

引用格式: 吴杰, 陈冠, 孟兴民, 黄逢春, 赵英萍. 白龙江流域滑坡降雨临界值[J]. 山地学报, 2022, 40(6): 875-886.

WU Jie, CHEN Guan, MENG Xingmin, HUANG Fengchun, ZHAO Yingping. Rainfall threshold of landslides in the bailong River basin, China [J]. Mountain Research, 2022, 40(6): 875-886.

白龙江流域滑坡降雨临界值

吴杰¹, 陈冠^{1,2,3*}, 孟兴民^{1,2,3}, 黄逢春¹, 赵英萍⁴

(1. 兰州大学 地质科学与矿产资源学院, 兰州 730000; 2. 甘肃省环境地质与灾害防治技术创新中心, 兰州 730000;
3. 甘肃省地质灾害野外科学观测研究站, 兰州 730000; 4. 甘肃省甘南州迭部县自然资源局, 甘肃 甘南 747000)

摘要: 白龙江流域是我国降雨型滑坡灾害最严重的区域之一, 雨季灾害多发, 严重威胁民众生命财产安全。通过研究滑坡和降雨的关系, 可以更为准确地预测区域内的滑坡。本研究针对地面降雨观测数据稀缺的白龙江流域, 基于滑坡编目和 TRMM 降雨数据, 构建了基于最佳时间尺度及考虑前期雨量的 $I-D$ 降雨阈值, 并探讨不同岩性、降雨雨型及大型地震对阈值曲线的影响。结果表明: (1) 基于近一次降雨事件的降雨阈值 $I = 2.673D^{-0.730}$ ($3\text{ h} \leq D \leq 195\text{ h}$), 其具有较高的准确性和可信度, 可用于短时连续降雨的滑坡预警; 基于 12 d 累积降雨历时的阈值 $I = 8.377D^{-0.878}$ ($3\text{ h} \leq D \leq 288\text{ h}$) 可用于长历时间断降雨的滑坡预警。(2) 岩性越坚硬的斜坡阈值越高, 具有软弱夹层的斜坡更易形成滑坡; 大型地震会破坏地质环境背景, 造成阈值曲线显著波动; 流域内滑坡产生主要受长历时中低强度降雨的驱动。研究结果表明通过卫星降雨数据构建滑坡降雨阈值具有可行性。本研究可为白龙江流域及类似数据稀缺地区滑坡的气象预警和风险控制提供参考。

关键词: TRMM; 滑坡; 降雨阈值; 气象预警; 白龙江流域

中图分类号: P694

文献标志码: A

亚洲的环青藏高原山区是世界降雨型滑坡主要分布区域之一^[1-2], 受气候变化的影响, 近年来区内极端降雨事件明显增多, 进一步加剧了滑坡灾害的风险。因此, 建立区域滑坡的降雨阈值模型, 为滑坡灾害的气象预警提供科学参考, 是青藏高原及其周边地区地质灾害防灾减灾的迫切需求。目前, 构建滑坡的降雨阈值主要有物理模型和经验模型两种方法。物理模型多基于滑坡发生的物理机制和过程, 在单点或小流域尺度上具有具有较高的精度, 然而其模型的构建通常需要较为详细的土水力学参数数据, 在区域尺度上存在明显的局限性^[3]。经验模型

在区域尺度上则具有更好的实用性且计算简便, 其中 $I-D$ 降雨阈值经验模型已在国内多个地区得到应用^[4-8]。经验模型对降雨数据的分辨率和精度要求较高。虽然当前气象、水利和自然资源等部门在青藏高原及其周边地区布设了一定数量的地面雨量站, 但受复杂地形和气象条件的影响, 相对于东南沿海和中部平原等地区, 降雨数据总体仍较为稀缺, 且地面站数据空间分辨率低, 时间序列不连续, 表现出强的时空不均匀性。TRMM 卫星具极高的时间分辨率, 目前在暴雨研究、预报模式数据同化等方面有广泛应用^[5], 研究表明该降雨数据总体是可靠的^[9-13]

收稿日期 (Received date): 2022-04-07; **改回日期** (Accepted date): 2022-12-30

基金项目 (Foundation item): 甘肃省科技重大专项计划项目 (19ZD2FA002); 第二次青藏高原综合科学考察研究专题 (2021QZKK0201); 甘肃省重点研发计划项目 (20YF8FA074)。[Science and Technology Major Project of Gansu Province (19ZD2FA002); The Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research Program (STEP) (2021QZKK0201); Key Research and Development Program of Gansu Province (20YF8FA074)]

作者简介 (Biography): 吴杰 (1998-), 男, 陕西商洛人, 硕士研究生, 主要研究方向: 环境遥感与地质灾害。[WU Jie (1998-), male, born in Shangluo, Shaanxi province, M. Sc. candidate, research on environmental remote sensing and geological hazards] E-mail: wuj21@lzu.edu.cn

*** 通讯作者** (Corresponding author): 陈冠 (1985-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 环境遥感与地质灾害。[CHEN Guan (1985-), male, Ph. D., associate professor, specialized in environmental remote sensing and geological hazards] E-mail: gchen@lzu.edu.cn

但在数据稀缺的高山峡谷区滑坡降雨阈值中的应用需开展进一步的探索。

白龙江流域地处青藏高原东南缘,是典型的高山峡谷区,流域内滑坡灾害频发、类型多样、形成机理复杂^[14-17],对区域内人民的生命财产安全造成了巨大威胁,严重制约了社会经济的可持续发展^[18]。白龙江流域关于滑坡降雨阈值的研究已取得了一定的进展。如有学者基于地面站降雨数据,考虑降雨特征、水分土壤状态的影响,建立了陇南地区降雨阈值^[19-20],也有学者考虑地震影响并结合历史降雨特征建立了甘肃省气象预警模型^[21],为区内滑坡灾害风险管理提供了重要支撑。然而,受区内地面降雨资料较为稀缺的影响,以上研究多针对短历时暴雨下的灾害预警,降雨和历史滑坡关系的分析也缺乏深入探讨^[22]。因此,亟需在深入探讨降雨特征对滑坡影响机制的基础上,利用高时间分辨率的降雨数据构建该区滑坡气象预警模型。

本研究在白龙江流域 2004—2019 年滑坡时间编目的基础上,结合 TRMM 降雨数据,分析滑坡时空分布特征,构建了滑坡降雨阈值模型,并探讨了不同岩性、降雨雨型以及大型地震对阈值曲线的影响,以期对白龙江流域及类似数据稀缺地区滑坡气象预警和风险防控提供科学参考。

1 研究区概况

白龙江流域地处我国第一、二级阶梯过渡地带,青藏高原、黄土高原、四川盆地交接处,地跨中国西北干旱区、青藏高寒区及东部季风区,河道穿行于高山峡谷区,地势从西北向东南急剧降低,发育有拱坝河、洋汤河等 49 条一级支流,总流域面积达 3.18 万 km²。流域内气候类型复杂多样:上游为温带湿润气候区,中游为暖温带湿润气候区,下游为北亚热带湿润气候区。降雨主要集中于 6—9 月,年降雨量存在明显的南北差异,北部年平均降雨量 400 ~ 700 mm;南部年平均降雨量 450 ~ 800 mm^[23-24]。

白龙江流域位于印度-亚洲板块碰撞带变形效应的东北缘,构造运动强烈,断裂、褶皱发育^[25]。地层岩性上属西秦岭地层区,主要出露前震旦系碧口群(Pzl)、志留系(S)、泥盆系(D)、石炭系(C)的灰

岩、变质碎屑岩、千枚岩、片岩等,侏罗系(J)、白垩系(K)、古近系和新近系(E、N)红色碎屑岩、泥岩,山间盆地和河流谷地普遍堆积第四系(Q)碎石土,部分地段分布黄土(Q²⁺³)^[14]。研究区为白龙江流域甘肃段,滑坡主要集中发育在中下游,地理位置见图 1。

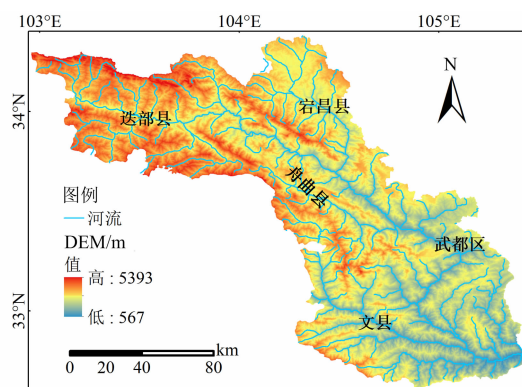


图 1 研究区位置图

Fig. 1 Location of study area

2 数据获取与研究方法

2.1 数据获取

通过新闻报道、调查报告、自然资源局数据和野外调查等途径编目研究区内 2004—2019 年有具体发生日期和地点信息的 85 次滑坡(表 1),基于时空信息提取滑坡发生 30 d 内的 TRMM 3B42 卫星降雨数据。

2.2 Caine I-D 降雨阈值模型

本研究采用当前广泛使用的 I-D 降雨阈值^[26-27],其幂函数关系式为:

$$I = \alpha \times D^{\beta} \quad (1)$$

式中, I 为降雨强度($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$); α 、 β 为计算得到的系数; D 为降雨历时(h)。

2.3 协方差

协方差可以用来衡量一个样本中两个变量组成的二维数据点集中数据的离散程度及变量相关性。设定某一样本中存在有 X 、 Y 两个变量。则协方差为:

$$\begin{aligned} \text{cov}(X, Y) &= E[(X - EX)(Y - EY)] \\ &= E(XY) - EX \cdot EY \end{aligned} \quad (2)$$

变量间的相关系数 ρ_{XY} 为:

$$\rho_{XY} = \frac{\text{cov}(X, Y)}{\sqrt{DX} \sqrt{DY}} \quad (-1 \leq \rho_{XY} \leq 1) \quad (3)$$

表 1 2004—2019 年白龙江流域滑坡列表

Tab. 1 List of Landslides in Bailong River Basin from 2004 to 2019

时间	经纬度	地理位置	时间	经纬度	地理位置
2004-8-13	103.840°E, 33.990°N	迭部县旺藏镇(S313+93)	2017-5-14	105.089°E, 33.478°N	武都区安化镇任家山村
2004-9-21	104.370°E, 33.779°N	舟曲县城区桥头	2017-6-21	105.092°E, 33.477°N	武都区米仓山
2004-9-21	104.450°E, 34.010°N	宕昌县甘江头乡(K325+900)	2017-8-7	104.927°E, 33.395°N	武都区城关镇西关上
2004-9-21	104.513°E, 33.741°N	舟曲县南峪乡江顶崖	2017-8-7	105.011°E, 33.513°N	武都区柏林镇
2004-9-21	104.790°E, 33.410°N	武都区两水镇土门	2017-8-7	105.012°E, 33.514°N	武都区柏林镇浩家沟
2005-5-28	104.224°E, 34.237°N	宕昌县哈达铺镇	2017-10-24	105.010°E, 33.351°N	武都区汉王镇
2005-5-28	104.237°E, 34.209°N	宕昌县哈达铺镇	2018-4-25	105.073°E, 33.414°N	武都区龙凤乡大阳山村
2005-7-2	103.569°E, 33.961°N	迭部县尼傲乡(S313+121)	2018-5-7	104.435°E, 33.099°N	文县石鸡坝镇阴平寨村
2006-5-6	104.917°E, 33.057°N	文县临江镇羊儿坝村	2018-6-6	104.470°E, 33.993°N	宕昌县新城子乡拉界村
2006-5-6	104.935°E, 33.073°N	文县临江镇	2018-6-6	104.452°E, 34.002°N	宕昌县新城子乡老树川村
2006-7-23	103.680°E, 33.947°N	迭部县旺藏镇九龙峡隧道	2018-6-6	104.977°E, 33.363°N	武都区汉王镇杨家坝
2006-7-23	103.139°E, 34.192°N	迭部县益哇镇傲子沟公路	2018-6-7	104.343°E, 33.622°N	舟曲县武坪镇河那村
2006-7-23	103.638°E, 33.950°N	迭部县旺藏镇(S313线 K114)	2018-6-7	104.430°E, 33.748°N	舟曲县南峪乡
2006-8-3	103.209°E, 34.060°N	迭部县电尕镇镇政府	2018-6-7	104.488°E, 33.972°N	宕昌县临江铺镇白杨坝
2007-8-14	103.153°E, 34.242°N	迭部县江迭公路尼扎段	2018-6-27	104.745°E, 33.576°N	武都区蒲池乡乱安子村
2008-2-28	105.161°E, 33.339°N	武都区郭河乡下成村阳坡	2018-6-30	104.640°E, 33.103°N	文县堡子坝镇堡子坪村
2008-5-18	104.244°E, 33.793°N	宕昌县狮子乡阴山村	2018-6-30	104.974°E, 32.967°N	文县堡子坝镇陶家坝村
2008-7-20	104.999°E, 33.244°N	武都区磨坝乡	2018-6-30	104.618°E, 32.976°N	文县堡子坝镇朱家台村
2008-7-20	105.003°E, 33.243°N	武都区磨坝乡	2018-6-30	104.648°E, 33.109°N	文县堡子坝镇八字河村
2009-10-8	104.908°E, 33.464°N	武都区汉林镇	2018-6-30	104.633°E, 33.145°N	文县堡子坝镇季家堡村
2010-8-12	104.934°E, 33.391°N	武都区城关镇清水沟	2018-6-30	104.661°E, 33.160°N	文县堡子坝镇排坊村
2010-8-12	104.935°E, 33.388°N	武都区城关镇清水沟	2018-7-3	104.761°E, 33.453°N	武都区石门镇下白杨村
2010-10-7	104.366°E, 33.784°N	舟曲县后坝村雷崖石	2018-7-9	104.404°E, 34.040°N	宕昌县财政局
2010-10-7	104.449°E, 34.010°N	宕昌县新城子乡	2018-7-11	105.154°E, 33.360°N	武都区郭河乡郭河村上河社
2010-10-10	104.194°E, 33.857°N	舟曲县慈班镇(S313+69)	2018-7-11	104.669°E, 33.688°N	宕昌县新寨乡历志坝村
2011-7-9	104.865°E, 33.473°N	武都区蒲池乡巩家村	2018-7-11	104.658°E, 33.653°N	宕昌县新寨乡远坝村
2011-9-22	104.530°E, 33.774°N	宕昌县官亭镇仇家山村	2018-7-11	104.674°E, 33.691°N	宕昌县新寨乡王家山村
2011-9-22	104.977°E, 33.363°N	武都区汉王镇杨家坝	2018-7-11	104.338°E, 34.193°N	宕昌县理川镇菜地村
2012-5-11	104.642°E, 33.529°N	武都区角弓镇构林坪村	2018-7-11	104.604°E, 33.682°N	宕昌县沙湾镇赵家坡村
2012-8-8	104.922°E, 33.456°N	武都区马街镇	2018-8-16	104.419°E, 33.222°N	文县中寨镇
2012-8-8	105.104°E, 33.480°N	江武公路(S205线, K157+20)	2018-8-16	104.415°E, 33.158°N	文县中寨镇马营村
2012-9-12	104.544°E, 33.860°N	宕昌县官亭镇邓桥村	2018-8-16	104.917°E, 33.415°N	武都区城关镇石家庄村
2013-6-29	104.880°E, 32.848°N	文县尚德镇瓦窑坡	2018-8-16	104.917°E, 33.415°N	武都区城关镇石家庄村
2013-7-1	105.189°E, 32.771°N	文县碧口镇井地村	2018-9-13	104.138°E, 33.874°N	舟曲县慈班镇果者村
2013-7-8	105.317°E, 32.749°N	文县中庙镇肖家坝	2019-4-22	105.163°E, 33.313°N	武都区三河镇马河村
2013-7-9	105.419°E, 32.782°N	文县中庙镇余家湾村	2019-6-30	104.632°E, 33.091°N	文县堡子坝镇何家坝
2013-7-9	105.378°E, 32.772°N	文县中庙镇	2019-8-9	104.953°E, 33.438°N	武都区马街镇河上面村
2013-7-12	104.979°E, 33.361°N	武都区东江成达燃气站	2019-8-14	104.435°E, 33.089°N	文县石鸡坝镇种树坪村
2013-7-12	104.983°E, 32.847°N	文县马家沟小学背后滑坡	2019-9-12	105.308°E, 33.150°N	武都区琵琶镇孟家磨
2013-7-16	104.997°E, 32.847°N	文县玉垒乡马家沟	2019-9-15	104.772°E, 32.837°N	文县丹堡镇丰元坡村
2014-4-11	105.159°E, 33.300°N	武都区三河镇	2019-10-16	104.392°E, 34.087°N	宕昌县贾河乡哈当
2014-7-31	104.824°E, 33.448°N	武都区两水镇	2019-10-16	104.483°E, 33.731°N	舟曲县东山镇辽东村
2016-8-10	105.208°E, 32.769°N	文县碧口镇石土地村			

3 滑坡时空分布及 TRMM 精度验证

3.1 滑坡的时空分布特征

分析编目的 85 次滑坡的时空分布信息(区域典型降雨型滑坡见图 2),在时间上,流域的滑坡在 5—10 月多发,夏季的 6—8 月份最多(65.88%),发生在冬季的滑坡相对较少,与流域年降雨量的分布特点一致(图 3)。

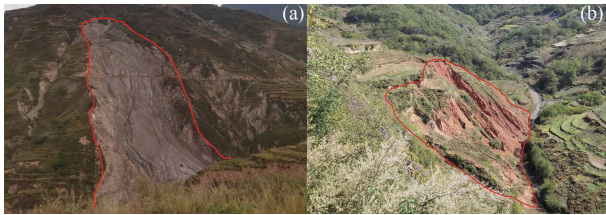


图 2 区域内典型降雨型滑坡:

(a) 陇南市枸林坪;(b) 陇南市甘家沟

Fig. 2 Typical rainfall landslides in the region:

(a) Gulinping, Longnan city ; (b) Ganjiagou, Longnan city

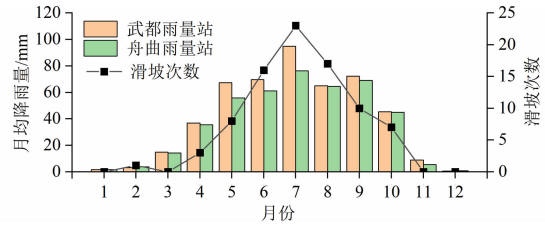


图 3 滑坡月分布及代表雨量站月均降雨量

Fig. 3 Monthly distribution of landslides and average rainfall of Zhouqu and Wudu rainfall stations

将滑坡空间分布与地形、地质(含构造)、水文等要素的关系进行分析(图 4),白龙江流域滑坡集中发生于 1000 ~ 2000 m 的中低山区域(84.71%),坡度范围 10° ~ 35°(67.06%),以南、东南、西南方向及西坡向为主(70.59%);滑坡条带状分布在白龙江两岸及支流附近,在中游武都舟曲一带密集分布;77% 的滑坡距离构造 2 km 以内,与构造整体走向一致。多因素耦合作用共同决定了流域内滑坡的时空分布格局。

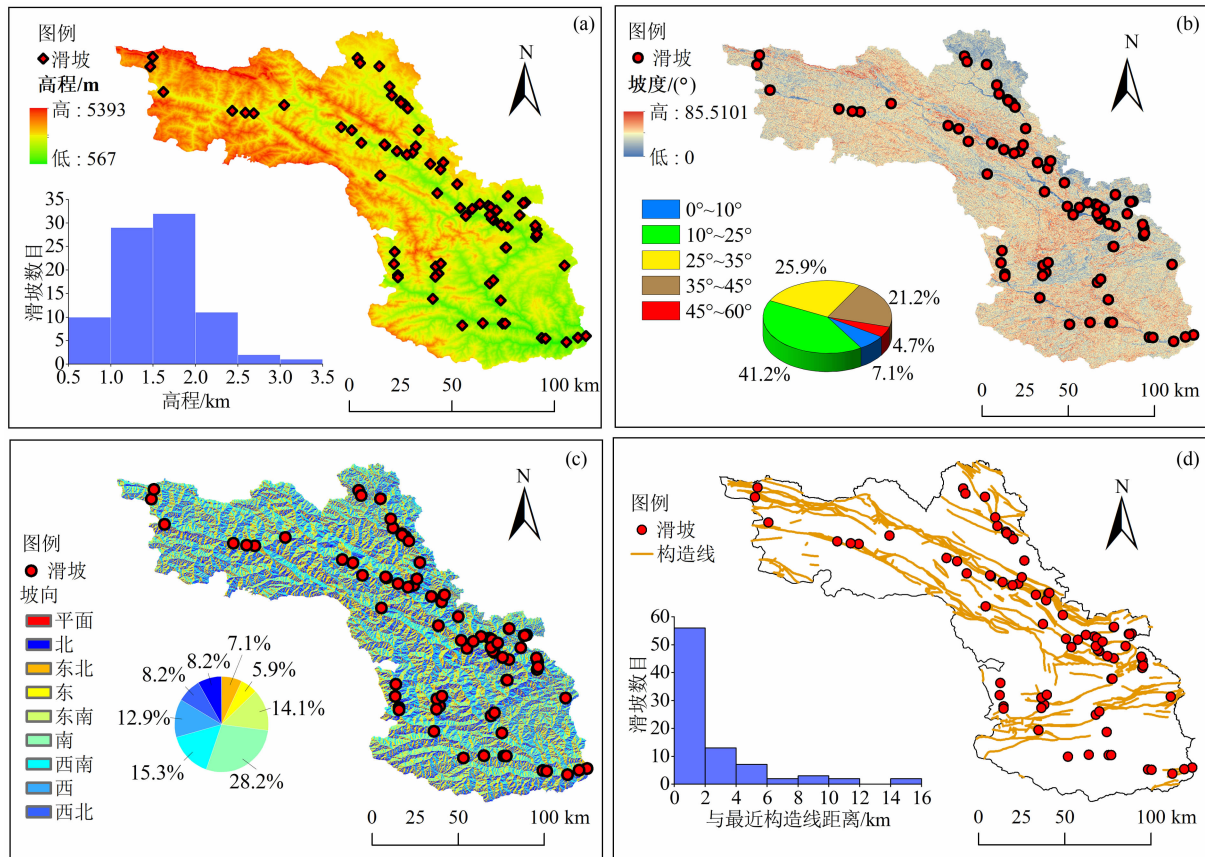


图 4 研究区地质背景图及滑坡分布:(a) 高程;(b) 坡度;(c) 坡向;(d) 主要构造线

Fig. 4 Geological background and landslide distribution map of study area;

(a) elevation; (b) slope; (c) aspect; (d) main structural line

3.2 TRMM 数据精度验证

TRMM 数据时间分辨率为 3 h, 空间分辨率为 0.25° , 全球覆盖范围为 $-180^\circ\text{W} \sim 180^\circ\text{E}$, $-50^\circ\text{S} \sim 50^\circ\text{N}$, 研究区位于 $32^\circ\text{N} \sim 34^\circ\text{N}$, 数据可完全覆盖。研究表明长江流域多年平均降水总量呈东高西低趋势, TRMM 能较好地反映长江流域降水的空间分布特征, 对反映长江上游高原高海拔地区年、月、日尺度降水有较高精度^[11,13]。对比 2004—2019 年 TRMM 与舟曲、武都雨量站逐年月降雨量(图 5), 验证其在白龙江流域的应用精度。

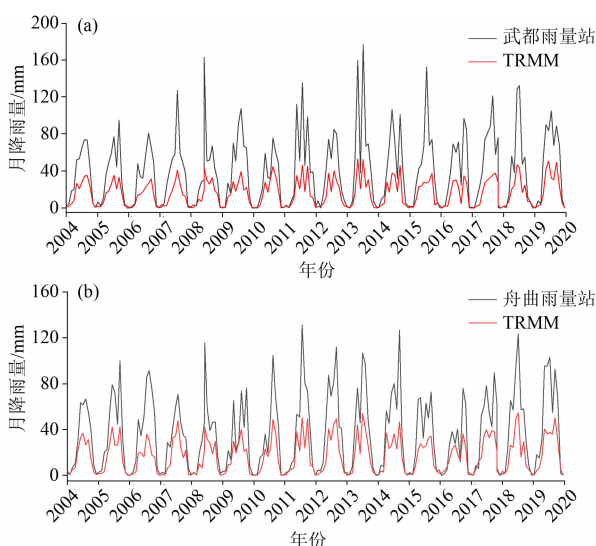


图 5 2004—2019 年舟曲、武都雨量站与 TRMM 月降雨量

Fig. 5 Monthly rainfall of TRMM and rainfall stations in Zhouqu and Wudu from 2004 to 2019

TRMM 数据变化趋势与舟曲、武都雨量站基本一致, 降雨主要分布在 5—10 月。整体上 TRMM 卫星降雨数据偏低, 非汛期差异较小。而 TRMM 对于强降雨、区域性降雨的刻画受限于雷达信号和测雨分辨率^[11-12], 研究区地形起伏大, 两种数据的时空尺度不同可能是差异的主要来源。另外, 地物杂波及地表回波的存在、电磁波传播过程中大气气体作用及星载降水雷达系统参数的选取、信号处理方法的选取等都会带来卫星降雨数据的误差^[28]。

两种降雨数据拟合得到关系式:

$$E_a = 2.32E_T - 3.39 \quad (R^2 = 0.86) \quad (4)$$

$$E_b = 2.89E_T - 5.86 \quad (R^2 = 0.85) \quad (5)$$

式中, E_a 为舟曲雨量站降雨量 (mm); E_b 为武都雨

量站降雨量 (mm); E_T 为 TRMM 卫星降雨量 (mm)。

相对于雨量站数据, 卫星数据更加密集均匀, 但其常具有一定的滞后性, 通过代表性雨量站的数据建立雨量站与卫星数据的关系, 一定程度上可降低数据间误差。通过卫星降雨数据建立降雨阈值曲线, 再利用关系式可推导适用于雨量站数据进行滑坡预测的阈值曲线。

综合来看, TRMM 卫星数据整体精度较高^[13], 能较好反映降雨空间分布特征和时间变化趋势, 可用于建立白龙江流域降雨阈值。

4 降雨阈值曲线分析

4.1 基于最佳时间尺度

考虑同一时间邻近区域滑坡影响, 定义同一时间卫星最小分辨率单元内的多次滑坡为一次滑坡事件, 编目的 85 次滑坡中 74 次滑坡 (65 次滑坡事件) 用于构建阈值曲线, 余下 11 次滑坡 (5 次滑坡事件) 用于结果验证。

考虑降雨的不均匀性和不连续性, 借鉴周伟修正后的詹氏法^[29]以及赵衡在研究鄂西阈值的方法^[4], 定义 D 为降雨历时, E_i 为累积降雨量 (i 为滑坡前降雨的某一时刻), 当 $E_i \geq 1 \text{ mm}$ 时, 将时刻 i 作为 D 的起始时间, 滑坡发生时间作为 D 的结束时间。基于研究区年蒸发能力约为降雨量的 3 倍^[23]的考虑, 为确定表征滑坡事件与降雨关系的最佳累积降雨时间尺度, 选取 1 ~ 15 d 共连续 15 个时间尺度。

当累计降雨时间为 12 d 时, 协方差和相关系数均达到最大值 (图 6), 数据的离散程度最低, 相关性最好。以 12 d 的降雨数据在双对数坐标中采用频数法拟合 (图 7), 得到 50% 频率发生滑坡的降雨阈值为 $I = 8.377D^{-0.878}$ ($3 \text{ h} \leq D \leq 288 \text{ h}$), 下边界阈值为 $I = 1.405D^{-0.878}$ ($3 \text{ h} \leq D \leq 288 \text{ h}$)。其中降雨历

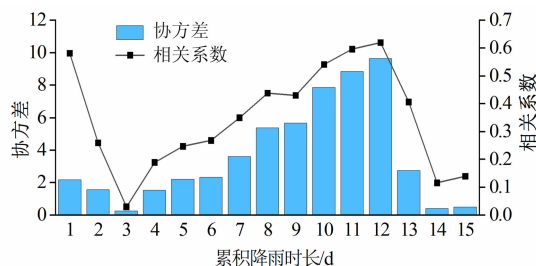


图 6 不同时间尺度下协方差及相关系数

Fig. 6 Covariance and correlation coefficients at different time scales

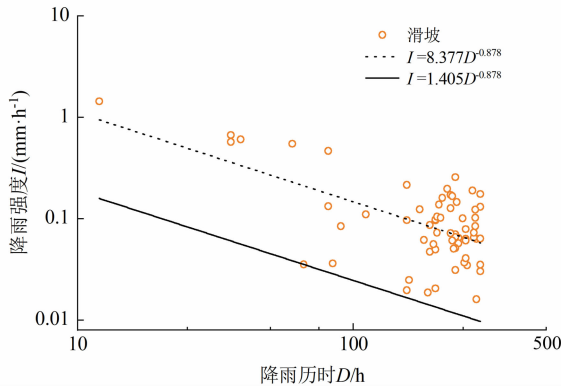


图 7 12 d 累积降雨量时间尺度 I - D 降雨阈值曲线
Fig. 7 12-day accumulated rainfall time scale I - D rainfall threshold curve

时范围的最大值受限于选择的时间尺度。

4.2 考虑前期降雨的阈值曲线

综合已有研究,将近一次降雨事件定义为:若滑坡事件前三天内存在降雨,以此时间向前一天为间隔的连续性降雨过程。其中 $E_i \geq 1$ mm 时,时刻 i 为降雨历时 D 的起始时间^[29]。提取参数作图以频数法拟合得 50% 频率发生滑坡的降雨阈值为 $I = 2.673D^{-0.730}$ ($3 \text{ h} \leq D \leq 195 \text{ h}$),下边界阈值为 $I = 0.388D^{-0.730}$ ($3 \text{ h} \leq D \leq 195 \text{ h}$) (图 8)。降雨历时范围最大值受限于滑坡样本对应降雨过程历时的最大值。

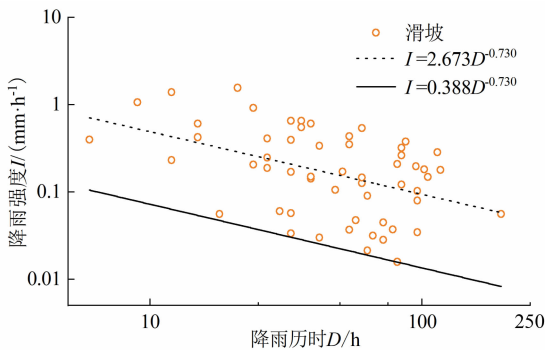


图 8 基于近一次降雨事件 I - D 阈值曲线
Fig. 8 I - D threshold curve based on the recent rainfall event

4.3 降雨阈值模型结果验证

选择已编目滑坡中 2018 年 6—7 月份的 11 次滑坡,验证上述两种阈值曲线预测滑坡的准确性 (图 9)。基于 12 d 累积降雨时长的 50% 频率阈值曲线 $I = 8.377D^{-0.878}$ 准确率达 60%,下边界阈值准确率为 100%。基于近一次降雨事件建立的 50% 频

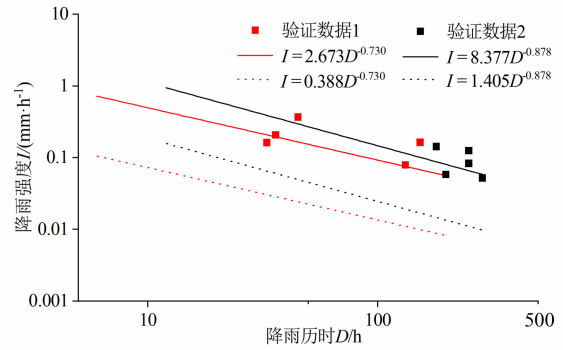


图 9 降雨阈值结果验证
Fig. 9 Rainfall threshold verification results

率阈值曲线 $I = 2.673D^{-0.730}$ 预测准确率为 80%,下边界阈值可全部预测。

2020 年 8 月陇南连续出现暴雨天气,短期内暴雨场次多、强度大、范围广、持续时间长,导致文县、宕昌等区域产生了大量崩滑流灾害,通过部分雨量站的降雨数据再次对结果进行验证。

以 12 d 累积降雨历时计算得到的阈值 $I = 8.377D^{-0.878}$ 和近一次降雨事件下建立的降雨阈值 $I = 2.673D^{-0.730}$ 进行验证,综合武都、舟曲雨量站与 TRMM 数据之间建立的关系式 (4) 和 (5),得上述两种阈值 E - D 阈值曲线的关系式为 $E_1 = 21.82D^{0.122} - 4.625$ (12 d)、 $E_2 = 6.96D^{0.270} - 4.625$ (近一次降雨事件),计算对应历时的临界累计雨量如表 2 所示。

表 2 不同降雨历时下对应临界累计雨量

Tab. 2 Corresponding critical cumulative rainfall under different rainfall durations

降雨历时 D /h	临界雨量 E_1 /mm	临界雨量 E_2 /mm
24	27.53	11.79
48	30.37	15.17
72	32.14	17.47
120	34.51	20.75
240	37.96	25.96
360	40.12	29.50

通过相关报道,获得 8 月 11 日的日降雨量文县 60.70 mm,宕昌 44.60 mm,8 月 17 日文县日降雨量 93.20 mm。均满足两种阈值的临界雨量,经转换的阈值采用雨量站数据进行滑坡预警,具较高的准确性。

5 阈值曲线影响因素分析

5.1 岩性

不同岩性具有不同的强度、抗风化能力和均一性,可反映斜坡工程地质性质^[16,30],按赵岩^[31]的方法将白龙江流域内岩性分为六种类型(图10)。

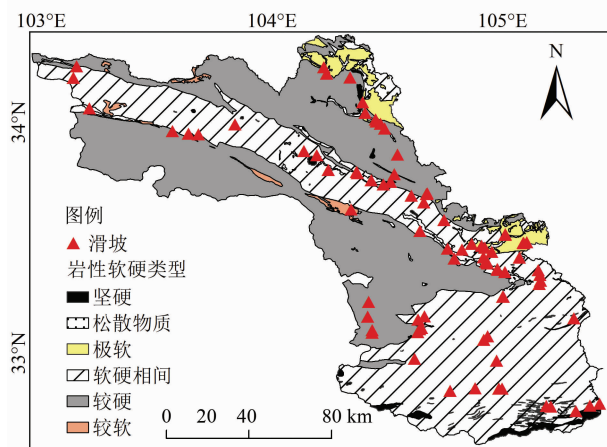


图10 白龙江流域岩性软硬类型分布

Fig. 10 Type distribution of lithology hardness in Bailong River Basin

(坚硬:岩浆岩;较硬:层状碳酸盐岩;软硬相间:层状变质岩、层状碳酸盐岩、层状碎屑岩的组合;较软:层状碎屑岩;极软:层状碎屑岩;松散物质:第四系卵石、砾石、粉质粘土)

根据结果以松散物质、极软、软硬相间和较硬四种主要类型构建阈值。基于近一次降雨事件下不同岩性软硬类型的阈值(图11)分别为:极软 $I = 0.640D^{-0.73}$;较硬 $I = 0.677D^{-0.73}$;软硬相间 $I = 0.388D^{-0.73}$;松散物质 $I = 0.460D^{-0.73}$ 。

软硬相间类型阈值最低,原因是区域内以砂岩、板岩、千枚岩、灰岩等及其组合为主的岩层中常含软弱夹层,构造应力易集中于软硬岩的交界或软岩内部层理面性质差异部位,在上下层应力作用下剪切变形,形成层间剪切带,加之溶蚀、水化、淋滤等物化作用影响,演化为滑带^[32],在降雨作用下诱发滑坡。

岩性较硬的阈值最高,松散物质与极软类型的次之。较硬类型以石灰岩为主,强度较高,常难以形成滑坡。松散物质和极软类型常为广布的残坡积物和黄土,残坡积物结构松散、渗透性好,与下伏基岩性质差异较大时,雨水渗透至接触界面形成滞水带,使接触带物质孔隙水压力增加、基质吸力降低,坡体

抗剪强度降低,接触带土体迅速泥化诱发滑坡。黄土结构松散,具有湿陷性,加之垂直节理、落水洞发育,极易发生层内滑坡或基覆界面滑坡^[17]。这两类斜坡往往植被较好,利于坡面汇流,且发育利于水分排泄的优势通道,因而诱发滑坡的降雨条件相对较高。

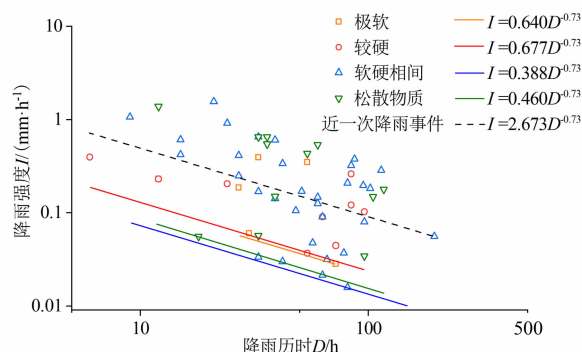


图11 基于近一次降雨事件下不同岩性软硬类型的降雨阈值

Fig. 11 Rainfall thresholds based on different lithological hard and soft types under a recent rainfall event

5.2 降雨特征

根据12 d的过程降雨数据,按照主要降雨发生时间和平均强度可分为前峰型、多峰型和后峰型三类,按总累积雨量 E_i 划分为小于10 mm、10 ~ 20 mm、大于20 mm三类。

将85次滑坡对应的降雨过程按以上两种标准分类(图12),分别建立阈值,图13显示:总累积雨量大小决定阈值下边界,数据在100 ~ 300 h历时集中分布,以前峰型和多峰型降雨为主。后峰型降雨在整个时段均有分布,在0 ~ 48 h的历时范围零星分布且雨强较大,说明短时强降雨下也易诱发滑坡。区域内滑坡产生以长历时中低强度降雨为主要驱动雨型,伴随部分短时强降雨。

5.3 地震效应

统计滑坡时间信息,以2008年汶川地震及2017年九寨沟地震两次临近大型地震时间为界限,分为两次地震前后四个时期,分别计算整体阈值(图14)。

地震发生后会导致关系式的 α 显著增大、 β 减小、阈值曲线斜率减小,区域内降雨强度变化梯度增大。地震特别是汶川地震后,降雨导致滑坡产生整体所需历时显著减小且集中分布(图15a),在同一

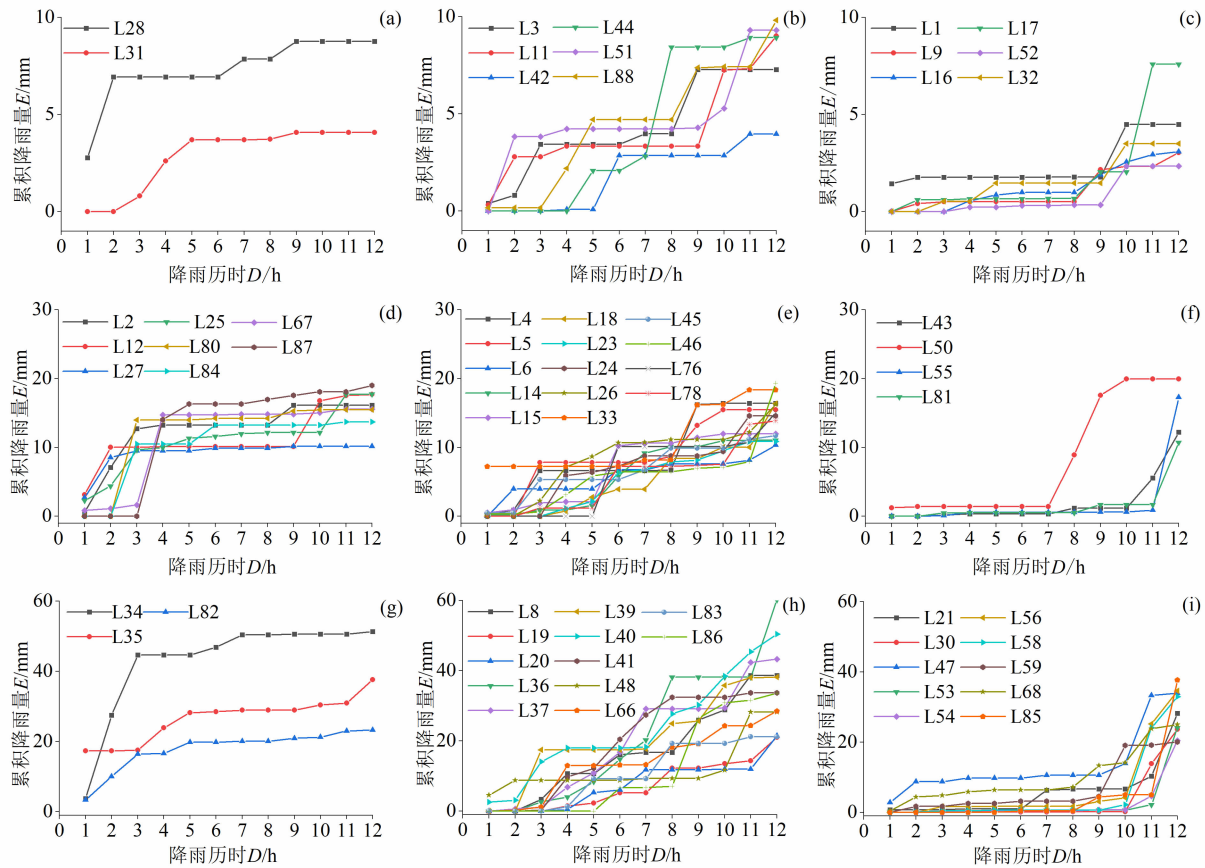


图 12 降雨类型划分结果：

(a) 前峰型, $E_i < 10$ mm; (b) 多峰型, $E_i < 10$ mm; (c) 后峰型, $E_i < 10$ mm; (d) 前峰型, $10 \text{ mm} \leq E_i \leq 20 \text{ mm}$; (e) 多峰型, $10 \text{ mm} \leq E_i \leq 20 \text{ mm}$; (f) 后峰型, $10 \text{ mm} \leq E_i \leq 20 \text{ mm}$; (g) 前峰型, $E_i > 20$ mm; (h) 多峰型, $E_i > 20$ mm; (i) 后峰型, $E_i > 20$ mm

Fig. 12 Rainfall type division results:

(a) front-peak, $E_i < 10$ mm; (b) multi-peak, $E_i < 10$ mm; (c) back-peak, $E_i < 10$ mm; (d) front-peak, $10 \text{ mm} \leq E_i \leq 20 \text{ mm}$; (e) multi-peak, $10 \text{ mm} \leq E_i \leq 20 \text{ mm}$; (f) back-peak, $10 \text{ mm} \leq E_i \leq 20 \text{ mm}$; (g) front-peak, $E_i > 20$ mm; (h) multi-peak, $E_i > 20$ mm; (i) back-peak, $E_i > 20$ mm
(其中 L_n ($1 \leq n \leq 85$) 为所编目滑坡的编号)

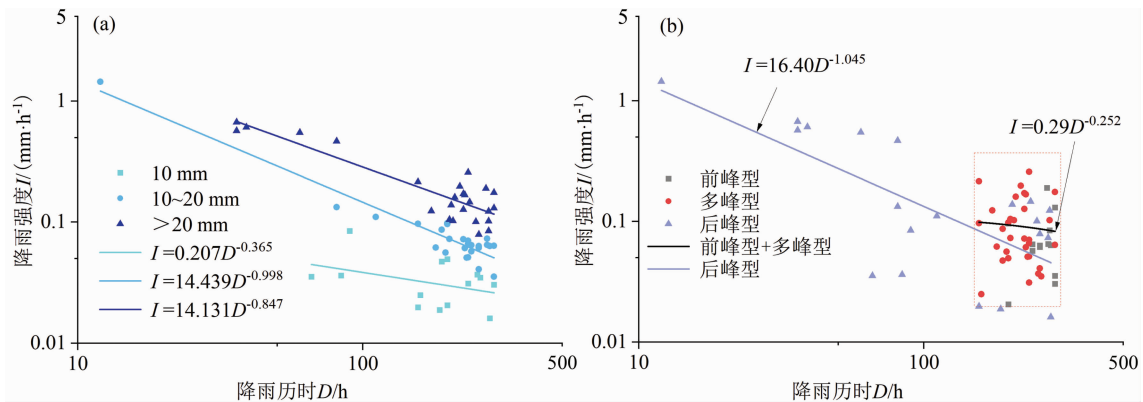


图 13 不同累积雨量和降雨雨型下的阈值：(a) 累积雨量；(b) 降雨雨型

Fig. 13 Thresholds under different accumulative rainfall and rainfall patterns:

(a) accumulative rainfall ; (b) rainfall patterns

雨强(图 14)下诱发滑坡产生所需降雨历时变短,但雨强更加分散(图 15b),不同雨强均可能诱发滑坡。

相对震前,数据在短历时出现分布,说明相同程度的短时强降雨对坡体稳定性影响在震后增强。

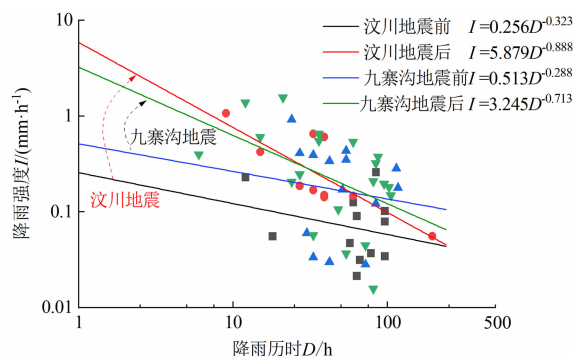


图 14 两次大型地震前后的阈值变化

Fig. 14 Threshold changes before and after two large earthquakes

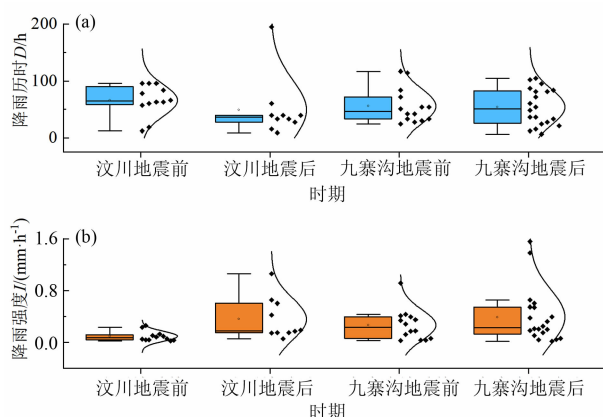


图 15 地震前后滑坡的降雨历时与强度箱线图、正态曲线图

Fig. 15 Boxplot and normal curve of rainfall duration and intensity before and after earthquakes

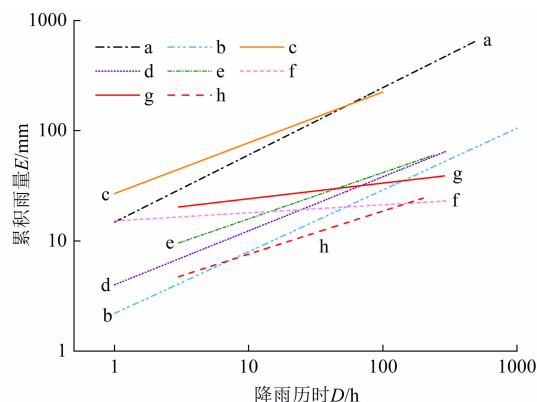
地震主要造成岩体的拉张破坏和结构面破坏^[33]。地震使山体震裂松动,在风化作用影响下岩体破碎,形成裂缝,为滑坡形成提供结构基础^[34],持续性降雨的浸润、饱和下更易失稳,降低了诱发滑坡所需降雨条件。九寨沟地震整体阈值波动更小,首先,汶川地震的影响尚还存在,滑坡活动仍处于自我调节期阶段^[35],其次,九寨沟地震震级低,释放能量对地质环境的破坏程度更小。综上,地震使得阈值整体降低,在震后一段时期内,阈值曲线会逐渐恢复至震前水平。

6 讨论

对比基于 12 d 累积降雨历时和近一次降雨事件得到的 $E-D$ 阈值曲线与其他地区的阈值(图 16),两种降雨阈值整体低于 GUZZETTI^[27] 建立的全球阈值, $E_1 = 21.82D^{0.122} - 4.625$ 整体趋势与四川省^[5] 较

为相近, $E_2 = 6.96D^{0.270} - 4.625$ 与天水^[8] 趋势一致。较低的可能原因是区域内断层发育,构造运动活跃,第四纪沉积物广布,地形陡变,为滑坡形成提供了有利条件,TRMM 卫星降雨精度也有一定影响。

白世彪^[20] 通过土壤水分平衡模型建立了武都区降雨阈值,当其前期雨量为 0 mm 时,当日降雨量达到 16.00 mm 时,滑坡发生概率为 50%,而基于 12 d 累积降雨历时和近一次降雨事件的 50% 概率阈值的日临界降雨量分别为 27.53 mm 和 11.79 mm,后者数值更为接近,并且考虑了连续降雨过程,更符合真实趋势,可用于短时连续降雨的滑坡灾害气象预警。但这里仅考虑了日降雨量,基于 12 d 累积降雨历时的阈值在长历时降雨过程的滑坡临灾预警中应有更好的表现。

图 16 不同地区 $I-D$ 降雨阈值转化为 $E-D$ 阈值后的对比Fig. 16 Comparison of $I-D$ rainfall thresholds in different regions after conversion to $E-D$ thresholds

(a: 全球 1^[26], $E = 14.82 \times D^{0.61}$; b: 全球 2^[27], $E = 2.2 \times D^{0.56}$; c: 浙江省^[36], $E = 26.9163 \times D^{0.461}$; d: 鄂西^[4], $E = 4.0 \times D^{0.49}$; e: 天水^[8], $E = 6.03 \times D^{0.42}$; f: 四川省^[5], $E = 15.207 \times D^{0.073}$; g: 12 d 累积降雨历时, $E_1 = 21.82D^{0.122} - 4.625$; h: 近一次降雨事件, $E_2 = 6.96D^{0.270} - 4.625$)

本研究中获取数据的来源有限,随着后续数据的不断完善,阈值的准确性会进一步提高。通过降尺度等方法可以进一步提高卫星降雨数据的精度。研究中并未考虑非导致滑坡降雨事件及其他影响因素,如滑坡的坡体结构、植被及构造作用等,将是进一步开展降雨阈值研究需要关注的重点。

7 结论与展望

本文通过滑坡编目,结合当前精度较高的 TRMM 数据,构建了白龙江流域滑坡降雨阈值,并从

岩性、降雨特征、地震效应等角度分析了对阈值的影响,主要结论如下:

(1)白龙江流域滑坡雨季多发,滑坡发育受大小构造控制作用明显,河流发育特征也有一定控制作用。

(2)基于 12 d 累积降雨历时的降雨阈值为 $I = 8.377D^{-0.878}$ ($3\text{ h} \leq D \leq 288\text{ h}$), 基于近一次降雨事件的阈值为 $I = 2.673D^{-0.730}$ ($3\text{ h} \leq D \leq 195\text{ h}$), 分别适用于区域滑坡灾害的短期和长期预警。不同岩性的斜坡阈值存在差异,大型地震整体上降低诱发滑坡的降雨条件,长历时中低强度降雨是诱发区域滑坡的主要雨型,但震后短历时强降雨的影响会增强。

(3)基于卫星数据计算的降雨阈值,经卫星与雨量站的数据拟合公式进行转换,可为白龙江流域的滑坡气象预警提供参考,为类似降雨数据稀缺地区阈值的构建提供了思路和方法。

参考文献 (References)

- [1] KIRSCHBAUM D, STANLEY T. Satellite-based assessment of rainfall-triggered landslide hazard for situational awareness [J]. *Earth's Future*, 2018, **6** (3): 505 – 523. DOI: 10.1002/2017EF000715
- [2] EMBERSON R, KIRSCHBAUM D, STANLEY T. New global characterization of landslide exposure [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2020, **20**: 3413 – 3424. DOI: 10.5194/nhess-20-3413-2020
- [3] YANG Hongjuan, WEI Fangqiang, MA Zhenfeng, et al. Rainfall threshold for landslide activity in Dazhou, southwest China [J]. *Landslides*, 2020, **17** (1): 61 – 77. DOI: 10.1007/s10346-019-01270-z
- [4] 赵衡, 宋二祥. 诱发区域性滑坡的降雨阈值[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2011, **41** (5): 1481 – 1487. [ZHAO Heng, SONG Erxiang. Rainfall thresholds for regional landslides [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2011, **41** (5): 1481 – 1487] DOI: 10.13278/j.cnki.jjuese.2011.05.004
- [5] 沈玲玲, 刘连友, 杨文涛, 等. 基于 TRMM 降雨数据的四川省地质灾害降雨阈值分析[J]. 灾害学, 2015, **30** (2): 220 – 227. [SHEN Lingling, LIU Lianyou, YANG Wentao, et al. Rainfall threshold analysis for the initiation of geological disasters in Sichuan province based on TRMM data [J]. *Journal of Catastrophology*, 2015, **30** (2): 220 – 227] DOI: 10.3969/j.issn.1000-811X.2015.02.041
- [6] 戴丛蕊, 黄玮, 李蒙, 等. 云南降雨型滑坡县级预警雨量阈值分析[J]. 气象科技, 2015, **43** (4): 675 – 680. [DAI Congrui, HUANG Wei, LI Meng, et al. County-level rainfall warning thresholds for rainfall-induced landslides in Yunnan [J]. *Meteorological Science and Technology*, 2015, **43** (4): 675 – 680] DOI: 10.19517/j.1671-6345.2015.04.019
- [7] 赵海燕, 殷坤龙, 陈丽霞, 等. 基于有效降雨阈值的澧源镇滑坡灾害危险性分析[J]. 地质科技通报, 2020, **39** (4): 85 – 93. [ZHAO Haiyan, YIN Kunlong, CHEN Lixia, et al. Landslide hazard analysis of Liyuan town based on effective rainfall threshold [J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2020, **39** (4): 85 – 93] DOI: 10.19509/j.cnki.dzkg.2020.0431
- [8] 丛佳伟. 天水地区降雨型滑坡的降雨阈值研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2020: 1 – 51. [CONG Jiawei. Rainfall threshold research of rainfall-induced landslides in Tianshui area [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2020: 1 – 51] DOI: 10.27204/d.cnki.glzhu.2020.003503
- [9] 韦芬芬, 汤剑平, 惠品宏. 基于雨量计的高分辨率格点降水数据与 TRMM 卫星反演降水数据在亚洲区域的比较[J]. 南京大学学报(自然科学版), 2013, **49** (3): 320 – 330. [WEI Fenfen, TANG Jianping, HUI Pinhong. Comparing high-resolution rain gauge-based precipitation data with satellite rainfall estimates of TRMM 3B42 over Asia [J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 2013, **49** (3): 320 – 330] DOI: 10.13232/j.cnki.jnju.2013.03.009
- [10] 高洁. 基于 TRMM 卫星数据的降雨测量精度评价[J]. 水力发电, 2015, **41** (6): 28 – 31. [GAO Jie. Accuracy assessment of rainfall measurement based on TRMM products [J]. *Water Power*, 2015, **41** (6): 28 – 31] DOI: 10.3969/j.issn.0559-9342.2015.06.007
- [11] 金秋, 张增信, 黄钰瀚, 等. 基于 TRMM 卫星产品的长江流域降水精度评估[J]. 人民长江, 2017, **48** (19): 48 – 52. [JIN Qiu, ZHANG Zengxin, HUANG Yuhan, et al. Accuracy evaluation of precipitation analysis in Yangtze River basin based on satellite TRMM [J]. *Yangtze River*, 2017, **48** (19): 48 – 52] DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2017.19.009
- [12] 曾华楠, 谷黄河, 余钟波, 等. TRMM 卫星降水数据在黄河源区的适用性研究[J]. 人民黄河, 2021, **43** (2): 17 – 21 + 29. [ZENG Huanan, GU Huanghe, YU Zhongbo, et al. Study on the applicability of TRMM satellite precipitation data based on distributed hydrological models in the headwaters of Yellow River basin [J]. *Yellow River*, 2021, **43** (2): 17 – 21 + 29] DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2021.02.004
- [13] 郭家力, 丁光旭, 杨旭, 等. 多源卫星降水产品在长江流域的时空精度对比[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2022, **20** (2): 230 – 242 + 252. [GUO Jiali, DING Guangxu, YANG Xu, et al. Comparison of temporal and spatial accuracy of precipitation products from multi-source satellites in the Yangtze River basin [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science and Technology*, 2022, **20** (2): 230 – 242 + 252] DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdk.2022.0025
- [14] 孟兴民, 陈冠, 郭鹏, 等. 白龙江流域滑坡泥石流灾害研究进展与展望[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2013, **33** (4): 1 – 15. [MENG Xingmin, CHEN Guan, GUO Peng, et al. Research of landslides and debris flows in Bailong River basin: Progress and

- prospect [J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2013, **33**(4):1–15] DOI: 10.3724/SP.J.1140.2013.04001
- [15] 李淑贞, 戴霜, 王华伟, 等. 白龙江地区断裂构造与滑坡分布及发生关系[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2015, **51**(2): 145–152. [LI Shuzhen, DAI Shuang, WANG Huawei, et al. Fault features and their implications on distribution and formation of landslides in Bailongjiang region [J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2015, **51**(2): 145–152] DOI: 10.13885/j.issn.0455–2059.2015.02.001
- [16] 陈明, 王运生, 梁瑞峰, 等. 白龙江流域大型滑坡发育分布规律研究[J]. *工程地质学报*, 2018, **26**(2):325–333. [CHEN Ming, WANG Yunsheng, LIANG Ruifeng, et al. Research on development and distribution rules of large-scale landslides in Bailongjiang River basin [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2018, **26**(2):325–333] DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2017–037
- [17] 陈宗良, 叶振南, 王志宏, 等. 白龙江流域中上游第四纪沉积物的发育特征及其灾害效应[J]. *水文地质工程地质*, 2019, **46**(2): 29–36. [CHEN Zongliang, YE Zhenan, WANG Zhihong, et al. Development characteristics and disaster effect of the Quaternary sediments in the middle and upper reaches of the Bailongjiang River basin [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2019, **46**(2): 29–36] DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000–3665.2019.02.05
- [18] 唐新凯, 梁收运. 白龙江流域甘肃段地质灾害与经济的关系[J]. *地质灾害与环境保护*, 2012, **23**(4): 66–71. [TANG Xinkai, LIANG Shouyun. Correlation between geo-hazards and economic development for the Gansu section of the Bailongjiang catchment area [J]. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 2012, **23**(4): 66–71] DOI: 10.3969/j.issn.1006–4362.2012.04.012
- [19] 冯军, 尚学军, 樊明, 等. 陇南地质灾害降雨区划及临界雨量研究[J]. *干旱气象*, 2006, **24**(4): 20–24. [FENG Jun, SHANG Xuejun, FAN Ming, et al. Geological calamity distribution and critical rainfall in Longnan region of Gansu province [J]. *Arid Meteorology*, 2006, **24**(4): 20–24] DOI: 10.3969/j.issn.1006–7639.2006.04.004
- [20] BAI Shibiao, WANG Jian, THIEBES B, et al. Analysis of the relationship of landslide occurrence with rainfall: A case study of Wudu county, China [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2014, **7**(4):1277–1285. DOI: 10.1007/s12517–013–0939–9
- [21] 郭富赞, 宋晓玲, 谢煜, 等. 甘肃地质灾害气象预警技术方法探讨[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2015, **26**(1):127–133. [GUO Fuyun, SONG Xiaoling, XIE Yu, et al. A discussion on the geological hazards meteorological warning system in Gansu province [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2015, **26**(1):127–133] DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003–8035.2015.01.023
- [22] 黎志恒, 文宝萍, 贾贵义, 等. 甘肃省白龙江流域滑坡分布规律及其主控因素[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2015, **51**(6):768–776. [LI Zhiheng, WEN Baoping, JIA Guiyi, et al. Characteristics of the landslide distribution along the Bailongjiang River basin and its controlling factors [J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2015, **51**(6):768–776] DOI: 10.13885/j.issn.0455–2059.2015.06.002
- [23] 赵艳萍, 宁娜, 齐识. 白龙江流域近40 a 气候变化特征分析[J]. *人民黄河*, 2012, **34**(10): 41–43. [ZHAO Yanping, NING Na, QI Shi. Characteristics of climate change in Bailong River valley in recent 40 years [J]. *Yellow River*, 2012, **34**(10): 41–43] DOI: 10.3969/j.issn.1000–1379.2012.10.009
- [24] 乔良. 甘肃白龙江流域活动构造带控制影响下的滑坡发育研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2017: 18–21. [QIAO Liang. Development of landslides dominated by neotectonics in Bailong River corridor, Gansu province, China [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2017: 18–21] DOI: 10.7666/d.D01382977
- [25] 陈冠. 基于统计模型与现场试验的白龙江中游滑坡敏感性分析研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2014: 31–35. [CHEN Guan. Landslide susceptibility analysis in the middle reach of Bailong River basin based on statistical models and in-situ experiment [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2014: 31–35]
- [26] CAINE N. The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows [J]. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 1980, **62**(1–2): 23–27. DOI: 10.1080/04353676.1980.11879996
- [27] GUZZETTI F, PERUCCACCI S, ROSSI M, et al. Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe [J]. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2007, **98**(3): 239–267. DOI: 10.1007/s00703–007–0262–7
- [28] 尹红刚. 星载降水雷达技术研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(空间科学与应用研究中心), 2008: 16–111. [YIN Honggang. Study on spaceborne precipitation radar technology [D]. Beijing: Graduate University of the Chinese Academy of Sciences (Center for Space Science and Applied Research), 2008: 16–111]
- [29] 周伟, 唐川. 汶川震区暴雨泥石流发生的降雨阈值[J]. *水科学进展*, 2013, **24**(6): 786–793. [ZHOU Wei, TANG Chuan. Rainfall thresholds for debris flows occurrence in the Wenchuan earthquake area [J]. *Advances in Water Science*, 2013, **24**(6): 786–793] DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2013.06.013
- [30] 何斌, 徐新兰, 贾贵义, 等. 甘肃省白龙江流域主要地质灾害发育特征及分布规律研究[J]. *地下水*, 2017, **39**(3): 174–176 + 179. [HE Bin, XU Xinlan, JIA Guiyi, et al. Characteristics and distribution of main geological hazards in Gansu Bailongjiang River basin [J]. *Ground Water*, 2017, **39**(3): 174–176 + 179] DOI: 10.3969/j.issn.1004–1184.2017.03.068
- [31] ZHAO Yan, MENG Xingmin, QI Tianjun, et al. AI-based identification of low-frequency debris flow catchments in the Bailong River basin, China [J]. *Geomorphology*, 2020, **359**: 107125. DOI: 10.1016/j.geomorph.2020.107125
- [32] 朱赛楠. 厚层基岩滑坡软弱夹层演化过程及控滑机理研究[D]. 西安: 长安大学, 2016: 35–58. [ZHU Sainan. Research

- on evolution process and controlling mechanism of weak layer from thick layered bedrock landslide [D]. Xi'an: Chang'an University, 2016:35–58] DOI: 10.7666/d.D0113999
- [33] 梁庆国, 韩文峰, 谌文武, 等. 岩体地震动力破坏问题研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2003, **22** (S2): 2783–2788. [LIANG Qingguo, HAN Wenfeng, CHEN Wenwu, et al. Discussion on rockmass failure under seismic load [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, **22** (S2): 2783–2788] DOI: 10.3321/j.issn:1000–6915.2003.z2.052
- [34] 许强, 李为乐, 董秀军, 等. 四川茂县叠溪镇新磨村滑坡特征与成因机制初步研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2017, **36** (11): 2612–2628. [XU Qiang, LI Weile, DONG Xiujun, et al. The Xinmocun landslide on June 24, 2017 in Maoxian, Sichuan: Characteristics and failure mechanism [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, **36** (11): 2612–2628] DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2017.0855
- [35] SHI Qingyun, TANG Chuan, GONG Lingfeng, et al. Activity evolution of landslides and debris flows after the Wenchuan earthquake in the Qipan catchment, southwest China [J]. Journal of Mountain Science, 2021, **18** (4): 932–951. DOI: 10.1007/s11629-020-6494-4
- [36] 麻士华, 李长江, 孙乐玲, 等. 浙江地区引发滑坡的降雨强度—历时关系 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2011, **22** (2): 20–25. [MA Tuhua, LI Changjiang, SUN Leling, et al. Rainfall intensity-duration thresholds for landslides in Zhejiang region, China [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2011, **22** (2): 20–25] DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003–8035.2011.02.003

Rainfall Threshold of Landslides in the Bailong River Basin, China

WU Jie¹, CHEN Guan^{1,2,3*}, MENG Xingmin^{1,2,3}, HUANG Fengchun¹, ZHAO Yingping⁴

(1. School of Earth Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2. Technology & Innovation Centre for Environmental Geology and Geohazards Prevention, Lanzhou 730000, China; 3. Gansu Geohazards Field Observation and Research Station, Lanzhou 730000, China; 4. Natural Resources Bureau of Diebu County, Gannan 747000, Gansu, China)

Abstract: The Bailong River Basin has one of the most severe rainfall-induced landslides in China. Geohazards occur frequently in rainy season, seriously threatening people's lives and property in the basin. It is quite necessary to determine the correlation between landslide occurrences and precipitation based on scarce ground-based rainfall data and remote sensing data for accuracy improvement on landslide predication in the basin. In this study, it collected landslide inventory of the Bailong River Basin and rainfall data from TRMM satellite from 2004 to 2019, and then an empirical *I-D* rainfall threshold was established on optimal time scale, with antecedent rainfall inclusive. The effects of lithology, rain types and earthquakes on the threshold curve were also discussed.

Following results were obtained. (1) The rainfall threshold $I = 2.673D^{0.730}$ ($3\text{ h} \leq D \leq 195\text{ h}$) based on the recent rainfall event had high accuracy and credibility, which could be used for landslide warning of short-term continuous rainfall. The threshold $I = 8.377D^{-0.878}$ ($3\text{ h} \leq D \leq 288\text{ h}$) based on 12-day cumulative rainfall duration could be used for landslide warning of long-term intermittent rainfall. (2) The higher the rock strength was, the higher the slope threshold was, and the slope with weak interlayer was more prone to form landslide. The deterioration of geo-environment inflicted by large-scale earthquakes caused significant fluctuation of a threshold curve. Landslides in the basin were mainly driven by long-term moderate and low-intensity rainfall.

The results suggest that based on satellite rainfall data it is feasible to construct a rainfall threshold for landslides in an area with scarce ground rainfall observation data. This study provides a reference for meteorological early warning and risk management of landslides in the Bailong River Basin and similar areas where meteorological data are scarce.

Key words: TRMM; landslide; rainfall threshold; meteorological warning; the Bailong River Basin