



引文格式:李昊宇,许强,李品良,等.降雨数据稀缺山区地质灾害的降雨阈值研究——以茂县为例[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(9):1878-1887.DOI:10.13203/j.whugis20240075

Citation:LI Haoyu,XU Qiang,LI Pinliang,et al.Rainfall Thresholds for Geological Disasters in Rainfall Data-Scarce Mountainous — A Case Study of Mao County[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2025,50(9):1878-1887.DOI:10.13203/j.whugis20240075

降雨数据稀缺山区地质灾害的降雨阈值研究 ——以茂县为例

李昊宇¹ 许强¹ 李品良¹ 巨袁臻¹ 蒲川豪¹

¹ 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护全国重点实验室,四川 成都,610059

摘要:降雨诱发地质灾害导致大规模人员伤亡,建立降雨阈值可有效降低地质灾害的危害性,而在数据稀缺山区,缺乏雨量信息来构建降雨阈值。因此,对全球降水计划数据产品进行降尺度处理,并利用雨量站验证其数据的有效性。结合灾害数据提取降雨事件,采用频率法建立茂县地区不同灾害、不同精度的临界阈值,并分析了震后阈值曲线随年份的演变规律。结果表明:(1)降尺度处理可有效提高降雨产品的空间分辨率和捕捉降雨能力;(2)茂县地区的降雨型滑坡主要受长时弱降雨控制,而泥石流主要受短时强降雨控制,假设累积降雨量为 E ,降雨历时为 D ,则临界阈值方程分别为: $E=4.17D^{0.18}$ ($8<D<868$), $E=3.93D^{0.24}$ ($10<D<441$);(3)降尺度后的降雨阈值较未降尺度的阈值低,临界阈值 E 的方程可表示为: $E=3.96D^{0.21}$ ($4<D<736$), $E=4.09D^{0.19}$ ($8<D<868$);(4)震后茂县地区诱发地质灾害的降雨事件由长时弱降雨转变为短时强降雨控制,降雨阈值随时间推移呈增大趋势。该研究对于茂县地区降雨型地质灾害的防灾减灾工作具有科学指导。

关键词:地质灾害;降雨阈值;全球降水计划;降尺度;频率法

中图分类号:P237

文献标识码:A

收稿日期:2024-06-21

DOI:10.13203/j.whugis20240075

文章编号:1671-8860(2025)09-1878-10

Rainfall Thresholds for Geological Disasters in Rainfall Data-Scarce Mountainous : A Case Study of Mao County

LI Haoyu¹ XU Qiang¹ LI Pinliang¹ JU Yuanzhen¹ PU Chuanhao¹

¹ State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

Abstract: Objectives: Rainfall-induced geological disasters often result in significant human and property losses, and rainfall thresholds can effectively reduce the hazards of geological disasters. However, limited rainfall data in mountainous areas lead to low accuracy of rainfall thresholds. Establishing rainfall thresholds in mountainous areas with scarce data is an unresolved problem. **Methods:** We downscale global precipitation measurement (GPM) data to the resolution of 1 km and verify its validity with ground station rainfall. By combining disaster data, we extract rainfall events and obtain critical thresholds for different types of disasters and different precisions in Mao County based on the frequency method. Furthermore, we also analyze the evolution of the threshold curves over the years following the earthquake. **Results:** Rainfall-induced landslides in Mao Country area are primarily controlled by long-duration weak rainfall, while debris flows are dominated by short-duration intense rainfall. Assuming cumulative rainfall is E and rainfall duration is D , the critical threshold equations are: $E=4.17D^{0.18}$ ($8<D<868$) and $E=3.93D^{0.24}$ ($10<D<441$). The rainfall threshold after downscaling is lower than the unscaled threshold, and the critical threshold equation can be expressed as: $E=4.09D^{0.19}$ ($8<D<868$) and $E=3.96D^{0.21}$ ($4<D<736$). The rainfall

基金项目:国家重点研发计划(2022YFC3003200)。

第一作者:李昊宇,硕士生,从事区域地质灾害监测预警研究。2289806387@qq.com

通信作者:许强,博士,教授。xq@cdut.cdut.edu.cn

events that triggered geological disasters in Mao County after the earthquake have shift from long-duration weak rainfall to short-duration intense rainfall control, and rainfall thresholds show an increasing trend over time. **Conclusions:** Downscaling can effectively enhance the spatial resolution of rainfall products and improve their ability to capture rainfall events. The critical thresholds established by downscaled data can serve as the minimum indicators for disaster monitoring and early warning in Mao County.

Key words: geological disasters; rainfall thresholds; global precipitation measurement; downscaling; frequency method

全球气候变暖导致极端降雨事件激增,由降雨诱发的地质灾害对人类社会造成了严重威胁^[1]。茂县地区作为地质灾害的高易发区之一,其地质灾害的频率与危害性位居全国前列,极易在降雨条件下产生大规模灾害。2017年茂县“6·24”特大山体滑坡造成了10人死亡,73人失踪^[2]。监测预警是地质灾害防治的重要措施,而降雨是地质灾害预警的重要指标,通过对降雨指标进行分析得到的降雨阈值能够有效识别可能诱发地质灾害的降雨条件^[3],从而降低地质灾害的危害性。因此,确定茂县地区地质灾害的降雨阈值对减少区域的经济损失和人员伤亡尤为重要。

目前,降雨阈值常通过物理模型和经验统计两种方法确定^[4],其中经验统计阈值因数据获取方式较物理模型阈值简单、高效而被广泛运用^[5]。学者们基于已诱发地质灾害降雨事件的降雨因子,提出了强度-历时(intensity-duration, I-D)阈值^[6]、累计雨量-历时(event rainfall-duration, E-D)阈值^[7]以及累计雨量-强度(event rainfall-intensity, E-I)阈值^[8]等。此外,部分学者考虑诱发地质灾害的前期降雨量^[9],提出了三维降雨阈值,旨在提高降雨阈值的准确性。

降雨数据的精度是决定降雨阈值准确性的关键,影响预警信息的可信度。现有阈值研究大都基于雨量计观测值,通过空间插值反映诱发地质灾害的降雨量^[10]。然而,在数据稀缺的偏远山区,雨量计分布密度低,导致插值雨量往往存在一定程度的不确定性^[11-12],从而降低了构建的降雨阈值的精度。卫星降雨产品的快速发展使其具有覆盖范围广和能够反映空间降雨差异的能力,因此被众多学者视为研究降雨阈值的有效数据来源^[13-16]。然而,现有的卫星降雨产品仍有弊端,如空间分辨率较低,或者高空间分辨率的降雨数据以月为时间分辨率。因此在数据稀缺山区获取更高精度的卫星降雨数据是构建精细化降雨阈值的前提,值得被探索。

综上,为在数据稀缺山区建立准确的降雨阈值,以减少地质灾害的危险性,研究考虑到现有

降雨产品的局限性,采用地理加权回归(geographically weighted regression, GWR)方法构建降尺度模型,将全球降水计划(global precipitation measurement, GPM)数据降尺度到1 km的小时尺度,并结合地面监测数据验证了降尺度数据的有效性。基于收集到的茂县地区2009—2020年发生的地质灾害数据,利用频率法确定了茂县地区降雨型地质灾害的临界降雨阈值,探究了不同灾害类型和不同空间精度条件下降雨阈值的差异,并分析了震后阈值随时间的演变规律。本文研究可为茂县地区和其他相关区域在降雨型地质灾害防灾减灾方面提供科学指导。

1 研究区概况

1.1 研究区

茂县位于四川省西北部,隶属于阿坝藏族羌族自治州,地处 $31^{\circ}25'N\sim 32^{\circ}16'N$, $102^{\circ}56'E\sim 104^{\circ}10'E$,总面积约 $3\,903.28\text{ km}^2$ 。地形属川西北高原向成都平原过渡地带,区内地势西北高、东南低,主要为高山峡谷。

茂县降雨变化主要由高原性季风气候控制。该地区的气候条件受海拔高度和地形起伏的影响存在着很大的差异,主要表现为:降雨多集中在夏季和秋季,春季和冬季较干燥;平均年降雨量为 887.04 mm 。

1.2 历史地质灾害

历史地质灾害数据来源于四川省地质环境监测院收集到的2009—2020年间茂县地区发生的739起地质灾害,灾害数据库包含了每起地质灾害的具体发生时间、发生地点、规模、类型、诱发因素(自然/人为)、威胁对象、财产损失等内容。为了排除非降雨型地质灾害对建立区域降雨阈值的影响,本文剔除了244起由人为因素导致或灾害发生当天累计降雨量小于 10 mm 的地质灾害^[17],将剩余495起地质灾害按9:1的比例随机选取其中446起地质灾害用于建立降雨阈值,49起地质灾害用于阈值模型的验证,其空间分

布如图1所示。图2绘制了研究区月平均降雨量与地质灾害频次图,由图2可知,月平均降雨量越高,灾害数目越多,且95%的灾害发生在丰水期,可见灾害发生与降雨具有较强的相关性^[18]。

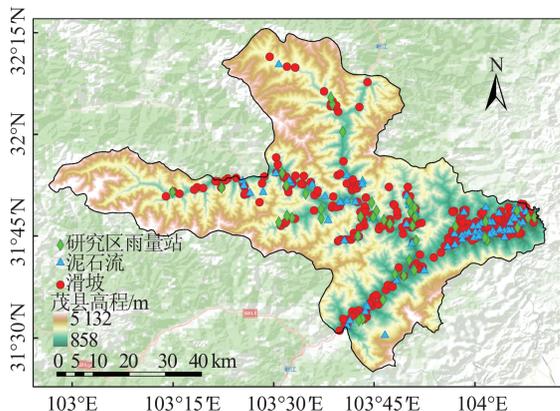


图1 茂县地质灾害分布图

Fig. 1 Geological Hazards Distribution Map of Mao County

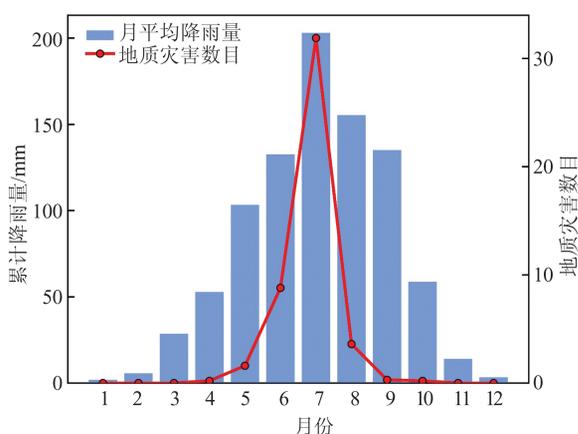


图2 月均降雨量与地质灾害频次图

Fig. 2 Map of Average Monthly Rainfall and Frequency of Geologic Hazards

2 GPM数据降尺度及其有效性分析

2.1 数据来源与处理流程

卫星降雨产品降尺度处理主要是基于环境变量与降雨量之间的关系提出的缩尺度方法^[19]。归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)与数字高程模型(digital elevation model, DEM)作为常用的环境变量,已被众多学者证实可有效提高卫星降雨数据的空间精度^[20-26]。因此,本文以NDVI与DEM为环境变量,采用GWR降尺度处理GPM降雨数据,其中降雨数据来源于美国国家航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)。该数据的时间分辨率包括30 min、1 d、1月3个版本,

空间分辨率为 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ (约11 km,后文统一使用),数据覆盖范围为 $50^{\circ}\text{S} \sim 50^{\circ}\text{N}$ 。考虑到建立降雨阈值模型的数据精度常以小时为单位^[10],本文选取2009—2020年GPM逐30 min的降雨数据产品(GPM_3IMERGHH),原始数据格式为netCDF,在GIS工具中将其批量转换为栅格格式,并合成小时降雨数据。

NDVI数据来源于NASA地球观测系统计划(<https://modis.gsfc.nasa.gov/>)。NDVI数据时间分辨率为16 d和1月,空间分辨率为250 m、500 m、1 km、 0.05° (约5.6 km)。本文选取2009—2020年内1 km的月尺度NDVI数据产品(MOD13A3)建立与降雨数据的相关关系。原始数据格式为HDF,使用NASA提供的MODIS投影变换工具对NDVI数据进行转换、投影和拼接并将其批量栅格化。

DEM数据是对地表地形的数字化模拟。该数据来源于NASA航天飞机雷达地形测量任务(<https://www.earthdata.nasa.gov/sensors/srtm>),空间分辨率为30 m,数据格式为栅格格式。

降尺度处理流程如图3所示,主要包括以下5个步骤:(1)将 0.1° 分辨率下的小时GPM数据合并为季节GPM数据,并将NDVI和DEM投影重采样至 0.1° 分辨率。(2)将统一尺度后的季节GPM数据作为因变量、NDVI和DEM作为自变量输入GWR模型,得到 0.1° 分辨率下的系数、截距和残差,再将3种参数插值重采样到1 km的分辨率。(3)将NDVI和DEM乘以1 km分辨率的对应系数,加上相应截距和残差,得到分辨率为1 km的季节GPM数据。(4)通过小时GPM数据和季节GPM数据的数量关系,得到 0.1° 分辨率下的比例系数。这里假设降尺度前后小时GPM数据与季节GPM数据的比例保持不变^[27],将比例系数插值重采样至1 km分辨率。(5)将1 km分辨率下的季节GPM数据与比例系数相乘便可得到分辨率为1 km的小时GPM数据,即降尺度GPM数据。

2.2 降尺度模型精度验证

中国各地区地理环境复杂,气候变化多端,降水分布不均,在某些地区,降雨数据可能会有所偏差。因此,验证GPM数据的适用性尤为重要。文献[28]对中国地区的GPM数据进行检验,发现其整体质量是可靠的。文献[29]分析GPM数据在天山山区的适用性,发现GPM数据能较准确估测天山山区的降水。文献[30]对GPM数据在甘肃

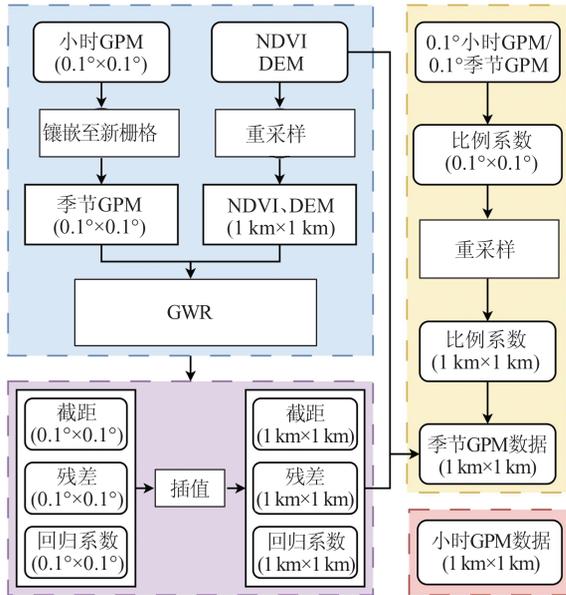


图 3 降尺度操作流程

Fig. 3 Downsampling Operation Procedure

陇南地区的适用性进行分析,发现 GPM 数据在陇南山区具有良好的精度和适用性,可以有效指示诱发地质灾害的极端降雨事件。本文基于四川省地质灾害监测预警平台中的 45 处雨量站(雨量站点分布位置如图 1 所示)监测数据,选取相关系数(correlation coefficient, CC)、平均绝对误差(mean absolute error, MAE)、均方根误差(root mean square error, RMSE)及偏差(Bias)4 种参数对茂县地区 0.1°与 1 km 分辨率的 GPM 数据进行精度评价,相关参数的计算式分别为:

$$E_{CC} = \frac{\sum_{i=1}^m (G_i - \bar{G})(R_i - \bar{R})}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (G_i - \bar{G})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^m (R_i - \bar{R})^2}} \quad (1)$$

$$E_{MAE} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m |G_i - R_i| \quad (2)$$

$$E_{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (G_i - R_i)^2} \quad (3)$$

$$E_{Bias} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (G_i - R_i) \quad (4)$$

式中, G 为区域内 GPM 数据; \bar{G} 为 GPM 数据的平均值; R 为区域内雨量站数据; \bar{R} 为雨量站数据的平均值。

图 4 展示了随机选取的降尺度前后的 GPM 数据图、雨量站插值图及降尺度后 GPM 数据与雨量站数据的叠合图。由图 4 可以看出,降尺度处理显著提高了卫星降雨数据的空间分辨率,且降尺度后的 GPM 数据可有效表征地面实际雨量的空间分布规律。图 5 展示了降尺度前后 GPM

数据与雨量站数据的参数分析结果。通过降尺度处理,GPM 数据与地面雨量站的日 CC 从 0.72 提高到 0.75,月 CC 从 0.94 提高到 0.96;日 Bias 从 0.16 降低到 0.08,月 Bias 从 12.51 降低到 7.06;日 RMSE 从 3.49 mm 降低到 3.29 mm,月 RMSE 从 27.07 mm 降低到 18.55 mm;日 MAE 从 1.89 mm 降低到 1.71 mm,月 MAE 从 18.27 mm 降低到 13.43 mm。由图 5 可以看出,降尺度方法可有效提高 GPM 数据在茂县地区的适用性,此结果远好于热带降雨测量任务数据的表现^[31-32]。需要强调的是,降尺度前后 GPM 数据均高估了地面实际雨量,可能是由卫星降水遥感反演原理的局限性导致。降水卫星通过被动微波遥感测量地表至云顶的微波辐射以推算降雨量^[33],而山区复杂地形会增强微波发射复杂性^[34],加大降水反演难度,从而导致对地面雨量的高估。综上,降尺度处理的 GPM 数据可以作为建立茂县地区降雨阈值的有效雨量数据来源。

3 研究方法

3.1 降雨事件划分标准

划分诱发灾害的降雨事件是确定降雨阈值的首要前提。但现有研究中未有统一标准将降雨时间序列离散为独立的降雨事件。因此,本文采用文献[35]的方法划分诱发灾害的降雨事件(图 6),该方法认定诱发灾害的降雨事件开始于连续 24 h 无降雨后再次下雨的时间,结束时间为灾害的开始时间。基于上述降雨事件的划分标准,获得诱发地质灾害的降雨事件并计算其相关降雨特征值参数,如累计降雨量(E)、降雨历时(D)以及降雨强度(I),单位分别为 mm、h 和 mm/h。

3.2 确定临界阈值模型

文献[6]提出的 I - D 阈值被广泛用于降雨诱发灾害预警,一般被表示为:

$$I = \alpha D^\beta \quad (5)$$

式中, α 与 β 为拟合系数。然而,降雨强度是降雨持续时间和累计降雨量的函数,为省略降雨强度转化步骤,本文采用 E - D 阈值模型建立茂县地区的降雨阈值,可表示为:

$$E = \alpha D^\beta \quad (6)$$

基于上述定义的降雨事件划分标准,提取茂县地区诱发地质灾害的降雨事件,将其绘制在双对数坐标轴中。参见文献[30]提出的划分标准,使用频率法^[36]确定茂县地区降雨型地质灾害的

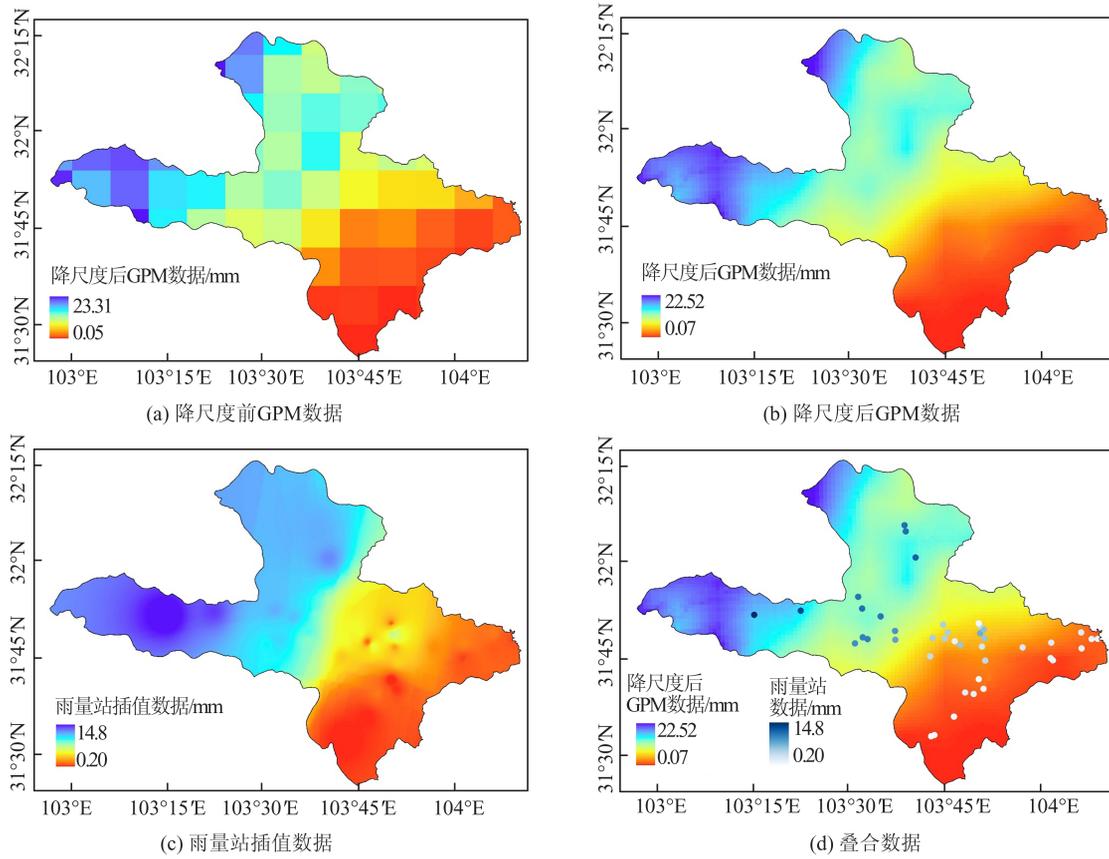


图4 茂县地区降尺度结果对比图

Fig. 4 Comparison of Downscaling Results in Mao County

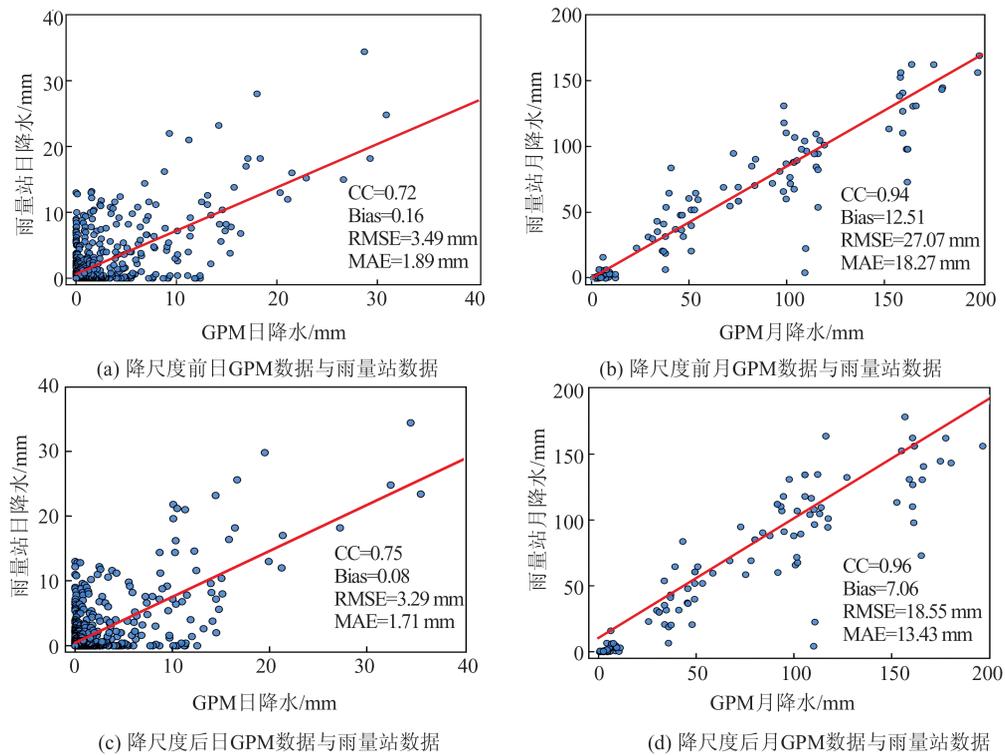


图5 GPM数据与雨量站数据散点图

Fig. 5 Scatterplot of GPM Data and Rainfall Station Data

临界降雨阈值。首先计算降雨事件累计降雨量与拟合曲线累计降雨量的对数之差 $\delta(D)$,通过核

密度估计确定 $\delta(D)$ 分布的概率密度函数(probability density function, PDF),再使用高斯函数进

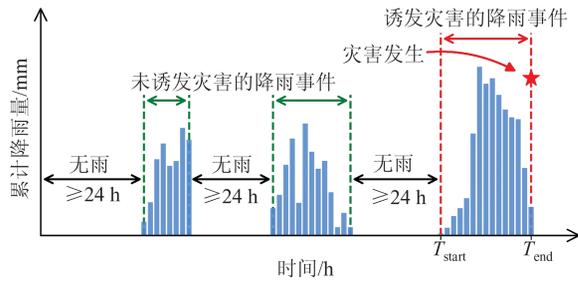


图 6 降雨事件划分标准

Fig. 6 Criteria for Classifying Rainfall Events

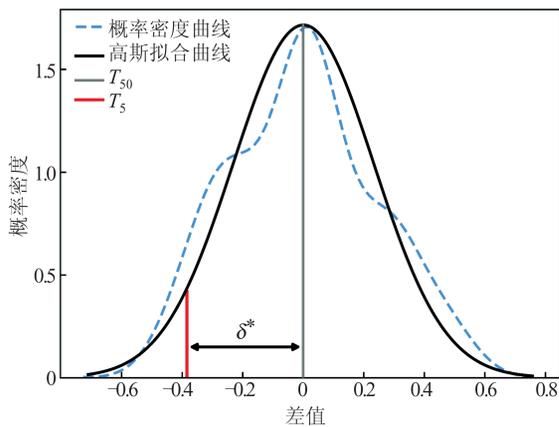


图 7 5% 发生概率 (T_5) 的阈值示意图

Fig. 7 Graphical Representation of Thresholds for 5% Probability of Occurrence (T_5)

行拟合(最小二乘法),最后根据拟合结果定义不同概率临界阈值。图 7 中红色实线 T_5 为 5% 阈值曲线,利用红线与最佳拟合线 T_{50} (灰色实线) 之间的距离 δ^* 计算 5% 阈值曲线的截距,具体为 $\delta_5 = \delta_{50} - \delta^*$ 。例如,5% 阈值曲线表明降雨量低于该阈值所诱发灾害的概率小于 5% 不会发生灾害

4 结果分析

4.1 不同灾害类型 $E-D$ 降雨阈值

图 8 绘制了诱发滑坡、泥石流降雨事件的散点图以及其对应的临界降雨阈值,可以看到诱发滑坡、泥石流灾害降雨事件的持续时间范围分别集中在 70~93 h、71~80 h,累计降雨量分别集中在 131~171 mm、141~175 mm。整体而言,诱发泥石流灾害的降雨事件分布更为集中,以短时强降雨为主,而诱发滑坡灾害的降雨事件分布则更为分散,以长时弱降雨为主;同时在相同持续时间范围内,泥石流的降雨阈值始终高于滑坡,这与文献[37]的结论相符,阈值方程可分别表示为 $E = 4.17D^{0.18}$ ($8 < D < 868$), $E = 3.93D^{0.24}$ ($10 < D$

< 441)。这是因为滑坡、泥石流的启动机制不同,即泥石流的形成需要在短时间内聚集大量雨水,形成强烈的地表径流,冲刷侵蚀松散堆积层;而长时间的低强度降雨能够保证雨水的充分入渗,导致坡体含水率增加,土壤的抗剪强度减弱,进而诱发滑坡。此外,滑坡产生的松散堆积物在降雨作用形成的径流强烈冲刷下可以作为泥石流的物源^[38],使得泥石流启动需要更高的累计降雨量。

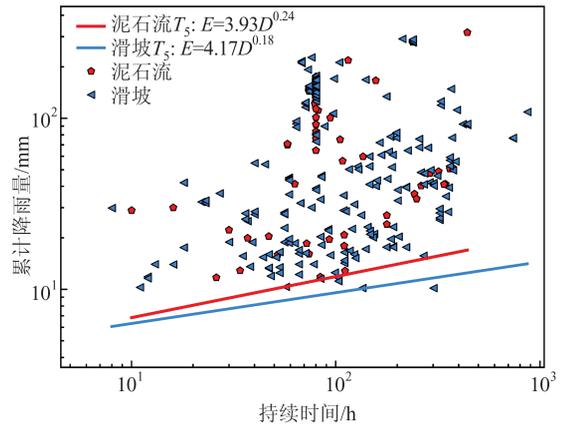


图 8 泥石流和滑坡降雨阈值

Fig. 8 Rainfall Thresholds for Debris Flow and Landslides

4.2 不同空间分辨率的 $E-D$ 降雨阈值

图 9 展示了 GPM 数据降尺度前后提取降雨事件的散点图及其对应的临界降雨阈值。由图 9 可知,降尺度前后的降雨事件的分布存在差异,降尺度前降雨事件的持续时间和累计降雨量的范围均小于后者,且分布更为集中;降尺度前的临界阈值曲线始终高于降尺度后的临界阈值曲线,阈值方程可分别表示为: $E = 3.96D^{0.21}$ ($4 < D < 736$), $E = 4.09D^{0.19}$ ($8 < D < 868$)。这一结果可能是由

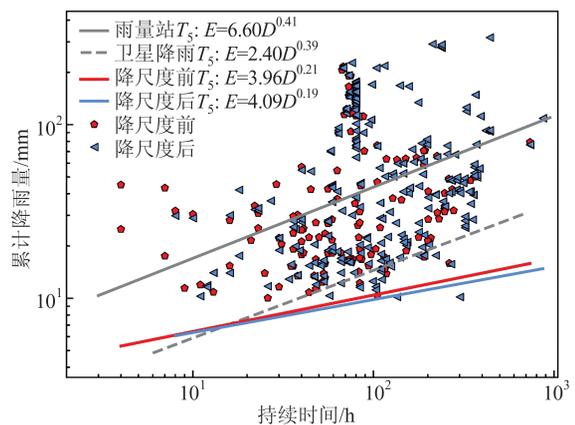


图 9 GPM 数据降尺度前后降雨阈值

Fig. 9 Rainfall Thresholds Before and After Down Scaling of GPM Data

于不同降雨产品的降雨捕捉能力和空间分辨率差异导致。具体而言,由§3.2可知,相较于降尺度前的降雨数据,降尺度后的降雨数据存在一定程度低估;同时更高分辨率的降雨数据更能准确反映灾害点处的真实降雨情况,有效排除相邻灾害点在提取降雨事件时的干扰(图9中三角形更为分散)。文献[39-40]进一步证实了本研究结论的可靠性,其通过空间插值得到的地面雨量数据的空间分辨率(绝大多数灾害距雨量站较远)远低于卫星降雨数据的空间分辨率;同时在意大利地区卫星降雨数据低估了地面雨量数据,所以最终由卫星降雨数据得到的降雨阈值(图9中灰色虚线)低于由雨量站得到的降雨阈值(图9中灰色实线)。综上,采用降尺度后的GPM数据建立的茂县地区的临界降雨阈值 $E = 4.09D^{0.19}$ ($8 < D < 868$)可作为诱发地质灾害的最低降雨标准,能有效降低预警系统的漏报率。

4.3 E-D降雨阈值的时间演变规律

图10展示了震后2009—2020年茂县地区降雨阈值的时间演变规律。鉴于个别年份统计的地质灾害数目较少,单独分析其降雨阈值可能不

具有代表性。因此,将降雨情况相似的两年的灾害样本合并考虑建立阈值(由于2018—2019年未收集到灾害数据,故将2017年与2020年灾害数据单独分析)。由图10(a)可知,随着时间的推移,诱发茂县地区的地质灾害临界降雨阈值曲线整体呈增大趋势,这与前人研究结果相符^[41]。值得注意的是,蓝色、绿色阈值曲线异常,是由于二者的年平均降雨异常所导致提取的降雨参数整体较高或较低。由图10(b)、10(c)可知,随着震后时间推移,诱发地质灾害降雨事件的累计降雨量整体逐渐变大,持续时间逐年降低。可见诱发茂县地区地质灾害的降雨事件由长时弱降雨逐渐转变为短时强降雨主控模式,这是因为在自然条件下,坡体结构趋于稳定,植被逐年恢复,降低了径流形成的速度和总量,土壤可侵蚀性显著降低^[42],因此需要更大的累计降雨量才能达到灾害发生的阈值。但相较于2020年降雨阈值而言,较高的年均降雨量并未引起降雨阈值的陡增,笔者认为这是由于震后10年里,地震对降雨阈值的影响逐年减小恢复至震前水平^[43-44]。

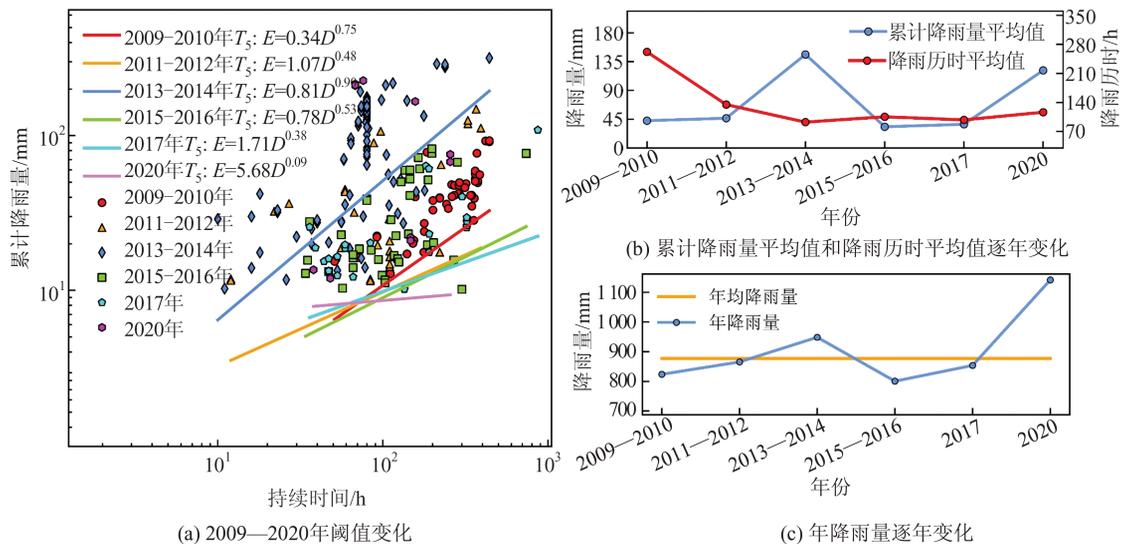


图10 阈值随年份变化

Fig. 10 Threshold Varies with Years

4.4 降尺度后的降雨阈值验证

利用49起降雨型地质灾害验证前文建立的临界降雨阈值的有效性,结果如图11所示。由图11可以看出,本文提出的临界降雨阈值成功预警49起灾害,成功率达到了100%。为比较研究区域附近已有降雨阈值,将文献[40]提出的汶川地区(与茂县相邻)临界I-D阈值按 $E = I \cdot D$ 对阈值进行转

换,其中2%、10%的阈值结果分别如图11中 T_2 、 T_{10} 所示,均低于本文提出的临界降雨阈值的成功率。此外,为避免雨量数据差异对阈值有效性的影响,本文利用基于雨量站获取的震后典型地质灾害数据^[41]验证了阈值的有效性,仍可成功预警。因此,利用降尺度处理的卫星降雨数据来建立茂县地区地质灾害的临界降雨阈值是可行的。

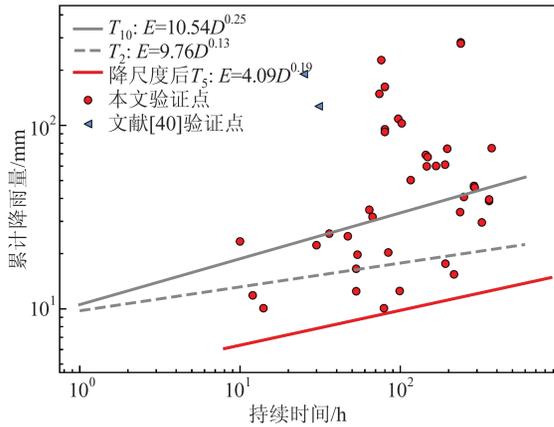


图 11 验证点滑坡发生概率位置

Fig. 11 Probability Position of Disaster in Validation Point

5 结 语

本研究对 2009—2020 年间由降雨诱发的地质灾害及其对应的小时降雨数据进行深入统计分析,建立茂县地区的 $E-D$ 临界降雨阈值,得到如下结论:

1) 降尺度操作能有效提高 GPM 数据在茂县地区的精度与适用性。通过将降尺度前后的 GPM 数据与雨量站数据作对比,发现受卫星降水遥感反演原理的限制,二者对真实降雨情况有一定程度高估,但降尺度 GPM 数据的相对偏差更小,数据精度更高。

2) 茂县地区滑坡灾害主要由长时弱降雨控制,泥石流主要由短时强降雨控制,二者对应临界阈值方程分别为 $E = 4.17D^{0.18}$ ($8 < D < 868$), $E = 3.93D^{0.24}$ ($10 < D < 441$)。

3) 降尺度前后的 $E-D$ 降雨阈值存在差异,对应的临界阈值方程分别为 $E = 3.96D^{0.21}$ ($4 < D < 736$), $E = 4.09D^{0.19}$ ($8 < D < 868$), 并且降尺度后临界阈值更低。

4) 随着地震后松散堆积物减少,植被覆盖率逐年回升,地质条件趋于稳定,触发灾害降雨特征逐渐由长时弱降雨转变为短时强降雨控制,灾害降雨阈值总体呈增大趋势,需要更高的累计降雨量才能诱发地质灾害。

5) 本文建立的临界降雨阈值相较于其他学者建立的临界降雨阈值预测灾害正确率更高。采用此阈值作为判断茂县地区灾害发生的最低降雨标准具有一定的可行性。

参 考 文 献

[1] 许强,董秀军,李为乐. 基于天-空-地一体化的重

大地质灾害隐患早期识别与监测预警[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(7): 957-966.

XU Qiang, DONG Xiujun, LI Weile. Integrated Space-Air-Ground Early Detection, Monitoring and Warning System for Potential Catastrophic Geohazards[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(7): 957-966.

[2] 许强. 对地质灾害隐患早期识别相关问题的认识与思考[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(11): 1651-1659.

XU Qiang. Understanding and Consideration of Related Issues in Early Identification of Potential Geohazards[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(11): 1651-1659.

[3] GUZZETTI F, CARRARA A, CARDINALI M, et al. Landslide Hazard Evaluation: A Review of Current Techniques and Their Application in a Multi-scale Study, Central Italy[J]. *Geomorphology*, 1999, 31(1): 181-216.

[4] 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.

[5] 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.

[6] 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.

[7] INNES J. Debris Flows[J]. *Progress in Physical Geography*, 7(4): 469-501.

[8] HONG Y, HIURA H, SHINO K, et al. The Influence of Intense Rainfall on the Activity of Large-Scale Crystalline Schist Landslides in Shikoku Island, Japan[J]. *Landslides*, 2005, 2(2): 97-105.

[9] 刘谢攀, 殷坤龙, 肖常贵, 等. 基于 $I-D-R$ 阈值模型的滑坡气象预警[J]. 地球科学, 2024, 49(3): 1039-1051.

LIU Xiepan, YIN Kunlong, XIAO Changgui, et al. Meteorological Early Warning of Landslide Based on $I-D-R$ Threshold Model [J]. *Earth Science*, 2024, 49(3): 1039-1051.

[10] SEGONI S, PICIULLO L, GARIANO S L. A Review of the Recent Literature on Rainfall Thresholds for Landslide Occurrence[J]. *Landslides*, 2018, 15(8): 1483-1501.

[11] 冯锦明, 赵天保, 张英娟. 基于台站降水资料对不

- 同空间内插方法的比较[J]. 气候与环境研究, 2004, 9(2): 261-277.
- FENG Jinming, ZHAO Tianbao, ZHANG Yingjuan. Intercomparison of Spatial Interpolation Based on Observed Precipitation Data[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2004, 9(2): 261-277.
- [12] 颜金彪, 段晓旗, 郑文武, 等. 顾及空间异质性的自适应IDW插值算法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(1): 97-104.
- YAN Jinbiao, DUAN Xiaoqi, ZHENG Wenwu, et al. An Adaptive IDW Algorithm Involving Spatial Heterogeneity [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(1): 97-104.
- [13] 曹杰, 肖云, 龙笛, 等. 联合重力卫星和水井资料监测华北平原地下水储量变化[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(5): 805-818.
- CAO Jie, XIAO Yun, LONG Di, et al. Combined Gravity Satellite and Water well Information to Monitor Groundwater Storage Changes in the North China Plain[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(5): 805-818.
- [14] O S, FOELSCHE U, KIRCHENGAST G, et al. Evaluation of GPM IMERG Early, Late, and Final Rainfall Estimates Using WegenerNet Gauge Data in Southeastern Austria [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017, 21(12): 6559-6572.
- [15] XU R, TIAN F Q, YANG L, et al. Ground Validation of GPM IMERG and TRMM 3B42V7 Rainfall Products over Southern Tibetan Plateau Based on a High-Density Rain Gauge Network[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2017, 122(2): 910-924.
- [16] 汤秋鸿, 张学君, 戚友存, 等. 遥感陆地水循环的进展与展望[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(12): 1872-1884.
- TANG QiuHong, ZHANG Xuejun, QI Youcun, et al. Remote Sensing of the Terrestrial Water Cycle: Progress and Perspectives[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(12): 1872-1884.
- [17] 李明, 杜继稳, 高维英. 陕北黄土高原区地质灾害与降水关系[J]. 干旱区研究, 2009, 26(4): 599-606.
- LI Ming, DU Jiwen, GAO Weiyang. Study on the Relationship Between Geological Disasters and Precipitation in the Loess Plateau in North Shaanxi Province [J]. *Arid Zone Research*, 2009, 26(4): 599-606.
- [18] 周剑, 汤明高, 许强, 等. 重庆市滑坡降雨阈值预警模型[J]. 山地学报, 2022, 40(6): 847-858.
- ZHOU Jian, TANG Minggao, XU Qiang, et al. Early Warning Model of Rainfall-Induced Landslide in Chongqing of China Based on Rainfall Threshold [J]. *Mountain Research*, 2022, 40(6): 847-858.
- [19] CHEN J, BRISSETTE F P. Stochastic Generation of Daily Precipitation Amounts: Review and Evaluation of Different Models [J]. *Climate Research*, 2014, 59(3): 189-206.
- [20] MA Z Q, ZHOU Y, HU B F, et al. Downscaling Annual Precipitation with TMPA and Land Surface Characteristics in China[J]. *International Journal of Climatology*, 2017, 37(15): 5107-5119.
- [21] LI B, TAO S, DAWSON R W. Relations Between AVHRR NDVI and Ecoclimatic Parameters in China [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2002, 23(5): 989-999.
- [22] IMMERZEEL W W, RUTTEN M M, DROOGERS P. Spatial Downscaling of TRMM Precipitation Using Vegetative Response on the Iberian Peninsula [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(2): 362-370.
- [23] JING W L, YANG Y P, YUE X F, et al. A Spatial Downscaling Algorithm for Satellite-Based Precipitation over the Tibetan Plateau Based on NDVI, DEM, and Land Surface Temperature [J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(8): 655.
- [24] JIA S F, ZHU W B, LÚ A, et al. A Statistical Spatial Downscaling Algorithm of TRMM Precipitation Based on NDVI and DEM in the Qaidam Basin of China [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(12): 3069-3079.
- [25] XU S G, WU C Y, WANG L, et al. A New Satellite-Based Monthly Precipitation Downscaling Algorithm with Non-Stationary Relationship Between Precipitation and Land Surface Characteristics [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 162: 119-140.
- [26] 景映红, 沈焕锋, 李星华, 等. 数据融合视角下的遥感参量空间降尺度[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(2): 175-189.
- JING Yinghong, SHEN Huanfeng, LI Xinghua, et al. Spatial Downscaling of Remote Sensing Parameters from Perspective of Data Fusion [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(2): 175-189.
- [27] TAPIADOR F J, TURK F J, PETERSEN W, et al. Global Precipitation Measurement: Methods, Datasets and Applications [J]. *Atmospheric Research*, 2012, 104: 70-97.
- [28] TANG G Q, MA Y Z, LONG D, et al. Evaluation of GPM Day-1 IMERG and TMPA Version-7

- Legacy Products over Chinese Mainland at Multiple Spatiotemporal Scales [J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 533: 152-167.
- [29] 金晓龙, 邵华, 张弛, 等. GPM 卫星降水数据在天山山区的适用性分析[J]. 自然资源学报, 2016, 31(12): 2074-2085.
- JIN Xiaolong, SHAO Hua, ZHANG Chi, et al. The Applicability Evaluation of Three Satellite Products in Tianshan Mountains [J]. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(12): 2074-2085.
- [30] 万宝峰, 李品良, 韩兵兵, 等. 基于卫星降雨数据的陇南地区的地质灾害降雨阈值研究[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2023, 54(2): 278-284.
- WAN Baofeng, LI Pinliang, HAN Bingbing, et al. Research on Rainfall Threshold of Geological Disasters in Longnan Region Based on Satellite Rainfall Data[J]. *Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2023, 54(2): 278-284.
- [31] BERIA H, NANDA T, SINGH BISHT D, et al. Does the GPM Mission Improve the Systematic Error Component in Satellite Rainfall Estimates over TRMM? An Evaluation at a Pan-India Scale [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017, 21(12): 6117-6134.
- [32] CHIKALAMO E E, MAVROULI O C, ETTEMA J, et al. Satellite-Derived Rainfall Thresholds for Landslide Early Warning in Bogowonto Catchment, Central Java, Indonesia [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2020, 89: 102093.
- [33] 丁明泽, 雍斌, 杨泽康. 全球降水观测计划多卫星联合反演降水产品的极端降水监测潜力研究[J]. 遥感学报, 2022, 26(4): 657-671.
- DING Mingze, YONG Bin, YANG Zekang. Extreme Precipitation Monitoring Capability of the Multi-satellite Jointly Retrieval Precipitation Products of Global Precipitation Measurement (GPM) Mission [J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2022, 26(4): 657-671.
- [34] 李欣欣, 张立新, 蒋玲梅. 山区地形对被动微波遥感影响的研究进展[J]. 国土资源遥感, 2011, 23(3): 8-13.
- LI Xinxin, ZHANG Lixin, JIANG Lingmei. Advances in the Study of Mountainous Relief Effects on Passive Microwave Remote Sensing [J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2011, 23(3): 8-13.
- [35] KIM S W, CHUN K W, KIM M, et al. Effect of Antecedent Rainfall Conditions and Their Variations on Shallow Landslide-Triggering Rainfall Thresholds in South Korea [J]. *Landslides*, 2021, 18(2): 569-582.
- [36] BRUNETTI M T, PERUCCACCI S, ROSSI M, et al. Rainfall Thresholds for the Possible Occurrence of Landslides in Italy [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2010, 10(3): 447-458.
- [37] 孙鹏, 胡磊, 胡玉乾, 等. 横断山区汶川县滑坡泥石流降雨致灾阈值研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2023, 59(2): 187-195.
- SUN Peng, HU Lei, HU Yuqian, et al. On Disaster Threshold of Landslide and Debris Flow Rainfall in Wenchuan County [J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2023, 59(2): 187-195.
- [38] 郭剑, 崔一飞. 滑坡-泥石流转化研究进展[J]. 工程地质学报, 2023, 31(3): 762-779.
- GUO Jian, CUI Yifei. An Overview of Landslide-Induced Debris Flow [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2023, 31(3): 762-779.
- [39] ROSSI M, KIRSCHBAUM D, VALIGI D, et al. Comparison of Satellite Rainfall Estimates and Rain Gauge Measurements in Italy, and Impact on Landslide Modeling [J]. *Climate*, 2017, 5(4): 90.
- [40] ROSSI M, LUCIANI S, VALIGI D, et al. Statistical Approaches for the Definition of Landslide Rainfall Thresholds and Their Uncertainty Using Rain Gauge and Satellite Data [J]. *Geomorphology*, 2017, 285: 16-27.
- [41] 蒋卓言. 强震后泥石流起动的降雨阈值演化规律及降雨模式响应研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2021.
- JIANG Zhuoyan. Study on the Evolution of Rainfall Thresholds and the Response of Rainfall Patterns for Post-seismic Debris Flows [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2021.
- [42] 徐宪立, 马克明, 傅伯杰, 等. 植被与水土流失关系研究进展[J]. 生态学报, 2006, 26(9): 3137-3143.
- XU Xianli, MA Keming, FU Bojie, et al. Research Review of the Relationship Between Vegetation and Soil Loss [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(9): 3137-3143.
- [43] FAN X M, SCARINGI G, KORUP O, et al. Earthquake-Induced Chains of Geologic Hazards: Patterns, Mechanisms, and Impacts [J]. *Reviews of Geophysics*, 2019, 57(2): 421-503.
- [44] GUO X J, CUI P, LI Y, et al. Intensity - Duration Threshold of Rainfall-Triggered Debris Flows in the Wenchuan Earthquake Affected Area, China [J]. *Geomorphology*, 2016, 253: 208-216.