

震后极端降雨下流域产沙及物质运移规律模拟

——以四川省洪溪河流域为例

谢 军^{1,3}, 汪 明^{1,3}, 刘 凯^{2,3}

(1. 北京师范大学 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875; 2. 北京师范大学 环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京 100875; 3. 北京师范大学 地理科学学部 减灾与应急管理研究院, 北京 100875)

摘 要:汶川地震引发的滑坡产生了大量松散物质,在极端降雨事件驱动下进入下游河道,导致河床淤升,河道变宽,给沿河道地势较低的居民区形成了新的洪涝风险。基于四川洪溪河流域 2013 年极端降雨数据,从无强降雨事件情景开始逐渐加大降雨强度及频次生成 6 个不同降雨情景。运用凯撒二维水动力地表景观演变模型(CAESAR-lisflood)模拟不同降雨情景下流域产沙以及物质运移规律及其空间分布格局。结果表明:随着降雨强度的增加,流域出口产沙量以及流域总产沙量都呈非线性的增加趋势,且累积产沙量在极端降雨事件发生前后有明显的突变现象;各个降雨情景下侵蚀堆积的严重程度以及影响范围差异明显;震后流域遭到破坏的植被对流域的物质运移规律及空间分布格局有较大的影响,在较少滑坡、泥石流灾害的上游地区和滑坡、泥石流灾害严重的中下游地区水土流失程度差异明显。

关键词:产沙; 极端降雨; CAESAR-lisflood; 流域; 侵蚀; 堆积

中图分类号:TV142; P333.4

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)01-0001-07

Material Migration Patterns of Basin After Earthquake Under Extreme Rainfall — A Case Study on Hongxi Basin of Sichuan Province

XIE Jun^{1,3}, WANG Ming^{1,3}, LIU Kai^{2,3}

(1. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Key Laboratory of Environment Change and Natural Disaster, ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Landslides triggered by Wenchuan earthquake generated a large amount of loose material. Driven by extreme rainfall events, the loose material moving into the downstream channel led to riverbed aggrading, the river channel wider, and formed the new flood risk to the residents along the low-lying river channel. This study was based on the data of extreme rainfall and gradual increases of rainfall intensity and frequency from the scenario without extreme rainfall to generate six rainfall scenarios in 2013 in Hongxi Basin in Sichuan Province. And the sediment yield and material migration rules were simulated by using the two-dimensional hydrodynamic surface landscape evolution model-CAESAR-lisflood. The results showed that with the increase of rainfall intensity, the increase of sediment yield at the basin outlet and the total sediment in the catchment was non-linear, and distinct mutation phenomenon of cumulative sediment yield occurred near the extreme precipitation events; there are obvious differences of the severity and influence range of erosion and deposition under variable rainfall scenarios; damaged vegetation after the earthquake had a great influence on the movement and spatial distribution pattern of material, the soil erosion degree difference between the upper basin with less landslide and the downstream areas with serious landslide disaster was obvious.

Keywords: sediment yield; extreme rainfall; CAESAR-lisflood; basin; erosion; deposition

汶川地震诱发了数以万计的崩塌、滑坡、泥石流,以及大量松动的岩体、崩滑堆积体和松散堆积物及覆

盖层。据统计,汶川地震共引发崩塌滑坡面积 2 264 km²,重灾区崩塌滑坡水土流失量相当于全国水土流

失量,接近 $5.586 \times 10^9 \text{ t}^{[1]}$,灾区呈现“滑坡—泥石流—山洪”多灾种频发并发的特点。

地震引发的滑坡在区域地貌侵蚀上具有一定的贡献,在有些地区甚至是造成陆面侵蚀的主要驱动力^[2],地震造成的大量沟谷和坡体上的松散物质,将造成震后持续性的大规模的泥石流等次生灾害^[3-4],同时,地震造成的碎屑物运移能量仍然很大^[5],汶川地震造成的山体松散物质及其运动可能会存在几十年至数百年之久^[6]。震后山区大量松散物质非常不稳定,在极端降雨事件的驱动下,山间汇水区内部松散物质沿沟谷运动,原有滑坡体的扩展、碎屑堆积区的再次滑动以及山体新滑坡的出现。由于松散物质往河道搬运和转移,一些小流域河道的河床淤升明显,河道宽度明显加大,部分河道震后改道,这些因素组合在一起,直接导致山洪来时水位剧增,且直接冲刷河道附近公路路基,威胁河道附近房屋。与此同时,震后山区居民新建房屋多往靠近河道地势较低处选址,且出现大量房屋沿山间沟谷而建,承灾体与山区孕灾环境间关系的改变也直接孕育着新的灾害风险^[7]。震后灾区滑坡、泥石流、山洪频发,泥石流物源的产生及运移方式发生了极大的改变,松散裸露土体产汇流条件的改变对山洪泥石流等灾害的形成和临界启动条件影响很大^[8]。

目前,国内外学者对震后场景泥沙运移特点、水土流失物质量估算、江河流域泥沙与河床演变问题开展了研究^[9-11],也有运用土壤侵蚀预报模型来研究水土流失^[12],如通用土壤流失方程(USLE-Universal Soil Loss Equation)和 WEPP 模型。随着地理信息系统(GIS)以及遥感技术的发展,一些学者尝试将数字高程模型(DEM)应用在土壤侵蚀类型与过程研究中^[13],应用 GIS 建立了流域降雨条件下土壤侵蚀的定量计算方法,用以模拟土壤侵蚀的空间分布格局及变化规律^[14]。这些研究对深入理解降雨与物质运移关系、构建量化评估方法起到了促进作用。然而,针对震后流域物质运移过程及空间分布规律研究较为不足,厘清震后流域物质运移规律及侵蚀堆积空间格局对研究流域次生灾害发生机制及预警显得尤为重要。本文选择汶川地震极重灾区四川省平武县洪溪河流域为研究区,运用基于 GIS 分布式的地表景观演变模型,模拟不同降雨情景下流域产沙以及物质运移规律,评估流域侵蚀堆积量及其空间分布格局,分析影响震后山区环境变化和次生灾害孕育的影响因素,旨在为灾区长期的恢复重建、防灾减灾和生态环境治理提供科学支撑。

1 研究区概况

研究区位于四川省绵阳市平武县洪溪河流域,流域

面积约 179 km²。流域主河洪溪河属涪江上游主岸支流,全长约 36 km。研究区气候温和,降雨充沛,多年平均降水量接近 800 mm,其中降雨多集中在 6—8 月,约占全年降水量的 60%以上。研究区地势险峻,地表起伏度大,海拔位于 679~3 036 m。汶川地震主震断裂带龙门山断裂带以近北东南西走向穿过流域,汶川地震发生后流域中下游区域发生大量的山体崩塌及滑坡,产生的大量碎屑物质堆积在山间汇水山谷,在降雨作用下滑坡碎屑物质顺着沟谷向河道运移,导致河床淤升,河道发生改变。2013 年极端降雨过后,下游河道堆积现象更为明显,根据笔者实地测量结果,平均堆积高度 2~3 m,最大堆积高度可达 5 m。

2 方法

2.1 CAESAR-lisflood

凯撒二维水动力地表景观演变模型(Cellular Automaton Evolutionary Slope And River)模型是由英国库尔撒德(Coulthard)教授在 2001 年开发的基于 GIS 分布式的地表景观演变模型,其核心算法使用元胞自动机,每一时刻的状态受相邻的单元的影响,体现了时间和空间上相邻区域相互影响的思想。该模型可以根据降雨条件,模拟地表径流的流速和深度。其最突出的功能是能够借助二维水动力模型很好的描述河流动态^[15]和泥沙的运输过程^[16-17],进而估计河床侵蚀和河道变化^[18];该模型也可以根据坡度和不同的降雨情景模拟雨后土壤侵蚀和边坡侵蚀情况^[19];该模型另一突出优点在于可以模拟一定空间(100 km²)和较长时间范围内的综合变化情况,既能对未来河床的变化以及地貌演变进行预测,也可以通过输入不同初始条件对不同区域特征的流域及情景进行模拟。该模型已经在全世界超过 100 个不同流域研究和实践中得到了应用。Hancock 等运用凯撒二维水动力景观演变模型研究澳大利亚 Stanley 流域在不同真实降雨情景下河道位置演变及产沙规律,结果显示模型能够较好模拟流域侵蚀产沙率及重现河道历史演变规律^[20-21]。Coulthard 等通过改变凯撒模型中“M 值”来建立不同的土地利用变化情景,模拟英格兰北部 swale 流域在不同土地利用变化情景下上下游产沙关联规律^[22]。Hancock 等第一次通过随机生成不同长时间尺度降雨序列,输入凯撒模型模拟矿区流域物质运移及河道演变规律^[23]。Meadows 用凯撒模型模拟美国 Toutle-Cowlitz 流域火山爆发后,下游流域产沙及物质运移规律。并验证了模型在极端灾害事件扰动后,模拟后续泥沙物质运移及地貌演变的可行性。同时也表明该模型在重大地质灾害后模拟地表物质运移

及流域地貌演变规律的有效性^[24]。

凯撒二维水动力地表景观演变模型具有综合考虑降雨和物质迁移运用以及河床沉积变化后对洪水的反馈作用的优点。模型的输入主要包括地形、降雨、边坡失稳临界值、植被、土壤侵蚀等参数。模型能将河道沉积过程与洪峰过程耦合起来,模型输出包括洪水淹没区流域产沙量、河床沉积量、流域河口输沙量及地形变化等。模型通过嵌入二维水动力模型(lisflood),具备一定的流域物质质量侵蚀堆积的物理基础,在特定降雨情景下可以对流域物质运移过程进行模拟,并生成流域物质侵蚀堆积空间分布格局。

在模型中,研究区被划分为一系列矩形网格。对于每一个网格,都存储着该对应位置的高程、植被条件、粒径分布、流量、水深、流速等数值。在模型运行过程中,每个网格存储的值都是根据周围相邻的网格通过一系列规则和算法实时迭代更新的。这些规则大致可以划分为 4 个模块:水力模块,河流动力模块,侵蚀堆积模块,坡面模块。其运行过程如图 1 所示。

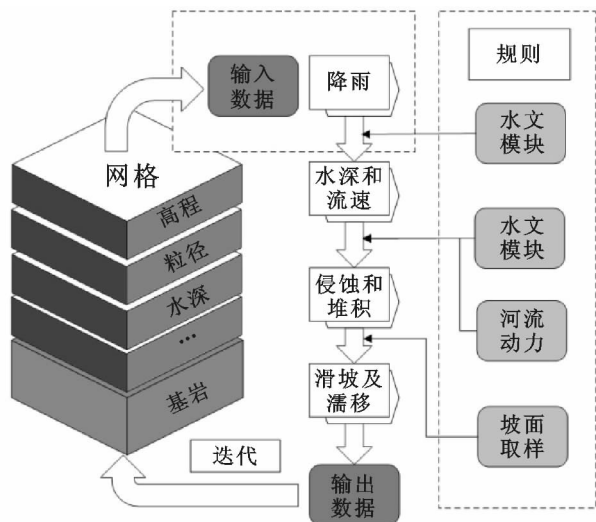


图 1 CAESAR-lisflood 模型结构及运行过程示意图

2.2 模型输入

降雨情景:2013 年研究区洪溪河流域经历了 50 年一遇的极端降雨,其中日均降雨量超过 50 mm(暴雨)的天数一共 8 d,主要为两次高强度且持续时间长的强降雨过程,其中在第 169~171 天连续 3 d 降雨超过 50 mm,累计降雨量达 278.64 mm,期间一次 12 h 降雨超过 120 mm;在第 218~219 天连续 2 d 降雨超过 100 mm,两天累计降雨量达 262.8 mm,期间一次 12 h 降雨达到 140 mm。通过提取 2013 年第 169~171 天和 218~219 天两次强降雨事件,2013 年全年去除这两次过程的数据设为第一个模拟情景,即无强降雨情景。之后逐步增加集中降雨量到无强降雨的情景 1 中,生成 5 个强度依次增强的降雨情景(图 2)。其中情景 1 为无强降雨情景,在第

169 天加入第一次强降雨事件生成情景 2,在第 170 天加入第 2 次强降雨事件生成情景 3,在第 171 天加入第 3 次强降雨事件生成情景 4,在第 218 天加入第 4 次强降雨事件生成情景 5,在第 219 天加入第 5 次强降雨事件生成情景 6。运用人为生成的降雨情景,探索在不同降雨强度下,震后灾区物质运移过程及空间分布规律。本文中采用的降雨数据为时间分辨率为 3 h 的全球热带降雨数据(TRMM),经重采样生成时间分辨率为 1 h 的降雨输入数据。

土地分类:在地震发生后,流域的地表覆盖类型发生了很大的变化,很大程度上影响了流域物质运移过程及空间分布规律。通过高空间分辨率遥感影像提取 2013 年之前的滑坡泥石流流空间分布,作为震后地表覆盖初始条件输入模型。在每个模拟场景中,流域的土地利用被分为林地、耕地、滑坡和河道四大类,通过设置模型中水文模块不同的 m 值,建立流域地表覆盖的空间差异分布。库尔撒德等^[22]用不同 m 值代表不同土地利用类型,探究长时间尺度下土地利用变化对流域上下游产沙量的关系,本研究将林地、耕地、滑坡和河道的 m 值依次设置为 0.02,0.008,0.003,0.002。

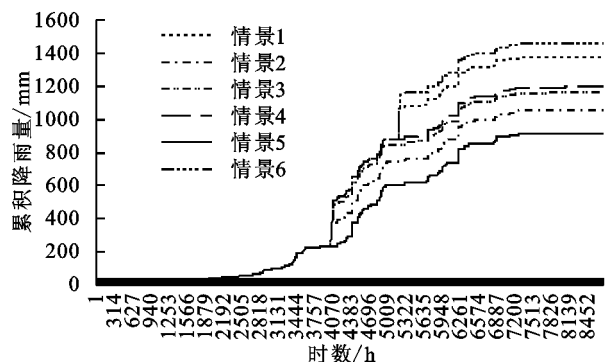


图 2 2013 年各降雨情景降雨量设置

地形数据:本研究采用的地形数据为荷兰屯特大学地理信息科学与地球观测中心生产的全球数字高程模型(Global DEM),数据获取时间为 2010 年,原始分辨率为 12.5 m,考虑到计算的稳定性和有效性,本研究将 DEM 重采样为 20 m 空间分辨率并转成文本文件作为模型地形表面输入数据。

粒径级配:于 2016 年 10 月在研究区开展了不同位置实地取土样,依次从上中下游的河道内、河道边缘、坡面等处总共采集 15 处样品,并在室内测得不同样本颗粒级配比,最后求得平均级配作为流域沉积物的级配输入。其他参数见表 1。

3 结果与分析

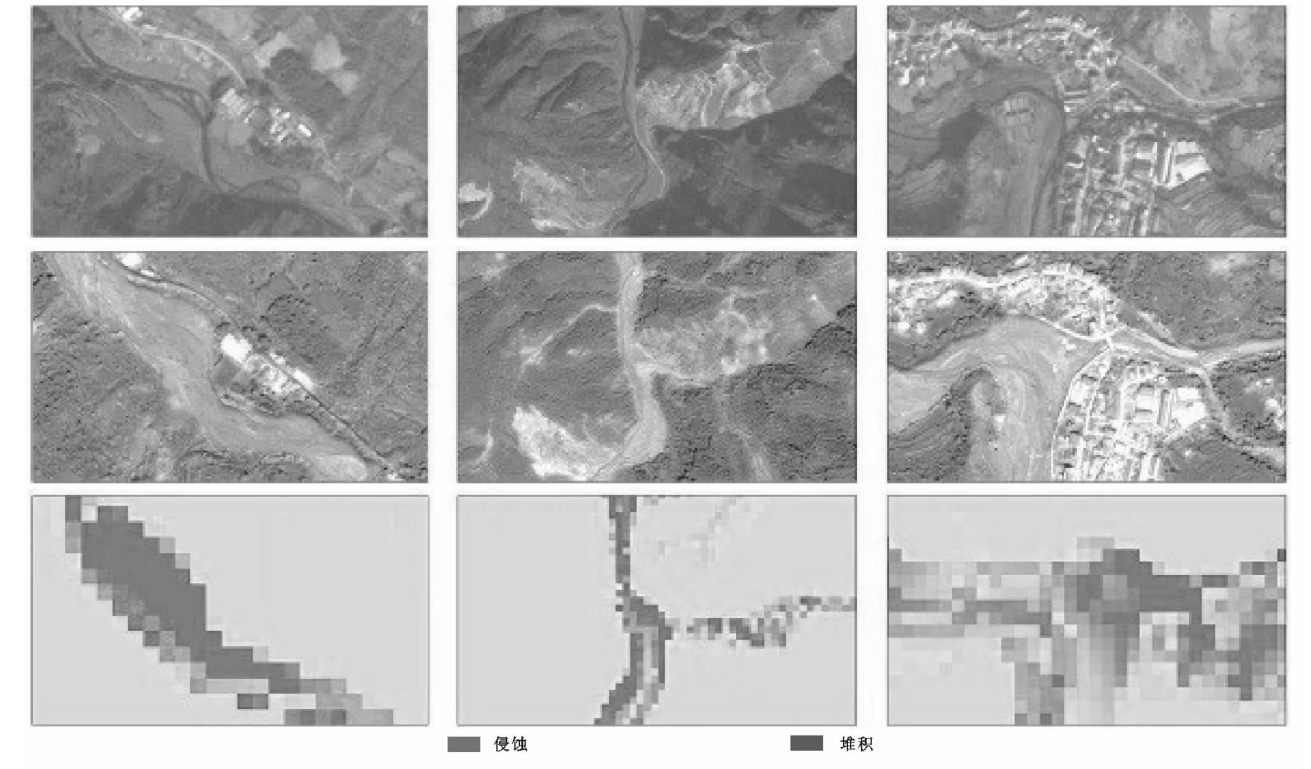
3.1 模型校验

本研究首次运用地表景观演变模型对震后流域

物质运移进行模拟。研究团队自 2010 年开始至今在此研究区持续观测,获取大量的实测数据(地形,地貌,植被,降雨,粒径等)。将研究区高精度的高程数据,土地利用,泥沙粒径,实时降雨等基本参数输入模型还原震后流域初始地表情景。在经过分析处理建立研究区基础数据库作为模型输入数据的基础上,运用撒德二维水动力模型(CAESAR-lisflood)模型对研究流域震后典型汛期(2013 年全年)山洪动态过程进行模拟。通过不同时期高分辨率卫星遥感影像及实地调研数据(2012 年、2013 年)与模拟结果(2013 年全年)对比对模型进行参数调整和模型校准(表 1),获得适用于研究区流域产沙及泥沙运移规律的模型参数。

表 1 模型输入参数

CAESAR-lisflood 参数	参数值
粒径/m	0.000074,0.0005,0.001,0.002,0.005,0.01,0.02,0.04,0.1
粒径比	0.047,0.111,0.078,0.052,0.162,0.158,0.169,0.130,0.093
泥沙输送公式	Wilcock and Crowe
最大侵蚀限制	0.02
侧向侵蚀率	0.000001
濡移值	0.0025
坡面失稳阈值	65
蒸散值/(m·d ⁻¹)	0
柯朗数	0.7
曼宁指数	0.04



注:上、中、下依次为 2012 年、2013 年遥感影像及模拟结果。

图 3 典型侵蚀堆积点验证

结果显示(图 3)凯撒二维水动力模型能有效模拟震后物质运移规律,河道淤升程度以及侵蚀堆积空间分布格局,模拟结果与实际情况基本相符。校验后的模型能够较好的模拟流域在不同极端降雨情境下的演变过程。

3.2 河口产沙量分析

基于 2013 年实际降雨生成的不同降雨情景下的运行结果(图 4)可以看出,研究区流域出口产沙量对强降雨事件具有极高的敏感性。从无强降雨事件的情景 1 到 2013 年全年真实极端降雨情景 6,降雨总量增加约 60%,而流域出口产沙量从 85 250 m³ 增长到 255 129 m³,增长近两倍;流域总产沙量从 592 659 m³ 增长到 3 409 066 m³,增长近四倍。在情景 1 中,流域出口产沙

主要集中在雨季,累积产沙量呈平缓上升趋势。情景 2 在第 169 d 加入第一次极端降雨后,日产沙量在第 170 天达到峰值 24 271 m³,累积产沙量出现明显的突变值。情景 3 和情景 4 在第 170 天和 171 天连续加入两次极端降雨事件后,日产沙量在第 170 天分别达到峰值 27 557 m³ 和 23 967 m³。相对于情景 2,情景 3 和情景 4 的日产沙量峰值并无产生明显变化,但累积突变量更为明显,其中情景 4 从第 168 天的 9 300 m³ 急剧增加到 171 天的 58 937 m³,增长了接近 5 倍。在第 218 天加入第 4 次极端降雨事件后,情景 5 中流域出口产沙量在第 170 天和第 219 天各出现一次峰值。由于降雨强度更大,第 2 次峰值更为明显,产沙量达 64 754 m³。同时,累积产沙量也出现明显的突变趋势。在情景 6 中,流域出口日

产沙量达到峰值 $81\,273\text{ m}^3$,第 2 次突变区间相对于情景 5 更为明显。可以看出在两次极端降雨期间,河口产沙量都出现了明显的突变值,且突变程度随着降雨强度的增加明显增强。

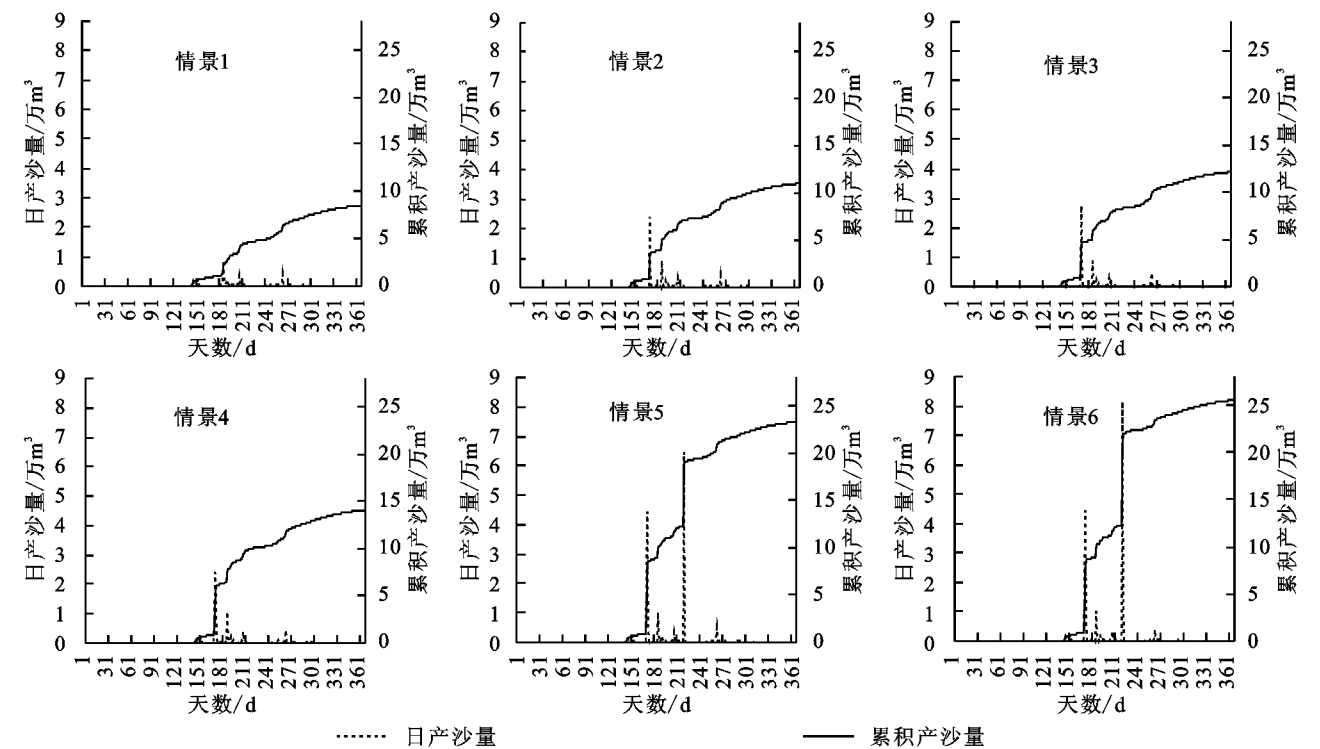


图 4 不同情景流域出口产沙量

从表 2 可以看出随着降雨强度的增加,流域出口产沙量从无极端降雨事件情景的 $85\,250\text{ m}^3$ 猛增到 2013 年极端降雨情景下的 $255\,129\text{ m}^3$,整个流域的产沙量也从 $592\,659\text{ m}^3$ 增长到 $3\,409\,066\text{ m}^3$ 。但从流域出口流失的泥沙量占整个流域产沙量的比例随着降雨强度的增加逐渐减少。短时高强度降雨的集中可以使流域产沙量随降雨量变化呈现非线性的激增,降雨量从情景 1 到情景 6 增长近 60%,而河口产沙量增长了 2 倍,流域总产沙量更增长了近 4 倍。

表 2 不同情景流域产沙量统计

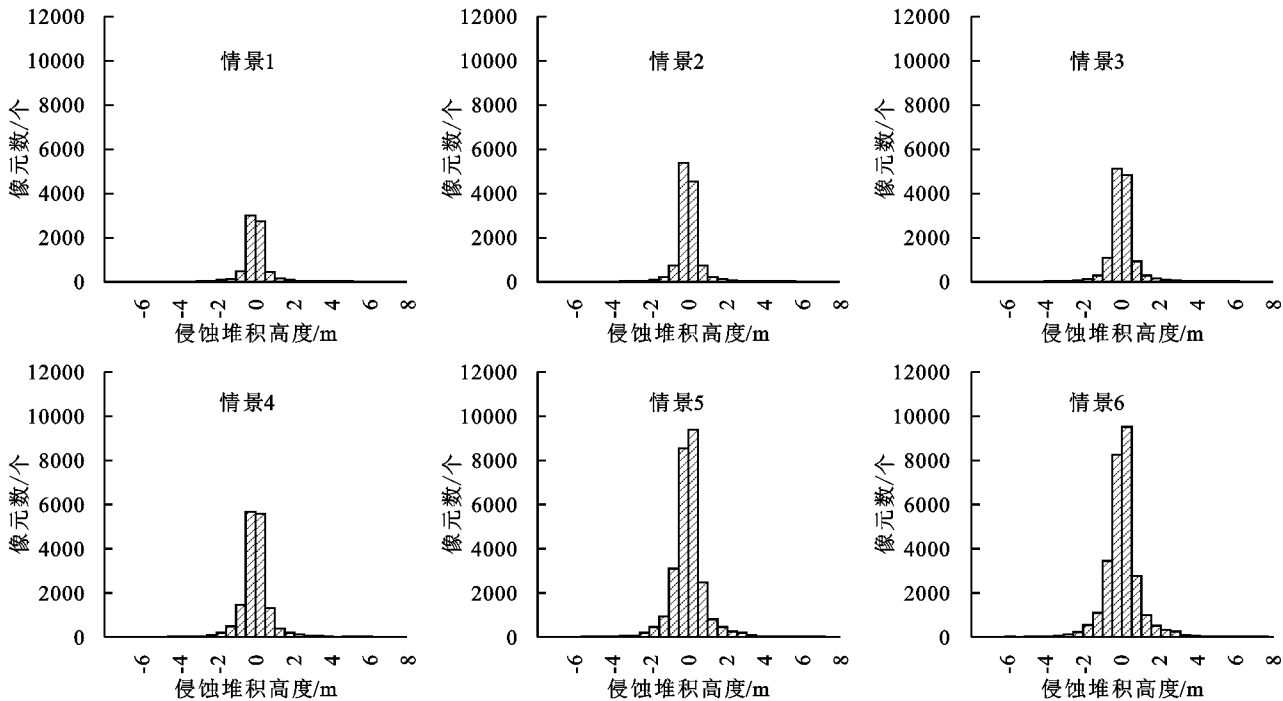
情景	出口产沙量/ m^3	流域总 产沙量/ m^3	泥沙 流失比
情景 1	85250	592659	0.144
情景 2	110082	1026415	0.107
情景 3	121280	1164680	0.104
情景 4	140625	1499445	0.094
情景 5	233000	3045921	0.076
情景 6	255129	3409066	0.075

3.3 流域侵蚀堆积空间分布规律

从空间分布上看,各个情景下流域的侵蚀堆积空间分布规律大体上一致,流域上游侵蚀严重,尤其在上游地区的河流沟谷中侵蚀较为严重,最大侵蚀深度可从情景 1 的 5.02 m 到情景六的 7.32 m 。堆积主要出现在地势相对较为平缓且开阔的主河道,特别是下游地区的河道淤积现象明显,最大堆积高度可从情

景 1 的 2.79 m 到情景 6 的 5.92 m 。从地形差异上看,整个流域的侵蚀和物质运移过程主要发生在沟谷和河道区域。同时,由于流域内汶川地震产生了大量的滑坡,对研究区造成了严重的植被破坏,影响了地表覆盖以及地形地貌初始条件。在发生滑坡的坡面区域,也出现了较为明显的侵蚀堆积现象。

对流域内每个情景侵蚀堆积量大于 0.1 m 的像元进行直方图统计分析(图 5),发现每个情景的直方图分布都近似正态分布,这与流域内整体物质质量守恒规律相一致。随着侵蚀堆积高度的增加,分布在该区间的像元数逐渐减少。分别计算不同情景下不同像元侵蚀堆积程度分布的峰度和偏度(表 3),可以看出,在每个降雨情景下,不同侵蚀堆积深度的像元分布都是右偏的,这与少量泥沙碎屑运移出河口导致整个流域侵蚀稍大于堆积的实际情况相符。随着降雨的持续增加,偏度值逐渐减少,说明在极端降雨情境下,整个流域的产沙量会大幅度增加,但是从流域出口流失的泥沙量占整个流域的产沙量比例更小,总体上整个流域的侵蚀堆积更加平衡,这与表 2 中计算出来的流域泥沙流失比结果相一致。同时随着降雨的增加,峰度值逐渐减少,侵蚀堆积量大的像元所占比例逐渐增加。均值先减小后增大最后又减小,标准误差逐渐变大,这说明随着降雨强度的增加,流域内侵蚀堆积偏离平衡状态的程度越大,表示流域侵蚀堆积过程越明显。



注：正为侵蚀，负为堆积。

图 5 不同情景下侵蚀堆积像元分布

表 3 不同情景侵蚀堆积像元统计分布拟合参数

统计参数	情景 1	情景 2	情景 3	情景 4	情景 5	情景 6
均值	0.016	0.009	0.013	0.014	0.007	0.008
标准方差	0.552	0.560	0.628	0.691	0.798	0.857
峰度	11.997	14.168	11.110	10.031	8.936	8.251
偏度	1.266	1.352	1.188	0.915	0.551	0.465

汶川地震后,研究区发生了大量的滑坡泥石流,通过高分辨率遥感提取出 2012 年研究区的滑坡编录。研究区在 2012 年共有滑坡泥石流 232 处,总计面积达 5.7 km²,约占整个研究区面积的 8.9%。反映 2013 年实际降雨的情景 6 计算结果如图 6 所示,从流域的侵蚀堆积空间格局看,在有滑坡泥石流的中下游地区侵蚀堆积程度比上游地区更为严重,这一现象在坡面区域尤为明显。在地表景观演变过程中,流域的侵蚀堆积和地貌变化过程主要发生在有地表径流的沟谷和河道,故在水文过程比较缓和的坡面并不会发生明显的水土流失现象。而地震引发的大量滑坡泥石流对地表景观覆盖及植被造成了严重的破坏,导致在发生滑坡的坡面区域及附近的沟谷在极端降雨情景下发生严重的物质运移和水土流失现象。

汶川地震对流域生态环境特别是植被覆盖破坏严重。在降雨驱动下,震后流域水土流失现象异常明显。本文首次运用基于数值模拟的地表景观演变模型方法模拟震后不同强度降雨情景下流域产沙及其物质运移规律,对流域泥沙调控以及生态环境防治特别是震后水土保持具有科学指导意义。本研究通过不同时期高分辨率卫星遥感影像及实地调研数据对模型参数进行校验。结果显示 CAESAR-Lisflood 能

有效的模拟震后物质运移规律及侵蚀堆积空间分布格局,模拟结果与实际情况基本相符。后续研究将运用该模型在有径流及含沙量监测数据相邻流域进行推广。此外,本研究未考虑震后次生山地灾害对流域产沙量及物质运移的作用机制,对灾害过程形成机理及其对生态环境的影响研究还需进一步完善。

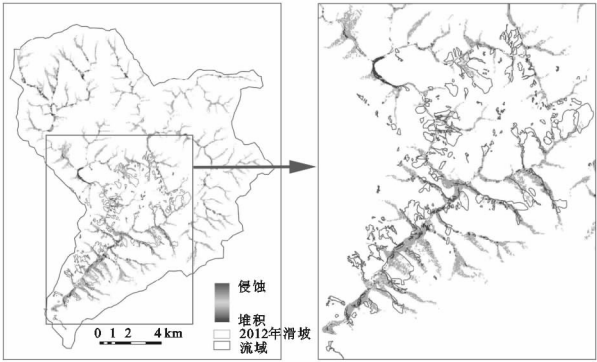


图 6 2013 年实际降雨过程(情景 6)下流域侵蚀堆积及滑坡分布

4 结论

(1) 震后流域产沙量对降雨强度有较高的敏感性,在不同极端降雨情景下,随着降雨强度的增加,流域出口产沙量和整个流域的总产沙量都呈现非线性的增长。在发生强降雨后,流域大量产沙会有一定的滞后作用,但随着极端降雨的持续,这种滞后作用便会减弱。流域出口产沙量在极端降雨情景下有明显的突变值,且突变程度随着极端降雨强度的增加而增强。在经历强降雨时间后,当流域再遭遇极端降雨事

件,流域出口产沙量同样会出现突变现象,且突变强度随着降雨强度的增加更加明显。

(2) 在空间上,流域侵蚀堆积过程主要发生在河道和沟谷地区以及遭受滑坡泥石流破坏的坡面区域。上游地区以侵蚀为主,下游地区的主河道堆积明显。随着降雨强度的增加以及极端降雨事件的增加,流域侵蚀堆积强度明显增加,影响范围也明显变大。特别是位于下游地区主河道堆积作用导致河道明显淤升,最大淤升高度可达5~6 m。河床淤升以及河道变宽孕育的后续的高位洪水给该流域下游河道附近的居民造成了更大的风险。从不同侵蚀堆积程度像元数统计分布来看,流域整体上处于物质平衡状态。且随着降雨强度的增加,整个分布峰度和偏度逐渐变小,侵蚀堆积程度较高的区域所占比例逐渐增加。流域出口流失的产沙量占整个流域的产沙量的比例逐渐减少,整个流域的堆积现象更加明显。

(3) 震后流域有些区域由于地表覆盖及植被破坏严重,在无滑坡泥石流灾害的上游地区和泥石流滑坡灾害严重的中下游地区水土流失程度有较大差别,流域上游地区由于地表植被条件良好,除了有地表径流的沟谷,其他区域的侵蚀堆积现象并不明显。而在下游地区由于地表植被破坏严重,坡面区域也发生大量的水土流失,且这些坡面区域大多位于滑坡泥石流附近。由于植被的破坏和退化,在不同极端降雨情景下震后产沙规律及侵蚀堆积空间分布格局也有所差异。

参考文献:

- [1] 陈晓清,李智广,崔鹏,等. 5·12汶川地震重灾区水土流失初步估算[J]. 山地学报, 2009, 27(1): 122-127.
- [2] Keefer D K. The importance of earthquake-induced landslides to long-term slope erosion and slope-failure hazards in seismically active regions[J]. *Geomorphology*, 1994, 10(1/4): 265-284.
- [3] Huang R, Li W. Post-earthquake landsliding and long-term impacts in the Wenchuan earthquake area, China [J]. *Engineering Geology*, 2014, 182: 111-120.
- [4] Qi L, Wang Z Y, Wang X. Erosion and sediment budget of the 2008 Wenchuan earthquake: A case study on Mianyan River basin[J]. *Natural Science*, 2012, 4(8): 640-647.
- [5] Chen J G, Chen X Q, Wang T, et al. Types and causes of debris flow damage to drainage channels in the Wenchuan earthquake area[J]. *Journal of Mountain Science*, 2014, 11(6): 1406-1419.
- [6] Wang J, Jin Z, Hilton R G, et al. Controls on fluvial evacuation of sediment from earthquake-triggered landslides[J]. *Geology*, 2015, 43(2): 115-118.
- [7] Yang W T, Wang M, Kerle N, et al. Analysis of changes in post-seismic landslide distribution and its effect on building reconstruction [J]. *Natural Hazards & Earth System Science*, 2015, 15(4): 817-825.

- [8] 李卫红,陈亚宁. 新亚欧大陆桥新疆沿线的孕灾环境及成灾过程分析[J]. *中国沙漠*, 2002, 22(1): 59-62.
- [9] 刘锋,付碧宏,杨顺虎. 龙门山地区类似2008年汶川大地震滑坡物质河流卸载时间的定量估算[J]. *地球物理学报*, 2013, 56(5): 1517-1525.
- [10] 曹叔尤,刘兴年,黄尔,等. 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: 工程科学版*, 2009, 41(3): 26-34.
- [11] 陈盼盼,胡利利,李亦秋,等. 龙门山地区水土流失敏感性评价及其空间分异[J]. *水土保持通报*, 2017, 37(3): 237-241.
- [12] 郑粉莉,刘峰,杨勤科,等. 土壤侵蚀预报模型研究进展[J]. *水土保持通报*, 2001, 21(6): 16-18.
- [13] 傅伯杰,汪西林. DEM在研究黄土丘陵沟壑区土壤侵蚀类型和过程中的应用[J]. *水土保持学报*, 1994, 8(3): 17-21.
- [14] 江忠善,王志强,刘志. 黄土丘陵区小流域土壤侵蚀空间变化定量研究[J]. *水土保持学报*, 1996, 10(1): 1-9.
- [15] Wiel M J V D, Coulthard T J, Macklin M G, et al. Embedding reach-scale fluvial dynamics within the CAESAR cellular automaton landscape evolution model [J]. *Geomorphology*, 2007, 90(3): 283-301.
- [16] Shennan I, Coulthard T, Flather R, et al. Integration of shelf evolution and river basin models to simulate Holocene sediment dynamics of the Humber Estuary during periods of sea-level change and variations in catchment sediment supply [J]. *Science of the Total Environment*, 2003, 314: 737-754.
- [17] Coulthard T J, Wiel M J V D. A cellular model of river meandering [J]. *Earth Surface Processes & Landforms*, 2010, 31(1): 123-132.
- [18] Pelletier J D. Persistent drainage migration in a numerical landscape evolution model [J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(20): 379-398.
- [19] Hancock, G. R, Coulthard, et al. An evaluation of landscape evolution models to simulate decadal and centennial scale soil erosion in grassland catchments[J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 398(3): 171-183.
- [20] Hancock G R, Coulthard T J. Channel movement and erosion response to rainfall variability in southeast Australia [J]. *Hydrological Processes*, 2012, 26(5): 663-673.
- [21] Hancock G R. Modelling stream sediment concentration: An assessment of enhanced rainfall and storm frequency [J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 430: 1-12.
- [22] Coulthard T J, Wiel M J V D. Modelling long term basin scale sediment connectivity, driven by spatial land use changes[J]. *Geomorphology*, 2017, 277: 265-281.
- [23] Hancock G R, Verdon-Kidd D, Lowry J B C. Sediment output from a post-mining catchment-Centennial impacts using stochastically generated rainfall [J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 544: 180-194.
- [24] Meadows T. Forecasting long-term sediment yield from the upper North Fork Toutle River, Mount St. Helens, USA [D]. East Midlands, UK: University of Nottingham, 2014.