

# 2008—2017年中国典型滑坡堰塞坝(湖) 灾害事件统计与初步分析

罗辉<sup>1</sup>, 邓创<sup>1</sup>, 赵高文<sup>2,3</sup>

(1. 国家电网四川省电力公司应急中心, 四川 成都 610041; 2. 贵州民族大学建筑工程学院, 贵州 贵阳 550025;  
3. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041)

**摘要:**滑坡堰塞坝相关的地质灾害链每年给我国造成了大量经济损失和人员伤亡,通过数据统计,分析了2008—2017年我国滑坡堰塞坝的触发因素及其分布规律。结果表明,2008—2017年我国形成的有记录的滑坡堰塞坝超过100座,大地震和强降雨是其最主要的触发因素,触发案例占统计总量的90%以上。地域分布上,西南地区是滑坡堰塞坝相关灾害的重灾区,堰塞坝数量占统计总量的80%以上。四川省因接连发生汶川地震、芦山地震,堰塞坝数量远远大于其他地区;排名第二的是台湾省,由于每年均遭受台风的影响,2008—2017年台湾地区形成的有具体数据记录的滑坡堰塞坝11个,占总量的10.2%;其次是云南省、重庆市等省市。时间分布上,除2008年之外,我国滑坡堰塞坝的形成数量基本上在正常范围内波动。

**关键词:**滑坡;堰塞坝;地震;降雨;统计分析

中图分类号:X43

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2020)01-0017-08

**Statistics and preliminary analysis for typical landslide dams in China in past decade**//LUO Hui<sup>1</sup>, DENG Chuang<sup>1</sup>, ZHAO Gaowen<sup>2,3</sup> (1. Emergency Centre of State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, China; 2. Architectural Engineering College, Guizhou Minzu University, Guiyang 550025, China; 3. Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** The geological disaster chain related to landslide dams has caused a lot of economic losses and casualties to China every year. Based on data statistics, the triggering factors and distribution rules of landslide dams in China in the past 10 years were analyzed. The results show that, there has been more than 100 recorded landslide dams in China. Earthquakes and heavy rainfalls are the main trigger factors, since they account for more than 90% of the total statistics. In terms of geographical distribution, Southwestern China is the heavy disaster-area of hazards related to landslide dams, and the landslide dam number accounts for more than 80% of the total statistics. The number of landslide dams in Sichuan Province is far more than that of other provinces, as it has suffered from the Wenchuan earthquake and the Lushan earthquake. Taiwan Province ranks the second, since there are 11 landslide dams recorded in the past 10 years due to the impact of typhoons yearly, accounting for 10.2% of the total, followed by Yunnan, Chongqing and other provinces. In terms of temporal distribution, the number of landslide dams is basically fluctuating within the normal range except for the year 2008.

**Key words:** landslide; landslide dam; earthquake; rainfall; statistical analysis

滑坡堰塞坝是滑坡运动过程中,坡体受地形阻碍而减速堆积形成的地质体,其形成过程不受人工干预,属天然坝。据Costa和Schuster统计,地震、强降雨、冰雪融水等自然作用均可触发滑坡堰塞坝<sup>[1]</sup>。例如,1929年新西兰南岛布勒地区发生里氏7.6级地震,导致该地区形成至少11座大型滑坡堰塞坝<sup>[2]</sup>;1889年日本Totsu河流域的强降雨造成上

游100 km<sup>2</sup>范围内形成53座滑坡堰塞坝<sup>[3]</sup>。滑坡堰塞坝具有很高的危险性,绝大多数在形成后的第一个洪水周期内溃决破坏<sup>[1-4]</sup>。

滑坡-堰塞坝-溃坝的过程可能形成一系列典型的地质灾害链,单是滑坡过程就可能造成严重灾害。例如,2010年1月巴基斯坦北部罕萨谷出现山体滑坡并形成堰塞坝,滑坡成坝过程中掩埋了阿塔拜德

作者简介:罗辉(1968—),男,高级工程师,硕士,主要从事电力安全生产和灾害防治研究。E-mail:eedeng@126.com

通信作者:赵高文(1989—),男,讲师,博士,主要从事地质灾害预警及防治研究。E-mail:zhaogaowen\_c@126.com

村,造成当地 26 栋民宅被毁,并导致 20 人死亡。堰塞坝最终堵塞了罕萨河,在之后 2 个月时间内形成了长达 11 km 的堰塞湖,湖水淹没了上游多个村庄和一段长约 5 km 的中巴友谊公路—喀喇昆仑公路(包括一座跨河大桥),给当地造成了巨大人员伤亡和财产损失。在我国,每年因滑坡并形成堰塞湖而造成的损失也极为严重。例如,2010 年 7 月重庆市城口县庙坝镇滑坡形成堰塞湖,导致整个城镇被淹;2012 年 7 月云南省红河州弥勒县新哨镇宿丫村发生山体滑坡并形成堰塞湖,导致该地区约 73 hm<sup>2</sup> 稻谷、40 hm<sup>2</sup> 玉米、10 hm<sup>2</sup> 葡萄、10 hm<sup>2</sup> 韭黄、6.7 hm<sup>2</sup> 石榴受灾,并且造成 5 座水泵站被淹;2016 年 9 月,浙江省丽水市遂昌县苏村发生山体滑坡并形成堰塞湖,导致 27 人被埋,20 多栋民宅被毁;2017 年 6 月,四川省阿坝州茂县新磨村突发山体滑坡并形成堰塞湖,造成 40 余户 100 余名民众被掩埋,堰塞坝堵塞松坪沟长达 2 km。

滑坡堰塞坝若发生溃决,可能导致更大范围的灾害。历史上,我国曾经出现过多次滑坡堰塞坝溃决事件。例如,1786 年四川摩岗岭滑坡堰塞坝堵塞大渡河后形成巨型堰塞湖并于 10 d 后溃决,突发性洪水不仅冲毁了下游一切基础设施,还造成了近 10 万人死亡<sup>[5]</sup>;1933 年四川茂县叠溪滑坡堰塞坝发

生漫顶溃决,造成下游近 2 500 人死亡,大量房屋被毁<sup>[6]</sup>;1950 年 8 月西藏察隅滑坡堰塞坝溃决,洪水造成下游上千个村庄被淹,出现大量人员伤亡<sup>[7]</sup>;2010 年 8 月 8 日凌晨,甘肃省甘南藏族自治州舟曲县因此前山体滑坡形成的堰塞湖溃决,溃决洪水引发的泥石流沿山谷倾泻,横扫沿途的人类生活区,造成了至少 1 481 人遇难,284 人失踪,1 800 余人受伤,舟曲部分县城被泥石流掩埋。

我国山地面积广袤,占国土总面积近 70%,并且地震活动频发,南方地区强降雨天气时有发生,每年都有新滑坡堰塞坝形成,这给国家的防灾减灾工作带来严峻考验,除了直接人员伤亡和经济损失外,我国每年在堰塞坝抢险救灾方面还投入了大量人力和物力。因此,加强对滑坡堰塞坝<sup>[8]</sup>的了解对我们人类的生产和生活都具有重要意义。本文的目的是通过统计分析 2008—2017 年(以下简称“近 10 年”)我国滑坡堰塞坝的发育和分布情况,加强人们对我国滑坡堰塞坝的了解。

## 1 近 10 年来中国滑坡堰塞坝案例统计

近 10 年来,我国因地震和极端降雨等导致的滑坡堰塞坝案例统计结果如表 1 所示(有具体数据记录的案例,下同)。

表 1 近 10 年中国发生的滑坡堰塞坝统计

编号	堰塞坝(湖)	形成时间	基本信息
1	治城	2008 年 5 月	堵塞涧江,汶川 8.0 级地震引发,位于北川县,堰塞坝体尺寸未知 <sup>[9]</sup>
2	唐家山	2008 年 5 月	堵塞涧江,汶川 8.0 级地震引发,距北川县约 6 km,地理坐标 104°25'57"E 31°50'41"N,横河向最大宽度 611 m,顺河向最大长度 803 m,高度 80 ~ 120 m,堰塞坝体积超 2 000 万 m <sup>3</sup> ,堰塞湖最大库容量超 3.2 亿 m <sup>3</sup> ,回水长度超 20 km,上游集雨面积 3 550 km <sup>2</sup> <sup>[9-10]</sup>
3	苦竹坝(下游)	2008 年 5 月	堵塞涧江,汶川 8.0 级地震引发,堰塞坝顺河向长 200 m,横河向宽 300 m,高度 60 m,堰塞坝体积 160 万 m <sup>3</sup> ,堰塞湖体积约 200 万 m <sup>3</sup> ,回水长度 800 m <sup>[9]</sup>
4	新街村	2008 年 5 月	堵塞涧江,汶川 8.0 级地震引发,堰塞坝顺河向长约 200 m,横河向宽约 350 m,高度约 20 m,堰塞坝体积约 70 万 m <sup>3</sup> ,堰塞湖最大库容量超过 200 万 m <sup>3</sup> <sup>[9]</sup>
5	白果村	2008 年 5 月	堵塞涧江,汶川 8.0 级地震引发,堰塞坝顺河向长约 100 m,横河向宽约 200 m,坝高约 15 m,堰塞坝体积在 40 万 m <sup>3</sup> 左右,最大库容量 80 万 m <sup>3</sup> <sup>[9]</sup>
6	岩羊滩	2008 年 5 月	堵塞涧江,汶川 8.0 级地震引发,堰塞坝横河向宽约 150 m,坝高约 20 m,体积超过 160 万 m <sup>3</sup> ,堰塞湖最大库容量 560 万 m <sup>3</sup> 回水长度约 3 km <sup>[9]</sup>
7	孙家院子	2008 年 5 月	堵塞涧江,汶川 8.0 级地震引发,堰塞坝横河向宽约 180 m,坝高约 50 m,堰塞湖体积超 500 万 m <sup>3</sup> <sup>[9]</sup>
8	罐子铺	2008 年 5 月	堵塞涧江,汶川 8.0 级地震引发,堰塞坝横河向宽约 390 m,坝高约 60 m,最大库容量约 585 万 m <sup>3</sup> <sup>[9]</sup>
9	唐家湾	2008 年 5 月	堵塞涧江,汶川 8.0 级地震引发,位于北川县,地理坐标 104°35'18"E 31°56'21"N,堰塞坝横河向宽约 300 m,坝高约 30 m,体积约 200 万 m <sup>3</sup> ,最大湖水库容 200 万 m <sup>3</sup> <sup>[9-10]</sup>
10	彭州涧江上游	2008 年 5 月	堵塞涧江,汶川 8.0 级地震引发,堰塞湖最大库容约 160 万 m <sup>3</sup> <sup>[9]</sup>
11	老鹰岩	2008 年 5 月	堵塞黄洞子沟,汶川 8.0 级地震引发,堰塞坝体积约 1 500 万 m <sup>3</sup> ,坝高 105 m,堰塞湖最大库容超 1 000 万 m <sup>3</sup> <sup>[9]</sup>
12	南坝	2008 年 5 月	堵塞石坎河,汶川 8.0 级地震引发,堰塞坝顺河向长约 625 m,横河向宽约 200 m,坝高约 50 m,堰塞坝体积超 600 万 m <sup>3</sup> ,最大湖水库容在 5 000 万 m <sup>3</sup> 以上,回水长度达 6 km <sup>[9]</sup>
13	石板沟	2008 年 5 月	堵塞青江河,汶川 8.0 级地震引发,堰塞坝顺河向长约 625 m,横河向宽约 800 m,坝高约 60 m,堰塞坝体积超 800 万 m <sup>3</sup> ,最大湖水库容在 2 000 万 m <sup>3</sup> 以上,回水长度为 4 km <sup>[9]</sup>
14	东河口	2008 年 5 月	堵塞青江河,汶川 8.0 级地震引发,堰塞坝顺河向长约 700 m,横河向宽约 500 m,坝高 15 ~ 25 m,堰塞坝体积超 1 000 万 m <sup>3</sup> ,最大湖水库容在 1 000 万 m <sup>3</sup> 以上 <sup>[9]</sup>
15	红石河	2008 年 5 月	堵塞青江河,汶川 8.0 级地震引发,堰塞坝顺河向长约 500 m,横河向宽约 400 m,坝高约 40 m,堰塞坝体积超 100 万 m <sup>3</sup> ,最大湖水库容在 300 万 m <sup>3</sup> 以上 <sup>[9]</sup>

表 1 (续)

编号	堰塞坝(湖)	形成时间	基本信息
16	肖家桥	2008年5月	堵塞茶坪河,汶川8.0级地震引发,位于安县,地理坐标104°16'36"E 31°38'50"N,堰塞坝顺河向长约250 m,横河向宽约200 m,坝高约80 m,堰塞坝体约200万m <sup>3</sup> ,最大湖水库容量超2000万m <sup>3</sup> ,回水长度7 km <sup>[9]</sup>
17	罐滩	2008年5月	堵塞凯江,汶川8.0级地震引发,堰塞坝顺河向长约120 m,横河向宽约200 m,坝高约60 m,堰塞坝体约140万m <sup>3</sup> ,最大湖水库容量超500万m <sup>3</sup> ,回水长度2 km <sup>[9]</sup>
18	黑洞崖	2008年5月	堵塞绵远河,汶川8.0级地震引发,堰塞坝顺河向长约700 m,横河向宽约120 m,坝高约35 m,堰塞坝体约200万m <sup>3</sup> ,最大湖水库容量超200万m <sup>3</sup> ,回水长度400 m <sup>[9]</sup>
19	小岗剑(上游)	2008年5月	堵塞绵远河,汶川8.0级地震引发,堰塞坝顺河向长约170 m,横河向宽约120 m,坝高约72 m,最大湖水库容量超1 100万m <sup>3[9]</sup>
20	小岗剑(下游)	2008年5月	堵塞绵远河,汶川8.0级地震引发,堰塞坝顺河向长约150 m,横河向宽约150 m,坝高约30 m,最大湖水库容量超700万m <sup>3</sup> ,回水长度2 000 m <sup>[9]</sup>
21	一把刀	2008年5月	堵塞绵远河,汶川8.0级地震引发,堰塞坝顺河向长约80~100 m,横河向宽约40 m,坝高约25 m,最大湖水库容量超50万m <sup>3[9]</sup>
22	干河口	2008年5月	堵塞石亭江,汶川8.0级地震引发,堰塞坝坝高约10 m,体约1万m <sup>3</sup> ,最大湖水库容量超50万m <sup>3[9]</sup>
23	马槽滩上	2008年5月	堵塞石亭江,汶川8.0级地震引发,堰塞坝顺河向长约300 m,横河向宽约100 m,坝高40~50 m,堰塞坝体约100万m <sup>3</sup> ,堰塞湖最大库容量超60万m <sup>3</sup> ,回水长度1 000 m <sup>[9]</sup>
24	马槽滩中	2008年5月	堵塞石亭江,汶川8.0级地震引发,堰塞坝顺河向长约80 m,坝高40~50 m,堰塞湖最大库容量超25万m <sup>3</sup> ,回水长度500 m <sup>[9]</sup>
25	马槽滩下	2008年5月	堵塞石亭江,汶川8.0级地震引发,堰塞坝顺河向长80~100 m,横河向宽约60 m,坝高约30 m,堰塞湖最大库容量约10万m <sup>3</sup> ,回水长度200 m <sup>[9]</sup>
26	木瓜坪	2008年5月	堵塞石亭江,汶川8.0级地震引发,堰塞坝顺河向长约100 m,横河向宽约20~30 m,坝高约15 m,堰塞湖最大库容量约50万m <sup>3</sup> ,回水长度1 000 m <sup>[9]</sup>
27	燕子岩	2008年5月	堵塞石亭江,汶川8.0级地震引发,堰塞坝顺河向长约30~40 m,横河向宽约20 m,坝高约10 m,堰塞湖最大蓄水量约10万m <sup>3</sup> ,回水长度约100 m <sup>[9]</sup>
28	红村电站厂房	2008年5月	堵塞石亭江,汶川8.0级地震引发,堰塞坝顺河向长约60 m,横河向宽约100 m,坝高40~50 m,堰塞坝体约40万m <sup>3</sup> ,堰塞湖最大库容量超100万m <sup>3</sup> ,回水长度约2.2 km <sup>[9]</sup>
29	凤鸣桥	2008年5月	堵塞金河,汶川8.0级地震引发,堰塞坝顺河向长约100 m,横河向宽约300 m,堰塞坝高10 m,堰塞湖最大库容量150万m <sup>3[9]</sup>
30	谢家店子	2008年5月	堵塞金河,汶川8.0级地震引发,堰塞坝顺河向长约70 m,横河向宽约250 m,堰塞坝高10 m,堰塞湖最大库容量100万m <sup>3[9]</sup>
31	鸡冠山乡竹根顶桥	2008年5月	堵塞井江,汶川8.0级地震引发,堰塞坝顺河向长约70 m,横河向宽约500 m,堰塞坝高90 m,堰塞坝体约300万m <sup>3</sup> ,堰塞湖最大库容量约450万m <sup>3[9]</sup>
32	火石沟	2008年5月	堵塞井江,汶川8.0级地震引发,堰塞坝顺河向长约40 m,横河向宽约500 m,堰塞坝高120 m,堰塞坝体约240万m <sup>3</sup> ,堰塞湖最大库容量约150万m <sup>3[9]</sup>
33	海子坪	2008年5月	堵塞井江,汶川8.0级地震引发,堰塞坝顺河向长约50 m,横河向宽约500 m,堰塞坝高50 m,堰塞坝体约150万m <sup>3</sup> ,堰塞湖最大库容量约300万m <sup>3[9]</sup>
34	六顶沟	2008年5月	堵塞井江,汶川8.0级地震引发,堰塞坝顺河向长约50 m,横河向宽约500 m,堰塞坝高60 m,堰塞坝体约150万m <sup>3</sup> ,堰塞湖最大库容量约300万m <sup>3[9]</sup>
35	映秀湾与太平驿电站之间堰塞湖	2008年5月	堵塞井江,汶川8.0级地震引发,堰塞坝顺河向长约200 m,横河向宽约300 m,堰塞坝高18 m,堰塞坝体约100万m <sup>3</sup> ,堰塞湖最大库容量约200万m <sup>3[9]</sup>
36	大光包	2008年5月	堵塞红洞子沟,汶川8.0级地震引发,位于安县高川乡泉水村,地理坐标104°7'0.2"E 31°38'20"N,坝高超过690 m,堰塞坝体约7.42亿m <sup>3</sup> ,历史罕见 <sup>[11]</sup>
37	小湔坪	2008年5月	汶川8.0级地震引发,位于绵竹市,地理坐标104°7'37"E 31°30'16"N,堰塞湖体超2 100万m <sup>3[10]</sup>
38	麻地湾	2008年5月	汶川8.0级地震引发,位于平武县,地理坐标104°51'58"E 32°13'39"N,堰塞湖体超1 000万m <sup>3[10]</sup>
39	楼房坪	2008年5月	汶川8.0级地震引发,位于北川县,地理坐标104°27'33"E 北纬31°50'42"N,堰塞湖体超700万m <sup>3[10]</sup>
40	茶坪乡马颈项	2008年5月	汶川8.0级地震引发,位于安县,堰塞坝顺河向长约350 m,横河向宽约340 m,坝高约70 m,体积200余万m <sup>3</sup> ,堰塞湖最大库容量超600万m <sup>3</sup>
41	御军门	2008年5月	汶川8.0级地震引发,位于绵竹市,地理坐标104°9'5"E 31°29'7"N,堰塞湖体超600万m <sup>3[10]</sup>
42	马滚岩	2008年5月	汶川8.0级地震引发,位于北川县,地理坐标104°32'52"E 31°51'30"N,堰塞湖体超600万m <sup>3[10]</sup>
43	小梅子林	2008年5月	汶川8.0级地震引发,位于什邡市,地理坐标104°1'4"E 31°24'12"N,堰塞湖体超300万m <sup>3[10]</sup>
44	沙坝	2008年5月	汶川8.0级地震引发,位于北川县,地理坐标104°29'12"E 31°51'16"N,堰塞湖体超300万m <sup>3[10]</sup>
45	枷担湾	2008年5月	汶川8.0级地震引发,位于都江堰市,地理坐标103°38'44"E 31°12'58"N,堰塞湖体超240万m <sup>3[10]</sup>
46	双河口	2008年5月	汶川8.0级地震引发,位于青川县,地理坐标105°7'33"E 32°24'49"N,堰塞湖体超230万m <sup>3[10]</sup>
47	长坪	2008年5月	汶川8.0级地震引发,位于都江堰市,地理坐标103°38'54"E 31°14'2"N,堰塞湖体超200万m <sup>3[10]</sup>
48	刘家店子	2008年5月	汶川8.0级地震引发,位于青川县,地理坐标105°3'3"E 32°18'1"N,堰塞湖体超150万m <sup>3[10]</sup>
49	睢水场	2008年5月	汶川8.0级地震引发,位于安县,地理坐标104°13'24"E 31°31'17"N,堰塞湖体超140万m <sup>3[10]</sup>



表1(续)

编号	堰塞坝(湖)	形成时间	基本信息
50	雷打树	2008年5月	汶川8.0级地震引发,位于平武县,地理坐标104°53'26"E32°17'6"N,堰塞湖体积超140万m <sup>3</sup> [10]
51	篾棚子	2008年5月	汶川8.0级地震引发,位于绵竹市,地理坐标104°5'59"E31°35'52"N,堰塞湖体积超110万m <sup>3</sup> [10]
52	芭蕉坪	2008年5月	汶川8.0级地震引发,位于安县,地理坐标104°16'4"E31°38'55"N,堰塞湖体积超45万m <sup>3</sup> [10]
53	开坪	2008年5月	汶川8.0级地震引发,位于北川县,地理坐标104°16'53"E31°57'1"N,堰塞湖体积超40万m <sup>3</sup> [10]
54	大水沟	2008年5月	汶川8.0级地震引发,位于绵竹市,地理坐标104°4'29"E31°36'02"N,堰塞湖体积超30万m <sup>3</sup> [10]
55	天池乡	2008年5月	汶川8.0级地震引发,位于绵竹市,地理坐标104°7'50"E31°29'16"N,堰塞湖体积超30万m <sup>3</sup> [10]
56	黄连头	2008年5月	汶川8.0级地震引发,位于安县,地理坐标104°16'17"E31°40'15"N,堰塞湖体积超20万m <sup>3</sup> [10]
57	反白坪	2008年5月	汶川8.0级地震引发,位于北川县,地理坐标104°21'57"E31°47'2"N,堰塞湖体积超20万m <sup>3</sup> [10]
58	陈家坝	2008年5月	汶川8.0级地震引发,位于北川县,地理坐标104°34'41"E31°54'60"N,堰塞湖体积超20万m <sup>3</sup> [10]
59	刨地里	2008年5月	汶川8.0级地震引发,位于青川县,地理坐标105°2'3"E32°21'10"N,堰塞湖体积超20万m <sup>3</sup> [10]
60	七盘沟	2008年5月	汶川8.0级地震引发,位于汶川县,地理坐标103°4'23"E31°25'41"N,堰塞湖体积超15万m <sup>3</sup> [10]
61	安家坪	2008年5月	汶川8.0级地震引发,位于茂县,地理坐标103°50'4"E31°37'13"N,堰塞湖体积超15万m <sup>3</sup> [10]
62	银洞子沟	2008年5月	汶川8.0级地震引发,位于都江堰市,地理坐标103°40'19"E31°9'46"N,堰塞坝顺沟向长约480m,横沟向宽约100m,坝高约30m,堰塞坝体积超80万m <sup>3</sup> ,堰塞湖最大库容约8万m <sup>3</sup>
63	红绸梁子	2008年5月	汶川8.0级地震引发,位于绵竹市,地理坐标104°5'1"E31°36'10",堰塞湖体积超15万m <sup>3</sup> [9]
64	洞洞响	2008年5月	汶川8.0级地震引发,位于什邡市,地理坐标103°54'54"E31°32'22"N,堰塞湖体积超15万m <sup>3</sup> [10]
65	杜家岩	2008年5月	汶川8.0级地震引发,位于青川县,地理坐标105°1'55"E32°20'33"N,堰塞湖体积超15万m <sup>3</sup> [10]
66	茶园沟1#	2008年5月	汶川8.0级地震引发,属即生即消型堰塞湖,溃决后残余坝体顺沟向长约20m,横沟向宽约10m,堰塞湖长约50m,宽约20m,湖水深度约2m,湖水体积约0.2万m <sup>3</sup> [12]
67	茶园沟2#	2008年5月	汶川8.0级地震引发,属即生即消型堰塞湖,溃决后残余坝体顺沟向长约23m,横沟向宽约11m,堰塞湖长约42m,宽约23m,湖水深度约2.5m,湖水体积约0.2万m <sup>3</sup> [12]
68	茶园沟3#	2008年5月	汶川8.0级地震引发,属即生即消型堰塞湖,溃决后残余坝体顺沟向长约18m,横沟向宽约10m,堰塞湖长约33m,宽约17m,湖水深度约3.5m,湖水体积约0.2万m <sup>3</sup> [12]
69	三交乡永定桥	2013年7月	芦山地震后强降雨引发,位于雅安市汉源县,堰塞坝体积超160万m <sup>3</sup> ,最大库容量超200万m <sup>3</sup>
70	火德红乡红石岩	2014年8月	鲁甸6.5级地震引发,位于昭通市鲁甸县,堵塞牛栏江,堰塞坝高80~100m,体积超1200万m <sup>3</sup> ,堰塞湖最大库容量超2.6亿m <sup>3</sup>
71	神木村	2009年8月	台风“莫拉克”带来的强降雨引发,位于台湾南投县,堵塞和社河,堰塞湖最大蓄水面积约1.4万m <sup>2</sup> [13]
72	梅山村	2009年8月	台风“莫拉克”带来的强降雨引发,位于台湾高雄县,堵塞荖浓河,堰塞湖最大蓄水面积约4.2万m <sup>2</sup> [13]
73	梅兰村	2009年8月	台风“莫拉克”带来的强降雨引发,位于台湾高雄县,堵塞拉克斯河,堰塞湖最大蓄水面积约2.1万m <sup>2</sup> [13]
74	宝山村	2009年8月	台风“莫拉克”带来的强降雨引发,位于台湾高雄县,堵塞宝来河,堰塞湖回水长度约180m[13]
75	那玛夏乡	2009年8月	台风“莫拉克”带来的强降雨引发,位于台湾高雄县,堵塞旗山河,堰塞湖最大蓄水面积约27万m <sup>2</sup> ,最大湖水深度约9m[13]
76	春日乡	2009年8月	台风“莫拉克”带来的强降雨引发,位于台湾屏东县,堵塞土文河,堰塞湖最大蓄水面积约6.7万m <sup>2</sup> ,回水长度约700m,最大水深24m,最大库容约185万m <sup>3</sup> [13]
77	包盛社	2009年8月	台风“莫拉克”带来的强降雨引发,位于台湾台东县,堰塞坝顺河道方向长约1200m,最大库容约533万m <sup>3</sup> [13]
78	铁矿乡鸡尾山	2009年6月	矿产资源开发导致,位于重庆市武隆区,堰塞坝坝高约100m,最大库水容量约40万m <sup>3</sup>
79	城口县庙坝镇	2010年7月	强降雨引发,位于重庆市,堰塞坝阻塞罗江河,顺河向长约100m,横河向宽约50m,坝高约18m,体积约10万m <sup>3</sup> ,堰塞湖最大库容超1500万m <sup>3</sup>
80	岚皋县四季乡	2010年7月	强降雨引发,位于陕西省安康市,堰塞坝体积约10万m <sup>3</sup>
81	紫阳县联合乡	2010年7月	强降雨引发,位于陕西省安康市,堰塞坝阻塞盘厢河,堰塞湖顺河向长约1000m,横河向宽约90m,湖水深度约16m,堰塞湖最大库容约80万m <sup>3</sup>
82	房县上龛乡	2011年6月	强降雨引发,位于湖北省十堰市,堰塞坝阻塞平渡河,顺河向长约100m,横河向宽约70m,坝高约35m,堰塞湖最大库容超200万m <sup>3</sup>
83	319国道潜江段	2011年5月	强降雨引发,位于重庆市,堰塞坝体积约2万m <sup>3</sup> ,抢险开挖前的湖水深度约2m
84	新竹县五峰乡	2011年11月	强降雨引发,位于台湾省,堰塞坝体积约50万m <sup>3</sup> ,堰塞湖顺河向长约150m,宽约60m,最大体积约10万m <sup>3</sup>
85	信义乡神木村	2012年6月	强降雨引发,位于台湾省南投县,堰塞坝堵塞头坑溪,湖水面积约10万m <sup>2</sup>
86	岑巩县思旸镇	2012年7月	强降雨引发,位于贵州省黔东南州,堰塞坝体积约1200万m <sup>3</sup> ,高约25m,堰塞湖最大蓄水量约150万m <sup>3</sup>
87	静宁县仁大乡	2012年7月	强降雨引发,位于青海省平凉市,堰塞坝体积约5万m <sup>3</sup> ,堰塞湖顺河向长约100m,横河向宽约80m,湖水深度6~8m,最大库水容量约12万m <sup>3</sup>
88	新哨镇宿丫村	2012年7月	位于云南省红河州弥勒县,堰塞坝堵塞甸溪河,体积约60万m <sup>3</sup> ,顺河向长约300m,堰塞湖横河向宽40~50m
89	彝良县龙海乡	2012年10月	位于云南省昭通市,堰塞坝体积约4.5万m <sup>3</sup> ,堰塞湖水深约7m

表 1 (续)

编号	堰塞坝(湖)	形成时间	基本信息
90	云龙县诺邓镇	2012年12月	位于云南省大理白族自治州,堵塞泘江河,堰塞坝体积约130万m <sup>3</sup> ,堰塞坝形成后20h内蓄水量达50万m <sup>3</sup> ,最大库容量超300万m <sup>3</sup>
91	鹿谷乡溪头镇	2013年6月	南投6.7级地震引发,位于台湾省南投县,堰塞坝体积未知
92	信义乡神木村	2013年7月	台风“苏力”带来的强降雨引发,位于台湾省南投县,堰塞坝堵塞和社溪,湖水长约50m,宽约8m,水深4~6m,最大库容约5万m <sup>3</sup>
93	新晃侗族自治县米贝乡	2014年7月	强降雨引发,位于湖南省怀化市,堰塞坝体积约5万m <sup>3</sup> ,最大库容量约9万m <sup>3</sup> ,水深约2m
94	竹园镇无山村	2014年9月	强降雨引发,位于重庆市奉节县,堰塞坝体积超1000万m <sup>3</sup> ,顺河向长度达3km,横河向宽约150m,高度约200m,24h内蓄水约100万m <sup>3</sup> ,水深超30m,最大库容量超800万m <sup>3</sup>
95	竹园镇岔河村	2014年9月	强降雨引发,位于重庆市奉节县,24h内蓄水约50万m <sup>3</sup> ,水深超25m,最大库容量超450万m <sup>3</sup>
96	雅溪镇里东村	2015年11月	位于浙江省丽水市,堰塞坝体积和湖水库容未知
97	板桥乡井园村	2016年6月	强降雨引发,位于重庆市酉阳县,堰塞坝体积约10万m <sup>3</sup> ,最大库容量约25万m <sup>3</sup>
98	青草岭下游	2016年6月	强降雨引发,位于湖北省咸宁市通城县,堰塞坝体积较小,不到1万m <sup>3</sup> ,堰塞湖最大库容约3万m <sup>3</sup>
99	陈家坝乡太洪村	2016年9月	位于四川省绵阳市北川县,堰塞坝顺河向长约230m,横河向宽约80m,坝高约40m,堰塞坝体积约50万m <sup>3</sup> ,24h内湖水水位上涨约13m,回水长度约1km,堰塞湖最大库容量约400万m <sup>3</sup>
100	北界镇苏村	2016年9月	台风“鲇鱼”带来的强降雨引发,位于浙江省丽水市遂昌县,堰塞坝总体积约45万m <sup>3</sup> ,坝高约20m,堰塞湖最大库容量约100万m <sup>3</sup>
101	叠溪镇新磨村	2017年6月	位于四川省阿坝州茂县,堰塞坝堵塞松坪沟,顺沟方向长度约2km,规模约450万m <sup>3</sup>
102	新民镇林家田村	2017年7月	强降雨引发,位于贵州省盘州市,堰塞坝体积约22万m <sup>3</sup>
103	两河镇两河村	2017年8月	由台风“天鸽”带来的强降雨引发,位于云南省昭通市彝良县,堰塞坝堵塞龙洞河,体积未知
104	拉加镇思肉欠村	2017年8月	位于青海省果洛藏族自治州玛沁县,堰塞坝堵塞西曲河,体积4万m <sup>3</sup> ,堰塞湖回水长度约1km
105	高滩镇万兴村	2017年10月	强降雨引发,位于陕西省安康市紫阳县,堵塞竹瓦溪,堰塞湖湖水面积约600m <sup>2</sup>
106	莽窝镇洛哈村	2017年10月	堰塞坝位于四川省凉山州普格县,体积约25万m <sup>3</sup> ,堵塞河道长度约100m

## 2 触发因数及堰塞坝(湖)的规模

开展滑坡堰塞坝的触发因素分类与规模统计对了解我国滑坡堰塞坝的主要触发因素以及堰塞坝溃决相关灾害的分析预测有重要意义。例如,沟内滑坡堰塞坝的体积对于估算溃坝泥石流的固体物源总量有重要作用。近10年来,我国滑坡堰塞坝的触发因素及规模统计结果如下。

### 2.1 触发因数

从表1可看出,近10年来,我国发生的有记录的滑坡堰塞坝案例超过100座。其中,地震触发案例70个,占统计样本的66.7%,强降雨触发案例29个,占统计样本的26.9%,自然原因(指坡体失稳滑动形成堰塞坝时既未发生地震,也未出现强降雨,下同)形成案例6个,占统计样本的5.6%,人为原因导致案例仅1个,占统计样本的0.9%(图1)。由此可知,近10年来,我国超过90%的滑坡堰塞坝由

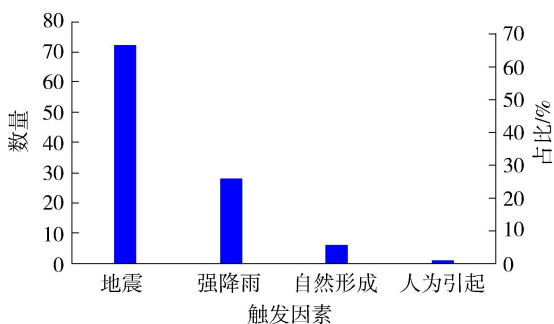


图1 近10年来中国滑坡堰塞坝的触发因素

地震和强降雨引发。

### 2.2 堰塞坝的规模和库容

滑坡堰塞坝形成之后,其危险性一般存在于两个方面:①如果堰塞坝堵塞大江大河,堰塞坝往往可以在短时间内形成体积庞大的堰塞湖,例如,唐家山滑坡堰塞坝形成后不到一个月时间,堰塞湖体积便达2.425亿m<sup>3</sup>[14],一旦发生溃坝,溃决洪水将给下游带来灾难性后果,因此,相关部门动用了一切可用手段对其进行泄洪处理。②如果滑坡堰塞坝形成于普通沟道内,这类堰塞坝往往成为泥石流地质灾害的重要物源,例如,2009年7月都江堰市虹口乡干沟滑坡堰塞坝溃决并参与形成泥石流,造成2人失踪,大量农田被埋[15];在同一时段,离干沟仅6km的银洞子沟滑坡堰塞坝也发生溃决,溃坝形成的泥石流不仅摧毁了汶川地震后沟内刚修筑的拦挡坝,而且冲毁了沟口附近的多座民房,大量松散物质在沟口淤积并阻断了当地公路和白沙河,造成了巨大的经济损失。

由于滑坡堰塞坝的形成一般具有突发性并且多数堰塞坝在形成后短时间内即发生破坏,因此,很难在短时间内对堰塞坝(湖)相关的数据进行准确快速记录。近10年来,我国有记录的滑坡堰塞坝案例中,堰塞坝体积和库容量统计结果分别如图2(a)(b)所示。

结合表1和图2可以看出,在所有统计的堰塞坝案例中,体积超过1亿m<sup>3</sup>的巨型堰塞坝1个,即大光包堰塞坝,体积在1000万~1亿m<sup>3</sup>之间的特大型堰塞坝7个,体积在500万~1000万m<sup>3</sup>之间

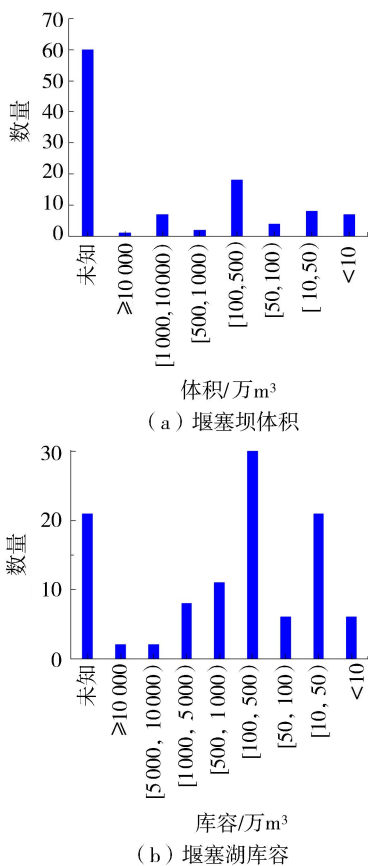


图2 近10年来中国滑坡堰塞坝(湖)的体积数据

的大型堰塞坝2个,体积在100万~500万 m<sup>3</sup> 之间的大型堰塞坝18个,体积在50万~100万 m<sup>3</sup> 之间的中型堰塞坝4个,体积在10万~50万 m<sup>3</sup> 之间的中型堰塞坝8个,体积小于10万 m<sup>3</sup> 的小型堰塞坝7个,其余的体积未知。库容大于1亿 m<sup>3</sup> 的巨型堰塞坝有2个,即唐家山堰塞坝和红石岩堰塞坝,库容在5000万~1亿 m<sup>3</sup> 的特大型堰塞坝2个,体积在1000万~5000万 m<sup>3</sup> 的特大型堰塞坝8个,库容在100万~1000万 m<sup>3</sup> 的大型堰塞坝41个,库容在10万~100万 m<sup>3</sup> 的中型堰塞坝27个,库容小于10万 m<sup>3</sup> 的小型堰塞坝6个。

### 3 时间分布与地域分布

开展滑坡堰塞坝的时间与地域分布统计对了解我国滑坡堰塞坝的主要发生地点、时间分布规律等具有重要作用。近10年来,我国滑坡堰塞坝的时间与地域分布统计结果如下。

#### 3.1 地域分布

从表1可看出,近10年来,四川省滑坡堰塞坝的数量达73个,占总量的67.6%,远远大于其他省份,数量仅次于四川的是台湾省,由于每年均遭受台风的影响,近10年来,台湾地区形成了11个滑坡堰塞坝,占总量的10.2%,其次是云南省、重庆市等省市(图3)。结合表1可知,近10年来,四川省的滑

坡堰塞坝主要由汶川8.0级地震引发,其中,比较著名的有唐家山堰塞坝<sup>[14-16]</sup>、大光包堰塞坝<sup>[11,17-18]</sup>、肖家桥堰塞坝<sup>[19-20]</sup>等。云南省境内的滑坡堰塞坝既有地震引发,也有强降雨引发,还有自然作用形成,其中最著名的是红石岩堰塞坝<sup>[21-22]</sup>。台湾省、贵州省、重庆市、湖北省、湖南省等地的滑坡堰塞坝主要由强降雨导致。

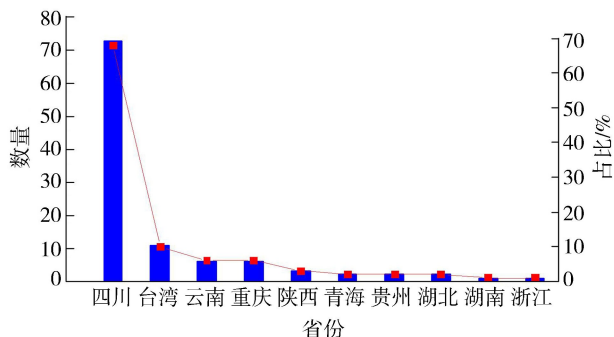


图3 近10年来中国滑坡堰塞坝的分布

按照传统的地理区划方法对近10年来中国滑坡堰塞坝的分布进行统计分析如图4所示。从图4中可以看出,近10年来,我国西南地区(四川省、重庆市、云南省、贵州省)的滑坡堰塞坝数量达87个,占总量的80.6%。加上西南地区以山地地貌为主,地质构造强烈,降水丰沛,地质灾害频发,因此,西南地区堪称我国滑坡堰塞坝相关地质灾害(滑坡、洪水、泥石流)的重灾区。仅次于西南地区的是华东地区(浙江省、台湾省),近10年来,该地区形成的滑坡堰塞坝有13个,占总量的12%。

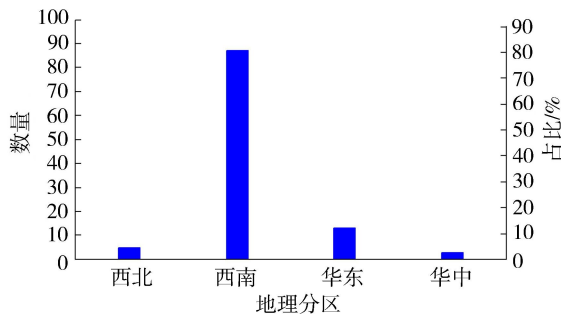


图4 近10年来中国滑坡堰塞坝的分布(按地理区划)

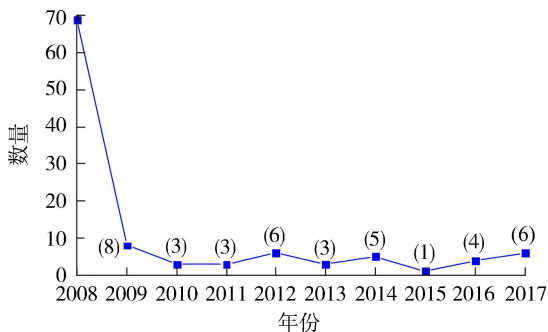


图5 近10年来中国滑坡堰塞坝的时间分布



### 3.2 时间分布

近 10 年来,我国滑坡堰塞坝的时间分布规律如图 5 所示。从图 5 中可以看出,2008 年滑坡堰塞坝的形成数量远远大于其他年份,主要因汶川 8.0 级强烈地震的影响。2009—2017 年间,我国滑坡堰塞坝的形成数量在正常范围内波动。由此也可以看出,大地震之后是我国滑坡堰塞坝相关地质灾害链防治工作的重要时期。对比图 3 和图 5 还可看出,近 10 年来,我国滑坡堰塞坝的行政区划分布规律与时间分布具有很高的一致性。

## 4 讨论

通过对近 10 年来我国有记录的滑坡堰塞坝数据的统计,分析了堰塞坝的触发因素、分布规律、堰塞坝(湖)的规模等。但是,有几个问题需要在此说明和讨论。

**a.** 首先是统计数量的问题。由于我国国土面积广袤,山地面积又占了国土面积的 70%,加上地震活动频繁,南方地区降雨丰沛,因此,近 10 年来,我国形成的滑坡堰塞坝数量肯定大于本研究的统计数据。但是,由于很多堰塞坝在形成后很短时间内即发生破坏,因此,这类即生即消型堰塞坝不在本研究的分析之列。

**b.** 数据的选择性问题。我国部分地区,比如西藏自治区,虽然该地区时常有地震、冰雪消融等作用,也经常形成滑坡堰塞坝。但是,由于地广人稀,该地区形成的很多堰塞坝没有明确的威胁对象,所以这类堰塞坝也不在统计分析之列。

**c.** 本研究的堰塞坝触发因素分析中,触发因素根据堰塞坝的主控因素分类,这类类似于建筑结构荷载分析中最不利荷载的计算,同时出现两种最不利荷载的情况极其少见。在本研究的分类方法中,同时发生强烈地震和强降雨的堰塞坝案例也极其少见,但真的出现这类堰塞坝时,建议先区分主控因素,然后再分类,如果无法区分主控因素,建议归为其他类型。

## 5 结论

**a.** 近 10 年来,中国滑坡堰塞坝的主要触发因素为地震和强降雨。其中,地震触发案例 72 个,占统计样本的 66.7%,强降雨触发案例 29 个,占统计样本的 26.9%,两种因素触发的堰塞坝案例占总量的 90% 以上。

**b.** 地域分布上,我国西南地区是滑坡堰塞坝相关灾害的重灾区,堰塞坝数量占总量的 80% 以上。其中,四川省由于接连遭受汶川地震、芦山地震的影

响,堰塞坝的数量远远大于同区的省和直辖市。

**c.** 时间分布上,除 2008 年之外,我国滑坡堰塞坝的形成数量基本上在正常范围内波动。

### 参考文献:

- [1] COSTA J E, SCHUSTER R L. The formation and failure of natural dams [J]. Geological Society of America Bulletin, 1988, 100(7): 1054-1068.
- [2] ADAMS J. Earthquake-dammed lakes in New Zealand [J]. Geology, 1981, 9(5): 215-219.
- [3] SWANSON F J, OYAGI N, TOMINAGA M. Landslide dams in Japan [C]//Landslide dams: processes, risk, and mitigation. [S. l.]: ASCE, 1986: 131-145.
- [4] 柴贺军, 刘汉超, 张倬元, 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. (CAI Hejun, LIU Hanchao, ZHANG Zhuoyuang, et al. Preliminary stability analysis of natural rockfield dam resulting from damming landslide[J]. Geological Science and Technology Information, 2001, 20(1): 77-81. (in Chinese))
- [5] DAI F C, LEE C F, DENG J H, et al. The 1786 earthquake-triggered landslide dam and subsequent dam-break flood on the Dadu River, Southwestern China[J]. Geomorphology, 2005, 65(3): 205-221.
- [6] 王兰生, 杨立铮, 李天斌, 等. 四川岷江叠溪较场地震滑坡及环境保护[J]. 地质灾害与环境保护, 2000, 11(3): 195-199. (WANG Lansheng, YANG Lizheng, LI Tianbin, et al. Evolution mechanism of Jiaochang earthquake landslide on Min River and its controlling[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2000, 11(3): 195-199. (in Chinese))
- [7] 任强, 陈生水, 钟启明, 等. 堰塞坝的形成机理与溃决风险[J]. 水利水电科技进展, 2011, 31(5): 30-34. (REN Qiang, CHEN Shengshui, ZHONG Qiming, et al. Formation mechanism and breaching failure risk of barrier dams[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011, 31(5): 30-34. (in Chinese))
- [8] 杜红娟, 田亚奇, 曹小洁. 水文应急监测系统的设计与实现[J]. 水资源保护, 2017, 33(增刊1): 13-15. (DU Hongjuan, TIAN Yaqi, CAO Xiaojie. Design and implementation of hydrological emergency monitoring system [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(Sup1): 13-15. (in Chinese))
- [9] 殷跃平. 汶川八级地震地质灾害研究[J]. 工程地质学报, 2008, 16(4): 433-444. (YIN Yueping. Researches on the geo-hazards triggered by Wenchuan Earthquake, Sichuan [J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(4): 433-444. (in Chinese))
- [10] 童立强. “5·12”汶川大地震极重灾区地震堰塞湖应急遥感调查[J]. 国土资源遥感, 2008(3): 61-63.

- (TONG Liqiang. Emergency remote sensing investigation of barrier lakes at the quake center area caused by “5·12” Wenchuan Strong Earthquake[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2008(3): 61-63. (in Chinese))
- [11] 黄润秋, 裴向军, 李天斌. 汶川 8.0 级地震引发触发大光包巨型滑坡基本特征及形成机理分析[J]. 工程地质学报, 2008, 16(6): 730-741. (HUANG Runqiu, PEI Xiangjun, LI Tianbin. Basic characteristics and formation mechanism of the largest scale landslide at Daguangbao occurred during the Wenchuan Earthquake [J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(6): 730-741. (in Chinese))
- [12] 李丽, 余斌, 张健楠, 等. 基于震后堰塞湖演化的泥石流危险性分析: 以汶川县茶园沟堰塞湖演化为例[J]. 桂林理工大学学报, 2011, 31(3): 357-363. (LI Li, YU Bin, ZHANG Jiannan, et al. Risk analysis based on the evolution of earthquake dammed debris flow: a case from the evolution of Barrier Lake in Chayuan Gully, Wenchuan [J]. Journal of Guilin University of Technology, 2011, 31(3): 357-363. (in Chinese))
- [13] 陈昆廷, 臧运忠, 郭玉树, 等. 莫拉克台风引致堰塞湖之案例分析[J]. 中华防灾学刊, 2010, 2(1): 43-50. (CHEN Kunting, ZANG Yunzhong, GUO Yushu, et al. Case analysis of landslide dam formation by Typhoon Morakot[J]. China Disaster Prevention Journal, 2010, 2(1): 43-50. (in Chinese))
- [14] 胡卸文, 黄润秋, 施裕兵, 等. 唐家山滑坡堵江机制及堰塞坝溃坝模式分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(1): 181-189. (HU Xiewen, HUANG Runqiu, SHI Yubing, et al. Analysis of blocking river mechanism of Tangjiashan landslide and dam-breaking mode of its barrier dam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(1): 181-189. (In Chinese))
- [15] 张健楠, 马煜, 张惠惠, 等. 四川省都江堰市大干沟地震泥石流[J]. 山地学报, 2010, 28(5): 623-627. (ZHANG Jiannan, MA Yu, ZHANG Huihui, et al. Study on earthquake debris flow in Dagan Gully, Dujiangyan, Sichuan [J]. Journal of Mountain Science, 2010, 28(5): 623-627. (in Chinese))
- [16] 李守定, 李晓, 张军, 等. 唐家山滑坡成因机制与堰塞坝整体稳定性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增刊1): 2908-2915. (LI Shoudin, LI Xiao, ZHANG Jun, et al. Study of geological origin mechanism of Tangjiashan landslide and entire stability of landslide dam [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(Sup1): 2908-2915. (in Chinese))
- [17] 殷跃平, 成余粮, 王军, 等. 汶川 8.0 级地震引发触发大光包巨型滑坡遥感研究[J]. 工程地质学报, 2011, 19(5): 674-684. (YIN Yueping, CHENG Yuliang, WANG Jun, et al. Remote sensing research on Daguangbao gigantic rock-slide triggered by Wenchuan Earthquake [J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19(5): 674-684. (in Chinese))
- [18] 李天涛, 裴向军, 黄润秋. 强震触发大光包巨型滑坡运动特征研究[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(2): 116-121. (LI Tiantao, PEI Xiangjun, HUANG Runqiu. A study of motion features of the Daguangbao large-scale landslide induced by the Wenchuan Earthquake [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, 41(2): 116-121. (in Chinese))
- [19] 何秉顺, 丁留谦, 王玉杰, 等. 四川安县肖家桥堰塞湖稳定性初步评估[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增刊2): 3626-3631. (HE Bingshun, DING Liuqian, WANG Yujie, et al. Preliminary evaluation of stability of Xiaojiaqiao Dammed Lake in Anxian County, Sichuan Province [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(Sup2): 3626-3631. (in Chinese))
- [20] 徐文杰, 陈祖煜, 何秉顺, 等. 肖家桥滑坡堵江机制及灾害链效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(5): 933-942. (XU Wenjie, CHEN Zuyu, HE Bingshun, et al. Research on river-blocking mechanism of Xiaojiaqiao landslide and disasters of chain effects [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(5): 933-942. (in Chinese))
- [21] SHI Z M, XIONG X, PENG M, et al. Risk assessment and mitigation for the Hongshiyuan landslide dam triggered by the 2014 Ludian Earthquake in Yunnan, China [J]. Landslides, 2017, 14(1): 269-285.
- [22] 刘建康, 程尊兰, 余涛. 云南鲁甸红石岩堰塞湖溃坝风险及其影响[J]. 山地学报, 2016, 34(2): 208-215. (LIU Jiankang, CHENG Zunlan, SHE Tao. Assessment of dam failure and secondary hazards for Hongshiyuan Dammed Lake caused by Ludian Earthquake in Niulanjiang River [J]. Journal of Mountain Science, 2016, 34(2): 208-215. (in Chinese))

(收稿日期:2018-09-28 编辑:郑孝宇)

