

文章编号: 1008-2786-(2016)2-208-08

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000120

云南鲁甸红石岩堰塞湖溃坝风险及其影响

刘建康^{1,2}, 程尊兰³, 余涛^{1,2}

(1. 中国地质科学院探矿工艺研究所, 四川 成都 611734; 2. 中国地质调查局地质灾害防治技术中心, 四川 成都 611734;

3. 中国科学院成都山地灾害与环境研究所/中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室, 四川 成都 610041)

摘 要: 红石岩堰塞湖是2014-08-03鲁甸地震诱发形成的大型堰塞湖,由红石岩崩塌堵断牛栏江形成。红石岩堰塞坝坝高约96 m,堆积体总方量约 $1\,200 \times 10^4 \text{ m}^3$,湖区满库库容为 $2.6 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。从红石岩堰塞湖形成的背景条件,以及堰塞湖对坝址所在流域构成的潜在灾害链效应,评估堰塞湖的溃决危险程度。同时根据可能的溃决形式分析,采用1/3和1/2溃决模式对堰塞湖溃坝洪水估算,得到两种工况条件下的峰值流量分别为: $Q_p \approx (1.3 \sim 1.5) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $Q_p \approx (2.2 \sim 2.8) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$,远超过坝址处500 a一遇的牛栏江暴雨洪水,并在此基础上对下游演进过程的洪水进行估算。认为红石岩堰塞湖在后期整治中仍存在库岸稳定、堰塞坝稳定和鱼类生态破坏等问题,应引起关注。

关键词: 鲁甸地震,红石岩堰塞湖,牛栏江,溃决,风险控制

中图分类号: P642.2

文献标志码: A

地震、降雨等因素诱发山体滑坡、崩塌、泥石流等堵断主河而形成的堰塞湖,是典型的山地灾害类型之一,主要危害方式是回水淹没危害以及坝体溃决导致湖区蓄水快速下泄而引发的特大洪水灾害。因此,在堰塞湖安全处置、下游居民安全转移等决策过程中,科学预测堰塞湖溃坝风险及其洪水影响分析是关键研究之一。

2014-08-03,云南省昭通市鲁甸县龙头山镇(27.1°N,103.3°E)发生6.5级地震,震源深度12 km。据地震局分析,鲁甸地震是北东向鲁甸-昭通断裂带西南段发生左旋走滑活动的结果^[1]。受地震剧烈的地表破坏作用影响,位于震中Ⅸ级烈度区的红石岩、甘家寨和王家坡分别发生特大崩滑地质灾害,其中红石岩崩塌堵断牛栏江形成堰塞湖,对上下游沿河村镇和基础设施构成严重威胁。

红石岩堰塞湖位于火德红镇李家山村和巧家县苞谷垭乡红石岩村交界的牛栏江干流(27.03°N,103.42°E),红石岩水电站枢纽工程区内,距离震中鲁甸县龙头山镇南偏东8.2 km。堰塞湖回水导致上游沿河两岸村庄和基础设施受淹,直接影响上游会泽县纸厂乡和迤车镇1 015人^[2];堰塞湖溃决风险等级高,威胁下游鲁甸、巧家、昭阳三县(区)10个乡镇、3万余人和3.3约2 200 hm²耕地,以及天花板和黄角树等水电站的安全,潜在危害十分严重^[2]。

本文拟围绕红石岩堰塞湖的形成背景条件、溃决风险指数、溃决洪水峰值流量、洪水演进和风险处置等方面内容进行分析,形成初步的堰塞湖风险评价体系结果,从而为红石岩堰塞湖的安全处置工作提供一定的建议和参考。

收稿日期(Received date): 2015-05-30; 改回日期(Accepted): 2015-11-20。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金项目(41402315); 中国地质调查局项目(12120113011000); 交通部西部交通建设科技项目(201231874004-2, 2009318797029)。[This research was financially supported by national natural science foundation of china (41402315); China geological survey project (12120113011000), and the West Traffic Construction Science and Technology Project of Ministry of Communications (201231874004-2, 2009318797029).]

作者简介(Biography): 刘建康(1985-),男(汉),博士,岩土工程专业,主要从事山地灾害研究。[Liu Jiankang (1985-), male, Han nationality, born in Zigong of Sichuan, major in mountain hazards and prevention methods study.] Email: j_jiankang@hotmail.com

1 堰塞坝的基本特征和形成背景

1.1 堰塞坝的基本特征

红石岩堰塞湖位于构造侵蚀中山地貌区,堰塞坝主要是由地震诱发的两岸强风化白云岩和灰岩高速崩滑堆积于牛栏江而成^[2],右岸崩塌占主导成分,约占70%(图1)。右岸崩塌高度约720 m,原为裸露基岩,白云岩和灰岩地层交界带及其以上的岩石完整性较差,受地震破坏而发生崩塌坠落,现岸坡下部裸露的白云岩被新的崩积物覆盖,是堰塞坝的主要组成部分;左岸崩塌高度约250 m,原为古崩坡积物,主要为后缘基岩崩塌形成,松散坡体受地震作用发生崩塌滑动,堆积于坡脚段成为堰塞坝的次要组成部分。

堰塞坝顶部最低高程1 216 m,河床原始高程1 120 m,坝高96 m,坝轴线垂直河道方向迎水面宽286 m、背水坡宽78 m,顺河方向长度753 m,上下游坝体坡度均约为1:1,堰塞坝总方量约 $1\,200 \times 10^4 \text{ m}^3$ ^[2]。据估算,坝前水位达到1 216 m时的堰塞湖满库库容为 $2.6 \times 10^8 \text{ m}^3$,回水长度25 km^[2]。

1.2 堰塞坝的形成背景

1.2.1 区域地质环境

堰塞湖所在区域在地质构造上位于南岭东西向复杂构造带的西延部位及云南山字型构造的东翼^[3-5],又称骡马口构造带^[6]。该构造带是区内的主干构造,由一系列规模和发育程度相当的褶皱和断裂组成(图2),以褶皱为主,断裂其次。断裂构造以北东向为主,大多为压性、压扭性断裂。其中,包谷垭-小河断层是北东向昭通-鲁甸断裂系北西向次级走滑断层,亦是鲁甸6.5级地震的发震断层^[1]。

堰塞湖坝址处于东部塘房背斜(火德红背斜)与西部天生桥向斜之间,右岸崩塌处于单斜构造范围内,距离北东向昭通-鲁甸断裂带的弯刀坎断层约1.5 km,距离发震断层(北西向包谷垭-小河断层)约8.5 km。坝址范围内没有区域性断层通过,但在塘房背斜构造形成过程中,右岸上部二叠系下统阳新群灰岩(P_{1y})与下部泥盆系中统曲靖组白云岩(D_{2q})^[3-5]发生层间错动,导致接触带岩体发生一定程度的破碎,形成产状为 $280^\circ \angle 27^\circ$ 的小断层,带宽0.8~1.2 m^[3]。其中,小断层及以上的白云岩和灰岩整体性差,岩体破碎,是地震崩塌形成堰塞坝的主要物质来源,小断层以下则为完整性较好的白云岩。

1.2.2 水源条件

牛栏江流域位于滇东北高原区^{*},气候上属昆明

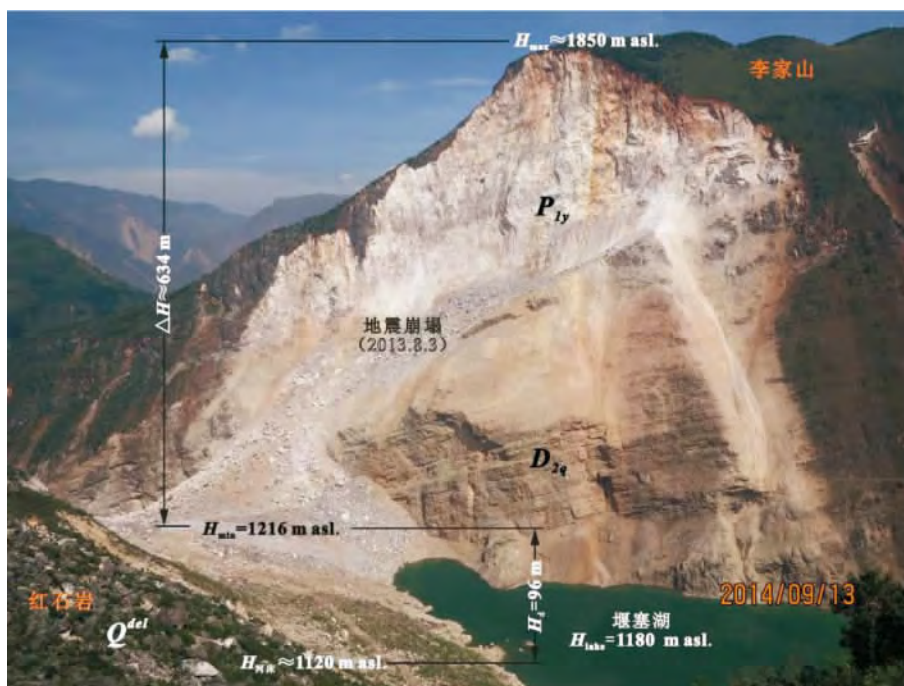


图1 红石岩堰塞湖全貌

Fig.1 Hongshiyang landslide dammed lake

1) 中铁十五局集团第三工程有限公司。红石岩电站隧洞工程实施性施工组织设计 2004-01。

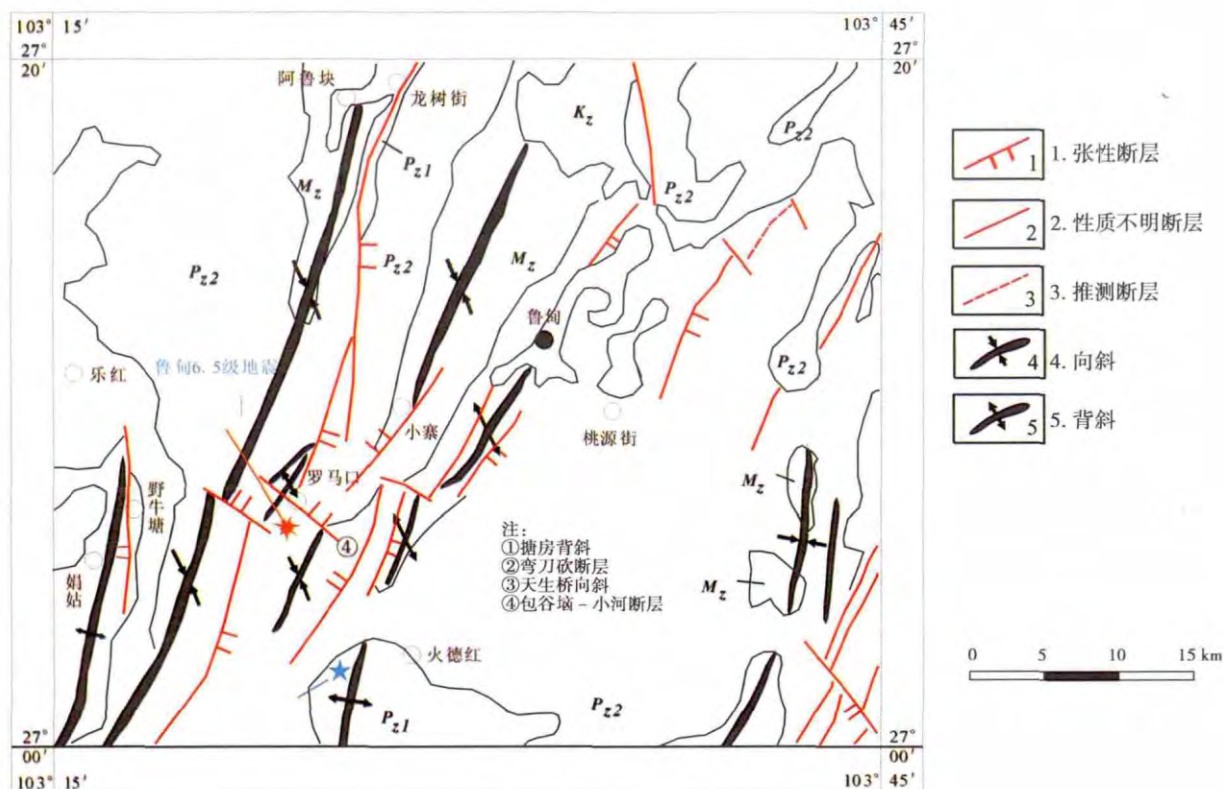


图2 研究区构造纲要图(据文献[6]修改)

Fig. 2 Geology map for the study area

准静止锋区,年均降水量 770 ~ 1 500 mm,雨量充沛,汛期多暴雨和特大暴雨,形成的洪水过程多为多峰矮胖型,一次单峰洪水过程历时约为 7 ~ 10 d,一次复峰洪水过程历时约为 15 ~ 20 d,为堰塞湖形成提供丰富的水源条件。堰塞湖坝址控制流域面积 11 832 km²,比上游红石岩水电站拦水坝大 255 km²,比下游小河水文站小 1 198 km²。根据水电站设计资料分析^[3],坝址多年平均流量 133 m³/s,汛期的平均流量 267.4 m³/s,丰水年汛期每月 10 个最大日均流量的平均流量为 501.0 m³/s,年径流总量 41.94 × 10⁸ m³;将小河水文站年径流成果按面积比转换到堰塞湖坝址处,得到坝址不同典型年份的径流年内分配见表 1。根据红石岩水电站的设计水文计算结果^[3],坝址 50 a 一遇洪峰流量 3 430 m³/s,500 a 一遇洪峰流量 5 700 m³/s。

由于牛栏江河床急剧下切,两岸边坡陡峻,崩滑流地质灾害频发;受人类活动影响,流域内植被稀少,水土流失严重。据水文站观测资料统计^[3],堰塞湖坝址处多年平均悬移质输沙量 1 213 × 10⁴ t,推移质约 181.95 × 10⁴ t,多年平均输沙模数 100 t/km² · a,来沙集中于汛期 6—9 月输沙量占全年的 92.5%。

2 堰塞湖的危险性分析

2.1 堰塞湖的潜在灾害链效应

堰塞湖对流域产生的潜在灾害链效应在空间上可以堰塞坝为界线分为上游、坝址和下游 3 个区间,相互关系如图 3 所示。

2.2 堰塞湖溃决危险性评估

2.2.1 堰塞湖稳定性评估

在上游不断来流或库区滑坡涌浪的作用下,堰塞坝稳定性降低,尤其是漫顶溢流条件下,溃坝风险陡增。据国内外的堰塞坝溃决案例统计^[7-10],地震形成的堰塞坝 90% 以漫顶形式溃决,10% 以背水坡失稳、渗流管涌等其他形式溃决。根据 Ermini 和 Casagli^[11]基于堰塞坝体积 V_d 、坝高 H_d 和流域面积 A_b 三个参数提出的地貌无量纲堆积体指数法(Dimensionless Blockage Index, DBI),对红石岩堰塞坝的溃坝风险进行判别, DBI 由下式计算

$$DBI = \lg \left[\frac{A_b \times H_d}{V_d} \right] \quad (1)$$

式中 A_b 为堰塞湖控制流域面积(km²); H_d 为堰塞

坝高度(m) ; V_d 为堰塞坝体积(m^3) 。

将红石岩堰塞坝的地貌特征参数代入判别式计算 , 得到 $DBI=4.98$ (以坝高 96 m 计算) 。根据判断标准 , 红石岩 $DBI>3.08$, 属于不稳定域 , 存在溃坝风险(图 4) 。

表 1 堰塞湖坝址典型年份的牛栏江径流年内分配(m^3/s)
(据文献[12]计算)

Tab.1 Distribution of the monthly runoff in typical years for Niulanjiang River at dam section (m^3/s)			
月份 Month	枯水年 Dry year	平水年 Normal year	丰水年 Wet year
6	194.5	117.3	149.7
7	138.2	102.0	540.5
8	104.9	297.4	333.7
9	111.5	368.0	374.7
10	81.8	164.0	389.9
11	72.1	114.4	163.0
12	69.2	80.3	110.6
1	47.2	72.5	85.3
2	37.8	52.5	73.8
3	34.1	46.0	61.0
4	32.9	40.4	54.3
5	34.3	59.0	111.5
平均	80.0	130.6	201.2

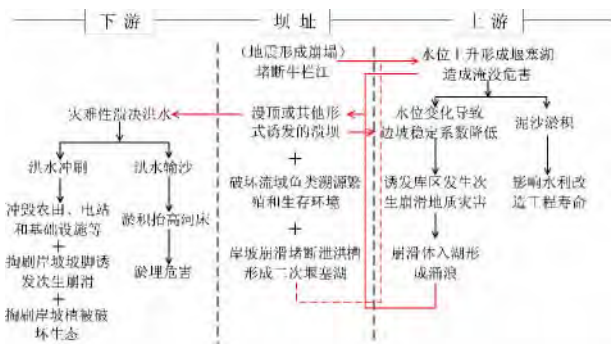


图 3 红石岩堰塞湖诱发的灾害链效应示意图

Fig.3 Sequential path model of geomorphic processes and hazards associated with the formation and failure of Hongshiyuan dam

2.2.2 堰塞湖潜在溃决形式与溃决洪水评估

若堰塞坝发生漫顶溢流 , 因抗冲刷能力低于水流的冲刷作用 , 溃口将迅速扩大 , 较短时间诱发堰塞坝溃决。坝体突然溃决所形成的洪水将形成比有原有水文记录高许多倍的洪峰流量过程 , 造成巨大破

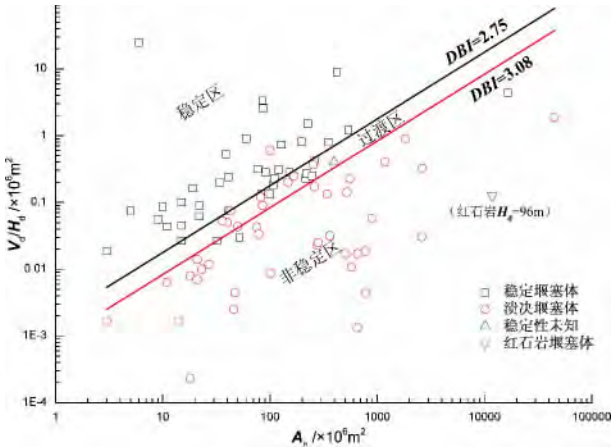


图 4 红石岩堰塞湖稳定性判别^[11]

Fig.4 Criterion of the stability for Hongshiyuan dammed lake

坏。1933-10-09 , 叠溪堰塞湖溃决 , 洪水演进至都江堰鱼嘴(距坝址 188 km 处) 的洪峰流量仍达到约 10 200 m^3/s 的水平 , 为断面处多年平均流量 459 m^3/s 的 22 倍多^[13] 。

红石岩堰塞坝为天然堆石坝 , 根据案例统计 , 溃坝形式以逐渐溃决或局部溃决为主^[7-10] 。采用 1/3 和 1/2 溃决模式估算红石岩堰塞坝溃决峰值流量 Q_p 时 , 溃口宽度 b 则根据 Froehlich^[14] 库容和溃口深度提出溃口宽度的计算公式

$$b=15V_m^{0.32}h^{0.19} \tag{2}$$

式中 V_m 为堰塞湖库容(10^7 m^3) ; h 为溃口深度(m) , 计算结果如表 2 。根据估算结果 , 红石岩堰塞湖溃决洪水峰值流量 $Q_p \approx (1.3 \sim 1.5) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$ (以 1/3 溃决形式计算) 或 $Q_p \approx (2.2 \sim 2.8) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$ (以 1/2 溃决形式计算) , 远大于坝址处 500 a 一遇的牛栏江暴雨洪水。

2.2.3 堰塞坝溃决洪水演进估算

当资料较为缺乏时 , 堰塞湖下游距坝址 L (m) 处的溃坝洪水最大流量估算常采用李斯特万计算公式进行

$$Q_{pL}=\frac{W}{\frac{W}{Q_p}+\frac{L}{V_{\max}}} \tag{3}$$

式中 Q_{pL} 为洪水演进至下游某处的洪峰流量(m^3/s) ; W 为堰塞湖溃决时的库容(m^3) ; L 为下游某处距溃口距离(m) ; V_{\max} 为为特大洪水的最大流速(无资料时 , 山区取 3.0 ~ 5.0 m/s , 丘陵区取 2.0 ~ 3.0 m/s , 平原区取 1.0 ~ 2.0 m/s) ; K 为经验系数(山区取 1.1 ~ 1.5 , 丘陵区取 1.0 , 平原区取 0.8 ~ 0.9) 。

考虑红石岩堰塞湖以下的河道形态 , 取 $V_{\max}K=$

表 2 红石岩堰塞湖溃决洪峰流量计算结果

Tab. 2 Estimated peak discharge of Hongshiyan dammed lake in different breach mode

溃决模式 Failure type	计算方法 Calculation method	溃口宽度 b/m Breach width b/m	洪峰流量 / (m^3/s) Peak discharge / (m^3/s)
1/3 $h = 32\text{ m}$	Froehlich ^[15] 白世录 ^[16]	84.2	$Q_p = 0.607 W^{0.295} h^{1.24} = 13\ 851$ $Q_p = \frac{8}{27} b \sqrt{gh}^{3/2} = 14\ 133$
1/2 $h = 48\text{ m}$	Froehlich 白世录	90.9	22 900 28 043

注: W 为堰塞湖库容(m^3); h 为溃口深度(m); b 为溃口宽度(m)。

5.0。根据表 4 中计算得到的不同工况溃决流量,利用公式(3),得到红石岩堰塞湖下游沿程洪峰流量见图 5。

从图 5 可以看出,下游牛栏江沿程的天生桥峡谷景区、昭(通)巧(家)公路、牛栏江大桥、天花板水电站、小河镇、陡滩口水电站等县乡镇、重要设施将受到不同程度的影响。溃坝洪水演进到天花板水电站坝址及业主厂区的最大流量值均 $>10\ 000\text{ m}^3/\text{s}$, $>500\text{ a}$ 一遇的牛栏江暴雨洪水(约 $5\ 980\text{ m}^3/\text{s}$) 远超过基础设施的防洪设计标准,导致溃决洪水对天花板电站枢纽区造成严重洪水危害。此外,下游沿江的陡滩口水电站(在建)和小河镇等也面临同样的溃决洪水威胁。

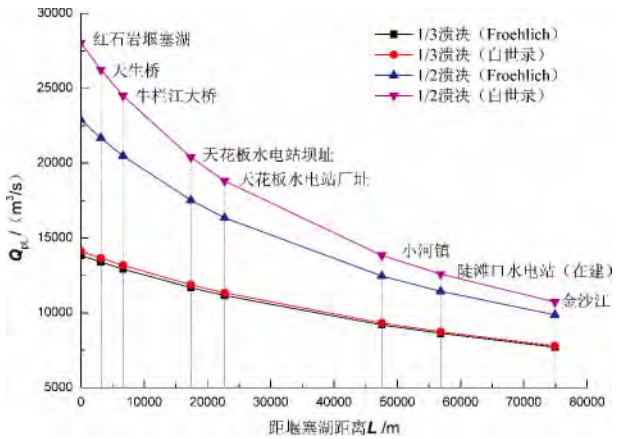


图 5 红石岩堰塞湖溃决洪水的沿程演进估算

Fig. 5 Calculation of outburst flood in the downstream for Hongshiyan dammed lake

3 堰塞湖的风险控制

3.1 堰塞湖险情

自 2014-08-03 鲁甸 6.5 级地震形成红石岩堰塞坝后,堰塞湖水位迅涨^[2,17]。8 月 5 日水位为

1 174.53 m 相比原河床高程(1 120 m) 增加约 54 m,蓄水量为 $4.84 \times 10^7\text{ m}^3$; 8 月 6 日水位为 1 176.42 m,蓄水量为 $5.60 \times 10^7\text{ m}^3$,回水长度约 4.4 km,淹没面积 2.85 km^2 。根据水文资料统计,8 月是牛栏江流域的汛期,参照坝址典型年份径流年内分配,8 月枯水年、平水年和丰水年的多年平均流量分别为 $104.9\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $297.4\text{ m}^3/\text{s}$ 和 $333.7\text{ m}^3/\text{s}$,依此计算,满库所需时间分别为 29 d、10 d 和 9 d。湖区水位迅涨,一旦满库,漫顶溢流溃坝的风险极高,因此制定和实施风险控制方案十分紧迫和必要。

3.2 风险控制方案

根据险情的紧迫性,红石岩堰塞湖风险控制方案分为以下三个阶段:

1. 应急处置

①堰塞湖上下游进行水文气象监测,为处置方案提供参数依据和预警预报^[18];

②堰塞湖下游天花板和黄角树电站预泄,为后期蓄滞堰塞湖下泄洪水腾空库容^[2,17];

③关闭堰塞湖上游的德庆水库闸门进行蓄水拦截^[2,17](8 月 4 日),开启引水隧洞末端的调压井(8 月 5 日)并爆破引水隧洞的施工支洞^[19](8 月 10 日),降低入湖流量而增大出湖流量至 $210\text{ m}^3/\text{s}$,达到减缓湖区水位上涨趋势甚至降低水位的目的。采取以上应急处置措施后,堰塞湖湖面高程维持在 1 180 m 左右,坝前水深约 60 m,处于稳定状态,为后续处置争取时间。

④为了防止应急处置阶段汛期洪水诱发的漫顶溃坝风险,在堰塞体顶部开挖泄流槽^[19](8 月 12 日),降低堰塞坝高程至 1 214 m,泄流槽底宽 5 m、深 8 m,坡比为 1:1.5,过流能力约 $300\text{ m}^3/\text{s}$,相当于丰水年 8 月的多年平均流量。

2. 后续处置

①拓宽挖深应急处置阶段的泄流槽断面^[19](8

月24日)降低堰塞坝高程至1208 m,泄流槽底宽5 m,局部6~7 m,坡比为1:1.5,降低坝高减少库容且增加了泄流槽的过流能力;

②在堰塞坝右岸开凿形成泄洪洞^[19](10月3日),洞径为7.5 m×7.5 m,出口高程1098 m,长度280 m,隧洞底坡约2.89%,最大下泄能力约840 m³/s,相当于2 a一遇的暴雨洪水,可有效降低堰塞湖水位和溃坝风险。堰塞湖于10月4日完成全部泄空,库区水位恢复至原始河床高程,险情完成解除^[20]。

3. 后期整治

现阶段,红石岩堰塞坝整体完好,坝顶高程由1216 m降低至1208 m,湖区蓄水泄空,堰塞湖溃决险情解除。根据方案^[2,17],后期整治以转型为主,变害为利,改造堰塞坝为水利枢纽,将堰塞湖开发利用为永久性、控制性的水库,使其成为具有综合效益的水利工程,发挥灌溉、发电、防洪、旅游等功能。

3.3 主要存在隐患及建议

应急处置和后续处置两个阶段的完成后,红石岩堰塞湖溃坝的风险得到有效控制,但根据既有案例的经验分析,后期整治仍存在以下几个隐患亟待解决:

1. 堰塞湖库岸崩滑体的稳定性

受鲁甸地震、湖区蓄水和泄水导致的水位变化影响,库岸崩滑体稳定性降低^[21],一旦发生失稳,可能对上游库区产生两种次生灾害链:蓄水阶段,入湖形成的涌浪或水位上涨导致堰塞坝溃决^[21];非蓄水阶段,崩滑体堵断上游牛栏江再次形成堰塞湖。因此,应对库区潜在的崩滑体进行勘查和监测,并对稳定性差的灾害点进行治理,防止其发生失稳滑动。

2. 渗流或管涌破坏导致的堰塞坝失稳

堰塞坝不同于人工土石坝,结构松散,加之坝前坝后的水位落差大,易导致背水坡失稳、坝体渗流或管涌破坏而诱发堰塞坝溃决。因此,为确保红石岩堰塞湖改造工程的长期稳定,需要对堰塞坝进行严格细致的防渗处理,如新西兰 Waikaremoana 湖的水电开发工程^[10]。

3. 泄流槽的过流安全

根据汶川地震堰塞湖处置的经验教训,堰塞坝泄流槽开挖后,在缺少相应防护措施的情况下,两岸的震后松散物源极易启动形成崩塌、滑坡或泥石流,如唐家山堰塞湖的右岸大水沟泥石流^[22]和小岗剑堰塞湖的左岸泥石流^[23],冲出的固体物质均堵断泄

流槽而形成二次堰塞湖,构成严重的次生灾害。

泄流槽过流洪水时,在缺少护面或加固措施的情况下,河床结构的抗冲强度低于水流的冲刷能力时,槽底松散组成颗粒易被启动冲至下游,在堰塞坝背水坡发生溯源侵蚀,导致溃口逐渐刷深拓宽而发生溃坝,如西藏易贡堰塞湖^[24]。

因此,必须对泄流槽岸坡采取必要的防护措施进行稳定与加固,并对泄流槽的槽底或坡面进行护面或加固,确保泄流槽的过流安全。

4. 鱼类生态系统

在牛栏江下游,水源条件较好,因距入汇口较近而有金沙江鱼类上溯,鱼类数量、品种和土著鱼类均是整个牛栏江流域最为丰富和多样的^[25]。位于该段的红石岩堰塞坝堵断主河后,在缺少相应的补偿措施前提下,洄游性鱼类溯河产卵和上下游物种交流的通道被阻断,造成物种逐步丧失遗传多样性,导致稳定的生存条件被破坏,种群灭绝的概率增加。

因此,应建立相应的工程补偿措施,如鱼类增殖放流站、下泄生态流量和网捕过坝等^[26],保护种群免于灭绝的危险。

5. 库区淤沙

牛栏江输沙量大,泥砂淤积严重是堰塞湖后期整治利用方案中的重点考虑环节之一。如未采取类似水电站的冲沙措施,快速的泥砂淤积将会大大降低改造工程的使用寿命和运营状况。

4 结 论

1. 鲁甸地震是红石岩堰塞坝形成的直接动力条件,山高坡陡深切峡谷是地形条件,褶皱构造导致岩石破碎是物源条件,流域产流丰富是水源条件。根据分析,红石岩堰塞坝主要是由位于右岸岩层交界带及其以上的整体性较差的白云岩和灰岩崩塌堆积形成。

2. 根据地貌无量纲堆积体指数法,判定红石岩 $DBI > 3.08$,存在较高的溃坝风险;对潜在溃决形式进行分析,若满库后发生漫顶溢流溃坝,通过堰塞体坝高的1/3和1/2溃决模式进行估算,分别得到峰值流量 $Q_p \approx (1.3 \sim 1.5) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $Q_p \approx (2.2 \sim 2.8) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$,远超过坝址处500 a一遇的牛栏江暴雨洪水。估算了下游演进过程的洪水峰值流量,超过沿江基建设施的防洪设计标准,一旦发生溃坝,下游的天花板、陡滩口水电站和小河镇等将面临严

重的溃决洪水危害。

3. 红石岩堰塞湖应急处置方案的工程措施充分考虑了水电站工程的基础条件、水文条件和险情的紧迫性,有效控制了溃坝风险。但后期整治方案中仍存在的隐患: 1) 堰塞湖库岸崩滑体的稳定性; 2) 堰塞坝的稳定性; 3) 泄流槽的过流安全; 4) 堰塞坝对鱼类生态系统的影响; 5) 若堰塞坝改造为水利枢纽,库区泥砂淤积是缩减工程寿命的隐患。

参考文献(References)

- [1] 中国地震局. 云南鲁甸 6.5 级地震[EB/OL]. [2014-08-06]. [http://www. cea. gov. cn/publish/dizhenj/468/553/100821/100831/20140806194711614124070/index. html](http://www.ceg.gov.cn/publish/dizhenj/468/553/100821/100831/20140806194711614124070/index.html). [China Earthquake Administration. Ludian 6.5 Earthquake in Yunnan [EB/OL]. [2014-08-06]. [http://www. cea. gov. cn/publish/dizhenj/468/553/100821/100831/20140806194711614124070/index. html](http://www.ceg.gov.cn/publish/dizhenj/468/553/100821/100831/20140806194711614124070/index.html).]
- [2] 云南省水利厅. 鲁甸“8.03”地震牛栏江堰塞湖排险处置情况[EB/OL]. [2014-08-06]. [http://www. web. yn. gov. cn/arti?id=28107](http://www.web.yn.gov.cn/arti?id=28107). [Water Resources Department of Yunnan Province. Risk management of Hongshiyuan dam lake in Ludian [EB/OL]. [2014-08-06]. [http://www. web. yn. gov. cn/arti?id=28107](http://www.web.yn.gov.cn/arti?id=28107).]
- [3] 刘国贵, 刘国华, 陈斌. 红石岩水电站工程动床模型试验研究[J]. 水力发电, 2005, 31(6): 27-28 [Liu Guogui, Liu Guohua, Chen Bin. Test study on the moveable-bed model for Hongshiyuan Hydropower Station [J]. Water Power, 2005, 31(6): 27-28]
- [4] 吴飞进, 朱友聪, 林洁. 洪石岩电站拦河坝复合式坝基方案的设计[J]. 中国农村水利水电, 2006, (10): 132-134 [Wu Feijin, Zhu Youcong, Lin Jie. Design of Composite Dam Foundation Scenarios for the Hongshiyuan Power Station Barrage [J]. China Rural Water and Hydropower, 2006, (10): 132-134]
- [5] 吴党中, 王茂荣. 洪石岩水电站厂房后边坡稳定性分析[J]. 水利水电技术, 2006, 37(10): 17-20 [Wu Dangzhong, Wang Maorong. Analysis on stability of back side slope of powerhouse for Hongshiyuan Hydropower Station [J]. Water Resource and Hydropower Engineering, 2006, 37(10): 17-20]
- [6] 唐立梅. 鲁甸县地质灾害特征、成因及防治区划研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2007: 15-22 [Tang Limei. Geology hazard investigation and preventing and curing Project of Ludian [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2007: 15-22]
- [7] Costa J E, Schuster R L. The formation and failure of natural dams [J]. Geological Society of America Bulletin, 1988, 100(7): 1054-1068
- [8] Schuster R L, Costa J E. A perspective on landslide dams [J]. Geotechnical Special Publication, 1986, (3): 1-20
- [9] 柴贺军, 刘浩吾, 刘汉超, 等. 天然土石坝稳定性初步研究[J]. 地质科技情报, 2001, 20(1): 77-81 [Chai Hejun, Liu Haowu, Liu Hanchao, et al. Preliminary stability analysis of natural rock - field dam resulting from damming landslide [J]. Geological science and technology information, 2001, 20(1): 77-81]
- [10] 刘宁, 程尊兰, 崔鹏, 等. 堰塞湖及其风险控制[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 74-109 [Liu Ning, Cheng Zunlan, Cui Peng, et al. Dammed lake and risk management [M]. Beijing: Science Press, 2013: 74-109]
- [11] Casagli N, Ermini L, Rosati G. Determining grain size distribution of the material composing landslide dams in the Northern Apennines: Sampling and processing methods [J]. Engineering Geology, 2003, (69): 83-97
- [12] 李正原. 天板水电站水资源分析与研究[J]. 水力发电, 2011, 37(6): 29-32 [Li Zhengyuan. Analysis on Water Resources Utilization of Tianhuaban Hydropower Station [J]. Water Power, 2005, 37(6): 29-32]
- [13] 严容. 岷江上游崩滑堵江次生灾害及环境效应研究[D]. 成都: 四川大学, 2006: 99-110 [Yan Rong. Secondary disaster and environmental effect of landslide and collapsed dams in the upper reaches of Minjiang River [D]. Chengdu: Sichuan University, 2006: 99-110]
- [14] Froehlich D C. Embankment dam breach parameters revisited [C]//Proceeding of the 1995 ASEC conference on Water Resource Engineering. San Antonio, Texas, 1995: 887-891
- [15] Froehlich D C. Peak outflow from breached embankment dam[J]. Journal of Water Resource Planning and Management, 1996, 121(1): 90-97
- [16] 白世录. 土坝溃坝流量计算方法的研究[J]. 水利水电工程, 1990, (2): 40-47 [Bai Shilu. Study on calculation method of earth dambreak flow [J]. Water and Hydropower Engineering, 1990, (2): 40-47]
- [17] 昭通市水利局. 鲁甸“8.03”地震牛栏江堰塞湖排险处置情况[EB/OL]. [2014-08-10]. [http://www. ztsl. gov. cn/news/ShowArticle. asp? ArticleID=2217](http://www.ztsl.gov.cn/news/ShowArticle.asp?ArticleID=2217) [Water Conservancy Bureau of Zhaotong. Risk management of Hongshiyuan dam lake in Ludian [EB/OL]. [2014-08-10]. [http://www. ztsl. gov. cn/news/ShowArticle. asp? ArticleID=2217](http://www.ztsl.gov.cn/news/ShowArticle.asp?ArticleID=2217)]
- [18] 云南省水文水资源局昭通分局. 牛栏江红石岩堰塞湖水文气象监测预警方案完成[EB/OL]. [2014-08-07]. [http://www. ztswj. com/xwdt/20140807/222226. htm](http://www.ztswj.com/xwdt/20140807/222226.htm). [Hydrology and water resources Bureau of Zhaotong. Hydrologic meteorological monitoring and early warning project [EB/OL]. [2014-08-07]. [http://www. ztswj. com/xwdt/20140807/222226. htm](http://www.ztswj.com/xwdt/20140807/222226.htm).]
- [19] 中国水利水电第十四工程局有限公司. 感谢信背后的故事——集团昭通鲁甸抗震救灾工作纪实[EB/OL]. [2014-09-23]. [http://www. fcbmis. com/news/jnyw/2014/923/149231123590DH39178HB2AAF600A98. html](http://www.fcbmis.com/news/jnyw/2014/923/149231123590DH39178HB2AAF600A98.html). [SinoHydro Bureau 14. Relief work of Ludian earthquake [EB/OL]. [2014-09-23]. [http://www. fcbmis. com/news/jnyw/2014/923/149231123590DH39178HB2AAF600A98. html](http://www.fcbmis.com/news/jnyw/2014/923/149231123590DH39178HB2AAF600A98.html).]
- [20] 中国水利水电第十四工程局有限公司. 公司鲁甸抗震救灾应急抢险突击队新建应急隧洞全部泄完红石岩堰塞湖水[EB/OL]. [2014-10-10]. [http://www. fcbmis. com/news/jnyw/2014/1010/141010924246C4HH9JD8J1IKDIFD14G. html](http://www.fcbmis.com/news/jnyw/2014/1010/141010924246C4HH9JD8J1IKDIFD14G.html). [Si-

- noHydro Bureau 14. Tunnel work has been done to release lake water in Hongshiyuan [EB/OL]. [2014-10-10]. <http://www.fcbmis.com/news/jnyw/2014/1010/141010924246C4HH9JD8J1IKDIFD14G.html>.]
- [21] 黄锦林. 库岸滑坡涌浪对坝体影响研究[D]. 天津: 天津大学, 2011: 1-19 [Huang Jinlin. Study on the Surge of Reservoir Bank Landslide and its Effect on Dam Body [D]. Tianjin: Tianjin University, 2011: 1-19]
- [22] 胡卸文, 吕小平, 黄润秋, 等. 唐家山堰塞湖大水沟泥石流发育特征及堵江危害性评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(4): 850-858 [Hu Xiewen, Lu Xiaoping, Huang Runqiu, et al. Developmental features and evaluation of blocking dangers of Dashui ditch debris flow in Tangjiashan dammed lake [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(4): 850-858]
- [23] 杨东旭, 陈晓清, 游勇, 等. 汶川地震区绵竹小岗剑沟泥石流流发展趋势[J]. 山地学报, 2012, 30(6): 701-708 [Yang Dongxu, Chen Xiaoping, You Yong, et al. The Debris Flow Development Trend of in Xiaogangjian Gully in Mianzhu County, Wenchuan Earthquake Zone [J]. Journal of Mountain Science, 2012, 30(6): 701-708]
- [24] 刘宁. 科学制定西藏贡嘎滑坡堵江减灾预案[J]. 中国水利, 2000, (7): 37-38 [Liu Ning. Scientific development of Tibet Yigong Landslide river blocking and mitigation plans [J]. Chinese water conservancy, 2000, (7): 37-38]
- [25] 王晓爱, 陈小勇, 杨君兴. 中国金沙江一级支流牛栏江的鱼类区系分析[J]. 动物学研究, 2009, 30(5): 585-592 [Wang Xiaaoai, Chen Xiaoyong, Yang Junxing. Ichthyologic Fauna of Niulan River [J]. Zoological Research, 2009, 30(5): 585-592]
- [26] 王伟营, 王志明, 卢飞. 牛栏江一滇池补水工程对鱼类的影响及补偿措施分析[G]//中国环境科学学会, 中国环境科学学会学术年会论文集, 北京, 2013: 5727-5731 [Wang Weiyang, Wang Zhiming, Lufei. Analysis of the impact of water replenishment project on fish and compensation measures to Niulan River [G]//Environment Science Association of China, Proceedings of annual conference of China Environmental Sciences, Beijing, 2013: 5727-5731]

Assessment of Dam Failure and Secondary Hazards for Hongshiyuan Dammed Lake Caused by Ludian Earthquake in Niulanjiang River

LIU Jiankang^{1,2}, CHENG Zunlan³, SHE Tao^{1,2}

(1. Institute of Exploration Technology, CAGS, Chengdu 611734, China;

2. Technical Center for Geological Hazard Prevention and Control, CGS, Chengdu 611734, China;

3. Key Lab of Mountain Hazards and Surface Processes, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China)

Abstract: Hongshiyuan is a huge dammed lake induced by Ludian Earthquake on August 3, 2014, and formed by a large landslide blocking the Niulanjiang River. Hongshiyuan dam is about 96m in height and $1\,200 \times 10^4 \text{ m}^3$ in volume, with a capacity of $2.6 \times 10^8 \text{ m}^3$ in the reservoir. This article reveals the forming conditions of Hongshiyuan dam in topography, geology and water source, analyses the potential chain effects impacted on the nearby area, and assesses the risk of dam break. Hongshiyuan dam is distinguished as a high level of failure risk by using a method of Dimensionless Blockage Index, and outburst floods under different breach mode are estimated. By calculating, the peak discharge are $Q_p \approx (1.3 \sim 1.5) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$ in 1/3 height of dam and $Q_p \approx (2.2 \sim 2.8) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$ in 1/2 height, which are much larger than the 500-year flood in section. Finally, risk management for Hongshiyuan dammed lake is summarized and analyzed, problems of the stability of Hongshiyuan dam and banks aside the lake, and the ecological destruction of fish are proposed.

Key words: Ludian Earthquake; Hongshiyuan dammed lake; Niulanjiang River; dam break; risk management