

文章编号: 1008-2786-(2018)1-053-11

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000301

岷江上游叠溪溃坝堆积体的沉积特征 与历史溃决洪峰流量

马俊学¹, 陈 剑^{1*}, 崔之久²

(1. 中国地质大学(北京) 工程技术学院, 北京 100083; 2. 北京大学 城市与环境学院, 北京 100871)

摘 要: 岷江上游叠溪河谷段在地质历史时期发生了一次大型岩质古地震山体滑坡事件, 并堵塞岷江形成一个大型古堰塞湖。堰塞湖形成后在晚更新世晚期(约 27 ka BP)发生了溃决, 并在其下游形成长约 5 km 的天然溃坝堆积体。基于野外地质调查, 采用测量统计、取样分析及理论计算等方法, 研究了叠溪古堰塞湖溃坝堆积体的沉积特征, 并重建了溃决洪水的最大洪峰流量。叠溪溃坝堆积体主要由砾石、卵石、砂及少量粉/黏土组成, 剖面中发育叠瓦、孔洞、块状、杂基、支撑—叠置及韵律互层等构造特征。从上游至下游, 溃坝堆积体的出露厚度逐渐变薄, 砾石碎屑成分表现出由粗变细的变化趋势。采用水力学理论方法重建了溃决洪水的最大洪峰流量, 溃口处洪水平均流速和最大洪峰流量分别为 17.23 m/s 和 49821.28 m³/s, 如此大规模的堰塞湖溃决洪水在世界范围内也是十分罕见的。叠溪溃坝堆积体的沉积特征与溃决洪峰流量重建, 对于了解滑坡堰塞湖坝体溃决过程、溃决洪水演进机制以及山区地质环境演化规律等方面具有重要意义。

关键词: 叠溪古堰塞湖 溃坝堆积体 沉积特征 溃决洪水 洪峰流量 岷江上游

中图分类号: P642

文献标志码: A

滑坡(崩塌)、泥石流、冰川/冰堆积及火山喷发等地质灾害常常引发堰塞事件, 而形成堰塞湖^[1-5]。地震活动中最常见的次生灾害类型是引发滑坡, 而在山区江河两岸的崩滑灾害又会堵江形成滑坡型堰塞湖。在我国的西南山区, 如金沙江及岷江上游等地区, 断裂构造十分发育, 地震活动强烈, 大型地质灾害(崩塌、滑坡及泥石流等)频发, 分布许多堰塞湖^[2-3]。

滑坡灾害的发生往往是一瞬间的事, 因此滑坡堰塞湖的形成是滑坡体物质快速堆积的结果, 其结构松散, 蓄水后易发生坝体溃决, 并在下游侧形成“溃坝堆积”。在国内, “溃坝堆积”这一说法最早是

由崔之久和陈剑等学者提出的^[6-7], 并开展了一些研究工作, 指出溃坝堆积是一种特殊类型的混杂堆积, 与其他类型沉积物完全不同。这类沉积物在世界各地广泛分布, 以冰川/冰堰塞湖溃坝堆积为主, 国外许多学者对其进行了研究^[8-11]。目前, 国内关于混杂堆积的研究取得了一些可喜的研究成果^[4-7, 12-15]。已有的研究成果显示, 陈剑等学者在金沙江上游雪龙囊古滑坡堰塞湖发现了一处溃坝堆积, 并开展了较为深入地研究, 提出一种堰塞湖溃坝堆积体判别新思路(“三位一体”)^[7]。

通过野外调查, 在岷江上游的四川省茂县叠溪地区首次发现了一处大型天然混杂堆积体, 沿岷江

收稿日期 (Received date): 2017-05-04; **改回日期** (Accepted date): 2018-2-8

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金面上项目(41571012); 国家自然科学基金重点项目(41230743); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2652015060)。[National Natural Science Foundation of China—General Program (41571012); National Natural Science Foundation of China—Key Program (41230743); Fundamental Research Funds for the Central Universities (2652015060)]

作者简介 (Biography): 马俊学(1987-), 男, 山东德州人, 博士研究生, 助理工程师, 主要研究方向: 工程地质与地质灾害防治。[Ma Junxue (1987-), male, born in Dezhou, Shandong province, Ph. D. candidate, research on engineering geology and geohazard prevention] E-mail: sdnj2mxx@163.com

*** 通讯作者** (Corresponding author): 陈剑(1975-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 灾害地貌学、工程地质和地质灾害防治。[Chen Jian (1975-), male, Ph. D., associate professor, specialized in disastrous geomorphology, engineering geology and geohazard prevention] E-mail: jianchen@cugb.edu.cn

两岸分布,长度达 5 km。经过大量调查研究,判定其为叠溪古堰塞湖溃决后在其下游形成的溃坝堆积体,其规模是非常罕见的。在叠溪堰塞坝体上游 30 km 范围内发育了许多厚层古湖相沉积物,国内很多学者对其进行了研究^[16-20],然而,这些研究工作都未曾涉及古堰塞湖下游的溃坝堆积体,此次叠溪大型古堰塞湖下游的溃坝堆积体的发现尚属首次。作为叠溪古堰塞湖的物质记录载体,溃坝堆积蕴含了丰富的地貌学和沉积学等地质地貌信息,其沉积特征和溃决古洪水信息的提取,对于研究古滑坡堰塞湖坝体溃决过程、溃决洪水动力学机制以及重建该地区的古环境(地震活动或气候变化)具有重要的理论意义。

1 研究区地质背景

研究区所在区域位于青藏高原东缘,是青藏高原向四川盆地过渡的川西高原地带(图 1),垂直落差较大(>2000 m),处在特提斯-喜马拉雅构造带上,有著名的 SN 地震带,发育两条活动断裂带——岷江断裂和虎牙断裂,区域构造复杂且地震多发。岷江上游叠溪段(31.5~32.5°N,103.5~104.5°E)河流两岸斜坡高陡,河谷下切显著,多呈“U”形,地势起伏大。该段河谷宽度由几十米至数百米,变化较大。

研究区出露的基岩岩性主要为变质灰岩、千枚岩、砂岩、大理岩及片/板岩。研究区年均降雨量 420 mm 左右,7、8 月份最多,占全年降雨量的 50% 以上,属亚热带高原大陆性季风气候。该地区常年多风,地表蒸发量大,多年平均蒸发量为 1375 mm,干旱现象比较严重,为干热型河谷。

2 叠溪古堰塞湖溃坝堆积体的发现及其沉积特征

综合目前已有研究成果,依据堰塞湖溃坝堆积“三位一体”的发育特征^[7],通过野外调查研究,已查明叠溪古堰塞湖湖相沉积、堰塞坝体和溃坝堆积体的分布特征、沉积特征及发育规律,如图 2 所示。

叠溪古滑坡坝体位于茂县叠溪古镇较场村,长约 3 km,宽约 1 km(图 3、4A)。现今残留的坝体主要分布在岷江左岸,且在对岸(右岸)及下海子湖中有少许残留,主要由砂砾石及黏土等混杂而成,包含大量岩石碎屑及块体,砾石最小粒径几十厘米,最大可达 5~8 m(图 4B)。据推算,原始古滑坡体积 $> 1.2 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。

叠溪古堰塞湖溃坝堆积体分布在坝体下游侧河流两岸,从叠溪隧道出口至下游水沟子村附近,长约 5 km,共有 5 处。从上游至下游将其分为上、中、下

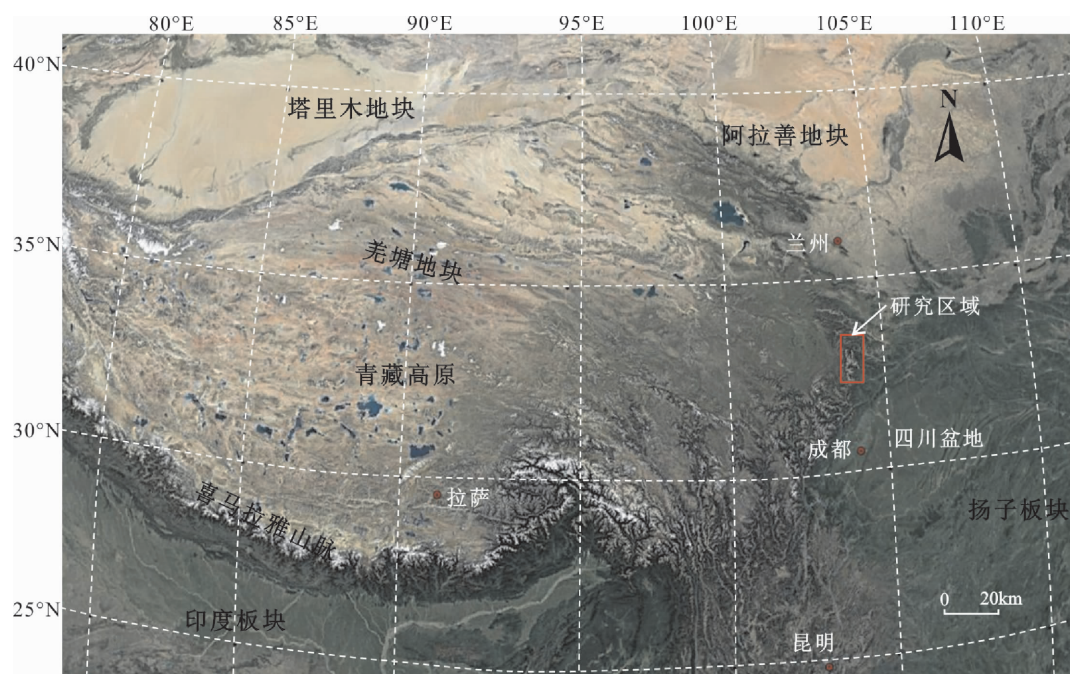


图 1 研究区位置图

Fig. 1 The location of the study area

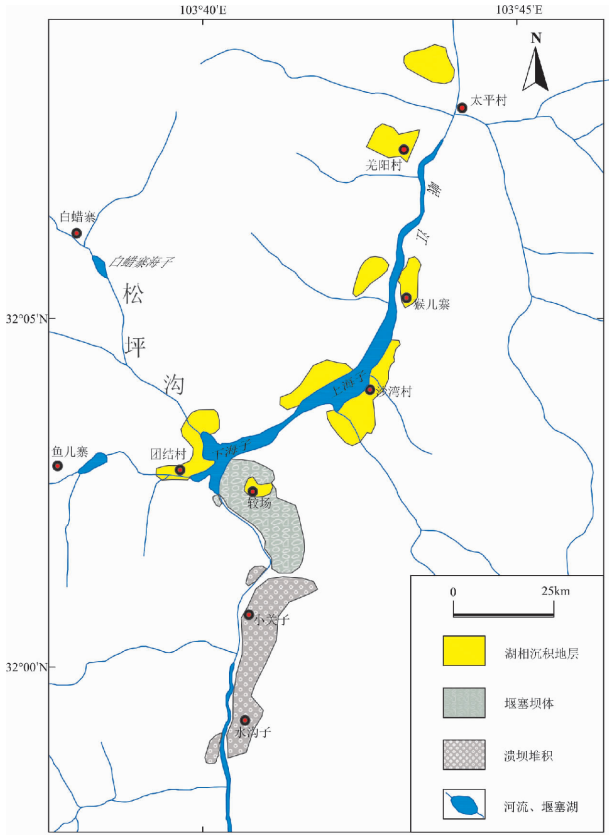


图 2 叠溪古滑坡堰塞湖的分布

Fig. 2 Distribution of the Diexi paleolandslide-dammed lake.

三段,并对这 5 处堆积体依次进行编号(I~V)(图 3),其分布特征见表 1。

表 1 叠溪古堰塞湖溃坝堆积体的分布特征

Tab. 1 Distribution characteristics of the outburst deposits

堆积体 编号	纬度 /N°	经度 /E°	剖面长度 /m	最大厚度 /m	高度 /m
I	32.022	103.683	150	25	7
II	32.020	103.672	78	18	37
III	32.015	103.679	110	8.5	6
IV	32.008	103.678	60	3.4	8
V	32.003	103.676	30	2.2	4

叠溪溃坝堆积体物质成分较为混杂,粒径分布范围较大,主要为砾石、卵石、砂及少量粉/黏土。从上段至下段,砾石尺寸逐渐减小,粗砾石层的厚度逐渐变薄,且细粒基质成分的含量有所增加。滑坡体物质是粗砾石成分的主要来源,细粒成分则可能来自上游湖相沉积、坝体或河床物质。

从几处出露的厚层堆积体发育特征来看,其沉积剖面均很完整,未发现侵蚀面的存在,说明这些堆积体为同一期次。在这些堆积体附近并未发现有大型支沟,说明没有溢洪道和泄洪道切割河流,这些堆积体并非来自支沟物质。从上游至下游,堆积体剖面厚度逐渐变薄,粗砾石组分呈由粗变细的趋势。堆积体呈现两种地貌形态:(1)在垂直方向上出露厚层的沉积剖面;(2)堆积于河流两岸的堆积阶地,

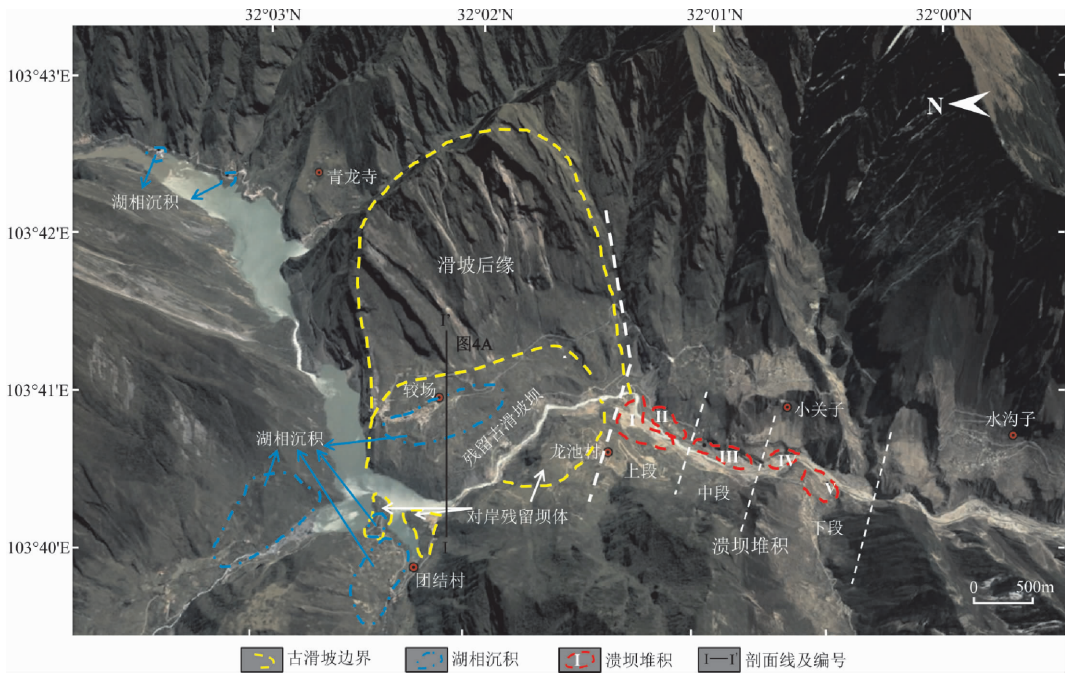


图 3 叠溪溃坝堆积体的分布特征

Fig. 3 Distribution features of the outburst deposits in Diexi area

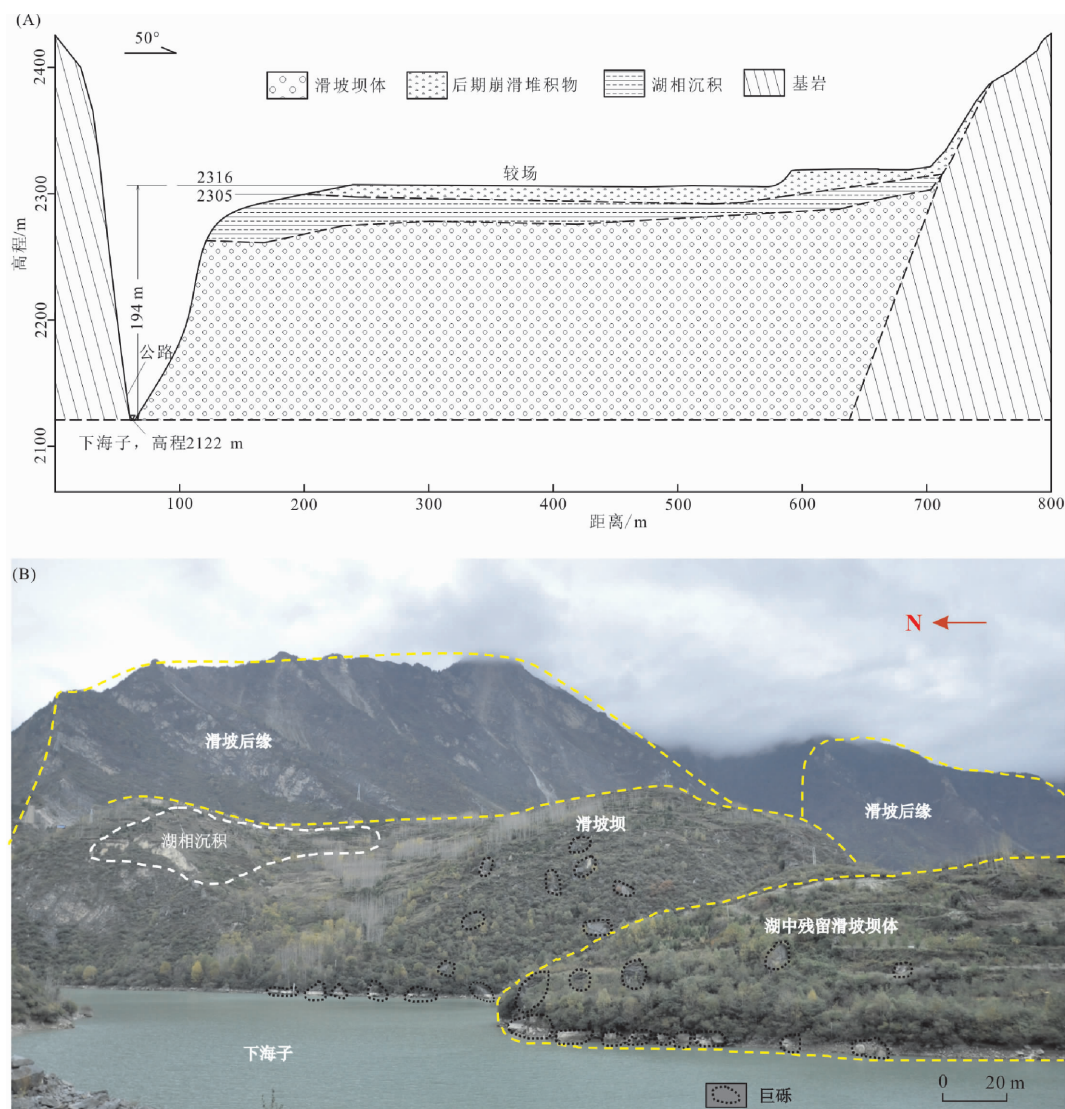


图4 叠溪古滑坡堰塞坝的地貌形态和堆积特征

(A) 滑坡坝纵剖面图(位置如图3所示);(B) 滑坡坝堆积特征

Fig.4 Landform and sedimentary features of the Diexi landslide dam

(A) Longitudinal section of the Diexi landslide dam (see Fig. 3 for the location);

(B) Sedimentary features of the Diexi landslide dam.

厚度较薄(3~5 m)(图5)。在地貌形态上表现为上、下两级“台阶”。

溃口附近河床及两侧分布着许多次磨圆状的巨砾堆积,呈叠瓦状-碎屑支撑分布,形成堆积阶地,最大长轴可达6 m。这些巨砾上大多覆盖了灌木和杂草等,说明这些砾石成分被高能水流(洪水)搬运至此后又经历了一个稳定的低水位时期。溃口处左岸有一处厚约9 m的堆积体剖面,层理面无序,规律性差,为叠溪溃坝堆积体的开端。剖面中大小砾石混杂,可见直径约3.5 m的“漂砾”,堆积体剖面及砾石扁平面微倾向下游(图5A)。向下游,堆积体的沉积特征变得越来越明显。

上段I号堆积体发育规模最大,剖面较完好且沉积特征较为典型,其最大出露厚度约25 m,从上游向下游逐渐变薄(图5B)。中、下段溃坝堆积体的剖面厚度逐渐变薄,砾石碎屑成分的粒径逐渐变小,砾石磨圆度和分选性呈逐渐变好的趋势。下段IV号堆积体上覆一层粉质粘土层,水平层理,厚约15 m,其物质来源很可能是坝体上游的湖相沉积,此外,粉质粘土层中还夹含一透镜体状湖相沉积,厚约2 m(图5C),间接地为溃坝堆积体提供了证据。下段V号堆积体的湖相沉积层中夹含薄层状河流相沉积物(图5D),当时可能水位降落,发生了回水现象。该处河流西岸存在一处混杂堆积阶地(长、宽

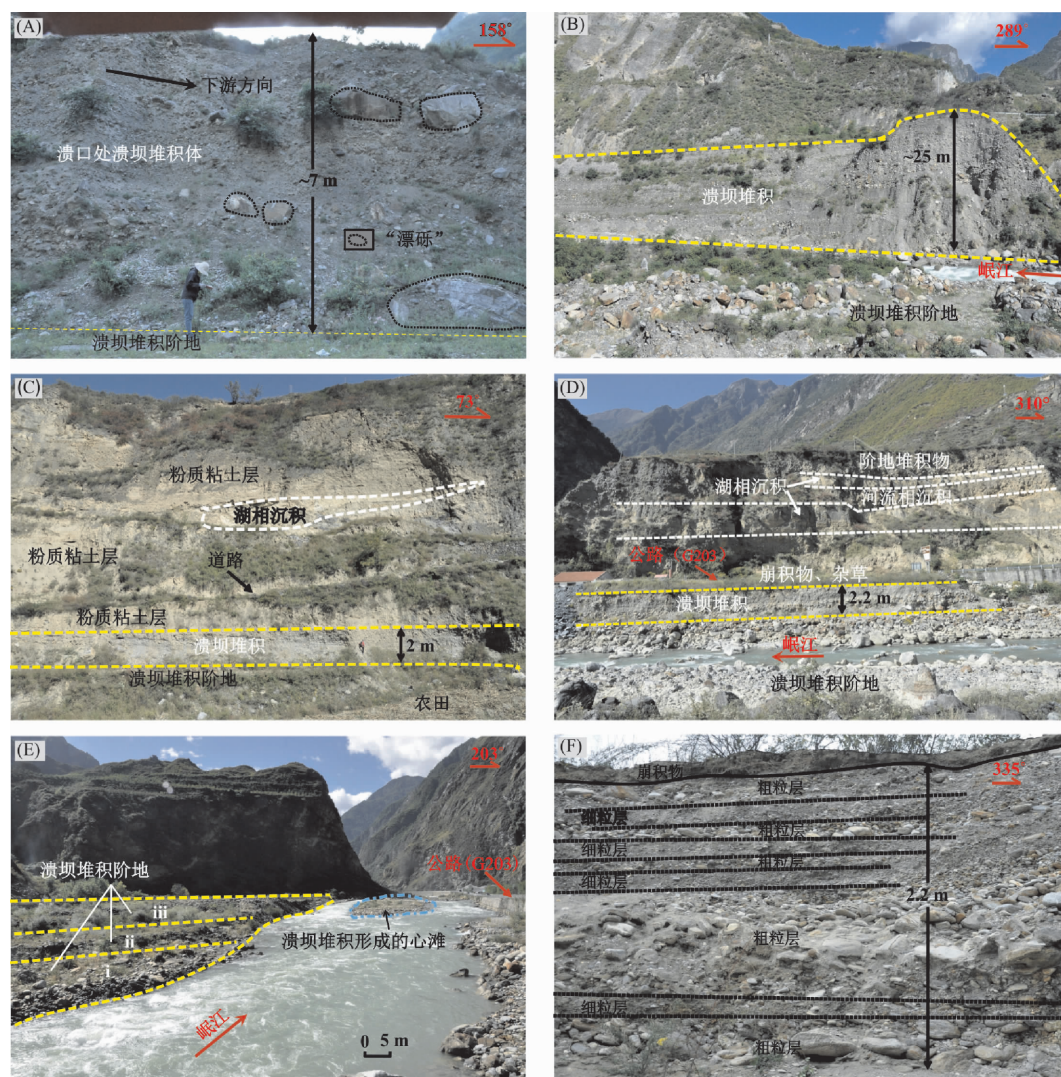


图5 叠溪古堰塞湖溃坝堆积体的沉积特征

(A) 溃口处溃坝堆积体的沉积特征;(B) 上段 I 号堆积体的沉积特征;(C) 下段 IV 号堆积体的沉积特征;
(D) 下段 V 号堆积体的沉积特征;(E) V 号堆积体处堆积阶地和心滩;(F) V 号堆积体中的韵律互层构造。

Fig.5 Sedimentary features of the outburst deposits in the Diexi area

(A) Sedimentary features of the outburst deposits at the breaching gate; (B) Sedimentary features of the outburst deposits of Accumulation I in the upper segment; (C) Sedimentary features of the outburst deposits of Accumulation IV in the lower segment; (D) Sedimentary features of the outburst deposits of Accumulation V in the lower segment; (E) Outburst deposit terrace, and the gravel diara located in the river of Accumulation V; and (F) Rhythmic interbedded structure composed of a coarser gravel layer, and a finer sand and gravel layer V.

分别约为 50 m 和 30 m), 在垂直方向上可分为 3 级 (i、ii、iii), 含有最大粒径约 80 cm 的块石。在该处河床中心, 发育一处规模较大的砾石“心滩”, 砾石直径较小(最大约 30 cm), 且磨圆、分选好, 这些砾石一般叠置堆积, 规律明显, 此处应为下段溃坝堆积体的末端(图 5E)。V 号堆积体剖面中粗砾石层具叠瓦、孔洞、杂基和支撑—叠置等构造特征, 有一定分选性; 细砂砾层一般为块状构造, 无分选或弱分选。此外, 粗砾石层和细砂砾层交替互层发育, 构成

韵律互层的特殊沉积构造(图 5F), 反映了堆积物的水动力条件特征, 粗细砾石层分别代表了搬运介质水动力的强弱。粗砾石层和细砂砾层构成的“旋回”是由于堰塞湖溃决洪水造成, 一次溃决洪峰形成一个“旋回”, 由此推断, 叠溪古堰塞湖曾在同一时期发生了多次溃决洪峰, 属于一种渐溃的过程。

根据沉积物的沉积层理和分选程度, 可将沉积类型分为有序和失序, 而且任何一种沉积物均只属于其中的一种。而叠溪溃坝堆积却表现为上游部位

混杂无序,中、下游为次有序或有序,这是因为在同一搬运介质条件下,搬运介质和搬运动力在沉积物的堆积过程中发生了变化,这完全不同于其他堆积类型。

3 叠溪古堰塞湖最大溃决洪峰流量计算

溃决洪水洪峰流量的计算是堰塞湖溃决洪水研究的重点之一,国外学者对许多堰塞湖及大河洪水开展了大量计算研究工作,提出很多计算溃决洪峰流量的理论方法^[1-2, 5, 7, 21-23],其中,水流能量法是较常用的方法。研究表明,最大粒径的沉积物颗粒反映了搬运介质的最大动能,因此,河床中的最大粒径砾石几何尺寸是该方法最重要的计算参数^[1]。

基于前人研究,本文采用了水流能量法计算叠溪古堰塞湖最大溃决洪峰流量。

3.1 计算过程

水流能量法计算洪峰流量可分为计算平均流速、平均深度和洪峰流量三步。在溃决洪水河床流速计算中采用 Helley 法^[24]和 $F_D + F_L = F_R$ 法^[25],古洪水深度的计算采用曼宁公式^[26]和 Sheild 公式^[27]。计算过程公式列于表 2。

3.2 叠溪古堰塞湖溃决洪峰流量的估算

在野外调查研究中,分别在溃口及上、中、下各段河床上随机选取大粒径砾石,测量统计其几何尺寸(长、中、短轴),统计结果列于表 3。叠溪河谷段各段河河床砾石叠置角度(θ)及最小剪应力(τ^*)见表 4。溃决洪水平均流速和平均深度的计算结果如表 5 所示。

表 2 水流能量法洪峰流量计算公式

Tab. 2 Peak flow computational formula of the hydraulic flow energy method

计算步骤		计算公式	
平均流速	河床流速 V_b	Helley 法 $V_b = 3.276 \left[\frac{(\gamma_s - 1) d_L (d_m + d_s)^2 MR_L}{C_{D'} d_s d_L MR_D + C_L d_m d_L MR_L} \right]^{0.5}$	$F_D + F_L = F_R$ 法 $V_b = \left[\frac{2(\gamma_s - 1) d_m g f}{\gamma_f (C_L + C_{D'})} \right]^{0.5}$
	平均流速 \bar{V}	$\bar{V} = 1.2 V_b$	
	平均深度	曼宁公式 $\bar{D} = \left(\frac{\bar{V} n}{\sqrt{S}} \right)^{1.5}$	Sheild 公式 $\bar{D} = \frac{\tau \cdot d_m (\gamma_s - \gamma_f)}{\gamma_f S}$
洪峰流量		$Q = \bar{V} A$	

表中: $C_{D'}$ 为修正的流体阻力系数,一般取 0.75 C_D , C_D 为流体阻力系数,取值可由流体阻力系数与颗粒形状系数的关系曲线求得^[24]; d_L 、 d_m 及 d_s 分别为颗粒长、中、短轴尺寸,m; C_L 为升力系数,此处为 0.178; γ_s 为颗粒有效容重,取 2.85 g/cm³; γ_f 为流体有效容重,取 1.0 g/cm³; g 为重力加速度,9.8 m/s²; f 为静摩擦系数,取 0.7; MR_L 和 MR_D 分别为升力、拉力回旋矩^[24]: $MR_L = \frac{1}{4} d_m \cos \theta + \sqrt{\frac{3}{16}} d_s^2 \sin \theta$, $MR_D = 0.1 d_s \cos \theta + \sqrt{\frac{3}{16}} d_s^2 \cos \theta - \frac{1}{4} d_m \sin \theta$; θ 为颗粒叠置角(现场测量); n 为河床粗糙系数^[28],取 0.04; S 为河床坡率(野外实测,为 0.005)。 τ 为河床剪应力, τ^* 为最小剪应力^[21]。 A 为计算位置洪水断面面积,m²。

表 3 叠溪堰塞坝体下游砾石几何尺寸统计

Tab. 3 Statistics of gravel dimension in the lower reaches of Diexi dammed-lake

统计位置	统计砾石数量/件	长轴平均值 \bar{d}_L /m	中轴平均值 \bar{d}_m /m	短轴平均值 \bar{d}_s /m
溃口	36	4.3	3.3	2.5
上段	30	3.6	2.3	1.7
中段	40	2.9	1.7	1.1
下段	40	1.9	1.3	0.9

表 4 叠溪古堰塞湖溃决洪水洪峰流量计算参数

Tab. 4 The peak flow calculation parameters of Diexi ancient dammed-lake outburst flood

参数	溃口	上段	中段	下段
河床砾石叠置角度 $\theta/^\circ$	35	30	40	30
最小剪应力 τ^*	0.013	0.015	0.017	0.020

表 5 古洪水平均流速及平均深度计算结果					
Tab. 5 Calculation results of average velocity and depth of paleoflood					
计算位置		溃口	上段	中段	下段
平均流速 /(m/s)	Helley 法	23.97	17.80	17.95	13.15
	$F_D + F_L = F_R$ 法	10.50	8.11	6.51	6.00
	平均值(m/s)	17.23	12.96	12.23	9.58
平均深度 / \bar{D} (m)	Manning 公式	30.43	19.85	18.20	12.62
	Sheild 公式	15.78	12.97	10.85	9.25
	平均值(m/s)	23.10	16.41	14.52	10.93

计算断面的形状对洪峰流量的计算影响较大。在采用理论方法计算时,可将断面近似为梯形(图 6);然后,根据古洪水平均深度、河流两岸坡度及河床宽度等参数求得断面面积;最后,计算最大洪峰流量(表 6)。需指出的是,由于对计算断面进行了近似处理,最大洪峰流量的计算结果会产生一定误差,但对于超大规模的溃决洪水而言,这一误差影响不大。

3.3 结果分析

由表 6 可看出,溃口处溃决洪水平均流速为 17.23 m/s,最大洪峰流量接近 50000 m³/s。查阅叠溪河段岷江水文资料,其常年平均流量约 700 m³/s,可见最大洪峰流量是其数十倍。表明,叠溪古堰塞湖溃决洪水可能是当时地质历史上万年一遇的异常

大古洪水,如此大规模的堰塞湖溃决洪水在世界范围内也是十分罕见的。此外,由表 2,从上游至下游:(1)叠溪河段河床大粒径砾石的几何参数逐渐减小,但在同一计算区段内相差不大;(2)溃决洪水的最大洪峰流量逐渐减小,溃口处最大洪峰流量是下段的四倍多,其变化很明显。以上结果表明,溃决瞬间,溃口附近的洪峰流量很大且段距离内下降很小,以至于只有最大的砾石能够不经搬运就沉积下来。随着搬运距离的增加,溃决洪水的洪峰流量迅速减小,其搬运动能迅速降低,小粒径成分才得以沉积,因此沉积物粒径逐渐减小。

表 6 叠溪古堰塞湖最大溃决洪峰流量计算结果					
Tab. 6 The maximum peak discharge of Diexi ancient dammed-lake outburst flood					
计算位置	溃口	上段	中段	下段	
断面面积 A/m^2	2891.54	2935.34	2130.30	1231.43	
最大洪峰流量 $Q/(\text{m}^3/\text{s})$	49821.28	38041.99	26053.59	11797.08	

可看出,水流能量法计算中所选取的最大砾石几何参数及计算断面形状非常重要,其准确与否取决于现场的实际测量统计手段。因此,需深入地研究堆积体的沉积特征,保证所选取的最大砾石是古堰塞湖溃坝沉积物,尽可能地减小计算误差。

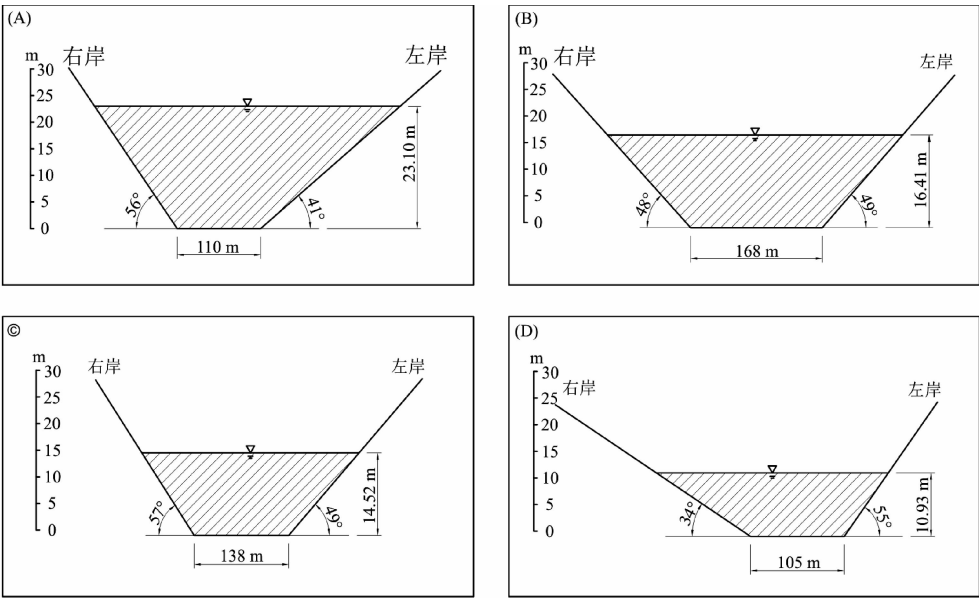


图 6 溃决洪水洪峰流量计算断面参数
(A) 溃口计算断面;(B) 上段计算断面;(C) 中段计算断面
Fig. 6 Cross-section parameters of Diexi paleo dammed-lake outburst flood
(A) Cross-section at the breaching gate; (B) Cross-section in the upper segment;
(C) Cross-section in the middle segment; (D) Cross-section in the lower segment

4 讨论

4.1 叠溪古堰塞湖的成因

通过以上研究,可以断定叠溪古堰塞湖由该河段岸坡滑塌堵江形成,而坡体的破碎程度、强烈地震活动及强降雨等都会引发岸坡滑塌。根据野外调查,笔者认为最可能造成该次堵江事件的原因是该地区的古地震活动。依据如下:

(1)叠溪段岷江两岸山体基岩结构完整,致密坚硬,坡体斜交,稳定性很好,此外,基岩中的节理面为斜交或反向,岩体自然状态下很稳定。可见,由基岩自身引发大型滑坡的可能性很小;

(2)前人研究显示,末次冰期(LGM, 10 ~ 30 ka BP)时,青藏高原较干旱,降水稀少,降雨量只有现代降水的 30% ~ 70%^[29],而叠溪地区年均降雨量不足 500 mm。由此也可排除强降雨导致两岸山体滑坡的可能;

(3)如前所述,研究区断裂构造十分发育,这就为强震活动提供了天然的地质条件。历史上,这一地区曾多次发生强震(震级 > 7),有些甚至达到了 8 级。此外,据有记载的历史资料,叠溪地区也曾多次发生大的古地震^[30-31]。由此看来,古地震活动最有可能成为大型山体滑坡的诱因。

由此,综合区域地质构造、古气候条件、古地震及古崩塌滑坡发育特征,推断叠溪古滑坡堰塞事件是由古地震活动引发的。

4.2 叠溪古堰塞湖溃决事件发生的年代

光释光测年是确定沉积物年代的重要手段,也是目前最精确、最常用的方法之一。野外考察时,分别在溃坝堆积体上、中、下段剖面细砂层中各采取了 1 个光释光测年(OSL)样品,共计 3 个样品。现场取样时,做了避光处理,并采用胶带密封。之后,委托北京核工业地质分析测试中心进行 U、Th 和 K 含量的测定,并在中国科学院地质与地球物理研究所进行等效剂量 De 的测量。测年结果列于表 7。

表 7 光释光测年结果

Tab. 7 OSL dating results of samples from the outburst deposits in the Diexi area

样品编号	采样位置	经纬度		高程 (m)	岩性	U (ppm)	Th (ppm)	K/%	含水率 /%	Gy/ka	Gy/ka	De (Gy)	样品年龄 /ka
		纬度/N (°)	经度/E (°)										
U1-QSBZ-1	上段	32.022	103.683	2006.9	砂	1.83	6.23	1.10	0.22	0.05	2.03 ± 0.10	42.40 ± 6.01	20.9 ± 3.1
M2-CSC-1	中段	32.013	103.679	1956.8	砂	1.49	5.69	0.96	0.34	0.18	1.90 ± 0.09	51.78 ± 4.64	27.3 ± 2.8
L1-NT-1	下段	32.008	103.678	1946.9	砂	1.92	6.47	0.95	0.23	0.23	2.10 ± 0.09	47.76 ± 6.78	22.7 ± 3.4

可看出,三个样品的测年结果分别为 20.9 ± 3.1 ka BP、27.3 ± 2.8 ka BP 和 22.7 ± 3.4 ka BP,表明叠溪古滑坡堰塞湖溃坝堆积的形成年龄为 20.9 ± 3.1 ~ 27.3 ± 2.8 ka BP,由此推断,叠溪古滑坡堰塞湖溃决事件发生的时间大约在 27 ka BP,即晚更新世晚期。此后,叠溪古堰塞湖经过了一个相当长的稳定期,在上游形成了大范围的湖相沉积。

5 结论

在岷江上游叠溪河谷段首次发现了一处大型古堰塞湖溃坝堆积体,沿岷江两岸分布,长度达 5 km,发育规模如此之大的古堰塞湖溃坝堆积体实属罕见。通过溃坝堆积体光释光年代测定,确定其形成

年龄为 20.9 ± 3.1 ~ 27.3 ± 2.8 ka BP,表明溃决事件发生时间约为 27 ka BP,即晚更新世晚期。叠溪溃坝堆积体物质成分较为混杂,粒径分布范围较大,主要为砾石、卵石、砂及少量粉/黏土。滑坡体物质是粗砾石成分的主要来源,细粒成分则可能来自上游湖相沉积、坝体或河床物质。堆积体剖面完整,未发现侵蚀面的存在,说明这些堆积体为同一期次。堆积体剖面发育叠瓦、孔洞、块状、杂基、支撑—叠置及韵律互层等构造特征。从上游至下游,堆积体厚度逐渐变薄,砾石碎屑成分由粗变细。该套溃坝堆积体在沉积层理和分选程度上表现为上游部位混杂无序,中、下游为次有序或有序,完全不同于其他堆积类型(只属于有序和失序中的一种)。

基于现场实地调查测量,采用洪水动力学理论

计算中的水流能量法重建了叠溪古堰塞湖溃决洪水的最大洪峰流量,溃口处古洪水平均流速为 17.23 m/s,最大洪峰流量为 49 821.28 m³/s。当地水文资料显示,该洪峰流量是该段岷江常年平均流量(约 700 m³/s)的数十倍。表明,叠溪古堰塞湖溃决洪水可能是当时地质历史上万年一遇的异常大古洪水,如此大规模的堰塞湖溃决洪水在世界范围内也是十分罕见的。本文研究可为认识堰塞湖坝体溃决过程及溃决洪水演进机制提供研究参数,对于了解山区地质环境演化规律具有重要意义,为堰塞湖稳定性评估、溃决洪水风险预测与应急预案及抢险减灾提供参考。

参考文献(References)

- [1] COSTA J E, Schuster R L. The formation and failure of natural dams[J]. *Geology Society of America Bulletin*, 1988, **100**: 1054–1068
- [2] 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, South-western China[J]. *Geomorphology*, 2005, **65**: 205–221
- [3] CHEN J, DAI F C, LV T Y, et al. Holocene landslide-dammed lake deposits in the Upper Jinsha River, SE Tibetan Plateau and their ages[J]. *Quaternary International*, 2013, **298**: 107–113
- [4] 崔之久,张梅,崔鹏,等. 初论堰塞湖溃坝沉积相特征[J]. *山地学报*, 2015, **33**(2): 129–140 [CUI Zhijiu, ZHANG Mei, CUI Peng, et al. Discussion on characteristics of sedimentary facies of dammed-lakes outburst deposits[J]. *Mountain Research*, 2015, **33**(2): 129–140]
- [5] 马俊学. 岷江上游叠溪古堰塞湖溃坝堆积体的沉积特征及溃决洪水反演[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2017. [MA Junxue. Sedimentary characteristics of outburst deposits and inversion of outburst flood induced by the Diexi paleo dammed lake of the upper Minjiang River in China [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2017.]
- [6] 崔之久,葛道凯,关保德,等. 混杂堆积与环境[M]. 石家庄:河北科学技术出版社, 2013: 1–718 [CUI Zhijiu, GE Daokai, GUAN Baode, et al. *Diamicton and environment* [M]. Hebei Science and Technology Press, Shijiazhuang, China, 2013: 1–718]
- [7] 陈剑,崔之久. 金沙江上游雪隆囊古滑坡堰塞湖溃坝堆积体的发现及其环境与灾害意义[J]. *沉积学报*, 2015, **33**(2): 275–284 [CHEN Jian, CUI Zhijiu. Discovery of outburst deposits induced by the Xuelongnang paleolandslide-dammed lake in the upper Jinsha River, China and its environmental and hazard significance[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2015, **33**(2): 275–284]
- [8] CUTLER P M, COLGAN P M, MICKELSON D M. Sedimentologic evidence for outburst floods from the Lauorentide Ice Sheet margin in Wisconsin, USA: Implications for tunnel-channel formation[J]. *Quaternary International*, 2002, **90**(1): 23–40.
- [9] KORUP O. Geomorphologic hazard assessment of landslide dams in South Westland, New Zealand: fundamental problems and approaches[J]. *Geomorphology*, 2005, **66**: 167–188.
- [10] BENN D I, Owen L A, Finkel R C, et al. Pleistocene lake outburst floods and fan formation along the eastern Sierra Nevada, California: implications for the interpretation of intermontane lacustrine records[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2006, **25**(21–22): 2729–2748.
- [11] CARLING P A. Freshwater megaflood sedimentation: What can we learn about generic processes? [J]. *Earth-Science Reviews*, 2013, **125**: 87–113.
- [12] 崔之久. 论混杂堆积和混杂岩的成因判别原则与标志[J]. *地质评论*, 1988, **34**(4): 369–376 [CUI Zhijiu. Discussion on the discrimination principle and symbol of origin on the diamicton and diamictite[J]. *Geological Review*, 1988, **34**(4): 369–376]
- [13] 方小敏,沈明智,牟昀智. 武都泥石流显微构造及其形成机制初探[J]. *中国科学(B辑)*, 1991(2): 205–215 [FANG Xiaomin, SHEN Mingzhi, MOU Junzhi. Preliminary study on the microstructure and formation mechanism of the debris-flow deposits in Wudu area[J]. *Science in China (Ser. B)*, 1991(2): 205–215]
- [14] 邓养鑫. 冰碛转化为冰川泥石流堆积过程及其沉积特征[J]. *沉积学报*, 1995, **13**(4): 37–48. [DENG Yangxin. Process of accumulation and characteristics of glacial debris flow deposits transformed by moraine[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1995, **13**(4): 37–48]
- [15] 崔之久,刘耕年,王晓辉,等. 泥石流沉积与环境[M]. 北京:海洋出版社, 1996: 1–192 [CUI Zhijiu, LIU Gengnian, WANG Xiaohui, et al. *Debris-flow deposits and their environment* [M]. China Ocean Press, Beijing, China, 1996: 1–192]
- [16] 王兰生,杨立铮,王小群,等. 岷江叠溪古堰塞湖的发现[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2005, **32**(1): 1–11 [WANG Lansheng, YANG Lizheng, WANG Xiaoqun, et al. Discovery of huge ancient dammed lake on upstream of Minjiang River in Sichuan, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, 2005, **32**(1): 1–11]
- [17] 王小群,王兰生,沈军辉. 岷江上游叠溪古堰塞湖沉积物粒度特征及环境意义[J]. *工程地质学报*, 2010, **18**(5): 677–684 [WANG Xiaoqun, WANG Lansheng, SHEN Junhui. Granularity analysis of sediments in Diexi ancient dammed lake on the upstream of Minjiang River and its environmental significance[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2010, **18**(5): 677–684]
- [18] WANG P, ZHANG B, QIU W L, et al. Soft-sediment deformation structures from the Diexi paleo-dammed lakes in the upper reaches of the Minjiang River, east Tibet[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, **40**(4): 865–872.

- [19] 王兰生, 王小群, 许向宁, 等. 岷江叠溪古堰塞湖的研究意义[J]. 第四纪研究, 2012, **32**(5): 998 – 1010 [WANG Lansheng, WANG Xiaoqun, XU Xiangning, et al. Significances of studying the Diexi paleo-dammed lake at the upstream of Minjiang River, Sichuan, China[J]. Quaternary Sciences, 2012, **32**(5): 998 – 1010]
- [20] WANG X Q, LI Y R, YUAN Y, et al. Palaeoclimate and palaeoseismic events discovered in Diexi barrier lake on the Minjiang River, China[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2014, **14**: 2069 – 2078
- [21] COSTAJ E. Paleohydraulic reconstruction of flash-flood peaks from boulder deposits in the Colorado Front Range[J]. Geological Society of American Bulletin, 1983, **94**(8): 986 – 1004.
- [22] KEHEW A E, LORD M L. Origin and large-scale erosional features of glacial-lake spillways in the northern Great Plains[J]. Geological Society of American Bulletin, 1986, **97**(2): 162 – 177
- [23] 吴庆龙, 张培震, 张会平, 等. 黄河上游积石峡古地震堰塞溃决事件与喇家遗址异常古洪水灾害[J]. 地球科学(D辑): 地球科学, 2009, **39**(8): 1148 – 1159 [WU Qinglong, ZHANG Peizhen, ZHANG Huiping, et al. A palaeo-earthquake induced damming and bursting of Yellow River and the abnormal flood that destroyed Lajia relic[J]. Science China (Seri. D): Earth Sciences, 2009, **39**(8): 1148 – 1159]
- [24] HELLEY E J. Field measurement of the initiation of large bed particle motion in Blue Creek near Klamath, California[J]. U. S. Geological Survey Professional Paper, 1969, 562 – G; p 19.
- [25] BRADLEY W C, MEARS A I. Calculations of flows needed to transport coarse fraction of Boulder Creek alluvium at Boulder, Colorado[J]. Geological Society of America Bulletin, 1980, **91**(3 – Part II): 1057 – 1090.
- [26] WILLIAMS G P. Manning formula—A misnomer? [J]. Journal of the Hydraulics Division, 1970, **96**: 193 – 200.
- [27] SHIELDS A. Anwendung der Aehnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung Auf Die Geschiebebewegung[J]. Mitteilungen der Preussischen Versuchsanstalt fur Wasserbau und Schiffbau, 1936: p 26.
- [28] BARNES H H. Roughness characteristics of natural channels[M]. U. S. Geological Survey Water Supply Paper 1849, 1967: p 213.
- [29] 施雅风, 崔之久, 苏珍, 等. 中国第四纪冰川与环境变化[M]. 石家庄: 河北科学技术出版社, 2006: 91 – 92. [SHI Yafeng, CUI Zhijiu, SU Zhen, et al. The quaternary glaciations and environmental variations in China[M]. Shijiazhuang: Hebei Science and Technology Publishing House, 2006: 91 – 92.]
- [30] 闻学泽, 张培震, 杜方, 等. 2008 年汶川 8.0 级地震发生的历史与现今地震活动背景[J]. 地球物理学报, 2009, **52**(2): 444 – 454 [WEN Xueze, ZHANG Peizhen, DU Fang, et al. The background of historical and modern seismic activities of the occurrence of the 2008 Ms 8.0 Wenchuan, Sichuan, earthquake[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, **52**(2): 444 – 454]
- [31] 王康, 沈正康. 1933 年叠溪地震的发震位置、震源机制与区域构造[J]. 地震学报, 2011, **33**(5): 557 – 567 [WANG Kang, SHEN Zhengkang. Location and focal mechanism of the 1933 Diexi earthquake and its associated regional tectonics [J]. Acta Seismologica Sinica, 2011, **33**(5): 557 – 567]

Sedimentary Characteristics of the Stacked Body of the Broken Diexi Dam in the Upper Reaches of the Minjiang River, China and Its Historical Peak Flow

MA Junxue¹, CHEN Jian^{1*}, CUI Zhijiu²

(1. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;

2. College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: During the geological history, a large-scale shock-induced rock landslide occurred at Diexi in the upper reaches of the Minjiang River and blocked the Minjiang River to form a large dammed lake. After the formation of the dammed lake, later it broke in the Late Pleistocene (about 27 ka BP) and formed a natural dam-break mass downstream about 5 km long. Based on the field geological survey, the sedimentary characteristics of the Diexi dam were studied by means of measurement statistics, sampling analysis and theoretical calculation, and the maximum outburst flood discharge was reconstructed. The gravel, pebble, sand and a small amount of powder / clay were the

main components of Diexi dam-break deposit. Structural features such as imbrication, cavitation, bolder structures, miscellaneous groups, supporting-stacking and rhythmic interbed were developed in the profile. From the upstream to the downstream, the exposed thickness of the dam body gradually becomes thinner, and the composition of the gravel debris changed from coarse to fine. The maximal peak flow of the outburst flood was reconstructed by using the theory of hydraulics. The average flood peak velocity at the breach and the maximum peak flow were estimated as 17.23 m/s and 49821.28 m³/s, respectively. Therefore, it is rare case worldwide. The sedimentary characteristics and the reconstruction of outburst flood discharge in Diexi dam are of great significance in understanding the process of failure of landslide dam, the evolution mechanism of flush flood and the evolution of the geological environment in mountainous areas.

Key words: Diexi paleo-dammed lake; outburst deposits; sedimentary characteristics; outburst flood; peak discharge; upper Minjiang River