

漂木对山洪泥石流运动致灾影响研究进展

陈剑刚<sup>1,2</sup>, 费高高<sup>1,2</sup>, 王喜安<sup>1,2</sup>, 陈华勇<sup>1,2</sup>, 陈晓清<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院成都山地灾害与环境研究所山地灾害与地表过程重点实验室, 四川 成都 610041;  
2. 中国科学院大学工程科学学院, 北京 100049)

**摘要:**基于国内外研究现状,对漂木的补给-搬运-堆积、聚集-堵塞、溃决等动力过程进行了详细评述,总结出山洪泥石流中漂木致灾效应包括冲击破坏、堵塞-淹没、堵塞-冲刷、溃决-冲刷4个方面,并着重阐述了现有研究的不足。为应对漂木致灾效应,提出工程措施与管理措施相结合的漂木防灾减灾措施。在此基础上,指出未来研究的主题包括:漂木补给定量评估、漂木运动-停积-堵塞-溃决动力过程、漂木致灾效应与风险评估、漂木灾害调控与减灾措施。

**关键词:**山洪;泥石流;漂木;堵塞;溃决-放大

**中图分类号:**P642.23      **文献标志码:**A      **文章编号:**1006-7647(2022)03-0104-08

**Advances on disaster effects of drift wood in flash flood debris flows**//CHEN Jiangang<sup>1,2</sup>, FEI Gaogao<sup>1,2</sup>, WANG Xi'an<sup>1,2</sup>, CHEN Huayong<sup>1,2</sup>, CHEN Xiaqing<sup>1,2</sup> (1. *Key Laboratory of Mountain Hazards and Land Surface Processes, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China*; 2. *College of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

**Abstract:** Based on the research status, the dynamic processes of drift wood recruitment, transport-accumulation, accumulation-blockage and breakage were reviewed in detail, and the disaster effects of drift wood in flash flood and debris flow were summarized from four aspects of direct impact damage, clogging-submergence, clogging-scouring, and breakage-scouring. In order to deal with the disaster effect of drift wood, the disaster prevention and mitigation measures combined with engineering measures and management measures were put forward. On this basis, it is pointed out that the future research topics on drift wood disaster include quantitative evaluation of drift wood recruitment, dynamic process of drift wood transport-accumulation-clogging-breakage, disaster-causing effect and risk assessment of drift wood, disaster control and mitigation measures of drift wood.

**Key words:** flash flood; debris flow; drift wood; logjam; breakage and amplification

地震、滑坡、火灾等因素使得大量树木枝干散落在沟道内,当发生山洪或泥石流时,会伴随其倾泻而出,使得含有大量漂木的山洪泥石流造成更为严重的灾害和损失<sup>[1-6]</sup>。Benn<sup>[7]</sup>统计了英国1845—2012年间铁路桥梁破坏的67个案例,由漂木聚集造成的事故占据20例。漂木在运动过程中受边界条件、漂木长度和直径等的影响,常在沟道内聚集形成不稳定的堵塞体,单个堵塞体的溃决或多个堵塞体的级联溃决会造成山洪泥石流流量的急剧增大,加剧了灾情,增大了损失<sup>[1-3,8]</sup>,1978年的瑞士洪水事件中,河流上游形成的一个漂木堵塞体突然溃决,使洪水峰值流量高达3 000 m<sup>3</sup>/s,造成溢洪道的损坏<sup>[9]</sup>;2018年6月九寨沟风景区克泽沟暴发山洪泥石流

灾害,由于大量漂木聚集堵塞沟道形成堵塞体,不稳定漂木堵塞体突然溃决时的瞬时洪峰流量是未形成堵塞体时的2.8倍,造成一座拦沙坝的破坏;2019年8月20日,受强降雨影响,位于岷江沿岸的簇头沟、板子沟、登基沟等暴发了特大泥石流灾害,泥石流携带的漂木在搬运过程中形成堵塞体,堵塞体溃决后产生流量放大效应,造成沟道内已建拦沙坝的损毁和堆积扇上房屋的严重破坏,泥石流冲出沟口淤埋或冲毁都汶高速公路,造成了都汶高速断道近50 h。以往泥石流防治工程设计过程中未考虑漂木在沟道内的堵塞-溃决流量放大作用而造成拦挡工程的破坏,增加了工程安全运行的维护成本<sup>[10]</sup>。

山洪泥石流中携带的漂木往往会加剧灾害,造

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA23090403);国家杰出青年科学基金(41925030);中科院“西部之光”人才项目(Y9R2140148)

作者简介:陈剑刚(1982—),男,研究员,博士,主要从事泥石流灾害防治研究。E-mail:chenjg@imde.ac.cn

成更为惨重的损失,尤其是植被发育较好、生态环境保护好的区域,漂木对山洪泥石流灾害的贡献更大,已成为近年来科学研究和灾害防治的热点和前沿。因此,全面开展山洪泥石流中漂木的补给、搬运-堆积、聚集-堵塞、溃决等动力学过程研究,对山洪泥石流中漂木危害的防治具有实际价值。本文在广泛收集国内外已有文献资料的基础上,依次对山洪泥石流运动中漂木动力过程、漂木致灾、漂木减灾措施的研究成果进行阐述,以期对山洪泥石流中漂木致灾机理研究和防治技术研发提供支撑。

1 山洪泥石流运动中漂木动力过程

崩塌滑坡等灾害导致树木连同坡体一起失稳进入沟道,在山洪泥石流的作用下树木起动形成漂木,漂木在搬运过程中遇到拦沙坝或沟道过流断面急剧缩小的位置极易形成漂木堵塞体。漂木堵塞体在后续山洪泥石流的冲击作用下,容易发生溃决,造成流量的瞬间放大,同时被拦蓄的泥沙等物质又转化为泥石流物源。进入河流中的漂木,在运动过程中常直接撞击桥墩,或在桥墩位置形成堵塞体,这不仅会降低河道的过流能力,还会造成上游水位抬升,淹没建筑物,加剧灾害。本节将从漂木补给、搬运-堆积、聚集-堵塞、溃决过程 4 个方面进行分析。

1.1 漂木补给

降雨诱发的山洪、泥石流等对沟岸侵蚀造成的森林破坏是沟道内漂木补给的主要来源<sup>[11]</sup>。除以上主要补给方式外,山火、火山爆发、植物更替、人为的砍伐活动等也会影响进入沟道的漂木数量,而这些补给方式的重要程度受流域特征的影响<sup>[12]</sup>。漂木的补给通常是多个过程的组合,基于流域尺度的漂木补给定量化分析受到植被覆盖率、地质条件、降雨量等因素的影响,同时漂木的搬运输移又受到流量特性、漂木特性、地形等因素的影响,导致其定量化分析十分复杂,具体表现在:漂木特性随时间和流域的不同而变化;山洪泥石流对漂木的搬运具有不确定性;漂木特征的连续调查具有挑战性。

Benda 等<sup>[13]</sup> 提出在给定时间段  $\Delta t$  内,长度为  $\Delta x$  的河段中漂木的输入量、输出量和储存量的定量分析模型,其表达式如下:

表 1 漂木调查方法

| 方法   | 技术       | 优点          | 缺点            | 应用举例                                                                              |
|------|----------|-------------|---------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| 现场测量 | 野外调查     | 操作简单        | 工作量大          | May 等 <sup>[14]</sup> ; Kraft 等 <sup>[15]</sup> ; Pettit 等 <sup>[16]</sup>        |
|      | GPS、无人机等 | 数据易获取;调查范围广 | 分辨率与成本相关      | Haschenburger 等 <sup>[17]</sup> ; Lassette 等 <sup>[18]</sup>                      |
| 追踪   | 视觉跟踪     | 简单          | 效率低           | Wohl 等 <sup>[19]</sup>                                                            |
|      | 编号标签     | 易分辨         | 成本高;漂木的变化无法记录 | Warren 等 <sup>[20]</sup> ; van der Nat 等 <sup>[21]</sup> ; Keim 等 <sup>[22]</sup> |
| 监控   | 录像       | 漂木情况实时记录    | 范围小;数据可用性低    | Takaaki 等 <sup>[23]</sup> ; MacVicar 等 <sup>[24]</sup>                            |

$$\Delta S = (L_i - L_o + Q_i/\Delta x - Q_o/\Delta x - D)\Delta t \quad (1)$$

式中: $\Delta S$  为漂木储存量; $L_i$  为沟道两岸对漂木的补充量; $L_o$  为漂木沉积量; $Q_i$  和  $Q_o$  分别为某段沟道输运过程中进出的漂木量; $D$  为漂木腐烂量。

该模型在漂木补给来源分析中已得到认可,但是其结果的精确性受漂木调查过程的影响。随着科学技术的进步,为定量化确定漂木补给量,GPS 和无人机等调查方法(表 1)得以应用。总体而言,在对流域尺度的漂木补给定量评估中,GPS 和无人机等调查方式更具实用性;在局部河段和沟道的漂木定量化分析中,追踪和监控等调查方法更具时效性。

1.2 搬运-堆积

漂木的起动通常是滑动、滚动和转动的组合过程,与漂木起始运动时的流体深度密切相关<sup>[25-27]</sup>,现有研究集中在漂木、来流、沟道等特征参数与漂木起始运动时的流体深度之间的变量关系,而沟道内的漂木对流体流态的影响是一个复杂的三维动态过程,今后需加强监测三维流体参数,或建立流体三维数值模型,进而将漂木周围的流体特征参数化。山洪泥石流中漂木起动的研究存在以下主要问题:山洪泥石流的流体性质相对水流复杂,且漂木通常伴随山洪泥石流倾泻而出<sup>[28]</sup>,因此泥石流沟道中的漂木起动研究难度较大。

单根漂木被水流搬运时,常会与河床直接接触或漂浮在水面上,而多根漂木被搬运时,具有不拥挤、半拥挤、拥挤 3 种输移方式<sup>[29]</sup>。山洪泥石流运动模式与水流差异明显,其搬运漂木的过程需要通过理论和实验模型进一步研究。Mazzorana 等<sup>[30]</sup> 使用二维流体力学模型计算了非稳态流动条件下水流搬运漂木的路径。Villanueva 等<sup>[31]</sup> 模拟了水流搬运单根圆柱状漂木,其结果与 Braudrick 等<sup>[27]</sup> 的试验结果相符。Bocchiola 等<sup>[32]</sup> 提出了包括漂木搬运在内的河流动力学的解析和数值方法,忽略了漂木堆积体内部结构,研究发现漂木搬运导致河床表面切应力和水流流速的增大。以上数值模型主要为二维模型,而水流对漂木的搬运,需要通过三维模型才能获取漂木周围的流体流态特征以及漂木在不同方位上的运动变化过程。通过野外调查发现:河流搬运漂木的距离随着漂木长度的增加整体上呈下降的趋

势<sup>[33]</sup>; 漂木相对来流方向夹角  $\theta$  ( $\theta=0^\circ$ 表示漂木与来流平行,  $\theta=90^\circ$ 表示漂木与来流垂直) 减小, 河流搬运漂木的距离降低<sup>[27]</sup>; 漂木的密度越低, 河流搬运漂木的距离越远<sup>[34]</sup>。然而, 以上结论是基于河段尺度的野外调查得到的定性分析, 还需通过模型试验开展定量分析研究。漂木会在浅水、河流凹岸、河流沙洲等处自然堆积<sup>[35-37]</sup>, 这种自然的漂木堆积一般有较好的生态效益<sup>[38-39]</sup>, 因此建立漂木堆积的易发性评估模型有利于评估漂木的生态价值。通过河道和漂木参数分析, 可将漂木自然堆积的易发性无量纲化<sup>[37]</sup>, 用  $K$  表示:

$$K = a_1 \frac{L}{w_{av}} + a_2 \frac{L}{R_c} + a_3 \frac{d_b}{d_{av}} \tag{2}$$

式中:  $L$  为漂木长度;  $w_{av}$  为河道平均宽度;  $R_c$  为河道平均曲率半径;  $d_b$  为漂木能够在河水中起动的临界水深;  $d_{av}$  为河道平均深度;  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$  为根据每个变量的相对重要性而变化的系数。

无量纲表达式数值越大, 漂木越容易在沟道中堆积, 但是存在以下问题: 该公式仅仅反映漂木堆积的平均趋势, 不能反映河道中局部区域漂木的堆积情况; 没有考虑河床颗粒粒径、水流性质等因素对漂木堆积的影响; 参数  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$  为经验值, 缺乏理论依据。

1.3 聚集-堵塞

漂木会在桥梁或拦沙坝等基础设施处聚集并逐渐形成堵塞体<sup>[40]</sup>, 导致过流断面减小, 上游水位上升, 下游灾害风险加剧<sup>[41]</sup>。基于实验数据分析, 许多学者建立了溢洪道、桥墩、拦沙坝等位置的漂木堵塞率计算公式(表2)。Chen 等<sup>[8]</sup>和王道正等<sup>[28]</sup>的泥石流水槽试验表明拦沙坝处漂木堵塞率随漂木长度和漂木体积的增加逐渐增加。然而, 现有的试验研究无法解释漂木堵塞过程的随机性行为, 因此在设计实验时需考虑统计学的方法来评估漂木堵塞率。

漂木堵塞体通常用其形状、尺寸和孔隙度来描述<sup>[46]</sup>。桩林式拦截结构处的漂木堵塞体横截面形状为地毯形, 而纵断面形状为三角形或梯形, 随着

表 2 漂木堵塞率计算公式

| 基础设施类型                  | 流体类型 | 漂木堵塞率 $P$                                           |
|-------------------------|------|-----------------------------------------------------|
| 闸门控制溢洪道 <sup>[42]</sup> | 清水   | $P=0.73(L/b-0.96)$                                  |
| 锯齿堰溢洪道 <sup>[43]</sup>  | 清水   | $P=1.5(d/H)-0.5$                                    |
| 桥面 <sup>[44]</sup>      | 清水   | $P=L/B(h+d/2)/h_o$                                  |
| 单个桥墩 <sup>[41]</sup>    | 清水   | $P=e^{-12.7x_n(v_o^{2/2gL})^{0.43}(d_p/2gL)^{0.6}}$ |
| 拦沙坝 <sup>[45]</sup>     | 泥石流  | $P=0.23(L/(b-d))^{1.02}m^{0.28}$                    |

注:  $b$  为溢洪道闸口或拦沙坝开口宽度;  $d$  为漂木直径;  $H$  为上游水头;  $B$  为沟道宽度;  $h$  为来流水深;  $h_o$  为桥面与水面间隙;  $m$  为一次供应的漂木数量; 不拥挤的漂木搬运,  $x_n$  取 1.00; 半拥挤和拥挤的漂木搬运,  $x_n$  取 0.65;  $v_o$  为来流流速;  $g$  为重力加速度;  $d_p$  为桥墩直径。

弗劳德数增大, 漂木堵塞体沿水流方向的长度随弗劳德数增加呈线性减小<sup>[47]</sup>。单个桥墩处的漂木堵塞体的横截面形状为马蹄形<sup>[6]</sup>, 漂木堵塞体的长度和宽度随弗劳德数增加呈指数式减小, 高度随弗劳德数增加呈指数式增加<sup>[48]</sup>。开口型拦沙坝处漂木堵塞有两种模式: 在低透过性拦沙坝的上游水流流速较低, 漂木堆积为单层浮毯式; 相反, 具有高透过性的拦沙坝上游水流流速较快, 漂木以密集复杂的三维模式聚集<sup>[49]</sup>。Manners 等<sup>[50]</sup>认为水流通过堵塞体的流动相当于多孔介质中的渗流, 并通过孔隙率  $\varphi$  来描述堵塞体内部特征:

$$\varphi = \frac{V_l - V_s}{V_s} \tag{3}$$

式中:  $V_l$  为自然堆积的漂木堵塞体体积,  $V_s$  为实际的漂木体积。根据瑞士洪灾后的漂木野外调查, 漂木堵塞体的孔隙率  $\varphi$  在 0.5 到 0.8 之间变化<sup>[51]</sup>。

1.4 溃决

当漂木堵塞体的内部组成或者外部的来流条件发生变化时, 堵塞体可能会发生溃决, 现有的研究对漂木从形成堵塞体到最终溃决的过程的描述以及溃决临界条件的总结见表3。漂木溃决过程都是先逐渐形成漂木堵塞体, 达到临界条件时, 堵塞体突然溃决。由于山洪泥石流具有突发性且历时短暂, 漂木聚集-堵塞位置具有较大随机性, 从而导致漂木溃决过程的实时监测难以获取。今后在现场调查过程中需捕捉漂木溃决过程, 结合理论和模型研究, 分析漂

表 3 溃决过程

| 拦截结构                 | 流体类型 | 溃决临界条件                                                           | 溃决过程                                                                            |
|----------------------|------|------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| 单个桥墩 <sup>[48]</sup> | 清水   | $0.7 < W_{cl}/W_{cr} < 0.95$<br>$1.05 < W_{cmax}/W_{cmin} < 1.3$ | 阶段 1: 单个漂木拦截和流失交替<br>阶段 2: 形成稳定的漂木堵塞体<br>阶段 3: 堵塞体从桥墩处脱离溃决                      |
| 拦沙坝 <sup>[49]</sup>  | 清水   | $3d < h_d < 5d$                                                  | 阶段 1: 少量漂木通过溢流口<br>阶段 2: 形成稳定的漂木堵塞体<br>阶段 3: 堵塞体在溢流口突然溃决                        |
| 拦沙坝 <sup>[8]</sup>   | 泥石流  | $L/b=0.875$<br>$V/V_{max}=0.75$                                  | 阶段 1: 大部分漂木通过拦沙坝开口<br>阶段 2: 漂木逐渐被拦沙坝截留<br>阶段 3: 形成稳定的漂木堵塞体<br>阶段 4: 堵塞体在开口处突然溃决 |

注:  $W_{cl}$  和  $W_{cr}$  分别为桥墩左右两边对应的漂木堵塞体宽度;  $W_{cmax}$  和  $W_{cmin}$  分别为  $W_{cl}$  和  $W_{cr}$  的最大值和最小值;  $h_d$  为溢流水深;  $V$  为水槽实验中的漂木体积;  $V_{max}$  为实验中漂木体积最大值。

木堵塞体溃决发生的临界条件,为漂木灾害的防治提供有效支撑。

## 2 漂木致灾

### 2.1 冲击破坏

漂木在较为顺直的沟道中运动时,速度快,冲击力强,易对建筑造成破坏<sup>[52]</sup>。傅宗甫等<sup>[53]</sup>发现漂木撞击力随漂木撞击角、潜没深度,及库水位的增加而增大,并提出漂木撞击力计算的经验公式,但该公式仅考虑有限范围内撞击角的影响,其适用性需进一步完善。Haehnel 等<sup>[54]</sup>通过单自由度理论模型结合实验研究发现冲击力随漂木运动速度、漂木质量、撞击角度以及碰撞刚度的增大而增大,若漂木所撞击的结构是刚性的,则冲击力与结构的材料类型无关,为了使研究具有普遍意义,还需分析各影响因素之间的内在联系,并将各因素有效统一。漂木对泥石流沟道中拦沙坝的冲击碰撞过程十分复杂,可从能量叠加角度研究漂木作用于拦沙坝的冲击力随时间的变化过程和空间分布规律。

### 2.2 堵塞-淹没

漂木在桥梁或河道断面缩窄处发生堵塞会导致上游水位上涨,增加邻近地区的洪水淹没风险<sup>[2,55]</sup>;在泥石流沟道中,漂木在拦沙坝或沟道断面缩窄处堵塞,造成泥石流回淤量增加。水槽试验结果表明,水位上涨高度随来流的弗劳德数、漂木堆积体的密实度、漂木堆积体中树枝和树叶含量的增大而增大<sup>[56]</sup>,漂木自然聚集形成的堵塞体与人工设置的漂木堵塞体相比造成的水位上涨高度降低约 40%<sup>[57]</sup>,同时建立了考虑各影响因素的数学表达式。Piton 等<sup>[49]</sup>研究了不同开口型拦沙坝溢流口位置漂木堵塞造成的水位上涨,结果表明,堰、格栅坝、梳子坝处堵塞导致水位上涨分别为 5% ~ 40%、20% ~ 60%、50% ~ 200%。该研究主要是对实验现象的解释,还需进一步分析影响水位上涨的各因素之间的内在联系,同时考虑不同漂木密度、不同流体类型、不同流态下漂木造成的流体流深变化规律,尤其是山洪泥石流运动过程中漂木堵塞造成的流体壅高,为防灾减灾提供理论支撑。

### 2.3 堵塞-冲刷

自然沟道内的漂木局部堵塞造成过流断面面积减小,流速增加,导致沟道的严重冲刷和侵蚀<sup>[58-59]</sup>。桥墩处漂木堵塞造成的河床冲刷深度主要受漂木堵塞体特性、水流深度和流速、河床泥沙颗粒粒径和级配、桥墩大小和形状等因素的影响<sup>[60]</sup>。通过高斯正态分布模型,量化了漂木在桩林式拦截结构处堵塞造成的冲刷深度和冲刷长度<sup>[60]</sup>,试验结果可以支撑

优化漂木拦截结构的设计。漂木在拦沙坝开口处堵塞会对后续流体起到拦挡作用,导致拦沙坝开口处泥沙堆积体所受侵蚀作用反而减小<sup>[61]</sup>。

### 2.4 溃决-冲刷

水位上涨或泥石流回淤将增大漂木堵塞体和基础设施承受的静水压力,从而增加了漂木堵塞体和基础设施溃决的风险。一旦发生溃决会造成山洪泥石流流量的瞬间放大,引发更严重的次生灾害<sup>[2,8,28]</sup>。Chen 等<sup>[8]</sup>通过泥石流水槽试验研究漂木在拦沙坝处的溃决-放大效应,研究发现峰值流量放大系数最大值为 1.6,同样在野外调查过程中也发现类似案例<sup>[3]</sup>。泥石流流量放大一方面会造成更严重的人民生命财产损失,另一方面会加剧对沟道的冲刷及沟岸森林的破坏。在以往的防治工程设计中,未考虑山洪泥石流中漂木堵塞体溃决过程带来的规模放大效应,从而导致桥梁、水工结构、拦沙坝等建筑设计标准偏低,出现建筑损毁的情况。因此,基于雨洪法和现场调查法计算山洪泥石流规模、流量、冲击力等参数的方法应用到含漂木的山洪泥石流防治时,需要考虑山洪泥石流中漂木堵塞体溃决过程带来的规模放大效应,避免因规模激增超过建筑设计标准而造成工程体系损毁。

## 3 漂木减灾措施

### 3.1 工程措施

减小漂木危害的工程措施以拦截和导流为主,拦截措施是将漂木拦截后清除,而导流措施则是让漂木快速有效地通过基础设施。漂木拦截措施包括拦截索网<sup>[62]</sup>、拦截坝体<sup>[62-63]</sup>、拦截桩林<sup>[64]</sup>等,但是此类措施一方面增加运行维护费用,另一方面漂木在拦截结构处的堵塞,同样会造成上游水位上涨以及局部冲刷加剧等问题。因此,建立及时有效的漂木清除机制是漂木拦截工程减灾的关键。漂木导流措施包括导流装置<sup>[65]</sup>、导流鳍<sup>[66]</sup>、清扫装置<sup>[65]</sup>等,这类措施不仅降低了漂木在基础设施处堵塞的概率,而且降低了清除漂木的成本,但是随着下游漂木量的逐渐增加会加剧下游的灾害。因此,工程措施需要考虑拦截和导流两种方式协同运行,同时及时清除漂木,从而有效防止漂木致灾。无论是漂木拦截措施还是漂木导流措施,其设计参数均为经验取值,在对特定流域选用工程措施建设时可采用以下流程:①调查该流域漂木、沟道、流体特征参数;②依据防灾减灾标准结合调查数据制定工程措施;③工程措施运行期的监测维护。

### 3.2 管理措施

Panici 等<sup>[67]</sup>认为漂木加剧灾害主要与漂木堵

塞相关,然而由于自然因素和人为活动可能导致灾害风险随时间发生变化,从而导致这种评估方式缺乏时效性<sup>[68]</sup>。Mazzorana 等<sup>[69]</sup>提出了基于形成性情景分析(FSA)的框架,将影响漂木致灾过程的各种变量整合,并应用在山区溪流中,最终模拟出与实际情况相符的灾害过程情景,这种方法考虑的情况较为全面且具有时效性,但是该模型没有将漂木的危害程度量化。现有研究表明,漂木具有一定的生态效益<sup>[70]</sup>,因此,还需加强漂木灾害预防、河流生态恢复、行政干预的综合管理措施研究<sup>[71]</sup>。

4 发展趋势

4.1 漂木补给定量评估

现有的研究对漂木补给的分类及其补给动力过程的研究已取得进展,基于河段尺度的漂木定量评估模型已经建立,然而局部河段的漂木补给情况不能反映流域内漂木补给的动态过程,无法实现有效的灾害评估。因此,需调查流域内森林的树木类型,获取漂木的分布、数量、长度和直径等特征参数,进而建立流域尺度的漂木定量化补给模型,有助于准确预测流域内的漂木量,预估山洪泥石流运动中漂木灾害风险等级,从而制定与之相适应的防治工程设计标准。

4.2 漂木运动-停积-堵塞-溃决动力过程

基于实验和数值模拟研究,漂木运动-停积-堵塞-溃决动力过程研究成果显著,但实验多为机理实验,数值模拟对空间漂木堆积结构、复杂的流态、泥沙两相流的模拟存在一定难度,今后需通过现场调查获取典型流域沟道、漂木、流体等参数,以典型流域为原型进行实验和数值模拟研究;通过现场调查和实时监测获取漂木运动-聚集-堵塞-溃决动力过程,结合实验和数值模拟研究分析其演化规律,揭示漂木在自然沟道或河流中的运动-停积-堵塞-溃决动力过程机制。

4.3 漂木致灾效应与风险评估

漂木在天然沟道内和河流中的堵塞-溃决过程会加剧灾害,基于实验分析,已初步建立漂木的冲击破坏、堵塞-淹没、堵塞-冲刷的计算模型,仍需要建立堵塞-溃决造成的流量放大动力学参数计算方法。漂木致灾风险定量评估可为基础设施建设、灾害预防、漂木生态效益利用等提供支撑,利用 GPS 精准定位、无人机等先进的技术手段,加强对漂木灾害事件的过程观测和监测,实时获取原型数据,结合室内实验和数值模拟手段,定量预测流域尺度的灾害风险。

4.4 漂木灾害调控与减灾措施

漂木减灾措施通常以局部区域的拦截和导流措

施为主,这种方法制造和维护费用高,且使用期限较短,需要建立流域尺度的漂木灾害调控措施。从流域尺度出发,针对上游汇集区、中游输移区、下游堆积区建立不同的漂木防治工程措施。同时,针对流域内漂木堵塞体溃决-放大效应带来的危害,建立有效的监测预警措施。最后通过将漂木灾害预警措施与工程防治措施相结合,建立有效的管理措施,从而降低漂木在天然沟道内和河流中的堵塞-溃决发生概率,降低其带来的危害。

5 研究展望

在目前漂木动力学过程、漂木致灾、漂木减灾研究的基础上,开展漂木堵塞-溃决过程研究,不仅有助于解决风景区内的漂木灾害防治问题,而且有助于解决川藏公路、川藏铁路等重大工程建设中面临的漂木灾害防治需求。未来的研究方向主要有:

a. 构建流域尺度漂木补给定量计算模型。由于漂木补给具有随机性,导致现有的漂木补给模型无法定量预测流域尺度的漂木补给量,直接影响漂木致灾效应的定量评估及流域内防治工程设计标准的确定,因此,亟须构建流域尺度的漂木补给定量计算模型。

b. 揭示漂木堵塞-溃决规模放大机理。由于缺乏对山洪泥石流中漂木堵塞-溃决带来的规模放大效应的研究,导致工程设计标准偏低,增大了工程损毁的风险。亟须开展系列物理模型试验和数值模拟研究,建立基于堵塞-溃决规模放大条件下的山洪泥石流动力学参数定量化计算方法。

c. 建立漂木致灾防控方法。由于漂木运动过程具有不确定性,造成漂木致灾风险无法定量评估。在研究漂木随机冲击破坏建筑物的基础上,建立冲击力计算方法,进而构建漂木堵塞-溃决条件下的灾害定量评估方法,研发漂木灾害防治关键技术,构建完善的漂木灾害监测与管理 体系。

参考文献:

[ 1 ] 崔鹏,陈晓清,柳素清,等. 风景区泥石流防治特点与技术[J]. 地学前缘,2007,14(6):172-180. ( CUI Peng, CHEN Xiaoqing, LIU Suqing, et al. Techniques of debris flow prevention in national parks [ J ]. Earth Science Frontiers,2007,14(6):172-180(in Chinese) )

[ 2 ] 陈晓清,崔鹏,韦方强. 良好植被区泥石流防治初探[J]. 山地学报,2006,24(3):333-339. ( CHEN Xiaoqing, CUI Peng, WEI Fangqiang. Study of control debris flow in high-covered vegetation region [ J ]. Mountain Research, 2006, 24 ( 3 ): 333-339. ( in Chinese) )

- [ 3 ] CHEN J, LIU W, ZHAO W, et al. Magnitude amplification of flash floods caused by large woody in Keze Gully in Jiuzhaigou National Park, China [ J ]. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2021, 12(1) : 2277-2299.
- [ 4 ] RUIZ-VILLANUEVA V, WYZGA B, MIKUS P, et al. Large wood clogging during floods in a gravel-bed river; the Dlugopole Bridge in the Czarny Dunajec River, Poland [ J ]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2017, 42(3) : 516-530.
- [ 5 ] EBRAHIMI M, KRIPAKARAN P, PRODANOVIC D M, et al. Experimental study on scour at a sharp-nose bridge pier with debris blockage [ J ]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2018, 144(12) : 04018071.
- [ 6 ] DIEHL T H. Potential drift accumulation at bridges [ R ]. Washington D. C. : US Department of Transportation, Federal Highway Administration, Research and Development, Turner-Fairbank Highway Research Center, 1997.
- [ 7 ] BENN J. Railway bridge failure during flooding in the UK and Ireland [ J ]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers ( Forensic Engineering )*, 2013, 166(4) : 163-170.
- [ 8 ] CHEN J, WANG D, ZHAO W, et al. Laboratory study on the characteristics of large wood and debris flow processes at slit-check dams [ J ]. *Landslides*, 2020, 17 : 1703-1711.
- [ 9 ] BRUSCHIN J. The overtopping of the Palagnedra Dam [ M ]. Switzerland : Motor Columbus, 1982.
- [ 10 ] CHEN X, CHEN J, CUI P, et al. Assessment of prospective hazards resulting from the 2017 earthquake at the world heritage site Jiuzhaigou Valley, Sichuan, China [ J ]. *Journal of Mountain Science*, 2018, 15(4) : 779-792.
- [ 11 ] COMITI F, ANDREOLI A, LENZI M A, et al. Spatial density and characteristics of woody debris in five mountain rivers of the Dolomites ( Italian Alps ) [ J ]. *Geomorphology*, 2006, 78(1/2) : 44-63.
- [ 12 ] GASSER E, SCHWARZ M, SIMON A, et al. A review of modeling the effects of vegetation on large wood recruitment processes in mountain catchments [ J ]. *Earth-Science Reviews*, 2019, 194 : 350-373.
- [ 13 ] BENDA L E, SIAS J C. A quantitative framework for evaluating the mass balance of in-stream organic debris [ J ]. *Forest Ecology and Management*, 2003, 172(1) : 1-16.
- [ 14 ] MAY C L, GRESSWELL R E. Processes and rates of sediment and wood accumulation in headwater streams of the Oregon Coast Range, USA [ J ]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2003, 28(4) : 409-424.
- [ 15 ] KRAFT C E, WARREN D R. Development of spatial pattern in large woody debris and debris dams in streams [ J ]. *Geomorphology*, 2003, 51(1/2/3) : 127-139.
- [ 16 ] PETTIT N E, NAIMAN R J, ROGERS K H, et al. Post-flooding distribution and characteristics of large woody debris piles along the semi-arid Sabie River, South Africa [ J ]. *River Research and Applications*, 2005, 21(1) : 27-38.
- [ 17 ] HASCHENBURGER J K, RICE S P. Changes in woody debris and bed material texture in a gravel-bed channel [ J ]. *Geomorphology*, 2004, 60(3/4) : 241-267.
- [ 18 ] LASSETTRE N S, PIÉGAY H, DUFOUR S, et al. Decadal changes in distribution and frequency of wood in a free meandering river, the Ain River, France [ J ]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2008, 33(7) : 1098-1112.
- [ 19 ] WOHL E, GOODE J R. Wood dynamics in headwater streams of the Colorado Rocky Mountains [ J ]. *Water Resources Research*, 2008, 44(9) : 1-14.
- [ 20 ] WARREN D R, KRAFT C E. Dynamics of large wood in an eastern US mountain stream [ J ]. *Forest Ecology and Management*, 2008, 256(4) : 808-814.
- [ 21 ] van der NAT D, TOCKNER K, EDWARDS P J, et al. Large wood dynamics of complex Alpine River Floodplains [ J ]. *Journal of the North American Benthological Society*, 2003, 22(1) : 35-50.
- [ 22 ] KEIM R F, SKAUGSET A E, BATEMAN D S. Dynamics of coarse woody debris placed in three Oregon streams [ J ]. *Forest Science*, 2000, 46(1) : 13-22.
- [ 23 ] WYZGA B, MIKUS P, ZAWIEJSKA J, et al. Log transport and deposition in incised, channelized, and multithread reaches of a wide mountain river; tracking experiment during a 20-year flood [ J ]. *Geomorphology*, 2017, 279 : 98-111.
- [ 24 ] MAC-VICAR B, PIÉGAY H. Implementation and validation of video monitoring for wood budgeting in a wandering piedmont river, the Ain River ( France ) [ J ]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2012, 37(12) : 1272-1289.
- [ 25 ] CHEN S C, TFWALA S S, WANG C R, et al. Incipient motion of large wood in river channels considering log density and orientation [ J ]. *Journal of Hydraulic Research*, 2020, 58(3) : 489-502.
- [ 26 ] BOCCHIOLA D, RULLI M C, ROSSO R. Flume experiments on wood entrainment in rivers [ J ]. *Advances in Water Resources*, 2006, 29(8) : 1182-1195.
- [ 27 ] BRAUDRICK C A, GRANT G E. When do logs move in rivers? [ J ]. *Water Resources Research*, 2000, 36(2) : 571-583.
- [ 28 ] 王道正, 陈晓清, 赵万玉, 等. 泥石流中漂木的运动和拦截特征 [ J ]. *中国水土保持科学*, 2017, 15(6) : 9-18. ( WANG Daozheng, CHEN Xiaqing, ZHAO Wanyu, et al. Movement and intercept characteristics of driftwood in debris flow [ J ]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2017, 15(6) : 9-18. ( in Chinese ) )
- [ 29 ] BRAUDRICK C A, GRANT G E, ISHIKAWA Y, et al. Dynamics of wood transport in streams: a flume experiment [ J ]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1997, 22

- (7):669-683.
- [30] MAZZORANA B, HÜBL J, ZISCHG A, et al. Modelling woody material transport and deposition in alpine rivers [J]. *Natural Hazards*, 2011, 56(2):425-449.
  - [31] RUIZ-VILLANUEVA V, BLADÉ E, SÁNCHEZ-JUNY M, et al. Two-dimensional numerical modeling of wood transport [J]. *Journal of Hydroinformatics*, 2014, 16(5):1077-1096.
  - [32] BOCCHIOLA D, CATALANO F, MENDUNI G, et al. An analytical-numerical approach to the hydraulics of floating debris in river channels [J]. *Journal of Hydrology*, 2002, 269(1/2):65-78.
  - [33] DAVIDSON S L, MACKENZIE L G, EATON B C. Large wood transport and jam formation in a series of flume experiments [J]. *Water Resources Research*, 2015, 51(12):10065-10077.
  - [34] RUIZ-VILLANUEVA V, PIÉGAY H, GAERTNER V, et al. Wood density and moisture sorption and its influence on large wood mobility in rivers [J]. *Catena*, 2016, 140:182-194.
  - [35] NAKAMURA F, SWANSON F J. Effects of coarse woody debris on morphology and sediment storage of a mountain stream system in western Oregon [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1993, 18(1):43-61.
  - [36] BOCCHIOLA D, RULLI M C, ROSSO R. Transport of large woody debris in the presence of obstacles [J]. *Geomorphology*, 2006, 76(1/2):166-178.
  - [37] BRAUDRICK C A, GRANT G E. Transport and deposition of large woody debris in streams: a flume experiment [J]. *Geomorphology*, 2001, 41(4):263-283.
  - [38] BERTOLDI W, WELBER M, GURNELL A M, et al. Physical modelling of the combined effect of vegetation and wood on river morphology [J]. *Geomorphology*, 2015, 246:178-187.
  - [39] WOHL E. Floodplains and wood [J]. *Earth-Science Reviews*, 2013, 123:194-212.
  - [40] SCHMOCKER L, WEITBRECHT V. Driftwood: risk analysis and engineering measures [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, 139(7):683-695.
  - [41] SCHALKO I, SCHMOCKER L, WEITBRECHT V, et al. Laboratory study on wood accumulation probability at bridge piers [J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2020, 58(4):566-581.
  - [42] HARTLIEB A. Hydraulic model tests for floating debris jams at spillways [J]. *Wasser Wirtschaft*, 2012, 102(6):15-19.
  - [43] PFISTER M, CAPOBIANCO D, TULLIS B, et al. Debris-blocking sensitivity of piano key weirs under reservoir-type approach flow [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, 139(11):1134-1141.
  - [44] SCHMOCKER L, HAGER W H. Probability of drift blockage at bridge decks [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011, 137(4):470-479.
  - [45] SHRESTHA B B, NAKAGAWA H, KAWAIKE K, et al. Driftwood deposition from debris flows at slit-check dams and fans [J]. *Natural Hazards*, 2012, 61(2):577-602.
  - [46] SCHALKO I. Modeling hazards related to large wood in rivers [D]. Zurich:ETH Zurich, 2018.
  - [47] SCHMOCKER L, HAGER W H. Scale modeling of wooden debris accumulation at a debris rack [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, 139(8):827-836.
  - [48] PANICI D, de ALMEIDA G A M. Formation, growth, and failure of debris jams at bridge piers [J]. *Water Resources Research*, 2018, 54(9):6226-6241.
  - [49] PITON G, HORIGUCHI T, MARCHAL L, et al. Open check dams and large wood: head losses and release conditions [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2020, 20(12):3293-3314.
  - [50] MANNERS R B, DOYLE M W, SMALL M J. Structure and hydraulics of natural woody debris jams [J]. *Water Resources Research*, 2007, 43(6):1-17.
  - [51] LANGE D, BEZZOLA G R. Schwemmholtz: probleme und lösungsansätze (large wood: problems and approach methods) [R]. Zurich: Laboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology, Zurich Federal Institute of Technology, 2006.
  - [52] KIMURA N, TAI A, HASHIMOTO A. Flood caused by driftwood accumulation at a bridge [J]. *International Journal of Disaster Resilience in the Built Environment*, 2017, 8(5):466-477.
  - [53] 傅宗甫, 刘明明, 吕家才. 漂木撞击力量测量方法及撞击力特性研究 [J]. *水利水电科技进展*, 2001, 21(3):33-34. (FU Zongfu, LIU Mingming, LYU Jiakai. Study on measurement and characteristics of percussive force of float timber [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resource*, 2001, 21(3):33-34. (in Chinese))
  - [54] HAEHNEL R B, DALY S F. Maximum impact force of woody debris on floodplain structures [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, 130(2):112-120.
  - [55] OKAMOTO T, TAKEBAYASHI H, SANJOU M, et al. Log jam formation at bridges and the effect on floodplain flow: a flume experiment [J]. *Journal of Flood Risk Management*, 2020, 13:e12562.
  - [56] SCHALKO I, SCHMOCKER L, WEITBRECHT V, et al. Backwater rise due to large wood accumulations [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2018, 144(9):04018056.
  - [57] SCHALKO I, LAGEDER C, SCHMOCKER L, et al. Laboratory flume experiments on the formation of spanwise large wood accumulations: part II. effect on local scour [J]. *Water Resources Research*, 2019, 55(6):4871-4885.
  - [58] PAGLIARA S, CARNACINA I. Influence of wood debris accumulation on bridge pier scour [J]. *Journal of*

- Hydraulic Engineering,2011,137(2):254-261.
- [59] PAGLIARA S, CARNACINA I. Influence of large woody debris on sediment scour at bridge piers[J]. International Journal of Sediment Research,2011,26(2):121-136.
- [60] MELVILLE B W, DONGOL D M. Bridge pier scour with debris accumulation [J]. Journal of Hydraulic Engineering,1992,118(9):1306-1310.
- [61] 谢湘平,王小军,屈新,等. 缝隙坝对携带漂木的泥石流减灾效果实验研究[J]. 工程地质学报,2020,28(6):1300-1310. (XIE Xiangping, WANG Xiaojun, QU Xin, et al. Experimental study on mitigation effect of slit dam to debris flow with driftwood [J]. Journal of Engineering Geology,2020,28(6):1300-1310. (in Chinese))
- [62] COMITI F, LUCÍA A, RICKENMANN D. Large wood recruitment and transport during large floods: a review [J]. Geomorphology,2016,269:23-39.
- [63] 崔鹏,柳素清,唐邦兴,等. 风景名胜区泥石流治理模式:以世界自然遗产九寨沟为例[J]. 中国科学 E 辑:技术科学,2003(增刊1):1-9. (CUI Peng, LIU Suqing, TANG Bangxing, et al. Debris flow control model in scenic spots: a case study of Jiuzhaigou [J]. Scientia Sinica: Technologica,2003,33(Sup1):1-9. (in Chinese))
- [64] RUIZ-VILLANUEVA V, PIÉGAY H, GURNELL A M, et al. Recent advances quantifying the large wood dynamics in river basins: new methods and remaining challenges[J]. Reviews of Geophysics,2016,54(3):611-652.
- [65] BRADLEY J B, RICHARDS D L, BAHNER C D. Debris control structures-evaluation and countermeasures; hydraulic engineering circular 9[R]. Washington D. C.: Federal Highway Administration. Office of Bridge Technology,2005.
- [66] SCHALKO I, SCHMOCKER L, WEITBRECHT V, et al. Risk reduction measures of large wood accumulations at bridges [J]. Environmental Fluid Mechanics, 2020, 20(3):485-502.
- [67] PANICI D, KRIPAKARAN P, DJORDJEVIC S, et al. A practical method to assess risks from large wood debris accumulations at bridge piers [J]. Science of The Total Environment,2020,728:138575.
- [68] WOHL E, BLEDSOE B P, FAUSCH K D, et al. Management of large wood in streams: an overview and proposed framework for hazard evaluation [J]. Journal of the American Water Resources Association,2016,52(2):315-335.
- [69] MAZZORANA B, RUIZ-VILLANUEVA V, MARCHI L, et al. Assessing and mitigating large wood-related hazards in mountain streams: recent approaches [J]. Journal of Flood Risk Management,2018,11(2):207-222.
- [70] OPPERMAN J. Maintaining wood in streams: a vital action for fish conservation [M]. New York: UCANR Publications,2006.
- [71] MAO L, ANDREOLI A, IROUMÉ A, et al. Dynamics and management alternatives of in-channel large wood in mountain basins of the southern Andes [J]. Bosque,2013,34(3):319-330.

(收稿日期:2021-05-09 编辑:郑孝宇)

(上接第 89 页)

- [9] 胡道达,马振利,石文凯. 小波包分形技术在泵机组故障诊断中的应用[J]. 煤矿机械,2016,37(5):163-165. (HU Daoda, MA Zhenli, SHI Wenkai. Application of wavelet packet fractal theory in fault diagnosis of pump assembly [J]. Coal Mine Machinery, 2016, 37(5): 163-165. (in Chinese))
- [10] LI S M, WANG J R, LI X L. Theoretical analysis of adaptive harmonic window and its application in frequency extraction of vibration signal [J]. Journal- Central South University,2018,25(1):241-250.
- [11] 梁瑞刚,姚炽伟. 基于谐波小波的梳状滤波器设计及应用[J]. 科技创新与应用,2015(33):65-66. (LIANG Ruigang, YAO Chiwei. Design and application of comb filter based on harmonic wavelet [J]. Technology Innovation and Application, 2015 (33): 65-66. (in Chinese))
- [12] 冯英鹏,占小杰,李传江. 基于谐波小波带通滤波的动不平衡信号提取研究[J]. 机械与电子,2015(5):47-50. (FENG Yingpeng, ZHAN Xiaojie, LI Chuanjiang. Study on the extraction of dynamic unbalance signal based on harmonic wavelet band-pass filtering [J]. Machinery & Electronics,2015(5):47-50. (in Chinese))
- [13] 段吉安,张小栋. 基于小波变换的轴心轨迹特征提取 [J]. 振动、测试与诊断,1997(1):31-34. (DUAN Ji'an, ZHANG Xiaodong. Feature extraction from the orbit of the center of a rotor based on wavelet transform [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis,1997(1):31-34. (in Chinese))
- [14] 臧怀刚,王石云,王冀龙. 谐波小波滤波与 HHT 在轴承故障诊断中的应用 [J]. 轴承,2014(9):44-47. (ZANG Huaigang, WANG Shiyun, WANG Jolong. Application of Harmonic Wavelet Filtering and HHT in Fault Diagnosis for Bearings [J]. Bearing,2014(9):44-47. (in Chinese))
- [15] 程佩青. 数字信号处理教程. [M]. 第 2 版. 北京:清华大学出版社,2001.
- [16] NEWLAND D E. Harmonic wavelet analysis [J]. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, 1993, 443 (1917):203-225.

(收稿日期:2022-01-10 编辑:刘晓艳)