

# 汶川地震后四川省绵竹市清平乡文家沟泥石流灾害调查研究<sup>\*</sup>

余斌 马煜 吴雨夫

(成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室 成都 610059)

**摘要** 在2008年5月12日汶川地震后的地震灾区暴发了许多泥石流灾害,其中以四川省绵竹市清平乡文家沟泥石流最为显著。文家沟原来不是泥石流沟,在汶川地震时由于滑坡形成的巨大的滑坡-碎屑流堆积体改变了文家沟的泥石流形成条件,在此后的3个雨季内,文家沟先后暴发了5次大规模和特大规模的泥石流灾害,其中以8·13文家沟泥石流规模和危害最大。8·13文家沟泥石流暴发时的总降雨量为227mm,泥石流持续时间约2.5h,泥石流总量约 $310 \times 10^4 \text{ m}^3$ ;泥石流造成7人死亡,5人失踪,39人受伤,479户农房被掩埋,直接经济损失4.3亿元。5次大规模和特大规模的泥石流以及洪水仅带走了16%的可以很容易形成泥石流的滑坡-碎屑流堆积物,文家沟如再遭遇较大降雨还会暴发泥石流。即使在今后的雨季中暴发几次规模如8·13泥石流一样大的特大规模泥石流,文家沟在较大降雨下仍然可能暴发泥石流灾害,因此对文家沟泥石流的防治工作将是一个长期的工作。

**关键词** 文家沟 泥石流 滑坡-碎屑流 地震 降雨

**中图分类号**:TU457, P642.22 **文献标识码**:A

## INVESTIGATION OF SEVERE DEBRIS FLOW HAZARDS IN WENJIA GULLY OF SICHUAN PROVINCE AFTER THE WENCHUAN EARTHQUAKE

YU Bin MA Yu WU Yufu

(State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059)

**Abstract** Many debris flow hazards were triggered recently in the epicenter area of the 2008 Wenchuan Earthquake. The severest debris flow is the debris flow in Wenjia Gully on Aug. 13, 2010. Wenjia Gully was a simply and ordinary gully and had no debris flow at all before the Wenchuan Earthquake. The formation conditions of debris flows were totally changed by a giant landslide caused by the earthquake. The giant landslide formed a landslide-debris deposition in the gully. The debris deposition had a volume of more than 30million cubic meters. The sediments were easily eroded by flash flood and formed debris flows. In the three raining seasons after the earthquake, a total of five large scale and giant scale debris flow were triggered. The largest and most harmful debris flow occurred on Aug. 13, 2010. The total rainfall during the debris flow was 227mm, and the duration of debris flow was 2.5 hours. The volume of debris flow was 3.1 million cubic meters. The debris flow resulted in 7 fatalities, 5 persons listed as missing, 39 persons injured, 479 houses buried, and a direct economic loss of RMB 430 million. About 16% sediments of the landslide-debris deposition flew down out of the gully during the five large scale debris flows. New

\* 收稿日期:2010-11-20;收到修改稿日期:2010-11-29.

基金项目:国家自然科学基金(40871054, 40772206)和地质灾害防治地国家重点实验室自主研究基金(DZKJ-0810).

第一作者简介:余斌,主要从事泥石流形成、运动和堆积以及浊流沉积的研究工作。Email:drbinu@gmail.com

debris flows will be triggered by rainfall in the gully in the future. It will be a long-term effort for prevention and mitigation of the debris flow hazards in the gully.

**Key words** Wenjia Gully, Debris flow, Landslide-debris, Hazards Wenchuan Earthquake, Rainfall

## 1 引言

2010年8月13日凌晨零点30分,在持续强降雨作用下,位于汶川地震重灾区的四川省绵竹市清平乡文家沟暴发特大泥石流灾害,泥石流冲塌绵远河上游幸福大桥后,将大桥整体推移到下游并堵塞老清平大桥,致使绵远河堵塞、水位抬高、河水改道。泥石流在绵远河河道内淤积体长约1600m,宽200m到500m,最大淤积厚度超过15m,平均淤积厚度为7m,泥石流总量约 $310 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。泥石流造成7人死亡,5人失踪,39人受伤,479户农房被掩埋受损,清平乡卫生院、学校等设施被严重掩埋,农田被毁300余亩,水、电、通讯全部中断,直接经济损失4.3亿元(图1)。

在2008年5月12日汶川地震前清平乡文家沟不是泥石流沟,但在汶川地震后的3个雨季内,文家沟先后暴发了5次大规模和特大规模的泥石流灾害,文家沟在地震的影响下演变为一条高频率泥石流沟<sup>[1]</sup>。在将来还极有可能多次暴发大规模或特大规模泥石流灾害。为了进一步查明泥石流的发生原因和发展趋势,成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室组织调查组对文家沟在汶川地震后发生的泥石流进行了现场调查,分析了泥石流的特征、成灾原因、成灾过程及泥石流的各重要参数,探讨了将来文家沟泥石流的发展趋势并提出了针对文家沟泥石流的防治建议,为今后泥石流的防灾减灾提供了依据。

## 2 文家沟泥石流流域基本特征及泥石流发生历史

文家沟位于四川省绵竹市西北部山区的清平场镇北,属长江流域的沱江水系上游绵远河左岸一支沟,沟口坐标  $N31^\circ 33' 04.7''$ ,  $E104^\circ 06' 58.5''$ 。在地貌上属构造侵蚀中切割陡峻低-中山地貌、斜坡冲沟地形。文家沟流域总体东西向伸展,主沟呈“7”字型,横断面呈“V”“U”结合,汇水面积  $7.81 \text{ km}^2$ ,主沟全长  $3.25 \text{ km}$ ,流域内最低点位于沟口海拔  $883 \text{ m}$ ,最高峰位于东部分水岭九顶山的顶子崖,海拔  $2402 \text{ m}$ ,相对高差  $1519 \text{ m}$ ,沟床平均纵坡降

$467.4\%$ 。文家沟有2条支沟,其中1号沟流域面积  $1.57 \text{ km}^2$ ,沟道长  $2.23 \text{ km}$ ,相对高差  $1017 \text{ m}$ ,沟床平均纵坡降  $456.1\%$ ;2号支沟流域面积  $0.64 \text{ km}^2$ ,沟道长  $1.21 \text{ km}$ ,相对高差  $587 \text{ m}$ ,沟床平均纵坡降  $485.1\%$ 。文家沟主沟发育于流域的峡谷区,岸坡陡峻,沟谷切割深,沟道短,纵坡降大,迭水坎多,横断面呈V型,为泥石流的暴发提供了有利的地形条件(图2)。

清平乡所属绵竹市地处四川盆地中亚热带湿润气候区,气候温和,降水充沛,四季分明。由于地形高差大,气候的垂直变化和差异很大,年平均气温  $15.7^\circ \text{C}$ 。通过对绵竹市清平乡文家沟区域1992以来近20a的降雨资料统计分析,最大日降雨量达  $496.5 \text{ mm}$ ,出现在1995年8月15日;最大1h降雨量为  $49.8 \text{ mm}$ ,最大10min降雨量  $23.98 \text{ mm}$ ,均出现在1995年8月11日;5a一遇的1h降雨量为  $69.3 \text{ mm}$ 。降雨主要集中在7~9月,这三个月的降雨量占全年降雨量的80%以上。降雨具有波动变幅大、降水集中、雨强大和暴雨频率高的特点,这些特点有利于洪水灾害和泥石流等灾害的发育。绵远河属长江流域的沱江水系上游。该段河谷宽窄相间,河面宽度  $50 \sim 200 \text{ m}$ ,多年平均总径流量  $5.12 \text{ 亿 m}^3$ 。

文家沟在地质构造上位于龙门山中央断裂(映秀—北川断裂)下盘的龙门山皱褶断束带中的太平推覆体,与映秀—北川断裂相距约  $3.6 \text{ km}$ 。在文家沟流域内出露地层主要为寒武系的清平组和泥盆系的观山雾组。泥盆系的观山雾组出露地层主要为:上部灰—深灰色石灰岩夹白云质灰岩;下部砂页岩夹泥质灰岩夹有铁质砂岩;底部黄褐色灰色中厚层石英砂岩,分布在“1300平台”以上,岩层产状  $320^\circ \angle 32^\circ$ ,呈顺向坡产出。寒武系的清平组出露岩层主要为:上部灰色薄层状长石云母石英粉砂质板岩及钙质泥质粉砂岩;中部暗紫—暗灰绿色薄层板状钙质粉砂岩;下部由灰绿色细粒状磷块岩、灰色含磷泥灰岩、薄层硅质岩及深灰色钙质磷块岩与磷质灰岩互层,统称为磷矿段,分布在“1300平台”以下,为文家沟的主要地层,总体倾向N-NW。2008年汶川地震时产生的滑坡—碎屑流堆积体极大地改变了文家沟内泥石流的物源条件。在汶川地震过



图1 8·13 文家沟泥石流在绵远河内淤积以及掩埋部分清平乡镇

Fig. 1 The deposition in Mianyuan River by debris flow of Wenjia Gully on August 13 and the buried part of Qingping Town

程中,汶川地震中的第2大滑坡-文家沟滑坡将  $2750 \times 10^4 \text{m}^3$  的观山雾组灰岩岩体从高程 1780 ~ 2340m 的山顶顺层高速下滑,在滑动过程中“刮铲”沟道两侧坡体,一部分停留在韩家大坪处形成了主堆积区 I,方量约  $2000 \times 10^4 \text{m}^3$ ; 另一部分从其前缘陡坎顶部高速抛射而出,在与对岸山体剧烈碰撞后随即解体转化为碎屑流,进入“1300m”平台并沿 SW 方向运动,最后大部分停留在 1400 ~ 985m 高程处形成了主堆积区 II,方量约  $3000 \times 10^4 \text{m}^3$  [2] (图 2, 3);

主堆积区 I 分布高程 1599 ~ 1890m,与滑坡前地势平缓(坡度约  $10^\circ$ )的韩家大坪基本重合。该区现今滑坡堆积物 ( $Q_4^{\text{del}}$ ) 成分为灰岩及白云质灰岩块碎石,直径大于 1m 的块石含量超过了 30%, 20 ~ 40cm 的占 40%。块碎石均为棱角状,大小混杂,无分选,表面结构松散,但经过一年来流水所携带的砂性土填埋,砂土固结度程度好,密实程度为中密至密实 [2]。由于该区块石粒径较大,密实程度较好,坡度较缓,上游汇水面积较小,在洪水作用下被起形成泥石流的可能性很小。

主堆积区 II 分布高程 1400 ~ 985m,是文家沟滑坡的土体部分,也是地震后次生泥石流发生的主要物源区,堆积区的最大淤积厚度约 150m。该区堆积

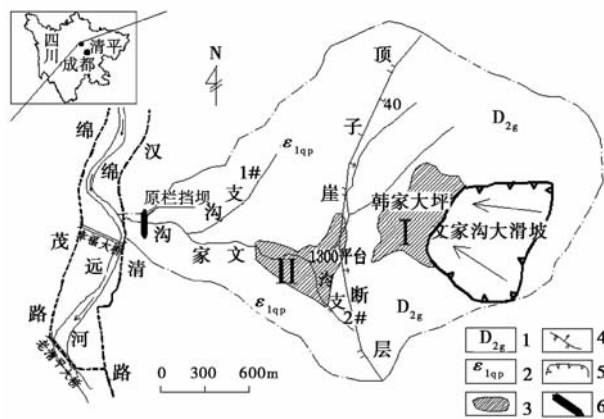


图2 文家沟流域图

Fig. 2 Catchment of Wenjia Gully

1. 泥盆系关雾山组; 2. 寒武系清平组; 3. 滑坡碎屑物堆积区;
4. 顶子崖逆掩断层; 5. 滑坡滑源区边界; 6. 拦挡坝

物主要为块碎石土,石质成分为灰白色棱角-次棱角状灰岩,土质成分为褐色黏土。堆积物表层结构松散,向下随厚度增加而逐渐密实。堆积物中直径小于 10mm 的占 30%, 1 ~ 20cm 的占 60%, 大于 20cm 的占 10%, 其中最大的超过了 160cm [2]。由于该区块石粒径较小,密实程度一般,坡度较陡,上游汇水面积较大,该区滑坡-碎屑流堆积体很容易被洪水起形成泥石流,且堆积体体积巨大,在持续较

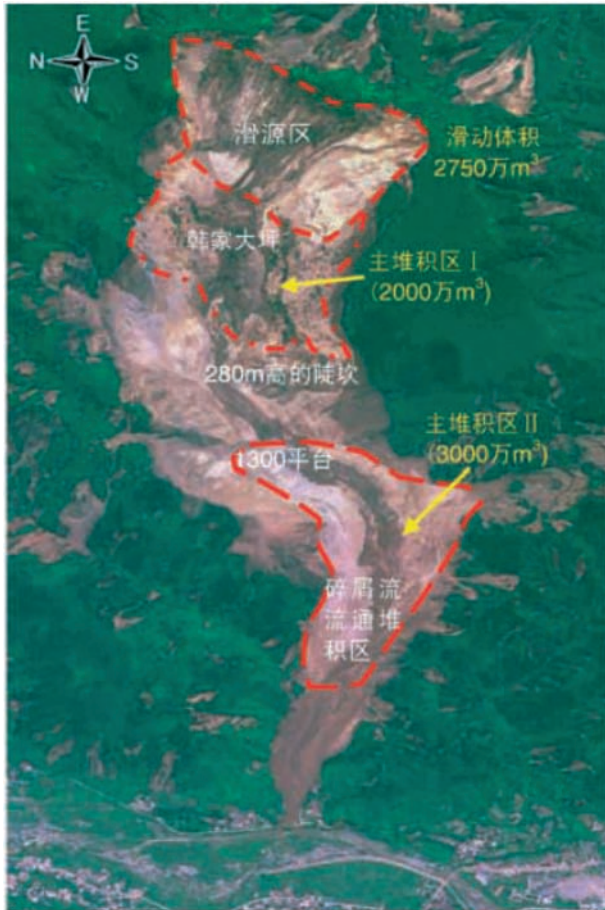


图3 汶川地震时文家沟滑坡及滑坡-碎屑流堆积

Fig. 3 The giant landslide in Wenjia Gully triggered

by Wenchuan Earthquake and the deposition of landslide-debris

大降雨条件下,堆积体可以源源不断地被洪水起动力形成规模巨大的泥石流灾害。

根据查阅绵竹县志和现场访问调查,绵远河清平段分别于1934、1964、1992、1995和1998年发生了较大的洪水,其中1934年爆发的洪水最大,根据统计相当于150—200a一遇的洪水。在所有这些绵远河爆发洪水时,绵远河流域都有较大降雨发生,而紧靠清平乡场镇的文家沟都没有发生泥石流。在1933年叠溪地震中,清平乡为该地震的轻破坏区<sup>[3]</sup>,但在随后的绵远河流域爆发大洪水,绵远河流域均有较大降雨的1934年,文家沟也没有发生泥石流,因此可以判断文家沟在汶川地震前不是泥石流沟。

### 3 汶川地震后文家沟泥石流暴发过程及成因

在2008年5月12日汶川地震前清平乡文家沟

不是泥石流沟,但在汶川地震后的3个雨季内,文家沟先后暴发了5次大规模和特大规模的泥石流灾害,文家沟在地震的影响下演变为一条高频率泥石流沟。这5次泥石流灾害暴发的时间和过程分别为:

(1)2008年9·24泥石流:2008年9月24日四川西北部发生强降雨,总降雨量达到88mm,导致文家沟暴发特大规模泥石流,泥石流总量约 $50 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,冲毁沟口公路并堵塞了绵远河河道,形成堰塞湖<sup>[1,2]</sup>。

(2)2010年7·31泥石流:2010年7月31日绵竹市发生强降雨,3h降雨量达到92.6mm(距文家沟约6km的楠木沟降雨资料),导致文家沟暴发大规模泥石流,泥石流总量约 $10 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,沟内部分谷坊溃决失效<sup>[1]</sup>。

(3)2010年8·13泥石流:2010年8月12日四川绵竹市清平乡发生局地大暴雨,从下午18时开始降雨,在22时之前雨量较小,22:30—13日1:30降雨演变为大到暴雨,随后逐渐减小至3时左右降雨停止,总降雨量227mm。泥石流的暴发是在13日0时30分左右,由于强大的洪水挟带大量的泥沙冲溃文家沟最后一道拦砂坝,形成溃决型特大规模泥石流。泥石流冲入绵远河,冲塌绵远河上游幸福大桥后,将大桥整体推移到下游并堵塞老清平大桥,致使绵远河堵塞、水位抬高、河水改道。泥石流持续时间约2.5h,在形成区冲刷形成新的沟道,在文家沟最后一道拦砂坝下游150m处开始淤积。泥石流进入绵远河后,在河道内大量淤积,淤积体长约1600m,宽200m到500m,平均宽300m,最大淤积厚度超过15m,平均淤积厚度为7m,泥石流总量约 $310 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。泥石流造成7人死亡,5人失踪,39人受伤,479户农房被掩埋受损,清平乡卫生院、学校、场镇、加油站、部分汶川地震安置房等设施被严重掩埋,农田被毁300余亩,水、电、通讯全部中断,直接经济损失4.3亿元。

(4)2010年8·19泥石流:2010年8月18日22时开始降雨,在19日的2—6时降雨量增大,到19日上午11时总降雨量为172.6mm(楠木沟降雨资料);19日凌晨暴发大规模泥石流,又有一部分民房被泥石流掩埋,泥石流总量约 $30 \times 10^4 \text{ m}^3$ <sup>[1]</sup>;

(5)2010年9·18泥石流:2010年9月18日上午9时开始降雨,根据文家沟泥石流的清水汇流区和泥石流形成区交界的“1300平台”降雨资料,最大5min降雨量5.5mm(发生时间9:40—9:45),最大30min降雨量16.5mm(发生时间9:30—10:00),

总降雨量 51.5mm。在降雨过程中滑坡-碎屑流堆积体出现了一大块的垮塌堆积在沟道中,形成了堵塞坝;在 10:05 堵塞坝溃决形成大规模泥石流,泥石流洪峰流量约  $220\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (图 4);泥石流为黏性泥石流,容重为  $2.1 \sim 2.3 \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ;泥石流的淤积位置上移,在文家沟最后一道拦砂坝上游 150m 处就开始淤积,相比 8·13 泥石流的淤积起始点,淤积起始点位置上移了约 300m。泥石流掩埋一部分沟口民房,淤埋了在沟道内施工的钻机 2 台,泥石流总量约  $17 \times 10^4 \text{m}^3$ (四川省地质工程集团公司提供了 2010 年 9 月 18 日文家沟泥石流的降雨、泥石流容重、泥石流流量和泥石流总量的泥石流现场观测资料)。



图 4 文家沟 9·18 泥石流龙头

Fig. 4 The head of debris flow on September 18, 2010 in Wenjia Gully

文家沟在 2008 年汶川地震后的 3 个雨季连续暴发 5 次大规模和特大规模泥石流的原因是汶川地震为泥石流提供了非常丰富的松散固体物源。汶川地震前文家沟沟内松散固体物质来源主要是崩塌产生的零星块石,大多被洪水带走,很难形成具有一定规模并可以参与泥石流的松散固体物质积累,因此即使在 1934 年的大降雨情况下也没有泥石流发生。汶川地震后有  $3000 \times 10^4 \text{m}^3$  滑坡-碎屑流堆积体在“1300 平台”下游,这些松散堆积物颗粒细小,堆积在文家沟沟道内并淤埋了原来的水流通道的,在有小降雨时就会被流水冲刷形成高含沙水流,在较大降雨作用下就会形成泥石流(图 5),如 2008 年 9·24 和 2010 年 8·19 及 9·18 泥石流。在 2008 年 9·24 泥石流后,在文家沟泥石流形成区和堆积区修建了多道谷坊和拦砂坝,但强大的洪水挟带大量的泥沙冲毁了谷坊和拦砂坝,形成了 2010 年 7·31 和 8·13 泥石流。

在具备了非常丰富且很容易被洪水起动的固体物质和陡峻的地形条件后,降雨量就是文家沟泥石流暴发的诱发因素。图 6 为文家沟 2010 年 9·18 泥石



图 5 文家沟泥石流形成区

Fig. 5 The formation area of debris flow in Wenjia Gully

a. 泥石流形成区源头; b. 泥石流形成区中部

流暴发前后的文家沟“1300 平台”和距文家沟约 6km 的楠木沟降雨量图。文家沟 9·18 泥石流暴发前的 30min 降雨量达到 16.5mm,正是这样集中的高强度降雨引起了滑坡-碎屑流堆积体的局部垮塌并堵塞沟道形成堰塞坝,在后来的强大洪水冲刷下溃决并形成泥石流。从图 6 可以看出尽管文家沟和楠木沟两个地方的降雨量有一些差别,但在没有降雨资料时楠木沟降雨资料可以作为文家沟降雨量的参考值。

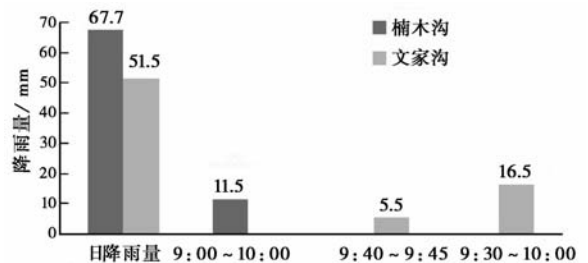


图 6 文家沟 9·18 泥石流暴发前降雨量及日降雨量

Fig. 6 Daily rainfall and Rainfall before debris flow of Wenjia Gully on Sep. 18, 2010

图 7 为 2010 年 7·31, 8·13 和 8·19 泥石流暴发前后楠木沟累积降雨量。从这三次降雨过程与泥石流的形成条件分析这三次泥石流的暴发过程如下:(1)7 月 31 日的降雨主要发生在 3~4 时和 4~5 时,小时降雨量分别为 39.1mm 和 50.4mm,泥石流的暴发是在较大降雨强度形成的洪水冲溃沟内部分谷坊后形成的,随着降雨的结束泥石流也随之结束;(2)8 月 12 日 19~23 时最大小时降雨量为 16.6mm,此后的 23~24 时降雨量为 37.4mm,此时洪水冲刷滑坡-碎屑流堆积体并将沟内最后一道拦砂坝淤满,13 日 0~3 时的小时降雨量分别为 16.3mm, 38.7mm, 24.8mm,此时强大的洪水冲溃拦砂坝并形成泥石流,泥石流持续到降雨结束;(3)8 月 19 日 1~5 时降雨量增大,小时降雨量为 16.1~21.9mm,此时因 8·13 泥石流将堆积体新冲刷出 1

条沟道,沟道坡度变缓,沟道宽度展宽,洪水单宽流量变小,流速降低,洪水冲刷能力降低,没有达到足够的洪水流量形成泥石流;5~6时的降雨量达31.9mm,洪水流量增大从而形成泥石流;6~7时降雨量为21.7mm,泥石流流量减小直到完全停止。

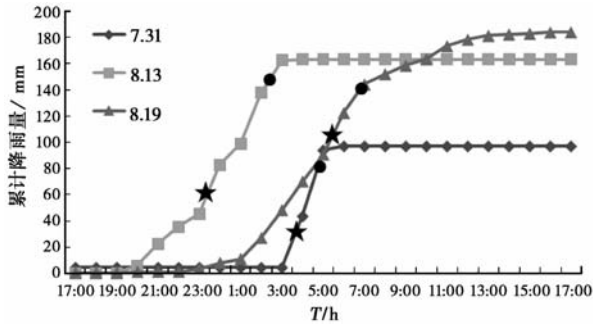


图7 文家沟7·31、8·13和8·19泥石流暴发前后降雨过程(楠木沟资料)

Fig. 7 Rainfall before and after debris flows of Wenjia Gully on July 31, Aug. 13 and Aug. 19, 2010 (Data of Nanmu Gully)  
★为泥石流暴发时间;●为泥石流结束时间,其中7·31,8·19为推测时间;楠木沟降雨量资料由成都高原气象所提供

从8·19泥石流暴发的激发降雨量是1h降雨量31.9mm,到9·18泥石流暴发的激发降雨量是30min降雨量16.5mm,说明这两次泥石流暴发的激发降雨条件基本一致。汶川地震后文家沟这5次大规模和特大规模泥石流的暴发除了8·13泥石流的量特别大以外,其他几次泥石流暴发的量不是很大,8·19和9·18泥石流的总量分别为 $30 \times 10^4 \text{ m}^3$ 和 $17 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,相对于 $3000 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的滑坡-碎屑流堆积体这两次泥石流带走的泥沙微不足道,对文家沟现在泥石流形成区的改变也很有限,因此9·18泥石流和8·19泥石流的触发条件基本一致,今后的文家沟泥石流的诱发降雨条件也与8·19及9·18泥石流的诱发降雨条件一样:以h降雨量为标准,在20mm时接近泥石流暴发的临界值,30mm时泥石流暴发。由于文家沟5a一遇的1h降雨量为69.3mm,因此在2010年文家沟多次暴发泥石流灾害,在今后的雨季中也可能一年多次暴发泥石流灾害。

#### 4 文家沟泥石流的静力学和动力学特征

泥石流的静力学和动力学特征是泥石流的重要特征参数。四川省地质工程集团有限公司在2010年9月18日文家沟泥石流暴发现场通过观测和取样获得了泥石流的重要参数:泥石流为黏性泥石流,容重

为 $2.1 \sim 2.3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。通过对文家沟的2010年8·13和9·18泥石流在堆积区的沉积物调查得出:泥石流的沉积特征均为混杂沉积,有明显的反粒径分布,说明两次泥石流同样都是性质相近的黏性泥石流。根据在8·13泥石流堆积区的取样(小样),由颗粒分析曲线(如图8)可以计算出黏性泥石流的容重<sup>[4]</sup>:

$$\gamma_D = \gamma_0 + P_2 P_{05}^{0.35} \gamma_V \quad (1)$$

式中: $\gamma_D$  = 黏性泥石流容重( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ); $\gamma_V$  = 黏性泥石流最小容重( $= 2.0 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ); $\gamma_0$  = 泥石流最小容重( $= 1.5 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ); $P_2$  = >2mm的粗颗粒百分含量(小数表示, $= 0.663$ ); $P_{05}$  = <0.05mm的粗颗粒百分含量(小数表示, $= 0.172$ )。计算结果为8·13泥石流容重为 $2.22 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,这与9·18泥石流的现场取样结果一致,可以作为这两次泥石流的容重值,同样2008年9·24泥石流,2010年7·31和8·19泥石流暴发在同一小流域,形成机理也相同,因此也可以将 $2.22 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 作为这几次泥石流的容重值。

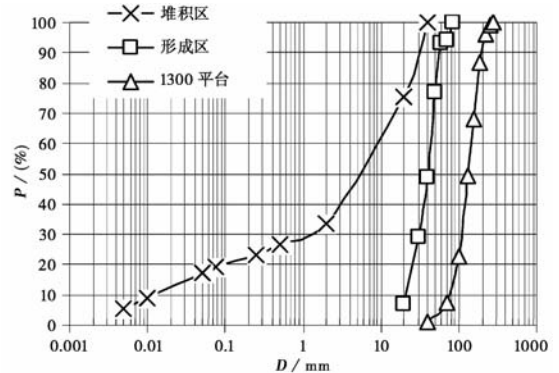


图8 泥石流堆积物和泥石流形成区表面颗粒分布曲线  
Fig. 8 Particle distribution of the sediment in debris flow and channels

堆积区曲线为泥石流堆积物小样颗粒重量百分比曲线;形成区曲线为占形成区60%以上颗粒中径的颗粒个数百分比;“1300平台”曲线为占80%以上颗粒中径的颗粒个数百分比

泥石流中的泥沙体积浓度可以根据泥石流容重计算得到<sup>[5]</sup>:

$$C = \frac{\gamma_D - \gamma_w}{\gamma_s - \gamma_w} \quad (2)$$

式中: $C$  = 泥石流的泥沙体积浓度; $\gamma_s$  = 泥石流中固体颗粒比重( $= 2.7 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ); $\gamma_w$  = 水的比重( $= 1.0 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ );计算结果泥石流泥沙的体积浓度为0.72。

泥石流容重为 $2.22 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,表明文家沟泥石流是高容重泥石流,泥石流的泥沙体积浓度 $C$ 为0.72,即泥石流体中72%都是泥沙。泥石流体中的黏粒占泥沙的5.5%。

泥石流的屈服应力是反映泥石流,特别是黏性泥石流的重要参数,根据在8·13泥石流的堆积物调查可以得到文家沟黏性泥石流的屈服应力<sup>[6]</sup>:

$$\tau_B = \gamma'gh\sin\theta \quad (3)$$

式中, $\tau_B$  = 泥石流流体屈服应力(Pa);  $\gamma' = (\gamma_c - \gamma_0)$ , 泥石流相对容重( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ );  $\gamma_c$  = 泥石流容重( $2220\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ),  $\gamma_0$  = 环境容重,在空气中  $\gamma_0 \approx 0$ ,在水中  $\gamma_0 = 1000(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$ ;  $g$  = 重力加速度( $= 9.81\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ );  $\theta$  = 坡度( $= 3.3^\circ$ ),  $h$  = 泥石流的最大堆积厚度( $= 8\text{m}$ )。得到  $\tau_B = 10029\text{Pa}$ 。文家沟泥石流具有很大的屈服应力,有很强的抵御洪水冲刷能力,这也是泥石流能堵塞绵远河的原因之一。此外,具有10029Pa的屈服应力可以使泥石流在绵远河内堆积厚度很大,如绵远河河底坡降为 $1^\circ$ ,在河道内的堆积厚度可以达到26m,这也是8·13特大泥石流能够在绵远河河道内淤积超过15m的原因之一。

泥石流的流量和总量是衡量泥石流的危险程度和防治泥石流的重要参数。四川省地质工程集团在2010年9月18日文家沟泥石流暴发现场观测泥石流的洪峰流量约 $220\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ,泥石流暴发持续时间约1h,泥石流总量约 $17 \times 10^4\text{m}^3$ 。文家沟泥石流的暴发主要由于溃坝形成(如7·31, 8·13和9·18均为溃坝形成泥石流),因此对8·13泥石流可以用瞬时溃决洪水洪峰流量计算代替泥石流洪峰流量计算,进而用溃决泥石流洪峰流量和泥石流暴发时间计算泥石流总量<sup>[7, 8]</sup>:

$$Q = \frac{8}{27}\sqrt{g}\left(\frac{B}{b}\right)^{1/4} bH^{2/3} \quad (4)$$

$$W = 0.2 * QT \quad (5)$$

$$W_s = WC \quad (6)$$

式中: $Q$  = 泥石流流量( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ );  $B$  = 溃决坝体总长度(m);  $b$  = 溃决坝溃口长度(m);  $H$  = 溃决坝溃口深度(m);  $W$  = 泥石流总量( $\text{m}^3$ );  $T$  = 泥石流持续时间(s);  $W_s$  = 泥石流中泥沙总量( $\text{m}^3$ )。计算结果见表1。

根据四川省地质工程集团在2010年9月18日文家沟泥石流暴发现场观测泥石流的洪峰流

量约 $220\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ,泥石流暴发持续时间约1h,由公式(5)计算的泥石流总量为 $16 \times 10^4\text{m}^3$ 与现场测量的泥石流总量 $17 \times 10^4\text{m}^3$ 非常接近,因此,用公式(5)由洪峰流量和持续时间计算溃决型泥石流的总量比较准确。用瞬时溃决洪水洪峰流量计算代替泥石流洪峰流量计算,进而用溃决泥石流洪峰流量和泥石流暴发时间计算8·13的泥石流总量为 $275 \times 10^4\text{m}^3$ ,与现场调查的泥石流总量为 $310 \times 10^4\text{m}^3$ 非常接近,因此用公式(4)计算的8·13泥石流洪峰流量比较准确, $1530\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 可以作为8·13文家沟泥石流的洪峰流量。

文家沟泥石流的固体物质来源都来自汶川地震形成的滑坡-碎屑流堆积体,通过调查自汶川地震以来到9·18泥石流后,文家沟沟内的滑坡-碎屑流堆积体的减少量为 $476 \times 10^4\text{m}^3$ ,因堆积体中有间隙,因此实际的固体物质质量还应去除堆积物中的间隙。由于堆积物的固结程度在地震后增长了很多,颗粒组成也很广泛<sup>[2]</sup>,因此参照现行《地基与基础设计规范》(JTJ024-85)中的碎石(砂土)密实度,选取中等密实程度的上限0.66作为现在文家沟滑坡-碎屑流堆积体的密实度<sup>[9]</sup>。因此实际固体物质仅有66%,实际减少固体物质总量为 $314 \times 10^4\text{m}^3$ 。汶川地震后5次泥石流的总量为 $417 \times 10^4\text{m}^3$ ,泥石流流体中泥沙体积浓度为0.72,除去泥石流中的水,实际泥沙总量为 $300 \times 10^4\text{m}^3$ (表2),与滑坡-碎屑流堆积体实际减少量 $314 \times 10^4\text{m}^3$ 非常接近,由于没有发生泥石流时的水流也会挟带走一部分堆积体泥沙,因此对文家沟5次泥石流的总量和泥沙总量调查比较准确。

## 5 文家沟泥石流的发展趋势

文家沟在汶川地震后多次暴发大规模和特大规模泥石流的主要原因是在沟道内有汶川地震产生的滑坡-碎屑流堆积体:其中可以形成泥石流的堆积物总量在“1300平台”以下的沟内约有 $3000 \times 10^4\text{m}^3$ ,经过3个雨季和5次大规模与特大规模的泥

表1 文家沟8·13和9·18泥石流的流量和总量

Table 1 Discharges and volumes of debris flow on Aug. 13 and Sep. 18, 2010

泥石流暴发时间	$B/\text{m}$	$b/\text{m}$	$H/\text{m}$	$Q^\#/\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$Q^*/\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$T/\text{s}$	$W^\#/10^4\text{m}^3$	$W^*/10^4\text{m}^3$	$C$	$W_s^\#/10^4\text{m}^3$
8·13	215	130	5	1530	-	9000	275	310	0.72	198
9·18	-	-	-	-	220	3600	16	17	0.72	11

# 计算值; \* 现场调查值。

表2 文家沟5次泥石流的总量和泥沙总量

Table 2 The total volume and sediment volume of all 5 events of debris flows in Wenjia Gully

	9.24	7.31	8.13	8.19	9.18	总计
泥石流总量/ $10^4 \text{ m}^3$	50	10	310	30	17	417
泥沙体积浓度	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72	-
泥石流中泥沙量/ $10^4 \text{ m}^3$	36	7	223	22	12	300
堆积物减少量/ $10^4 \text{ m}^3$	-	-	-	-	-	476
堆积物密度	-	-	-	-	-	0.66
实际堆积物减少量/ $10^4 \text{ m}^3$	-	-	-	-	-	314

泥石流共消耗了  $476 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 占这部分滑坡-碎屑流堆积体总量的 16%, 因此现在文家沟沟道内仍然有大量的可以形成泥石流的滑坡-碎屑流堆积体。

在现在的文家沟“1300 平台”以下到滑坡-碎屑流堆积体的前缘沟道中, 沟道狭窄, 大多都在 20m 以内, 最狭窄处仅 13m; 泥石流形成区域的沟道坡度较大, 沟道内还有多处跌坎, 沟道纵坡坡度上游较大, 约  $20^\circ$ , 到下游最小约  $10^\circ$ ; 沟道内的堆积物表层泥沙颗粒粒径较小, 粒径有 60% 以上在 20 ~ 85mm 之间(图 8); 沟道两岸边坡陡峻, 处于非常不稳定的状态, 边坡坡度达  $35^\circ \sim 50^\circ$ 。在边坡上附近的堆积体也非常松散, 在降雨的作用下极易垮塌进入沟道, 造成沟道堵塞(图 9)。因此文家沟在将来的雨季有较大降雨时(如 1h 降雨量达到 30mm)还会暴发泥石流, 有大暴雨发生时还会形成大规模甚至特大规模泥石流。

由于文家沟沟内可以形成泥石流的滑坡-碎屑流堆积体体积巨大, 即使在今后的雨季中暴发几次规模如 8·13 泥石流一样大的特大规模泥石流, 这些滑坡-碎屑流堆积体仍然会很多, 仍然需要防范泥石流灾害, 因此对文家沟泥石流的防治工作将是一个长期的工作。

## 6 结论和建议

### 6.1 结论

(1) 汶川地震前文家沟沟内松散固体物质来源主要是崩塌产生的零星块石, 很难形成具有一定规模并可以参与泥石流的松散固体物质积累, 文家沟不是泥石流沟。汶川地震中的第 2 大滑坡-文家沟滑坡将  $3000 \times 10^4 \text{ m}^3$  滑坡-碎屑流堆积在文家沟沟内, 由于该堆积体很容易被洪水起动形成泥石流, 且堆积体体积巨大, 在持续的较大降雨条件下, 堆积体



图9 文家沟沟道内滑坡-碎屑流堆积体

Fig. 9 The deposition of Landslide-debris in the channel of Wenjia Gully

可以源源不断地被洪水起动形成规模巨大的泥石流灾害。

(2) 在汶川地震时的滑坡-碎屑流堆积体改变了文家沟的泥石流形成条件, 文家沟演变为一条高频率泥石流沟。从汶川地震后的 2008 年 9 月 24 日到 2010 年 9 月 18 日不到两年的时间内, 文家沟先后暴发了 5 次大规模和特大规模的泥石流灾害, 其中以 8·13 文家沟泥石流规模和危害最大。

(3) 2010 年 8 月 13 日持续的强降雨诱发了 8·13 文家沟泥石流, 强大的洪水挟带大量的泥沙冲溃文家沟最后一道拦砂坝, 形成溃决型特大规模泥石流, 泥石流持续时间约 2.5h, 泥石流总量约  $310 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。泥石流造成 7 人死亡, 5 人失踪, 39 人受伤, 479 户农房被掩埋, 直接经济损失 4.3 亿元。8·13 文家沟泥石流暴发过程前后的总降雨量为 227mm。

(4) 文家沟泥石流为高容重黏性泥石流, 容重为  $2.22 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , 泥沙体积占泥流体积的 72%, 泥石流的屈服应力为 10029Pa; 文家沟 8·13 泥石流的洪峰流量为  $1530 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。

(5) 汶川地震后的 3 个雨季和 5 次大规模与特大规模的泥石流共消耗了  $476 \times 10^4 \text{ m}^3$  固体物质, 仅占汶川地震后可以形成泥石流的滑坡-碎屑流堆积体总量的 16%, 因此现在文家沟仍然具有再次暴发特大规模泥石流的物源条件。现在文家沟泥石流形成区的沟道地形条件也有利于泥石流的形成。

(6) 文家沟如再遭遇较大降雨(如 1h 降雨量达到 30mm)还会暴发泥石流。由于文家沟沟内依然



有大量的可以形成泥石流的滑坡-碎屑流堆积体,即使在今后的雨季中暴发几次规模如8·13泥石流一样大的特大规模泥石流,文家沟在较大降雨下仍然可能暴发泥石流灾害,因此对文家沟泥石流的防治工作将是一个长期的工作。

## 6.2 建议

四川省绵竹市清平乡文家沟泥石流与其它受地震影响的泥石流沟有显著的不同特点:汶川地震产生的巨大的滑坡-碎屑流堆积体使文家沟沟内拥有大量可以较容易形成泥石流的松散固体物质,只要遭遇较大降雨,文家沟就可能会暴发泥石流灾害。由于文家沟内可以形成泥石流的松散固体物质体积非常巨大,只要能形成泥石流的降雨过程持续较长时间,泥石流的暴发也会有较长的持续时间,泥石流的冲出量就会非常巨大。文家沟的下游不远就是清平乡场镇和汶川地震安置点与重建学校等,对文家沟的泥石流防治需要采取更加慎重而有效的措施,对此本文提出针对文家沟泥石流的防治建议:

(1)对文家沟的泥石流防治的重点是防止泥石流的暴发,在泥石流形成区上游“1300平台”处修建集水区,将“1300平台”及上游因降雨产生的洪水汇集并排导到其它区域,减少形成泥石流的水源,从而达到防止泥石流发生或减小泥石流规模的目的。

(2)在泥石流的形成区清理沟道,排除边坡隐患,降低边坡坡度,并采取护坡和护底工程,防止降雨在形成区形成的洪水冲刷沟道和边坡坡脚形成泥石流。

(3)尽管采取了截水和护坡护底工程后可以起到一部分防止泥石流发生的作用,但在泥石流形成区的堆积物仍然可能在较大降雨时垮塌进入沟道并堵塞沟道最终形成泥石流,因此还需要在形成区的下游修建拦挡工程,拦挡工程以拦挡较大规模泥石流及其巨石为主要目的,使洪水或小规模泥石流暴发时泥沙不会淤积在拦挡工程内,这样就能保证在暴发较大的泥石流时能起到拦挡的作用。由于拦挡工程位置处于堆积扇,地势比较开阔,对拦挡工程的设计和施工中应考虑泥石流对拦挡工程的冲击并采取相应措施,避免8·13泥石流冲毁拦砂坝的事件再次发生。

(4)在采取拦挡工程措施后,对通过拦挡工程的泥石流或因拦挡工程失效而流出的泥石流还应该采取排导工程的方法将泥石流排导到绵远河内,排导工程在进入绵远河时与绵远河河道的交汇角应该

成锐角,最好成 $30^\circ$ 夹角,这样经排导工程排导的泥石流就不会堵塞绵远河,排导出的泥沙可以通过绵远河水流冲刷自然排导到下游,不会影响清平乡在文家沟上下游居民的安全。

(5)所有防护治理工程在雨季前都必须进行检查、维护和清淤工作,在每一次降雨后也要采取相同的措施确保防护治理工程能起到相应的作用。同时在雨季前和每次降雨后都要检查沟道两边的边坡的稳定性,在发现有较大的不稳定边坡时应采取相应措施排除险情,尽可能减小泥石流暴发的可能性。

(6)在泥石流形成区及上游“1300平台”建立降雨监测及泥石流预报系统,在有较大降雨时(如1h降雨量为30mm)发出泥石流警报。在截水通道上下游,泥石流形成区,泥石流拦挡工程及排导工程处设立全天候摄像监控系统,在降雨时监控各防护治理工程的运行状态,一旦有异常情况发生,立即采取报警措施,确保人员的安全。

(7)在每个雨季到来前组织文家沟沟口居民及有可能受到文家沟泥石流威胁的清平乡居民进行泥石流防灾演习,划分安全区域和避难场所,保证所有有关居民在泥石流警报发出后可以迅速撤退到安全的避难场所。

**致谢** 本文的现场调查工作得到了四川省地质工程集团公司的大力支持,四川省地质工程集团公司,成都高原气象所刘兴华副研究员为本文提供了许多宝贵资料,成都理工大学黄润秋教授、唐川教授安排和指导了本文的现场调查工作并对本文的撰写提出了许多宝贵意见,在此一一表示感谢!

## 参 考 文 献

- [1] 许强. 四川省8·13特大泥石流灾害成因与启示[J]. 工程地质学报, 2010, 18(5): 596~608.  
Xu Qiang. The 13 August 2010 catastrophic debris flows in Sichuan Province: characteristics, genetic mechanism and suggestions. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(5): 596~608.
- [2] 许强, 裴向军, 黄润秋, 等. 汶川地震大型滑坡研究[M]. 北京: 科学出版社, 2009, 381~406.  
Xu Qiang, Pei Xiangjun, Huang Runqiu, et al. Large-scale landslides induced by the Wenchuan Earthquake. Beijing: Science Press, 2009, 381~406.
- [3] 钱洪, 周荣军, 马声浩, 等. 岷江断裂南端与1933年叠溪地震研究[J]. 中国地震, 1999, 15(4): 333~338.  
Qian Hong, Zhou Rongjun, Ma Shenghao, et al. South segment of Minjiang fault and Dixi earthquake in 1933. Earthquake research

- in China, 1999, **15**(4): 333 ~ 338.
- [4] 余斌. 根据泥石流沉积物计算泥石流容重的方法研究[J]. 沉积学报, 2008, **26**(5): 789 ~ 796.  
Yu Bin. Research on the calculating density by the deposit of debris flows. ACTA Sedimentological SINICA, 2008, **26**(5): 789 ~ 796.
- [5] 中华人民共和国国土资源部. 泥石流灾害防治工程勘查规范(报批稿)[M]. 2006, 2.  
Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. Specification of geological investigation for debris flows stabilization. 2006, 2.
- [6] 余斌. 不同容重的泥石流淤积厚度计算方法研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2010, **23**(2): 78 ~ 92.  
Yu Bin. Study on the method for deposition depth calculation of debris flow with different densities. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2010, **23**(2): 78 ~ 92.
- [7] 曾向荣, 郝红星, 孙博良. 唐江山堰塞湖泄洪问题研究[J]. 数学的实践与认识, 2009, **39**(16): 37 ~ 49.  
Zeng Xiangrong, Hao Hongxing, Sun Boliang. The research of Tangjiashan Barrier Lake spillway. Mathematics in Practice and Theory, 2009, **39**(16): 37 ~ 49.
- [8] 张健楠, 马煜, 张惠惠, 等. 四川都江堰市虹口乡大干沟地震泥石流灾害研究[J]. 山地学报, 2010, **28**(5): 624 ~ 627.  
Zhang Jiannan, Ma Yu, Zhang Huihui, et al. Study on earthquake debris flow in Dangan Gully, Hongkou, Dujiangyan, Sichuan Province. Journal of Mountain Science, 2010, **28**(5): 624 ~ 627.
- [9] 东南大学, 浙江大学, 湖南大学, 等. 土力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005, 41 ~ 42.  
Southeast University, Zhejiang University, Hunan University, et al. Soil Mechanics. Beijing: China Architecture and Building Press, 2005, 41 ~ 42.

## 《工程地质学报》编委会扩大会议在福州召开

《工程地质学报》编辑委员会扩大会议于2010年11月18日晚在福州怡山大厦召开。会议由主编王思敬院士主持, 参加会议的同志有: 张苏民, 李广诚, 胡瑞林, 许强, 王清, 李文平, 隋旺华, 简文彬, 叶为民, 张永双, 兰恒星, 张茂省, 汪稔, 彭建兵, 伍法权, 宋玉环, 李志清, 马凤山等19人。

会议听取了宋玉环同志作的编辑部工作报告, 与会同志对学报近年来取得的成绩给予了充分的肯定, 并就如下议题展开了热烈讨论:

### 一、学报的学术定位

与会编委一致认为, 《工程地质学报》的论文应当充分体现科学性、实用性和时效性, 反映本领域的最高学术水平, 学报要办出自己的学术特色。促进和引导工程地质学科基础理论研究是学报的一项基本任务。要积极跟踪国内外相关学术会议动态, 追踪国家各类重大项目好重大理论问题研究进展, 主动地有针对性地组织稿源。

为了满足产业部门广大读者群的实用需求, 学报应适当加大重大工程实录类论文的比重, 提高论文水平。对于重大突发事件要及时组织论文, 尽快在第1时间发表最新的研究报告。

进入EI检索系统是《工程地质学报》面临的紧迫问题。要努力提高论文学术水平, 严把编辑质量。

### 二、进一步提升学报审稿与编辑水平

与会编委提出, 应以SCI的办刊标准要求本刊。要提高评审专家工作水平, 规范论文评审工作。杜绝人情稿, 关系稿。增强编辑的判断能力, 加强责任编辑的作用, 每期论文稿件应由责任编辑终审。

### 三、统一论文的格式要求

编委会提出, 学报应进一步规范论文投稿格式要求, 对摘要长度与写作格式, 参考文献的数量, 结论的写法等要有统一规定。