

狄靖月,许凤雯,李焕连,等,2022.暴雨诱发恩施州地质灾害成因分析[J].气象,48(10):1321-1332. Di J Y, Xu F W, Li H L, et al, 2022. Cause of the geological hazards induced by rainstorm in Enshi Autonomous Prefecture[J]. Meteor Mon, 48(10): 1321-1332(in Chinese).

暴雨诱发恩施州地质灾害成因分析^{*}

狄靖月^{1,2} 许凤雯^{1,2} 李焕连³ 李宇梅^{1,2}
张国平⁴ 陈春利⁵ 方志伟⁵ 包红军^{1,2}

1 国家气象中心,北京 100081

2 中国气象局-河海大学水文气象研究联合实验室,北京 100081

3 中国气象局气象干部培训学院,北京 100081

4 中国气象局公共气象服务中心,北京 100081

5 中国地质环境监测院,北京 100081

提 要: 强降水是滑坡、泥石流等地质灾害的直接诱因,分析其与灾害的发生关系有着重要的意义。从 2020 年 7 月鄂西南恩施州连续降雨造成滑坡等地质灾害事件出发,分析了 7 月的 4 次强降水过程降水强度与持续时间特征关系,对比了恩施州近年来的地质灾害及致灾背景,并基于区域地质灾害潜在危险性和区域易损性特征,结合 5 km 空间分辨率、24 h 时效多源融合定量降水估测(QPE)驱动陆面水文模型,模拟了灾害过程的径流与土壤湿度特征,着重研究了 7 月第四次暴雨(7 月 15—19 日)诱发湖北省恩施州 8 个市(县)群发性滑坡等地质灾害的成因。结果表明,恩施州大部属于地质灾害高易发区,但该区域易损度相对较低,过程降水量 100 mm 以上,日雨量达到 50 mm 以上或小时雨量达到 10~30 mm,均有可能触发地质灾害,陆面水文过程模拟能较好地表征灾害的发生发展过程,而建立的过程 $I-D$ 曲线对恩施州地区未来的灾害预警有一定的指示作用。

关键词: 滑坡,地质灾害,成因分析

中图分类号: P429, P641

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2022.072202

Cause of the Geological Hazards Induced by Rainstorm in Enshi Autonomous Prefecture

DI Jingyue^{1,2} XU Fengwen^{1,2} LI Huanlian³ LI Yumei^{1,2} ZHANG Guoping⁴
CHEN Chunli⁵ FANG Zhiwei⁵ BAO Hongjun^{1,2}

1 National Meteorological Centre, Beijing 100081

2 CMA-HHU Joint Laboratory for Hydrometeorological Studies, Beijing 100081

3 CMA Training Centre, Beijing 100081

4 CMA Public Meteorological Service Centre, Beijing 100081

5 China Geological Environmental Monitoring Institute, Beijing 100081

Abstract: Geological hazards such as landslides and debris flows are usually caused by severe precipitation directly, so analyzing the correlation between geological hazards and severe precipitation is of great significance. In this paper, four continuous severe rainfall processes in July 2020 responsible for geological disaster events in Enshi Autonomous Prefecture, southwestern Hubei Province are analyzed, the relationships between rainfall intensity and duration are investigated, and the geological disasters and the disaster-caused

^{*} 国家自然科学基金项目(41871020、41775111、41875131)、国家重点研发计划(2018YFC01508202)、中国气象局气象干部培训学院科研项目(重 2021-010)和风云卫星应用先行计划(FY-APP-2021.010)共同资助

2021 年 6 月 30 日收稿; 2022 年 6 月 28 日收修定稿

第一作者:狄靖月,主要从事应用气象研究. E-mail: dijy@cma.gov.cn

background in recent years are compared. Based on the potential dangerous degree and regional vulnerability degree of geological disasters and combined with multi-source quantitative precipitation estimation (QPE) with 5 km spatial resolution and 24 h temporal resolution, the land-surface hydrological model is driven to simulate the runoff and soil moisture characteristics during the disaster process. The causes of cluster-occurring geological disasters induced by the fourth rainfall process from 15 to 19 July are emphatically analyzed. The results reveal that most areas of Enshi Autonomous Prefecture are of high potential dangerous degree but have low degree of vulnerability. The rainfall processes with accumulated precipitation over 100 mm, daily accumulated rainfall over 50 mm, or hourly rainfall with 10—30 mm can possibly trigger geological disasters in this region. The land-surface hydrological simulation can better represent the occurrence and development of disasters, while the *I-D* curve established in this paper can be used as an indicator for early warning in the concerned area.

Key words: landslide, geological hazard, cause analysis

引 言

地质灾害是我国影响范围最广、造成损失最大的自然灾害之一。目前,全球气候变暖,极端天气事件频发,泥石流、滑坡等地质灾害亦呈上升趋势,严重影响到人类生存环境和经济发展,各行各业对地质灾害气象预警服务提出更新、更高的要求。

近年来,国内外大力发展卫星、雷达融合地面观测降水技术(Hartke et al, 2020; 何爽爽等, 2018),将灾害模型与精细化格点降水耦合(Underwood and Schultz, 2004; 陈悦丽等, 2016),对洪水及次生灾害进行预警(Roder et al, 2017),并应用区域灾害监测预警系统对灾害进行评估(Gourley et al, 2012; Ren et al, 2010)。地质灾害气象预警研究主要包括两方面:一是基于地质灾害危险性评价研究,如陈曦炜等(2016)、徐勇等(2016)基于信息量模型评估了地质灾害风险易发性,苏鹏程等(2010)基于群发性灾害的地理特征差异,分析了地质灾害特征及其成因;二是基于灾害阈值的预警技术研究(Nikolopoulos et al, 2017),如崔鹏等(2003)研究了前期降雨对泥石流形成的作用,陈源井等(2013)分析了四川汶川震区的泥石流临界雨量变化特征,许凤雯等(2020)、杨寅等(2019)等从业务检验的角度研究了强降水引发的地质灾害发生过程。

2015年以来,格点化天气预报技术的发展有力地推动了地质灾害气象风险预警业务的发展(包红军等, 2021),而MICAPS 4.0、MESIS 2.0等一批业务系统的建设则有利于支撑国家级水文地质气象预警服务,地质灾害气象预报能力在精细化、智能化、

格点化方面取得了若干进展。然而,现有的地质灾害预警关键技术主要还是采用固定阈值法,与世界先进水平的动态临界阈值理念还存在较大差距。同时,对于缺资料和无资料地区的气象风险临界阈值技术短板,还没有好的解决方法,仅是基于灾害风险普查阈值技术的风险预警模型已很难满足业务服务需求。地质灾害预警技术的精细化和准确度仍有待进一步提升。技术的提升需要对大量的地质灾害事件进行研究与剖析,因此,充分了解灾害成因,对不同类型的降水过程引发的地质灾害进行有针对性的研究是提升预警技术及服务能力的最为基础的工作。

2020年汛期,整个长江流域降水异常偏多,持续的暴雨洪涝导致山区地质灾害激增。本文选取了湖北省西南部恩施州这一典型区域,对该区域7月的4次降雨过程,尤其是第四次(7月15—19日)极端强降雨诱发恩施州8个市(县)群发性地质灾害的过程进行了分析。此外,还对比了恩施州近年来的地质灾害及降水情况。结合降水强度与持续时间特征,本文从恩施州地质灾害易发性及区域易损性角度,探寻了灾害成因,并从水文过程模拟解析灾害发生机理,为提升强降水引发地质灾害的预警能力提供科技支撑。

1 研究区域及资料方法

1.1 资料及研究区域概况

选取湖北省恩施州作为研究区域,采用自然资源部地质环境监测院的2015—2020年的恩施州灾

情信息,进行灾害特征分析;采用国家气象中心 2015—2020 年的全国逾 2400 个国家站的日降水量数据,即每日全国 08 时(北京时,下同)和 20 时的 24 h 日降水量资料,2020 年 7 月 1—21 日的逾 5 万个气象自动观测站 1 h 加密雨量数据,进行致灾降水特征分析;同时,采用国家气象信息中心的定量降水估测数据(QPE:空间分辨率为 5 km,时间分辨率为 24 h)驱动灾害水文模型进行过程模拟;高程、高差和坡度取自全国 1:25 万的数字高程模型数据,岩石类型数据提取自全国 1:400 万地质环境数据,断层密度来源于全国 1:50 万数字地质图,分月的植被覆盖度数据来自国家气象中心,进行地质灾害危险度及易损性评价。

湖北省恩施州位于鄂西南,云贵高原东端,管辖恩施、利川 2 个市和建始、巴东、宣恩、咸丰、来凤和鹤峰 6 个县。同时,恩施州地处清江流域上游,属亚热带温湿季风型气候,流域西南部的咸丰地区,因受地层断裂陷落影响,海拔高度仅为 500 m 左右,构成鄂黔之间的天然通道,西南暖湿气流可长驱直入(陈桂亚和郭海晋,2001),雨量充沛,多年平均降雨量为 1400 mm 左右,降雨多集中在 5—9 月。

恩施州地势西高东低,属于中、低山区,区内地形落差大,西以齐岳山与乌江分界,分水岭高程为 1500~2000 m;东部河口高程不足海拔 200 m;南以武陵山支脉与澧水相隔,分水岭高程约为 1000~1500 m;北与长江三峡地区相邻,分水岭海拔高度为 1000~1900 m(陈桂亚和郭海晋,2001),中西部山地斜坡陡峻,河流切割深度大(常宏等,2014)。境内河道交错,流域落差 1070 m 左右(陈桂亚和郭海晋,2001)。林地主要分布在咸丰县、来凤县、恩施县、建始县和鹤峰县等山区,草地面积相对小,主要分布在利川市、巴东县等地,其中,鹤峰县、宣恩县部分地区总的植被覆盖率达 90% 以上(王璐瑶等,2016)。地层岩性主要分为:泥岩、页岩、粉砂岩、砂岩、板岩和灰岩等,岩土主要为红粘土、黄土以及软硬相间的岩层结构松散的岩和土(董丽青和杨丽雯,2017)。

由于植被发育,地表径流较少,大气降雨是坡体地下水的主要补给来源。恩施地区地下水活动频繁,其地下水对岩体的软化作用使得岩体强度减弱,岩土重量增加,易产生空隙水压力,还会产生对透水层的浮托作用。在强降雨作用下,滑体抗剪强度逐渐降低,稳定性逐渐减小,易导致滑坡体产生微小的

变形。从气象和地质条件上,恩施州属于地质灾害高易发区。恩施地区的滑坡规模以中小型为主,占绝大多数的为土质类滑坡,风化堆积土质是滑坡体的重要成分。灾害的发生主要与土壤层的深度、地形坡度、降雨等因素有关,另外还与人类活动有密切关系。

1.2 技术方法

1.2.1 地质灾害潜在危险度及易损度研究方法

暴雨诱发的地质灾害与降水、地理环境、水文地质条件密不可分,本文在降水分析基础上,采用地质灾害潜在危险度和区域易损度指标来分析山区地质灾害的易发性(李宇梅等,2020)。

地质灾害潜在危险度融合了多个因子来表现孕灾环境的灾害易发程度。本文采用信息量方法来进行地质灾害潜在危险度(易发程度)综合评价,选取高程、高差、坡度、岩石类型、断层密度和植被类型共 6 个地质环境因子分别计算单个地质环境影响因子信息量,计算公式如下:

$$I(X_i) = \ln \frac{N_i/N}{S_i/S} \quad (1)$$

式中: S 为研究区总单元; N 为研究区所含有的地质灾害总单元; S_i 为研究区内含有地质环境影响因子 X_i 的单元数; N_i 为分布在因素 X_i 内特定类别内的地质灾害单元数。

单个评价单元内的总信息量计算公式如下:

$$I_i = \sum_i^n I(X_i) = \sum_i^n \ln \frac{N_i/N}{S_i/S} \quad (2)$$

式中: I_i 为评价单元总的信息量值, n 为参评因子数,其他参数同前。

将总信息量值 I_i 通过归一化处理来表示潜在危险度 P_h ,取值在 0~1,表征孕灾环境的地质灾害潜在危险度。

灾害易损度指用于量化表征承灾体潜在损失的大小和抵抗灾害的能力,用以下公式表示:

$$V = \sqrt{\frac{(G+L)/2+D}{2}} \quad (3)$$

式中: V 为易损度(0~1), G 为单位面积国内生产总值(单位:万元·km⁻²), L 为单位面积土地利用类型赋值, D 为人口密度(单位:人·km⁻²), G 、 L 、 D 均需归一化后取值。土地利用类型分为城乡工矿居民用地、耕地、林地、草地、水域、未利用土地等 6 类,分别赋值 1.0、0.8、0.6、0.4、0.2、0.0。

潜在危险度 P_h 和易损度 V 取值均介于 0~1, 分别按 0、0.2、0.4、0.6、0.8 划分为 5 个等级区间, 潜在危险度分别为极低危险、低危险、较高危险、高危险、极高危险; 易损度分别为极低易损、低易损、较高易损、高易损和极高易损。

1.2.2 CREST 水文过程模拟

本文采用 CREST (Coupled Routing and Excess Storage) 分布式水文模型来进行灾害水文过程模拟, 该模型由美国俄克拉何马大学水文气象遥感实验室和美国航空航天局 SERVIR 项目组共同开发, 于 2011 年推出 1.0 版 (Wang et al, 2011), 模型能够基于初始水文流量、流向、流域蒸散发量及格点化定量降水估测产品 (QPE), 高效稳健地输出未来 10 d、空间尺度 5 km、时间尺度 1 h 的土壤湿度、径流等产品, 重现流域的水文过程 (甘衍军等, 2017)。该模型基本原理为降水经过植被截留、蒸散发、地面径流、土壤下渗、壤中流等过程, 沿着河网汇集到流域出口断面, 模型根据新安江模型的变化下渗曲线, 将全流域划分为若干单元网格, 对每个网格进行产流和汇流计算。

CREST 模型的适用性已经得到一定程度的验证。如 Wang et al (2011) 将 CREST 模型用于东非肯尼亚境内 Nzoia 流域的洪水预报, 对模型参数进行了率定, 并对率定后的模型模拟效果进行了检验, 证明了 CREST 模型能够高效地重现该流域的实测流量过程。Wu et al (2012) 利用 TMPA 降水数据驱动 CREST 模型, 评估了模型在 1998—2010 年的全球洪水事件模拟方面的能力, 结果表明 CREST

能够很好地再现洪水事件的发生、演进和消退过程。Xue et al (2013) 将 CREST 模型用于不丹山区流域的水文模拟, 对 TMPA 的两种降水产品进行评估, 证明了模型在山区流域的径流模拟方面有着较高的技能。该模型在我国长江、珠江和淮河等流域强降雨灾害模拟过程中也有应用。其中, 在长江全流域重要水文站水文模拟系数检验中, 纳什-萨特克利夫效率系数为 -0.69, 相关系数为 0.372, 说明可信度较高。同时, 在 2016 年 4 月云南怒江傈僳族自治州、迪庆藏族自治州、红河哈尼族彝族自治州 26 起滑坡、崩塌、泥石流等中小型地质灾害过程, 在 5 月福建三明市泰宁县特大型泥石流灾害过程, 以及在 2020 年北京“7·16”暴雨诱发地质灾害的过程模拟应用中, 模拟的流量能较好地反映灾害的发生发展过程 (许凤雯等, 2020)。

2 恩施州地质灾害及致灾降水特征分析

2015—2020 年, 恩施州发生地质灾害总数 289 起, 造成死亡和失踪 22 人, 总经济损失达 15 314.2 万元, 其中, 滑坡 220 起、崩塌 47 起、泥石流 14 起、地面塌陷 8 起。灾害发生次数最多的是 2016 年, 2020 年次之, 但经济损失最严重的是 2020 年, 2016 年次之。在每年发生的地质灾害中, 7 月发生灾害较多。尤其是在 2020 年, 全年 66 起灾害中有 41 起集中发生在 7 月 (表 1)。因此, 本文重点研究 2020 年 7 月暴雨诱发恩施州地质灾害的特征及成因。

表 1 2015—2020 年恩施州地质灾害

Table 1 Geological hazards in Enshi Autonomous Prefecture from 2015 to 2020

年份	灾害总数/起	死亡失踪/人	经济损失/万元	滑坡/起	崩塌/起	泥石流/起	地面塌陷/起	7 月灾害/起
2015	31	9	1286	16	9	5	1	0
2016	151	3	5247	122	19	5	5	65
2017	27	3	831	16	9	2	0	9
2018	7	2	753	7	0	0	0	3
2019	7	0	124	3	3	1	0	1
2020	66	5	7073.2	56	7	1	2	41
合计	289	22	15314.2	220	47	14	8	119

2.1 降雨引发地质灾害过程

2020 年 6 月, 恩施州入汛, 连续强降水导致土壤含水量高, 地质环境脆弱。7 月中上旬, 恩施州又先后经历了 2 日、4—8 日、11—12 日、15—19 日共四次强降水过程, 区域平均面雨量分别为 41.6、161.7、40.0、200.5 mm。其中, 前三次累计降水 (图 1a) 达

100 mm 以上, 恩施州中南部地区 250 mm 以上, 鹤峰局地过程累计达 400 mm 以上。强降水使得恩施州各地土壤饱和, 地质活动活跃, 地质灾害事件进入高频期。而第四次 (图 1b) 强降水过程是此次恩施州群发性灾害及特大型滑坡的直接诱因, 单次过程累计降水量达 250 mm 以上。

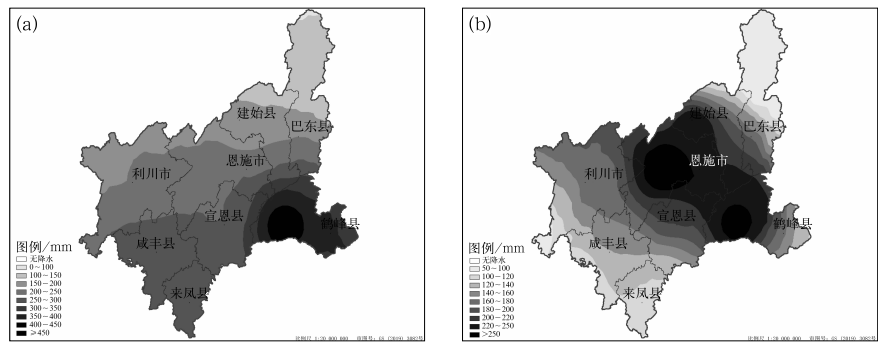


图 1 2020 年 7 月(a)1—14 日,(b)15—19 日过程降水量

Fig. 1 Process precipitation in Enshi Autonomous Prefecture (a) from 1 to 14, (b) from 15 to 19 July 2020

降雨过程共诱发 40 起地质灾害,其中 15 起是受前三次降雨过程影响发生,22 起是受第四次降雨过程影响,集中性强、过程时间短、灾害数量多是第四次降雨诱发地质灾害过程中最为突出的特点。因此,本文主要对第四次降雨过程引发的群发性灾害事件进行分析。22 起灾害从规模上看,以小型滑坡灾害为主的 17 起、中型滑坡 4 起、特大型滑坡 1 起(特大型滑坡是指体积 $>10\times 10^6\text{ m}^3$,直接经济损失 >1000 万元,直接威胁人数 >500 人的滑坡);分布区域主要位于恩施市、利川市、来凤县和鹤峰县,其中中型以上灾害均分布在利川和恩施市;灾害发生日期多集中在 7 月 17 日,发生时间多在凌晨(图 2)。7 月 18 日,恩施州恩施市屯堡乡马者村沙子坝出现变形、地面下沉等现象,19 日出现滑坡现象,20 日滑坡体加剧。21 日 05 时左右,屯堡乡马者村沙子坝出现特大滑坡(地处清江河谷),约 150 万 m^3 泥土滑入清江,大量泥沙石块垮塌进清江河道

中,堵塞形成堰塞湖,伴随清江上游水位快速上涨。

2.2 致灾累计降水特征

地质灾害的发生与灾害前期累计降水密不可分。2015—2020 年,恩施州 6 月 1 日至 7 月 20 日同期累计降水情况详见表 2。从表 2 中可以看出,2020 年的累计降水量为 847.9 mm,超过 2016 年的 654.0 mm,排第一位,相较于近 30 年(1991—2020 年)降水量气候平均值,历史距平百分率为 114.8%;且单站最大日降水量发生在 7 月 17 日,达到 191.6 mm,仅次于 2016 年的 218.7 mm,该站位于恩施市,与 18 日开始的特大型滑坡灾害有时间对应关系。结合 2015—2020 年恩施州地质灾害情况(表 1)和单站最大日降水及累计降水量分析(表 2)表明,恩施州降水量的大小、持续时间与灾害的发生数量及规模有直接关系。

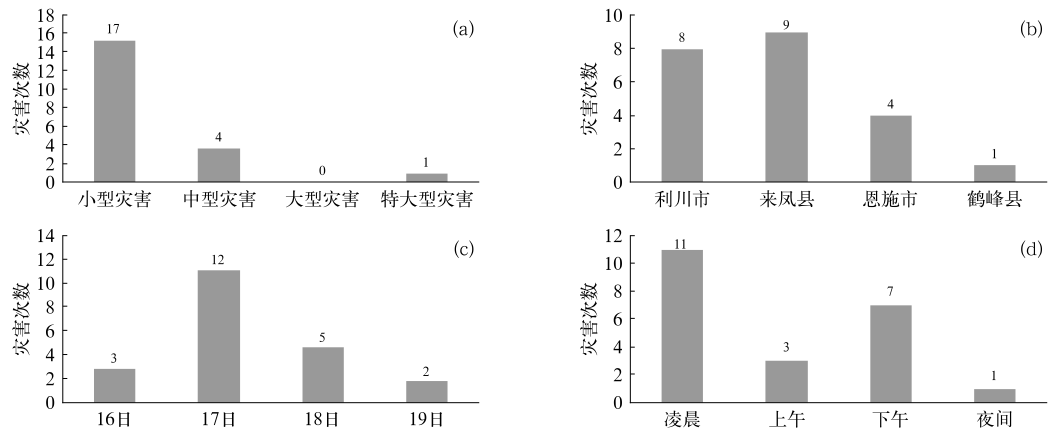


图 2 2020 年 7 月 16—19 日恩施州地质灾害分布

(a)灾害等级,(b)灾害分布区域,(c)灾害发生日期,(d)灾害发生时间

Fig. 2 Distribution of geological disasters in Enshi Autonomous Prefecture from 16 to 19 July 2020

(a) grade of disasters, (b) distribution of disasters, (c) date of disasters, (d) time of disasters

表 2 恩施州 2015—2020 年 6 月 1 日至 7 月 20 日累计降水统计
Table 2 Statistics of accumulated precipitation in Enshi Autonomous Prefecture
between 1 June and 20 July from 2015 to 2020

年份	累计 降水量/mm	降水量气候 平均值/mm	距平 百分率/%	累计降水 量排位	单站最大 日降水量/mm	单站最大日降水量 出现时间/(月/日)	单站最大日降 水量出现站点
2020	847.90	394.8	114.8	1	191.6	7/17	恩施
2019	282.7	394.8	-28.4	5	85.0	6/21	鹤峰
2018	278.0	394.8	-29.6	6	96.0	6/19	巴东
2017	501.5	394.8	27.0	3	135.2	7/9	鹤峰
2016	654.0	394.8	65.7	2	218.7	7/19	建始
2015	356.5	394.8	-9.7	4	111.2	6/30	建始

2015—2020 年,恩施州 8 个市(县)站 6 月 1 日至 7 月 20 日的暴雨日数之和分别为 2015 年 9 d, 2016 年 24 d, 2017 年 22 d, 2018 年 8 d, 2019 年 4 d, 2020 年 45 d, 以 2020 年暴雨及以上日数出现次数最多,比暴雨日数排第二的 2016 年多了近 1 倍(表 3);恩施和利川市,建始、巴东、宣恩、咸丰、来凤、鹤峰县,2015—2019 年平均暴雨日数分别为

2.6、0.6、1.6、1.4、1.0、1.2、2.0 和 3.0 d。2020 年,除巴东县暴雨日数明显较往年平均略偏少外,其余各市(县)暴雨日数均明显大于往年平均。结合 2020 年 6 月 1 日至 7 月 20 日恩施州累计降水量最大,暴雨日数最多,但单日最大降水量及灾害发生次数均次于 2016 年,说明强降水的持续时间对灾害发生的影响小于日降水极端性对灾害发生的影响。

表 3 恩施州 2015—2020 年 6 月 1 日至 7 月 20 日暴雨及以上日数统计(单位:d)
Table 3 Statistics of days of heavy rainfall in Enshi Autonomous Prefecture
between 1 June and 20 July from 2015 to 2020 (unit: d)

地点	2020 年	2019 年	2018 年	2017 年	2016 年	2015 年	2015—2019 年平均
巴东县	1	0	2	3	1	1	1.4
利川市	4	1	0	0	2	0	0.6
建始县	7	0	0	3	4	1	1.6
恩施市	5	2	0	6	4	1	2.6
咸丰县	4	0	1	2	2	1	1.2
宣恩县	5	0	0	1	2	2	1.0
鹤峰县	13	1	2	5	6	1	3.0
来凤县	6	0	3	2	3	2	2.0

2.3 致灾日降水特征

前期累计降水为地质灾害的发生提供不稳定条件,临近灾害前的日强降水则预示着灾害即将发生。针对恩施州 7 月第四次降水过程的 22 起地质灾害,对灾害前的日降水[市(县)站所在位置 20 时观测降水]进行分析,7 月 15—19 日降水引发的恩施州 4 个灾害市(县)中,恩施市和利川市的日雨量极值分别为 191.6 mm 和 89.0 mm,均达大暴雨和暴雨量级。恩施市和利川市的地质灾害开始发生时间均是在日降水量明显增大的当日或第二日,灾害发生次数最多的时间段也集中在日降水极值发生的当日或第二日。这符合突发性强降水致灾的雨量特点。鹤

峰县受两次降水过程叠加影响,7 月 5—8 日过程和 15—19 日过程,日雨量分别达到了 101.6 mm 和 111.9 mm。灾害的发生时间在日降雨极值发生的第二日,既满足致灾需要的降水时间持续性,又满足大暴雨量级的降水触发致灾特点。来凤县也是受两次降水过程叠加影响,在 5—8 日的降水过程中,日雨量已达到 156 mm;在 15 日开始的再一次降雨过程中,日雨量达到 50 mm 以上,灾害发生次数最多的时间段在日雨量再一次达极值的当日。这符合持续性的降水导致周边灾害发生的条件(图 3),恩施州 4 个市(县)中,日雨量至少达到 50 mm 以上,灾害发生频次才明显增多。

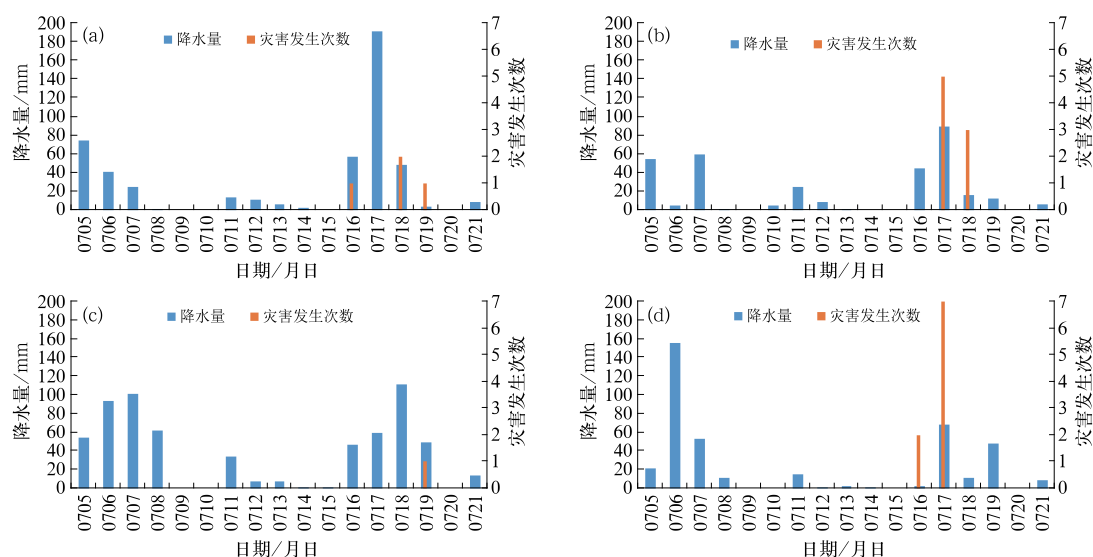


图 3 2020 年 7 月 5—21 日恩施州地质灾害区域日降水量

(a)恩施市,(b)利川市,(c)鹤峰县,(d)来凤县

Fig. 3 Daily precipitation of geological hazard areas in Enshi Autonomous Prefecture from 5 to 21 July 2020

(a) Enshi City, (b) Lichuan City, (c) Hefeng County, (d) Laifeng County

2.4 致灾雨强特征

将 2020 年 7 月 15—19 日的 22 起地质灾害分别提取小型地质灾害和中型以上地质灾害发生前 24 h 逐小时雨量,分析触发灾害的雨强特征。在 17 起小型地质灾害中,大部分呈现出越接近灾害发生的时间,雨强越大的现象。此外,还可以看出,灾害的发生对雨强的响应速度很快,且较大雨强主要分布在灾害前 0~14 h,临近灾害前的 4~5 h,大多致灾雨强可达到 $30 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 以上,最高达 $80 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ (图 4a);而中型以上地质灾害共 5 起(图 4b),灾害前雨强分布特征与小型地质灾害雨强分布相反,即越临近灾害发生,雨强总体减小。灾前 12~24 h 雨强能达到约 $10 \sim 30 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,相比小型地质灾害,触发雨强普遍偏小,但降水一直持续,灾害一般发生在最大雨强出现的 12 h 后。由此可见,较大规模的地质灾害,对降水响应有一定的延迟性,一般是由较强的持续性降水触发,经历一段时间的地质形变的缓慢过程;而小型的地质灾害,雨强达 $30 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 以上数小时内即可发生,是对降水迅速响应的过程。

2.5 1 h 时间尺度降水型滑坡发生 $I-D$ 曲线

在恩施州的灾害信息中,选取 7 月灾害发生前

的平均雨强达 $5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 以上的灾害事件,作为直接降水触发型滑坡灾害样本(其余的认为非直接降雨型灾害),开展 1 h 时间尺度的滑坡临界降水研究,以滑坡发生前的小时降水强度及降水持续时间分布为基础,以连续 3 h 雨量小于 0.5 mm 作为降水场次的分割点(倪化勇,2016 年)。根据降水场次划分,确定了 20 次灾害事件,对降水持续时间(D)及强度(I)分布进行 $I-D$ 曲线拟合,得到此次过程的地质灾害预警拟合曲线,可预测该区域内一定降水历时和降水强度下是否易发生地质灾害。拟合结果(图 5)具备幂函数特征,滑坡灾害前降水多持续 5~30 h,且随着持续时间越长,降水的平均雨强越小。 $I-D$ 曲线对该区域地质灾害有一定警示作用。

3 致灾水文地质特征分析

3.1 恩施州地质灾害危险度及易损度

根据 2020 年 7 月降雨引发恩施州发生的 40 起地质灾害,叠加地质灾害潜在危险度(图 6a)可知,在较高潜在危险度与高潜在危险度的过渡地带,地质灾害分布数量较多。40 起地质灾害主要分为两部分,一部分主要位于恩施州北部的利川市、恩施市、建始县境内,与地形的起伏变化有关;另一部分

位于来凤县和鹤峰县境内,对应极高的潜在危险度等级区。经统计,47.5%的灾害点发生于恩施州地

质灾害潜在危险度较高区域,47.5%的灾害点处于高危险度区,2%属于极高危险度区域。然而,40起

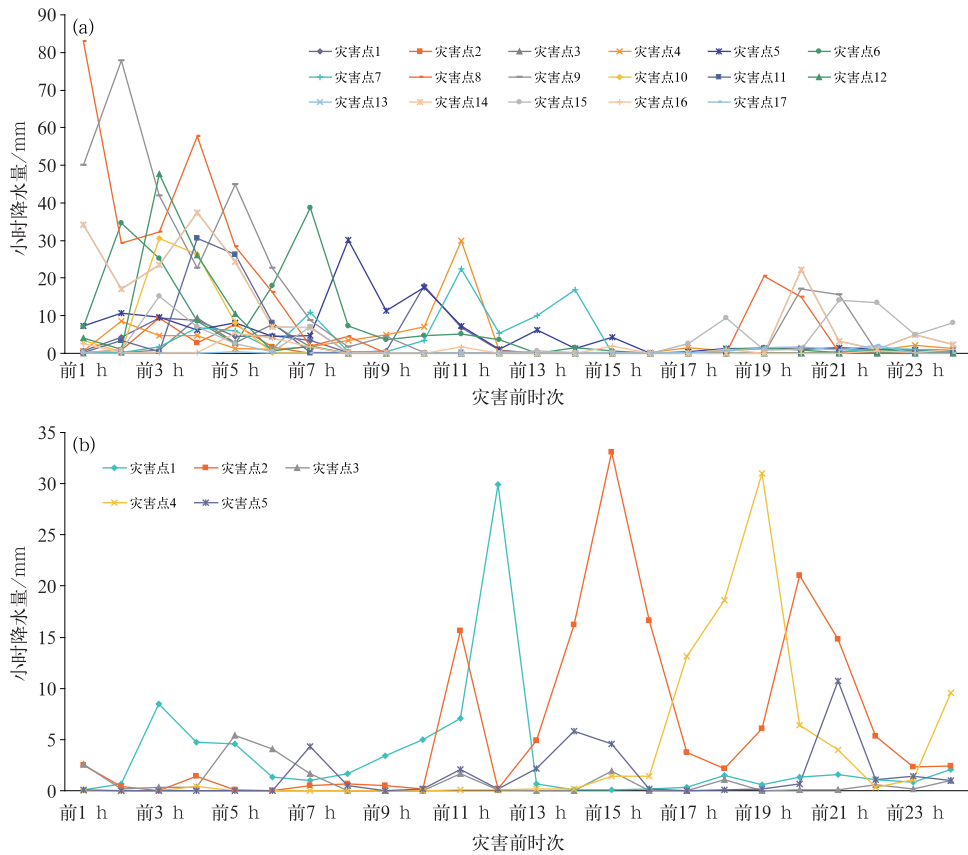


图 4 2020 年 7 月恩施州不同规模灾害发生前小时降水量

(a)小型灾害点,(b)中型及特大型灾害点

Fig. 4 Rainfall intensity of different disaster scales in Enshi Autonomous Prefecture

(a) small geological hazards, (b) medium and extra-large geological hazards in July 2020

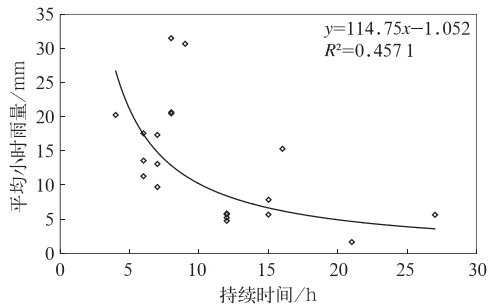


图 5 2020 年 7 月恩施州降水过程平均小时雨量及降水持续时间散点及回归拟合线

Fig. 5 The scatter diagram of hourly average precipitation and duration and the fitting curve in Enshi Autonomous Prefecture during the July 2020 rainfall process

地质灾害虽然具有较高的潜在危险度,但 72.5%的灾害发生在低易损度的区域(图 6b),22.5%灾害点处于较高易损度区域,仅 5%处于高易损度区域。因此,本次群发性的地质灾害虽然还存在特大泥石流事件,但总体造成的经济损失不大,影响人数多在 20 人以内,灾害经济损失多在 40 万元以内。

3.2 致灾水文过程模拟

基于 5 km 空间分辨率、24 h 时效的格点化定量降水估测数据(QPE),驱动 CREST 水文模型模拟此次致灾过程,根据模式输出土壤相对湿度(SM)、流量(R)、地表径流深(RS)和地下径流深(RI)结果,对降水造成的陆面水文过程进行分析。

土壤相对湿度指土壤含水量相对于饱和水量的百分比,能充分表征土壤的干湿程度;流量表示单位时间通过某一河流断面的水的体积;地表径流深则用来表示某一给定时段径流总量除以相应集水面积所得到的值,即地表层的水流深度;地下径流深则用来表示地下层的水流深度。2020 年 7 月 15—19 日的降水过程历时 5 d,群发性灾害是从 16 日开始,17 日大范围爆发,18—19 日逐渐减少。因此,本文以 15—17 日的水文要素特征来分析此次地下水文过程的变化,对灾害发生水文过程进一步分析。具体如下:

土壤相对湿度变化能反映土体的不稳定变化。根据土壤相对湿度变化情况(图 7),7 月 15 日,在群发性地质灾害发生前夕,恩施州东部土壤相对湿度

为 30%~50%,恩施市、利川市、咸丰县、来凤县西部等地相对湿度基本达到 50%~70%;16—17 日,恩施州土壤相对湿度全面达到 70%左右,土壤饱和度较高,具备灾害发生的土壤湿度条件。从 CREST 水文模型模拟的地下径流深变化图看,地下径流深整体上变化幅度较小,恩施州南部部分地区维持在 $40 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ (图 8),这表明地下水文过程活动不活跃。CREST 水文模型模拟的地表径流明显变大,且具有自西向东逐渐传输的趋势,从 16 日开始,恩施市及其附近的地表径流从 $10 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 逐渐增加至 $60 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,17 日迅速增加至 $80 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,且灾害点与地表径流深的增大区域位置匹配较好(图 9)。由此可见,本次灾害过程的降水强度较大,雨水来不及渗入土壤,迅速在地面形成超渗产流,使

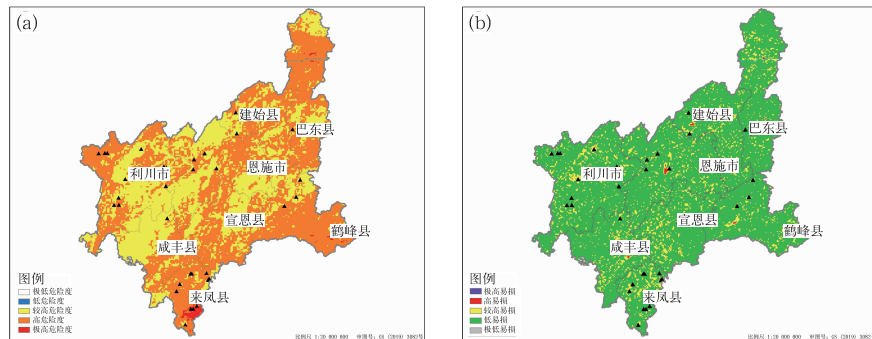


图 6 2020 年 7 月湖北恩施州(a)地质灾害潜在危险度等级,(b)区域易损度等级
(三角形表示灾害点分布)

Fig. 6 (a) Potential dangerous degree of disasters and (b) vulnerability degree of disasters in Enshi Autonomous Prefecture in July 2020
(Triangle shows the distribution of disaster point)

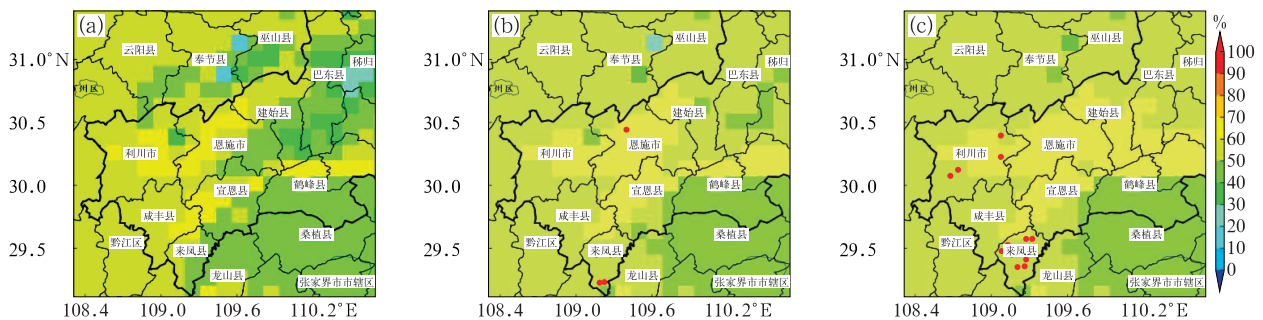


图 7 2020 年 7 月(a)15 日,(b)16 日,(c)17 日 CREST 水文模型模拟恩施州土壤相对湿度
(红点表示灾害点分布)

Fig. 7 The CREST simulated relative soil moisture in Enshi Autonomous Prefecture
on (a) 15, (b) 16, (c) 17 July 2020
(Red dot shows the distribution of disaster point)

得地表径流深指标表现活跃,地表径流深越来越大,与土壤内的不稳定因素相结合,进而为大范围形成滑坡等地质灾害提供有利条件。流量值的变化最能体现地表水文特征。CREST 水文模型模拟的流量变化,伴随着 15 日降水过程开始,流量迅速增大,15—16 日的流量最小增幅都达到 $50 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 以上,17 日的流量增加到 $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,整个过程几乎是跳跃式增长,且流量明显增大区域主要位于恩施州的恩施市、利川市、来凤县和鹤峰县,呈西南向东北的两条流量大值带,与本次群发性的灾害分布区域

吻合(图 10)。

7 月,湖北恩施州的前三次强降水过程,使得恩施州土壤含水量增大,地质条件出现不稳定因素,岩体内部出现碎裂结构。由于岩土体成分特质,风化后在山体表面堆积,经长时间雨水浸泡,为滑坡提供物质条件,易形成位移并伴引发泥石流。15 日开始的第四次强降水,降水强度大,土壤湿度迅速增加,边坡失稳,形成超渗产流,水流顺着斜坡运动产生坡面流,并在地面低洼处形成汇流,产汇流过程产生滑移和弯曲等变形机制形成下垫面拉裂,导致滑坡体

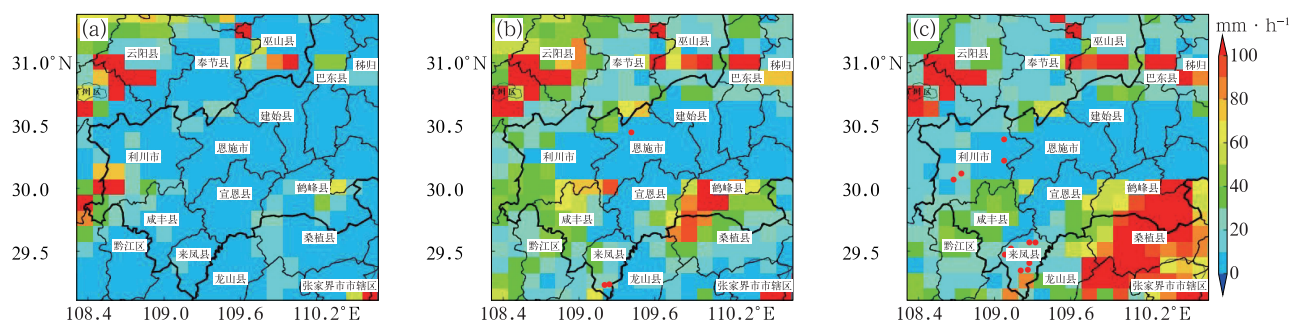


图 8 同图 7,但为地下径流深

Fig. 8 Same as Fig. 7, but for the subsurface runoff depth

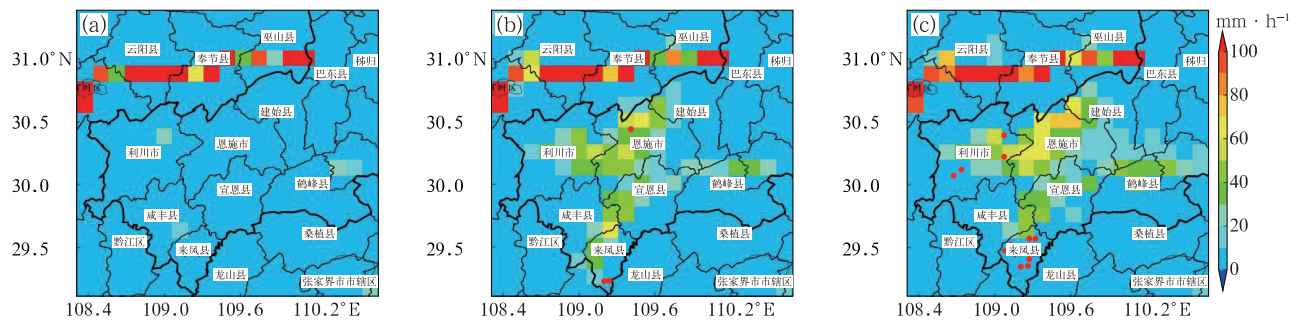


图 9 同图 7,但为地表径流深

Fig. 9 Same as Fig. 7, but for the surface runoff depth

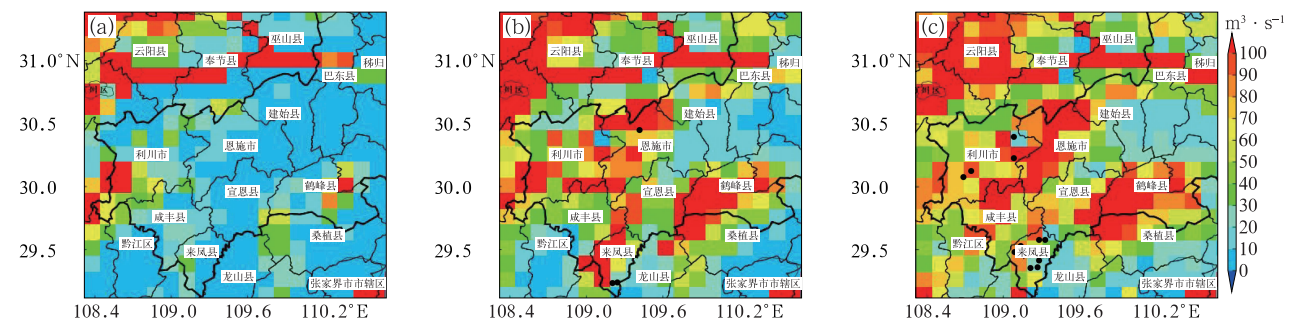


图 10 同图 7,但为流量

Fig. 10 Same as Fig. 7, but for the discharge

产生位移。因此,灾害发生首先是基于连续的过程性强降水、临近的暴雨诱发,同时与该区域处于山区,地形起伏大,土体多为沉积岩,易形成软弱面进而形成滑坡面有关。这是一次典型的持续性强降水引发的地质灾害过程。

4 结论与讨论

本文对鄂西南地区恩施州2020年7月降水过程引发的地质灾害进行分析,结果表明:

(1)恩施州致灾降水强度及持续时间与灾害发生规模及数量有明显的对应关系,降水极端性因子比持续时间因子更易引发地质灾害。小型灾害受临近降水影响较大,是对强降水迅速响应的过程;中型以上灾害在强降水发生后略有滞后效应,是由持续较强降水触发,经历一段时间的地质形变的缓慢过程。过程降水量100 mm以上,日雨量达50 mm以上或小时雨量达10~30 mm,有可能触发地质灾害。通过过程 $I-D$ 曲线拟合发现,灾害一般发生在降水开始后的5~30 h内,灾害点分布具备幂函数特征,可作为该区域同类型降水引发灾害的阈值参考。

(2)恩施州的大部分地区处于地质灾害潜在危险度较高到高的区域,南部的部分地区极高。虽然恩施州处于地质灾害高潜在危险度中,但该区域下垫面的易损度普遍较低,因此恩施州易发生地质灾害,但总体规模较小,经济损失相对较少。

(3)灾害过程的水文模拟结果显示,临近灾害发生,土壤湿度逐渐由30%增加到70%,地表径流从 $10 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 增加至 $60 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,17日迅速增加至 $80 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,而同时对应的地下径流增幅却较小。由此可见,此次地质灾害发生过程主要是降水强度过大,形成超渗产流引起地表径流迅速增长的过程;流量值变化最能反映此次地质灾害过程的产汇流特征,随着降水的开始,流量呈现大幅增加,最小增幅都达到 $50 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 以上,呈跳跃式增长,且流量明显增大区域主要位于恩施州的恩施市、利川市、来凤县和鹤峰县,与本次群发性的灾害分布区域较为吻合,这说明流量指标可以较好地表现灾害的发生发展。

此次降水过程的致灾因子及水文要素特征均对地质灾害的发生有较好的指示作用,可作为该区域同类型的降水致灾过程的参考,然而对于其他类型

的降水致灾适用性,还需要进一步研究。同时,本次过程模拟水文要素对承载体的地表部分表现较好,对承载体内部的变化过程模拟的精细化程度不够。因此,精细化、格点化的土壤含水量估测数据可作为水文模拟的输入端,为今后的地质灾害发生发展过程总结进行补充。

参考文献

- 包红军,张恒德,许凤雯,等,2021.国家级水文气象预报业务技术进展与挑战[J].气象,47(6):671-684. Bao H J, Zhang H D, Xu F W, et al, 2021. Progress and challenge of national level operational technology for hydrometeorological forecasting[J]. Meteor Mon, 47(6): 671-684(in Chinese).
- 常宏,韩会卿,章昱,等,2014.鄂西清江流域滑坡崩塌致灾背景及成灾模式[J].现代地质,28(2):429-437. Chang H, Han H Q, Zhang Y, et al, 2014. Formation background and regular pattern of avalanches and landslides of Qingjiang River Basin in western Hubei Province[J]. Geoscience, 28(2): 429-437(in Chinese).
- 陈桂亚,郭海晋,2001.清江流域水文特性概述[J].长江职工大学学报,18(1):29-31. Chen G Y, Guo H J, 2001. A summary of the water regime in the Qingjiang Valley[J]. J Changjiang Vocat Univ, 18(1): 29-31(in Chinese).
- 陈曦炜,裴志远,王飞,2016.基于GIS的贫困地区降雨诱发型地质灾害风险评估——以湖北省恩施州为例[J].地球信息科学学报,18(3):343-352. Chen X W, Pei Z Y, Wang F, 2016. GIS-based assessment of rainstorm-induced geological hazards risk in Enshi Autonomous Prefecture[J]. J Geo-Inf Sci, 18(3): 343-352(in Chinese).
- 陈源井,余斌,朱渊,等,2013.地震后泥石流临界雨量变化特征——以汶川地震区小岗剑沟为例[J].山地学报,31(3):356-361. Chen Y J, Yu B, Zhu Y, et al, 2013. Characteristics of critical rainfall of debris flow after earthquake: a case study of the Xiaogangjian Gully[J]. J Mt Sci, 31(3): 356-361(in Chinese).
- 陈悦丽,陈德辉,李泽椿,等,2016.降雨型滑坡的集合预报模型及其初步应用的试验研究[J].大气科学,40(3):515-527. Chen Y L, Chen D H, Li Z C, et al, 2016. An ensemble prediction model for rainfall-induced landslides and its preliminary application[J]. Chin J Atmos Sci, 40(3): 515-527(in Chinese).
- 崔鹏,杨坤,陈杰,2003.前期降雨对泥石流形成的贡献——以蒋家沟泥石流形成为例[J].中国水土保持科学,1(1):11-15. Cui P, Yang K, Chen J, 2003. Relationship between occurrence of debris flow and antecedent precipitation: taking the Jiangjia Gully as an example[J]. Sci Soil Water Conserv, 1(1): 11-15(in Chinese).
- 董丽青,杨丽雯,2017.恩施州滑坡灾害的成因机理及评价[J].山西师范大学学报(自然科学版),31(2):94-99. Dong L Q, Yang L W, 2017. Genetic mechanism and evaluation of landslide hazards in Enshi Prefecture[J]. J Shanxi Norm Univ (Nat Sci Ed), 31(2): 94-99(in Chinese).

- 甘衍军,徐晶,赵平,等,2017.暴雨致洪预报系统及其评估[J].应用气象学报,28(4):385-398. Gan Y J, Xu J, Zhao P, et al, 2017. Introduction and evaluation of a rainstorm-caused flood forecasting system[J]. J Appl Meteor Sci, 28(4):385-398(in Chinese).
- 何爽爽,汪君,王会军,2018.基于卫星降水和WRF预报降水的“6.18”门头沟泥石流事件的回报检验研究[J].大气科学,42(3):590-606. He S S, Wang J, Wang H J, 2018. Hindcast study of “6.18” Mentougou debris-flow event based on satellite rainfall and WRF forecasted rainfall[J]. Chin J Atmos Sci, 42(3):590-606(in Chinese).
- 李宇梅,杨寅,狄靖月,等,2020.全国地质灾害气象风险精细化网格预报方法及其应用[J].气象,46(10):1310-1319. Li Y M, Yang Y, Di J Y, et al, 2020. Meteorological risk assessment method of geological disaster in China and its mesh refinement application [J]. Meteor Mon, 46(10):1310-1319(in Chinese).
- 倪化勇,2016.泥石流发生雨型响应及其临界降雨条件[D].成都:成都理工大学. Ni H Y, 2016. Influence of rainfall patterns on debris flow initiation and critical rainfall condition[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology(in Chinese).
- 苏鹏程,韦方强,顾林康,等,2010.四川省德昌县群发性泥石流的特征和成因[J].山地学报,28(5):593-606. Su P C, Wei F Q, Gu L K, et al, 2010. Characteristic and causes of group-occurring debris flow in Dechang County, Sichuan Province[J]. J Mt Sci, 28(5):593-606(in Chinese).
- 王璐瑶,王宏志,徐新良,等,2016.鄂西南地区近期植被覆盖度时空变化特征及原因分析[J].湖北农业科学,55(17):4514-4519. Wang L Y, Wang H Z, Xu X L, et al, 2016. Analysis on spatial-temporal characteristics and driving force of vegetation coverage changes in the southwest of Hubei Province during recent years [J]. Hubei Agric Sci, 55(17):4514-4519(in Chinese).
- 许风雯,狄靖月,李宇梅,等,2020.北京“7·16”暴雨诱发地质灾害成因分析[J].气象,46(5):705-715. Xu F W, Di J Y, Li Y M, et al, 2020. Cause analysis of the geological hazards induced by the 16 July 2018 rainstorm in Beijing[J]. Meteor Mon, 46(5):705-715(in Chinese).
- 徐勇,连志鹏,李德营,等,2016.鄂西南地区五峰县凉风洞滑坡灾害风险分析[J].长江科学院院报,33(10):51-56. Xu Y, Lian Z P, Li D Y, et al, 2016. Risk analysis of Liangfengdong landslide in Wufeng County, Southwest Hubei Province[J]. J Yangtze River Sci Res Inst, 33(10):51-56(in Chinese).
- 杨寅,包红军,彭涛,2019.台风“鲇鱼”强降水引发的地质灾害气象风险预警检验与分析[J].暴雨灾害,38(3):221-228. Yang Y, Bao H J, Peng T, 2019. Verification and analysis of meteorological early warning of geological hazards during precipitation of Typhoon “Megi”[J]. Torr Rain Dis, 38(3):221-228(in Chinese).
- Gourley J J, Erlingis J M, Hong Y, et al, 2012. Evaluation of tools used for monitoring and forecasting flash floods in the United States[J]. Wea Forecasting, 27(1):158-173.
- Hartke S H, Wright D B, Kirschbaum D B, et al, 2020. Incorporation of satellite precipitation uncertainty in a landslide hazard nowcasting system[J]. J Hydrometeorol, 21(8):1741-1759.
- Nikolopoulos E I, Destro E, Maggioni V, et al, 2017. Satellite rainfall estimates for debris flow prediction: an evaluation based on rainfall accumulation-duration thresholds[J]. J Hydrometeorol, 18(8):2207-2214.
- Ren D D, Leslie L M, Fu R, et al, 2010. A storm-triggered landslide monitoring and prediction system: formulation and case study [J]. Earth Interact, 14(12):1-24.
- Roder G, Sofia G, Wu Z, et al, 2017. Assessment of social vulnerability to floods in the floodplain of northern Italy[J]. Wea, Climate, Soc, 9(4):717-737.
- Underwood S J, Schultz M D, 2004. Patterns of cloud-to-ground lightning and convective rainfall associated with postwildfire flash floods and debris flows in complex terrain of the western United States[J]. J Hydrometeorol, 5(5):989-1003.
- Wang J H, Hong Y, Li L, et al, 2011. The coupled routing and excess storage (CREST) distributed hydrological model[J]. Hydrol Sci J, 56(1):84-98.
- Wu H, Adler R F, Hong Y, et al, 2012. Evaluation of global flood detection using satellite-based rainfall and a hydrologic model[J]. J Hydrometeorol, 13(4):1268-1284.
- Xue X W, Hong Y, Limaye A S, 2013. Statistical and hydrological evaluation of TRMM-based multi-satellite precipitation analysis over the Wangchu Basin of Bhutan: are the latest satellite precipitation products 3B42V7 ready for use in ungauged basins? [J]. J Hydrol, 499:91-99.

(本文责编:俞卫平)