

川藏公路南线滑坡泥石流坝溃决影响因素分析

郭国和¹ 吴国雄² 程尊兰³

(1. 同济大学 交通运输工程学院, 上海 201804; 2. 重庆交通大学 土木建筑学院, 重庆 400074;
3. 中国科学院 成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041)

摘要:川藏公路南线(西藏境内)独特而又脆弱的自然环境导致多次大型滑坡泥石流堵塞主河事件,堰塞湖蓄水溃决造成惨重的危害。在对然乌至培龙段近几十年曾经发生过的堵塞坝事件进行野外考察的基础上,运用室内试验和理论分析相结合的方法对影响坝体溃决的主要因素进行研究,认为泥石流坝溃决是主河水流与沟道特征、坝体几何形态以及坝体物质结构、坝体与主河夹角等多种因素共同作用的结果,其中关键因素为坝体高度和下游坡面坡度,影响着溃坝时机和洪水规模。

关键词:川藏公路南线;滑坡泥石流坝;溃决;影响因素

中图分类号:U416.1

文献标志码:A

文章编号:1674-0696(2010)02-240-04

Analysis of Main Factors Influencing Landslide and Debris-flow Dam's Break along South Section of Sichuan-Tibet Highway

GUO Guo-he¹, WU Guo-xiong², CHENG Zun-lan³

(1. School of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China;

2. School of Civil Engineering & Architecture, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

3. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: The natural environment along south section of Sichuan-Tibet highway (in Tibet) is unique and fragile, which has led to many large scales of landslides and debris-flows blocking the main rivers, and caused severe catastrophe by outburst floods. Though field investigation of several typical dams along the section of Ranwu town to Peilong town in recent decades, main factors impacting the dam break had been identified through the methods of laboratory test and theoretical analysis. The results showed that the dam break is influenced by various factors such as the runoff and the channel characteristics of the main river, properties of materials, geometry and structural characteristics of the blocking dam and the angle between the dam and the main river, of which the downstream slope and the height of the dam are key influencing factors, affecting the break timing and the scale of floods.

Key words: South section of Sichuan-Tibet highway; landslide and debris-flow dam; break; influencing factors

滑坡泥石流坝是滑坡泥石流从主河岸坡或支沟冲进并停淤在主河中形成的,其溃决是一个很复杂的自然现象。国内有关泥石流堵塞坝及其危害的介绍始于20世纪60年代初,首先在研究川藏公路沿线古乡沟泥石流时提出了这一问题。柴贺军、晏鄂川等^[1-2]对滑坡坝稳定性、溃坝洪水及环境效应进行了大量研究。徐道明、陈储军^[3-4]对冰川终碛湖溃决条件和溃决洪水及灾害进行了研究。匡尚富^[5]利用动量原理分析了泥石流堵江的条件。吴积善、程尊兰、朱平等^[6-7]对西藏东南部泥石流堵塞坝进行了系统野外调查和机理研究。以前学者对

各种天然坝体有一定研究,对滑坡坝的研究也比较多,但对溃坝过程及其影响因素还较少涉及,特别是对泥石流坝溃决研究更少。笔者以典型灾害点为依据,对影响滑坡泥石流坝溃决主要因素的作用机理进行分析,为进一步研究溃坝过程和洪水预测提供参考。

1 堵塞坝形成条件和主要特征值

川藏公路南线(西藏境内)地质地貌、气候、水文与构造特征独特而又脆弱,为地质灾害的形成提供了充沛的水源、适宜的沟床纵坡和大量松散固体物质等条件,导致本区滑坡泥石流活动强烈,规模巨

收稿日期:2009-10-14;修订日期:2009-11-19

基金项目:国家自然科学基金项目(40771024);交通运输部西部交通建设基金项目(200631879284)

作者简介:郭国和(1981-),男,河南南阳人,博士研究生,从事道路工程及灾害治理技术的学习和研究。E-mail: ggh401@126.com。

大,多次堵河形成高大的堵塞坝,堰塞湖蓄水溃决造成惨重的危害。虽然该区形成堵塞坝的次数相对较多,但由于堰塞湖溃决具有突发性和灾难性,且当地交通与通信条件不发达,科研力量薄弱,勘察观测条件局限,现场考察代价太高,所采集到的第一手资料

很少。通过对川藏公路南线实地考察,根据目击者的介绍、堵塞坝形成后的现场调查和有关文献,统计了川藏公路南线有代表性的 5 次特大型或大型滑坡泥石流堵塞坝形成条件和主要特征值(表 1)。

表 1 典型滑坡泥石流坝形成条件和主要特征值^[6]

Tab.1 Conditions and main factors for the formation of typical landslide and debris-flow dams								
沟道名称	入汇主河	流域面积/km ²	沟长/km	沟床比降/‰	年均降水量/mm	年均气温/℃	容重/(t·m ⁻³)	主要激发因素
培龙沟	帕隆藏布	86.1	18.8	132	1 360.5	13.1	2.0~2.2	冰雪崩
冬茹弄巴	帕隆藏布	23.7	10.0	214	750.0	7.0	2.3	冰雪融水、降雨
米堆沟	帕隆藏布	117.5	29.8	63.5	884.5	8.6	1.7	冰湖溃决
扎木弄巴	易贡藏布	31.8	9.7	343	1 086.1	11.9	约 2.0~2.3	滑坡、雪崩
主河水流特征值		支沟与主河交角及汇流处地形			局部堵江和堵塞坝特征值			
沟道名称	流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	平均流速/ (m·s ⁻¹)	交角	汇流处主河特征		坝体高度		沿主河长/ m
				宽度/m	比降/‰	本次高/m	累积高/m	
培龙沟	2 298	5.09	偏主河下游 41°	654	5.13	(2~3)	(2~3)	220
	1 191	4.2	接近垂直,偏上	654	5.12	11.3	14.3	822
	2 104	4.86	基本垂直	654	5.08	15	29.3	1135
冬茹弄巴	232	2.65	基本垂直	64	13.5	13.4	13.4	410
米堆沟	194	2.56	接近垂直,偏下	91	21.5	(7~9)	(7~9)	-1520
扎木弄巴	1 100	4.56	基本垂直	3 350	7.69	80	80	3 200
	720	3.68	基本垂直	3 350	16.7	50	130	1 500
								堵河时间
								1983 年 7 月 29 日
								1984 年 8 月 23 日
								1985 年 6 月 20 日
								1975 年 6 月 12 日
								1988 年 7 月 14 日
								1902 年 7—8 月
								2000 年 4 月 9 日

注:1. 括号内为局部堵江特征值;2. 本表部分数据系估算。

从表 1 中可以看出,就所研究的 4 条沟道而言,其特征值(如流域面积、沟长、沟床比降)差异巨大,年降雨量在 750~1 360 mm 之间,年均气温基本在 7~13℃,堵塞坝体容重大致在 2.0~2.3 t/m³ 地,支沟与主河基本垂直,汇流处主河宽度有着显著的差别。这些沟道数据大部分是毫无规律可言的,但均形成了不同规模的堵塞坝。

2 典型滑坡泥石流堵河事例

2.1 培龙沟泥石流坝

培龙沟位于念青唐古拉山脉东南缘,帕隆藏布下游自西转南拐弯处的右岸(图 1)。地理坐标为 30°02′00″—30°05′30″N,94°56′45″—94°00′45″E。沟口海拔高程 2 000 m,为川藏公路西藏境内海拔最低点。该沟流域形态呈哑铃形,源头最高峰海拔 5 828 m,山坡平均坡度达 32°。在海拔 2 850 m 以上的圈椅形围谷被现代海洋性冰川和常年积雪所覆盖,山坡及脊峰基岩裸露、岩壁陡峭。下游沟谷形态呈较宽顺畅的“U”型谷地。



图 1 培龙沟泥石流堵河点
Fig.1 Location of blockage from Peilong gully

1983—1990 年培龙沟发生了 19 次泥石流^[6-7],其中有 3 次规模巨大,1984 年和 1985 年的特大泥石流均形成堵塞坝,回水淹埋上游 6 km 的川藏公路和 79 辆装有货物的汽车;溃坝后,涌波又冲毁了下游 2 km 川藏公路和沿程的 5 座桥梁,至今这上下游共 8 km 的路段成为川藏公路著名的“盲肠”,经常发生断道和翻车事故。

2.2 冬茹弄巴泥石流坝

冬茹弄巴位于帕隆藏布江上游左岸,地理坐标为 29°36′59″—29°40′45″N,96°22′05″—96°26′30″E。该沟位于东西走向的拉萨—波密褶皱带东端,岩性主要为燕山晚期的花岗岩,内部节理发育。流域内地形崎岖,高差很大,峡谷深切,一般山坡坡度在 33°以上,最大在 53°以上。流域特征值见表 1。该段主河流量不大,再加上沟道很窄,冬茹弄巴泥石流多次堵塞帕隆藏布江(图 2),最近的一次堵江是 1975 年 6 月 12 日^[6-7],但相关资料并不多。



图 2 冬茹弄巴堵塞坝残体
Fig.2 Residual blockage from Dongru gully

2.3 米堆沟泥石流坝

米堆沟位于帕隆藏布江中偏上游左岸,地理坐标为 $29^{\circ}23'18''$ — $29^{\circ}32'10''$ N, $96^{\circ}27'45''$ — $96^{\circ}35'05''$ E。流域特征值见表1。1988年7月14日冰舌前缘约 $3.6 \times 10^5 \text{ m}^3$ 崩入冰川末端光谢错冰湖(图3),造成冰碛堤局部溃决,强劲的溃决洪水,冲刷沿程的松散固体物质,逐渐演变为容重为 1.70 t/m^3 的稀性泥石流^[6-7]。泥石流只局部堵塞主河,形成了高7m左右的潜坝,没有形成堵塞坝。

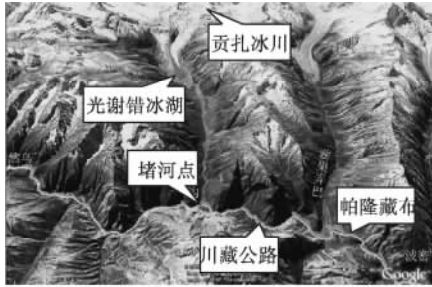


图3 米堆沟堵河点

Fig. 3 Location of blockage from Midui gully

2.4 扎木弄巴滑坡坝

该沟于1902年和2000年2次爆发特大滑坡,堵断主河易贡藏布,形成了堵塞坝(图4)。尤其2000年堵塞坝累积高130m,上游回水长30km,淹没了这范围内的一切村寨和农田^[6]。62d后堵塞坝溃决,湖水最深处达110余m,高而凶猛的涌波,沿易贡藏布进入帕隆藏布,汇入雅鲁藏布江,直泻我国的墨脱和邻国印度,荡净了两岸耕地和建筑物,在我国境内损失达2.8亿元人民币。

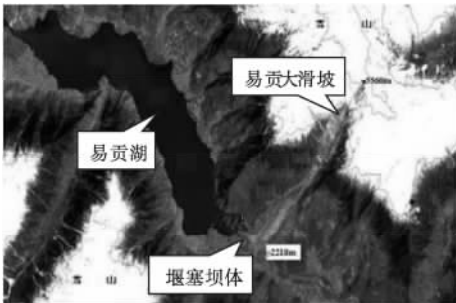


图4 易贡湖形成时的遥感图片

Fig. 4 Remote sensing image of Yigong dammed lake

3 堵塞坝溃决影响因素分析

滑坡泥石流溃决是主河水流与沟道特征、坝体几何形态以及坝体物质结构等多种因素共同作用的结果。具体来说,包括河道、堵塞坝、坝体与主河的夹角等各方的参数,如河岸崩滑情况、河道顺直程度、水位上涨速率、堆积体规模、坝体力学指标、化学成分、巨砾含量与分布、含水量、密实度、空隙率、坝体冲蚀速率、坝体变形、管涌渗流以及流域质地貌特征、流域面积、自然环境条件(气温、降雨等)、冰雪

崩、冰湖溃决或大规模滑坡(含崩塌)、地震活动等。笔者结合现场调研成果,重点对影响堵塞坝溃决的以下因素进行分析。

3.1 河道特征

3.1.1 主河流量

坝上游水位的上涨速度直接影响溢坝水量和溢坝后冲刷速度。在河道和坝体确定的情况下,主河流量越大,湖水位就上涨越快,越容易溢坝。上游水量越大,溢坝水流流速和流量也越大,可以直接控制坝体的溃坝过程。

3.1.2 河道纵比降

河道纵比降是河流动力学的重要参数,库区水溢坝后,水流在坝体下游坡面上冲刷。钱宁提到平衡比降的概念,即当河床纵比降大于平衡比降时冲刷过程继续,直到小于平衡比降时冲刷停止^[8]。他采用 Meger-peter 的推移质公式推导,冲刷平衡比降可以表示为:

$$J = \frac{0.058 \left(\frac{n}{D_{90}^{1/6}} \right)^{3/2} D}{h} \quad (1)$$

式中: D 为床沙平均粒径; D_{90} 为床沙中90%的重量较之为小的粒径; n 为床面曼宁系数; h 为水深。

另外, J 对最大冲刷粒径也有重要作用, Harri-son^[8]的水模型试验中:

$$D = \frac{27}{c} \times \frac{r}{r_s - r} R_b' J \quad (2)$$

式中: c 是反映大小颗粒间相互作用的参数; r_s 和 r 为泥沙和水的容重; R_b' 和 J 分别是洪水泥沙阻力水力半径与比降,可见纵比降对溃决过程和溃坝规模的影响力巨大。

3.1.3 河宽

虽然堰塞湖在开始溃决时,河流上游来水量是控制坝体能否溃决以及溃决时机的因素,但是一旦溃决发生,影响溃决洪水流量的决定因素就不是上游来水量了,堵塞坝溃决所形成溃决洪水流量往往是河道流量的数百上千倍,这一点可以从几个堵塞坝溃决事例中清楚地看到。通过分析一些水利工程中土石坝溃决的研究成果发现,堵塞坝溃决的洪峰流量与上游库区水的势能有密切关系。例如,1988年 Costa 等^[9]从能量观点出发,结合12个具体实例建立了如下关系式^[9]:

$$Q = 0.063 PE^{0.42} \quad (3)$$

式中: Q 为溃坝洪水的流量; PE 为堰塞湖水潜在势能。因此,决定堵塞坝形成的库容的河道参数——河宽和河床比降同样成为控制溃决过程和溃决流量的重要因素。

另外,从现场调查发现,几乎所有影响较大的滑坡泥石流堵河事件,其上游河道通常较宽。这就说明堵塞坝的形成与河宽也存在相当的关系。在主河流量一定的情况下,主河道宽越宽,越容易形成堵塞坝。其原因在于,大的河宽使滑坡泥石流冲入主河后,铺展面大,流速衰减较快,库区水位上涨缓慢,需要相对更长的时间才能漫顶溢坝,这段时间堆积体可能由于脱水和重力堆积作用而强度提高,能够稳定下来。当然,如果未能稳定下来,堰塞湖蓄积大量水体,溃坝洪水会更大,可能造成的灾害将更加严重。

3.1.4 其它河道因素

同样的道理,由于河道边岸的坡度对库容大小有贡献,所以也对溃坝洪水过程有影响。但是根据典型事例对比分析认为,其影响力远不如前几个因素重要。

3.2 堵塞坝坝体特征

3.2.1 坝体几何形态

由于堵塞坝是突发性形成的,其横断面一般不规则,而且坝体形成后往往很快溃决,因此很难对坝体断面尺寸统一化。泥石流坝溃决一般有2种方式:①坝顶溢流后坝体下游坡面被冲刷,逐渐溯源拉通坝顶,产生溃口进而溃决;②堵塞坝过流后,或者没有过流时,由于巨大的渗透水压力和坝体下游坡面太陡,容易使堵塞坝失去稳定性,坝体下游坡面上泥石流物质再次启动而溃坝。可见,堵塞坝下游坡面的坡角是控制坝体稳定性的最重要结构因素。而上游坡角与河道上游流速以及坝体物质性质有关,一般是稍大于下游坡角,对溃坝过程影响不如下游坡角大。

坝体高度是堵塞坝最主要的形态因素,也是控制溃坝洪水大小的关键要素。这一点,在徐道明和陈储军^[3-4]研究冰川终碛湖溃决时亦得到认可。Costa公式中库区水的势能主要靠坝体高度控制,而且相对于河宽对库区水的势能的影响,它还可以反映出平均势能的概念。即,相同库区水势能,如果堵塞坝较高,则平均每立方米水的势能就较高,在溃坝后转变为洪水的动能和流速就越大,冲刷能力越强,溃口发育快,在达到冲刷平衡比降之前库区水下泄需要相对较短的时间,洪峰自然增大。

由于滑坡泥石流的堆积特性,使堆积坝顶存在一定倾角,而倾角的存在影响到坝体溃口出现的位置和溃决过程。坝顶倾角的形成与物质的流变性以及滑坡泥石流的规模都有关系,不同的坝体其坝顶倾角往往相差很大,而且坝体形成后一般很快就被水流冲刷,所以很少有坝顶的详细记录,难以把握堵

塞坝坝顶的特征。

3.2.2 坝体物质的密度和颗粒级配

泥石流坝溃决后,溃决过程结束可以是2种情况:①堵塞坝溃决到底,同时库区中的水完全排出,河道流量恢复正常;②堵塞坝溃决后,溃决洪水在坝体宽阔平缓的下游坡面上冲刷,最终达到冲刷平衡。在公式(1)中,参数 D 起的作用是很大的,但是该公式中使用的是平均粒径,而实际坝体溃决与滑坡泥石流物质中的巨大石块数量和分布情况有很大关系。这是因为,通常溃坝洪水流量较大,只有特别大的石块才能在这样大的洪水中稳定下来。例如,所考察的拉松错湖,就是数百年前泥石流堵江后坝体经过冲刷最终稳定下来,在湖的出口处全是由直径1 m左右的巨石组成的急滩,这也证明了堵塞坝物质结构对坝体稳定性的重要作用。

坝体物质密度和颗粒级配参数集中反映了坝体的物理力学性质(主要为黏聚力和内摩擦角等抗剪强度指标)。由于坝体颗粒级配分布范围大,粒径从十几米的巨石到非常细腻的黏土都有,而且堆积无分选性,因此,堆积体密度的概念意义并不大,而级配则直接影响到其抗冲刷性、坝体稳定性以及抵抗水流渗透和管涌的能力。

3.3 坝体与主河夹角

在前人研究泥石流堵河判别条件时,支沟与主河的夹角均被作为一个参数^[5-6]。从实例分析也不难发现夹角对堵塞坝形成与溃决的重要贡献,如果该夹角很小,泥石流流体将几乎顺河而下,难以堵塞河道。由于支沟与主河夹角的存在,在主河水流的冲刷推移作用下,泥石流坝与主河也必然存在一定夹角。它影响着坝体受力和坝前壅水水位变化,从而影响溃坝时机和溃坝进程。此夹角越大,同条件下坝体轴向长度越小,稳定性相对较好,越不易溃坝,但溃坝过程则会较快。对于滑坡坝而言,堵塞坝与主河夹角的影响也类似于泥石流坝。

4 结 语

1) 影响堵塞坝溃决的主要因素为河道上游来水量、河宽、河床比降、坝体高度、坝体下游坡面倾角、坝体物质组成,其中以坝体高度和坝体下游坡面坡度最为关键。由于溃坝资料匮乏和影响因素的交织性,未能对这些影响因素进行量化评价。

2) 通过对滑坡泥石流坝溃决的研究,启示我们不能忽视小样本事件,应重视现场原始数据的采集和积累,特别应对公路沿线地质水毁灾害点进行系统研究,多技术融合,野外调研、室内试验、理论分析相配合,深入研究灾害机理与防治技术。

(下转第268页)

$m_1 + 1, N_1^2 = d_{1, 2} = 5$ (转 4); $k = 2 \geq K$ (转 6)。
得到路径: $N_3^2 = 1, N_2^2 = 2, N_1^2 = 4, N_0^2 = 7$ 。
同时得到其它两条路径:
 $N_3^3 = 1, N_2^3 = 2, N_1^3 = 4, N_0^3 = 7$;

$N_3^4 = 1, N_2^4 = 2, N_1^4 = 4, N_0^4 = 7$ 。
得到所有最短换乘路径之后,按照 2.2 的站点搜索法,得到各出行方案及广义费用如表 4,因此得到最短路径为方案 2。

表 4 各方案线路、站点及费用
Tab.4 Line station, fare of programs

方案 编号	方案路径							时间/min	票价/元	广义费用/元
	站点	线路	站点	线路	站点	线路	站点			
1	1	L1	2	L3	4	L9	7	535	95	2 150
2	1	L1	2	L3	4	L11	7	525	95	2 140
3	1	L10	2	L3	4	L9	7	1 860	90	3 390
4	1	L10	2	L3	4	L11	7	1 850	90	3 380
5	1	L1	2	L2	5	L13	7	485	115	2 440
6	1	L1	2	L2	5	L6	7	1 775	90	3 305
7	1	L10	2	L2	5	L13	7	370	110	2 240
8	1	L10	2	L2	5	L6	7	1 660	85	3 105
9	1	L8	3	L12	5	L13	7	590	105	2 375
10	1	L8	3	L12	5	L6	7	1 880	80	3 240
11	1	L8	3	L4	5	L13	7	590	110	2 460
12	1	L8	3	L4	5	L6	7	1 880	85	3 325
13	1	L8	3	L5	6	L7	7	460	100	2 160

3 结 论

在综合考虑换乘、时间、票价等因素的基础上,提出一种基于 Floyd 算法的最小换乘矩阵及对应路径的算法,并利用最小换乘路径进行站线搜索与费用计算,从而获取城际交通的最短路。该算法不仅可以准确地捕捉最小换乘路径,简化了路径搜索的过程,同时考虑了城际交通所特有的换乘时间因素,增强了算法的适用性,城际交通换乘的研究具有重要参考价值和借鉴意义。

参考文献:

[1] 牛学勤,王炜. 基于最短路搜索的多路径公交客流分配模型研究[J]. 东南大学学报:自然科学版, 2002, 32(6):917-919.
[2] 徐业昌,李树详. 基于地理信息系统的最短路径搜索算法

[J]. 中国图像图形学报, 1998, 3(1):39-43.

[3] 杨新苗,王炜,马文腾. 基于 GIS 的公交乘客出行路径选择模型[J]. 东南大学学报:自然科学版, 2000, 30(6):87-91.
[4] 苏啸,曾子维. 基于关联的城市公交换乘查询算法[J]. 计算机工程与设计, 2006, 27(3):519-521.
[5] 张林峰,范炳全,吕智林. 公交网络换乘矩阵的分析与算法[J]. 系统工程, 2003, 21(6):92-96.
[6] 王莉,李文权. 公共交通系统最佳路径算法[J]. 东南大学学报:自然科学版, 2004, 32(4):264-267.
[7] 翁敏,毋河海,杜清运,等. 基于公交网络模型的最优出行路径选择的研究[J]. 武汉大学学报:信息科学版, 2004, 29(6):500-503.
[8] 廖楚江,蔡忠亮,杜清运,等. 基于最少换乘的公交最优路径算法的设计与实现[J]. 武汉大学学报:信息科学版, 2006, 31(10):904-907.

(上接第 243 页)

3) 研究结果可以为进一步的堵塞坝溃决模型试验和数值模拟提供基本资料,对野外堵塞坝溃决洪水预测的参数采集、对河道沿线川藏公路以及农田水利设施防灾减灾具有一定的指导意义。

参考文献:

[1] 柴贺军,刘汉超,张俤元. 大型滑坡堵江事件及其环境效应研究综述[J]. 地质科技情报, 2000, 19(2):87-90.
[2] 晏鄂川,郑万模,唐辉明,等. 滑坡堵江坝溃决洪水及其演进的理论分析[J]. 水文地质工程地质, 2001(6):14-22.
[3] 徐道明,冯清华. 西藏喜马拉雅山区危险冰湖及其溃决特征[J]. 地理学报, 1989, 44(3):343-352.

[4] 陈储军,刘明,张帆. 西藏年楚河冰川终碛湖溃决条件及洪水估算[J]. 冰川冻土, 1996, 18(4):347-352.
[5] 匡尚富. 汇流部泥石流的特性和淤积过程的研究[J]. 泥沙研究, 1995(1):1-15.
[6] 吴积善,程尊兰,耿学勇. 西藏东南部泥石流堵塞坝的形成机理[J]. 山地学报, 2005, 23(4):399-405.
[7] 罗德富,毛济周. 川藏公路南线(西藏境内)山地灾害及防治对策[M]. 北京:科学出版社, 1995.
[8] 钱宁. 河床演变学[M]. 北京:科学出版社, 1987.
[9] Costa J E, Schuster R L. The formation and failure of natural dams[J]. Geological Society of America Bulletin, 1988(100):1054-1068.