

引用格式: 徐辉. 中国诱发滑坡的降水极端性特征及变化趋势[J]. 山地学报, 2023, 41(4): 545-553.

XU Hui. Extreme characteristics and variation trend of rainfall-induced landslides in China. [J]. Mountain Research, 2023, 41(4): 545-553.

# 中国诱发滑坡的降水极端性特征及变化趋势

徐辉

(国家气象中心, 北京 100081)

**摘 要:** 极端降水往往会造成滑坡灾害, 但关于引发滑坡灾害的极端降水特征量化评估研究仍不足。本文基于近 20 年(2000—2019 年)的中国地面观测站点降水数据和 2014—2018 年历史滑坡灾害个例数据, 运用百分位数、标准化距平和 Mann-Kendall 方法分析诱发滑坡的极端降水特征, 初步揭示了滑坡灾害与极端降水间的关系, 探讨了近 20 年来中国范围内的极端降水与滑坡灾害的时空分布特征及变化趋势。结果表明: (1) 诱发滑坡灾害的不同时间尺度降水绝大部分都存在极端性特征, 导致滑坡灾害的发生一般是一年之中某个时间尺度内出现了极端性累积降水; (2) 异常性降水为滑坡灾害的关键诱发因素, 绝大部分滑坡灾害点的前期过程有效雨量均超出气候平均  $2\sigma$  以上, 具有明显的降水异常性; (3) 近 20 年以来中国遭遇极端日降水和过程降水事件的次数整体呈现增长趋势, 而不同区域内的极端降水变化特征存在较大差异, 除了黄淮、云南、华南东部的部分地区存在减少趋势以外, 其他大部地区的极端日降水、极端过程有效降水事件发生频次均呈增多趋势。本研究成果揭示了诱发滑坡灾害的触发因素和极端降水事件的变化趋势, 可为基于极端降水的滑坡预报预警提供科学依据。

**关键词:** 滑坡; 降水极端性; 前期有效雨量; 百分位数; 标准化距平

**中图分类号:** P426.61

**文献标志码:** A

降雨是滑坡的主要诱发因素之一。全球范围内每年因滑坡灾害造成的经济损失近百亿美元, 并造成数千人伤亡<sup>[1]</sup>。中国是世界上遭受滑坡灾害最严重的国家之一, 其中由于降雨导致的滑坡数量占总数的 90% 左右<sup>[2]</sup>。

国内外学者围绕引发滑坡的降水特征进行了大量的研究。引发滑坡灾害的降雨类型主要分为前期有效降水和本场激发降水两种。绝大部分的滑坡事件属于前期有效降水主导型<sup>[3]</sup>, 引发滑坡的累积降水量往往与年平均降水量线性相关。在香港地区, 当降水量超过 250 mm 时, 降雨型滑坡事件明显增多<sup>[4]</sup>。在喜马拉雅山坡区域, 当日降水量超过 144 mm 时, 发生滑坡的风险显著增高<sup>[5]</sup>。短时强降水会诱发即雨即滑型滑坡, 即强降水与滑坡的启

动几乎是同时发生<sup>[6-12]</sup>。而且, 台风影响区域触发滑坡的降雨阈值要普遍高于非台风影响区域的降雨阈值<sup>[13]</sup>。此外, 滑坡灾害的发生也与降雨历时、降雨量及降雨类型有密切的关系, 不同类型的降雨型滑坡灾害的诱发机制具有明显的差异性<sup>[14-15]</sup>。国内外学者基于引发滑坡灾害的降雨特征分析开展了滑坡预报技术研究, 例如: 建立了面向全球滑坡预报的 I-D 降水阈值曲线<sup>[16]</sup>; 基于滑坡易发性评估和实时降雨数据构建极端降雨条件下区域滑坡实时临近预报系统<sup>[17]</sup>; 基于百分位法判别前期降雨条件并建立滑坡动态降雨致灾临界阈值模型<sup>[18]</sup>。上述研究基于引发滑坡灾害的降水特征建立了预警模型, 对滑坡灾害的预报预警起到了一定的作用。

近几十年来, 很多国家和地区的极端降水事件

收稿日期(Received date): 2022-03-18; 改回日期(Accepted date): 2023-05-05

基金项目(Foundation item): 国家重点研发计划(2019YFC1510702)。[National Key Research and Development Plan(2019YFC1510702)]

作者简介(Biography): 徐辉(1979-), 男, 浙江衢州人, 正高级工程师, 主要研究方向: 天气预报和气象灾害风险预报技术研究。[XU Hui (1979-), male, born in Quzhou, Zhejiang province, professor of engineering, research on weather forecast and risk forecast of flash flood and geological disasters] E-mail: xuhui@cma.gov.cn

呈现出增多的趋势<sup>[19]</sup>,极端降水诱发了严重的次生灾害,甚至引发具有重大影响的灾难事件,比如,1999 年的委内瑞拉特大泥石流、2010 年的中国舟曲特大滑坡泥石流。在全球气候变暖背景下,未来中国的极端降水事件的频率将增加、强度将加大<sup>[20-21]</sup>,这必将导致更多的滑坡灾害发生。目前尽管针对引发滑坡灾害的降水特征已有很多研究成果,但定量性研究仍然不足,特别是和滑坡灾害密切相关的极端降水特征及其变化趋势。

本文利用地面降水观测资料、历史滑坡个例数据,分析了 2014—2018 年中国范围内诱发滑坡的极端降水特征,初步揭示了滑坡灾害与极端降水之间的关系,并分析了诱发滑坡灾害的极端降水特征及变化趋势,以期提升地质灾害预报业务能力提供科学依据。

## 1 数据和方法

### 1.1 数据

本文所用降水数据来源于国家气象信息中心提供的 5 万多个区域自动气象站近 20 年(2000—2019 年)的逐小时降水资料以及中国 2400 多个国家级地面气象观测站(包括国家基准气候站、国家基本气象站和国家一般气象站)的逐日降水资料(前一日 08 时至当日 08 时),该资料经过统一的质量控制流程,具备较好的数据分析可靠性。

本文所用的滑坡灾害历史个例信息(2014—2018 年)来源于各省的地质环境监测站,包含灾害类型、发生时间、发生地点、经纬度等信息。本文基于自动气象站点的逐小时降水数据建立降水与滑坡灾害的匹配关系:基于中尺度天气系统的定义选取 10 km 为空间距离;采用该空间距离内离滑坡灾害点最近原则选取自动气象站点,以该站点的降水数值作为滑坡灾害点的诱发降水量;为排除非降雨型滑坡事件对降水特征分析的影响剔除连续 15 天以内没有降雨或者降雨较少(日雨量小于 1 mm)的滑坡个例数据。本文选取的滑坡个例均是由降水因素诱发,属于降雨型滑坡,共累计整理了 6973 起滑坡个例(图 1)。由图 1 可见,降雨型滑坡灾害(简称:滑坡灾害)主要发生在西南地区、华东地区、华南北部等地。

中国国土幅员辽阔,气候差异性大,不同地区的

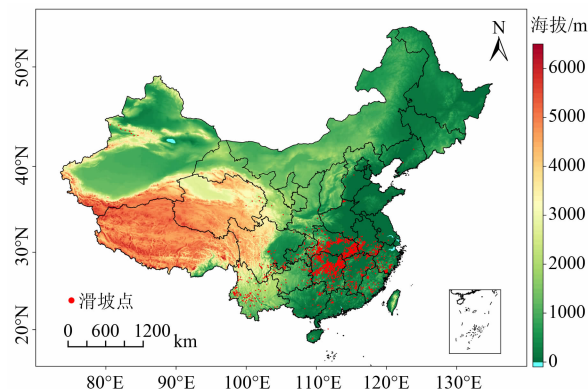


图 1 历史滑坡灾害点分布<sup>[3]</sup>

Fig. 1 Distribution of historical landslide disasters

(审图号:GS(2019)1822 号)

降水事件区域差异明显,为较为真实地分析各个区域的降水特征,本文采用 6 个气候区域<sup>[22]</sup>,分别是东北区域、西北区域、华北区域、西南区域、华东区域和华南区域。

### 1.2 方法

#### 1.2.1 极端性降水事件确定

本文选取 1~15 天的降水极端指数分析极端降水与滑坡灾害之间的关系。其中,极端降水指数采用国际上较为通用的百分位法<sup>[23]</sup>来确定,取 95 百分位值的 30 年平均值定义为极端降水指数,当从某日开始连续  $n$  天降水量都大于极端降水指数,则认为出现一次持续时间为  $n$  天的极端降水事件,并通过以下公式计算滑坡灾害点降水的百分位数  $P$ <sup>[24]</sup>:

$$P = \frac{(m - 0.31)}{N + 0.38} \quad (1)$$

式中, $N$  和  $m$  分别为降水要素的样本个数和滑坡灾害点降水的序号。

本文使用标准化距平  $I$  对降水异常性进行分析,一般来说,标准化距平超出正负  $2.5\sigma$  以上则表示降水因子比较异常。 $I$  计算公式如下:

$$I = \frac{x - \bar{x}}{\sigma} \quad (2)$$

其中,

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N - 1}} \quad (3)$$

式中, $x$  为进行分析的物理量; $\bar{x}$  为 1991—2020 年 30 年同期该物理量的气候平均; $\sigma$  为气候平均标准差。

### 1.2.2 趋势变化

Mann-Kendall 方法是一种非参数趋势检验方法,数据样本无需遵从一定分布,可避免少数异常值的干扰,是一种广泛应用于气候变化领域的趋势特征分析方法。本文采用 Mann-Kendall 方法定性定量分析多年极端降水的空间变化趋势及变化幅度, M-K 法的统计量  $\kappa$ 、方差  $\sigma^2$ 、倾向率  $\beta$  和标准化变量  $M$  计算如下<sup>[25-26]</sup>:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (4)$$

其中,

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1, & x_j > x_i \\ 0, & x_j = x_i \\ -1, & x_j < x_i \end{cases} \quad (5)$$

$$\kappa = \frac{4S}{N(N-1)} - 1 \quad (6)$$

$$\sigma^2 = \frac{2(2N+5)}{9N(N-1)} \quad (7)$$

$$M = \kappa/\sigma \quad (8)$$

$$\beta = \text{median}\left[\frac{x_i - x_j}{i - j}\right] \quad (9)$$

式中,  $S$  为序列所有对偶数值  $(x_i, x_j, i < j)$  中  $x_i < x_j$  出现的次数;  $N$  为序列长度。本文取  $\alpha = 5\%$  的显著水平,如果一时间序列在此置信水平下存在显著变化的趋势,则  $|M| > M_{\alpha/2} = 1.96$ 。  $M$  或  $\beta$  值为正,表明具有上升或增加趋势,  $M$  或  $\beta$  值为负,则意味着下降或减少的趋势。

## 2 诱发滑坡的降水极端性特征

一般认为,降雨型滑坡最主要的诱发因素是降雨。降雨主要通过地表径流、土壤入渗等各种作用渐进式影响坡体的稳定性。由于径流、入渗、水分蒸发、植物吸收等过程会造成地表部分雨水的损失,滑坡灾害产生影响的前期累积雨量会随着时间的延长而快速减小。在扣除上述损失后,对滑坡灾害发生具有影响的这部分降雨量称为前期过程有效雨量。相关研究<sup>[3]</sup>也表明,滑坡前 15 天有效降水在导致滑坡的各个降雨因素中占据主导性地位。本文将前期过程有效降水时段也设定为 15 天,前 15 天过程有效雨量(下文简称过程有效雨量)  $r_a$  通过以下公式计算<sup>[3]</sup>:

$$r_a = \sum_{i=1}^{15} r_i k^i \quad (10)$$

式中,  $r_i$  为滑坡灾害发生前第  $i$  天的降水量;  $k$  为衰减系数,由区域内岩土体性质和降水蒸发量等因素决定。通常采用的衰减系数有 0.78、0.80、0.84、0.85 等不同数值<sup>[27]</sup>,  $k$  在本文中取为 0.84。

由图 2 可见,诱发滑坡灾害的过程有效雨量分布从中国西部地区向东部地区逐渐增加,其中新疆、青藏高原和西北地区等区域诱发滑坡灾害的过程有效雨量一般在 60 mm 以下,四川、云南、贵州、重庆等地一般为 60 ~ 100 mm,而中东部地区诱发滑坡灾害的过程有效雨量则一般在 100 mm 以上。总体来说,过程有效雨量的分布与滑坡灾害的易发性分布是一致的,西北地区、西南地区、青藏高原等地地形起伏度大且地质环境脆弱,属于滑坡灾害高易发区域,诱发滑坡的过程有效降水量明显小于中东部地区。

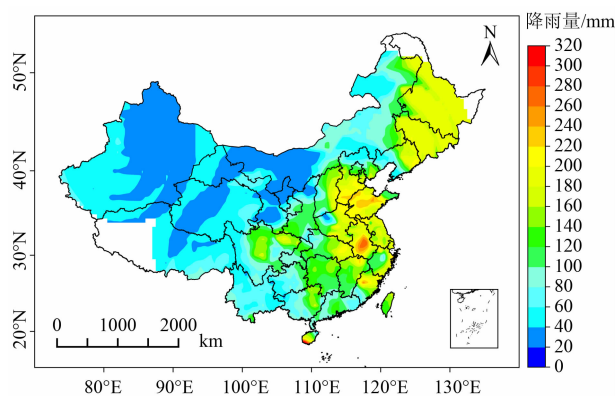


图2 滑坡前期过程有效雨量空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of precedent effective precipitation before landslide occurrence

超过 88.7% 的滑坡灾害点过程有效雨量百分位数都在 95 以上,其中,接近 77% 的滑坡灾害点过程有效雨量百分位数在 97.5 以上(图 3a),按照上文中对极端降水的定义,这明显已经达到极端降水的标准,由此可见,前期极端降水过程通过地表径流、土壤入渗等各种作用影响坡体的稳定性,是诱发滑坡灾害的重要因素。另外,滑坡灾害发生前的前期过程有效雨量标准化距平均为正值(图 3b),这说明,诱发滑坡灾害的前期过程有效雨量较当地的降水气候态是偏大的。其中,76% 以上的滑坡灾害点前期过程有效雨量超出气候平均  $2\sigma$  以上,接近

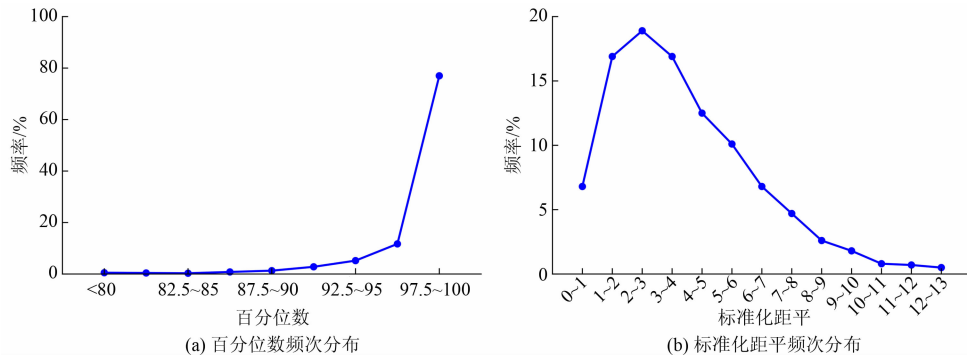


图 3 滑坡前期过程有效雨量百分位数和标准化距平频次分布

Fig. 3 Distribution of precedent effective precipitation percentile and normalized anomaly frequency before landslide occurrence

57% 以上的滑坡灾害点前期过程有效雨量超出气候平均  $3\sigma$  以上,具有明显的降水异常性,这也表明,降水异常性程度对研判滑坡灾害是否发生具有较好的指标意义。

除了前期过程有效雨量具有极端性特征以外,本文也对各个时间尺度的累积降水进行了分析。滑坡灾害发生前 1 天降水中有 64% 以上超过 95 百分位降水量(图 4),而且随着降水累积时段的延长,出现极端性降水的频率进一步增大,滑坡灾害前 15 天累积降水中超出 95 百分位降水量的比例更是达到了 95% 以上。这表明诱发滑坡灾害的不同时间尺度降水绝大部分都存在极端性特征。由此可见,极端性降水是诱发滑坡灾害的关键外在诱发因素,当一年之中某个时间尺度内出现了极端性累积降水,那么一般就会引发滑坡灾害,这对开展基于极端降水的滑坡预报预警具有很好的参考意义。

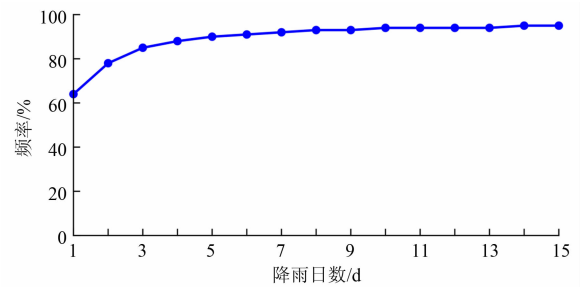


图 4 滑坡前 1~15 天极端降水量频次分布

Fig. 4 Frequency of extreme precipitation in the previous 1-15 days before landslide occurrence

### 3 极端性降水分布特征及变化趋势

为进一步分析极端性降水对滑坡灾害的影响,本文对近 20 年来的中国平均极端过程有效雨量和日极端降水量进行了分析。由图 5 可见,中国区域平均极端过程有效雨量和日极端降水量分布基本都是从西北向华南区域逐渐增加。西北地区、青藏高

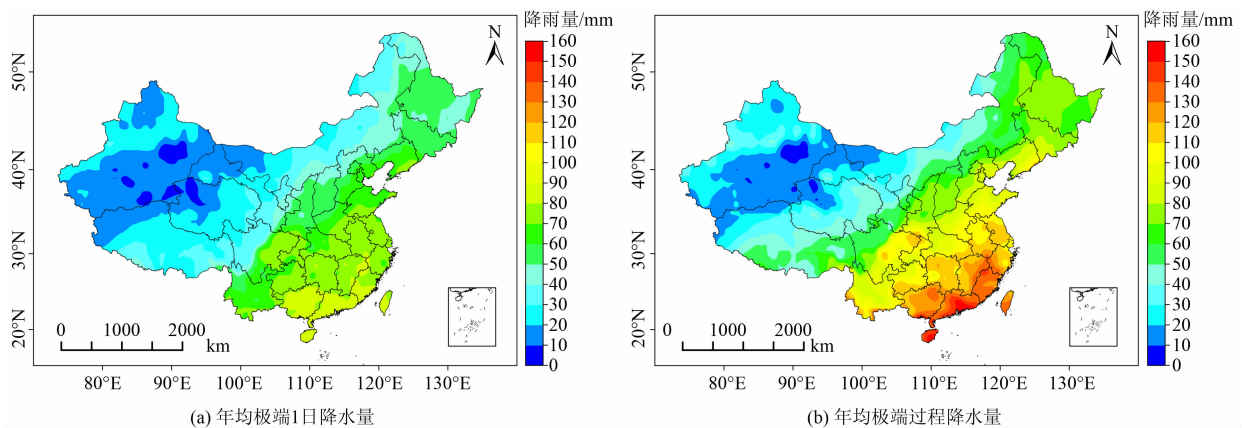


图 5 中国年均极端降水量空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of the annual average extreme precipitation in China



原的平均日极端降水量和极端过程有效雨量差别不大,均为 10 ~ 50 mm;西南地区的平均日极端降水量和极端过程有效雨量分别为 50 ~ 90 mm 和 80 ~ 110 mm;中东部地区的平均日极端降水量和极端过程有效雨量分别为 70 ~ 110 mm 和 100 ~ 150 mm,这与诱发滑坡的前期过程有效雨量分布(图 3)基本一致。

以长江为界,长江以南地区出现极端日雨量年平均次数为 3 ~ 6 次,长江以北地区一般在 3 次以下(图 6a)。长江流域、珠江流域出现极端过程雨量的频次比较高,年平均次数一般为 14 ~ 20 次(图 6b),而这些地方正是中国发生滑坡灾害次数最多的地方,全国其他地区则一般在 14 次以下,由此可见,极端降水发生频次高的地方往往对应着滑坡灾害高发地区。

图 7 表明,近 20 年以来,每年出现极端日降水和过程降水事件的次数均呈现出明显的增长趋势,均达到了 0.01 的显著性水平,每 10 年分别增加了 0.3 和 1.1 次。极端过程降水事件比日极端降水事

件呈现更大的增长趋势。2009—2011 年是一个转折点,在此之前,极端日降水和过程降水事件发生频次均在气候均值以下,在此之后,极端日降水和过程降水事件发生频次均在气候均值以上,这也意味着中国范围内出现滑坡灾害的次数有增多的趋势。

虽然从全国的空间尺度上看,极端降水事件总体上呈现出增长趋势,但在不同的区域内,极端降水事件的分布和变化趋势也存在着比较大的差异。如图 8 所示,东北地区、西北地区、华东地区等地出现极端过程降水的频次的年际变化比较明显,有显著的上升趋势,其增加幅度达 1.9 ~ 3.5 次/10a。而其他区域的变化趋势并不明显。

由图 9 可见,出现日极端降水、极端过程有效降水事件频次正趋势的测站占比分别为 70% 和 60% 左右,远多于出现负趋势的测站个数。另外,除了黄淮、云南、华南东部的部分地区存在负趋势以外,其他大部地区的日极端降水、极端过程有效降水事件发生频次均呈增多趋势。其中,华北、东北、江南北部和东部、西北地区东部等地的日极端降水、极端过

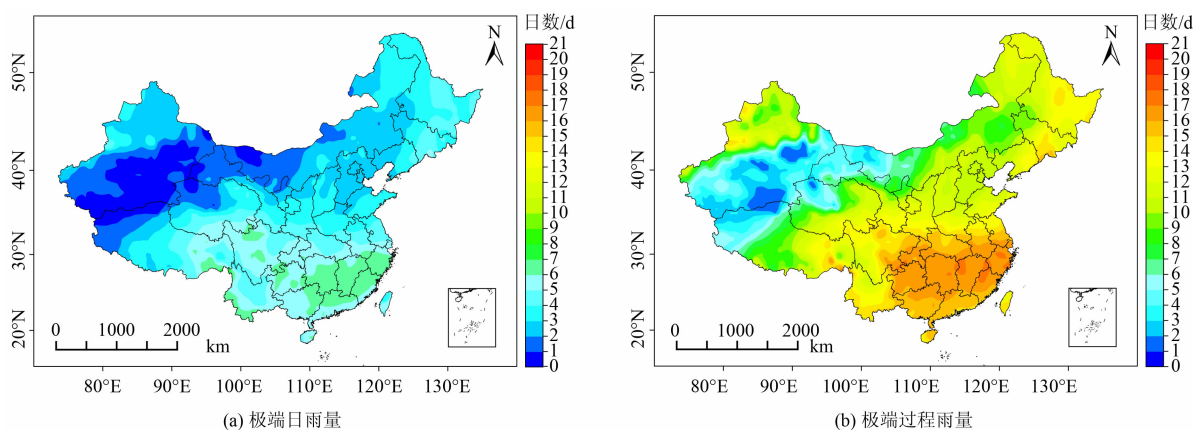


图 6 中国极端雨量频次空间分布

Fig. 6 Frequency of extreme precipitation in China

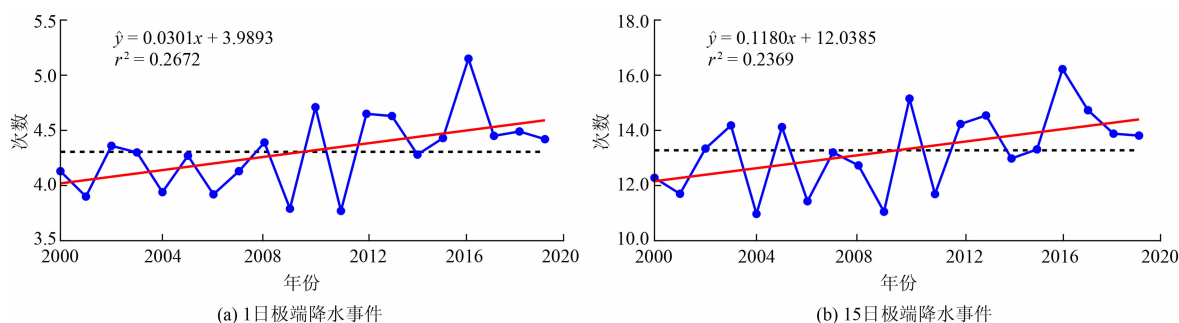


图 7 历年中国极端降水事件频次年际变化

Fig. 7 Interannual frequency changes of extreme precipitation in China

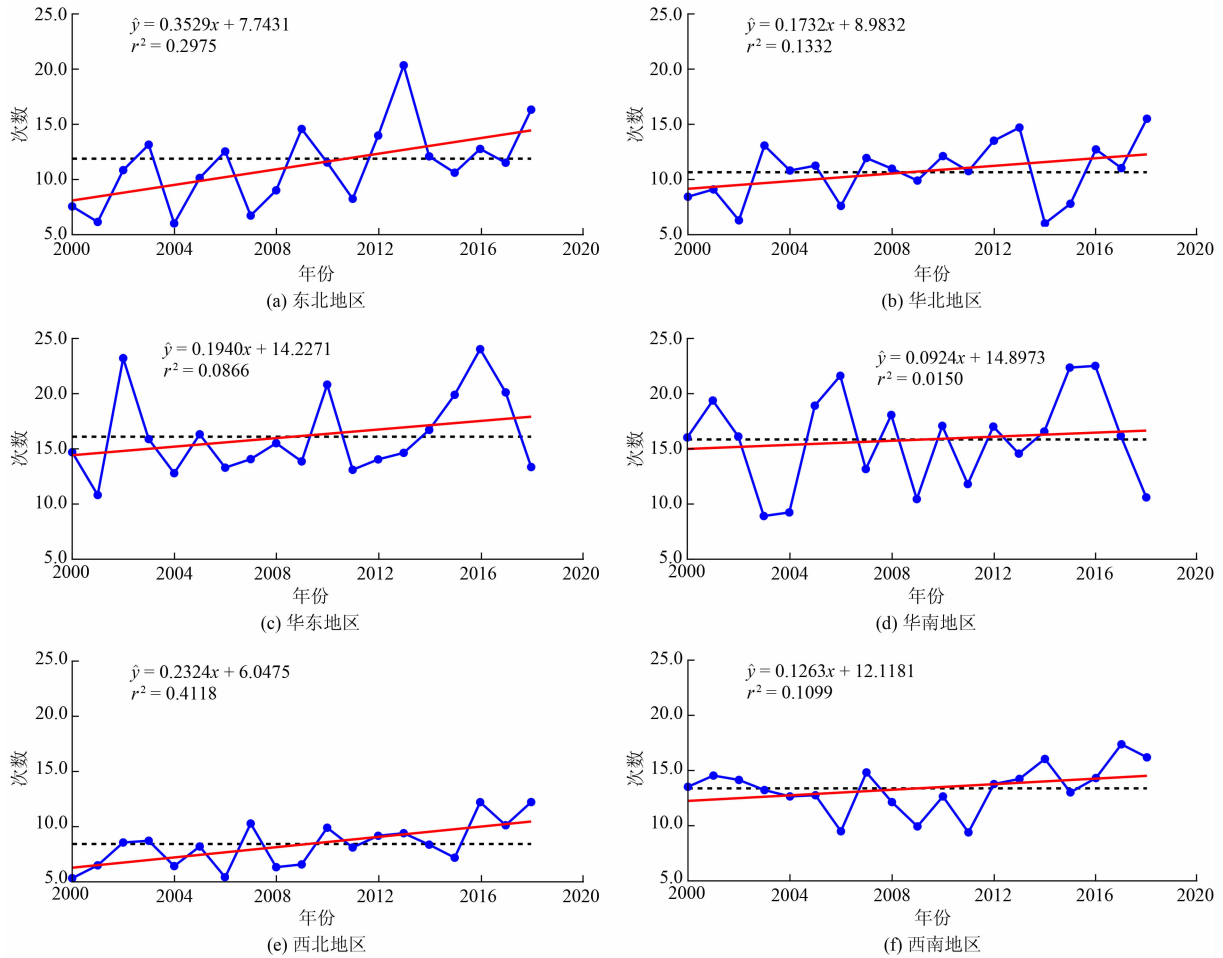


图 8 区域极端过程降水事件频次的年际变化

Fig. 8 Interannual frequency variations of regional extreme precipitation process

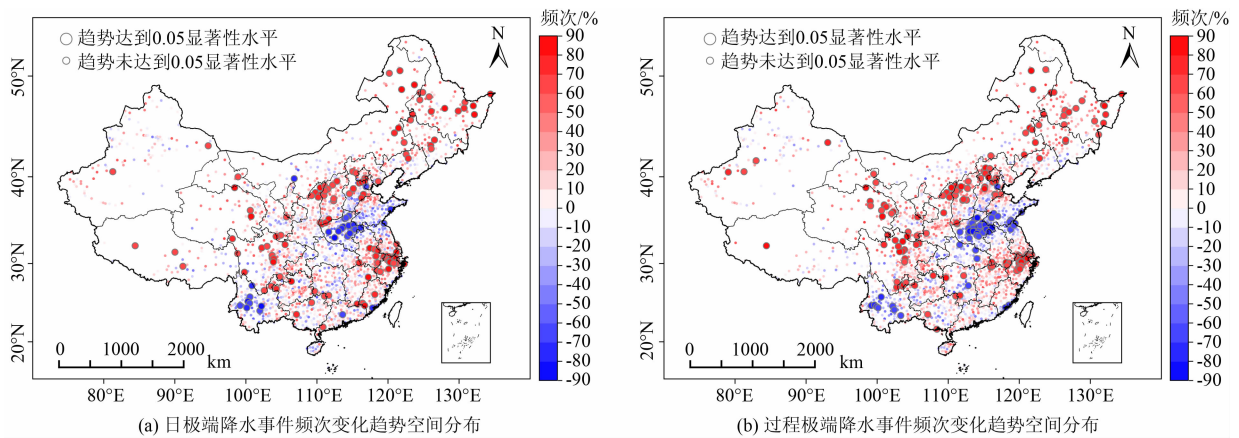


图 9 历年日和过程极端降水事件频次变化趋势的空间分布 (红色表示增加, 蓝色表示减少)

Fig. 9 Spatial distribution of daily and process extreme precipitation frequency trends during the historical period (red indicates increase, blue indicates decrease)

程有效降水事件发生频次变化趋势最为明显 ( $p < 0.05$ ), 正增幅在 60% 以上, 而黄淮西部和云南等地的部分地区的负趋势比较显著 ( $p < 0.05$ ), 减

幅 -60% 以下。由此可见, 在全球变暖的大背景下, 各个时间尺度的极端性强降水发生频次基本上呈增多趋势。由于降水是诱发滑坡灾害的重要因素, 西

北地区的滑坡灾害易发区域受极端降水增多影响,滑坡灾害也会呈现多发趋势。而同为滑坡灾害易发区域的云南由于极端降水减少,滑坡灾害的发生也呈现减少趋势。2013—2019 年与 2001—2012 年比较,云南省年均地质灾害发生次数由 1438 起降为 390 起,下降达到 73%<sup>[28]</sup>。这表明,极端降水的变化趋势和滑坡灾害发生频次变化趋势有较好的对应关系,通过极端降水的识别可以较好地研判滑坡灾害的发生与否。

## 4 讨论

近年来全球变暖背景下的极端性降水频发,降水是诱发滑坡灾害的主要因素之一,目前关于滑坡灾害的极端降水特征尚缺乏定量化的分析研究。本文研究表明,从时间尺度来看,诱发滑坡灾害的降水量基本都存在极端性特征且存在明显的异常性,初步揭示了极端性降水在滑坡灾害发生过程中所起的作用,这对开展地质灾害预报预警有一定的借鉴和参考作用,可应用于滑坡灾害的防治和评价工作。

另外,近年来中国每年出现极端性降水事件的次数总体上呈现明显增长趋势,这意味着出现滑坡灾害的次数也有增多趋势。当然,诱发滑坡灾害的极端性降水特征不仅体现在时间尺度上,在空间尺度上也有所反应,在后续的研究中,随着滑坡灾害样本的完善,将围绕诱发滑坡的降水空间极端性特征进行深入研究,以此更加全面地揭示极端性降水对滑坡灾害的诱发作用。

## 5 结论

本文基于近 20 年(2000—2019 年)的中国地面观测站点降水数据和 2014—2018 年历史滑坡灾害个例数据分析了诱发滑坡的降水极端性特征,并探讨了近 20 年来中国范围内的极端性降水分布特征及变化趋势,得到以下结论:

(1)诱发滑坡灾害的降水普遍具有极端性特征。滑坡灾害前 15 天累积降水中超出 95 百分位降水指数阈值的比例达到了 95% 以上,极端性降水是诱发滑坡灾害的关键外在诱发因素,导致滑坡灾害的发生一般是一年之中某个时间尺度内出现了极端性累积降水。

(2)异常性降水是滑坡灾害的关键诱发因素。滑坡灾害发生前的前期过程有效雨量标准化距平基本为正值,这表明,诱发滑坡灾害的前期过程有效雨量较当地的降水气候态偏大,而且 76% 以上的滑坡灾害点的前期过程有效雨量均超出气候平均  $2\sigma$  以上,接近 57% 以上的滑坡灾害点的前期过程有效雨量超出气候平均  $3\sigma$  以上,具有明显的降水异常性。

(3)极端性降水呈增多趋势。近 20 年以来中国每年出现极端日降水和过程降水事件的次数总体上均呈现明显的增长趋势,其中,极端过程降水事件比日极端降水事件呈现更大的增长趋势,这意味着中国范围内出现滑坡灾害的次数有增多的趋势。但在不同的区域内,极端降水事件的变化特征也存在着比较大的差异,除了黄淮、云南、华南东部的部分地区存在减少趋势以外,其他大部地区的极端日降水、极端过程有效降水事件发生频次均呈增多趋势。

## 参考文献 (References)

- [1] GUZZETTI F, CARRARA A, CARDINALI M, et al. Landslide hazard valuation: A review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy [J]. *Geomorphology*, 1999, **31**: 181–216.
- [2] 李媛, 孟晖, 董颖, 等. 中国地质灾害类型及其特征——基于全国县市地质灾害调查成果分析 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2004, **15**(2): 29–31. [LI Yuan, MENG Hui, DONG Ying, et al. Main types and characteristics of geo-hazard in China-based on the results of geo-hazard survey in 290 counties [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2004, **15**(2): 29–31]
- [3] 徐辉, 刘海知. 诱发滑坡的多尺度降雨特征 [J]. *山地学报*, 2019, **37**(6): 858–867. [XU Hui, LIU Haizhi. Multi-scale rainfall characteristics of rainfall-induced landslides [J]. *Mountain Research*, 2019, **37**(6): 858–867] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000476
- [4] 李军, 周成虎. 香港地区滑坡体积与前期降水关系分析 [J]. *自然灾害学报*, 2002, **11**(2): 37–45. [LI Jun, ZHOU Chenghu. Analysis of relationship between landslide volume and antecedent precipitation in Hong Kong [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2002, **11**(2): 37–45]
- [5] GABETA E J, BURBANK D W, PUTKONEN J K, et al. Rainfall thresholds for landsliding in the Himalayas of Nepal [J]. *Geomorphology*, 2004, **63**(3–4): 131–143. DOI: 10.1016/j.geomorph.2004.03.01
- [6] 刘艳辉, 唐灿, 李铁锋, 等. 地质灾害与降雨雨型的关系研究 [J]. *工程地质学报*, 2009, **17**(5): 665–661. [LIU Yanhui, TANG Can, LI Tiefeng, et al. Statistical relations between geo-

- hazards and rain-type [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2009, **17**(5): 665–661]
- [7] 钟荫乾. 滑坡与降雨关系及其预报 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 1998, **9**(4): 81–86. [ZHONG Yinqian. Landslide related to rainfall and its forecasting [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 1998, **9**(4): 81–86]
- [8] 林孝松, 郭跃. 滑坡与降雨的耦合关系研究 [J]. *灾害学*, 2001, **16**(2): 87–92. [LIN Xiaosong, GUO Yue. A study on coupling relation between landslide and rainfall [J]. *Journal of Catastrophology*, 2001, **16**(2): 87–92]
- [9] ALEOTTI P. A warning system for rainfall-induced shallow failures [J]. *Engineering Geology*, 2004, **73**: 247–265. DOI: 10.1016/j.enggeo.2004.01.007
- [10] CHEN Chienyuan, CHENTienchien, YUFanchieh, et al. Rainfall duration and debris-flow initiated studies for real-time monitoring [J]. *Environment Geology*, 2005, **47**(5): 715–724. DOI: 10.1007/s00254-004-1203-0
- [11] GUZZETTI F, PERUCCACCIS, ROSSI M, et al. Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe [J]. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2007, **98**: 239–267. DOI: 10.1007/s00703-007-0262-7
- [12] GUZZETTI F, PERUCCACCI S, ROSSI M, et al. The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows: An update [J]. *Landslides*, 2008, **5**: 3–17. DOI: 10.1007/s10346-007-0112-1
- [13] DAHAL R K, HASEGAWA S. Representative rainfall thresholds for landslides in the Nepal Himalaya [J]. *Geomorphology*, 2008, **100**: 429–443. DOI: 10.1016/j.geomorph.2008.01.014
- [14] SAITO H, NAKAYAMA D, MATSUYAMA H. Relationship between the initiation of a shallow landslide and rainfall intensity-duration thresholds in Japan [J]. *Geomorphology*, 2010, **118**: 167–175. DOI: 10.1016/j.geomorph.2009.12.016
- [15] SHUIN Y, HOTTAN, SUZUKI M, et al. Estimating the effects of heavy rainfall conditions on shallow landslides using a distributed landslide conceptual model [J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2012, **49**: 44–51. DOI: 10.1016/j.pce.2011.06.002
- [16] CHEN C W, SAITO H, OGUCHI T, et al. Rainfall intensity-duration conditions for mass movements in Taiwan [J]. *Progress in Earth and Planetary Science*, 2015, **2**: 14. DOI: 10.1186/s40645-015-0049-2
- [17] CHUANG R Y, WU B S, LIU H C, et al. Development of a statistics-based nowcasting model for earthquake-triggered landslides in Taiwan [J]. *Engineering Geology*, 2021, **289**: 106177. DOI: 10.1016/j.enggeo.2021.106177
- [18] 刘海知, 徐辉, 包红军, 等. 区域降雨诱发滑坡阈值特征分析 [J]. *自然灾害学报*, 2021, **30**(4): 181–190. [LIU Haizhi, XU Hui, BAO Hongjun, et al. Characteristics analysis of rainfall-induced landslide thresholds in local regions [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2021, **30**(4): 181–190] DOI: 10.13577/j.jnd.2021.0420
- [19] ZHANG Shanghong, LI Wenda, AN Wenjie, et al. Temporal and spatial evolutionary trends of regional extreme precipitation under different emission scenarios: Case study of the Jialing River Basin, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2023, **617**: 129156. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2023.129156
- [20] 江志红, 陈威霖, 宋洁, 等. 7 个 IPCC AR4 模式对中国地区极端降水指数模拟能力的评估及其未来情景预估 [J]. *大气科学*, 2009, **33**(1): 109–120. [JIANG Zhihong, CHEN Weilin, SONG Jie, et al. Projection and evaluation of the precipitation extremes indices over China based on seven IPCC AR4 coupled climate models [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2009, **33**(1): 109–120]
- [21] 吴佳, 周波涛, 徐影. 中国平均降水和极端降水对气候变暖的响应: CMIP5 模式模拟评估和预估 [J]. *地球物理学报*, 2015, **58**(9): 3048–3060. [WU Jia, ZHOU Botao, XU Ying. Response of precipitation and its extremes over China to warming: CMIP5 simulation and projection [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, **58**(9): 3048–3060] DOI: 10.6038/cjg20150903
- [22] 孙军, 张福青. 中国日极端降水和趋势 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2017, **47**(12): 1469–1482. [SUN Jun, ZHANG Fuqing. Daily extreme precipitation and trends over China [J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2017, **47**(12): 1469–1482] DOI: 10.1360/N072016-00360
- [23] 翟盘茂, 潘晓华. 中国北方近 50 年温度和降水极端事件变化 [J]. *地理学报*, 2003, **58**(S): 1–10. [ZHAI Panmao, PAN Xiaohua. Change in extreme temperature and precipitation over northern China during the second half of the 20th century [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2003, **58**(S): 1–10]
- [24] 赵安周, 朱秀芳, 潘耀忠, 等. 1965—2013 年黄土高原地区极端降水事件时空变化特征 [J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2017, **53**(1): 43–50. [ZHAO Anzhou, ZHU Xiufang, PAN Yaozhong. Spatiotemporal variations of extreme precipitation events in the Loess Plateau from 1965 to 2013 [J]. *Journal of Beijing Normal University(Natural Science)*, 2017, **53**(1): 43–50] DOI: 10.16360/j.cnki.jbnuns.2017.01.009
- [25] 刘昌明, 郑红星. 黄河流域水循环要素变化趋势分析 [J]. *自然资源学报*, 2003, **18**(2): 129–135. [LIU Changming, ZHENG Hongxing. Trend analysis of hydrological components in the Yellow River basin [J]. *Journal of Natural Resources*, 2003, **18**(2): 129–135]
- [26] 刘敏, 沈彦俊, 曾燕, 等. 近 50 年中国蒸发皿蒸发量变化趋势及原因 [J]. *地理学报*, 2009, **64**(3): 259–269. [LIU Min, SHEN Yanjun, ZENG Yan, et al. Changing trend of pan evaporation and its cause over the past 50 years in China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2009, **64**(3): 259–269]
- [27] 李长江, 麻士华, 孙乐玲, 等. 降雨型滑坡预报中计算前期有效降雨量的一种新方法 [J]. *山地学报*, 2011, **29**(1): 81–



86. [ LI Changjiang, MA Tuhua, SUN Leling, et al. A new approach to calibrate antecedent precipitation for rainfall-triggering landslide forecast [J]. Mountain Research, 2011, **29**(1): 81 – 86 ]
- [28] 云南省自然资源厅. 云南省创建生态文明建设排头兵促进条例实施细则 [EB/OL]. [ 2021-09-27 ]. <https://zrzygh.km.gov.cn/c/2021-09-29/4108473.shtml>
- gov.cn/c/2021-09-29/4108473.shtml. [ Yunnan Provincial Department of Natural Resources. Implementation rules for the promotion of leading forces in creating ecological civilization construction in Yunnan province [EB/OL]. [ 2021-09-27 ]. <https://zrzygh.km.gov.cn/c/2021-09-29/4108473.shtml> ]

## Extreme Characteristics and Variation Trend of Rainfall-Induced Landslides in China

XU Hui

(National Meteorological Center, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Extreme precipitation often causes landslides, but there was a lack of quantitative research on the extreme characteristics and variation trend of rainfall-induced landslides.

In this study, it preliminarily revealed the relationship between landslide occurrences and extreme rainfall based on the observations at ground meteorological stations in China from 2000 to 2019 and the recorded rainfall-induced landslide events from 2014 to 2018. The extreme characteristics of rainfall-induced landslides in China were analyzed by percentile, standardized anomaly and Mann-Kendall methods, and then it concluded the distribution and variation trend of extreme precipitation in the past 20 years (2000 – 2019) as well as the corresponding landslides for the same period.

We get the following results. (1) Most of the precipitation triggering landslides at different time scales had extreme characteristics. Landslides occurred generally on a certain time scale of a year with extreme cumulative precipitation. (2) Abnormal precipitation is the key inducing factor of disasters. The effective precedent rainfall at most of landslide sites exceeded the average of precipitation by more than  $2\sigma$ , presenting apparent anomaly. (3) For the past 20 years, the number of extreme daily precipitation and process precipitation events in China had shown an obvious growth trend in general, but the change characteristics of extreme precipitation events also had relatively large discrepancy in different regions. In addition to Huanghuai, Yunnan, and parts of eastern South China had a decreasing trend, the frequency of extreme daily precipitation and extreme process effective precipitation events in most other areas showed an increasing trend. This trend of extreme precipitation had a good correspondence with the frequency of landslide disasters. Except for the decreasing trend in some areas of Huanghuai Plain, Yunnan, and eastern South China, the frequency of extreme daily precipitation and extreme process effective precipitation events had shown an increasing trend in most other areas.

This study revealed the triggering factors of landslide disaster and the change trend of extreme precipitation events, and provides a scientific basis for improving the operational capability of geological disaster forecast.

**Key words:** landslide; extreme precipitation; precedent effective rainfall; percentile; standardized anomaly

(责任编辑 朱颖彦 钟雨倩)