

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2020.03.11

桂西典型岩溶区岩溶震群活动震害防治初探

蒙荣国

(广西水文地质工程地质勘察院, 广西 柳州 545006)

摘要: 由于近年来各种极端天气频发, 桂西典型岩溶区发生的岩溶震群活动引起广泛关注。岩溶震群活动具有频度高、震级低、灾害大等特点, 为探讨岩溶震群活动震害防治, 文章以“6·28”震群研究为基础, 分析发现桂西典型岩溶区岩溶震群活动震害主要表现为次生地质灾害的危害及岩溶地基对地表破坏烈度的放大作用, 岩溶震群活动主要表现为气爆地震及塌陷地震, 通过分析其作用机理, 从减小地震发生概率出发, 文章认为桂西典型岩溶区岩溶震群活动震害防治可从认知、辅助治理、工程治理三个层次进行探讨。

关键词: 岩溶震群活动; 形成机理; 震害; 防治对策

中图分类号: P642.25

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2020)03-0083-06

Preliminary analysis on prevention and control of active earthquake damage of earthquake clusters in typical karst areas of Western Guangxi

MENG Rongguo

(Hydrogeology and Engineering Geology Survey Institute of Guangxi, Liuzhou, Guangxi 545006, China)

Abstract: Due to the frequent occurrence of extreme weather in recent years, the karst earthquake swarms in typical karst areas in Western Guangxi have attracted wide attention. The activity of karst seismic swarm has the characteristics of high frequency, low magnitude and large disasters. In order to discuss the prevention and control of earthquake damage caused by karst seismic swarm activity, based on the study of “6·28” earthquake swarm, it is found that the main hazards of karst seismic swarm activity in typical karst areas of Western Guangxi are secondary geological hazards and the magnification of karst foundation to the surface damage intensity. The activity of karst seismic swarm is mainly manifested in gas explosion areas. Based on the analysis of the mechanism of earthquake and subsidence earthquake, and from the point of reducing the probability of earthquake occurrence, this paper considers that the prevention and control of earthquake damage caused by karst earthquake swarms in typical karst areas of Western Guangxi can be discussed from three levels: cognition, auxiliary treatment and engineering treatment.

Keywords: activity of karst earthquake swarms; formation mechanism; earthquake damage; prevention countermeasures

0 引言

随着社会的发展, 人类对资源的需求进一步加大,

人类工程活动对自然环境的改造进一步加深, 各种灾害逐步突显。尤其近年来各种极端天气的频繁出现, 于岩溶区频发的小震群活动引起广泛关注。

收稿日期: 2019-07-18; 修订日期: 2019-09-18

作者简介: 蒙荣国(1975-), 男, 壮族, 广西合山人, 硕士, 高级工程师, 主要从事水文地质、工程地质、环境地质研究工作。E-mail: mrgcomputer@126.com

2010 年 6 月,广西凌云—凤山一带发生了 3 级震群(称“6·28”震群),该震群活动的发生引起当地各级政府的广泛关注。经研究认为该震群为暴雨诱发的岩溶震群活动^[1]。

岩溶震群活动是指在岩溶区这个特定岩溶环境水文地质条件下发生的浅部地震活动,它可能是塌陷地震或气爆地震,也可能是塌陷地震引发一系列气爆地震,或气爆地震引发一系列塌陷地震,或者因气体挤压溶洞顶板产生应力释放而产生局部小地震^[1]。

岩溶震群活动国内外研究主要以水库诱发地震研究或岩溶塌陷研究居多。1988 年范家参等^[2]对水库诱发地震气爆成因进行了分析,1989 年胡平等^[3]将气爆型水库诱发地震分为塌陷型气爆及外冲型气爆,1990 年康彦仁等^[4]对中国南方岩溶塌陷的形成条件、影响因素、分布规律、形成过程、成因机制、塌陷区划等进行系统地深入研究,1994 年邹成杰等^[5]将岩溶区水库地震分为岩溶塌陷地震和岩溶气爆地震,近年来的同类研究成果很多,但多未将岩溶区地震和引发灾害一起研究。桂西典型岩溶区多为贫困山区,人口密度小,地震记录少,类似研究工作更少。2010 年“6·28”震群发生后,方引起广泛关注。

1 岩溶震群活动特点

1.1 主要发育于岩溶强烈发育区

岩溶发育强度控制着岩溶震群活动的环境条件,地下岩溶洞穴上部岩土体失稳下塌会产生地震活动。如广西来宾市良江镇吉利村发生大型岩溶塌陷,该地下伏石炭系灰岩、白云质灰岩中岩溶强烈发育,地下发育一条规模较大的地下河或岩溶地下水强径流带^[6],地下水活动强烈,给岩溶震群活动的发生提供优越条件。

1.2 与强降雨具有较好的相关性

2010 年 6 月 27~30 日广西西北部出现大暴雨过程,凤山县至凌云县一带发生“6·28”震群活动,震群的发生时间与震区强降雨具有明显的时空相关性,为暴雨诱发的岩溶震群活动。

1.3 频度高震级低

“6·28”震群共记录到 3071 次地震活动,绝大部分为 2.0 级以下地震,3.0~3.9 级地震 3 次,最大 3.2 级,其中记录到最高的单日震动次数达 351 次(2010 年 6 月 30 日),表现为频度高,震级低的特征。

1.4 分布集中,震源浅

据地震部门提供数据,“6·28”震群约 70% 集中在

广西凤山县江洲乡那林村一带(东经 106°54'00",北纬 24°21'36"),达 2 083 次,63% 地震的震源深度小于 1.6 km,震源浅^[7]。

1.5 灾害大

“6·28”震群发生在广西桂西北岩溶地区,河池市凤山县江洲乡陇善村等 7 个自然屯震感强烈,地震共造成 1 000 多人受灾,百色、河池两市直接经济损失 1 500 多万元,转移安置群众 3 500 余人。

1.6 具有重现性

“6·28”震群发生后,广西地震台网中心分别于凤山县江洲乡陇善村和凤山县平乐乡大洞村各架设 1 个流动地震台站。这 2 个流动地震台从 2011 年 9 月至 2012 年 11 月共监测到 79 次 0 级以上地震,与 2010 年“6·28”震群震中区基本一致。

2 岩溶震群活动震害特点

岩溶震群活动也和一般地震活动一样对地表建筑结构产生破坏,而岩溶震群活动因震级小,其危害主要次生地质灾害的危害及岩溶地基对地表烈度的放大作用。

2.1 次生地质灾害特点

岩溶震群活动主要发生于强岩溶发育区,地震活动引发的次生地质灾害主要有滑坡、崩塌(危岩)、地面塌陷、地裂缝等。次生地质灾害主要具有以下特点。

(1) 突发性

岩溶震群活动所引发的地质灾害往往具有突发性的特点,次生地质灾害产生的时间具有不可预见性,可能地震时发生,也可能震后发生,或震后一段时间内因其它因素改变(如发生大的降雨)发生。因此,由于其突发性给次生地质灾害的预防提出了更高的要求。

(2) 隐蔽性

隐蔽性是地质灾害发生的共性,由于地质灾害发育的复杂性,常规的地质灾害调查往往很难查清所有地质灾害隐患。如岩溶区的危岩调查,受植被、地形等因素影响,很难查清调查区危岩发育状况^[8],有时调查认为很危险的块体地震时并未下崩,而不危险的块体却有下崩现象,更有甚者存在未发现危岩块体处发生崩塌现象。对于地质灾害的隐蔽性要求地质灾害工作者不仅要有丰富的经验,还应敢于创新,充分运用现代技术手段对地质灾害进行调查分析评价。

(3) 连环性

次生地质灾害发生的连环性是与岩溶震群活动的特点分不开的,往往是一种地质灾害的发生又引发另

一种地质灾害的发生,或同一类型地质灾害发生引发别处发生地质灾害。如危岩崩塌形成的震动引发岩溶地面塌陷,而地面塌陷发生后又有可能引发别处地面塌陷。

2.2 岩溶场地破坏烈度放大效应分析

(1) 岩溶地基不均一性

岩溶地基由于岩溶作用,往往地下土洞、溶槽(洞)发育,在地震作用下,地基岩(土)体发生差异变形,从而引起地表建(构)筑物的破坏,地震烈度加大。

(2) 次生地质灾害多发性

由于岩溶地区地质环境的脆弱性,在漫长的地质年代作用下,岩溶区表现为崩塌(危岩)、滑坡、岩溶地面塌陷等地质灾害多发,地震活动加速了各种地质灾害的形成,从而表现为地震烈度的加大。

(3) 地震活动叠加性

如前所述,岩溶震群活动往往为多个地震的叠加,气爆地震可能引发塌陷地震,塌陷地震的发生又引发气爆地震,各种地震活动所释放能量的叠加加速各类地质灾害的形成,从而表现出地表的加速破坏。

(4) 建筑结构无抗震设防设计

桂西岩溶区多半是贫困山区,所修建筑随意性大,多没有专业人员的指导,无抗震意识。地震发生后,表现出建筑结构破坏严重,人员伤亡大。

3 岩溶震群活动机理研究

岩溶震群活动主要表现为气爆地震及塌陷地震,下面主要从气爆地震及塌陷地震两种类型进行分析。

3.1 气爆地震机理分析

通过对“6·28”震群研究,岩溶气爆地震发生取决于其环境条件及动力条件^[1],其中环境条件就是地下存在因地下水上涨而自动密闭的岩溶空腔,密闭空腔存在受堵塞通道与地表连通(图1);动力条件为地下水暴涨使地下岩溶空腔内形成高压气体,岩溶空腔内高压气体对上部岩土体产生破坏形成气爆地震,最常见以外冲型为主。

3.1.1 气爆地震力学模型分析

(1) 模型概化

为研究方便,模型概化时作以下假设:

1) 受堵塞通道是垂直的,且横截面形状为上下一致的圆形。

2) 受堵塞通道充填物是均一的,且其力学性质远小于围岩。

3) 岩溶空腔是密闭的,且堵塞通道充填物不

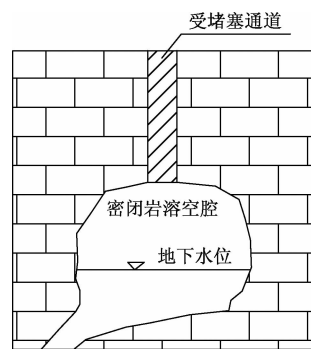


图1 气爆地震模型图

Fig. 1 Gas explosion seismic model diagram

透气。

4) 岩溶空腔气体不可燃。

根据以上假设,将气爆地震模型概化见图1。

(2) 力学分析

堵塞体受到岩溶空腔中高压气体 P (附加气体压力,即气体压力减去大气压力 P_0) 的作用,堵塞体则依靠土体黏聚力(f)及自重(G)来阻止土体的变形。

堵塞通道半径为 a ,厚度为 H ,当堵塞处极限平衡状时,取地面以下深度 z 处, dz 厚度土体作受力分析(图2),由垂向上平衡条件可以得到:

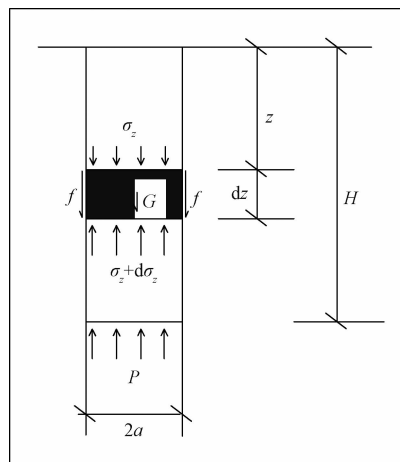


图2 气爆地震力学分析图

Fig. 2 Gas explosion seismic mechanical analysis diagram

$$\gamma_{\text{sat}} \pi a^2 dz + 2\pi ac dz + 2\pi a \lambda \sigma_z \tan \psi dz = \pi a^2 d\sigma_z$$

$$\text{即: } \frac{d\sigma_z}{dz} = \gamma_{\text{sat}} + \frac{2c}{a} + \frac{2\lambda \sigma_z \tan \psi}{a} \quad (1)$$

式中: γ_{sat} ——土体饱和重度/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$);

c ——堵塞体与围岩接触面的内聚力/ kPa ;

ψ ——堵塞体与围岩接触面的内摩擦角/($^\circ$);

λ ——静止土压力系数;

σ_z ——附加应力/ kPa 。

将边界条件: $z=0, \sigma_z=0; z=H, \sigma_z=P$ 。代入式(1)得:

$$P = \frac{2c + \alpha\gamma_{\text{sat}}}{2\lambda \tan \varphi} \left[\exp\left(\frac{2\lambda \tan \varphi}{\alpha} H\right) - 1 \right] \quad (2)$$

式(2)极限平衡状态下推导出来的,这里将计算出的压力值记为 P_l ,从而可得出:当压缩气体应力大于 P_l 时,堵塞体被击穿,气体能量释放,产生气爆地震;当压缩气体应力小于等于 P_l 时,堵塞体稳定或处极限平衡状态,不会产生气爆地震。

将式(2)变换可得:

$$H = \frac{a}{2\lambda \tan \varphi} \ln\left(\frac{2\lambda P \tan \varphi}{2c + \alpha\gamma_{\text{sat}}} + 1\right) \quad (3)$$

同上可得出:当堵塞体厚度小于 H_l 时,堵塞体被击穿,气体能量释放,产生气爆地震;当堵塞体厚度大于等于 H_l 时,堵塞体稳定或处极限平衡状态,不会产生气爆地震。

3.1.2 气爆地震能量分析

气爆地震能量参照理想气体作绝热膨胀时所释放的能量来计算^[9]。算式如下:

$$U_g = \frac{PV}{k-1} \left(1 - \left(\frac{P_0}{P} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right) \quad (4)$$

式中: U_g ——气爆震能量/MJ;

P_0 ——环境的绝对压力/MPa;

P ——气体的绝对压力/MPa;

V ——气体的体积/ m^3 ;

k ——气体的绝热指数。

空气氧气氢气及一氧化碳的绝热指数 k 均近似为 1.4,取 1.4。环境绝对压力 P_0 取 100 kPa(一个标准大气压),代入式(3)得:

$$U_g = 2.5PV(1 - 0.52(P)^{-0.2857}) \quad (5)$$

令 $C_g = 2.5P(1 - 0.52(P)^{-0.2857})$ 则式(5)简化为:

$$U_g = C_g V \quad (6)$$

式中: U_g ——爆炸能量/J;

C_g ——爆炸能量系数/ $\text{J} \cdot \text{m}^{-3}$;

V ——气体体积/ m^3 。

常用压力下气体爆炸能量系数 C_g ($k=1.4$ 时)见表 1。

3.2 塌陷地震机理分析

塌陷地震主要因地下洞穴上覆岩(土)体因势能减小产生能量释放而形成地震,其形成过程非常复杂。如溶洞顶板危岩体,其破坏模式就可能有滑移式、倾倒式、坠落式等,难概化出一个统一的模型,因此,下面仅

对塌陷地震能量作初步探讨。

表 1 空气爆炸能量系数计算表

Table 1 Calculation table of air explosion energy coefficient

绝对压力/MPa	0.5	0.7	0.9	1.1	1.7
能量系数/ $(\text{J} \cdot \text{m}^{-3})$	4.61×10^5	7.46×10^5	1.05×10^6	1.36×10^6	2.36×10^6

塌陷地震能量释放过程可参照能量守恒定理对其能量进行估算,则有:

$$W_g = \xi mgh \quad (7)$$

式中: W_g ——塌陷地震能量/MJ;

ξ ——修正系数(取 0.1~0.9,和塌落过程环境有关);

m ——塌陷体的质量/kg;

g ——重力加速度,取 10 m/s^2 ;

h ——塌陷体下落高度/m。

3.3 地震震级估算

地震震级与能量大小的关系见表 2 或参考文献[10]。

表 2 震级与能量对应关系

Table 2 Correspondence between magnitude and energy

震级 M	能量 E/J	震级 M	能量 E/J
0	6.3×10^4	5	2×10^{12}
1	2×10^6	6	6.3×10^{13}
2	6.3×10^7	7	2×10^{15}
2.5	3.55×10^8	8	6.3×10^{16}
3	2×10^9	8.5	3.55×10^{17}
4	6.3×10^{10}	8.9	1.4×10^{18}

注:J(焦耳)能量单位

$$\lg E = 4.8 + 1.5M \quad (8)$$

式中: E ——地震能量/J;

M ——地震震级。

4 岩溶震群活动震害防治对策初探

地震震害防治是世界难题,主要因为地震难预测。岩溶震群活动有其特殊性,它与岩溶环境水文地质条件及强降雨具有很强的关联性,讨论震群活动的防治,可从减小地震发生概率出发,对岩溶震群活动灾害防治可分三个层次进行开展,即认知层次(采用科普宣传、地震专项调查)、辅助治理(天气预报、绿色发展)、工程治理(地下以水气疏导为主,地上以增强建(构)筑物刚度及对次生地质灾害防治为主)。

4.1 开展科普宣传教育

防灾减灾关键是受灾主体的意识,受灾主体对灾害认识提高了,“要我防灾”就会变成“我要防灾”,从而使各项工作将更加顺利开展,也可减少地震发生时

造成的社会恐慌。

构造地震防灾减灾知识已有一定程度的普及,而暴雨触发岩溶震群活动几乎尚未开展科普宣传教育。应充分利用广播、电视、报刊杂志、网络等媒体开展科普教育,其中包括岩溶区震群活动的控制因素、产生条件、形成机理、以及震群活动引发次生地质灾害的类型、规模特征和危害程度。普及地质灾害防治知识,增强群众的防灾、减灾意识和防灾能力。

4.2 开展岩溶区地震专项调查工作

开展岩溶区地震专项调查工作主要是查明岩溶区产生震群活动环境条件及动力条件,利用多因子评判方法对调查区产生岩溶震群活动易发程度进行分区,再根据分区结果分层次探讨减缓岩溶震群活动震害的方案。

4.3 贯彻绿色发展理念,减少人类活动对环境的影响

从岩溶震群活动形成机制分析中可知,地质作用是漫长及渐变的,地质环境本身存在自身调节功能,岩溶震群活动的发生也是漫长及渐变的,而人类工程活动相对地质作用本身是快速及突变的,往往在短时间内将起着决定性作用,岩溶震群活动大规模发生主要为人类工程活动(如水土流失造成地下岩溶管道淤积和堵塞易形成气爆地震,而大降深开采地下水易形成地面塌陷等)造成的,因此,加强水土保持工作,保护自然生态是人类活动优先考虑的重要问题。

因此,进行工程建设时应要考虑到最大限度减少对地质环境的影响,认真贯彻“绿水青山就是金山银山”的发展理念,减少因发展引发各类灾害地质的发生。

4.4 加强灾害性天气预报工作

强降雨给岩溶震群活动提供了动力条件,也是引发地质灾害重要因素之一。因此对岩溶震群活动易发区加强灾害性天气预报工作显得尤为重要。目前地震预报及特大暴雨预报都是有待解决的难题,尤其局部地区强降雨预测预报难度更大,其结果也影响暴雨触发岩溶震群活动的预报准确度,势必影响次生地质灾害的预报准确度。

在岩溶震群活动易发区应加强气象台的建设工作,尤其是自动气象台观测工作,保证这些地区降雨信息及时传送气象台。应加强持续干旱之后瞬时暴雨的灾害性天气预报预警,即加强干旱特大干旱之后的暴雨特大暴雨的趋势预报工作。这种预报的准确程度直接影响岩溶区震群活动预报的准确程度。

4.5 岩溶气爆地震高易发区实施必要的工程措施

(1) 对已发现的岩溶空腔施工通气孔

密闭空腔为岩溶气爆地震发生的必要条件,通过施工通气孔,从而使原可密闭的地下岩溶空腔变成“漏气”空腔,岩溶空腔内难以形成高压气体,减少岩溶气爆地震的发生。此种方法主要基于改变岩溶气爆地震环境条件。

(2) 对受淹洼地地下水进行疏导

洼地受淹说明地下水去路不畅,从而导致地下水上涨幅度及速率均大大增加。从减轻岩溶气爆地震动力条件出发,若能对地下水去路进行疏导,使地下排水畅通,可以减小地下水上涨幅度及速率,从而减少岩溶气爆地震的发生。

此种方法可以结合目前土地整治项目进行开展,提高资金的使用效益。

4.6 适当提高岩溶震群活动高易发区地面抗震设防

抗震设防国家已出台相应文件、规范等作了具体规定,对我国防灾减灾起到了很大的作用。岩溶震群活动是小流域及小范围的,它往往具有频度高、震级低、震源浅、烈度大等特点,国家规范难以完全覆盖。因此,对于岩溶震群活动高易发区抗震设防进行一些补充规定是必要的。

(1) 加强岩溶震群活动高易发区建筑管控

一般地震发生受损最为严重往往是一些违规建(构)筑物,该类建(构)筑物往往乱搭乱建,各种安全防范措施多不到位,包括从选址到建筑结构。因此,应加强对此类建(构)筑物的管控,管理部门可在审批此类构筑物时要求建设方加强建(构)筑物的整体结构,如增加圈梁等措施,提高建(构)筑物的抗震能力。

(2) 适当提高岩溶震群活动高易发区抗震设防

通过岩溶震群活动专项调查,确定岩溶震群活动高易发区可能发生地震的破坏烈度,若该烈度高于国家对该区的设防烈度,则适当提高设防烈度。

4.7 加强次生地质灾害调查研究

次生地质灾害是地震灾害重要组成部分,尤其是小震级活动,次生地质灾害的危害尤为突出。因此,加强次生地质灾害调查研究显得更加重要。

加强次生地质灾害调查研究,首先详细查明震区现有地质灾害现状,分析其成因机制,破坏模式及危害等;其次,分析地震活动条件下地质灾害破坏后其可能的运动方向、距离及造成的危害等;第三,预测震区现存斜坡于震状态下稳定性,其可能产生的破坏模式及危害;第四,提出防灾减灾建议,重点理清防与治的层次关系。

5 结论与建议

(1) 由于近年来极端天气频发,岩溶震群活动逐渐被广泛关注,岩溶震群活动具有频度高、震级低、灾害大等特点。

(2) 岩溶震群活动主要表现为气爆地震或塌陷地震,还包括因气体挤压溶洞顶板而产生应力释放的局部小地震。

(3) 岩溶震群活动震害主要为次生地质灾害及岩溶地基对地表烈度的放大作用。

(4) 岩溶震群活动震害防治可从认知(采用科普宣传、地震专项调查)、辅助治理(天气预报、绿色发展)、工程治理(地下以水气疏导为主,地上以增强构筑物刚度及对次生地质灾害防治为主)三个层次进行探讨。

参考文献:

- [1] 蒙荣国,李细光,姚宏,等. 凤山县至凌云县一带岩溶区环境水文地质条件与“6.28”震群关系调查报告(简写本)[R]. 广西:广西水文地质工程地质队,广西壮族自治区地震局,2013:3-6,56-57. [MENG R G, LI X G, YAO H, et al. Study on the relationships between ‘6.28’ Earthquake Swarms and karst hydrology condition of the region from Fengshan County to Lingyun County (Simple Servomechanism) [R]. Guangxi: Team of Hydrogeology and Engineering geology of Guangxi, Seismological Bureau of the Guangxi Zhuang Autonomous, 2013:3-6,56-57. (in Chinese)]
- [2] 范家参,姜朝松. 水库地震气爆成因初探——以乌江渡水库地震为例[J]. 云南水力发电, 1988, 4(2): 40-44. [FAN J C, JIANG C S. Water conservancy and hydropower of Yunnan[J]. Yunnan Water Power, 1988, 4(2): 40-44. (in Chinese)]
- [3] 胡平,胡毓良,马文涛,等. 气爆型水库诱发地震的分析[J]. 地震地质, 1989, 11(1): 115-124. [HU P, HU Y L, MA W T, et al. Analysis of reservoir induced earthquake caused by gas explosion in Karst caves[J]. Seismology and Geology, 1989, 11(1): 115-124. (in Chinese)]
- [4] 康彦仁,等. 中国南方岩溶塌陷[M]. 广西:广西科学技术出版社,1990:91-108. [KANG Y R, et al. Karst collapse of south China[M]. Guangxi: Guangxi Science and Technology Publishing House, 1990:91-108. (in Chinese)]
- [5] 邹成杰,等. 水利水电岩溶工程地质[M]. 北京:水利水电出版社,1994:216. [ZOU C J, et al. Karst engineering geology of water conservancy and hydropower[M]. Beijing: China Waterpower Press, 1994:216. (in Chinese)]
- [6] 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. [DAI J L, LUO W Q, WU Y B, et al. Mechanism analysis of sinkholes formation at Jili village, Laibin City, Guangxi, China[J]. Carsologica Sinica, 2017, 36(6): 808-818. (in Chinese)]
- [7] 蒙荣国,荣明书,邓忠,等. 广西凤山至凌云一带岩溶水文地质条件与“6·28”震群关系研究[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(3): 148-152. [MENG R G, RONG M S, DENG Z, et al. A study of the relationships between ‘6·28’ earthquake swarms and the Karst hydrological condition of the region of the Fengshan-Lingyun region in Guangxi[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, 41(3): 148-152. (in Chinese)]
- [8] 危岩防治工程技术规范:DB45/T 1696—2018[S]. 广西:广西壮族自治区质量技术监督局,2018. [Technical code for dangerous rockmass stabilization; DB45/T 1696—2018[S]. Guangxi:Guangxi Bureau of Quality and Technical Supervision, 2018. (in Chinese)]
- [9] 蔡茂林. 现代气动技术理论与实践 第四讲:压缩空气的能量[J]. 液压气动与密封, 2007, 27(5): 54-59. [CAI M L. Hydraulics pneumatics & seals [J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2007, 27(5): 54-59. (in Chinese)]
- [10] 常士骠,张苏民,等. 工程地质手册[M]. 第三版. 北京:中国建筑工业出版社,2007:50-53. [CHANG S P, ZHANG S M, et al. Engineering Geology Handbook [M]. 3th. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007:50-53. (in Chinese)]