

DOI: 10.12006/j.issn.1673-1719.2019.174

史培军, 杨文涛. 山区孕灾环境下地震和极端天气气候对地质灾害的影响 [J]. 气候变化研究进展, 2020, 16 (4): 405-414

Shi P J, Yang W T. Compound effects of earthquakes and extreme weathers on geo-hazards in mountains [J]. Climate Change Research, 2020, 16 (4): 405-414

山区孕灾环境下地震和极端天气气候 对地质灾害的影响

史培军^{1,2,3}, 杨文涛⁴

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 北京师范大学应急管理部—教育部减灾与应急管理研究院,
北京 100875;3 青海省人民政府—北京师范大学高原科学与可持续发展
研究院, 西宁 810008;

4 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083

摘 要: 开展多致灾因子耦合作用下的地质灾害研究对山区综合风险防范和可持续发展至关重要。在山区孕灾环境中, 极端降水和地震是触发滑坡等地质灾害的主要因素。以往研究多在山地孕灾环境稳定的假设下, 研究极端降水或强震单独导致的地质灾害过程, 而对孕灾环境变化下的极端天气和地震致灾因子共同诱发地质灾害的关注不足。针对这一问题, 梳理了国内外发生在山区的地震和极端降水共同导致滑坡等地质灾害的研究案例, 系统总结了山区强震与极端降水引发滑坡等地质灾害的相互作用过程。现有研究已在地震和极端降水引发滑坡等地质灾害的问题上取得了以下认识: (1) 山区地震可强烈改变孕灾环境, 显著提升震后降水引发地质灾害的可能性, 放大极端降水—滑坡灾害链; (2) 地震对降水引发滑坡的影响随着震后时间的推移逐渐减弱, 该现象可能受控于气候因素; (3) 在全球气候变化背景下, 极端天气气候事件增多, 定量研究山区强震和极端天气气候二者“遭遇”下的地质灾害链将面临更多挑战。由于观测案例不足, 针对山区地震与极端降水共同导致地质灾害的研究仍缺少定量分析, 触发机理也需进一步明确。

关键词: 极端天气气候; 山区地震; 灾害“遭遇”; 地质灾害链; 气候变化

引 言

根据自然灾害学定义, 自然致灾因子 (natural hazards) 是可能对人的生命财产造成损失的自然过程, 其动力学机制是地表能量的自然释放^[1-2]。作为一种自然过程, 具备破坏性的能量和潜力是致灾因子的基本特征。例如, 地震、滑坡、极端降水等都是致灾因子, 都具备对承灾体直接造成损失的潜力。描述其特征的物理要素主要是能量

强度, 例如地震的烈度, 滑坡泥石流发生的体积、运动速度, 极端降水的强度等^[3-4]。

孕灾环境是指孕育致灾因子的环境要素, 包括地质构造背景、地形地貌、岩土性质、植被、气候等要素^[3]。特定的大地构造背景可孕育出特定的地震致灾因子; 类似地, 特定的气候环境会发育特定特征的气象致灾因子 (极端降水或干旱)。山地与丘陵地形地貌等组成的山区环境显著区别于平原地区的孕灾环境特征, 这一特征是山区环

收稿日期: 2019-07-25; 修回日期: 2019-10-28

资助项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究项目 (2019QZKK0606); 国家自然科学基金项目 (41807500)

作者简介: 史培军, 男, 教授, spj@bnu.edu.cn

境在经受强地震、极端降水时具备发生山体失稳导致滑坡等地质灾害的关键。

发生在山区孕灾环境下的地震和极端降水,受地形、地貌、岩土性质等的影响可引发大面积的山体滑坡、崩塌,形成对应的地震-滑坡地质灾害链和降水-滑坡地质灾害链^[4-5]。此外,按地震诱发地质灾害发生的时间顺序,山区地震灾害可分为同震灾害和震后灾害。同震灾害,指地震发生瞬间伴生的瞬时地质灾害,主要有地震动触发的山体滑坡、崩塌、堰塞湖等^[6-7]。在同震灾害发生后,极端降水也可以引发出新的致灾因子,如受到水文、地形等孕灾环境的影响,滑坡、崩塌在降水作用下形成泥石流,堵塞河道、导致下游的洪水或泥石流等。震后灾害,多指地震发生后在山区孕灾环境下的极端降水诱发的山体滑坡、泥石流等气象-地质灾害链。文中提到的滑坡包括了各种类型的崩塌、碎屑流等重力地貌过程,所述及的地质灾害类型主要是滑坡和泥石流。

在山区孕灾环境下,地震和极端降水都是触发滑坡等地质灾害的致灾因子,均可单独诱发山区地质灾害。这两类滑坡地质灾害每年在全球造成严重的生命和财产损失^[8]。以往降水滑坡或地震滑坡造成的人员伤亡多归为气象或地震灾害事件,因此导致对滑坡灾害普遍低估。以2008年汶川地震(里氏8.0级)为例,地震发生时,巨大的能量触发了近200 km长的地表破裂^[9],诱发了数万个滑坡^[10-11],近1/3的伤亡与同震滑坡地质灾害直接相关^[12],地质灾害与大地震导致的灾情相当。因此,对降水-地质灾害链和地震-地质灾害链的定量研究越发受到重视。目前,针对单独的地震或降水引发的地质灾害开发了诸多的数值模型:例如模拟地震触发滑坡的区域模型有Newmark块体位移物理模型^[13]和CAMEL模糊数学统计模型^[14]等;对降水诱发的滑坡地质灾害,已建立各类定量的降水-滑坡数值模型等^[15-16]。

区域地质灾害链模型是制作灾害精准地图和防灾减灾的关键。滑坡地质灾害制图包括敏感(易发)性图、危险性图和灾害风险图。滑坡敏感性图基于地质灾害的孕灾环境制作,表示是否具备

滑坡发生的基本条件,综合考虑如海拔、坡度、坡向、土地利用类型、岩性等环境要素^[17]。发生在山区孕灾环境中的地震致灾因子,可形成独特的地震-滑坡地质灾害链;极端降水也可单独作为致灾因子在山区孕灾环境中形成降水-滑坡地质灾害链^[17]。已有的地质灾害链模型只能基于单一触发因子制作滑坡危险性和风险图。虽然现有的单一致灾因子灾害链模型已基本满足地质灾害研究,但是无法定量评估地震和极端降水共同导致的地质灾害链。多致灾因子耦合作用下的山区地质灾害模型尚未发展,严重制约了多致灾因子“遭遇”条件下的山区地质灾害危险性和风险评估。以2008年汶川地震为例,震后我国政府3年内基本完成了灾区所有的重建工作。震后,汶川灾区夏季极端降水多次引发大规模的滑坡、泥石流地质灾害,对新建的基础设施造成严重损失^[18-22]。这说明我们在山区大震后对极端降水事件引发的滑坡等地质灾害的放大效应认识严重不足。因此,开展山区孕灾环境下地震和极端降水对滑坡等地质灾害共同影响的研究,对构造活跃山区的灾后重建和可持续发展至关重要。

本文通过梳理山区地震和极端降水共同触发滑坡等地质灾害的典型研究案例,总结现有研究的进展和存在的问题,以期引起国内同行对山区特殊孕灾环境变化背景下,多致灾因子“遭遇”导致灾害放大效应的重视。最后梳理现有研究中存在的问题,并探讨可能需要重点开展的研究方向。由于汶川地震后已有综述论文系统回顾了地震触发同震地质灾害和震后地质灾害演化的规律和机制^[23],本文侧重从多致灾因子同时、同地发生,尤其是从气候孕灾环境变化的角度,讨论当前地质灾害链的研究。

1 山区大地震可显著放大震后的极端降水-地质灾害链的致灾强度

关于这部分的讨论,近期已有研究论文较充分地总结了现有的研究进展^[23],在此我们仅从灾害系统理论的角度做简要的回顾。山区发生的大

地震可通过诱发大量崩塌滑坡、导致大量山体内部结构的破坏^[24], 显著改变孕灾环境, 对震后极端降水引发的滑坡等地质灾害链的致灾强度有显著的放大作用^[25]。例如, 1999 年台湾里氏 7.6 级集集地震发生后, 2001 年台风桃芝造成的滑坡、泥石流等山地灾害影响的山区面积是震前同等规模台风 (1996 年台风贺伯) 引发地质灾害的 5 倍^[26]。2008 年汶川地震后, 降雨诱发了大规模的滑坡、泥石流^[27]。由于地震影响区存在大量滑坡碎屑物, 与震前相比, 震后泥石流启动所需的降水阈值下降了 30%^[28]。

强震不仅影响坡面过程, 还影响沟道过程。在震后降水作用下, 坡面碎屑物质运动进入沟道, 通过泥石流把滑坡碎屑物冲入河道, 淤积、抬升和加宽河床。河床形态的改变显著地改变了河流的水文环境, 导致同等流量下的河床更易暴发山洪和泥石流。图 1 是发生在汶川地震后泥石流冲毁新建居民点的案例。图 1(a) 是震前 (2002 年) 居民点分布, 图 1(b) 是地震 4 年后 (2012 年) 重建的居民点, 图 1(c) 是地震 5 年后 (2013 年) 的居民点分布。对比 2002 年和 2012 年, 灾后重建的房屋分布在河道附近; 对比 2012 年和 2013 年的影像, 发现重建的安置点完全消失。结合 2013 年 8 月的实地考察, 发现地震后降水把滑坡碎屑物从坡面冲入沟道, 为泥石流暴发提供了物源;

降水引发的泥石流把丰富的碎屑物运移到河道, 河床显著变宽、升高, 导致 2013 年 8 月暴发大规模山洪、泥石流, 彻底摧毁了重建房屋^[29]。此过程在汶川地震后的很多地区都有发生^[30]。地震引发的滑坡物质从坡面运动到河道的持续时间可能长达数年甚至几十年^[31]。因此, 山区地震可在震后年份显著放大极端天气气候事件的影响。

2 极端天气和气候对山区地震—地质灾害链的影响

按发生时间, 地震—滑坡灾害链分为同震灾害链和震后灾害链。极端天气气候可对地震—滑坡地质灾害链产生重要影响, 这种影响按照发生的相对时间, 分为极端天气对同震—滑坡灾害链的影响以及对震后滑坡演化的影响。极端天气 (主要是极端降水) 与地震致灾因子同时发生, 属于多个致灾因子的“遭遇”问题 (图 2a)。如前所述, 地震可显著提升地质灾害孕灾环境的敏感性, 导致震后的地质灾害显著多发 (图 2b)。但是地质灾害孕灾环境的敏感性在震后的动态变化可能受控于多种因素, 其中气候可能发挥着主要作用。

2.1 极端降水对山区同震地质灾害链的影响

从定义来讲, 极端降水是极少数的罕见天气



注: 所有影像来自 Google Earth, 研究区位于 32°14′57.8″N, 104°53′8.7″E。

图 1 汶川地震后重建的平武县建全村被发生于 2013 年 8 月的泥石流摧毁, 地震前 2002 年 11 月的卫星影像 (a), 地震 4 年后的卫星影像 (b), 泥石流后的卫星影像 (c)

Fig. 1 The post-seismic newly built buildings in Jianquan village, Pingwu, were destroyed by a debris flow in August 2013, pre-seismic 1 m resolution IKONOS image (a), 0.5 m WorldView-01 image in 2012 (b) (4 years after the earthquake), 1 m IKONOS image after the debris flow (c)

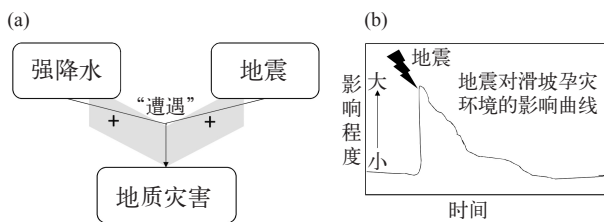


图2 极端天气气候对地震—地质灾害链影响 (a) 灾害“遭遇”，(b) 地震可显著改变孕灾环境，使降水极易诱发地质灾害（黑线所示）

Fig. 2 Impact of extreme weather and climate on earthquake-landslide hazard chain (a) when intense precipitation and earthquake occur concurrently, (b) major earthquakes could significantly alter environment, making lots of slopes unstable during precipitation

事件，而强震也属于少见事件，二者同时同地发生的概率较低。目前，世界上对同一地区同时经历极端降水和强烈地震的观测比较缺乏。1976年8月16、22和23日四川平武—松潘地震连续发生3次强烈地震（震级分别是里氏7.2、6.8和7.2级）。据记载，22日和23日发生地震时恰逢降水，崩塌、滑坡、泥石流大量出现^[32]。由于缺少定量的观测资料，我们无法系统研究这次罕有的地震与降水“遭遇”引发地质灾害的影响范围和程度。

从气候角度来说，雨季发生的地震更易与极端降水“遭遇”导致严重的地质灾害事件。雨季地震对应着降水和地震“遭遇”一起引发地质灾害的过程。降水诱发滑坡的主要机理是增加坡体孔隙水压力和减小有效应力，导致物质下滑分力超过坡体抗滑力，使坡体失稳^[15]。而地震则可通过施加地震惯性力，使坡体下滑力增加，或通过增加土层孔隙水压力增加下滑力诱发滑坡^[32]。在雨季，山区坡体水分较多、地下水位较高，地震可显著增加土壤孔隙水压力，通过施加地震惯性力加速原本接近临界值的坡体失稳；在旱季，坡体干燥、地震难以改变孔隙水压力而仅通过施加地震惯性力作用于坡体。因此，在旱季坡体干燥，稳定性较高，地震造成的地质灾害链严重性较雨季弱。震前山区的干湿状况可能会影响强震导致的滑坡、崩塌等致灾因子强度，而区域的干湿状况更多与山区气候及季节有关。

2.2 气候可能控制着山区强震的后续持续影响效应

尽管山区大地震可以显著提升地震影响区的气象—地质灾害的致灾强度，但是这种放大效应却呈现随着时间逐渐降低的趋势。例如，汶川地震后虽然震后的滑坡、泥石流等灾害不断发生，但是震后滑坡的活跃程度在持续下降^[33-34]。通过高空间分辨率遥感（如WorldView等）和高时间分辨率遥感等数据（如MODIS），一些在震中的研究^[33-36]普遍认为震后滑坡上的植被可能在地震后20年内就可恢复到震前覆盖水平。Guo等^[28]发现震后引发泥石流的降水阈值在逐年升高，并预测未来10年可能会恢复到震前水平。同样地，2005年巴基斯坦的喀什米尔地震（里氏7.6级）导致的滑坡面积，在震后也在稳步减少^[37]。可侵蚀物质的减少、松散碎屑物的压实、植被恢复导致的土体强度增加是解释震后滑坡逐渐减少的主要机制^[31, 38-39]。

虽然震后滑坡活跃性逐年整体下降，但是震后滑坡变化具有较大的区域差异。比如1999年台湾集集地震后，滑坡活跃性下降很慢，而2005年巴基斯坦地震2年后（2007年）滑坡活动趋于减弱。汶川地震后，滑坡上的植被恢复具有明显的空间差异。Yang等^[40]通过分析汶川地震整个灾区的震后滑坡体上植被的动态变化发现，在震中映秀和岷江河谷两岸地区震后滑坡线性减少，而其他地区（主要是龙门山）滑坡上植被恢复很不稳定，表示滑坡物质仍不稳定。虽然解释震后滑坡减少的机制有多种，但这种空间差异很可能与气候和地表物质组分有关。比如Yang等^[41]发现降水强度可能决定了震后滑坡碎屑物的稳定还是滑动。Zhang等^[42]根据汶川地震滑坡分布区下游的水库岩芯，发现水库中的滑坡碎屑物质量与强降水关系很明显，表明滑坡碎屑物的搬运主要受控于强降水事件。反之，2010年智利大地震（里氏8.8级）由于震后持续干旱，其坡面和沟道地貌过程很不发育，以至于河流中有很少的地震碎屑物^[43]。与之对比鲜明的是，2001年台风桃芝触发的降水滑坡是1999年集集地震导致滑坡面积的三倍多。

2008 年汶川地震和 2005 年巴基斯坦地震后的降水并没有导致比地震引发更多的滑坡灾害。山区地震后滑坡发育的这些差异说明, 地震影响区的气候条件很可能是控制震后持续效应的主要因素。

3 气候变化背景下, 多灾“遭遇”引发地质灾害的问题更加复杂

目前, 作为孕灾环境的气候要素在持续发生变化, 其孕育出的致灾因子(极端气象事件)的强度和频率也随之改变。在此背景下, 我们需要进一步讨论上述研究问题, 尤其是多种致灾因子“遭遇”背景下的地质灾害研究。

3.1 极端降水增加背景下的地质灾害链

已有研究表明全球气候变化可能导致极端降水的增多^[45]。在构造活跃的山区, 极端降水的增加对地震—地质灾害链将产生重要影响。由于山区地震会显著改变孕灾环境, 研究气候环境和山地环境共同变化下的极端降水—地震引发的地质灾害链将变得更为复杂。

以甘肃省天水地区为例, 该区地处构造活跃、地震多发的半干旱区, 历史地震频发且强度较大。2013 年 7 月 25 日天水市娘娘坝镇发生群发性滑坡、泥石流灾害, 因灾死亡 24 人, 1 人失踪。地质灾害发生 3 天前, 定西市岷县发生了里氏 6.6 级地震。据美国地质调查局报道, 受地震影响的娘娘坝地区烈度约为 3.5 度。尽管单独的地震因素不足以直接造成这次的地质灾害^[46], 但地震可

能使岩土体遭到扰动^[47], 间接促进群发性地质灾害。这次地质灾害前当地发生了多次极端降水事件。第一次极端降水发生在 2013 年 6 月 20 日(历史最大), 第二次极端降水(历史日降水排名第 5)发生在 2013 年 7 月 8 日, 定西地震发生在 2013 年 7 月 22 日, 群发性滑坡发生在 2013 年 7 月 25 日, 滑坡当日的降水量是 25 mm(图 3)。根据我们的实地考察和走访(2017 年 10 月), 此次滑坡深度为 1 m 左右的浅层滑坡、泥石流。由于当地地处半干旱黄土高原地区, 蒸发量很大, 地表和浅层地下水难以长时间维持较高水位, 因此前两次极端降水(分别在滑坡发生前 35 天和前 17 天)对此次滑坡的影响已显著降低。而根据地震损伤力学理论^[48], 地震可以引发岩体产生裂隙, 裂隙的存在为降雨的下渗提供了条件, 进而使斜坡的岩体强度显著降低, 诱发滑坡发生。因此, 滑坡发生 3 天前的地震可能给滑坡当日 25 mm 的降水创造了条件。所以说, 尽管地震没有直接诱发天水群发性滑坡, 但是对如此大规模的区域滑坡事件起到了间接的促进作用。

进一步分析 1964 年 7 月 1 日至 2019 年 10 月 3 日的日值降水数据, 发现天水地区单日降水最多的 Top10 中, 半数发生在 2010 年以后(表 1)。在全球气候变化背景下, 构造活跃山区的极端降水可能增多^[45]。随着对山区地震的关注, 研究者对地震—地质灾害链的研究不断取得新的认识。但由于研究案例依旧有限, 不具备建立统计预测模型的基础。随着全球气候的变化, 研究极端降水和强震“遭遇”引发的地质灾害变得更加复杂。

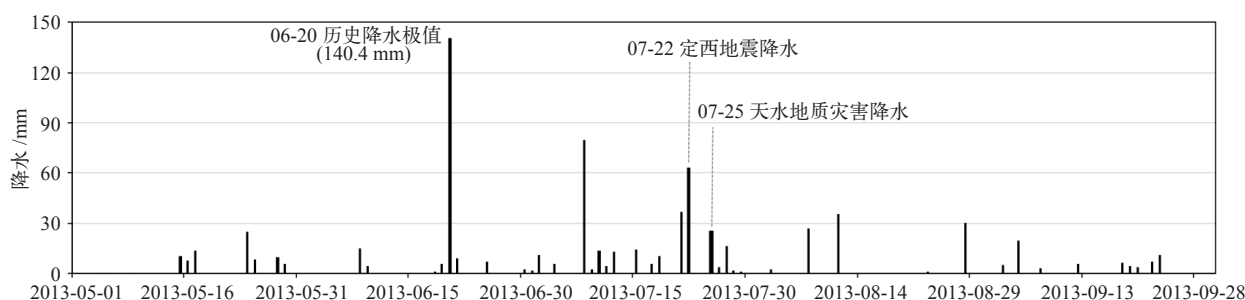


图 3 2013 年 5 月 1 日—9 月 30 日天水市麦积区日值降水数据

Fig. 3 Daily precipitation record at the Maiji meteorology station, Tianshui from 1 May 2013 to 30 September 2013

表 1 1964 年 7 月至 2019 年 10 月间天水地区单日降水最多的 Top10 发生日期
Table 1 Top ten daily precipitation from July 1964 to October 2019 at Maiji meteorology station

排序	降水日期	日降水量/mm	排序	降水日期	日降水量/mm
1	2013-06-20	140.4	6	2019-08-20	69.4
2	1990-08-11	110.5	7	1965-07-07	68.5
3	2005-07-01	90.0	8	1967-09-09	66.9
4	2017-08-07	84.9	9	2006-08-27	66.1
5	2013-07-08	80.0	10	2011-07-28	65.3

3.2 气候变暖背景下的冰冻圈复杂孕灾环境中的地质灾害链

在全球变暖背景下,研究更复杂山区孕灾环境下的地震—地质灾害链挑战更大。例如,作为世界第三极的青藏高原有着大范围的冰冻圈环境,近年来,高原升温速度呈明显加快趋势^[49]。快速升温导致冰川、冻土加速退化^[50],增加了坡体的不稳定性,和发生山地灾害的可能性^[51]。此外,青藏高原山地的本底孕灾环境具有以下特点:构造活跃、岩体破碎、冰雪广布、河流侵蚀强烈、冰碛物丰富、地形极其复杂^[52]。该区导致滑坡等山地灾害的致灾因子有区内的强震、极端降水以及高温导致的冰川退化^[53]。

以西藏东南部林芝地区为例,该区构造活跃地震多发,地形深度切割海拔高差极大,受地形影响年降水量>1000 mm且集中在夏秋季节。这一地区多冰川泥石流灾害,降水、升温、地震都可作为致灾因子启动冰川泥石流。2018年10月17日凌晨林芝东部雅鲁藏布江峡谷的色东普沟发生大规模冰崩泥石流,碎屑物堵塞雅鲁藏布江。截至17日15时,堰塞湖蓄水约1.5亿m³,给下游造成严重威胁。泥石流所在的林芝色东普沟曾在2017年11月18日发生里氏6.9级地震(图4a)。通过对比地震前后的Landsat 8 OSL影像(图4b和4c),可以看出地震发生后,震中加拉白垒峰附近山体发生大量滑坡。但是,严重的堵塞雅鲁藏布江事件却发生在2018年10月(地震1年以后)。

与以往地震类似,2017年11月的强震通过诱发大量崩塌、滑坡极大地改变了当地的孕灾环

境,同时还可能导致很多坡体上的岩土、冰川和丰富的冰碛物推向了濒临大规模失稳的状态。强烈的地震动可能显著增加了冰川裂隙,使夏季的冰川表面融水更易渗入冰床,加速冰川失稳^[54],最终引发冰川泥石流。

除此之外,气温也是孕育冰川泥石流的主要孕灾环境^[55]。分析1989—2018年林芝气象站9月份的降水、气温统计数据(图5),发现近30年9月份所有气温要素都处于上升趋势,其中平均最低气温(升温速率0.038℃/a)和月最低气温(升温0.037℃/a)均通过0.01的显著性检验,月最高气温(升温0.080℃/a)通过 $P<0.05$ 的显

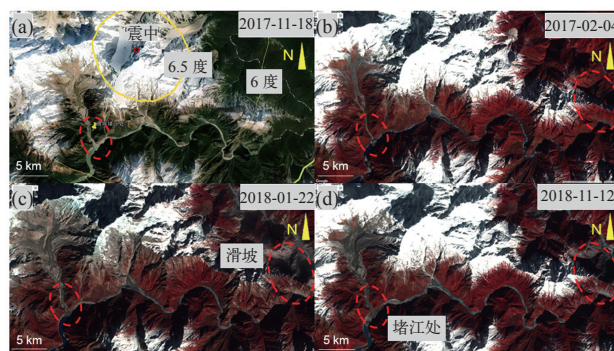


图 4 2018 年 10 月雅鲁藏布冰川泥石流堵江前后的卫星影像 (a) 2017 年 11 月 18 日林芝色东普沟地震烈度图 (来源: USGS), (b) 2017 年 2 月 4 日地震前影像, (c) 2018 年 1 月 22 日地震后影像, (d) 2018 年 11 月 12 日色东普沟冰崩泥石流堵江后的影像

Fig. 4 Satellite images before and after the outburst of the glacial debris flow in October 2018 at Yalong Zangbo River (a) intensity map of the Milin earthquake on 18th November 2017 (data source: USGS), (b) false color Landsat 8 OSL image on 4 February 2017 before the earthquake, (c) post-seismic image on 22 January 2018, (d) debris dammed lake on 12 November 2018

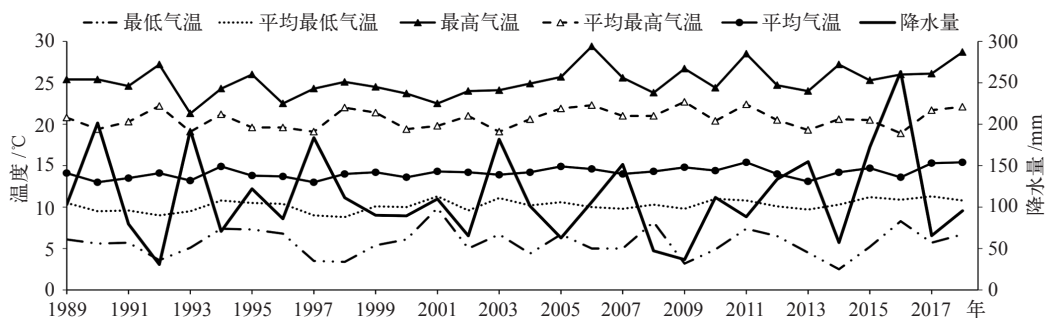


图 5 1989—2018 年林芝气象站 9 月份气温和降水统计

Fig. 5 Statistics of September temperature and precipitation from 1989 to 2018 in Nyingchi meteorology station

著性检验, 降水变化不显著。在其他同等条件下, 作为孕灾环境的气温持续上升也可显著增加这一地区的冰川泥石流的暴发。据此推测, 2018 年 10 月雅鲁藏布江的堵江事件可能是 1 年前强震和 2018 年夏季高温共同作用导致的灾害后续持续影响效应的产物。随着全球温度的继续上升, 山区复杂孕灾环境中的地震—地质灾害研究将面临更多挑战^[56]。

4 结 语

在山区孕灾环境中, 以往的灾害研究多集中在地震—地质灾害和极端降水—地质灾害的单一灾害链, 而对两种致灾因子即地震和极端降水共同诱发地质灾害的研究存在不足。本文回顾了山区地震与极端降水在引发滑坡等地质灾害上的相互作用过程, 认为目前学术界对这两种致灾因子“遭遇”上取得的认识主要有: (1) 山区大地震可显著改变滑坡、泥石流地质灾害的孕灾环境, 在震后明显放大极端降水诱发的地质灾害的强度。(2) 山区大地震对震后极端降水—地质灾害链的致灾强度的影响随着时间有衰减效应, 这种衰减过程可能受控于区域气候、地表物质组成和植被的差异。最后, 本文还分别探讨了气候变化背景下极端降水增加和气温升高对地质灾害链研究带来的新挑战。

由于对地震和极端天气气候事件导致滑坡、泥石流等地质灾害的观测不足, 对其变化规律尚不明晰, 对其影响因素和机理的认识还不清楚。

山区由地震—极端降水导致的滑坡等地质灾害事件样本的不足, 难以从统计上建立定量关系, 导致对大地震和极端降水共同导致的滑坡等地质灾害的量化研究薄弱。目前, 地震的发生难以预测, 复杂山区的天气气候空间差异很大且缺少观测资料。山区多灾种遭遇引发的滑坡等地质灾害链研究涉及地球物理、地质、地貌、气候、天气、水文等多学科的研究, 在涉及其他复杂的孕灾环境时, 多灾群发情况将更为复杂。建议未来加强对山区多灾群聚与群发的系统观测, 从全球案例中收集更多资料, 定量化研究山区极端天气气候事件与强震“遭遇”引发滑坡等地质灾害的致灾成害过程, 揭示其机理、过程, 建立动力学和统计学模型。■

致 谢: 感谢上海师范大学环境与地理科学学院杜士强副教授对本文终稿的修改和建议, 感谢国家气候中心孙劭副研究员提供本文的气象数据。

参考文献

- [1] 陈顺, 史培军. 自然灾害 [M]. 北京: 北京师范大学出版社, 2008. Chen Y, Shi P J. Natural disaster [M]. Beijing: Beijing Normal University Press, 2008 (in Chinese)
- [2] 史培军. 再论灾害研究的理论与实践 [J]. 自然灾害学报, 1996, 5 (4): 6-17. Shi P J. Theory and practice of disaster study [J]. Journal of Natural Disasters, 1996, 5 (4): 6-17 (in Chinese)
- [3] 史培军. 灾害研究的理论与实践 [J]. 南京大学学报, 1991, 11: 37-42. Shi P J. On the theory of disaster research and its practice [J]. Journal of Nanjing University, 1991, 11: 37-42 (in Chinese)
- [4] 史培军. 三论灾害研究的理论与实践 [J]. 自然灾害学报, 2002, 11 (3): 1-9. Shi P J. Theory on disaster science and disaster dynamics [J]. Journal

- of Natural Disasters, 2002, 11 (3): 1-9 (in Chinese)
- [5] 史培军, 吕丽莉, 汪明, 等. 灾害系统: 灾害群、灾害链、灾害遭遇 [J]. 自然灾害学报, 2014, 23 (6): 1-12. Shi P J, Lyu L L, Wang M, *et al.* Disaster system: disaster cluster, disaster chain and disaster compound [J]. Journal of Natural Disasters, 2014, 23 (6): 1-12 (in Chinese)
- [6] 祁生文, 许强, 刘春玲, 等. 汶川地震极重灾区地质背景及次生斜坡灾害空间发育规律 [J]. 工程地质学报, 2009, 17 (1): 39-49. Qi S W, Xu Q, Liu C L, *et al.* Slope instabilities in the severest disaster areas of 512 Wenchuan earthquake [J]. Journal of Engineering Geology, 2009, 17 (1): 39-49 (in Chinese)
- [7] 崔鹏, 韩用顺, 陈晓清. 汶川地震堰塞湖分布规律与风险评估 [J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2009, 3: 35-42. Cui P, Han Y S, Chen X Q. Distribution and risk analysis of dammed lakes reduced by Wenchuan earthquake [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2009, 3: 35-42 (in Chinese)
- [8] Petley D. Global patterns of loss of life from landslides [J]. Geology, 2012, 40 (10): 927-930
- [9] 徐锡伟, 闻学泽, 叶建青, 等. 汶川 Ms8.0 地震地表破裂带及其发震构造 [J]. 地震地质, 2008, 30 (3): 597-629. Xu X W, Wen X Z, Ye J Q, *et al.* The Ms8.0 Wenchuan earthquake surface rupture and its seismogenic structure [J]. Seismology and Geology, 2008, 30 (3): 597-629 (in Chinese)
- [10] 许强, 李为乐. 汶川地震诱发大型滑坡分布规律研究 [J]. 工程地质学报, 2010, 6: 818-826. Xu Q, Li W L. Distribution of large-scale landslides induced by the Wenchuan earthquake [J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 6: 818-826 (in Chinese)
- [11] 许冲. 汶川地震滑坡详细编录及其与全球其他地震滑坡事件对比 [J]. 科技导报, 2012, 30 (25): 18-26. Xu C. Detailed inventory of landslides triggered by the 2008 Wenchuan earthquake and its comparison with other earthquake events in the world [J]. Science & Technology Review, 2012, 30 (25): 18-26 (in Chinese)
- [12] 殷跃平. 汶川八级地震地质灾害研究 [J]. 工程地质学报, 2008, 16 (4): 433-444. Yin Y P. Researches on the geo-hazards triggered by Wenchuan earthquake Sichuan [J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16 (4): 433-444 (in Chinese)
- [13] Jibson R W, Harp E L, Michael J A. A method for producing digital probabilistic seismic landslide hazard maps [J]. Engineering Geology, 2000, 58 (3): 271-289
- [14] Miles S B, Keefer D K. Evaluation of CAMEL: comprehensive areal model of earthquake-induced landslides [J]. Engineering Geology, 2009, 104 (1): 1-15
- [15] 李长江, 麻士华, 朱兴盛. 降雨型滑坡预报的理论、方法及应用 [M]. 北京: 地质出版社, 2008. Li C J, Ma T H, Zhu X S. Forecasting of landslides triggered by rainfall: theory, methods & applications [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2008 (in Chinese)
- [16] 兰恒星, 周成虎, 王苓涓, 等. 地理信息系统支持下的滑坡-水文耦合模型研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22 (8): 1309-1314. Lan H X, Zhou C H, Wang L J, *et al.* GIS based landslide stability and hydrological distribution coupled model [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22 (8): 1309-1314 (in Chinese)
- [17] Fell R, Corominas J, Bonnard C, *et al.* Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning [J]. Engineering Geology, 2008, 102 (3-4): 85-98
- [18] 许强. 四川省 8·13 特大泥石流灾害特点、成因与启示 [J]. 工程地质学报, 2010, 5: 596-608. Xu Q. The 13 August 2010 catastrophic debris flows in Sichuan province: characteristics, genetic mechanism and suggestions [J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 5: 596-608 (in Chinese)
- [19] 唐川, 李为乐, 丁军, 等. 汶川震区映秀镇“8·14”特大泥石流灾害调查 [J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2011, 1: 172-180. Tang C, Li W L, Ding J, *et al.* Field investigation and research on giant debris flow on August 14, 2010 in Yingxiu town, epicenter of Wenchuan earthquake [J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2011, 1: 172-180 (in Chinese)
- [20] 胡凯衡, 游勇, 庄建琦, 等. 北川地震重灾区泥石流特征与减灾对策 [J]. 地理科学, 2010, 4 (30): 566-570. Hu K H, You Y, Zhuang J Q, *et al.* Characteristics and countermeasures of debris flows in Beichuan's meizoseismal area [J]. Scientia Geographica Sinica, 2010, 4 (30): 566-570 (in Chinese)
- [21] 邹强, 郭晓军, 朱兴华, 等. 岷江上游“7·10”泥石流对公路的危害方式及成因 [J]. 山地学报, 2014, 32 (6): 747-753. Zou Q, Guo X J, Zhu X H, *et al.* Hazard characteristics and causes of “7·10” debris flow along highways in the upper reaches of Minjiang River [J]. Mountain Research, 2014, 32 (6): 747-753 (in Chinese)
- [22] 葛永刚, 宋国虎, 郭朝旭, 等. 四川彭州龙门山镇 8·18 泥石流灾害特征与成灾模式分析 [J]. 水利学报, 2012, 43 (S2): 147-154. Ge Y G, Song G H, Guo C X, *et al.* Characteristics and causes of 8·18 debris flow hazards at the Longmenshan town, Pengzhou, Sichuan [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43 (S2): 147-154 (in Chinese)
- [23] Fan X M, Scaringi G, Korup O, *et al.* Earthquake-induced chains of geologic hazards: patterns, mechanisms, and impacts [J]. Review of Geophysics, 2019, 57: 421-503
- [24] 黄润秋. 汶川地震地质灾害后效应分析 [J]. 工程地质学报, 2011, 2: 145-151. Huang R Q. After effect of geohazards induced by the Wenchuan earthquake [J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 2: 145-151 (in Chinese)
- [25] 崔鹏, 庄建琦, 陈兴长, 等. 汶川地震震后泥石流活动特征与防治对策 [J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2010, 5: 10-19. Cui P, Zhuang J Q, Chen X C, *et al.* Characteristics and countermeasures of debris flow in Wenchuan area after the earthquake [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2010, 5: 10-19 (in Chinese)
- [26] Lin C W, Liu S H, Lee S Y, *et al.* Impacts of the Chi-Chi earthquake on subsequent rainfall-induced landslides in central Taiwan [J]. Engineering Geology, 2006, 86 (2-3): 87-101
- [27] Tang C, Zhu J, Ding J, *et al.* Catastrophic debris flows triggered by a 14 August 2010 rainfall at the epicenter of the Wenchuan earthquake [J]. Landslides, 2011, 8 (4): 485-497
- [28] Guo X, 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
- [29] 杨文涛. 基于遥感技术的区域滑坡灾害系统研究: 以汶川地震灾区为例 [D]. 北京: 北京师范大学研究生院, 2015. Yang W T. Analysis of regional landslide disaster system based on remote sensing: case study in

- the Wenchuan earthquake affected area [D]. Beijing: Graduate School of Beijing Normal University, 2015 (in Chinese)
- [30] Fan X M, Scaringi G, Domènech G, *et al.* Two multi-temporal datasets that track the enhanced landsliding after the 2008 Wenchuan earthquake [J]. *Earth System Science Data*, 2019, 11 (1): 35-55
- [31] Hovius N, Meunier P, Lin C W, *et al.* Prolonged seismically induced erosion and the mass balance of a large earthquake [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, 304 (3-4): 347-355
- [32] 中国科学院成都地理研究所. 地震与滑坡 [M]. 成都, 1978: 12. Chengdu Institute of Geography, Chinese Academy of Sciences. Earthquake and landslides [M]. Chengdu, 1978: 12 (in Chinese)
- [33] Fan X M, Domènech G, Scaringi G, *et al.* Spatio-temporal evolution of mass wasting after the 2008 Mw7.9 Wenchuan earthquake revealed by a detailed multi-temporal inventory [J]. *Landslides*, 2018, 15 (12): 2325-2341
- [34] Yang W T, Qi W W, Wang M, *et al.* Spatial and temporal analyses of post-seismic landslide changes near the epicentre of the Wenchuan earthquake [J]. *Geomorphology*, 2017, 276: 8-15
- [35] Yang W T, Qi W W, Zhou J X. Decreased post-seismic landslides linked to vegetation recovery after the 2008 Wenchuan earthquake [J]. *Ecological Indicators*, 2018, 89: 438-444
- [36] Tang C X, van Westen C J, Tanyas H, *et al.* Analysing post-earthquake landslide activity using multi-temporal landslide inventories near the epicentral area of the 2008 Wenchuan earthquake [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2016, 16: 2641-2655
- [37] Khan S F, Kamp U, Owen L A. Documenting five years of landsliding after the 2005 Kashmir earthquake, using repeat photography [J]. *Geomorphology*, 2013, 197: 45-55
- [38] Hu W, Scaringi G, Xu Q, *et al.* Internal erosion controls failure and runoff of loose granular deposits: evidence from flume tests and implications for postseismic slope healing [J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45 (11): 5518-5527
- [39] Marc O, Hovius N, Meunier P, *et al.* Transient changes of landslide rates after earthquakes [J]. *Geology*, 2015, 43: 883-886
- [40] Yang W T, Qi W W. Spatial-temporal dynamic monitoring of vegetation recovery after the Wenchuan earthquake [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2017, 10 (3): 868-876
- [41] Yang W T, Qi W W, Zhou J X. Effects of precipitation and topography on vegetation recovery at landslide sites after the 2008 Wenchuan earthquake [J]. *Land Degradation & Development*, 2018, 29 (10): 3355-3365
- [42] Zhang F, Jin Z D, West A J, *et al.* Monsoonal control on a delayed response of sedimentation to the 2008 Wenchuan earthquake [J]. *Science Advances*, 2019, 5 (6): eaav7110
- [43] Tolorza V, Mohr C H, Carretier S, *et al.* Suspended sediments in Chilean Rivers reveal low postseismic erosion after the Maule earthquake (Mw8.8) during a severe drought [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2019, 124 (6): 1378-1397
- [44] Dadson S J, Hovius N, Chen H, *et al.* Earthquake-triggered increase in sediment delivery from an active mountain belt [J]. *Geology*, 2004, 32 (8): 733-736
- [45] Donat M G, Lowry A L, Alexander L V, *et al.* More extreme precipitation in the world's dry and wet regions [J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6: 508-513
- [46] 辛鸿博, 王余庆. 岩土边坡地震崩滑及其初判准则 [J]. *岩土工程学报*, 1999, 21 (5): 591-594. Xin H B, Wang Y Q. Earthquake induced landslide and avalanche [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1999, 21 (5): 591-594 (in Chinese)
- [47] 于国强, 张茂省, 胡炜. 天水市“7·25”群发性山洪地质灾害发育特征及成因分析 [J]. *西北地质*, 2014, 47 (3): 185-191. Yu G Q, Zhang M S, Hu W. Analysis on the development characteristics and hydrodynamic conditions for the massive debris flow in Tianshui [J]. *Northwestern Geology*, 2014, 47 (3): 185-191 (in Chinese)
- [48] 邱洪志, 崔云, 孔纪名. 降雨作用下地震损伤斜坡破坏机理研究 [J]. *自然灾害学报*, 2018, 27 (3): 144-152. Qiu H Z, Cui Y, Kong J M. Study on failure mechanism of earthquake damage slope under rainfall condition [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2018, 27 (3): 144-152 (in Chinese)
- [49] 段安民, 肖志祥, 吴国雄. 1979—2014 年全球变暖背景下青藏高原气候变化特征 [J]. *气候变化研究进展*, 2016, 12 (5): 374-381. Duan A M, Xiao Z X, Wu G X. Characteristics of climate change over the Tibetan Plateau under the global warming during 1979—2014 [J]. *Climate Change Research*, 2016, 12 (5): 374-381 (in Chinese)
- [50] Maurer J M, Schaefer J M, Rupper S, *et al.* Acceleration of ice loss across the Himalayas over the past 40 years [J]. *Science Advances*, 2019, 5 (6). DOI: 10.1126/sciadv.aav7266
- [51] 崔鹏, 苏凤环, 邹强, 等. 青藏高原山地灾害和气象灾害风险评估与减灾对策 [J]. *科学通报*, 2015, 60 (32): 3067-3077. Cui P, Su F H, Zou Q, *et al.* Risk assessment and disaster reduction strategies for mountainous and meteorological hazards in Tibetan Plateau [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2015, 60 (32): 3067-3077 (in Chinese)
- [52] 崔鹏, 贾洋, 苏凤环, 等. 青藏高原自然灾害发育现状与未来关注的科学问题 [J]. *中国科学院院刊*, 2017, 32 (9): 985-992. Cui P, Jia Y, Su F H, *et al.* Natural hazards in Tibetan Plateau and key issue for future research [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2017, 32 (9): 985-992 (in Chinese)
- [53] 崔鹏, 陈容, 向灵芝, 等. 气候变暖背景下青藏高原山地灾害及其风险分析 [J]. *气候变化研究进展*, 2014, 10 (2): 103-109. Cui P, Chen R, Xiang L Z, *et al.* Risk analysis of mountain hazards in Tibetan Plateau under global warming [J]. *Climate Change Research*, 2014, 10 (2): 103-109 (in Chinese)
- [54] Tuckett P A, Ely J C, Sole A J, *et al.* Rapid accelerations of Antarctic Peninsula outlet glaciers driven by surface melt [J]. *Nature Communications*, 2019. DOI: 10.1038/s41467-019-12039-2
- [55] 姚檀栋, 秦大河, 沈永平, 等. 青藏高原冰冻圈变化及其对区域水循环和生态条件的影响 [J]. *自然杂志*, 2013, 35 (3): 179-186. Yao T D, Qin D H, Shen Y P, *et al.* Cryospheric changes and their impacts on regional water cycle and ecological conditions in the Qinghai Tibetan Plateau [J]. *Chinese Journal of Nature*, 2013, 35 (3): 179-186 (in Chinese)
- [56] 秦大河. 应对气候变化加强冰冻圈灾害综合风险管理 [J]. *中国减灾*, 2017 (1): 12-13. Qin D H. Strengthening integrated risk management for cryosphere disasters in response to climate change [J]. *Disaster Reduction in China*, 2017 (1): 12-13 (in Chinese)

Compound effects of earthquakes and extreme weathers on geo-hazards in mountains

SHI Pei-Jun^{1,2,3}, YANG Wen-Tao⁴

1 State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2 Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Ministry of Emergency Management and Ministry of Education & Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3 Academy of Plateau Science and Sustainability, People's Government of Qinghai Province & Beijing Normal University, Xining 810008, China; 4 School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract: Studying interplays among different geo-hazard triggers is crucial for mitigating integrated hazard risks and sustaining sustainability in mountain communities. Extreme precipitation and strong seismicity in mountain environment are major triggers for initiation of geo-hazards, such as landslides. Traditional studies on geo-hazards have been extensively carried out by treating them with single triggers, yet compound effects of earthquakes and extreme weathers on geo-hazards initiations have largely been ignored. Regional-scale geo-hazard cases that were jointly caused by earthquake and extreme weather have been reviewed to analyze the interplay between both triggers in initiating geo-hazards. Three major points can be drawn from existing literatures: 1) strong mountain earthquakes can alter mountain environments, which could significantly increase the likelihood of geo-hazards' initiations and magnify its magnitude; 2) this magnifying effect decays with time and may be controlled by climate; 3) extreme weathers have been increasing under climate change and its coalition with strong earthquakes in tectonic mountains will lead to more complicated problems. Due to a lack of observations, joint triggering mechanism of extreme weathers and earthquakes on geo-hazard initiation remains elusive.

Keywords: Extreme weathers; Mountain earthquakes; Hazards coalition; Geo-hazards' chain; Climate change