

文章编号: 1008-2786-(2017)3-346-11

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000231

# 邛海北岸官坝河山洪泥石流灾害特征及发展趋势

魏学利<sup>1\*</sup> 陈宁生<sup>2</sup> 李 宾<sup>1</sup> 赵怀义<sup>1</sup>

(1. 新疆维吾尔自治区 交通规划勘察设计研究院 新疆 乌鲁木齐 830006;

2. 中科院水利部成都山地灾害与环境研究所 四川 成都 610041)

**摘 要:** 官坝河为邛海流域最大支沟,近年来山洪泥石流频发,对邛海产生严重泥沙淤积灾害。本文在对官坝河 1998 年 7 月 6 日百年一遇泥石流灾害调查基础上,分析泥石流形成运动特征及其对邛海的淤积效应,揭示山洪泥石流暴发主要影响要素及发展趋势。研究表明:官坝河流域内物源丰富且形式多样,山洪泥石流暴发频率高且规模大;流域沟道长且比降大,沿途流速流量变化大且流态变换复杂;山洪泥石流对邛海泥沙淤积严重,大量泥沙不仅堆积在入湖口,还以浊流形式输移至湖心处;区域频繁地震活动、强降雨作用和不合理人类活动共同促进山洪泥石流暴发,预测山洪泥石流活动强度总体呈上升趋势。该成果可为官坝河流域规划管理和工程治理提供参考依据,有助于揭示区域山洪泥石流特征及其对邛海的泥沙淤积演化过程。

**关键词:** 官坝河;邛海;山洪泥石流;泥沙淤积;影响因素;发展趋势

中图分类号: P642.23

文献标志码: A

邛海作为典型高原半封闭构造断陷湖,被称为四川西昌市的“母亲湖”,近年来邛海泥沙淤积问题严重,面积从 1952 年的 31.00 km<sup>2</sup> 减少到 2003 年的 27.40 km<sup>2</sup>,平均水深由原来的 14.00 m 减少到 2003 年的 10.95 m<sup>[1]</sup>,严重威胁邛海生命质量和区域经济社会发展。山洪泥石流的频繁发生是邛海泥沙淤积的主要原因,作为邛海北岸的最大支沟—官坝河,近年来山洪泥石流暴发频繁,泥石流在山坡和沟道网络之间形成一个重要的链接,从山坡和沟道携带大量松散物质进入湖泊,对邛海产生严重淤积灾害,何杰等<sup>[2]</sup>指出邛海北片区官坝河山洪泥石流对邛海泥沙淤积贡献最大,余斌等<sup>[3-4]</sup>对邛海南岸的鹤掌河泥石流对邛海的淤积进行初步分析,然而当前缺少对邛海流域泥石流活动及其对邛海泥沙淤积的系统剖析。为此,本文以邛海北岸官坝河为研究对象,在对 1998-07-06 特大型山洪泥石流灾害的调查基础上,分析灾害形成运动特征及其泥沙淤积灾

害效应,预测官坝河山洪泥石流灾害发展趋势,为官坝河流域规划管理和工程治理提供参考依据,以有效减轻山洪泥石流对邛海的淤积危害。

## 1 区域背景

官坝河位于邛海的北岸,为邛海流域最大支流,整个流域面积约为 137.24 km<sup>2</sup>,地势东高西低,最高点海拔 3 264 m,入湖口处为 1 510 m,其中主沟道长度约为 24.12 km,平均纵比降 64.40‰。官坝河流域支沟众多,整个沟道形态呈串珠状,宽谷和峡谷相间,且具有明显分带性,大湾子村以上为流域上游,大湾子村至象鼻寺段为流域中游,主流在象鼻寺处发生转向,由东西流向改为南北流向,象鼻寺至入湖口段为流域下游,相应的地貌类型分别为上游的中高山峡谷地貌、中游的低山宽谷区和下游的宽浅河谷区(图 1)。

收稿日期(Received date): 2016-01-29; 改回日期(Accepted date): 2016-06-12。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金青年基金(41602331); 中国博士后科学基金(2016M602951XB); 中国沙漠气象科学研究基金(Sqj2015015)。[National Science Foundation for Young Scholars of China(41602331); Postdoctoral Science Foundation of China(2016M602951XB); Desert Climatic Science Research Foundation of China(Sqj2015015)]

作者简介(Biography): 魏学利(1981-),男,博士,主要研究方向:公路地质灾害与特殊性岩土。[Wei Xueli(1981-), male, Ph.D., specialized in road geological disasters and special geotechnical engineering.] E-mail: weixl8115@126.com

在川滇南北向构造作用下,官坝河流域分为两个地貌单元,即中上游的构造剥蚀地貌和中下游的河湖相沉积地貌。中上游区域约占整个流域面积的77.60%,山体多为中高山,平均海拔2550 m,沟谷深切且侵蚀剥蚀严重,山高坡陡,褶皱和断层发育,山体岩性以砂岩和泥质页岩为主,岩层产状为 $300^{\circ}\angle 15^{\circ}$ ;中下游区域约占流域总面积的22.40%,主要以河湖相堆积为主,局部为中低山,平均海拔1735 m,河湖相堆积地层包含砂卵石层、粉砂层和粉西沙层及粘土层等。

官坝河流域主要受安宁河断裂和则木河断裂控制,新构造运动活跃,中小地震频发,流域断裂密集发育,沿3条较大支沟附近分别发育3条逆断层,走向均与支沟走向一致,断层倾角较大( $40^{\circ}-50^{\circ}$ ),致使中上游河谷深切,斜坡陡峭,岩体破碎,崩塌滑坡呈串珠状发育,又加上近百年来的乱砍乱伐和陡坡开垦等活动,森林植被破坏严重,水土流失加剧,为山洪泥石流暴发及邛海泥沙淤积灾害提供了大量物质来源。

官坝河流域为中亚热带高原山地气候,雨量充沛,日照充足,干湿季分明,多年平均气温 $16.90^{\circ}\text{C}$ ,多年平均年降雨量为1013.50 mm,5-10月的降雨量为953.30 mm,占年降雨量为93%,多年平均径流深480 mm,多年平均流量 $1.70\text{ m}^3/\text{s}$ 。

## 2 泥石流成因分析

官坝河流域物源丰富,夏季多暴雨,每年都不同程度暴发山洪泥石流灾害。其中1998年7月6日暴发百年一遇泥石流,持续近2h左右,最大泥石流流量 $820.28\text{ m}^3/\text{s}$ ,泥石流总流量约为143.47万 $\text{m}^3$ ,为低频特大规模泥石流;沟道沿途比降变化大,冲淤过程复杂,从上游至下游流态呈粘性-稀性-洪水的转换形式;当时官坝河流域内突降特大暴雨,主沟和支沟泥石流同时暴发,水深约4.00-5.00 m,水中大石块碰撞发生巨大声响,沟床凹凸不平且弯道多,堵塞严重,沟道内局部段呈现阵性特征,泥石流搬运能力强且冲击能量大,造成千亩农田受淹,

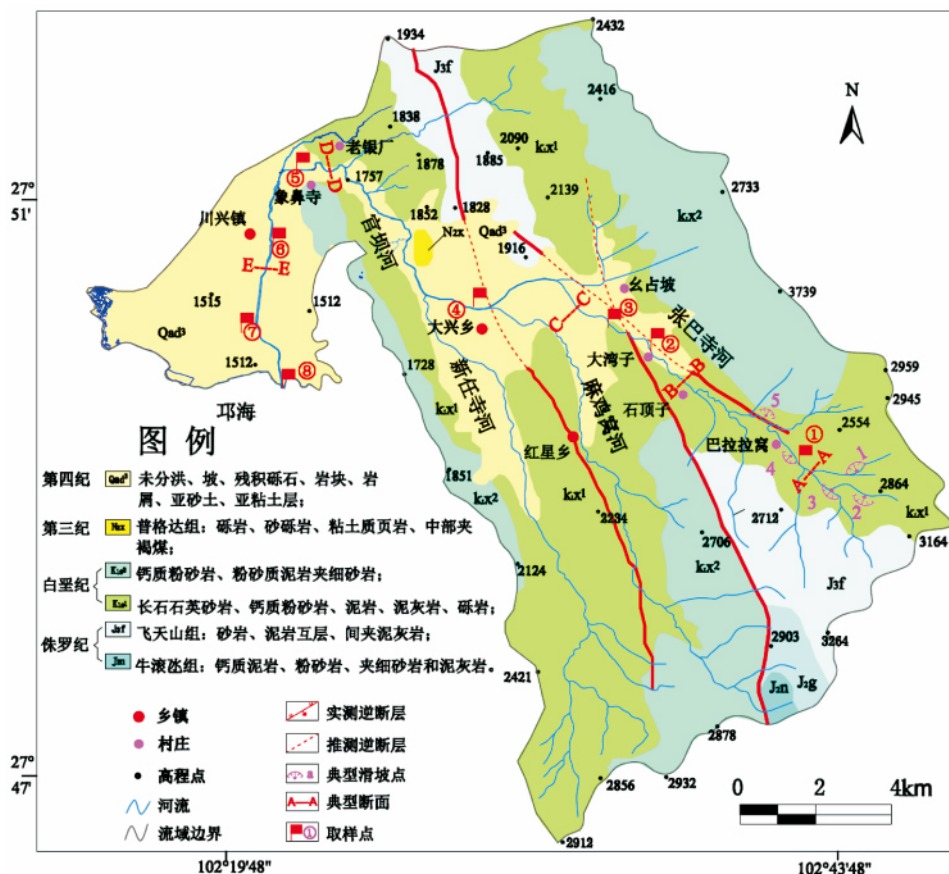


图1 官坝河流域概况图

Fig.1 Sketch map of Guanba River basin

大量泥沙被推向邛海。

## 2.1 动力条件充足

山坡坡度和沟床比降是流体由位能转变为动能的底床条件,是影响泥石流的形成、运动和堆积的重要因素。坡度较大的坡面有利于物源供给和泥石流启动,源区山地坡度主要介于  $25^{\circ}$  –  $45^{\circ}$  和  $>45^{\circ}$ ,满足泥石流形成的易发临界坡度范围<sup>[5]</sup>;官坝河主沟上游段地形起伏较大,河道呈“V”字形,沟道比降介于  $83.33\%$  –  $463.88\%$  之间,在中游大兴乡断陷盆处,河流呈现游荡型,坡度较缓,比降介于  $17.28\%$  –  $83.33\%$  之间,下游段属于平原型宽浅河流,地势平坦,比降仅为  $1.73\%$  –  $17.28\%$ 。官坝河流域内发育3条较大支沟,分别为大萝卜沟、马鸡窝河和新任寺河,沟床平均比降介于  $89.00\%$  –  $96.00\%$ ,中上游比降更大,一般介于  $122.43\%$  ~  $363.97\%$ ,下游比降减小,属于典型的漏斗形沟谷。官坝河流域逐级递减的沟道比降特征有利于促使泥石流的形成运动和泥沙输移。

## 2.2 物源供给多样性

物源供给条件对泥石流的频率和规模起着重要的作用<sup>[6]</sup>。官坝河流域内泥石流物源供给形式多样,主要来源于重力侵蚀、沟道侵蚀和面源侵蚀等,其中崩塌滑坡等重力侵蚀对泥石流的物源补给贡献率最大,其发育受断裂带控制且主要分布于中上游陡峭山坡<sup>[7]</sup>,崩塌滑坡数量为98个,总方量估算为  $116.53 \times 10^4 \text{ m}^3$ ;沟道冲洪积物断续地分布在主支沟内,堆积方量约为  $42.79 \text{ 万 m}^3$ ,主要分布于中下游河床比降为  $87\%$  –  $176\%$  区域,堆积物表面被水流“粗化”,细小颗粒随水流一起被携带至下游,而大部分粗大颗粒堆积在原地,最大颗粒粒径可达  $2.00$  –  $4.00 \text{ m}$ ,在后续洪水和泥石流的冲击下,多以跳跃或翻滚的形式运动;官坝河主支沟曾大范围毁林开荒造田,水土流失严重,主要发生在坡度  $5^{\circ}$  –  $25^{\circ}$  的坡耕地和裸地,整个流域历史平均侵蚀模数达  $2\,575.97 \text{ t/km}^2 \cdot \text{a}$ 。

## 2.3 降雨激发泥石流

泥石流暴发往往取决于短历时雨强和前期土体含水状况等因素<sup>[8]</sup>,而泥石流暴发所需要的短历时雨强的大小,与泥石流暴发前补给物质的前期含水状况有关<sup>[9]</sup>。一般认为,前期降雨量越大,泥石流暴发所要求的短历时雨强越小。崩塌滑坡是官坝河流域泥石流的主要物质来源,前期降雨在其失稳破坏过程中具有重要作用,直接决定后续短时雨强激

发泥石流的性质和规模。

从1998-7-6特大型泥石流事件过程看,前期6月29日-7月5日的7天为连阴雨天(表1),前期累积降雨量达到了  $422.20 \text{ mm}$ ;在降雨初始阶段,土体干燥且吸水率大,降雨径流全部渗入土体内部,随着雨量增大且集中产流,表层土体达到饱和,地表发生蓄满产流,局部产生积水导致土体内孔隙水无法自由排泄,进而造成土体内部孔隙水压力剧增和抗剪强度骤降,促使原本不稳定斜坡处于失稳破坏的临界状态,虽然在7月3日和5日出现了无降雨和降雨较小时段,但由于时间较短,土体的含水率衰减较小,土体含水状态基本未发生较大变化,在7月6日短时雨强作用下暴发泥石流;从整个降雨过程发现,在7月6日泥石流暴发时刻(16时)的雨强仅为  $7.10 \text{ mm}$ ,而最大雨强( $9.50 \text{ mm}$ )出现时刻却在19时(图2),由此发现,在本次泥石流发生过程中,前期降雨对泥石流暴发的贡献作用更明显,短历时雨强则是激发临界失稳土体破坏产流,Tecca and Genevois<sup>[10]</sup>认为只是稍先于泥石流发生前短历时雨强和累计雨量对泥石流激发是必须的,但不是泥石流发生的充分条件;崔鹏等<sup>[11]</sup>对云南蒋家沟泥石流的观测研究发现,前期降雨在影响泥石流的各项降雨指标中贡献超过  $80\%$ ,对泥石流激发的短历时雨强大小有较大的影响。除此之外,土体特性、地形变化和人类活动等也是激发泥石流的重要因素。

表1 泥石流暴发前期有效降雨

Tab. 1 Antecedent effective rainfall of debris flow occurrence

日期	袁家山站(西昌) (海拔:1512m)
6月29日	46.00mm
6月30日	29.60mm
7月1日	78.50mm
7月2日	21.50mm
7月3日	0
7月4日	55.60mm
7月5日	0.10mm
前7日累计值	310.50mm
7月6日	61.50mm

## 3 泥石流活动情况及灾害效应

### 3.1 泥石流运动堆积特征

1998年7月6日官坝河发生的大型泥石流为

百年一遇,沟道内洪痕保留较为完整,现场测量 4 处代表性的典型横断面进行最大流速和流量的估算(图 1 和图 3)。由于坡度和沟床糙率及边界条件的差异,沿程物源补给不均匀,致使泥石流的流速流量是动态变化的,而且变化幅度较大,在不同沟段之间流速介于 1.00–8.00 m/s,从上游至下游流量变化于 78.54–820.28 m<sup>3</sup>/s,但有时泥石流流速与流量沿程的变化是不同步的(表 2)。A–A 到 B–B 断面段,由于靠近物源区,沟道比降大,重力侵蚀加剧,沿程大量物质裹挟和径流补给,泥石流的流速和流量均呈增长的趋势;在 B–B 到 C–C 断面段,处于大兴乡断陷盆地,沟道展宽,比降减小,流速开始呈现下降趋势,并随着能量降低,粗大固体物质产生停淤,流量减小;但在 C–C 断面附近虽然沟道比降仅为 35.00‰,流速仍达到 5.63 m/s,流量达到了最大

值 820.28 m<sup>3</sup>/s,主要是由于在该段有二大支流汇入其中(麻鸡窝河和新任寺河),又加上沟道经过宽阔大兴乡断陷盆地,沟道后又进入段的峡谷沟道,沟道束窄作用加快了泥石流流速,只是泥石流的性质可能由粘性泥石流转化为稀性泥石流;C–C 断面下游为宽浅泥石流滩地,出山口后断面展宽,流速降低,泥石流固体物质沿程停淤少,但由于此时稀性泥石流已经转化为高含沙水流,致使在入湖口处流量仍然较大。

对官坝河沿程沟道堆积物调查发现,堆积颗粒沿程具有明显分选性,泥石流流体中大部分粗颗粒(>2.00 mm)沿程停淤在出山口内,在入湖口处几乎消失,<2.00 mm 细颗粒含量则沿程逐渐增加,从出山口的象鼻寺附近到入湖口处,<2.00 mm 细颗粒含量由 81.40% 逐渐增加至 100.00%。在入湖口处

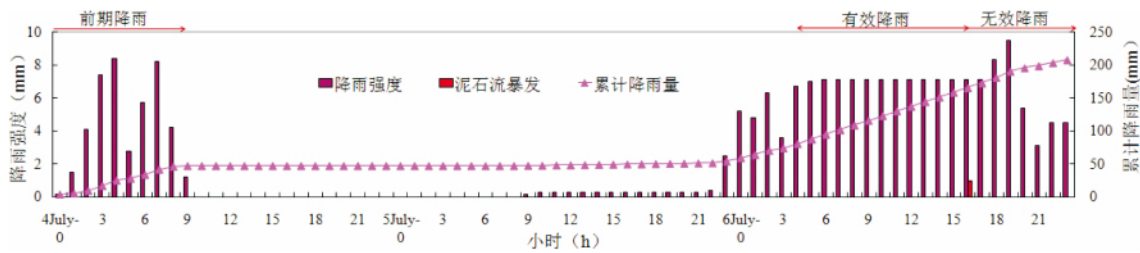


图 2 1998 年 7 月 6 日官坝河泥石流降雨过程  
Fig. 2 Rainfall process of Guanba River debris flow on 6 July 1998

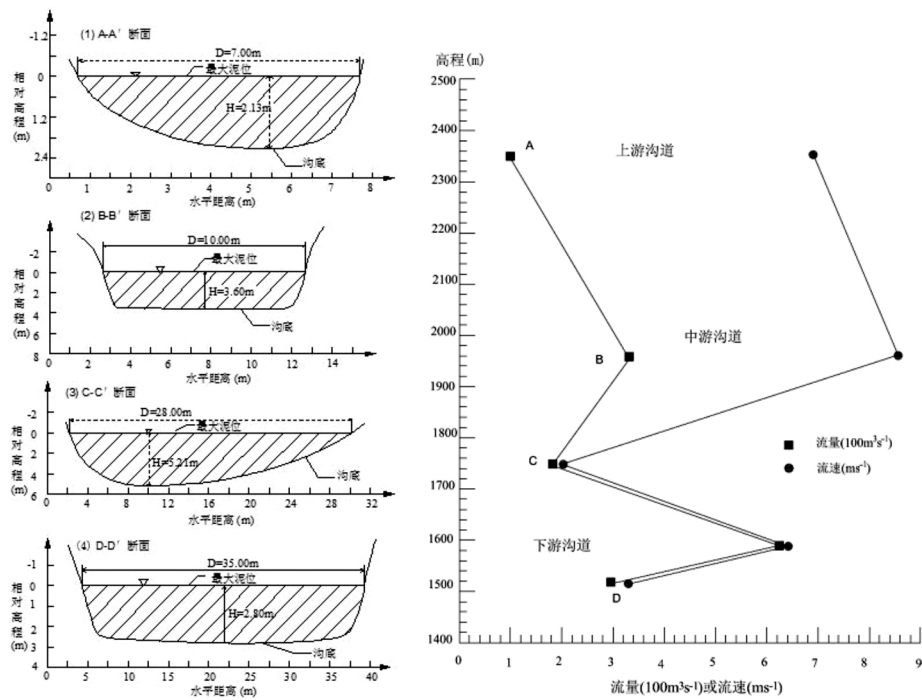


图 3 典型泥石流洪痕断面的流速流量变化图  
Fig. 3 Variation diagram of velocity and discharge along typical floodmark section of debris flow

表 2 典型断面参数和泥石流计算结果

Tab. 2 Typical section parameters and debris flow results

位置	海拔 (m)	距入海口距离 (km)	断面平均宽度 (m)	性质	流速 V (m/s)	断面面积 A (m <sup>2</sup> )	流量 Q (m <sup>3</sup> /s)
A - A	2354	19.05	7.00	粘性	6.23	12.60	78.54
B - B	1962	15.18	10.00	粘性	8.02	36.00	288.76
C - C	1584	5.85	28.00	稀性	5.62	145.83	820.28
D - D	1520	2.00	35.00	稀性	1.02	736.88	751.62

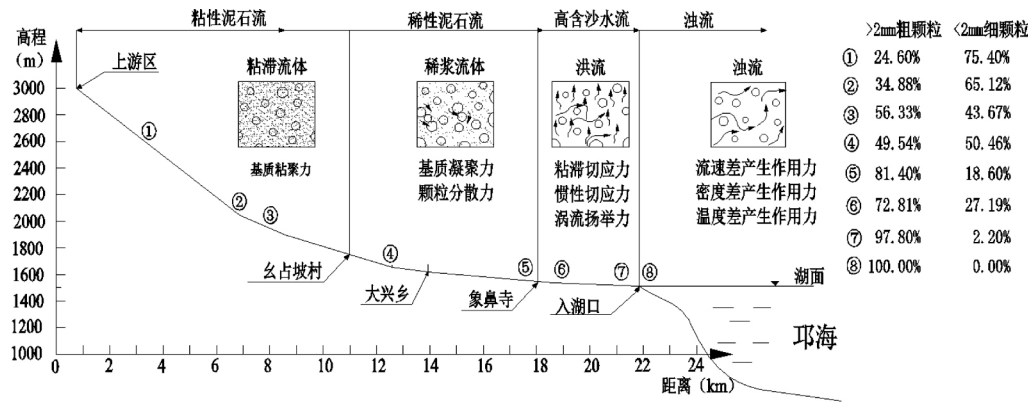


图 4 官坝河泥石流沿程流态性质变化图

Fig. 4 Variation chart of debris flow regime properties along the Guanba River channel

主要为 <2.00 mm 粉细砂,而大量的粘粒物质则以浊流的形式被输移至邛海深处,说明泥石流在形成、运动和堆积过程中流体性质在不断发生变化,随着沿程地形变化、冲淤平衡以及支沟汇入等因素变化,粘性泥石流、稀性泥石流、高含沙水流以及浊流之间在一定条件下将发生相互转化和过渡(图 4)。

3.2 泥石流形成模式分析

官坝河泥石流形成模式可归纳为 3 种,分别为沟道侵蚀启动型、滑坡液化启动型和地震滑塌溃决型,其中滑坡液化启动型泥石流暴发频率高,地震滑塌溃决型泥石流规模较大。

(1) 沟道侵蚀启动型

官坝河中上游沟道比降大,比降变化于 83.33‰-463.88‰,降雨形成径流快速汇集且具有较强的冲刷侵蚀能力,致使沟道内细颗粒首先启动,形成高含沙水流和稀性泥石流。随着沿程水流汇入,流速和流量增大,高速紊动水流冲刷冲击粗颗粒物质,致使其发生滚动、跃移、漂浮现象,最终形成大规模泥石流流体。在此过程中,泥石流不断冲刷刮削沟道堆积物,还对沟岸产生淘蚀冲刷,致使大量物质掺混进入泥石流体内(图 5a)。

(2) 滑坡液化启动型

官坝河区域降雨丰富,且降雨量较大,又加上流

域独特的砂泥岩地层,山坡松散固体物质在降雨渗透侵蚀作用下,土体逐渐饱和且强度降低,斜坡运动破坏过程中直接液化或流态化启动形成泥石流,当其堆积于河道内将阻断河道形成短暂性堰塞体,随着水流汇集和能量蓄积,堰塞体被侵蚀溃决形成大规模泥石流灾害。如 1998 年 7 月 6 日山洪泥石流暴发过程中,官坝河支沟新仁寺河曾发生土坡液化启动型泥石流,土坡液化形成泥石流流体冲击对岸形成高约 20.00m 米的堰塞坝,在随后发生溃决形成泥石流,对下游产生严重危害(图 5b)。

(3) 地震滑塌溃决型

强烈地震活动诱发沟道两岸滑坡灾害常常是随机的,在陡峭峡谷里地震滑坡多呈簇状密集分布,由于峡谷沟段内没有足够空间停积滑坡物质,滑坡体常堵塞河道而形成滑坡坝,挤压河流主线冲刷对岸山坡,并改变原有顺直沟道呈“S”型,这种现象在汶川地震过程后大量出现<sup>[12]</sup>。官坝河流域受则木河和安宁河断裂段控制,地震诱发型滑坡发育,在官坝河流域大湾子沟道段内出现典型的“S”型河道,这可能为地震诱发滑坡淤堵河道所形成(图 5c)。该类泥石流为多处滑坡淤堵河道并溃决所形成,具有一处溃决连续暴发的连锁效应,常常诱发大规模泥石流灾害。



3.3 泥石流对邛海的淤积效应

官坝河山洪泥石流频发,对下游村镇造成严重危害,同时大量泥沙被携带进入邛海,在入湖口产生泥沙淤积(表 3 和图 6)。对照 1998 年、2006 年和 2009 年官坝河入湖口的湖岸线地形和泥沙淤积厚

度<sup>[13]</sup>,自 1998 年至今入湖口总淤积量为  $181.08 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,湖岸线被推进 665 m,平均每年推进 55.42 m,淤积速率为  $15.09 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{年}$ ;其中 1998 年 7 月 6 日官坝河暴发百年一遇的山洪泥石流灾害,仅当年泥沙就向湖内淤积了约 172 m,淤积量达到 68.98

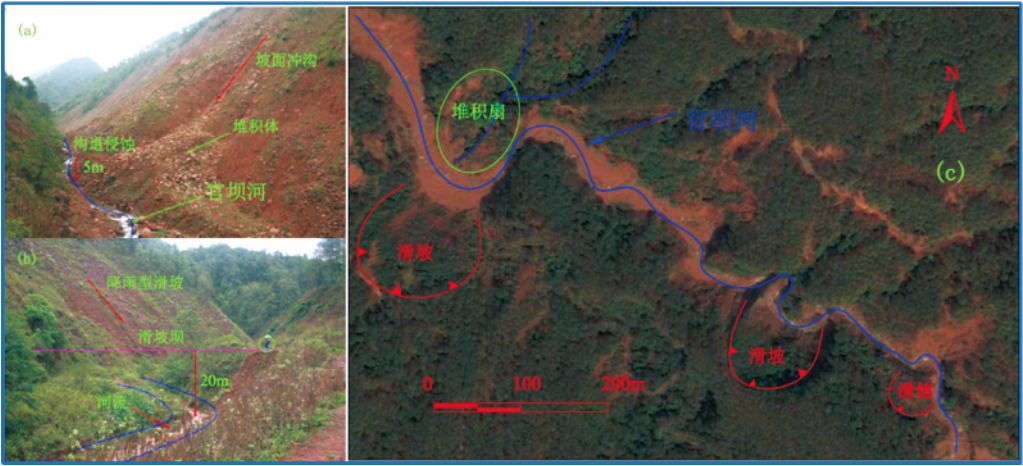


图 5 泥石流形成模式示意图  
Fig. 5 Sketch map of debris flow formation mode

表 3 官坝河入湖口泥沙淤积情况

Tab. 3 Sediment deposition at Guanba River estuary

时间	淤积面积( km <sup>2</sup> )	淤积长度( m)	平均深度( m)	平均每年淤积体积( 万 m <sup>3</sup> )	淤积量( 万 m <sup>3</sup> )
98 年	0.09	172.00	7.75	68.98	68.98
99 年 - 06 年	0.10	359.00	9.75	12.43	99.45
07 年 - 10 年	0.01	124.00	11.50	4.14	12.65
合计	0.20	665.00	/	/	181.08

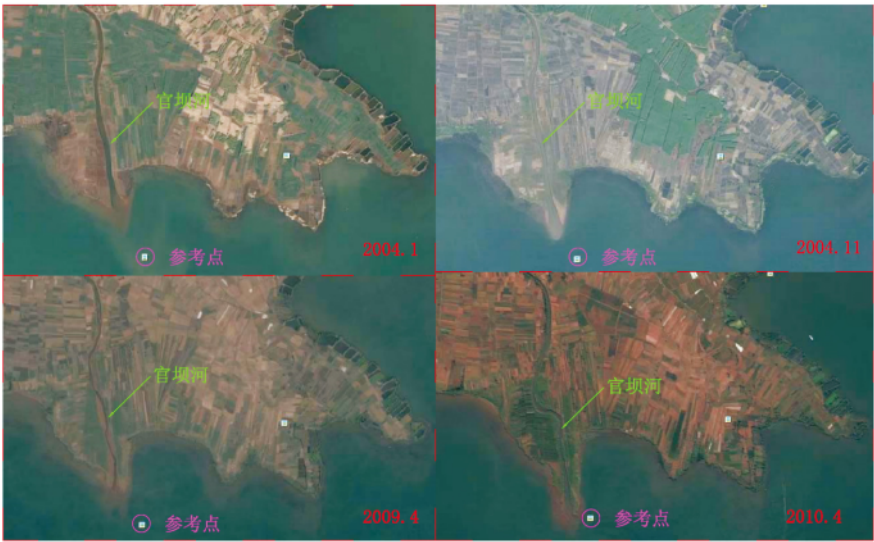


图 6 不同时期官坝河入海口泥沙淤积对比图  
Fig. 6 Comparison chart of sediment deposition in Guanba River estuary at different periods

$\times 10^4 \text{ m}^3$ ; 1999 – 2006 年湖岸线被推进 359 m, 入湖淤积量为  $99.45 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 平均每年推进 44.87 m, 淤积速率为  $12.43 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{年}$ ; 2007 – 2010 年湖岸线被推进 124 m, 入湖淤积量为 12.65 万  $\text{m}^3$ , 平均每年推进 41.33 m, 淤积速率为  $4.14 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{年}$ 。随着近些年来邛海流域采取了退耕还林等保护措施, 泥沙淤积量和淤积速率呈减少趋势。

对比 1988 年和 2003 年邛海水下地形图(图 7) 2003 年邛海湖底地形起伏大, 并在入湖口出现一个由北向南延伸的水下堤, 其为官坝河泥沙淤积形成, 从北向南水下堤由窄到宽, 水下堤长 1000.00 m, 平均高 2.00 m, 体积约为  $30.00 \times 10^4 \text{ m}^3$  [3], 推测水下堤为 1998 年以来官坝河山洪泥石流所形成; 高含沙洪水和泥石流携带泥沙进入邛海后, 还将在邛海底部以浊流形式继续运动, 形成水下湖底扇(图 7b)。因此, 除了山洪泥石流对官坝河入湖泥沙淤积具有控制作用, 平水年水流挟沙对湖底淤积也具有重要贡献, 因为平水年的不同浓度的含沙水流, 在水下以浊流形式继续在水下运动, 这也是更细的粉粘粒在湖底继续前进, 形成湖积垄和湖底扇的原因。

## 4 泥石流主要影响因素及发展趋势

### 4.1 地震活动对山洪泥石流发展的长久控制效应

滑坡物质常常被认为是重要的泥沙物质来源, 控制着流域的侵蚀产沙和泥石流规模, 当前官坝河流域内崩塌滑坡是泥石流的主要补给源, 总方量可

达  $116.53 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 这些滑坡强烈受断裂带控制, 呈现明显的地震激发特征, 沿 3 条断裂带呈簇状或集群状分布, 推测为 1850 年 M7.5 西昌大地震所激发 [7]; 大地震诱发滑坡具有长期活动性 [15–16], 将在很长一段时间影响泥石流活动和河流产沙量 [17–18], 1850 年 M7.5 大地震激发滑坡的长期活动性及影响流域产沙效应至少可达到 160 年 [7]。强震过后大量崩塌滑坡堆积物质, 震后一段时间内在降雨作用下呈现输移控制型泥石流, 这些松散固体物质部分被输移走, 部分在重力和降雨渗透作用下逐渐固结稳定, 要诱发这些固体物质重新复活启动则需要更大的暴雨强度, 泥石流活动将由输移控制型向松散固体物质控制型转变 [19]。官坝河山洪泥石流活动本应自 1850 年大地震以来呈降低趋势, 回归到地震前的松散固体物质控制型, 然而 1850 年大地震后以来官坝河平均每年却暴发 2–5 次山洪泥石流, 对邛海产生严重泥沙淤积灾害, 这可能是历史大地震控制了该区域的灾害类型与分布格局, 而 1850 年以来流域附近频繁地震诱发了原本大量地震滑坡复活和不稳定斜坡失稳, 为泥石流的形成提供持续丰富的松散物源, 促使输移控制型泥石流的活动性不断增强, 并延长了其持续时间。

邛海区域构造稳定性主要受安宁河断裂及则木河断裂控制, 地震活动性强且中强震频发, 研究区附近大地震周期大约为 140 年左右, 附近地区再次发生地震级  $M > 6.7$  的地震的可能性是存在的 [20]; 另据邛海流域附近 150.00 km 范围内 1970 – 2014 年间的的历史资料统计发现, 此期间发生震级  $2.0 \leq M \leq$

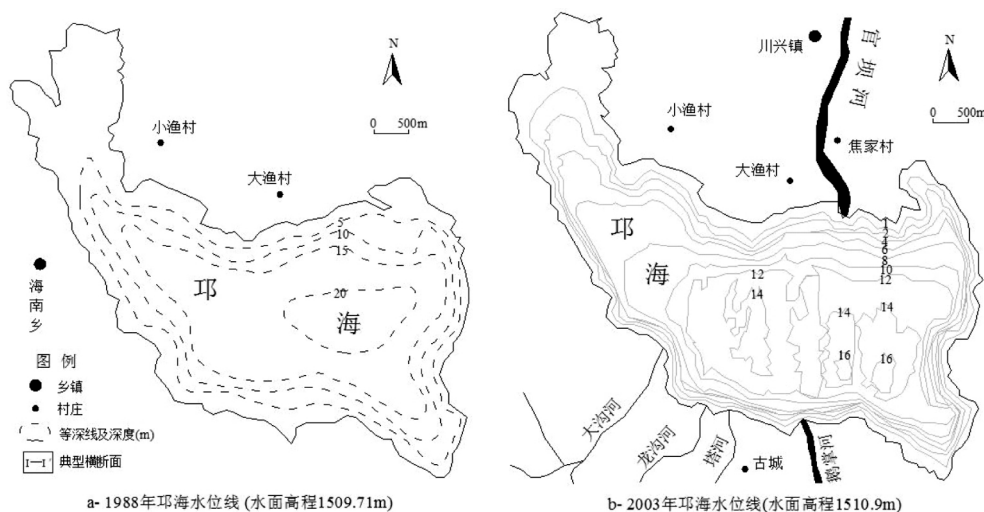


图 7 邛海湖盆不同年份地形图(改自邛海流域环境规划总报告 [14])

Fig. 7 Underwater topographic maps of Qionghai Lake at different periods

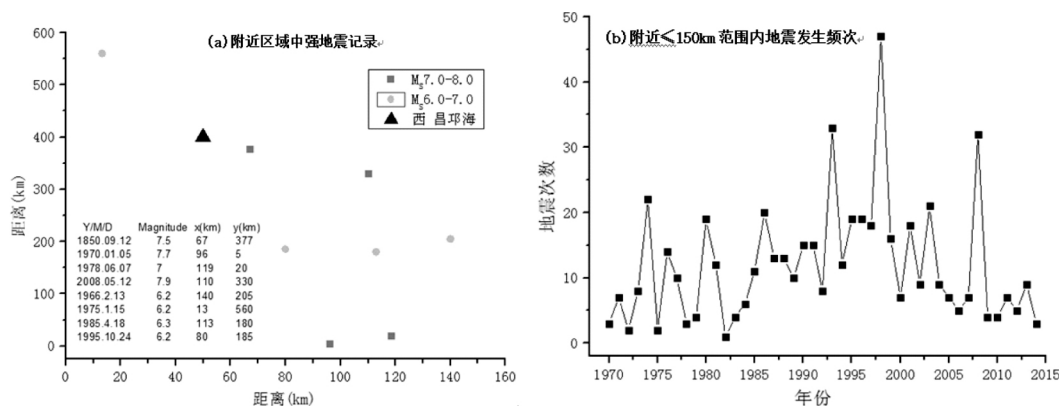


图8 邛海附近地震发生记录

Fig. 8 Earthquake occurrence record near Qionghai Lake

5.0 地震共 533 次,且近年来呈增加的趋势(图 8)。官坝河大量斜坡体在频繁的地震动反复扰动后会发生岩土体的累积变形,促使原有裂缝扩展和新裂缝形成而是原斜坡体成为不稳定斜坡体,特别是地震和暴雨同时发生时可能继续发生滑动破坏,成为泥石流的潜在物源,将极大增加泥石流暴发的可能性。

#### 4.2 气候变化对山洪泥石流暴发的波动性响应

邛海流域每年均有形成灾害的天气过程,在雨季土壤过湿的状态下连续 3 日降水总量  $\geq 50$  mm,就有可能发生山洪泥石流灾害<sup>[13]</sup>。雨量较多的连阴雨强烈影响前期土壤含水量,短历时暴雨将直接激发泥石流。据历史资料统计,在 1970-2012 年间邛海流域共发生地质灾害事件 521 次,其中滑坡泥石流灾害发生 249 次(13 个年份内),洪水灾害发生 67 次(6 个年份内)(图 9),滑坡泥石流发育主要受频繁地震和极端降雨的时空耦合控制,区域地震活动控制物源的供给形式和数量,降雨作用直接激发土体起动形成泥石流,官坝河泥石流活动性将随气候波动变化呈周期性暴发,频繁地震活动和极端暴雨耦合下将极大增加泥石流暴发的规模和频率。

统计分析邛海流域 1951-2009 年间降雨资料,发现在 1951-1980 年间年平均降雨量为 1 013.10 mm,1980-2009 年间年均降雨量为 1 158.90 mm,年均降雨量增加了 145.80 mm,这可能因为年均降雨量  $> 1100.00$  mm 的多雨年数量呈现多-少-多的增多趋势,年均降雨量  $< 890.00$  mm 的少雨年数量则呈现少-多-少的变化过程(图 10b)。另据 1980~2009 年近 30 年的逐日降水资料统计,雨日数总体呈下降趋势,30 年累计减少 15d,而年均降雨量、雨季总降雨量仍均呈不同幅度的上升趋势(图

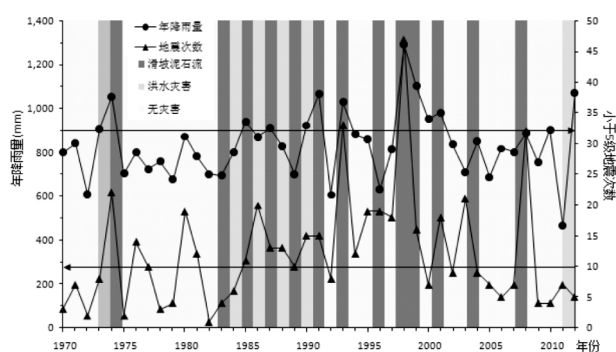


图9 邛海流域地质灾害类型与地震和降雨耦合关系曲线

Fig. 9 Coupling relationship of geological disaster types and seismicity and rainfall

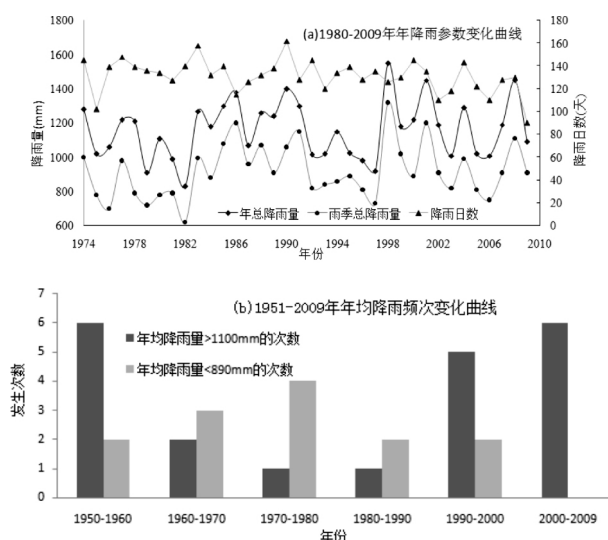


图10 邛海附近降雨量变化曲线

Fig. 10 Variation chart of rainfall near Qionghai Lake

10a) 在过去 30 年里年均降雨量增加了约 54.00 mm,雨季总降雨量累计增多约 90.00 mm。由此可知,邛海流域年均降雨量和雨季总降雨量均呈上升



表 4 官坝河人口统计情况  
Tab.4 Population statistics for Guanba River basin

区域	辖区	位置	总人口 (人)	非农业	农业	人口密度 (人/km <sup>2</sup> )
				人口(人)	人口(人)	
官坝河	川兴镇	山前平原区	8 990	230	8 760	350
	大兴乡	中低山区	13 610	/	6 710	179
	普诗乡	中高山区	/	1 300	35	
	红星乡	中高山区		/	5 600	129
总计	/	/	22 600	230	22 370	165

趋势,又加上近年来多雨年数量不断增多,官坝河流域未来诱发山洪泥石流灾害的天气过程增多,泥石流的规模和频率将继续呈增大趋势。

4.3 人类活动对山洪泥石流发生的短期促进作用

自 20 世纪初至今,邛海流域人口数量成倍增长,其中 1937 年总人口为 13 000 人,1950 年约为 25 000 人,而 2010 年则达到了 50 000 人左右,人口密度达到 126 人/km<sup>2</sup>。官坝河作为邛海流域最大支沟,包含西昌市川兴镇、大兴乡、红星乡以及昭觉县的普诗乡的部分村庄(表 4),流域内人口约为 22 600 人,人口密度达到 165 人/km<sup>2</sup>,约占邛海流域总人口的 46%,其中,山区农业人口达到 13 610 人,人口密度达到 114 人/km<sup>2</sup>。

由于人口压力增大和经济发展需要,山区开展大范围毁林开荒和陡坡耕种等不合理活动,造成坡面裸露、水土流失加剧,山洪泥石流灾害频发,陈宁生等<sup>[1]</sup>研究指出近年来邛海山洪泥石流灾害与频繁人类活动关系密切。在 40 年代官坝河流域植被覆盖率仅为 16.3%,50 年代开展大规模飞播造林和植树造林活动,植被覆盖率达到 48.90%,80 年代随着农业经济快速发展,毁林开荒加剧,植被退化严重,植被覆盖率仅为 33.16%,近年来随着政府采取退耕还林政策和水土保持措施,截止到 2010 年官坝河流域的植被覆盖率达到 47.62% 左右,官坝河流域植被覆盖率逐渐转好,生态环境得以快速恢复<sup>[13]</sup>。然而,由于人多地少矛盾持续存在,短时间内不合理人类活动仍将继续,又加上植被的水保功能和生态效益具有滞后性,官坝河主沟及支沟水土流失仍然较严重,当前官坝河上游和中下游区侵蚀模数分别为 3 841.92 和 3 537.90 t/ km<sup>2</sup> · a,新任寺河和麻鸡窝河侵蚀模数分别为 3 317.35 和 2 176.88 t/ km<sup>2</sup> · a<sup>[14]</sup>,大量泥沙进入沟道必将成为泥石流重要补给源,进而加速邛海淤积。

5 结论

官坝河为邛海流域最大支沟,山洪泥石流暴发频繁且规模较大,形成运动过程复杂,逐级递减的沟道比降加速泥石流的形成运动和泥沙输移,充沛的前期降雨和短历时的强降雨共同诱发泥石流,多种形式固体物质(重力侵蚀、沟道侵蚀和面源侵蚀)的沿途补给放大了泥石流的流量;泥石流形成模式可归纳为沟道侵蚀启动型、滑坡液化启动型和地震滑塌溃决型,其中滑坡液化启动型泥石流暴发频率高,地震滑塌溃决型泥石流规模较大;官坝河山洪泥石流对邛海泥沙淤积严重,大量泥沙不仅堆积在河口形成三角洲,大量粉粘粒进入邛海形成水下堤和湖底扇。

历史大地震控制邛海流域的灾害类型和分布格局,震后频繁地震活动和极端降雨事件的时空耦合对原本脆弱的地质环境进行持续扰动,延长了输移控制型泥石流的持续时间,不合理人类活动破坏了良好生态本底,短期内加速了山洪泥石流暴发,预测未来频繁的地震、强降雨和人类活动的耦合将增加官坝河泥石流暴发的可能性。目前官坝河流域内修建拦砂坝工程已初见成效,并在入湖口开发成生态湿地公园,然而对坡面侵蚀的细颗粒物则难以有效拦截,故建议对官坝河流域采取生物防护和工程治理相结合的综合治理模式,同时加强流域规划管理和生态保护的宣传培训等行政法治管理。

参考文献(References)

[1] CHEN Ningsheng, CHEN Mingli, LI Jun, et al. Effects of human activity on erosion, sedimentation and debris flow activity - A case study of the Qionghai Lake watershed, southeastern Tibetan Plateau, China[J]. Holocene, 2015, 25(6): 973 - 988  
[2] 何杰, 邓虎, 胡桂胜. 邛海山洪泥石流淤积特征与趋势分析[J].

- 成都理工大学学报(自然科学版) 2012 39(3): 317–322 [HE Jie, DENG Hu, HU Guisheng. Silt deposit characteristics and trend analysis of torrential flood debris flow in Qionghai Lake, Xichang, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology( Science & Technology Edition), 2012 39(3): 317–322]
- [3] 余斌,王士革,章书成,等. 鹤掌河泥石流对四川邛海影响的初步研究[J]. 湖泊科学, 2006, 18: 57–62 [YU Bin, WANG Shige, ZHANG Shucheng, et al. Preliminary study on the effect of debris flows from Goose Foot River on Lake Qionghai, Sichuan, China [J]. Journal of Lake Sciences, 2006, 18: 57–62]
- [4] 余斌,章书成,王士革. 四川西昌邛海的浊流沉积初探[J]. 沉积学报, 2005 23(4): 559–565 [YU Bin, WANG Shige, ZHANG Shucheng. A preliminary study on the effect of turbidity currents in Lake Qionghai, Sichuan, China [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2005 23(4): 559–565]
- [5] DAI Fuchu, LEE C. Frequency – volume relation and prediction of rainfall – induced landslides [J]. Engineering Geology, 2001, 59(3): 253–266.
- [6] JAKOB M, BOVIS M, ODEN M. The significance of channel recharge rates for estimating debris – flow magnitude and frequency [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2005, 30: 755–766.
- [7] WEI Xueli, CHEN Ningsheng, CHENG Qiangong, et al. Long – term activity of earthquake – induced landslides: A case study from Qionghai Lake Basin, Southwest of China [J]. Journal of Mountain Science, 2014, 11(3): 607–624.
- [8] COSTA J E. Physical geomorphology of debris flows. In: Costa JE, and Fleischer PJ, (eds) Developments and Applications of Geomorphology [M]. New York: Springer – Verlag, 1984: 269–317.
- [9] 陈景武. 云南东川蒋家沟泥石流暴发与暴雨关系的初步分析 [C]. 全国泥石流学术论文集. 1980: 93–99 [CHEN Jingwu. Preliminary analysis of relationship between rainstorm and debris flows in Jiangjia gully, Dongchuan, Yunnan [C]. Papers of Institute of Glacier and Frozen Earth, 1980 4: 93–99]
- [10] TECCA P R, GENEVOIS R. Field observations of the June 30, 2001 debris flow at Acquabona (Dolomites, Italy) [J]. Landslides, 2009 6: 39–45.
- [11] 崔鹏, 杨坤, 陈杰. 前期降雨对泥石流形成的贡献——以蒋家沟泥石流形成为例[J]. 中国水土保持科学, 2003, 1: 11–15 [CUI Peng, YANG Kun, CHEN Jie. Relationship Between Occurrence of Debris Flow and Antecedent Precipitation: Taking the Jiangjia Gully as An Example [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2003, 1: 11–15]
- [12] CUI Peng, CHEN Xiaoqing, ZHU Yingyan, et al. The Wenchuan earthquake (May 12, 2008), Sichuan province, China, and resulting geohazards [J]. Natural Hazards 2011 56(1): 19–36.
- [13] 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所. 邛海流域官坝河山洪泥石流防治工程勘察报告[R]. 四川, 2010 [Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS. Geotechnical investigation report of flood and debris flow in the Guanba River of Qionghai Lake basin [R]. Sichuan 2010]
- [14] 云南省环境科学研究院. 邛海流域环境规划总报告[R]. 云南, 2004 [Yunnan Institute of Environmental Science. Environmental planning report of Qionghai Lake basin [R]. Yunnan 2004]
- [15] LIN C. W, LIU S. H, LEE S. Y, et al. Impacts of the Chi – Chi earthquake on subsequent rainfall – induced landslides in central Taiwan [J]. Engineering Geology 2006 86(2): 87–101.
- [16] 黄润秋. 汶川地震地质灾害后效应分析[J]. 工程地质学报, 2011, 19(2): 145–151 [HUANG Runqiu. After effect of geohazards induced by the Wenchuan earthquake [J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19(2): 145–151]
- [17] 崔鹏, 庄建琦, 陈兴长, 等. 汶川地震震后泥石流活动特征与防治对策[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2010, 42(5): 10–19 [CUI Peng, ZHUANG Jianqi, CHEN Xingchang, et al. Characteristics and countermeasures of debris flow in Wenchuan area after the earthquake [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition) 2010 42(5): 10–19]
- [18] KOI T, HOTTA N, ISHIGAKI I, et al. Prolonged impact of earthquake – induced landslides on sediment yield in a mountain watershed: the Tanzawa region, Japan [J]. Geomorphology, 2008, 101(4): 692–702.
- [19] BOVIS M. J, JAKOB M. The role of debris supply conditions in predicting debris flow activity [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1999 24(11): 1039–1054.
- [20] 甘遐荣, 林向, 何国涛. 四川西昌附近地震危险性初探[J]. 地震研究, 1982 2(5): 179–189 [GAN Xiarong, LIN Xiang, HE Guotao. Preliminary study of earthquake risk near Xichang, Sichuan [J]. Journal of Seismological Research, 1982 2(5): 179–189]

## Disaster Characteristics and Development Trend of Guanba River Debris Flow in the North Shore of Qionghai Lake , Sichuan

WEI Xueli<sup>1\*</sup> , CHEN Ningsheng<sup>2</sup> , LI Bin<sup>1</sup> , ZHAO Huaiyi<sup>1</sup>

( 1. Academy of Transportation planning Surveying and design in Xinjiang , Urumqi 830006 , China;

2. Institute of Mountain Hazards and Environment , CAS , Sichuan , Chengdu 610041 , China)

**Abstract:** Guanba River is the largest debris flow gully around Qionghai Lake basin , and recently floods and debris flows occurred frequently which caused severe sediment deposition disaster in Qionghai Lake. Based on survey of hundred year debris flow occurred in July 6 , 1998 , the debris flow movement process was analyzed in the Guanba River. The effect of debris flow on sediment deposition of Qionghai Lake was discussed , and the main influencing factors and development trend of debris flows were revealed. The results showed that different kinds of source materials are supplied in abundant , and the occurrence frequency of debris flows were often high with great scale. Due to longer gully and larger gradient along the channel , debris flow velocity and discharge usually changed greatly , and the transformation process of flow regime was complicated. The influence of floods and debris flows on sediment deposition of Qionghai Lake was very serious , and a large number of sediments was not only accumulated on the river estuary , but also transported into central lake. The coupling of frequent earthquakes , heavy rainfall and unreasonable human activities triggered debris flows , and it was forecasted that the probability of debris flow initiation will significantly increase in Guanba River. The results can provide reference foundation for river planning management and engineering treatment , and contribute to alleviate sediment deposition disasters of Qionghai Lake.

**Key words:** Guanba River; Qionghai Lake; flood and debris flow; sediment deposition; influence factor; development trend