

文章编号:1009-3087(2014)03-0049-07

# 汶川地震滑坡与强降雨驱动的输沙量增加研究

——以岷江上游为例

丁海容<sup>1,2</sup>, 马光文<sup>1</sup>, 倪师军<sup>2</sup>, 施泽明<sup>2</sup>, 赵国华<sup>3</sup>, 闫亮<sup>3</sup>, 颜照坤<sup>3</sup>

(1. 四川大学 水利水电学院, 四川 成都 610065; 2. 成都理工大学 核技术与自动化工程学院, 四川 成都 610059;

3. 成都理工大学 油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川 成都 610059)

**摘要:**为了能够详细刻画汶川地震及其震后强降雨对岷江上游输沙量增加量的影响,在对 SPOT 图像、航片和数字高程图的影像资料进行解译的基础上,对岷江上游滑坡、泥石流进行了标定,同时通过收集该流域 1980—2010 年期间输沙量、降雨量、滑坡量、泥石流流量等方面的资料,分析了汶川地震前后岷江上游降水量、输沙量、滑坡量、泥石流流量之间的相关关系,定量计算了汶川地震前后该流域输沙量的变化,进一步探讨了汶川地震后强降雨驱动的滑坡、泥石流对岷江输沙量增加的控制作用。研究结果表明:1)由汶川地震的同震构造抬升和同震滑坡、泥石流所导致的输沙量增加值为 30% 左右,表明在汶川地震后岷江上游输沙量的增加主要受同震滑坡、泥石流的控制;2)震后强降雨导致的输沙量是震前的 1.75 倍,震后强降雨泥石流的产砂量对当年新增输沙量的贡献率达到 37.49%;3)强降雨带与地震断裂带和地震滑坡带基本重合,导致了汶川地震后输沙量的增加与强降雨量之间存在正反馈关系;4)汶川地震震动所引发地表物质松动和驱动滑坡导致了河流输沙量加大,这是未来几十年所面临的灾害。

**关键词:**汶川地震;岷江上游;强降雨;输沙量增加

**中图分类号:**TV125

**文献标志码:**A

## Study on Sediment Discharge Increase Caused by Wenchuan Earthquake Landslide and Heavy Rainfall in the Upper Reaches of the Min River

DING Hairong<sup>1,2</sup>, MA Guangwen<sup>1</sup>, NI Shijun<sup>2</sup>, SHI Zeming<sup>2</sup>, ZHAO Guohua<sup>3</sup>, YAN Liang<sup>3</sup>, YAN Zhaokun<sup>3</sup>

(1. College of Water Resource and Hydropower, Sichuan Univ., Chengdu 610065, China;

2. College of Nuclear Technol. and Automation Eng., Chengdu Univ. of Technol., Chengdu 610059, China;

3. National Key Lab. of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu Univ. of Technol., Chengdu 610059, China)

**Abstract:** In order to characterize the increase of the sediment discharge caused by the Wenchuan earthquake and post-seismic heavy rainfall in the upper Min River, the SPOT images, aerial photographs and digital elevation map were interpreted, and landslides, mudslides in the area were marked. Data on sediment discharge, rainfall, landslides, and debris flows were collected for the period of 1980—2010 to describe the effects of the Wenchuan earthquake and post-earthquake heavy rainfall on the increase in sediment discharge of the area. The relationship among precipitation, sediment discharge, landslides, and debris flows before and after the Wenchuan earthquake was analyzed. The variation trends of sediment discharge in the river basin before and after the earthquake were calculated quantitatively. The research results showed that sediment discharge increased by approximately 30% due to coseismic uplift, coseismic landslides, and debris flows after the Wenchuan earthquake. The sediment discharge caused by heavy rainfall after the earthquake was 1.75 times larger than that before the earthquake. The percentage contribution of the sediment yield of debris flows induced by heavy rainfall after the earthquake to the increase in sediment discharge was 37.49%. The heavy rainfall zone basically coincided with the earthquake fault zone and the seismic landslide zone. Therefore, there was a positive-feedback relationship between the increase of sediment discharge and heavy rainfall after the Wenchuan earthquake. The loosening of surface materials and landslides driven by the Wenchuan earthquake resulted in an increase in sediment discharge into the river, bringing about a great disaster which will need to be addressed in the coming decades.

**Key words:** Wenchuan earthquake; upper reaches of the Min River; heavy rainfall; increased sediment discharge

收稿日期:2013-11-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41172162);四川省教育厅资助项目(14ZB0072)

作者简介:丁海容(1978—),女,博士生,讲师。研究方向:水文学及水资源。E-mail:dinghairong@cdut.cn

http://jsuese.scu.edu.cn

2008年5月12日汶川8.0级特大地震是龙门山断裂带有历史文献记录以来发生的最大地震灾害,同震变形在瞬间就改变了地形坡度,并导致地貌和河流体系产生相应的变化和调整,其间导致大量滑坡、泥石流的剥蚀与河流搬运、传输,地震滑坡携带大量沙石进入河道,对河流搬运能力和河流形态产生深刻的影响,导致了剥蚀作用加强,河流输沙量加大<sup>[1-3]</sup>,地震滑坡、泥石流—强降雨—堰塞湖—溃决山洪(泥石流)—输沙量增加所构成的灾害链已引起了专家学者的高度重视。一些专家学者指出,地震滑坡、泥石流携带大量沙石进入河道,会对河流搬运能力和河流形态产生深刻的影响<sup>[4]</sup>。具体表现为:使河流输沙量激增,磨蚀河床,以致河流形态发生变化;在部分河段,地震后发生的山洪泥石流物质甚至阻塞河道形成堰塞湖<sup>[5]</sup>。河流输沙量与地质、地貌、气候,特别是暴雨关系密切,因素复杂,山体发生崩塌、滑坡或泥石流等山地灾害,会对流域输沙量产生巨大影响。曹叔尤等<sup>[6]</sup>提出,仅用单因素分析,可以认为震区河流泥沙输移量随强地震增加而明显增加。Lin等<sup>[7-9]</sup>在研究中发现,1984年日本一次地震触发了大量滑坡、泥石流,震后一年的河流年均泥沙量是震前的10倍,震后4年的年均泥沙量是震前的4倍;1999年台湾集集地震震后河流输沙量的产生量高于震前的2倍,震后6年,随着滑坡体上植被恢复,沉积物的产生量仍然比震前要高<sup>[7-9]</sup>。Koi等<sup>[10]</sup>研究发现日本中部丹泽地区的河流输沙量至今仍受到该地区1923年的Mw7.9级地震触发的滑坡、泥石流的影响。以上研究表明,滑坡、泥石流对河流输沙量的影响可能与区域的气候条件有很大关系,在降水强度大的山区,地震驱动的滑坡、泥石流使河流悬移质的含量高于背景值好几倍。

虽然汶川地震之后,众多专家学者对龙门山地区开展了汶川地震对震区河流演化及河道修复、同震滑坡和泥石流等地质灾害、水系响应、震后洪水与泥石流等方面的研究工作,但对于汶川地震前后强降雨与河流输沙量的关系,滑坡、泥石流对河流输沙量的贡献等尚未展开深入研究。鉴于此,作者在现场调查、遥感解译、水文资料和水系变化等相关数据的基础上,以岷江上游为例,探讨汶川地震前后强降雨对河流输沙量增加的影响,揭示强震条件下,强降雨驱动的滑坡、泥石流及输沙量的变化规律,剖析汶川地震后强降雨驱动的滑坡、泥石流对输沙量增加的控制作用及其对河流地貌演化的影响,为青藏高原东缘强震和强降雨驱动的滑坡、泥石流与河流输沙量的研究提供一个范例和定量约束条件。

## 1 汶川地震前、后岷江上游输沙量的对比分析

青藏高原东缘地区由3个一级地貌单元构成,自西向东分别为青藏高原地貌区、龙门山高地地貌区和山前冲积平原区(成都盆地)。岷江流域发源于青藏高原东缘岷山南麓,长江上游的一级支流,发源于岷山,横切龙门山,进入四川盆地(图1)。在都江堰以上称为岷江上游,属于典型的山区河流,主干河道流向为由北向南,在汶川南侧向东南横切九顶山之后,流入成都平原。呈南北宽、东西窄的袋状,流域面积约为23 000 km<sup>2</sup>,属不对称水系,不对称系数达1.21。西高东低,河长为340 km,河道平均比降为0.0 075。岷江上游河谷剖面表现为下部“V”型的深切河谷,海拔高程在700~6 253 m之间。该流域地处中国东部季风湿润区和青藏高原高寒区的过渡地带,流域年平均降水500~850 mm,雨季为5~10月,降水量占年降水量的75%以上,该流域主要位于青藏高原东缘地形雨所导致的暴雨区(图1);多年平均径流量为 $144 \times 10^4$  m<sup>3</sup>,丰水期5~10月占全年径流的75%,而枯水期11月~次年4月仅占全年的25%;多年平均输沙量为 $704 \times 10^4$  t。

### 1.1 汶川地震前岷江上游输沙量的变化趋势

为了对汶川地震前的岷江上游输沙量进行分析,本次收集了1980—2007年期间的紫坪铺水文站的输沙量数据,并收集了该流域21个雨量站(图2)在1982—2007年期间的降水量数据。在此基础上,应用Excel软件,对该流域的降水量、输沙量统计数据整合,建立降水量—输沙量的相关关系,总结出了岷江上游在汶川地震前的输沙量与降水量变化趋势(1980—2007年)。

由图3计算可知,在1980—2007年期间岷江上游(紫坪铺水文站)的年平均输沙量为 $704.43 \times 10^4$  t,其中最大值为 $900 \times 10^4$  t(1992年),最小值为 $562.5 \times 10^4$  t(2002年),其年际变差系数为0.14。此外,汶川地震前岷江上游年输沙量总体呈下降趋势,从1980—2007年减少了约 $32 \times 10^4$  t,约占多年平均输沙量的4.5%。在1980—2007年期间岷江上游(紫坪铺水文站)的年平均降水量为1 201 mm,其中最小值为763 mm(2007年),最大值为1 805 mm(1990年),降水量峰值的出现频率为3 a左右,如1981、1983、1990、1992、1995、2001年都出现了降水量峰值。统计结果表明,自1980年以来岷江上游的降水量总体呈下降趋势,到2007年减少了约300 mm,约占多年平均降水量的25%。降水量的年际变差系数为0.18(图3)。在此基础上,本次对岷江上游(紫坪铺站)年降

水量与输沙量的相关性进行了分析(图4),结果表明,二者相关系数为 $R = 0.571$ ,显示岷江上游的年降水量与年输沙量变化具有一致性,降水量与输沙量的相关关系式为 $y = 0.266x + 359.15$ 。

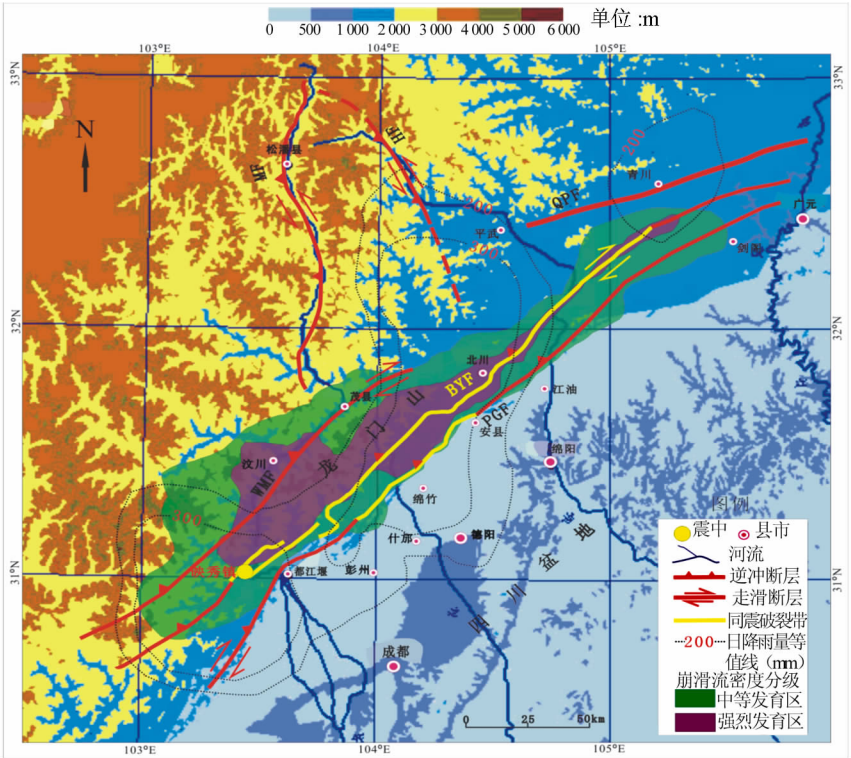


图1 汶川地震的地表破裂、滑坡分布与2010年8月中旬强降雨量分布图

Fig.1 Distribution diagram of surface ruptures and landslides after the Wenchuan earthquake and heavy rainfall in mid-August, 2010

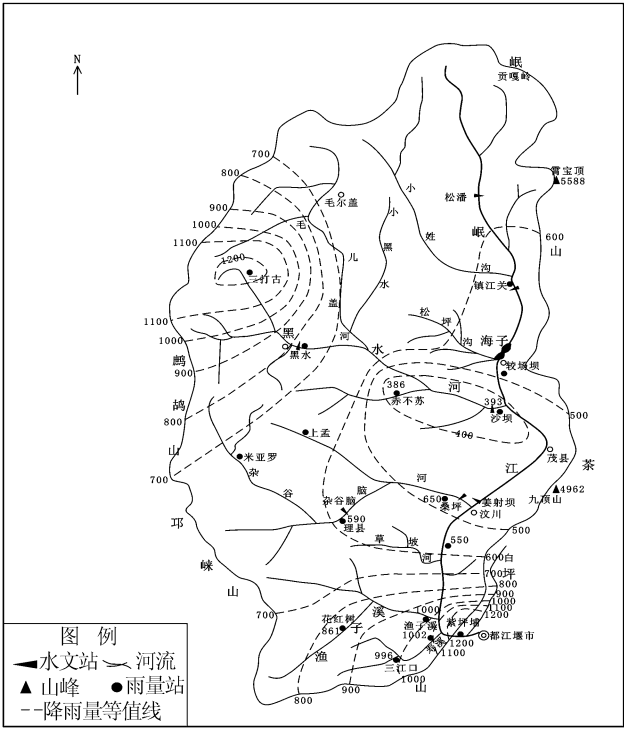


图2 岷江上游的水系样式及降水量分布图

Fig.2 Drainage system and rainfall distribution in the upper reaches of Min River

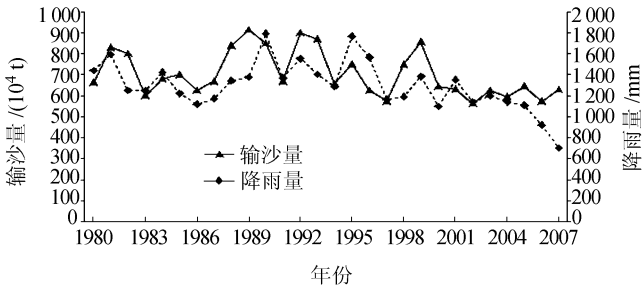


图3 汶川地震前岷江上游降水量与输沙量变化趋势图(1980—2007年)

Fig.3 Trend of rainfall and sediment discharge in the upper reaches of Min River before Wenchuan earthquake(1980—2007)

因此,可以获得如下认识:

- 1)在汶川地震前,岷江上游的年输沙量总体呈现为减少的趋势。
- 2)在汶川地震前,降水量与输沙量的相关性较强,岷江上游年输沙量的变化主要受到年降水量的控制,随着降水量的减少,输沙量也相应地减少。
- 3)降水量峰值的出现频率为3 a左右的周期,因此,岷江上游年输沙量的周期性变化主要受周期性强降雨的控制。

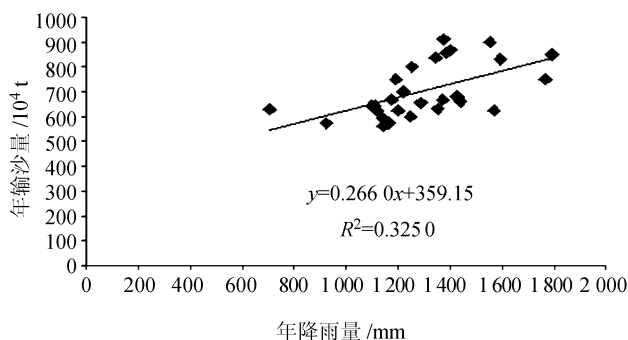


图4 汶川地震前岷江上游降水量与输沙量的相关性关系图

Fig. 4 Correlation of annual rainfall to sediment discharge in the upper reaches of Min River before Wenchuan earthquake

### 1.2 汶川地震同震(2008—2009年)导致的岷江上游输沙量增加

为了能够了解汶川地震的同震构造抬升和同震滑坡剥蚀作用对岷江上游输沙量的影响,本次收集和对比了2000—2010年期间的紫坪铺水文站的输沙量和降雨量数据(图5),对岷江上游汶川地震前、后(2008—2009年)输沙量的变化进行对比分析,获得如下初步结论:1)在汶川地震前(2000—2007年),该流域的年平均输沙量为 $704.43 \times 10^4$  t,相对稳定;2)在汶川地震后的2008年,年输沙量达到了 $905.71 \times 10^4$  t,比地震前的多年平均输沙量增加了27.56%;3)2009年的年输沙量为 $808.05 \times 10^4$  t,比地震前的多年平均输沙量增加了11.47%;4)由于2008和2009年在岷江上游流域没有发生强降雨,但其输沙量比震前多年平均值增加了约30%左右,表明在没有强降雨的影响下仅由汶川地震的同震构造抬升和滑坡、泥石流导致的输沙量增加值为30%左右。

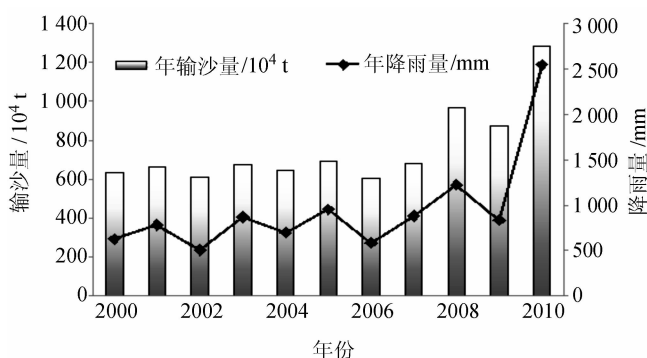


图5 汶川地震前后岷江上游降雨量、输沙量对比图

Fig. 5 Rainfall, sediment discharge comparison before and after the Wenchuan earthquake in the upper reaches of Min River

### 1.3 汶川地震后强降雨(2010年)导致的岷江上游输沙量增加

在汶川地震后的2008—2013年期间,该流域经历了2010年强降雨、2012年强降雨和2013年强降雨,降雨范围与汶川地震灾区基本重合,导致强降雨区与地震滑坡区的叠置,加之降雨量远远高于地震前的多年平均降雨量,导致了大量的滑坡、泥石流的新生和洪水暴发,给汶川地震灾区带来了新的巨大灾难。其中2010年“8·13”、“8·18”强降雨由于地域、时间、雨量都很集中,强度特别大,年降水量达到2 545.8 mm,其中8月的降水量达到507.2 mm,较震前的常年平均值高出239 mm<sup>[11]</sup>(图5)。通过对汶川地震前、后的岷江上游输沙量和降雨量的对比分析,可获如下初步结论:1)在汶川地震后的2010年,年输沙量达到了 $1\,239.19 \times 10^4$  t,它不仅是该流域自有测量数据以来的最高值,而且是该流域汶川地震前的多年年均输沙量( $704.43 \times 10^4$  t)的1.75倍;2)2010年的年输沙量分别是2008、2009年的年输沙量1.36倍~1.53倍;3)由于2010年岷江上游流域发生了强降雨,表明在强降雨的影响下,由强降雨导致输沙量增加了75.92%;4)2010年输沙量显著增加的原因主要是强降雨带和汶川地震滑坡、泥石流带的叠加,因此在汶川地震后,只要出现强降雨,河流的输沙量将会迅猛增加。

### 1.4 2010年强降雨驱动的特大泥石流的产沙量及其对岷江上游输沙量增加的贡献

在岷江上游暴发了“8·13”、“8·18”的强降雨导致了特大泥石流达20处之多,其中大型的泥石流包括红椿沟泥石流、碱坪沟泥石流和八一沟泥石流(表1)。仅在汶川地震震中(映秀)的岷江左岸就形成了6个大型泥石流,促使大量的汶川地震导致的松散固体物质、滑坡再次活动,并以泥石流的形式输移到岷江中。为了能够定量地研究红椿沟泥石流、碱坪沟泥石流和八一沟泥石流对岷江输沙量的影响,作者采用台湾学者根据集集地震与泥石流土砂产量的估算方法<sup>[8]</sup>对红椿沟泥石流产砂量进行了估算。台湾集集地震后,在分析现场调查资料的基础上,认为泥石流土砂产量一般与流域面积的大小相关,并受不同重现期雨量的影响,泥石流的土砂产量估算公式为:

$$V_s = K \times (R_0 - r) \times A^{0.61} \quad (1)$$

式中:  $V_s$  为泥石流的土砂产量,  $m^3$ ;  $A$  为流域面积,  $m^2$ ;  $r$  为临界日降雨量;  $R_0$  为泥石流发生之日的降雨量;  $K$  为系数。

表1 2010年8月13日岷江上游特大泥石流的流速、流量、冲出量统计表

Tab.1 Flow velocity, flow rate and short-term volume of large debris flows in the upper reaches of the Min River on August 13, 2010

| 沟名  | 流域名称                  | 面积/km <sup>2</sup> | 泥石流总量<br>$W_c/(10^4\text{ m}^3)$ | 一次泥石流冲出<br>总量 $W_c/(10^4\text{ m}^3)$ | 峰值流量<br>$Q_c/(m^3\cdot s^{-1})$ | 持续时长<br>$T/s$ | 发生之日雨量<br>$R_0/mm$ | 临界日雨量<br>$r/mm$ | 数据<br>来源 |
|-----|-----------------------|--------------------|----------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------|---------------|--------------------|-----------------|----------|
| 碱坪沟 | 岷江一级<br>支沟龙溪河<br>左岸流域 | 3.60               | 144                              | 11.5                                  | 80.10                           | 5 400         | 75                 | 70              | 文献[12]   |
| 八一沟 | 岷江一级<br>支流龙溪河<br>右岸流域 | 7.67               | —                                | 116.5                                 | 1 082.00                        | 6 240         | 75                 | 70              | 文献[13]   |
| 红椿沟 | 映秀镇<br>岷江左岸           | 5.35               | —                                | 71.1                                  | 696.45                          | 5 400         | 59                 | 50              | 文献[14]   |

本次利用该方法对2010年“8·13”红椿沟泥石流、碱坪沟泥石流和八一沟泥石流的一次冲出土砂产量进行了估算(表2)。

表2 2010年8月13日岷江流域主要特大泥石流的土砂产量估算结果

Tab.2 Estimated results for sediment yields of large debris flows occurring in the Min River basin on August 13, 2010

| 沟名  | $R_0/mm$ | $r/mm$ | $A/km^2$ | $V_s/(10^4\text{ m}^3)$ |
|-----|----------|--------|----------|-------------------------|
| 碱坪沟 | 75       | 70     | 3.6      | 13.5                    |
| 红椿沟 | 162.1    | 16.4   | 5.35     | 75.2                    |
| 八一沟 | 75       | 70     | 7.67     | 253.4                   |

结果表明,红椿沟泥石流的一次冲出土砂产量为 $75.2\times10^4\text{ m}^3$ ,碱坪沟泥石流的一次冲出土砂产量为 $13.5\times10^4\text{ m}^3$ ,八一沟泥石流的一次冲出土砂产量为 $253.4\times10^4\text{ m}^3$ ,总和为 $342.1\times10^4\text{ m}^3$ ,可折合为 $263.9\times10^4\text{ t}$ 。据实地调查,2010年8月13日红椿沟泥石流的一次冲出量为 $71.1\times10^4\text{ m}^3$ ,与计算值十分接近,表明这种计算方法适用于岷江流域。据此,获得以下初步结论:1)2010年8月13日所发生3个特大泥石流的产砂量( $263.9\times10^4\text{ t}$ )占岷江流域的多年平均输沙量( $704\times10^4\text{ t}$ )的37.49%,表明泥石流的产砂量对岷江流域当年新增输沙量的影响很大,它们对岷江流域新增输沙量的贡献率达到37.49%。2)在2010年“8·13”泥石流事件中,仅在映秀红椿沟、都江堰龙池2地冲入岷江流域河流中的泥石流方量共计 $440\times10^4\text{ m}^3$ ,考虑到“8·13”特大暴雨引发了岷江入河泥石流达数10处之多,估计单个泥石流冲入河中的物质在 $50\times10^4\sim100\times10^4\text{ t}$ 之间。因此,估计在2010年因泥石流冲入岷江流域的物质总量为 $490\times10^4\sim540\times10^4\text{ m}^3$ 之间。3)2010年的输沙量应该是多年平均输沙量( $704\times10^4\text{ t}$ )与泥石流冲入岷江流域的物质总量( $490\times10^4$

$\text{m}^3\sim540\times10^4\text{ m}^3$ )的总和,即:在 $1\,254\times10^4\sim1\,304\times10^4\text{ m}^3$ 之间。因此,综合考虑了2010年“8·13”所有泥石流的产砂量,估计2010年“8·13”特大泥石流对当年岷江流域总的输沙量贡献率介于39.54%~43.58%。

2 汶川地震后岷江上游输沙量增加的成因分析

人们通常认为,地震尤其是逆断型发震是一种造山运动,每一次地震都将导致山脉新的抬升,从而造就山脉持续隆升。但是在强震过程中,由于大量滑坡崩塌的产生,导致山体物质大量下泄,导致河流输沙量的增加。因此,作者认为汶川地震破裂带的分布、滑坡带的分布和强降雨带的分布等均对岷江上游输沙量的增加都具有控制作用。

2.1 汶川地震后岷江上游输沙量的增加受汶川地震触发的滑坡、泥石流的控制

据台湾集集地震的研究结果表明,强震作用下为泥石流流域提供了大量松散固体物质来源<sup>[9-10]</sup>。汶川地震的震裂山体对岷江上游沟谷斜坡岩土体破坏严重,导致崩塌、滑坡等大量松散物质堆积于沟道中,为泥石流和岷江河道形成提供了丰富的物源。据报道,汶川地震形成的大型崩滑体所能提供的固体松散物质达 $400\times10^6\text{ m}^3$ <sup>[2]</sup>,除少部分物质已进入河道外,仍有大量松散物悬于河谷谷坡之上。此外,岷江上游的汶川至都江堰河段的滑坡、泥石流的分布区受汶川地震断裂的控制,沿发震断裂呈带状分布,处于映秀-北川断裂交叉、错落部位的压应力集中区这一特殊部位,一旦有一定强度的暴雨或连续性降雨,可促使震后滑坡沉积物质的再次输移,导致大量的地表松散物随泥石流进入河道。因而,可以认为震后滑坡、泥石流将加速该区水系对地表物质的剥蚀、搬运过程。因此,汶川地震后岷江上游输沙量的增加量受汶川地震触发的滑坡、泥石流的控制。



## 2.2 强降雨带与汶川地震滑坡带基本重合,导致了汶川地震后输沙量的增加受强降雨的控制

龙门山位于青藏高原东缘,降雨主要受东亚季风控制,在7~9月东亚季风气流由南东向北西通过龙门山脉,在龙门山东侧的向风坡产生“雨影区”效应,形成“地形雨”,降雨量剧增,形成东北向展布的强降雨带(图6)。

由于强降雨带与龙门山汶川地震破裂带、滑坡带在空间位置上基本重合,体现了地震构造作用过程、地表剥蚀过程和降雨过程之间的反馈关系,使得汶川地震导致龙门山地区河流传输能力的提高。因此,即在强降雨条件下,滑坡、泥石流灾害使大量地表松散物进入河流系统,水系对地表物质的剥蚀、搬运过程加快,河流输沙量增大。

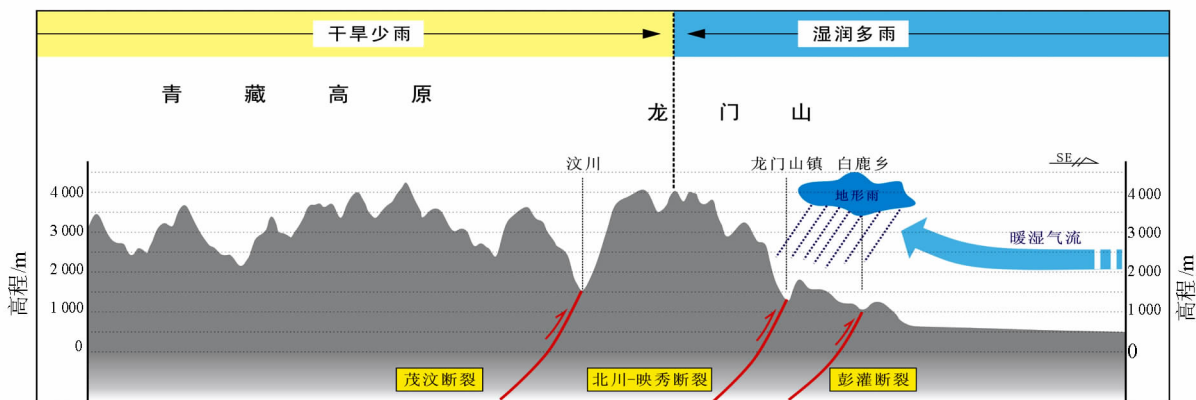


图6 龙门山地区地形雨形成剖面示意图

Fig.6 Profile showing the formation of orographic rain on Longmen Mountain

## 3 讨论与结论

汶川地震和震后强降雨导致了大量的滑坡、泥石流,形成了堵江和洪水事件,使得今后几年内河流输沙量的不断增加,同时也使得地震滑坡沉积物在河流系统中的搬运、传输及速度是能够被测量的,这为定量剖析地震滑坡沉积物在河流系统中的搬运和传输奠定科学依据。本次以位于汶川地震震中的岷江上游为例,剖析了汶川地震前后输沙量的变化情况,从沉积学的角度分析了震后强降雨驱动的滑坡、泥石流对输沙量增加的控制作用,获得以下初步结果:

1)由汶川地震的同震构造抬升和滑坡、泥石流导致的岷江上游输沙量增加值为30%左右,表明汶川地震后岷江上游输沙量的增加受汶川地震触发的滑坡、泥石流的控制。

2)在汶川地震后,由强降雨导致的输沙量是震前的1.75,表明泥石流的产砂量对岷江流域当年新增输沙量的贡献率达到37.49%。

3)强降雨带与地震发震断裂带和地震滑坡带基本重合,导致了汶川地震后输沙量的增加与强降雨量之间存在正反馈关系。

4)汶川地震震动所引发地表物质松动和驱动滑坡导致了河流输沙量加大,这是未来几十年所面临的灾害。

## 参考文献:

- [1] Parker R N, Densmore A L, Rosser N J, et al. Mass wasting triggered by the 2008 Wenchuan earthquake is greater than orogenic growth [J]. Nature Geoscience, 2011, 4 (7): 449 - 452.
- [2] Huang R Q, Fan X M. The landside story [J]. Nature Geoscience, 2013, 6 (5): 325 - 326.
- [3] Li Yong, Huang Runqiu, Zhou Rongjun, et al. The Ms8.0 Wenchuan earthquake and co-seismic river response [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2010, 42 (5): 20 - 33. [李勇, 黄润秋, 周荣军, 等. 汶川 Ms8.0 级地震的水系响应 [J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2010, 42 (5): 20 - 33.]
- [4] Korup O, Densmore A L, Schlunegger F. The role of landslides in mountain range evolution [J]. Geomorphology, 2010, 120 (1/2): 77 - 90.
- [5] Dadson S J, Hovius N, Chen H, et al. Earthquake-triggered increase in sediment delivery from an active mountain belt [J]. Geology, 2004, 32: 733 - 736.
- [6] Cao Shuyou, Liu Xingnian, Huang Er. Advances in studies of river sediment and fluvial processes of the Upper-Yangtze river in earthquake background [J]. Journal of Si-

- chuan University: Engineering Science Edition, 2009, 41(3):26-33. [曹叔尤,刘兴年,黄尔.地震背景下的川江流域泥沙与河床演变问题研究进展[J].四川大学学报:工程地质学,2009,41(3):26-33.]
- [7] Lin G W, Chen H, Niels H, et al. Effects of earthquake and cyclone sequencing on landsliding and fluvial sediment transfer in a mountain catchment[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2008, 33(9):1354-1373.
- [8] Lin C W, Shieh C, Yuan B, et al. Impact of Chi-Chi earthquake on the occurrence of landslides and debris flows; example from the Chenyulan River watershed, Nantou, Taiwan[J]. Engineering Geology, 2004, 71(1/2):49-61.
- [9] Lin C W, Liu S, Lee S, et al. Impacts on the Chi-Chi earthquake on subsequent rainfall-induced landslides in central Taiwan[J]. Engineering Geology, 2006, 86(2/3):87-101.
- [10] 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.
- [11] Tang Chuan, Li Weile, Ding Jun, et al. Field investigation and research on giant debris flow on AUGUST 14, 2010 in Yingxiu town, epicenter of Wenchuan earthquake[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2011, 36(1):172-180. [唐川,李为乐,丁军,等.汶川震区映秀镇“8·14”特大泥石流灾害调查[J].地球科学——中国地质大学学报,2011,36(1):172-180.]
- [12] Chu Shengming, Yu Bin, Li Li, et al. Forming mechanism and characteristics of debris flow happened on August 13, 2010 in Jianping Gully[J]. Soil and Water Conservation in China, 2011(8):52-54. [褚胜名,余斌,李丽,等.“8·13”碱坪沟泥石流形成机理及特征研究[J].中国水土保持,2011(8):52-54.]
- [13] Ma Yu, Yu Bin, Wu Yufu, et al. Research on the disaster of debris flow of Bayi Gully, Longchi, Dujiangyan, Sichuan on August 13, 2010[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2011, 43(1):92-98. [马煜,余斌,吴雨夫,等.四川都江堰龙池“八一沟”大型泥石流灾害研究[J].四川大学学报:工程科学版,2011,43(1):92-98.]
- [14] Zhou Zhidong, Huang Qiang, Deng Ting. Study on development mechanism of debris flow in Hongchungou[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2011, 42(9):55-58. [周志东,黄强,邓婷.四川红椿沟泥石流成因初步分析[J].水利水电技术,2011,42(9):55-58.]

(编辑 张琼)