

# 官坝河泥石流发育特征及对四川邛海的泥沙淤积效应

魏学利<sup>1,2</sup>, 陈宁生<sup>3</sup>

- (1. 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所, 乌鲁木齐 830002;  
2. 新疆维吾尔自治区交通规划勘察设计研究院, 乌鲁木齐 830006;  
3. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041)

**摘要:** 晚新生代以来青藏高原的强烈隆升造成青藏高原东南边界形成大量的构造断裂, 同时构造拉伸和挤压作用也塑造了许多构造断陷湖泊。近年来很多湖泊的面积和深度逐渐减小, 对当地生态环境和社会经济发展带来极大影响。选取青藏高原东南缘的西昌邛海流域为研究区, 探讨邛海北岸官坝河泥石流发育特征及对邛海的泥沙淤积效应。研究发现: ① 官坝河泥石流暴发频率高且规模大, 崩塌滑坡和面源侵蚀是泥石流最主要的固体物质来源, 动储量约为 428.03 万  $\text{m}^3$ ; ② 山洪泥石流的频繁发生是邛海泥沙淤积的主要原因, 而频繁地震和强降雨耦合作用控制着区域山洪泥石流活动, 预测邛海流域泥石流活动仍将频繁发生, 泥沙淤积问题更加严重; ③ 自 1950 年以来, 邛海流域泥沙淤积速率约为 17.09 mm/a, 如按当前淤积速率推算, 邛海的寿命将仅约为 600 年左右; ④ 建议对官坝河流域实施工程治理和生物防护相结合的综合治理, 并加强流域管理和宣传培训等行政法治管理。该成果可为邛海流域综合规划管理和防灾减灾提供参考依据, 有助于揭示青藏高原东南缘湖泊逐渐萎缩的真正原因和控制要素。

**关键词:** 青藏高原; 西昌官坝河; 泥石流; 四川邛海; 泥沙淤积; 构造断陷湖泊

DOI: 10.11821/dlxb201801007

## 1 引言

湖泊是地球表面上暂时存在的地质体, 不管湖泊是由哪一种强烈地质事件, 如火山、地震或冰川作用形成的, 如果当其处于区域构造相对稳定时期, 沉积作用将大于构造沉降作用<sup>[1]</sup>, 湖泊将在适当的时候被沉积物所填充而转变为陆地<sup>[2]</sup>。泥石流是一个在高地势起伏环境下的地貌过程, 泥石流在山坡和沟道网络之间形成一个重要的链接, 他们从山坡携带大量松散物质到邻近沟道<sup>[3-5]</sup>, 当其流入到湖泊中时, 泥石流对湖泊形态的塑造扮演重要角色。世界上有众多著名的海岸和湖泊, 不同程度受到泥石流淤积影响, 如 1999 年委内瑞拉瓦加斯乌里亚发生的大规模泥石流流入加勒比海, 不仅将海岸线向海中推进了 200 m, 而且泥石流以浊流形式在加勒比海流动, 大量的泥沙沉入海底, 细颗粒泥沙悬浮在海中并随海流运动<sup>[6]</sup>。中国云南滇池流域河流众多, 洪水携带泥沙进入滇池湖盆, 使得滇池湖底 40 年 (1960-2000 年) 中升高约 48 cm<sup>[7]</sup>; 还有四川云南交界的泸沽湖、云南省大理洱海和昆明的抚仙湖等受周围河流和泥石流沟的影响, 每年有大量泥沙

收稿日期: 2017-04-12; 修订日期: 2017-07-25

**基金项目:** 中国沙漠气象科学研究基金项目(Sqj2015015); 国家自然科学基金青年基金项目(41602331); 中国博士后科学基金项目(2016M602951XB) [Foundation: Desert Climatic Science Research Foundation of China, No.Sqj2015015; National Science Foundation for Young Scholars of China, No.41602331; Postdoctoral Science Foundation of China, No.2016M602951XB]

**作者简介:** 魏学利(1981-), 男, 天津蓟县人, 博士, 工程师, 主要从事公路地质灾害与特殊岩土研究。

E-mail: weixl8115@126.com

在湖中沉积<sup>[8]</sup>。泥石流不仅可在地面产生淤积,当其汇入湖泊时,泥石流流体在水下也将继续以其他形式运动,这也是大多数湖泊平均水深逐渐变浅的真正原因。因此,泥石流泥沙淤积作用对湖泊的演化和消亡过程具有至关重要作用。

邛海作为青藏高原东南边界的半封闭构造断陷湖,被称为四川西昌市的“母亲湖”。由于其所处的特殊地理环境和独特气候背景,邛海流域山洪泥石流频发,泥沙淤积问题异常严重,这为研究青藏高原东南缘湖泊的演化与消亡过程和原因提供天然的场所。本文以邛海北岸的官坝河流域为研究对象,在对泥石流发育特征分析基础上,探明泥石流对邛海的泥沙淤积灾害效应,并提出有效减少泥沙淤积邛海的防治建议,为邛海流域管理规划和防灾减灾工作的开展提供参考依据和支撑,不断提高邛海的生命空间尺度和旅游服务价值。

## 2 研究区背景

邛海位于四川省西昌市东南郊约 4 km 处,属史前地质构造运动断陷所形成,邛海流域三面环山,仅西侧出口与安宁河谷相连;邛海形状如蜗牛,南北最长约为 10.3 km,东西最宽约为 5.6 km,流域面积 307.64 km<sup>2</sup>,水面面积约 27 km<sup>2</sup>,蓄水量约为 2.93×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>,平均水深约为 10.95 m,湖周有多条支沟汇入,其中以北岸的官坝河流域面积最大(图 1)。

官坝河流域面积约为 137.24 km<sup>2</sup>,平均纵比降 64.4‰,主沟长 24.12 km,在入湖口处高程为 1510 m,流域相对高差达到 1754 m。官坝河流域水系发育,主沟道形态呈串珠状,宽谷和峡谷相间分布,其中张巴寺河源头至大湾子为高山峡谷地貌,地形起伏较大,沟谷呈“V”字形,沟床纵比降变化于 83.3‰~463.8‰;大湾子至象鼻寺段为低山宽谷区,发育游荡型河流,坡度较缓,比降为 13.5‰~83.3‰之间;象鼻寺至入湖口段为宽浅河谷区,地势较为平坦,比降仅为 13.5‰(图 2),逐级递减的沟道比降有利于促使泥石流的运动和泥沙输移。

研究区属于中亚热带高原山地气候,雨量充沛,干湿季分明,光照充



图 1 邛海流域水系图

Fig. 1 Hydrographical chart of Qionghai Lake basin

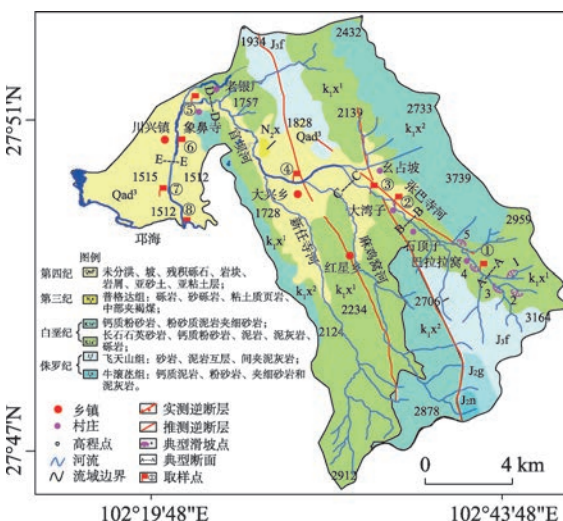


图 2 官坝河流域地质构造图

Fig. 2 Geologic structure diagram of Guanba River basin

足,多年平均气温16.9℃,多年均降雨量为1013.5 mm,5-10月的降雨量为953.3 mm,占年降雨量的93%,多年平均径流深480 mm,多年平均流量1.696 m<sup>3</sup>/s。

研究区位于安宁河断裂与则木河断裂交界处,地质构造复杂,地层岩性主要以砂泥岩为主,地震活动频发,官坝河流域共分布三条逆断层,走向呈北西—南东向,倾角40°~50°左右,分别沿各支沟沟谷附近展布,地质破碎,崩塌滑坡发育,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。

### 3 官坝河泥石流发育特征

官坝河历史上山洪泥石流灾害严重,每年都不同程度暴发山洪泥石流灾害,多年气象灾害资料显示流域平均每年发生3~4次山洪泥石流灾害。据实地调查,1998年7月6日官坝河暴发泥石流规模最大,至少为百年一遇,当时主沟和支沟均暴发泥石流,水深约4~5 m,水中大石块碰撞发生巨大声响,沟道内局部段呈现阵性特征,持续将近2个小时,造成千亩农田受淹,大量泥沙淤积邛海。

#### (1) 物源供给条件

破碎岩体、冲洪积物和崩坡积物是泥石流激发的主要物源<sup>[9-10]</sup>,物源供给条件对泥石流的频率和规模起着重要的作用<sup>[11]</sup>。官坝河泥石流物源主要来自以下四个方面:一是沟坡松散崩滑体,二是沟道冲洪积物,三是沟岸老泥石流堆积体,四是面源侵蚀。据实地调查发现,整个流域共发育98处崩滑体,物源总方量可达161.50×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>,主要分布于流域中上游的陡峭山坡,具有近期潜在活动性的浅层扰动滑坡和崩塌的堆积方量约为116.53×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>;沟道冲洪积物断断续续地分布在主支沟的中下游河床比降为2%~5%区域,堆积方量约为42.79×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>,堆积物表面被“粗化”,最大颗粒直径可达1~2 m;官坝河流域分布有地质时期暴发形成的老泥石流堆积物,以高台地形式分布在大湾子—幺占坡段的主沟两岸,呈半胶结状态,岸坡陡立,高度变化于5~15 m之间,两岸老泥石流堆积方量约为349.73×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>;面源侵蚀主要分布于流域的上游坡度在5°~25°区域,主要为当地居民开荒耕地和砍伐树木形成的裸露坡体,据实地调查,官坝河流域内裸地面积为7.82 km<sup>2</sup>,占整个流域的5.7%,源区裸地土层平均厚度约为0.9 m,坡面侵蚀量达到年686.26×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>,直接参与水土流失的表层土厚度约为0.5 m,直接参与泥石流的动储量约为311.5×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>。由此可知,官坝河流域内松散固体物源总量达1240.28×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>,其中崩塌滑坡和面源侵蚀是官坝河泥石流最主要的固体物质来源,活动物源主要为具有潜在活动性的崩滑体和陡坡浅表层松散土体,相应动储量约为428.03×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>。

#### (2) 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>[10]</sup>,而泥石流暴发所需要的短历时雨强,与泥石流暴发前补给物质的前期含水状况有关<sup>[12]</sup>。前期降雨越大,补给物质就越接近饱和,泥石流暴发所要求的短历时雨强就越小。分析1998年7月6日官坝河泥石流激发降雨过程(图3),在泥石流发生之前的7天内均为连阴雨天,前期累积降雨量达到了422.2 mm,虽然降水量较大,但由于刚开始土体吸水率大,降雨全部深入至土体内部,随降雨量增大造成表层土体达到饱和,并出现蓄满产流,致使土体内孔隙水无法自由排泄而孔隙水压力剧增,进而使源区松散土体处于破坏的临界状态,虽然中间出现短暂无降雨时段,但土体的含水率衰减较小,含水率基本维持平衡状态<sup>[13]</sup>,在7月6日短历时雨强激发下形成泥石流灾害;泥石流暴发的雨强仅为7.1 mm,而当日最大



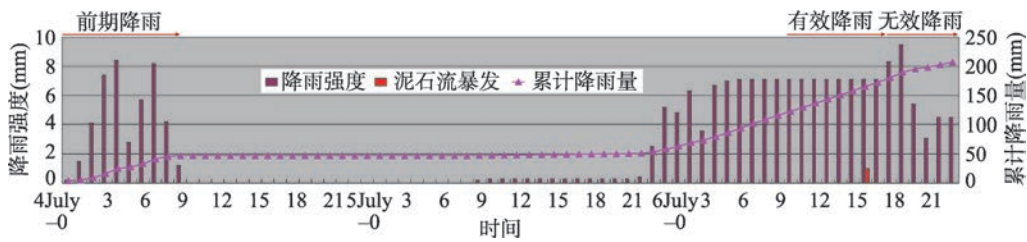


图3 1998年7月4-6日西昌(袁家山站)降雨强度过程曲线  
Fig. 3 Rainfall intensity curve on July 4-6, 1998

雨强则出现在19时,雨强也仅为9.5 mm,说明前期累计降雨量对本次泥石流灾害的贡献率更明显,而短历时雨强主要起到激发作用,Tecca等<sup>[14]</sup>曾指出只是稍先于泥石流发生前的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>[13]</sup>通过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有较大的影响。另外,地形特征、土源特性和人类活动等也对泥石流暴发具有促进作用。

(3) 频繁地震和强降雨耦合控制泥石流活动

邛海流域1850年M 7.5大地震发生后,强震激发的大量崩塌和滑坡为泥石流暴发提供了充足物源,造成邛海流域每年都不同程度发生泥石流灾害,其中官坝河自1850年以来共发生山洪泥石流100多次。对1970-2012年间邛海流域发生的灾害类型调查分析,13

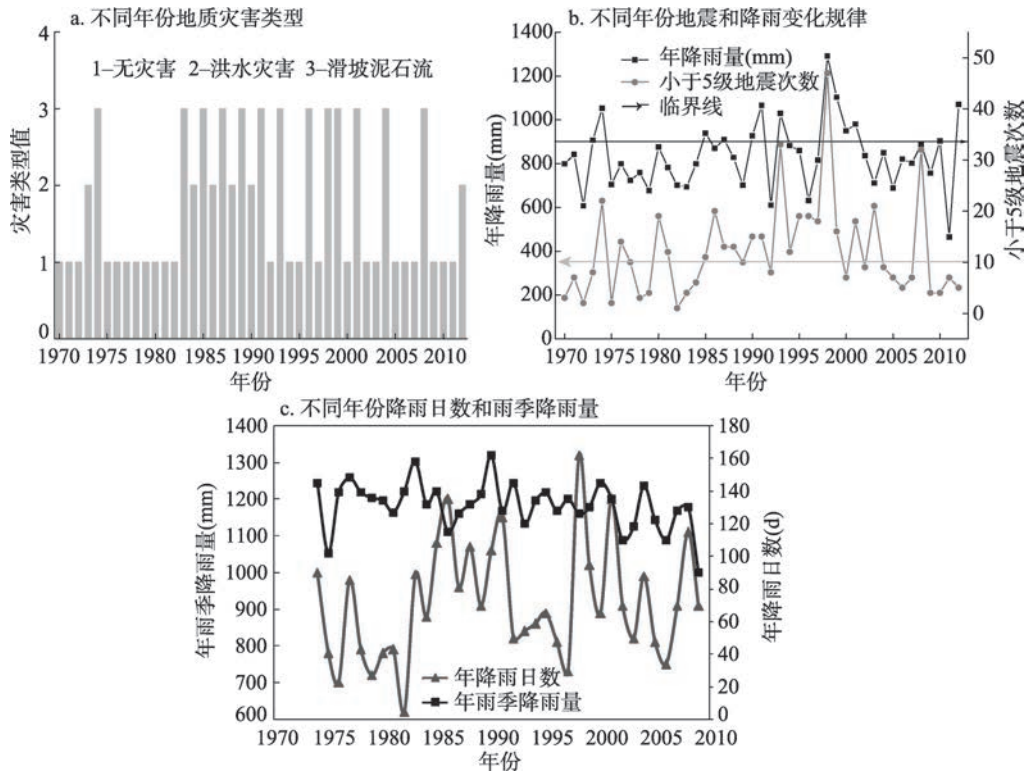


图4 邛海流域地质灾害类型与地震和降雨关系  
Fig. 4 Geological disaster type relationship with earthquake and rainfall in Qionghai Lake basin

个年份内发生了249次滑坡泥石流灾害（图4a），其发育特征主要受频繁地震和极端降雨的共同控制（图4b），如大部分灾害发生年份内（1974年、1985年、1987年、1991年、1993年、1998年、1999年、2001年和2008年）， $\leq 150\text{ km}$ 区域范围地震次数至少为10次，且年降雨量大于900 mm，仅2008年年降雨量为887.42 mm，又加上当年小于150 km范围内 $2 \leq M \leq 5$ 的中小地震发生了32次，频繁地震降低了土体失稳起动形成滑坡泥石流的临界雨量阈值，同时，近年来研究区降雨日数减少且雨季总降雨量却不断增加，暴雨事件增多加大了泥石流暴发的概率（图4c）；而其余4个年份（1983年、1989年、1996年和2004年）研究区附近地震次数和年降雨量均为达到上述标准，却也暴发了滑坡泥石流灾害，这可能与地震活动的长期灾害效应有关<sup>[15-16]</sup>，如1983年泥石流灾害发生的前两年地震动次数分别达到31次，降雨量达到693.83 mm，1996年泥石流灾害发生前一年地震动次数达到19次，降雨量达到631.42 mm，这说明滑坡泥石流灾害发生之前1~2年的频繁地震对土体扰动变形具有重要的影响，这也是非极端气候年份流域发生滑坡泥石流事件根本原因。由此发现，大地震事件对邛海流域灾害类型和分布格局具有控制作用，后期频繁的中小地震和强降雨的时空耦合是邛海流域泥石流灾害频发的根本原因。

4 官坝河泥石流对邛海的泥沙淤积效应

4.1 入湖口陆地泥沙淤积效应分析

每年汛期官坝河山洪泥石流频发，大量泥沙被携带进入邛海，在入湖口形成舌状三角洲堆积，官坝河入湖口处的水域面积逐年减少。1998年7月6日官坝河发生的大型泥石流为百年一遇，持续时间约为2 h，沟道内洪痕保留较为完整，选取入湖口断面计算本次泥石流流量特征，并估算不同频率下冲出一次泥石流和固体物质总量（表1）。1998年7月6日百年一遇泥石流流入湖口最大流量为755.08 m<sup>3</sup>/s，一次泥石流总量为143.47万m<sup>3</sup>，固体物质总量为42.20万m<sup>3</sup>，而据实地调查，入湖口处1998年泥石流堆积物为68.98万m<sup>3</sup>，故可判断剩余26.78万m<sup>3</sup>泥石流体来源于其他小规模山洪泥石流和常流水期间被水流所携带的悬移质。

表1 1998年7月6日官坝河泥石流冲出物质总量  
Tab. 1 The debris flow total volume of Guanba river on July 6, 1998

频率(%)	容重(g/cm <sup>3</sup> )	峰值流量(m <sup>3</sup> /s)	一次泥石流总量(m <sup>3</sup> )	一次固体物质总量(万m <sup>3</sup> )
1	1.50	755.08	143.47	42.20
2	1.42	636.99	121.03	29.58
5	1.30	508.27	96.57	17.25
10	1.22	425.07	80.76	10.41

结合不同年份官坝河入湖口的湖岸线的地形对照和实地调查<sup>[17]</sup>，官坝河自1998年以来入湖口总淤积量为181.08万m<sup>3</sup>，湖岸线被推进665 m，平均每年前进55.42 m，平均每年淤积15.09万m<sup>3</sup>；其中，1998年官坝河泥沙向邛海推进了172 m，入湖淤积量为68.98万m<sup>3</sup>；1999-2006年平均湖岸线被推进359 m，入湖淤积量为99.45万m<sup>3</sup>，平均每年推进44.87 m，平均每年淤积量为12.43万m<sup>3</sup>；2007-2009年湖岸线被推进124 m，入湖淤积量为12.65万m<sup>3</sup>，平均每年推进41.33 m，平均每年淤积量为4.14万m<sup>3</sup>（表2）。由此可见，官坝河泥沙淤积邛海问题非常严重，泥石流频繁发生是造成邛海泥沙淤积的主要原因，泥沙淤积量与年降雨量变化存在明显对应关系（图5），而平水年水流冲刷沟道泥石流堆

表2 官坝河入湖口泥沙淤积情况  
Tab. 2 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> )
1998 年	0.089	172	7.75	68.98	68.98
1999-2006 年	0.102	359	9.75	12.43	99.45
2007-2009 年	0.011	124	11.50	4.14	12.65
合计	0.202	665			181.08

积物中细颗粒进入邛海，也是官坝河泥沙淤积邛海的重要原因。

官坝河源区滑坡土体为宽级配砾石土，粒径变化大，粘粒含量介于2.5%~6.3%之间（图6a），而邛海湖边土样主要为< 2 mm 粉细砂，基本无砾粒和粘粒（图6b），说明大量的粉粘粒物质被输移至邛海深处，这也在官坝河沟道沿程堆积调查得到证实（图7），> 2 mm 粗颗粒沿沟道内含量逐渐减小，< 2 mm 细颗粒含量从上游到入湖口处逐渐增加，在出山口象鼻寺至入湖处< 2 mm 细颗粒含量从81.4%增加到100%，入湖口处> 2 mm 颗粒几乎消失，说明大部分> 2 mm 粗颗粒沿程停淤在出山口内。泥石流在形成、运动和堆积过程中流动形态和性质不断变化，随着沿程冲淤变化、地形起伏以及支沟汇入，泥石流在沟道内运移时粘性泥石流、稀性泥石流和高含沙水流之间相互转化，并在进入湖泊后以浊流形式继续前行。

4.2 入湖口水下泥沙淤积效应分析

根据2003年邛海水下地形图发现，由于官坝河泥沙淤积严重，在入湖口出现一个由北向南延伸的水下堤（图8a），水下堤长约1 km，平均高约2 m，体积约为30万 m<sup>3</sup>，约为1998年来总淤积量的16.56%；余斌等<sup>[18]</sup>通过对比1988年和2003年邛海的水下地形，

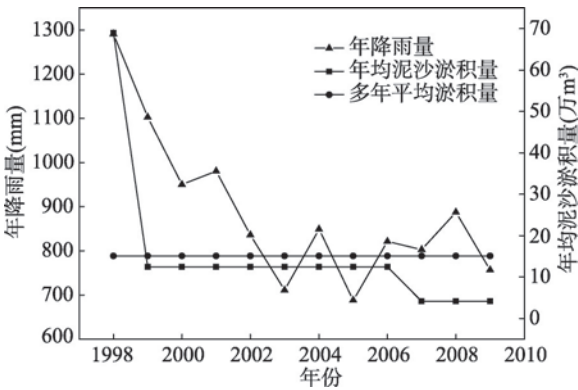


图5 官坝河泥石流输沙量与降雨关系  
Fig. 5 Relationship between sediment deposition and precipitation in the Guanba River

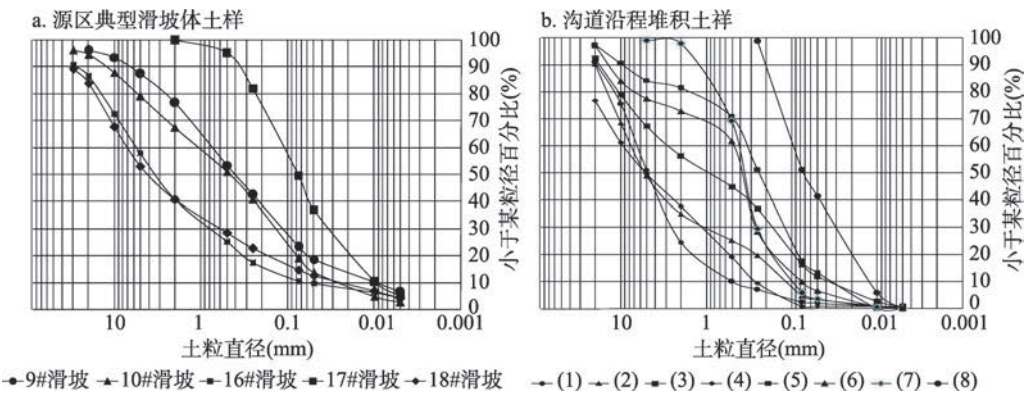


图6 官坝河流域内典型土样颗分曲线  
Fig. 6 Grain size distribution curves of typical soil samples in the Guanba River basin



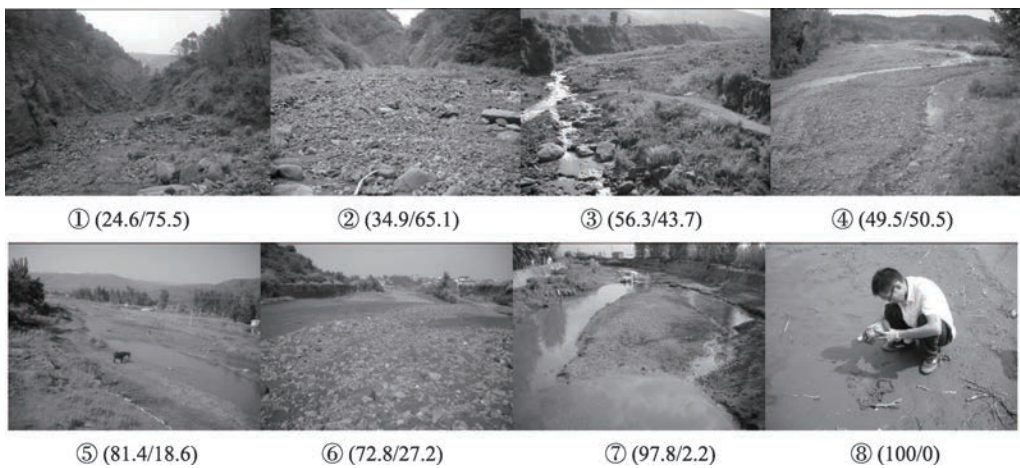


图7 官坝河沟道沿程泥石流堆积物(24.6/75.5为> 2 mm粗颗粒/< 2 mm细颗粒)  
Fig. 7 Gully bed deposition along the Guanba River channel

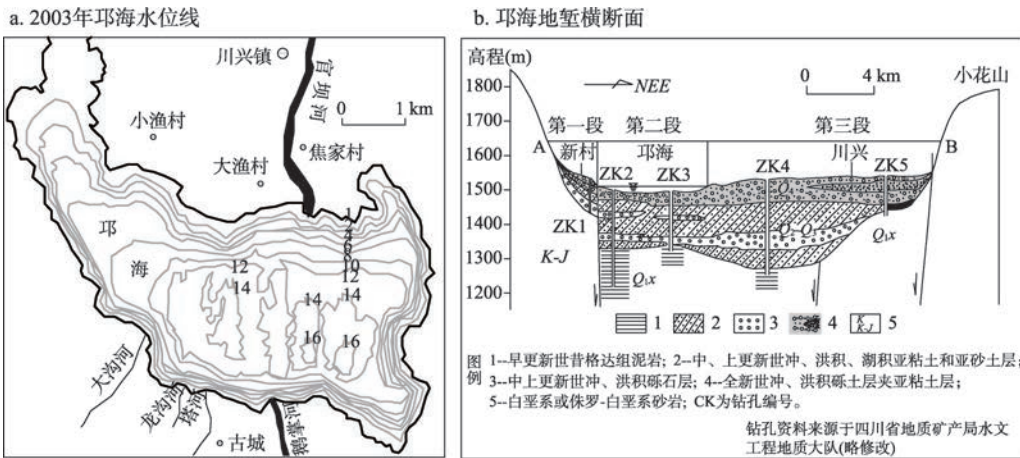


图8 邛海地壑典型断面地形图(改自邛海流域环境规划总报告<sup>[20]</sup>)  
Fig. 8 Underwater topographic maps of Qionghai Lake

发现2003年邛海湖底地形较1988年起伏大，并在湖底形成扇状的“湖底扇”，因此推断2003年发现的水下堤是1998年官坝河改道后所形成的，水下沉积作用明显；洪水和泥石流携带泥沙进入邛海，不仅淤积在河口堆积扇水下部分，而且高含沙洪水或泥石流还能潜入邛海底部，以浊流形式继续运动<sup>[19]</sup>。因此，官坝河入湖泥沙淤积问题除了为山洪泥石流造成外，平水年水流挟沙进入湖底也是重要因素之一。另根据1987年邛海流域典型断面钻孔资料也证实浊流在水下输沙现象（图8b），邛海地壑自全新世以来地层由白垩系砂岩、侏罗—白垩系砂岩、早更新世泥岩、中上更新统亚粘土层和亚石层及全新统亚粘土层组成<sup>[20]</sup>。

5 邛海寿命预测及泥石流防治建议

5.1 邛海寿命预测分析

邛海流域为青藏高原东边界强烈隆升和挤压过程中形成典型构造断陷湖泊，在历史

上经历了拉裂形成和变深发育的过程,当前则处于其后期填充淤积期,邛海面积和水深都在逐渐变小,邛海面积从1952年的 $31\text{ km}^2$ 减少到2010年的 $27\text{ km}^2$ ,邛海从1952年到2003年的51年间淤积泥沙 $27\times 10^6\text{ m}^3$ ,平均每年淤积约 $17.09\text{ mm}$ ,平均水深也由原来的 $14.0\text{ m}$ 减少到 $10.95\text{ m}$ 。邛海流域共分布8条支沟,最大的官坝河流域面积为 $137.24\text{ km}^2$ ,其次的鹅掌河为 $54.31\text{ km}^2$ ,两个泥石流沟的流域面积之和占邛海全流域的62.3%,每年具有不同程度泥石流暴发,其他6条支沟则主要以洪水为主,对邛海泥沙淤积贡献较小。何杰等<sup>[21]</sup>指出邛海流域北片区的官坝河和南片区的鹅掌河对邛海泥沙淤积贡献较为突出;余斌等<sup>[18]</sup>发现鹅掌河泥石流灾害频发,将大量泥沙携带进入邛海产生严重淤积。结合图1可估算,邛海流域全新世以来入海口附近堆积扇面积为 $35.44\text{ km}^2$ ,其中官坝河和鹅掌河堆积扇面积明显较大,分别为 $25.83\text{ km}^2$ 和 $3.38\text{ km}^2$ ,分别占总堆积扇面积的71.8%和9.40%,两个泥石流堆积扇面积之和占总堆积扇面积81.2%,说明官坝河和鹅掌河泥石流活动对邛海的泥沙淤积贡献较大。

此外,从整个流域侵蚀速率来看,官坝河流域中上游和中下游区的平均侵蚀模数分别为 $3842\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ 和 $3538\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ ,鹅掌河流域平均侵蚀模数达到 $3542\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ ,均高于邛海流域平均侵蚀模数 $2781\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ <sup>[17]</sup>,无论从各支沟流体性质和堆积扇面积大小来看,官坝河和鹅掌河流域内的物源供给和侵蚀输沙能力都远大于其他支沟,山洪泥石流活动控制着邛海流域侵蚀输沙和湖泊演化过程。目前世界各地正逐步进入地震活跃期和极端气候异常期,又加上近年来人类活动频繁,未来泥沙淤积问题将更加严重,如果湖泊在当前泥沙淤积严重时期不进行有效治理和规划,在假设当前地质构造稳定且水面变化不大情况下,按当前泥沙淤积速率 $17.09\text{ mm/a}$ 进行估算,预测其寿命将仅约600年左右,邛海将被沉积物所填充而局部转变为陆地,又加上邛海周围各支沟泥沙淤积速率不等,未来邛海可能被泥沙淤积分割成大小不等多处水塘。

## 5.2 官坝河泥石流防治建议

邛海流域的侵蚀特征变化将为邛海流域泥石流及泥沙治理提供依据。本次对邛海流域周边典型小箐河、鹅掌河和干沟河进行调查,探索不同防治措施下各支沟侵蚀产沙特征,为官坝河及其他支沟泥石流和泥沙灾害制定合理治理方案提供参考。

目前,小箐河、鹅掌河和干沟河入湖口处年淤积量分别为 $1500\text{ m}^3$ 、 $1162.45\text{ m}^3$ 和 $2157.78\text{ m}^3$ 。综合考虑上面沟道及入湖口淤积泥沙的颗粒分布特征,发现入湖口淤积泥沙颗粒大小介于 $0.005\sim 2\text{ mm}$ 之间,流入邛海内的泥沙颗粒为小于 $0.005\text{ mm}$ 的粉粘粒,故本次将粒径大于 $0.005\text{ mm}$ 的泥沙定为推移质,粒径小于 $0.005\text{ mm}$ 的粉粘粒定为悬移质,结合各支沟上游的颗粒分布特征,估算小箐河、鹅掌河和干沟河每年入湖泥沙量分别为 $163.67\text{ m}^3$ 、 $133.21\text{ m}^3$ 和 $184.85\text{ m}^3$ 。

另据实地调查,小箐河和鹅掌河流域已建有拦挡和排导工程,并在上游进行了封山育林,而干沟河则只是采取了一些水土保持措施。其中,小箐河左右两个支沟共6个拦沙坝,坝高 $3\text{ m}$ 左右,沟道坡度约 $3^\circ$ ,坝内基本淤满,拦沙坝内年淤积量为 $2045.62\text{ m}^3$ ;鹅掌河共21个拦沙坝,平均坝高 $3\text{ m}$ ,沟道平均坡度 $3^\circ$ ,坝内有超半数的库容已经淤满,拦沙坝内年淤积量为 $976.89\text{ m}^3$ 。综合分析两条支沟陆上和陆下泥沙淤积结果,小箐河已建6个拦沙坝,每年拦截的泥沙量占流域年泥沙侵蚀量的56%;湖口淤积和入湖淤积量分别占40%和4%;鹅掌河已建21个拦沙坝,每年拦截的泥沙量占流域年泥沙侵蚀量的43%,湖口淤积和入湖淤积量分别占51%和6%。可见,两条支沟上的拦沙坝在短时间内发挥了很大的拦沙作用,特别是阻止泥沙淤积邛海起到了很大的作用且效果明显。

根据3条典型支沟泥沙淤积量反演流域的侵蚀产沙模数(表3,图9),小箐河的侵蚀



表3 邛海流域3条典型支沟泥沙堆积情况  
Tab. 3 Sediment deposition of three typical gullies around Qionghai Lake

流域	小箐河		鹅掌河	干沟河
	右支沟	左支沟		
流域面积(km <sup>2</sup> )	6.68		54.31	38
拦砂坝修建时间	2005.2.20		2002.2.15	
坝内年堆积量(m <sup>3</sup> )	1465.41	580.21	976.89	
入湖口年淤积量(m <sup>3</sup> )	1500.00		1162.45	2157.78
入湖年淤积量(m <sup>3</sup> )	163.67		133.21	184.85
流域侵蚀模量(t/km <sup>2</sup> ·a)	1766.40		2054.97	2356.49

模数约为1766.40 t/(km<sup>2</sup>·a)，鹅掌河的侵蚀模数约为2054.97 t/(km<sup>2</sup>·a)，干沟河的侵蚀模数约为2356.49 t/(km<sup>2</sup>·a)，均小于邛海流域的历史平均侵蚀模数2575.97 t/(km<sup>2</sup>·a)，说明采取相应的治理措施后，大大降低了流域的土壤侵蚀量和湖泊泥沙淤积量；另外各支沟所采取的治理形式不同和工程设计是否合理，将会导致治理效果差别较大，但整体来看，采用工程和生物措施相结合要优于单一工程治理。

针对官坝河山洪泥石流的特征及其侵蚀淤积危害，建议对全流域实施工程治理和生态防护相结合的综合治理模式，在官坝河流域建立具有多个防御层次、多种防护功能的防御体系，即上游实行水土保持和封山育林，保护源区的生态平衡，中下游拦挡和排导相结合，将泥石流大量固体物质拦截于坝体内，降低山洪泥石流规模，并在中游沟道修建防护堤，将水流归槽，一方面可以保护沿岸已有耕地，另一方面也可以开发河滩地，缓解人多地少的窘境。同时，还应积极开展防御泥石流灾害、保护生态环境的科普宣传和应急培训工作，提高当地群众的防灾减灾、保护环境意识，强化居民防灾义务和责任。

6 结论

历史上官坝河泥石流暴发频率高且规模大，自1998年以来入湖口总淤积量为181.08万m<sup>3</sup>，湖岸线被推进665 m，平均每年淤积15.09万m<sup>3</sup>，其中1998年7月6日官坝河暴发百年一遇泥石流，入湖口最大峰值流量达到755.08 m<sup>3</sup>/s，一次泥石流固体物质总量为42.20万m<sup>3</sup>；崩塌滑坡和面源侵蚀是官坝河泥石流最主要的固体物质来源，动储量约为428.03万m<sup>3</sup>。雨量较多的连阴雨强烈影响前期土壤含水量，对泥石流暴发具有重要贡献作用，而短历时暴雨仅是起到激发作用。

山洪泥石流的频繁发生是邛海泥沙淤积的主要原因，而频繁地震和强降雨耦合作用控制着区域山洪泥石流活动，预测未来官坝河流域泥石流活动仍将频繁发生；1952-2003年的51年间，邛海淤积泥沙27×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>，平均每年淤积约17.09 mm/a，按此淤积速率预

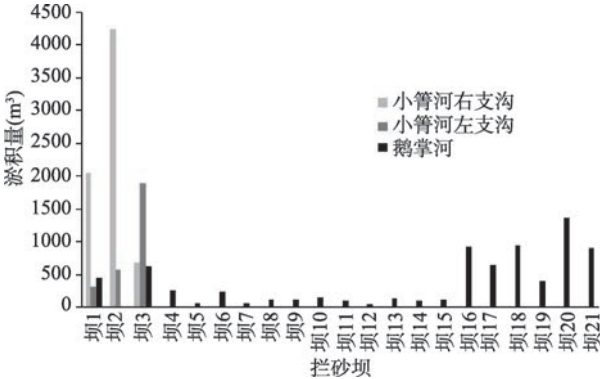


图9 小箐河和鹅掌河坝内淤积泥沙  
Fig. 9 Sediment deposition in the check dams of Xiaoqing and Ezhang rivers

测, 其寿命将仅约 600 年左右, 邛海将被沉积物所填充而局部转变为陆地; 建议在官坝河流域建立具有多个防御层次、多种防护功能的工程与生态相结合防御体系, 并加强流域管理和宣传培训等行政法治管理。

### 参考文献(References)

- [1] Shen Ji, Xue Bin, Wu Jinglu, et al. Lake Sediments and Environmental Evolution. Beijing: Science Press, 2010. [沈吉, 薛滨, 吴敬禄, 等. 湖泊沉积与环境演化. 北京: 科学出版社, 2010.]
- [2] Hakanson L, Jansson M, Yang Song, et al. Principle of Lake Sedimentology. Beijing: Science Press, 1992.
- [3] Costa J E, Jarrett R D. Debris flows in small mountain stream channels of Colorado and their hydrologic implications. *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, 1981, 18: 309-322.
- [4] Benda L, Veldhuisen C, Black J. Debris flows as agents of morphological heterogeneity at low-order confluences, Olympic Mountains, Washington. *Geological Society of America Bulletin*, 2003, 115: 1110-1121.
- [5] Eaton S L, Morgan M A, Kochel R C, et al. Role of debris flows in long-term landscape denudation in the central Appalachians of Virginia. *Geology*, 2003, 31: 339-342.
- [6] Wei F Q, Xie H, Jose L L, et al. Extraordinarily serious debris flow disasters in Venezuela in 1999. *Journal of Mountain Science*, 2000, 18(6): 580-582. [韦方强, 谢洪, Jose L Lopez, 等. 委内瑞拉 1999 年特大泥石流灾害. *山地学报*, 2000, 18(6): 580-582.]
- [7] Feng Junbi. A remote sensing study on the soil erosion disaster of Dianchi Area of Yunnan. *Remote Sensing Technology and Application*, 1994(9): 27-29. [冯均彬. 云南滇池湖泊流域水土流失灾害遥感调查. *遥感技术与应用*, 1994(9): 27-29.]
- [8] Nanjing Institute of Geography and Limnology, CAS, et al. Environments and Sedimentation of Fault Lakes, Yunnan Province. Beijing: Science Press, 1989. [中国科学院南京地理与湖泊研究所, 等. 云南断陷湖泊环境与沉积. 北京: 科学出版社, 1989.]
- [9] Wicczorek G F. Effect of rainfall intensity and duration on debris flows in central Santa Cruz Mountains, California// Costa J E, Wicczorek G F. *Debris Flows/Avalanches, Process, Recognition and Mitigation*. Geological Society of America. *Reviews in Engineering Geology*, 1987, 7: 93-104.
- [10] Costa J E. *Physical geomorphology of debris flows*//Costa J E, Fleischer P J. *Developments and Applications of Geomorphology*. New York: Springer-Verlag, 1984: 269-317.
- [11] Jakob M, Bovis M, Oden M. The significance of channel recharge rates for estimating debris-flow magnitude and frequency. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2005, 30: 755-766.
- [12] Chen Jingwu. Preliminary analysis of relationship between rainstorm and debris flows in Jiangjia gully, Dongchuan, Yunnan//Papers of Institute of Glacier and Frozen Earth. 1980: 93-99. [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//*全国泥石流学术论文集*. 1980: 93-99.]
- [13] Cui Peng, Yang Kun, Chen Jie. Relationship between occurrence of debris flow and antecedent precipitation: Taking the Jiangjia Gully as an example. *Science of Soil and Water Conservation*, 2003(1): 11-15. [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. *中国水土保持科学*, 2003(1): 11-15.]
- [14] Tecca P R, Genevois R. Field observations of the June 30, 2001 debris flow at Acquabona (Dolomites, Italy). *Landslides*, 2009, 6: 39-45.
- [15] Huang R, Fan X. The landslide story. *Nature Geoscience*, 2013, 6(5): 325-326.
- [16] 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. *Geomorphology*, 2008, 101(4): 692-702.
- [17] Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS. Geotechnical investigation report of flood and debris flow in the Guanba River of Qionghia Lake basin. Sichuan, 2010. [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查报告. 四川, 2010.]
- [18] Yu B, Wang S G, Zhang S C, et al. Preliminary study on the effect of debris flows from Goose Foot River on Lake Qionghai, Sichuan, China. *Journal of Lake Science*, 2006, 18: 57-62. [余斌, 王士革, 章书成, 等. 鹅掌河泥石流对四川邛海影响的初步研究. *湖泊科学*, 2006, 18: 57-62.]
- [19] Yu Bin, Zhang Shucheng, Wang Shige. A preliminary study on the deposition of turbidity currents in Qionghai Lake, Sichuan, China. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2006, 23(4): 559-565. [余斌, 章书成, 王士革. 四川西昌邛海的浊流沉积初探. *沉积学报*, 2006, 23(4): 559-565.]

- [20] Yunnan Institute of Environmental Science, et al. Environmental planning report of Qionghai Lake basin. Yunnan, 2004 (5): 17-19. [云南省环境科学研究院, 等. 邛海流域环境规划总报告. 云南, 2004(5): 17-19.]
- [21] He Jie, Deng Hu, Hu Guisheng. Silt deposit characteristics and trend analysis of torrential flood debris flows in Qionghai Lake, Xichang, China. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2012, 39(3): 317-322. [何杰, 邓虎, 胡桂胜. 邛海山洪泥石流淤积特征与趋势分析. 成都理工大学学报(自然科学版), 2012, 39(3): 317-322.]

## Development of debris flows in Guanba River and its effect on sediment deposition in Qionghai Lake of Sichuan

WEI Xueli<sup>1,2</sup>, CHEN Ningsheng<sup>3</sup>

(1. Institute of Desert Meteorology, CMA, Urumqi 830002, China;

2. Academy of Transportation planning Surveying and Design, Urumqi 830006, China;

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

**Abstract:** Since the late-Cenozoic, the strong uplift of Tibetan Plateau not only formed a large number of tectonic fractures on the southeast edge, but also generated many tectonic rift lakes due to structural stretching and compression. However, in recent years, some of the lakes started to shrink and depicted a reduction in lake depth, which has eventually exerted great influence on local ecological environment and socio-economic development. In this paper the Qionghai Lake, located on the southeast edge of the Tibetan Plateau, is selected as the study area. Based on exploring the debris flow characteristics of Guanba river in the north of Qionghai Lake, the effect of sediment deposition deriving from debris flows on Qionghai Lake is analyzed. The research shows that: (1) The scale and frequency of debris flow occurrence is higher in the Guanba River, and the primary material sources are landslide and non-point source erosion with a movable volume of  $428.03 \times 10^4 \text{ m}^3$ . (2) The frequent occurrence of floods and debris flows are the primary cause of sediment accumulation in the Qionghai Lake, and the debris flows are controlled by the coupling effect of frequent earthquakes and heavy rainfall. It is predicted that debris flows will still occur frequently, and sedimentation disasters will become more severe in the future. (3) Since 1950, the average deposition rate was about 17.09 mm/a. In terms of current deposition rate, it is inferred that the longevity of the Qionghai Lake will be only about 600 years. (4) The comprehensive governance model with management of administrative law is proposed in the Guanba River. The results can not only provide reference bases for planning management and disaster prevention in Qionghai Lake basin, but also contribute to reveal the reason of lake shrinkage on the southeast edge of Tibetan Plateau.

**Keywords:** Tibetan Plateau; Guanba River in Xichang; debris flows; Qionghai Lake in Sichuan; sediment deposition; tectonic rift lake