172.36 m,最宽84.8 m,坑底到水平面的垂直高度最深38 m(图4,图5),陷

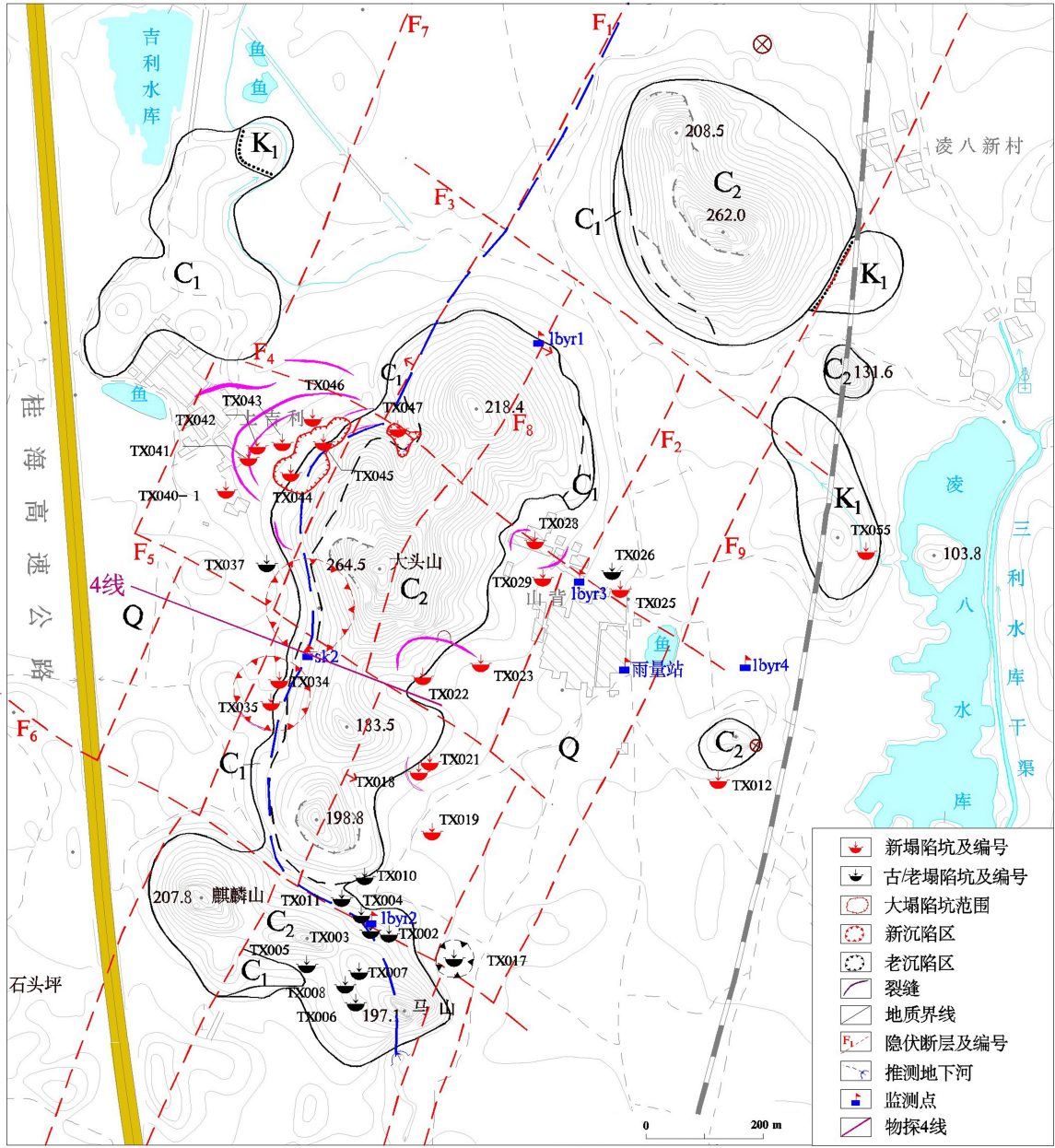


图 2 吉利村地质图及岩溶塌陷分布图

Fig. 2 Geological map and sinkhole distribution map of Jili village

落坑上方坡面上的水塔、输变电设备等设施已经发生严重倾覆,周围还不时出现塌方现象,同时村里出现裂缝,宽 5 cm 至 60 cm 不等(图 6);与此同时,对应于山脚东另一侧的山背屯后山脚下有群众发现了一条长约 30 m、宽约 20 cm 的裂缝,周边的大桉树发生歪斜,坑外围东面约 50 m 范围内可见弧状裂缝,但未形成塌陷坑;此外,在大头山半山腰也发现明显的裂缝,缝宽 1.5 m,深 1 m,缝走向 67°,西南方向与 TX045 壁相连。从第一个塌陷发生至 6 月底陆续发

生了 17 处塌陷。新发生的塌陷可分为两个区域:以大头山为界,分别为大头山北西侧吉利屯岩溶塌陷区和大头山南东侧山背屯岩溶塌陷区。其中大头山北西侧吉利屯塌陷区岩溶塌陷规模最大、范围最广、数量最多、危害最严重,而山背屯岩溶塌陷次之。新发生的岩溶塌陷各塌陷点位置、规模和发生时间见表 1。

以上塌陷除了 TX044—045 为基岩塌陷,其余均为土层塌陷。

表 1 吉利塌陷区岩溶塌陷形成过程及特征

Table 1 Formation progress and characteristic of the sinkholes in Jili

时间	塌陷个数	位置	塌陷编号	特征			
				形态	大小/m	深度/m	备注
2010 年 6 月 3 日 7 时许	1	吉利屯东南 450 m	TX035	圆形,浅碟状	12 × 12	1.5	周边可见多条同心圆弧状的地裂缝,其半径约为 28 m,后期形成最外圈为近圆形,直径约 80 m 左右的一个较大的沉陷区。同心圆弧状裂缝密度为 2~4 条·m ⁻¹
2010 年 6 月 3 日 15 时许	4	吉利屯东大山头西侧山脚处,吉利屯东侧,吉利屯东南 450 m	TX044、TX045、TX041、TX034	近圆形,漏斗状	70 × 70	25	TX044:初期直径约 35 m,可见深度 20 m
				椭圆形,漏斗状	100 × 80	38	TX45:初期为 2 塌陷坑,其中一坑呈近圆形,直径约 25~30 m,深度为 20 m,底部最低处见有一直径约 5 m 的圆形天窗,见有多条塌落的桉树插入天窗内。另一坑呈近圆形,直径约 30~40 m,深度为 20~30 m,底部有积水;塌坑逐渐扩大发展,合并为一个
				不规则形,坛状	15 × 2	1.5	TX041:造成房屋损毁
				近圆形,浅碟状	20 × 20	0.5	TX028:可见长约 30 m、宽约 20 cm 的裂缝,外围东面约 50 m 范围内可见弧状裂缝
				近圆形,浅碟状	22 × 22		TX019:周边可见有明显的圆形地裂隙,裂隙宽度 2~5 cm 不等,可见深度 20~30 cm
2010 年 6 月 3 日—5 日	2	吉利屯东偏北 120 m	TX046	圆形,漏斗状	34 × 34、25 × 25	15 及 13	TX046:由两坑组成
2010 年 6 月 3 日—9 日	1	吉利屯 100°330 m 冲沟底部	TX047	近圆形,漏斗状	12 × 12	3.0~4	塌坑的北西侧可见有沿冲沟方向产生的地裂缝,裂缝长 5~8 m,宽 2~8 cm,可见深度 5~15 cm
2010 年 6 月 6 日—17 日	1	吉利屯东北冲沟底部	TX13	近椭圆形,漏斗状	5 × 4	3.0	塌坑的南东侧可见有沿冲沟方向产生的地裂缝,裂缝长 5~8 m,宽 2~8 cm,可见深度 5~15 cm
2010 年 6 月 13 日	4	吉利屯东侧 2 个,山背屯北侧及 250°200 m	TX042、TX043、TX023、TX025	椭圆形,圆柱状	6.5 × 5	1.8	TX042
				椭圆形圆柱状	11.5 × 9.5	6.5	TX043
				椭圆形,圆柱状	14 × 11	7	TX023
				椭圆形,圆柱状	9.5 × 7.5	7	TX025
2010 年 6 月 14 日	1	山背屯 250° 300 m	TX022	近圆形,圆柱状	9 × 9 m	7	
2010 年 6 月 16 日	2	山背屯 240° 350 m	TX021、TX018	圆形,漏斗状	5.6 × 5.6	3	TX021
				椭圆形,漏斗状	9.5 × 8.0	4.0	TX018:坑壁近直立状,周边约 1.5 m 范围内可见有 2~3 条同心圆弧状细
2010 年 6 月 26 日	1	上吉利南	TX040—1	圆形,圆柱状	6 × 6	2.5	初期椭圆状,4 × 3.5 m,深 3.5 m,剖面呈坛状,下部直径为 6~7 m
2011 年 8 月 1 日	1	山背屯 150° 300 m	TX012	圆形,圆柱状	2.5 × 2.5	1.5	



图 3 TX044—045 照片及 TX045 坑底可见落水洞
Fig. 3 Photo of TX044—045 and a doline at the bottom of the pit

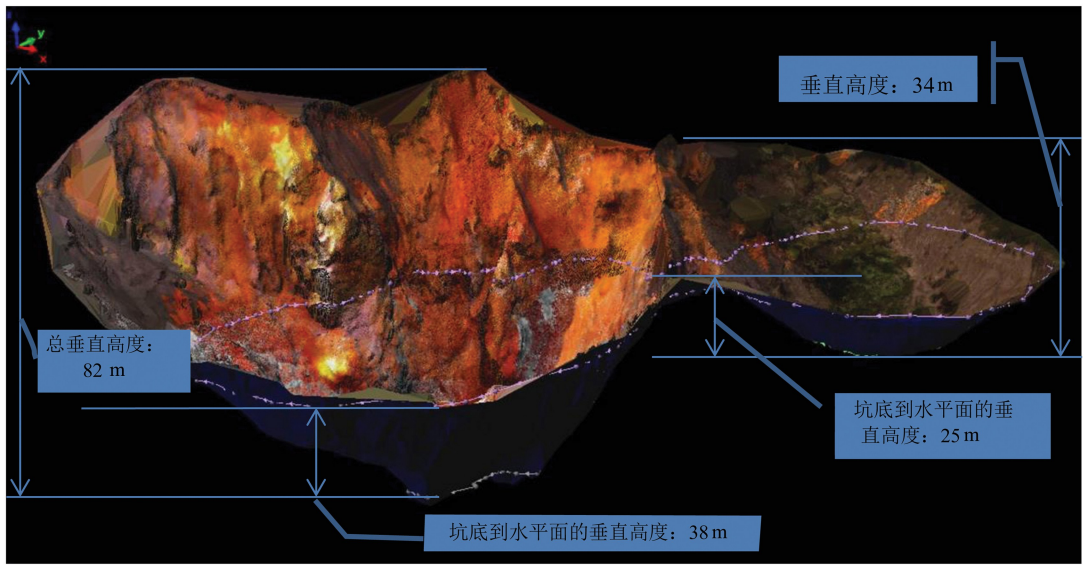


图 4 TX044—045 塌陷坑三维激光测量成果
Fig. 4 Three-dimensional laser scanning results of the pit of collapse TX044—045

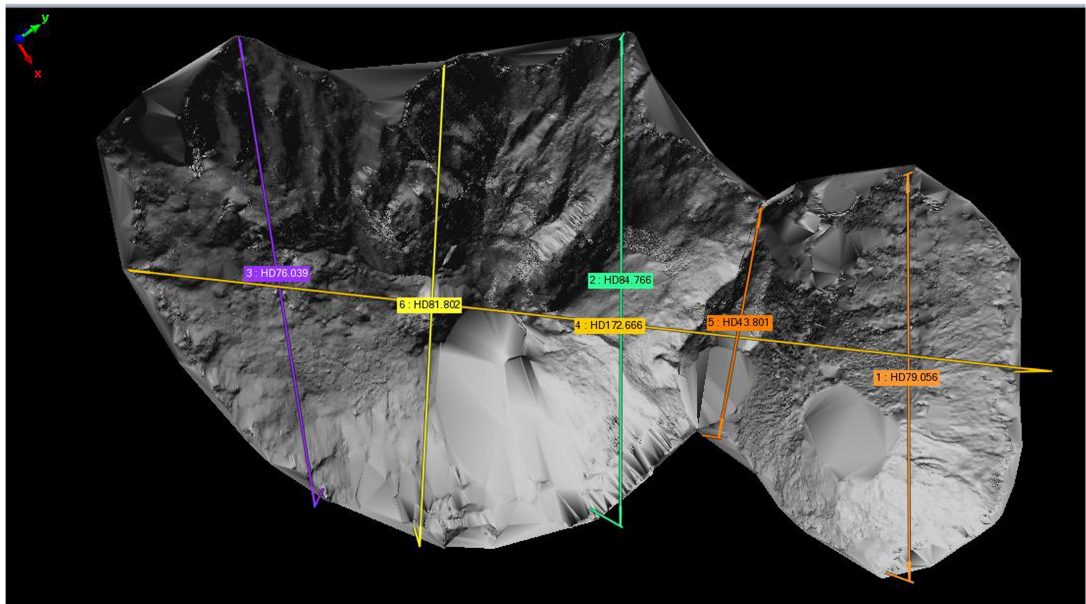


图 5 TX044—045 塌陷坑坑口长宽尺寸(俯视图,单位:m)
Fig. 5 Measurement of the length and width of the pit of collapse TX044—045 (top view, unit:m)



图6 塌陷造成的房屋破坏和地裂缝

Fig. 6 Building destruction and fissures caused by the collapse

3 吉利村岩溶塌陷形成机制

3.1 岩溶塌陷影响因素分析

通过对调查和勘查资料的分析认为吉利村岩溶塌陷是多种不良因素共同作用的结果。这些因素主要为特殊的“水—土—岩”组合及极端暴雨。

3.1.1 极端降雨条件

2009年9月至2010年5月,我国西南地区遭遇罕见的旱灾,持续数月的干旱使得各地的水塘沟溪干涸,很多地方民井无水,地下水位下降很大。据来宾市气象局的气象水文资料,2009年9月1日至2010年5月31日间来宾市总降雨量为623.4 mm,少于历年同期降雨量。2010年5月31日至6月1日,来宾市遭遇54年以来特大暴雨的袭击,6月1日当天12小时内降雨量达442 mm(图7),最大小时降雨量达62.2 mm(图8),6月降雨量达707.7 mm,市内各乡镇洪水泛滥,河水暴涨,相应地地下水位也随之

暴涨。

长期干旱一方面造成土壤强度降低,有利于降雨入渗,另一方面使得地下水位大幅度下降,在极端降雨条件下大量水流渗入,一方面使得土壤处于饱水状态,容重增大,另一方面造成地下水位急剧上升,岩溶管道内可产生向上的压力,在薄弱部位可能因为气爆作用而发生塌落。

3.1.2 覆盖层条件

研究区覆盖层自上而下由第四系、强风化硅质岩(全风化)组成。第四系覆盖层分为耕植土、粉土。耕植土厚度0.3~1.4 m,粉土的透水性较好,厚度3~8 m,随着深度的增加,角砾含量增多,粘土的塑限由25%减少到20.5%。强风化硅质岩主要为C₁硅质岩、硅质泥岩、硅质灰岩全风化的碎石土、含碎石粉质黏土,碎石成分为强风化状硅质岩、硅质灰岩,棱角~次棱角状。吉利屯一带,由于构造破碎影响风化程度的不同,覆盖层厚度变化较大,密实程度差异也较大:

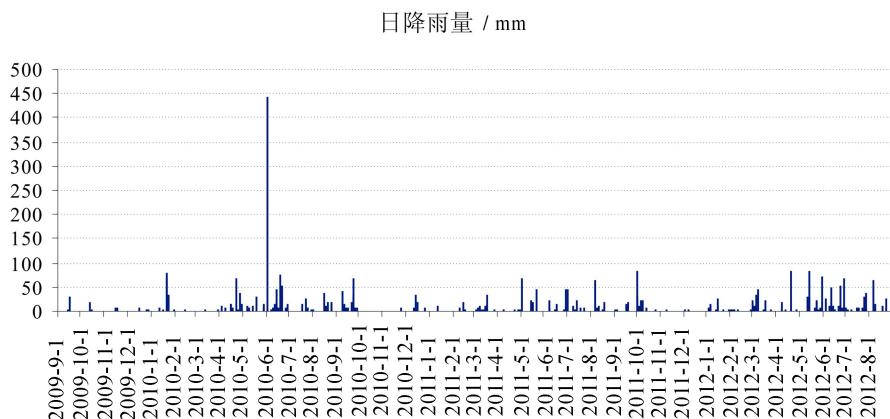


图7 来宾市日降雨量(2009.9.1—2012.8.31)

Fig. 7 Daily precipitation in Laibin City(2009.9.1—2012.8.31)

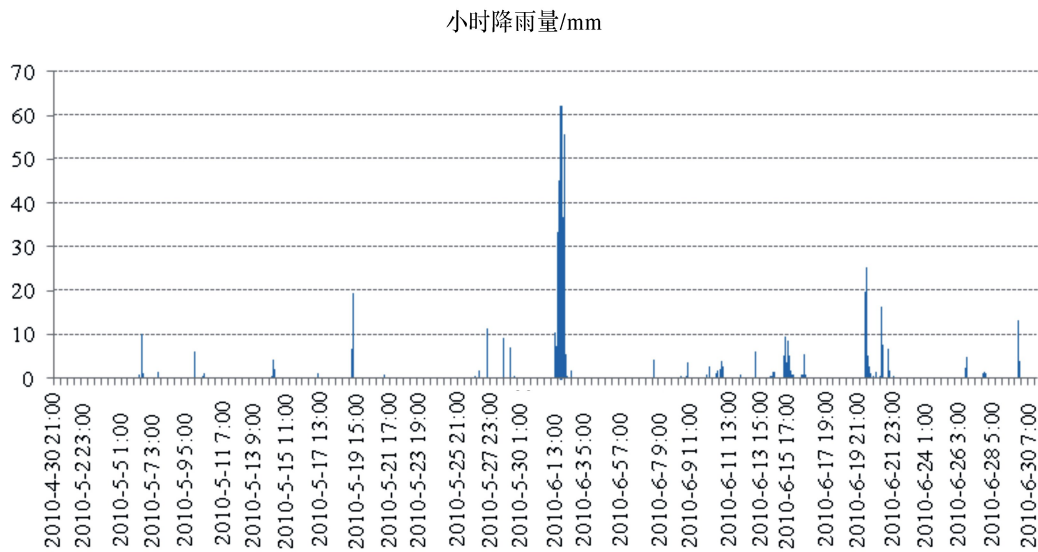


图 8 塌陷发生前后来宾市小时降雨量(2010. 4. 30—2010. 6. 30)

Fig. 8 Hourly precipitation before and after the sinkhole event in Laibin City(2010. 4. 30—2010. 6. 30)

吉利屯以东至大山头地段,覆盖层结构相对较松散,厚度 >77.5 m,其中上部为碎石土,厚度 $26.5\sim >41.5$ m;往下为含碎石粉质黏土,未揭露基岩;吉利屯其他地区,覆盖层主要为原岩(C_1)全风化产物,原岩结构完全被破坏,土层呈坚硬—硬塑土状或角砾土状、密实含碎石粉质黏土状,覆盖层厚度 $53.0\sim >101.8$ m,在断层破碎带,硅质岩强烈破碎、角砾化,岩层拖拽、挠曲、碎裂组成松散的岩体,并受强烈的风化,表现为碎石土的特征,碎石粒径 $1\sim 3$ cm为主,大于 1 cm占 $55\%\sim 70\%$,碎石成分为硅质岩,碎石间为褐黄、灰黄色可塑—硬塑状粉质黏土充填。山背屯一带,覆盖层厚度 $15.0\sim 31.0$ m,自西向东厚度变薄,上部为碎石土,厚度 $14.0\sim 19.5$ m,碎石成分为硅质岩、泥岩,下部为硅质岩、硅质灰岩全风化的角砾土,或含角砾粉质黏土,密实状。

因此,研究区覆盖层以中—厚覆盖的碎石土、含碎石粉质黏土为主,结构较松散,密实度较差,尤其在断层带附近。这种覆盖层透水性强,有利于地下水的活动。如图 9 所示,部分钻孔中覆盖层岩芯破碎、不完整,另外在塌陷坑壁也可观察到松散土体,这部分土体黏聚力差,在降雨和自身重力的作用下容易坍塌,造成部分塌陷坑扩大发展形成更大的塌陷坑。

3.1.3 地质构造

研究区处于桂林—来宾断裂带内,地质构造复杂;区域上褶皱断裂发育,构造线呈北东—北北东走向。吉利塌陷区位于平塘背斜东翼与来宾向斜西翼过渡区的次级褶皱大头山向斜的轴部两侧。大头山

向斜被断裂破坏已不完整;轴部出露石炭系中统碳酸盐岩、下统硅质岩夹含锰灰岩,硅质灰岩。向斜西翼由于断层切割破坏而不完整,断层带西侧为下石炭统硅质岩夹泥质硅质岩、硅质泥岩,岩层呈北北东走向,断层向东缓倾斜,向东与向斜轴部灰岩地层呈断层斜接。向斜东翼为第四系覆盖,钻探验证为硅质岩与灰岩。向斜轴部岩层产状平缓,西侧 $85^\circ\sim 95^\circ\angle 15^\circ\sim 20^\circ$,东侧 $325^\circ\sim 330^\circ\angle 20^\circ$ 左右。平行褶皱轴向,发育一组北北东向的断层(F_1 、 F_2 、 F_7 、 F_8 、 F_9),走向 $15^\circ\sim 20^\circ$ 。断层带形成较宽的破碎带,尤其硅质岩系强烈破碎、角砾化,岩层拖拽、挠曲、碎裂,组成松散的岩体,并受强烈的风化;大体垂直主断层,伴生一组北西西向的张扭性断层(F_3 、 F_4 、 F_5 、 F_6),切割并错移北北东向断裂^[13](图 2)。构造控制着本区的岩溶发育,例如大头山西侧近山脚地带,受 F_1 断层的影响,断层西侧石炭系下统硅质岩与东侧石炭系中统碳酸盐岩呈断层接触关系。断层带宽 $50\sim 60$ m,断层带内岩石破碎严重,岩石风化强烈,而石炭系中统可溶性碳酸盐岩系在构造断裂的影响下,岩体节理裂隙发育,沿节理裂隙方向岩溶发育。

研究区的构造亦对塌陷的空间分布起到控制作用,如图 2 所示绝大部分塌陷分布在断裂构造破碎带上。这是因为在断裂构造发育的地段,特别是断裂交回地段,岩石破碎,有利于地下水的渗透,是岩溶发育强烈的地段,亦是水流活动强烈之处,有利于岩溶塌陷的发生。



图9 钻孔中及塌陷坑壁上松散、破碎的土体

Fig. 9 Loose and broken soil in the borehole and the wall of collapse pit

3.1.4 岩溶发育条件

研究区的岩溶主要发育在石炭系中统碳酸盐岩,下部为浅灰色薄层—中厚层状灰岩、白云质灰岩及白云岩,上部为浅灰色厚层状灰岩夹白云质灰岩,受地质构造、地层岩性、地下水活动、地形地貌等诸因素的影响,岩溶发育程度具有极不均匀性。岩溶形态主要为溶洞、溶蚀裂隙和地下河,岩溶十分发育,山边多有脚洞。强烈发育的岩溶是研究区岩溶塌陷形成的最基础条件。

(1) 溶洞

根据调查,工作区可见溶洞有6处,其中规模最大的为大头山南侧半山腰发育的溶洞,溶洞口长15 m,宽0.5~3 m,近直立,表面溶孔及裂隙发育,溶洞

近垂直向下发育,洞内钟乳石形态各异,可进入深度大于60 m,内见溶潭,面积约2 000 m²。

根据区内收集了65个钻孔钻探资料(来自研究区岩溶塌陷应急勘查、1:5万的岩溶塌陷地质调查以及来武高速、南柳高铁的施工钻孔),其中有16个钻孔遇溶洞,溶洞高度0.4~15.5 m,基岩面以下20 m岩溶发育。

根据物探资料,中石炭与下石炭接触部位发育一断层,断层走向15°~20°,受构造的影响,断层带附近岩溶强烈发育,大头山西北侧C₂与C₁分界地带的钻孔揭露,该处地下发育多层串珠状溶洞,未充填的溶洞最大为5 m,岩心破碎,钻孔成孔困难,图10所示为物探4号线揭露的强烈溶蚀发育带。

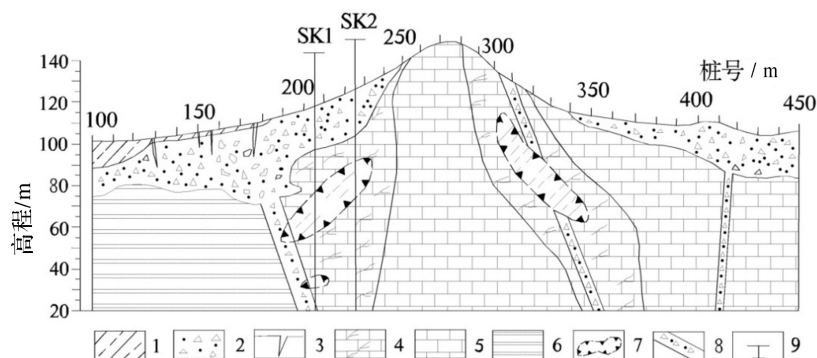


图10 第4测线地质推断解释剖面

Fig. 10 Interpretation of comprehensive geophysical explore of the fourth surveying line

1—粉质黏土 2—碎石土、含碎石粉质黏土 3—裂缝 4—溶隙灰岩 5—完整灰岩 6—全风化硅质岩 7—溶洞 8—断层破碎带 9—水文地质钻孔

(2) 地下河

根据调查,山背屯南的马山南侧山脚下有一处地下河伏流入口,降雨季节,地面水流汇集于沟溪后,从该洞口流入地下。根据物探资料显示,调查区内北东向的较大断层(F1)东侧形成较宽的充水低阻带,并

反映浅部(标高95~100 m)碳酸盐岩一侧有岩溶发育,推测为地下河,同时,施工的SK2和WTZK5钻孔地下水位以下为未充填溶洞,可能就是地下河管道,而在深部标高-250~-300 m,亦反映有深层岩溶发育。

综上所述,调查区内存在一条沿构造断裂带发育的岩溶地下河,地下河自马山南侧山脚处先以西北向流经与 F6 断层交汇处后,转折向近南北走向,沿大头山西侧山麓(近山脚处)流向 TX044—45 塌陷地带,然后又转向北北东,大致沿大头山北西山麓展布,再转向北,由南向北方向径流至约 7 km 处的良江镇北东侧,以岩溶上升泉的形式出露地表。在吉利地段,地下河大致追踪北北东向断裂(裂隙)带发育,局部地段因受北西西向断裂(裂隙)的影响而呈现北

西向。

3.1.5 岩溶塌陷动力条件

在研究区布置了 6 个岩溶塌陷动力条件监测点和 1 个降雨量监测点。其中 LYBR2 监测点位于地表水伏流口附近,LYBR5 监测点位于地下河空腔区附近东部,LYBR6、LYBR7 监测点位于岩溶管道径流区,SK2 监测点位于地下河空腔区附近西部,LYBR4 监测点位于地下河系统东侧向补给区。各监测点 2016 年 5 月 1 日—8 月 31 日的变化特征见图 11。

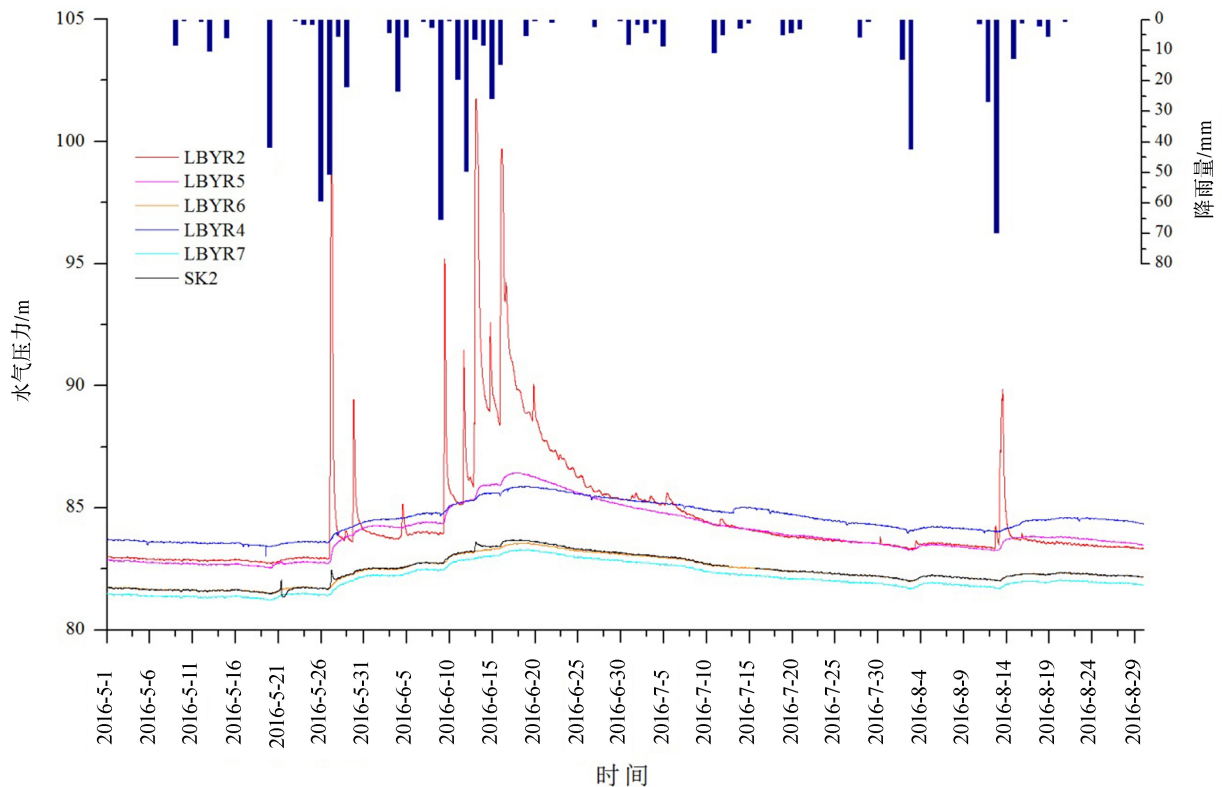


图 11 岩溶管道裂隙系统水气压力变化曲线

Fig. 11 Diagram of the variation of groundwater-air pressure in the karst fracture system

LYBR2 监测点岩溶管道裂隙系统中水气压力变化明显受降雨影响,雨季岩溶地下水气压力上升幅度最大达 16.99 m(连续两天降雨量分别为 59.2 mm 和 50.6 mm),岩溶地下水气压力的最大变化速率达 $38.94 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ (对应日降雨量为 49.6 mm),此变化速率远大于黏土的渗透变形临界速度。而吉利塌陷发生时的日降雨量为 442 mm,可以推断塌陷发生之时岩溶水气压力变化幅度和速率是 2016 年的数倍。

SK2 监测点岩溶管道裂隙系统中水气压力变化也受降雨影响,但幅度没有 LYBR2 大,雨季岩溶地下水气压力上升幅度最大达 6 h 0.7 m,岩溶水气压力的最大变化速率为 $1.99 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。SK2 监测点

与 LYBR2 总体变化一致,但变化幅度比 LYBR2 小,分析其原因应是 SK2 监测点位于最大塌陷坑附近,塌陷后与大气相通所致。

3.1.6 人类工程活动

工作区人类工程活动不强。经调查,吉利村及周边地区无地下采矿、地面采石场等工程活动。南柳高铁、平武高速分别在工作区的东部和北部经过,塌陷发生期间正在进行路基开挖,对地下水影响较小。另外工作区有机井 3 个,机井深度都大于 65 m,供当地居民日常生活用水,开采量小,对地下水影响小。

3.2 吉利村岩溶塌陷形成过程及机制分析

吉利村岩溶塌陷集中在 2010 年 6 月的极端暴雨

之后,因为工作区人类工程活动不强,所以塌陷的发生主要是极端暴雨诱发,但整个塌陷的发育过程不仅仅受暴雨影响,是多种不良因素共同作用的结果。吉利村特殊的地质条件,决定了该区岩溶塌陷发生的特殊性。综合资料,分析其形成过程,认为其主要受气爆效应、水击效应、渗流潜蚀效应的综合作用。根据塌陷发生的过程及其各个阶段的成因模式,可将吉利村的岩溶塌陷形成过程分为以下3个阶段:

(1)极端暴雨引起的气爆作用致地下河/溶洞顶板垮塌

吉利村所处的地质部位为可溶岩与非可溶岩断层接触带上,断层东侧岩溶强烈发育,沿断层带发育一条地下河。2010年5月31日至6月1日,来宾地区普降特大暴雨,出现了极端降雨过程,至6月1日11:00降雨达到最大值,导致土层密封性增强、地下河水位快速上涨,岩溶空腔中的气体急剧压缩形成高压气团,产生作用于管道壁的巨大应力,顶部盖层强度不足,产生气爆破裂、顶板垮塌,LYBR2监测点捕捉到了这种气爆效应。地下河/溶洞顶板垮塌伴随着地震事件,来宾市地震台在6月1日11:35监测到1.7级地震,15:29监测到1.6级地震。

(2)土体剥落,形成土洞

①地下河/溶洞顶板垮塌,上覆结构较松散、密实度较差、透水性较强的强风化碎石土失去支撑,在自重的作用下开始剥落,土洞开始形成,另外垮塌的大块石体、大块土体落入地下水中会对上覆盖层产生瞬间水击效应,使得土洞规模不断扩大。

②地震使溶洞上覆的土层结构被破坏,稳定性下降,还会使地面开裂,大量的地表水灌入,对土层产生冲刷和潜蚀作用。

(3)土洞顶板失稳,地表形成岩溶塌陷

在水击效应和渗流潜蚀效应的共同作用下,土洞上方的碎石土不断坍塌,土洞规模不断扩大之后土洞顶板失稳,在地表形成岩溶塌陷。

综上,吉利村的岩溶塌陷为自然塌陷,极端暴雨引起的地下水气压力的急剧大幅上升是其主要动力因素,造成这一突变的主要原因是雨季土层密封性增强,地表水的补给使岩溶地下水位上升造成岩溶空腔中的气体的压缩,形成气爆。岩溶塌陷的形成演化过程:降雨→第四系饱水→岩溶地下水位上升→气爆效应→地下河/溶洞顶板垮塌→土体剥落→土洞形成→水击效应/渗流潜蚀效应→土体继续剥落→土洞顶板

失稳→岩溶塌陷。

4 结 论

(1)吉利村岩溶塌陷为自然塌陷,是多种不良因素共同作用的结果。这些因素主要为特殊的“水—土—岩”组合及极端暴雨,其中极端暴雨是此次塌陷的诱发因素。

(2)通过地面调查、地球物理勘探、水文地质工程地质钻探、岩溶塌陷动力条件监测等多项工作分析了吉利塌陷的形成机理,吉利村岩溶塌陷的发生是气爆效应、水击效应、渗流潜蚀效应的综合作用结果。

(3)吉利村岩溶塌陷的形成演化过程为:降雨→第四系饱水→岩溶地下水位上升→气爆效应→地下河/溶洞顶板垮塌→土体剥落→土洞形成→水击效应/渗流潜蚀效应→土体继续剥落→土洞顶板失稳→岩溶塌陷。

致 谢:审稿专家和编辑对本文提出了宝贵的意见,在此表示感谢!

参考文献

- [1] 康彦仁,项式均,陈健,等. 中国南方岩溶塌陷[M]. 南宁:广西科技出版社,1990.
- [2] 蒋小珍,雷明堂,等. 岩溶塌陷灾害监测技术[A]. 地质出版社,2016.
- [3] Tony Waltham, Fred GB, Martin GG. Sinkholes and subsidence[A]. Praxis Publishing Ltd., Chichester, UK. 2005.
- [4] F. Gutiérrez, M. Parise et. al. A review on natural and human-induced geohazards and impacts in karst[J]. Earth-Science Reviews, 2014(138):61-88.
- [5] Gao YL. Karst Feature Distribution in Southeastern Minnesota: Extending GIS-Based Database for Spatial Analysis and Resource Management[D]. University of Minnesota,2002.
- [6] Zhou WF, Beck BF, Adams AL. Sinkhole risk assessment along highway 1-70 near Frederick, Maryland[C]. Sinkholes and the engineering and environmental impacts of karst, proceedings of the ninth multidisciplinary conference,2003:591-601.
- [7] Xiaozhen Jiang, Mingtang Lei, Yongli Gao. New Karst Sinkhole Formation Mechanism Discovered in a Mine Dewatering Area in Hunan, China[J]. Mine Water Environ,2017.
- [8] 戴建玲,雷明堂,蒋小珍. 线性工程岩溶塌陷危险性评价研究[J]. 中国岩溶,2012, 31(3):296-302.
- [9] 黄健民,吕镁娜,郭宇,等. 广州金沙洲岩溶地面塌陷地质灾害成因分析[J]. 中国岩溶,2013, 32(2):167-174.

- [10] 王建秀,杨立中,何静. 岩溶塌陷演化过程中的水-土-岩相互作用分析[J]. 西南交通大学学报,2001,36(3):314-317.
- [11] 袁杰,高宗军,马海会. 论岩溶地下水位对岩溶塌陷形成的控制作用:以山东枣庄市岩溶地面塌陷区为例[J]. 中国地质灾害与防治学报,2010,21(4):95-98.
- [12] 冯克印,任翠爱,姚春梅,等. 地下水数据模拟在岩溶塌陷预警系统中的应用:以山东临沂市城区岩溶塌陷为例[J]. 中国地质灾害与防治学报,2007,18(2):112-116.
- [13] 广西水文地质工程地质勘察院. 广西来宾市兴宾区良江镇吉利村岩溶塌陷地质灾害应急勘查报告[R]. 2010.

Mechanism analysis of sinkholes formation at Jili village, Laibin City, Guangxi, China

DAI Jianling, LUO Weiquan, WU Yuanbin, JIANG Xiaozhen

(Institute of Karst Geology, CAGS /Key Laboratory of Karst Collapse Prevention, CAGS,Guilin,Guangxi 541004,China)

Abstract After an extreme rainstorm event in June 2010, 17 sinkholes emerged at Jili village, Laibin City, Guangxi in a month. The impact area occupied more than 1,500 m². Three of the sinkholes expanded and merged gradually and eventually developed into a large sinkhole which is 170 m long and 38 m deep. It is the largest sinkholes in Guangxi. In order to understand the formation mechanism, extensive investigations including field investigation, three-dimensional laser measurement, geophysical prospecting, exploratory boreholes and real-time monitoring of karst water pressure and rainfall were conducted. The results indicated that sinkholes at Jili village were attributed to natural factors, which is the result of multiple adverse factors. These factors mainly include the special "water-soil-rock" combination and extreme rainstorm. The special geological conditions determine the particularity of the sinkholes. Analyzing the formation process and mechanism of the sinkholes, we think they were mainly controlled by the combination of gas explosion effect, water hammer effect and seepage erosion effect.

Key words sinkhole, influencing factor, formation mechanism, extreme rainstorm event

(编辑 吴华英 黄晨晖)