

文章编号: 1008-2786-(2019)6-858-10

DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000476

诱发滑坡的多尺度降雨特征

徐 辉, 刘海知

(国家气象中心, 北京 100081)

摘 要: 在全球气候变暖背景下, 极端性降水导致滑坡泥石流等自然灾害频发, 关于降水与地质灾害之间的关系引起公众广泛的关注。本研究在对降水过程进行定量化划分的基础上研究滑坡发生与降水之间的关系, 基于全国气象台站的地面降水观测资料, 对 2658 例滑坡事件中的前期降水量、本场激发降水量、极端性降水量等不同时间尺度的降水特征进行了系统性的统计分析。结果表明: 绝大部分的滑坡事件都属于前期有效降水主导型; 前期降雨在导致滑坡的各个因素中占主导地位; 滑坡灾害发生前 10 d 特别是前 5 d 的降雨是导致滑坡发生的关键因素, 而且降水产生时间与滑坡事件发生时间相隔越长, 其在诱发滑坡事件发生的过程中的作用也越小; 本场激发降雨是诱发滑坡事件发生重要的影响因素, 持续时间大多集中在 6 h 之内, 且以强度大、时间集中为特点的短时降水为主; 极端性降水也是导致滑坡事件的关键诱发因素, 大部分滑坡事件中的前 15 d 有效降水量和当日本场降水量在历史同期降水序列中均超过第 90 百分位数, 具有明显的极端性特征。本研究从全国的视角来系统性地分析研究滑坡与降雨之间的关系, 将为全国范围内的滑坡地质灾害预警提供参考。

关键词: 滑坡; 极端性降水; 前期有效降水; 本场激发雨量

中图分类号: 426.61

文献标志码: A

滑坡的发生往往与地形地貌、地质构造、降雨以及地震等多个因素密切相关, 其中, 降雨是最活跃且多变的自然因素, 是滑坡最主要诱发因素^[1]。中国降雨诱发的滑坡占滑坡总数的 90% 左右^[2]。很多学者从诱发滑坡的强降水时空分布特征、降雨持续时间、降雨频次和雨强等方面研究了地质灾害与降雨之间的统计关系, 取得了一些成果。例如, Caine 根据滑坡资料研究了降雨的强度、持续时间与滑坡灾害关系并最早提出了 I-D 滑坡降水阈值^[3]。Cannon 等人基于旧金山海湾滑坡和降雨数据建立了滑坡与降雨强度、持续时间临界关系曲线^[4]。由于不同的下垫面和地理气候条件, 区域诱发滑坡发生的降雨条件明显不同。在香港, 当日雨量超过

100 mm 并且 15 d 累积雨量超过 350 mm 时一般会 发生滑坡^[5]。在日本, 当累计降水量超过 150 ~ 200 mm 且小时雨量超过 20 ~ 30 mm 时, 滑坡发生的 概率大幅度增加^[6]。当降水量超过年平均值的 8 ~ 17% 时, 巴西东南部就可能产生滑坡灾害^[7]。在意大利因佩里亚地区, 当 45 d 累积降雨量达到 1000 mm 并出现 8 ~ 10 mm/h 的降水后的 8 ~ 10 h 内将会导致大范围的滑坡^[8]。

滑坡灾害与降雨具有较强的一致性, 雨量越大 滑坡灾害越活跃^[9-11]。目前研究降雨诱发滑坡主 要是基于固定时间段的日降水量(当日 08 时至次 日 08 时或当日 20 时至次日 20 时)来分析降水与滑 坡之间的关系, 人为地割裂了整个降水过程对滑坡

收稿日期 (Received date): 2019-5-15; **改回日期** (Accepted date): 2019-12-18

基金项目 (Foundation item): 国家重点研发计划 (2017YFC1502501)。[National Key Research and Development Program of China (2017YFC1502501)]

作者简介 (Biography): 徐辉 (1979-), 男, 浙江衢州人, 高级工程师, 主要研究方向: 天气预报和山洪地质灾害风险预报。[XU Hui (1979-), male, born in Quzhou, Zhejiang province, senior engineer, research on weather forecast and risk forecast of flash flood geological disaster]
E-mail: xuhui@cma.gov.cn

发生的影响,不能完全表征滑坡与降水之间的关系,而且也缺乏从全国的视角来系统地分析研究滑坡与降水之间的关系。另外,从近几年的全国降水极值的变化格局来看,各个区域的极端性降水有增多的趋势^[12-14],目前针对诱发滑坡灾害的极端性降水特征研究相对较少。因此,本文以收集统计的全国数千次滑坡灾害为案例,通过对降水过程的划分,运用全国气象台站的降水观测数据系统性地对诱发滑坡灾害的前期降水量、本场激发降水量、极端性降水量等不同时间尺度的降水特征开展统计分析,以期为全国范围内的滑坡地质灾害预警提供参考。

1 数据和方法

1.1 数据

本文所用的逐日(观测时次为当日20时至前日20时)及逐小时地面降水观测数据有两类,一类是全国2480个国家基准气象站观测资料,另一类是全国5万多个区域气象站数据,均来源于中国气象局国家气象信息中心并均经过了质量控制。

本文所用的历史滑坡灾害信息数据主要来源于2004—2016年期间中国地质环境监测总站和中国气象灾害大典,包含灾害类型、发生时间、发生地点、经纬度、灾害等级等信息,总计10340起滑坡个例。由于滑坡发生地与雨量观测站之间往往存在一定的距离,受局地降雨的影响,监测降雨与滑坡地点的实际降雨可能存在一定的偏差,故在数据处理的过程

中,尽可能采用滑坡发生时间比较准确且附近有降雨观测站同时具有可靠降雨数据的滑坡事件作为研究样本。以此为原则,对10340例滑坡事件和相关降雨数据进行了校核,对信息明显存在偏差的滑坡事件和降雨资料予以剔除,最后得到2004—2016年期间的有效滑坡样本2658例(图1)。由于降雨型滑坡灾害发生的地点一般无常规雨量观测站,故在本文中用距离最近的观测站降雨资料代表滑坡灾害发生点的雨量。

1.2 方法

诱发滑坡灾害的发生是由当日本场激发降水和前期有效雨量共同作用下导致^[15-17]。基于降水过程的划分,下文介绍了本场激发降水量、前期有效降水量以及滑坡降水百分位数的计算方法。

1.2.1 降水场次划分

在国家气象中心及省级部门的地质灾害预警业务实践中,一般以固定时刻当日08时至次日08时或当日20时至次日20时的24h累计降水量作为诱发滑坡的日雨量进行分析,这在一定程度上人为地割裂了整场降水过程对滑坡灾害的整体影响。本文中以一场降雨的前后12h雨量均小于10mm作为本场连续降雨,一场连续降雨过程的总降雨量即为本场激发降雨量^[18],以此标准对导致滑坡事件发生的降水场次进行划分(图2)。

1.2.2 前期有效雨量的确定

由于受到地表径流、土壤入渗、水分蒸发、植物吸收等诸多因素影响,前期雨量对滑坡灾害形成的影响会随着时间的延长而减小,在扣除地表径流、蒸

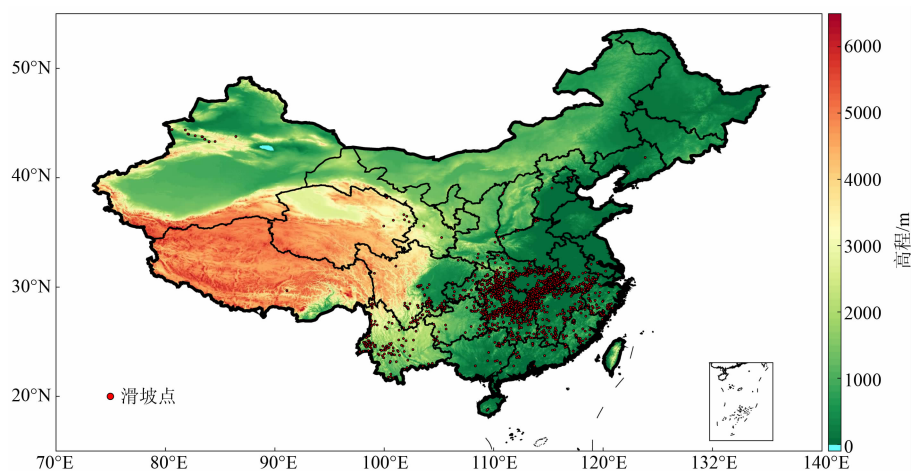


图1 全国滑坡灾害点分布(2004—2016)

Fig. 1 Distribution of landslide disaster sites in China (2004—2016)

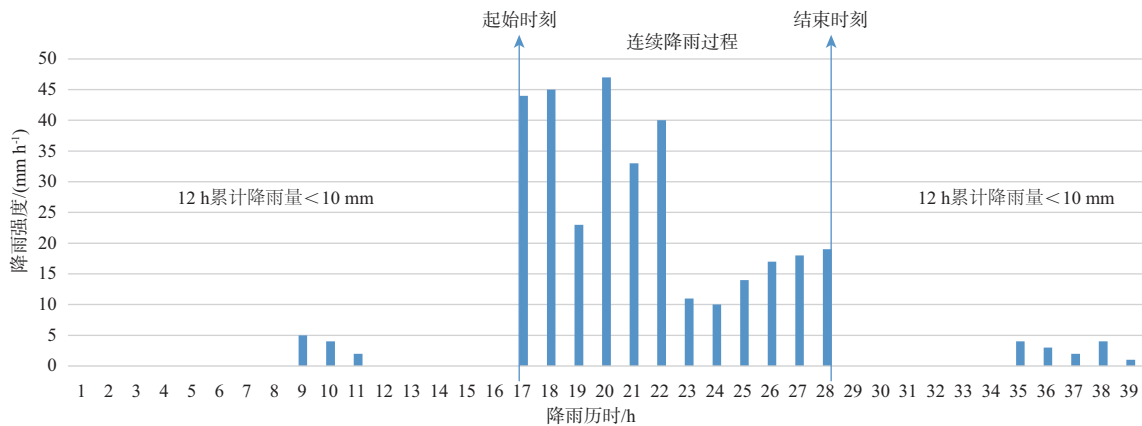


图2 本场次降水划分示意图

Fig. 2 Graphical representation of rainfall division

发等损失后,对滑坡灾害发生具有影响的这部分降雨量称为前期有效雨量^[19]。Crozier 和 Eyles (1980) 引入前期降雨指数 API (Antecedent Precipitation Index) 的方法,用于研究降雨诱发的滑坡预报并应用于计算滑坡事件前 10 d 有效降雨指数^[15]。使用前期降雨观测进行滑坡预报,主要困难在于确定滑坡前累积降雨的时间段^[20],国内外学者对此有不同的定义,分别把前期有效雨量的时段设为 4 d、10 d 和 18 d^[21-22]。Pasuto and Silvano (1998) 发现前期 15 d 有效降水与滑坡发生之间有最好的相关关系^[22]。本研究将前期有效降水时段设定为 15 d,前期有效雨量的计算如下式(1):

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

式中, r_a 为前 15 天有效雨量; r_i 为滑坡灾害发生前第 i 天的降雨量(mm); k 为衰减系数; k 由区域内的岩土体性质和蒸发量等因素决定,可选用 0.78、0.80、0.84、0.85 等不同数值^[19],根据经验, k 在本研究中取为 0.84。

1.2.3 滑坡致灾降雨类型划分

降雨过程不同,滑坡发生的时段也存在明显的差异性,通过对降水过程的定量化表征,可以在一定程度上区分导致滑坡发生的不同降雨类型。通过公式(2)计算滑坡发生点本场激发雨量占总雨量的比值,并以此比值的大小来定量化表征与滑坡相关的降雨类型。

$$q = \frac{r_1}{r_1 + r_a} \quad (2)$$

式中, q 为滑坡发生点本场激发雨量占总雨量的比

值; r_1 为滑坡发生点本场激发雨量(mm)。

在本文中,依据本场激发雨量占总雨量的比值的大小,把滑坡致灾降雨类型划分为三种,分别是当日激发雨量主导型、前期及当日降水均衡型、前期有效降水主导型(表 1)。

表1 滑坡致灾降雨类型划分标准

Tab. 1 Classification standard of landslide-induced precipitation types

| 滑坡致灾降雨类型 | 比值 q |
|------------|-------------------------|
| 当日激发雨量主导型 | $q > 0.60$ |
| 前期及当日降水均衡型 | $0.40 \leq q \leq 0.60$ |
| 前期有效降水主导型 | $q < 0.40$ |

1.2.4 百分位阈值确定

百分位数法用于表征统计指标分布状态的一种较为常见的简单方法,其计算过程主要是将样本数据从小到大排序,并计算相应的累计百分位,某一百分位所对应数据的值就称为这一百分位的百分位数。滑坡灾害点的降水量百分位数代表其在整个降水历史序列中的相对位置,空间分布的百分位数在一定程度上可以用于从正常降水量中区分滑坡致灾降水阈值。

对所研究的每一个滑坡灾害点附近气象观测站 1998—2018 年汛期(4 月—9 月)期间的逐日降水量和 15 d 滑动有效降水量数值从小到大进行排序,从而获得该滑坡灾害点的百分位滑动 15 d 有效雨量和日雨量数据集,并通过以下公式计算滑坡灾害点降水百分位数^[24]。将 N 个降水量数值按 $t_1, t_2, t_3, \dots, t_m, \dots, t_N$ 升序排列,则某个值小于或等于 t_m 的概

率为:

$$P = \frac{(m - 0.31)}{N + 0.38} \quad (3)$$

式中, P 即为百分位; N 和 m 分别为降水序列的个数和 t_m 的序号。第 P 个百分位数是指 P 所对应的 t_m 值。

一般来说, 极端降水事件通常被理解为超过某一限定阈值的降水事件, 一般定义第 90 个百分位、第 95 个百分位、第 97.5 个百分位和第 99 个百分位数值为极端降水阈值。本研究中定义第 90 个百分位数值为极端降水事件。

2 结果分析

2.1 滑坡时空分布特征

滑坡的发生具有明显的季节和地域分布特征。图 3 表明, 7 月发生滑坡灾害的数量最多, 其次是 6 月, 这和我年降水量分布是一致的。一般来说, 每年 4 月—9 月是我国的主汛期, 每年大部分的降水都出现在这段时间内, 大部分的滑坡灾害也主要出现在这段时间。另外, 大部分的滑坡灾害主要分布在华中地区 (包括湖南省、湖北省等地) 和西南地区 (包括云南省、四川省等地), 其他地区发生滑坡的数量则相对较少, 而这些地区基本上都属于传统意义上的滑坡灾害易发区。

2.2 前期降水特征

前期降水对滑坡的影响主要是通过土壤含水量的变化来实现的, 前期降水量越大, 土壤含水量就会增大, 从而导致边坡的稳定性更差, 也就越容易发生滑坡。图 4 表明, 滑坡灾害点的前 15 d 有效雨量大

多在 50 ~ 100 mm 之间, 占比为 25%, 其次是 100 ~ 150 mm 之间, 占比为 22%, 50 mm 以下则占比为 20% 左右。总体上说, 滑坡发生时的前 15 d 有效降水在 200 mm 以下的各个量级分布均比较均匀, 而在 200 mm 以上的占比则有大幅度的减小, 这表明, 鉴于全国幅员辽阔, 各地的地理气候状况差异性比较大, 这导致很难得出一个统一的滑坡致灾前期降水阈值区间来确定滑坡是否发生。

在考虑前期降水对滑坡事件的影响时, 除了分析前期有效降雨总量以外, 前期降水的逐日分布也对滑坡有重要的影响。从滑坡灾害发生前 15 d 逐日雨量的最大值、平均值分布来看 (图 5), 总体上说, 滑坡发生前一天的最大降雨量和平均降雨量都达到最大, 分别是 514 mm 和 72 mm。从滑坡发生前 1 ~ 10 d, 滑坡灾害发生前的逐日雨量最大值、平均值均呈一致性减小的趋势, 到前 11 d 左右达到最小值, 分别为 194 mm 和 0.39 mm 左右。尤其是从前 5 d 开始, 滑坡灾害发生前的逐日雨量平均值减小幅度最大, 而从滑坡发生前 12 ~ 15 d, 滑坡灾害点的逐日雨量最大值、平均值又呈增大的趋势。这表明, 滑坡灾害发生前 10 d 尤其是前 5 d 的降雨是导致滑坡发生的关键因素, 而且与滑坡事件发生时间相隔越长, 降水对诱发滑坡发生的作用也越小。

图 6 是滑坡灾害发生前 15 d 逐日的无雨日数频率分布图。图 6 表明, 各个滑坡灾害点的前 15 d 逐日的无降雨日数是逐渐增加的。滑坡发生前一天基本上都伴随有降水, 占比为 90% 左右, 而从滑坡发生前 6 d 开始, 有一半以上的滑坡灾害点都无降雨。这进一步表明, 滑坡发生前 5 d 的降水对滑坡

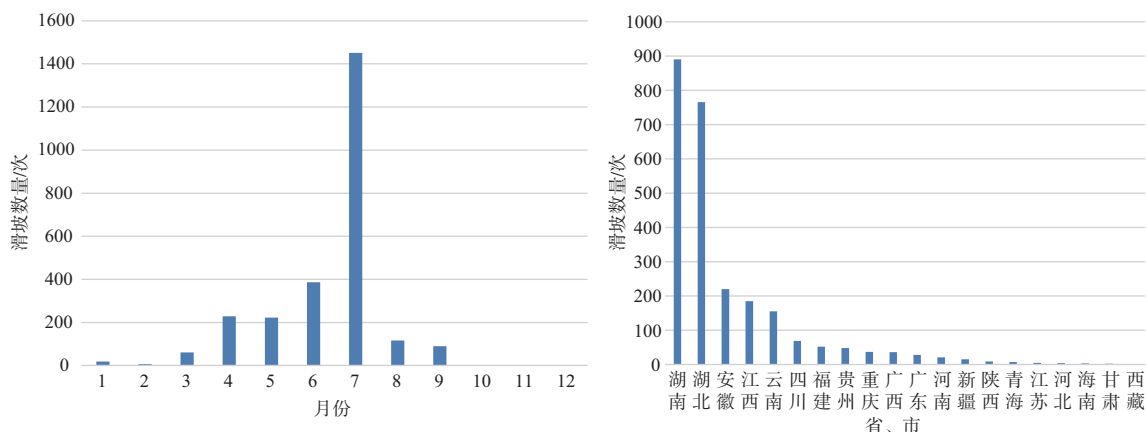


图 3 滑坡的时空分布 (2004—2016)

Fig. 3 Spatial and temporal distribution of landslide events in China (2004—2016)

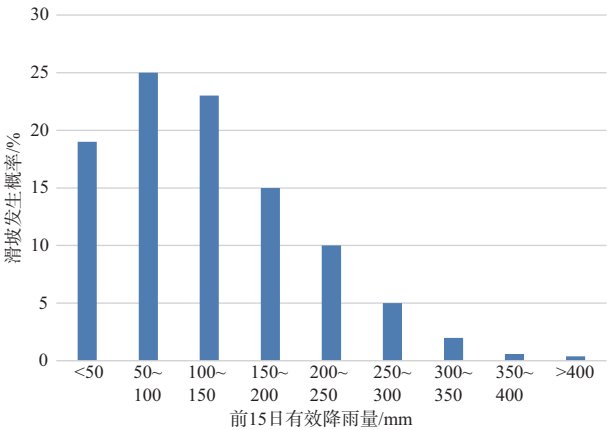


图4 滑坡发生前15 d有效雨量的频率分布

Fig.4 Frequency distribution for effective precipitation at a time of 15-day before landslide event

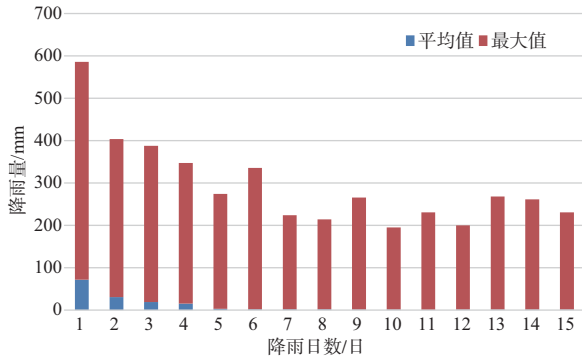


图5 滑坡灾害发生前15 d逐日雨量的最大值、平均值分布

Fig.5 Frequency statistic for the daily maximum and average rainfall during 15 days before landslides

的发生具有关键的作用,而滑坡发生前5 d以上的大部分时段均未发生降水,这与图5得出的结论基本上是一致的,同时,这在一定程度上也解释了图5中平均值减小的原因。

从滑坡发生前15 d逐日降水大于25 mm、50 mm、100 mm的频率分布来看(图7),滑坡发生前1 d的降水量达到大雨、暴雨及大暴雨量级的比例分别为67%、51%和27%,滑坡发生前2 d的降水量达到大雨、暴雨及大暴雨量级的比例则大幅度地降为37%、22%和7%,之后相隔滑坡发生时间越长,各个量级降水所占的比例均呈减小的趋势。由此可见,滑坡发生前1 d的降水量对诱发滑坡的发生是至关重要的。

2.3 本场激发雨量特征

除了前期降水对滑坡的发生有一定的影响以

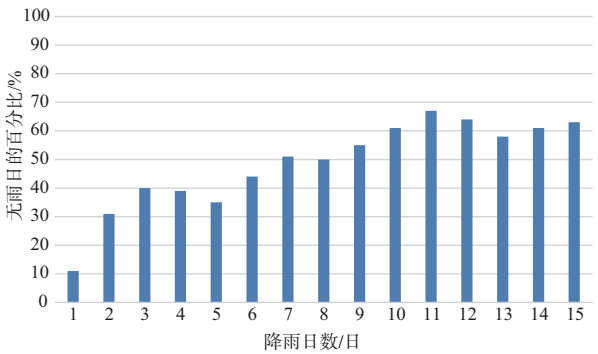


图6 滑坡灾害发生前15 d逐日的无雨日数频率分布

Fig.6 Frequency statistic for the non-rainy days during 15 days before landslides

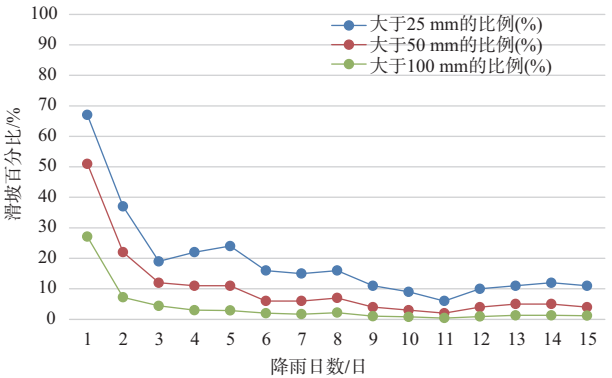


图7 滑坡发生前15 d逐日降水大于25、50、100 mm的频率分布

Fig.7 Frequency statistic for the daily rainfall more than 25 mm, 50 mm, and 100 mm during 15 days before landslides

外,本场激发雨量也对滑坡的发生有重要的诱发作用。前期雨量通过地表径流、土壤入渗等各种作用影响坡体的稳定性,并在一定的本场降水量激发作用下发生滑坡。表2表明,在所有发生的滑坡灾害个例中,本场激发降水量在25 mm及50 mm以上的占比分别为66%和53%,即大雨(日雨量达到25 mm的为大雨)以上量级的强降水更容易导致滑坡的发生。

表2 诱发滑坡的本场降水量频率

Tab.2 Frequency of the rainfall of the landslide day

| 本场激发降水量/mm | 滑坡所占比例/% |
|------------|----------|
| <25 | 34 |
| ≥25 | 66 |
| <100 | 47 |
| ≥100 | 53 |

从滑坡灾害发生时本场降水持续时间的分布来看(图8a),本场降水时间持续1 h、2 h、3 h的滑坡占比分别为16%、13%和7%,而本场降水时间持续6 h以上的滑坡占比则迅速减小,总体来看,本场降水持续时间在6 h以内的滑坡占比达到54%以上。这表明,导致滑坡灾害发生的本场激发降水持续时间主要集中在6 h之内,而从本场激发降水峰值雨强的分布来看(图8b),10 mm/h以上的滑坡占比为64%,这表明,以强度大、时间集中为特点的短时强降雨是诱发滑坡发生的关键因素,短时强降雨可以在一定程度上导致坡体瞬间形成大面积的地表汇流区并形成地表径流,地表径流快速入渗进入坡体,坡体滑动面被浸泡软化,降低了坡体的抗剪强度,增大了孔隙水压力,使处于极限平衡状态的坡体产生滑动导致滑坡灾害发生。

2.4 滑坡致灾降雨类型分析

一般认为,降雨型滑坡是前期有效雨量和本场

激发雨量共同作用的结果,但两者在导致滑坡发生过程中所起的作用很难进行量化。本文通过分析滑坡发生点的本场激发降水量在总降水量中的比例来量化前期雨量和本场降水量的作用,从本场激发降水量与总降水量比值分布来看(图9a),大约98%的滑坡灾害点的本场激发降水量与总降水量之比在0.6以下,这表明,尽管绝大部分的滑坡是在前期有效雨量和本场激发雨量的共同作用下产生的,但是相比较而言,前期15 d有效降水在导致滑坡的各个因素中占主导性地位,这也说明前期降水通过土壤入渗等作用影响坡体稳定性是导致滑坡发生不可或缺的因素。进一步的滑坡致灾降雨类型分布结果(图9b)也显示,前期有效降水主导型的滑坡所占比重最高,为55.1%,其次是前期及当日降水均衡型,占比为43.4%,而当日激发雨量主导型的滑坡所占比重仅为1.5%,这也表明,总体上说,本场激发雨量在诱发滑坡灾害的过程中所起的作用要明显

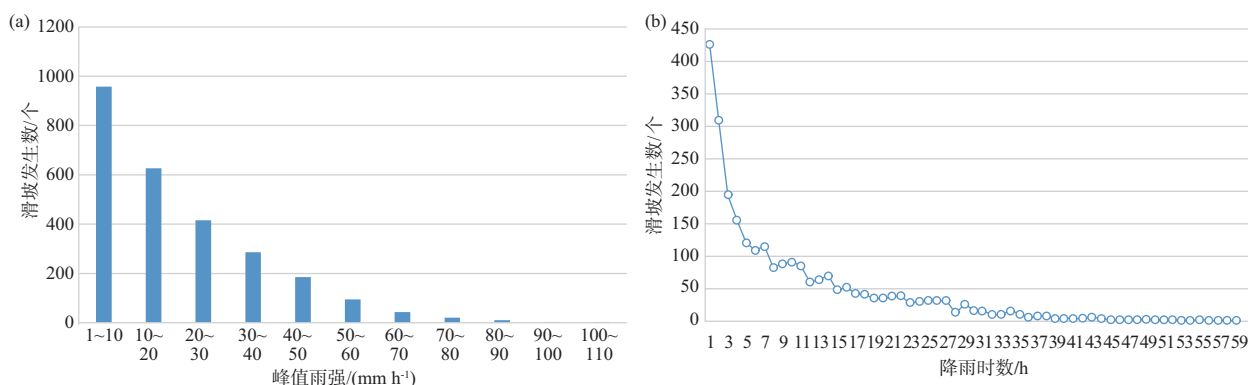


图8 滑坡灾害发生时峰值雨强(a)和本场降雨历时(b)

Fig. 8 Statistic for precipitation duration and peak precipitation for landslides

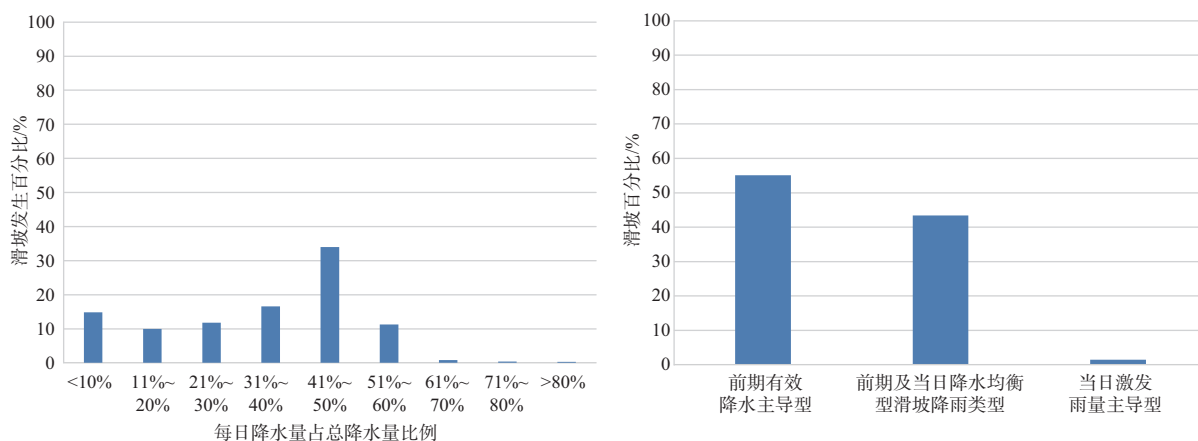


图9 本场激发降水量与总降水量比值分布(a)和滑坡致灾降雨类型分布(b)

Fig. 9 Distribution of ratio of induced precipitation to total precipitation (a) and distribution of precipitation types leading to landslides (b)

弱于前期雨量的作用,这明显不同于导致泥石流发生的降雨类型分布结果,导致泥石流发生的降雨类型一般以当日激发雨量主导型为主。总体上说,如果前期累积雨量足够大,即使当日激发雨量或者雨强比较小也可能会诱发滑坡灾害。这是因为前期降雨下渗后减小了滑坡体与岩石之间的摩擦力,使得边坡的稳定度减小,这时候只需不太大的本场激发雨量就会导致滑坡事件发生。

2.5 滑坡致灾降水的极端性分析

基于降水百分位的滑坡降雨阈值在一定程度上可以消除地域和季节因素,从而使计算得到的百分位降水阈值具有更大区域内的适用性和统一性,也具有更好的空间可比性。从导致滑坡事件的前 15 d 有效降水量和当日本场次降水量在历史同期降水序列中的分布来看(图 10),前 15 d 有效降水量在历史同期降水序列中超过第 50 百分位以上的占比为 96.3%,超过第 80 百分位的则有 90%,而当日本场降水量在历史同期降水序列中超过第 50 百分位以上的占比为 94%,超过第 80 百分位的则有 74%,从中可以看出,绝大多数滑坡事件中的前 15 d 有效降水量和当日本场降水量在历史同期降水序列中的超过第 50 百分位数占比相差不大,但超过第 80 百分位数的占比差别很大。这在一定程度上表明,针对滑坡灾害而言,前期 15 d 有效降水在历史同期降水序列中的第 80 百分位数比日降水的第 80 百分位数有更大的指示意义,当前期 15 d 有效降水在历史同期降水序列中超过第 80 百分位及以上时更容易诱发滑坡灾害的发生。

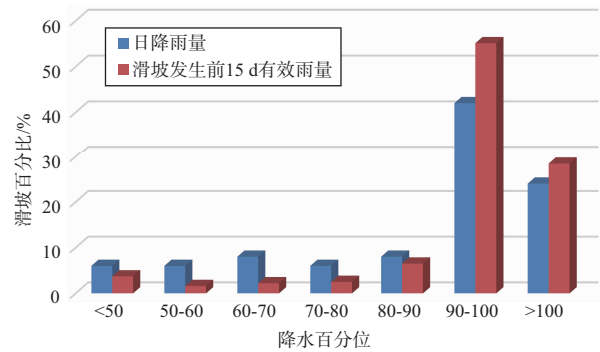


图 10 滑坡前 15 d 有效降水量和当日本场次降水量的降水百分位数分布

Fig. 10 Percentile of effective rainfall 15-day before landslide and the rainfall of the occurrence day

从图 10 也可以看出,导致滑坡事件的前 15 d 有效降水量和当日本场降水量具备极端性(在历史同期降水序列中超过第 90 百分位以上)的所占比例分别为 83.5% 和 66%,其中,导致滑坡事件的前 15 d 有效降水量和当日本场降水量超历史极值的所占比例分别为 28.4% 和 24%,这就表明,大部分的滑坡事件都伴随着极端性的降水,异常性或极端性的降水成为导致滑坡事件关键的诱发因素。这表明,山地环境在长期的历史进程(如气候地理演变)中形成了相对的稳定状态,每一个地方的边坡稳定性对当地的气候地理常态条件已经产生了一定的适应性,当该地的诱发因素(比如极端降水)超出常态条件下,发生滑坡灾害就成为大概率事件。

从前 15 d 有效降水量的第 90 百分位数值分布(图 11)来看,我国的前 15 d 有效降水量第 90 百分位数值自西北内陆向东南沿海递增,西北内陆的前

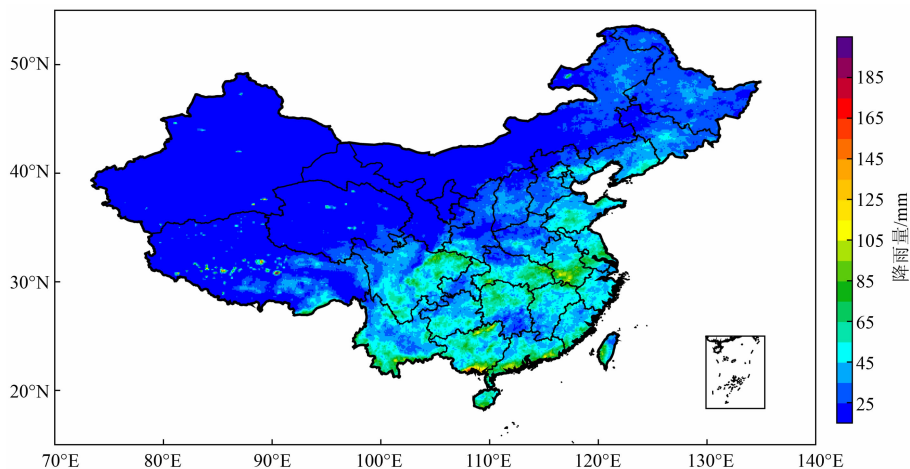


图 11 全国 15 d 有效降水量第 90 百分位降水阈值分布

Fig. 11 Distribution of the 90th percentile of 15-day effective rainfall in China

15 d 有效降水量第 90 百分位数值一般在 25 mm 以下,而作为滑坡易发区的西南地区 and 东南地区的前 15 d 有效降水量第 90 百分位数值一般在 80 mm 以上,东南沿海地区则达到 100 mm 以上。这也表明,从西北内陆到东南沿海地区,诱发滑坡灾害的降水阈值总体上是递增的。

3 结论

运用各种地面降水观测资料对全国数千起滑坡事件各个时间尺度的降水特征展开了系统性的分析,主要结论如下:

(1) 滑坡的产生是多种因素综合导致的,但降雨是其中最重要的外在诱发因素。滑坡灾害发生前 10 d 特别是前 5 d 的降雨是导致滑坡发生的关键因素,而且与滑坡事件发生时间相隔越长,降水对诱发滑坡事件的作用也越小。相比较而言,绝大部分的滑坡事件属于前期有效降水主导型,前期降水在导致滑坡的各个降水因素中占主导性地位。

(2) 滑坡事件的本场激发降水持续时间大多集中在 6 h 之内,而且小时降雨量一般在 10 mm 以上,以强度大、时间集中为特点的短时降水是诱发滑坡发生的关键因素,而且当前期有效雨量较大时,土壤饱和度较高,则当日诱发滑坡灾害所需的本场激发降雨量就比较小,反之较大。

(3) 滑坡事件前 15 d 有效降水量和当日本场降水量在历史同期降水序列中超过第 90 百分位以上的所占比例分别为 83.5% 和 66%,这表明,大部分的滑坡事件都伴随着极端性的降水,异常性或极端性的降水成为导致滑坡事件关键的诱发因素。

本研究主要是从全国尺度上来系统性分析滑坡致灾的降水特征,所得结论可以用于我国的降雨型滑坡预测,但是我国幅员广阔,每个区域的气候特征及地理特征都具有较大的差异性,而且本研究所涉及的滑坡样本数还是有限,在将来的研究中,采用更大数量的滑坡样本并分区域分析研究降雨型滑坡的降雨特征,以期进一步完善和改进多尺度降雨滑坡预报预警理论。

参考文献 (References)

[1] DAI F C, LEE C F. Frequency-volume relation and prediction of rainfall-induced landslides [J]. *Engineering Geology*, 2001, **59**

(3/4): 253 - 266.

- [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): 32 - 37. [LI Yuan, MENG Hu, DONG Ying. 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): 32 - 37]
- [3] CAINE N. The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows [J]. *Geografiska Annaler Series A-Physical Geography*, 1980, **62A**(1/2): 23 - 27.
- [4] CANNON S H, ELLEN S D. Rainfall conditions for abundant debris avalanches in the San Francisco bay region, California [J]. *California Geology*, 1985, **38**(12): 267 - 272.
- [5] LUMB, P. Slope failure in Hong Kong [J]. *Engineering Geology*, 1975, **36**(8): 31 - 65.
- [6] ONODERA T, YOSHINAKA R, KAZAMA H. Slope failures caused by heavy rainfall in Japan [J]. *Journal of the Japan Society of Engineering Geology*, 1974, **15**(4): 191 - 200.
- [7] GUIDICINI G, IWASA O Y. Tentative correlation between rainfall and landslides in a humid tropical environment [J]. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 1977, **16**(1): 13 - 20.
- [8] GUZZETTI F, CARDINALI M, REICHENBACH P, et al. Landslides triggered by the 23 november 2000 rainfall event in the Imperia province, Western Liguria, Italy [J]. *Engineering Geology*, 2004, **73**(3): 229 - 245.
- [9] 张珍,李世海,马力. 重庆地区滑坡与降雨关系的概率分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, **24**(17): 3185 - 3191. [ZHANG Zhen, LI Shihai, MA Li. Probability analysis of relationship between landslide and rainfall in Chongqing area [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, **24**(17): 3185 - 3191]
- [10] 朱晓霞,张力. 降雨引发的兰州黄土滑坡时空规律分析和临界降雨量预测[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2019, **30**(4): 24 - 31. [ZHU Xiaoxia, ZHANG Li. Characteristics of rainfall-induced loess landslides and threshold rainfall in Lanzhou [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2019, **30**(4): 24 - 31]
- [11] 张玉成,杨光华,张玉兴. 滑坡的发生与降雨关系的研究[J]. *灾害学*, 2007, **22**(1): 82 - 85. [ZHANG Yucheng, YANG Guanghua, ZHANG Yuxing. Research on the relationship between landslide and rainfall [J]. *Journal of Catastrophology*, 2007, **22**(1): 82 - 85]
- [12] 严中伟,杨赤. 近几十年中国极端气候变化格局[J]. *气候与环境研究*, 2000, **5**(3): 267 - 272. [YAN Zhongwei, YANG Chi. Geographic patterns of extreme climate changes in China during 1951 - 1997 [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2000, **5**(3): 267 - 272]
- [13] 黄琰,封国林,董文杰. 近 50 年中国气温、降水极值分区的时空

- 变化特征[J]. 气象学报, 2011, **69**(1): 125 – 136. [HUANG Yan, FENG Guolin, DONG Wenjie. Temporal changes in the patterns of extreme air temperature and precipitation in the various regions of China in recent 50 years [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2011, **69**(1): 125 – 136]
- [14] 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**(z1): 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**(S1): 1 – 10]
- [15] CROZIER M J, EYLES R J. Assessing the probability of rapid mass movement [G] // New Zealand Institute of Engineers. Proceedings of the Third Australia-New Zealand Conference on Geomechanics. Wellington: Proceedings of Technical Groups, 1980: 247 – 253.
- [16] CROZIER M J. Landslides: causes, consequences and environment[M]. London: Croom Helm Ltd., 1986: 185 – 189.
- [17] CROZIER M J, PRESTON N J. Modelling changes in terrain resistance as a component of landform evolution in unstable hill country [J]. Earth Science Lectures, 1998, **78**(7): 267 – 284.
- [18] SEGONI S, ROSSI G, ROSI A. Landslides triggered by rainfall: a semi-automated procedure to define consistent intensity-duration thresholds [J]. Computers & Geosciences, 2014, **63**(4): 123 – 131.
- [19] 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 Yueling. A new approach to calibrate antecedent precipitation for rainfall-triggering landslide forecast [J]. Mountain Research, 2011, **29**(1): 81 – 86]
- [20] GUZZETTI F, PERUCCACCI S, ROSSI M. Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe [J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 2007, **98**(3): 239 – 267.
- [21] ALEOTTI P. A warning system for rainfall-induced shallow failures [J]. Engineering Geology, 2004, **73**(3): 247 – 265.
- [22] PAUSTO A, SILVANO S. Rainfall as a triggering factor of shallow mass movements [J]. Environment Geology, 1998, **35**(2): 184 – 189.
- [23] 倪化勇, 王德伟. 基于雨量(强)条件的泥石流预测预报研究现状、问题与建议[J]. 灾害学, 2010, **25**(1): 124 – 128. [NI Huayong, WANG Dewei. Present status, problem and advice on the research of prediction and forecasting of debris flow based on rainfall condition [J]. Journal of Catastrophology, 2010, **25**(1): 124 – 128]
- [24] 赵安周, 朱秀芳, 潘耀忠. 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. Spatiotemporal variations of extreme precipitation events in the Loess Plateau from 1965 to 2013 [J]. Journal of Beijing University: Natural Science, 2017, **53**(1): 43 – 50]

Multi-Scale Rainfall Characteristics of Rainfall-Induced Landslides

XU Hui, LIU Haizhi

(National Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China)

Abstract: Under the background of global warming, geological disasters—including landslides and debris flows—are frequently triggered by extreme rainfall, and the relationship between rainfall and natural disasters has become a major scientific concern. This study reveals the relationship between landslide occurrence and rainfall based on a quantitative division of rainfall process. Based on surface rainfall records collected at national meteorological stations, the characteristics of rainfall at different time scales, which triggered 2658 landslides, were systematically analyzed. These characteristics was described as effective antecedent rainfall (EAR), induced rainfall, and extreme rainfall. The EAR was demonstrated to be the dominant factor for most landslides, suggesting that the effect of triggering rainfall related to landslides was weaker than that of EAR; However, the situation was quite different for debris flow formation, where the triggering rainfall process was dominant. The rainfall triggering debris flow occurrence was a result of induced rainfall of the same day. As for the rainfall process triggering landslides, the rainfall within the first six hours was an significant factor. Moreover, rainfall in the first 10-days before landslide disasters—especially the first 5-days—was the key factor leading to their occurrence. It was far easier for landslides

to occur when the 15-day effective rainfall reaches 50 ~ 100 mm. The longer the time before landslide events occurred, the smaller the effect of rainfall on the motivation of landslide-induced events. The rainfall one day before the occurrence of a landslide event was the most significant factor inducing the landslide. Also, the triggering rainfall process was mainly short in duration but with high intensity. Short-duration with high volume of rainfall can generate a large area of surface confluence and surface runoff on slopes, resulting in slopes to be soaked and softened, which reduced the shear strength of slope soil and correspondingly increased pore water pressure, finally causing landslide occurrence. And extreme rainfall was also a key trigger for landslides. The time series of the occurrence data showed that both the 15-day EAR and the rainfall of the event day exceeded the 90th percentile over the same period, which depicted the extremity of rainfall. It can say that rainfall threshold based on rainfall percentile can eliminate regional and seasonal factors to some extent. In conclusion, the calculated rainfall percentile threshold has greater regional applicability and unity, with better spatial comparability. It is therefore imperative to take into consideration extreme rainfall as an important trigger of landslides. It could help improve landslide forecasting and subsequent measures to minimize the damage caused by landslides to people's lives and property.

Key words: landslide; extreme rainfall; the effective antecedent rainfall; induced rainfall