

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2022.02-15

王海芝, 曾庆利, 许冰, 等. 北京“7·21”特大暴雨诱发的地质灾害类型及其特征分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(2): 125-132.

WANG Haizhi, ZENG Qingli, XU Bing, *et al.* Types and characteristics of geological disasters induced by the “7·21” rainstorm in Beijing [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(2): 125-132.

# 北京“7·21”特大暴雨诱发的地质灾害类型及其特征分析

王海芝<sup>1</sup>, 曾庆利<sup>2</sup>, 许冰<sup>2,3</sup>, 胡福根<sup>1</sup>, 于淼<sup>1</sup>

(1. 北京市地质研究所, 北京 100120;

2. 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049;

3. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029)

**摘要:** 降雨是突发地质灾害主要诱因之一, 文章通过剖析降雨及其引发的地质灾害的典型实例, 研究突发地质灾害时空分布特点及规律, 为极端气象条件下的防灾减灾提供技术支持。文中对北京市有气象记录以来强度最大的“7·21”特大暴雨及其引发的地质灾害数据进行系统分析, 分析不同类型的突发地质灾害数量、规模、灾情与降雨量及降雨强度之间的响应关系, 重点研究了北京西部山区短时强降雨泥石流发生的阈值。结果显示, 随着与降雨中心距离的增加, 突发地质灾害的数量、种类及规模逐渐变少, 降雨强度是诱发突发地质灾害的关键因素; 不同类型突发地质灾害的激发雨量和雨强具有明显差别, 泥石流、滑坡的触发雨量与雨强高于崩塌; 北京山区诱发泥石流的累计降雨量阈值为 187.4~257.2 mm, 小时雨强阈值为 51.2~62 mm。基于研究结果将“7·21”触发泥石流的实时数据与以往基于平均雨强的泥石流临界雨量进行对比, 对北京基于平均雨强的临界雨量模型进行了修正, 为提高地质灾害的预警预报精度提供技术保障。

**关键词:** 时空维度; 暴雨量; 诱发地质灾害类型特征; “7·21”特大暴雨

中图分类号: P642

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2022)02-0125-08

## Types and characteristics of geological disasters induced by the “7·21” rainstorm in Beijing

WANG Haizhi<sup>1</sup>, ZENG Qingli<sup>2</sup>, XU Bing<sup>2,3</sup>, HU Fugen<sup>1</sup>, YU Miao<sup>1</sup>

(1. Beijing Institute of Geology, Beijing 100120, China;

2. College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

**Abstract:** Because of rainfall is one of the main inducing factors of sudden geological disasters, by analyzing the temporal and spatial distribution characteristics of typical rainfall and the induced geological disasters, this paper studies the characteristics and laws of different types of rainfall and its induced sudden geological disasters, so as to provide technical support for disaster prevention and reduction under extreme meteorological conditions. Using the method of typical case analysis, this paper systematically analyzes the “7·21” rainstorm with the greatest intensity since the meteorological records in Beijing and its

收稿日期: 2021-05-26; 修订日期: 2021-09-07

投稿网址: <https://www.zgdzhyfzxb.com/>

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41772182; 41672181)

第一作者: 王海芝(1975-), 女, 硕士, 高工, 主要从事地质灾害预报预警。E-mail: 418424101@qq.com

通讯作者: 许冰(1969-), 男, 博士, 研究员, 主要从事地质环境研究。E-mail: bingx\_1@163.com

geological disaster data, and studies the response relationship between the number, scale and disaster situation of different types of sudden geological disasters and rainfall and rainfall intensity, This paper focuses on the threshold of short-term heavy rainfall debris flow in the mountainous area of western Beijing. The results show that with the increase of the distance from the rainfall center, the number, type and scale of sudden geological disasters gradually decrease, and the rainfall intensity is the key factor inducing the occurrence of sudden geological disasters. The triggered rainfall and rainfall intensity of different types of sudden geological disasters are obviously different. The triggered rainfall intensity and rainfall of debris flow and landslide are higher than that of collapse. The cumulative rainfall threshold of debris flow induced in Beijing mountainous area is 187.4–257.2 mm, and the hourly rainfall intensity threshold is 51.2–62 mm. Based on the research results, the real-time data of debris flow triggered by “7·21” are compared with the previous critical rainfall of debris flow based on average rainfall intensity, and the critical rainfall prediction model based on average rainfall intensity in Beijing is modified, so as to provide technical guarantee for improving the accuracy of early warning and prediction of geological disasters.

**Keywords:** spatiotemporal dimension; rainstorm volume; types and characteristics of induced geological hazards; “7·21” torrential rain

## 0 引言

北京是世界上突发地质灾害发育的首都城市之一。根据北京市规划自然资源委公布的官方数据,截至 2020 年底,北京市山区共发现 4 964 处突发地质灾害隐患,许多村镇和旅游景区都处在地质灾害隐患高发区,人居环境及生命财产受地质灾害的潜在威胁严重。据统计,自 2003 年以来,北京市共发生地质灾害 568 起<sup>[1]</sup>,造成数百亿经济损失。研究大暴雨诱发不同类型突发地质灾害及诱发因素的变化特征,实现突发地质灾害的精确预警是防灾减灾研究的重点与关键。国内外众多研究表明降雨是触发突发地质灾害的主导因素,滑坡、泥石流的发生与降雨量和降雨强度密切相关<sup>[2-8]</sup>。但是,过去对突发地质灾害临界雨量的研究,缺少降雨与地质灾害的详细记录,多是基于对历史上灾害事件统计分析,缺乏真实触发地质灾害降雨特征信息,预测预报存在一定的误差。因此,基于详细降雨过程及其激发的突发地质灾害的案例研究,对于提高预警预报的精度显得尤为迫切和重要。

2012 年 7 月 21 日 10 时—22 日 4 时(以下简称“7·21”),北京市大部分地区出现大暴雨,局地特大暴雨天气。强降雨造成北京约 160.2 万人受灾,78 人死亡,20 000 hm<sup>2</sup> 农作物受灾,525 架次航班取消,道路桥梁多处受损,交通几近瘫痪;经济损失达 116.4 亿元<sup>[6]</sup>。全市 6 个山区,3 个浅山区共发生突发地质灾害 161 处,造成 3 人死亡、1 人重伤、90 余处房屋受损,超过 5 km 道路堵塞,此外还有大量农田、挡墙等工程设施被毁坏<sup>[9]</sup>,是有突发地质灾害记录以来规模最大的一次群发性地质灾害事件。

文中采用典型案例的方法,通过对“7·21”降雨及其引发的大范围突发地质灾害数据的分析整理,研究突发地质灾害数量、规模、灾情与降雨量及降雨强度之间的响应关系,分析不同类型突发地质灾害的激发雨量、激发雨强的条件,给出短时强降雨泥石流发生的雨量及雨强阈值,探索加强基于实时降雨的突发地质灾害临界雨量阈值研究的方法,在提高突发地质灾害防灾减灾效率方面具有较好的应用前景。

## 1 区域地质环境条件

北京市是由西北部的山地和东南部的平原两大地貌单元组成。北部山区属于燕山山脉系统,以近东西向的山地为主体,主要由中上元古界沉积岩、中生界侵入岩组成。山体具有块状分散、地势陡峻、起伏较大等特点。西部和西北部的山区属太行山脉,是新构造运动强烈上升区,经外力长期侵蚀切割形成起伏山峦,主要由中生界、古生界和中新元古界地层组成,岩性以碳酸盐岩、各类碎屑岩及火山岩为主。东南部平原由河流冲洪积物堆积而成,地势平缓。

根据地形划分标准<sup>[10]</sup>,北京山区多为中低山。中低山区是突发地质灾害高易发区,丘陵是突发地质灾害的中低易发区,山间盆地和平原是突发地质灾害的不易发区<sup>[11-12]</sup>。其中,中山区主要分布于北京市北部与西部山区的边缘地带,面积 1 041 km<sup>2</sup>,海拔大于 1 000 m,地形高差一般在 500 m 以上,山势险峻,地形坡度多大于 35°。中山区山高坡陡,山体高大,阻碍气流云团移动,迫使云团沿地形抬升,导致局部地区强暴雨的形成,是大型崩塌、滑坡及泥石流形成的重要地段<sup>[13]</sup>。低山区广布于北京市山区,面积 4 648.1 km<sup>2</sup>,海拔 500 ~

1 000 m,地形起伏较大,平均坡度在 25°左右。地形切割强烈,松散物质丰富,是突发地质灾害发生的主要区域。丘陵主要分布于山区和平原交接地区,面积约 4 383.4 km<sup>2</sup>,海拔低于 500 m,相对高度不超过 200 m。丘陵所在区域由于坡度较缓、地形高差较小,不良地质现象和地质灾害不发育。平原区主要由永定河、潮白河、温榆河、拒马河等河流的洪积、冲积作用形成,面积约 6 338 km<sup>2</sup>。

## 2 北京地质灾害类型及特征

2002 年北京市完成了以区(县)为单元的潜在地质灾害的调查与区划工作,初步查明了潜在地质灾害的种类、范围、规模和危害程度等要素,划定了地质灾害高、中、低易发区和非易发区。2012 年“7·21”特大自然灾害后,原市国土局组织实施了“北京市突发地质灾害详细调查(1:5 万)”项目,对北京市山区及浅山区的崩塌、滑坡、泥石流及地面塌陷等突发地质灾害进行详细调查,查明了山区及浅山区突发地质灾害及其隐患的发育特征、分布规律及形成的地质环境条件,并对其危害程度进行了评价。上述调查成果查明北京市大部分突发地质灾害隐患,为北京市防灾减灾提供了可靠的数据支撑。但是由于调查手段的局限性和突发地质灾害的高隐蔽性,仍有一定数量的突发地质灾害尚未被发现。

经调查,北京市山区发育的地质灾害类型包括崩塌、滑坡、泥石流、采空塌陷、不稳定斜坡。根据北京市规划自然资源委公布的官方数据,截至 2020 年底,北京市山区共发育 4 964 处突发地质灾害隐患。其中崩塌 2 623 处,滑坡 56 处,泥石流 811 处,地面塌陷 95 处,不稳定斜坡 1 379 处(表 1)。

表 1 北京市各区地质灾害类型及数量统计一览表

Table 1 Statistical list of types and quantities of geological hazards in various districts of Beijing

所在区	地质灾害数量	地质灾害类型/处				
		崩塌	不稳定斜坡	地面塌陷	滑坡	泥石流
房山区	931	420	306	38	13	154
门头沟区	703	512	90	49	5	47
昌平区	440	265	132	0	4	39
密云区	1 065	374	436	0	5	250
平谷区	436	181	180	6	21	48
海淀区	41	21	10	1	0	9
石景山区	28	11	15	0	1	1
怀柔区	710	423	69	0	6	212
丰台区	28	17	8	0	0	3
延庆区	582	423	69	0	6	48
合计	4 964	2 623	1 379	95	56	811

北京市突发地质灾害总体特征表现在三个方面,第一是数量多、规模小:全市共发育 4 964 处突发地质灾害隐患,其中小型隐患 4 522 处,是全部隐患数量的 91.10%;第二是分布面积广,分布不均匀:突发地质灾害隐患分布于北京市 10 个山区及浅山区,其中房山区、门头沟区、密云区、怀柔区共发育 3 409 处,占全部突发地质灾害隐患的 68.7%;第三是类型全,险情差异大:全市特大型险情的灾害隐患仅 5 处,大型险情的为 7 处,中型险情的 92 处,其余的全部为险情小型。

## 3 北京“7·21”特大暴雨情况介绍

2012 年 7 月 21 日 10 时—22 日 4 时,受东移南下的冷空气和西南气流的共同影响,北京市普降暴雨,局部地区特大暴雨,全市平均降雨 195 mm,平均降雨为大暴雨级别<sup>[14]</sup>。“7·21”降雨是北京市自 1951 年有气象记录以来最强的一次降雨过程,具有范围广、强度大、持续时间长、山地加强等特点。暴雨、大暴雨及特大暴雨覆盖面积 1.42×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>,占全市面积的 86%<sup>[15]</sup>(图 1)。暴雨中心位于房山区河北镇,该处 16 h 降雨量 541 mm,达到了 500 年一遇。全市累积降雨量>100 mm 的雨量站达到了 211 个,占全部雨量站总数的 92%;96 个站累积降雨量>200 mm;12 个站累积降雨量>300 mm<sup>[16]</sup>;强降雨持续时间长达 7 h(15:00—21:00),其中河北镇长达 5 h 降雨强度达到 80~100 mm;暴雨带呈西南-东北方向移动,各级别暴雨空间分布界线清晰,展布方向一致(图 1)。

## 4 “7·21”特大暴雨致灾地质灾害特征分析

“7·21”暴雨引发的突发地质灾害特点为:点多、面广、类型齐全,分布规律性强、灾情等级高。灾害数量空间分布与各级暴雨空间分布高度一致,“7·21”暴雨激发的突发地质灾害覆盖了除延庆之外的山区与浅山区(图 1、图 2)。本场暴雨共引发各类突发地质灾害 161 处,其中房山区 105 处,门头沟区 24 处,昌平区 13 处,三个区灾害数量为 142 处,占本次突发地质灾害总数的 88.20%(表 2、图 2)。各区突发地质灾害数量由多到少依次为:房山区>门头沟区>昌平区>密云区>平谷区=海淀区>石景山区>怀柔区>丰台区。

“7·21”降雨激发的突发地质灾害类型包括了崩塌、滑坡、泥石流、地面塌陷及不稳定斜坡 5 种。其中崩塌 99 处,泥石流 24 处,不稳定斜坡 18 处,滑坡 13 处,地面塌陷 7 处(图 3)。崩塌数量占总数的 61.49%,泥石流数量占总数的 14.91%,不稳定斜坡数量占总数的 11.18%。

“7·21”降雨激发的灾害险情差异较大,根据地质

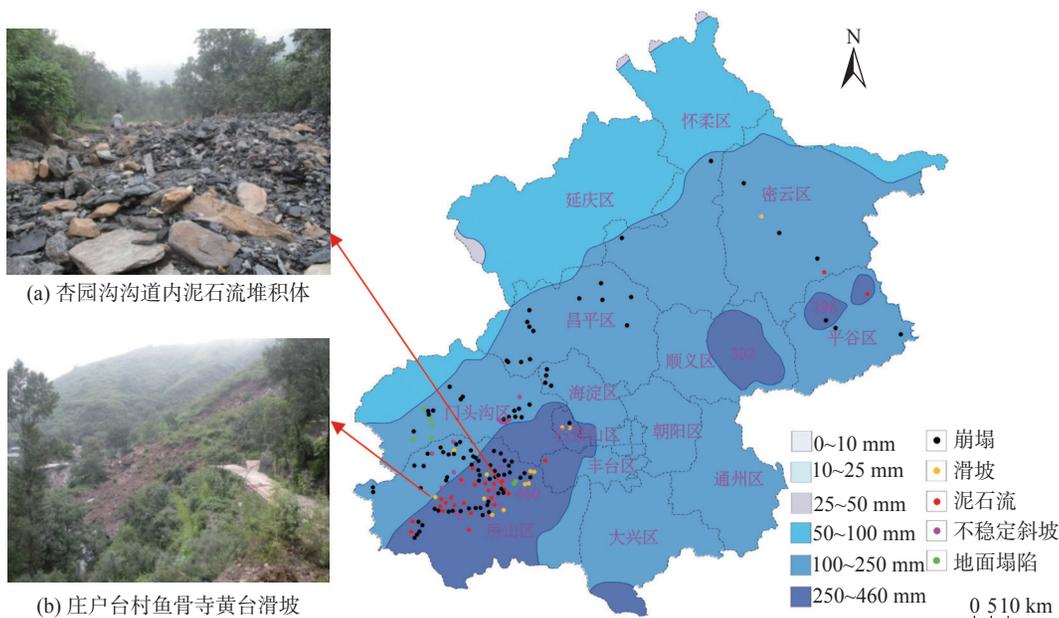


图 1 “7·21”北京市降雨及突发地质灾害空间分布简图

Fig. 1 Spatial distribution of rainfall and sudden geological disasters in Beijing on 21, July

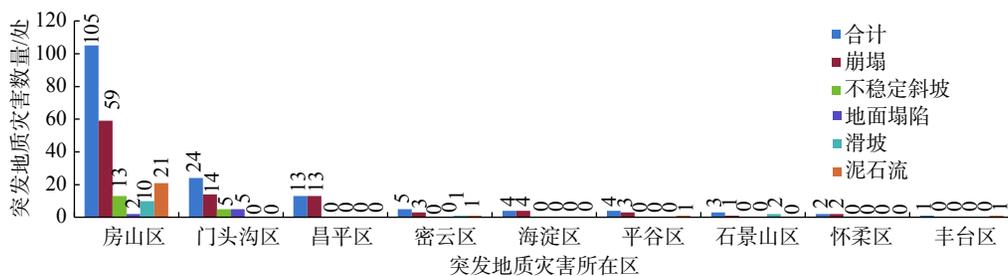


图 2 “7·21”突发地质灾害分区数量统计图

Fig. 2 Statistical chart of geological disasters triggered by “7·21” rainstorm

表 2 “7·21”北京市各区地质灾害类型及数量统计一览表

Table 2 Statistical list of types and quantities of geological disasters in Beijing on 21, July

所在区	地质灾害数量	地质灾害类型/处				
		崩塌	不稳定斜坡	地面塌陷	滑坡	泥石流
房山区	105	59	13	2	10	21
门头沟区	24	14	5	5	0	0
昌平区	13	13	0	0	0	0
密云区	5	3	0	0	1	1
平谷区	4	3	0	0	0	1
海淀区	4	4	0	0	0	0
石景山区	3	1	0	0	2	0
怀柔区	2	2	0	0	0	0
丰台区	1	0	0	0	0	1
延庆区	0	0	0	0	0	0
合计	161	99	18	7	13	24

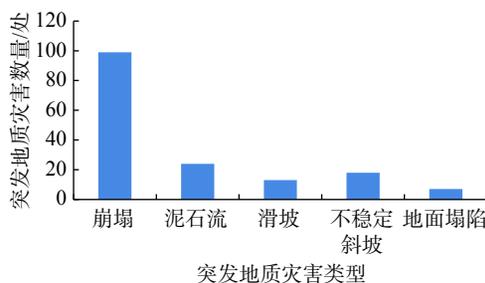


图 3 “7·21”暴雨激发的突发地质灾害类型及数量统计图

Fig. 3 Statistical chart of types and quantity of sudden geological disasters triggered by “7·21” rainstorm

灾害分类分级标准<sup>[17]</sup>, 特大级 1 处、重大级 1 处、较大

级 2 处、一般级 157 处, 占灾害总数的 97.52%(表 3)。“7·21”地质灾害造成了重大的损失, 包括 3 人死亡、1 人重伤、90 余处房屋受损, 超过 5 km 道路堵塞, 此外还有大量农田、挡墙等工程设施被毁坏。其中 1 处灾情特大级的泥石流沟出现在暴雨中心房山区河北镇的

西区沟,见图1(a);1处灾情重大级的泥石流沟出现房山区南窖乡南窖村泥石流沟;2处灾情较大级的地质灾

害出现在房山区霞云岭乡庄户台村,分别是庄户台村鱼骨寺滑坡见图1(b)和庄户台村港沟泥石流。

表3 “7·21”北京市各区地质灾情统计一览表

Table 3 Statistics of geological disasters in Beijing on 21, July

所在区	灾害数量	灾情等级				灾害损失情况
		一般级	较大级	重大级	特大级	
房山区	105	101	2	1	1	造成1人死亡,80余处房屋受损,超过5公里道路堵塞,另外造成大量农田及果树毁坏,大量干砌石挡墙倒塌,部分桥梁以及景区设施破坏
门头沟区	24	24	0	0	0	损坏房屋7间,造成妙峰山景区道路中断,3处挡墙倒塌,破坏农田及果园
昌平区	13	13	0	0	0	未造成人员伤亡、房屋损坏及道路破坏,一辆大货车损坏
密云区	5	5	0	0	0	无人员伤亡及房屋损坏,主要造成部分道路阻塞,破坏50亩农田
海淀区	4	4	0	0	0	封堵占压防火通道,损坏挡墙60余米,破坏树木70余棵
平谷区	4	4	0	0	0	无人员伤亡及房屋损坏,造成部分村级道路破坏,毁坏3处村公共卫生间、农田20亩以及果树100棵,砸毁轿车2辆,损坏部分景区护栏及人行步道
石景山区	3	3	0	0	0	造成2人死亡,1人重伤,1间房屋倒塌,6处房屋受损,4处干砌石挡墙倒塌
怀柔区	2	2	0	0	0	损坏房屋2间
丰台区	1	1	0	0	0	冲毁在建旅游步道,淤平沟口水池
合计	161	157	2	1	1	—

## 5 基于时空维度的暴雨量致灾地质灾害分析

### 5.1 降雨与突发地质灾害之间的关系分析

“7·21”短历时、高强度的降雨特征引发了大规模群发性地质灾害事件。在19h的降雨时间段内,全市平均降雨量达到了大暴雨级别,暴雨中心达到了特大暴雨级别,且强小时雨强持续时间长达7h(15:00—21:00)。“7·21”降雨激发的突发地质灾害在数量、规模及灾情上都与降雨特征具有极其清晰的响应关系。

突发地质灾害的数量、规模以及灾情等级与降雨的时空分布具有高度的一致性。突发地质灾害均分布于累积雨量 $\geq 100$  mm的降雨落区内,灾害的数量随着与暴雨中心距离的增加,明显减少。处于暴雨中心的房山区共发生突发地质灾害105处,占总数的65.22%;其次是门头沟区,发生突发地质灾害24处,占总数的14.91%;第三是昌平区,发生突发地质灾害13处,占突发地质灾害总数的8.18%。所发生的突发地质灾害灾情的大小也随着与暴雨中心距离的加大而逐渐变小,其中特大级灾情出现在降雨中心——河北镇;重大级灾情发生在南窖乡,距离暴雨中心河北镇23 km;较大级灾情发生在霞云岭乡,距离暴雨中心34 km。

地质灾害类型的数量也与距暴雨中心的距离密切相关。暴雨中心区域较周边地区灾害类型多,如暴雨中心的房山区发生了5种类型的突发地质灾害,而与之毗邻的门头沟区发生了3种,其他各区仅发生了2种或1种突发地质灾害。

地质灾害类型与降雨量和降雨强度密切相关。泥

石流、滑坡仅出现在特大暴雨落区内,崩塌、地面塌陷及不稳定斜坡出现在大暴雨的落区内。其中24处泥石流灾害均出现在累积降雨量 $\geq 250$  mm落区范围,其他突发地质灾害均出现在累积降雨量 $\geq 100$  mm落区范围。

综上所述,北京市突发地质灾害的发生与降雨特征密切相关,表明降水是触发地质灾害的关键因素。雨量与雨强越大,激发突发地质灾害的类型、数量就越多,险情就越高,反之,则越小和越弱。因此,研究突发地质灾害发生时期的降雨特征对于北京地区地质灾害的预报预警具有重要意义。

### 5.2 典型区域降雨与典型突发地质灾害(泥石流)的关系分析

目前研究现状和文中相关数据不具备详细分析其它突发地质灾害临界雨量的条件,所以以分析典型突发地质灾害泥石流临界雨量阈值为主。

房山区作为“7·21”降雨的中心,降雨强度和累积雨量明显高于与之毗邻的门头沟区。为了明确在前期无降雨的条件下,突发地质灾害发生的激发雨强及累积雨量的阈值,选取了房山区具有代表性的霞云岭雨量站的过程雨量与门头沟区的过程雨量进行分析,以期获取在前期无明显降雨的条件下,突发地质灾害发生的阈值。

从降雨过程来看,两个区的主要降雨时段均集中在21日11:00—20:00(图4),其中房山区的强降雨过程集中在16:00—19:00四个小时的时段内。泥石流灾害也发生在此时段内。指示这四个小时的累积雨量也是泥石流发生的主要触发雨量。房山区泥石流均发生于

18:00 之后较短的时间内, 激发雨强为 62 mm/h, 累积雨量为 257.2 mm。同时段门头沟区小时雨强为 51.2 mm/h, 累积雨量为 187.4 mm, 但是门头沟区却没有泥石流发

生。由此, 西部山区在无前期累积雨量的前提下, 泥石流发生的阈值为:  $187.4 \text{ mm} < \text{累积雨量} \leq 257.2 \text{ mm}$ ,  $51.2 \text{ mm/h} < \text{降雨强度} \leq 62 \text{ mm/h}$ 。

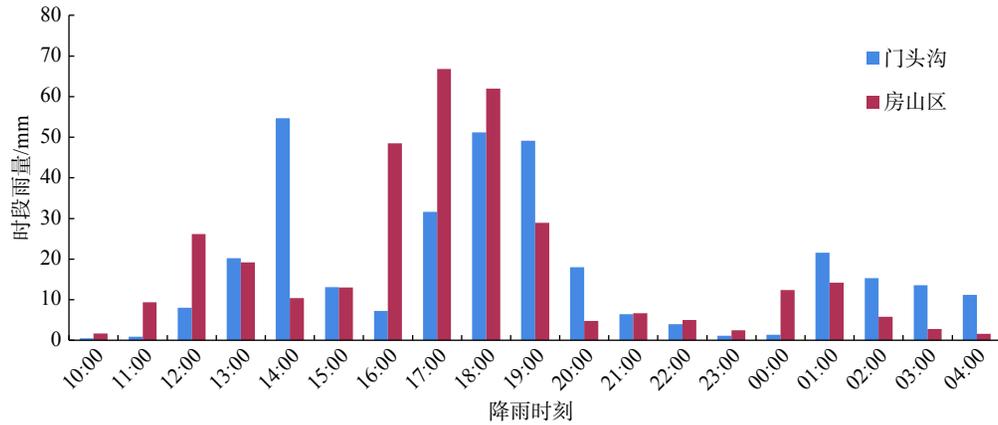


图 4 典型区域“7·21”暴雨过程柱状图  
Fig. 4 Histogram of “7·21” rainstorm process in typical area

在累积雨量处于同一数量级的前提下, 高雨强及高雨强持续的时间是决定突发地质灾害数量的关键性因素。此次暴雨过程, 房山区共发生突发地质灾害 105 处, 门头沟区发生突发地质灾害 24 处(表 2), 房山区突发地质灾害数量是门头沟区突发地质灾害数量的 4.38 倍。以本场降雨的强降雨时段 16:00—19:00 作为突发地质灾害的主要发生时段进行分析, 房山区在此时段内的累积雨量为 206.2 mm, 门头沟区在此时段内的累积雨量为 139.1 mm, 房山区的平均小时雨强为 51.55 mm/h, 门头沟区在此时段内的平均小时雨强为 34.78 mm/h, 此时段内房山区的累积雨量及平均小时雨强是门头沟区的 1.48 倍, 但是房山区发生的突发地质灾害数量却是门头沟区的 4.38 倍, 显示雨强与突发地质灾害数量之间是呈倍数级的关系。

### 5.3 基于实时降雨的泥石流临界雨量阈值分析

对于北京市泥石流临界雨量的研究, 以前的研究主要是基于一次或几次泥石流事件时期降水数据, 进行定性或简单的统计分析, 阈值的确定多是根据短时间(如 10 min、1 h、3 h、6 h 和 24 h)最大降雨强度来推测<sup>[18]</sup>。但多数情况下, 这些时段强降水与泥石流发生时间之间的相关关系并不清楚, 而且两者之间并未发现有明显的线性关系<sup>[19]</sup>, 表明利用上述数据进行临界雨量的确定具有一定的不确定性。

吴正华<sup>[20]</sup>根据降雨量-持续时间的经验模型( $R=421.6 \times D^{0.475}$ )对北京市泥石流发生的临界降雨强度进行分析, 表明日降雨量 200 mm 以上的特大暴雨过程是高

险情泥石流发生的雨量条件。涂剑等<sup>[21]</sup>利用历史上 18 次泥石流发生的峰值降水持续时间和 3 h 降雨的平均降水强度拟合了泥石流的临界雨量为  $I=35.4 \times D^{-0.18}$ 。Ma 等<sup>[22]</sup>对 2000 年前和 2000 年以后的数据进行了单独分析, 建立了地区和区域临界雨量模型。王海芝<sup>[23]</sup>通过对 1949 年以来北京地区发生的泥石流及其发生时期的降水数据分析, 建立了基于平均降雨量和降雨强度的临界值模型:  $I=56.9 \times D^{-0.746}$ 。

将“7·21”降雨过程中触发泥石流的实时降雨数据与过去基于平均雨量和雨强的临界值进行对比(图 5)。从图 5 中可以清楚的发现, 2012 年 7 月 21 日触发泥石流的实时数据均位于基于平均雨强的临界值上部。另外, 1989 年 7 月 21—22 日降雨过程中<sup>[20]</sup>触发泥石流实时数据的降雨强度也远高于过去的临界雨量模型(图 5)。上述特征表明, 过去基于平均降雨强度的临界

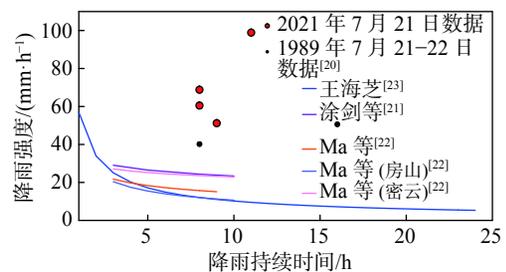


图 5 “7·21”触发泥石流的降雨强度与过去基于平均雨强的临界雨量比较

Fig. 5 Comparison of rainfall intensity of debris flow triggered by “7·21” with critical rainfall based on average rainfall intensity in the past

雨量模型在对北京地区的预报预警中具有一定的指示意义,但可能存在较大的误报率。即基于这些临界雨量模型的预警值低于实际触发泥石流的临界值,具有较高的保险系数,但可能存在较高的误报率,在防灾减灾工作中造成不必要的人力和财力损失。基于实时数据的临界雨量值,相对于平均雨量和雨强的临界值,具有更高的准确率。

## 6 结论

(1)北京市突发地质灾害的种类、数量、规模以及灾情等级与降雨量及降雨强度密切相关。降雨中心是突发地质灾害数量、规模及灾情最严重的区域,随着与降雨中心距离的加大,突发地质灾害的数量、种类及规模逐渐变少或变小。降雨强度是控制突发地质灾害强度的关键因素。

(2)不同类型突发地质灾害的激发雨量和雨强不同。泥石流、滑坡发生的降雨条件高于崩塌发生的降雨条件。在无前期累积雨量的前提下,西部山区短历时强降雨激发泥石流的阈值为:187.4 mm<累积雨量≤257.2 mm, 51.2 mm/h<降雨强度≤62 mm/h。

(3)通过“7·21”事件中触发泥石流降雨的详细数据与过去基于平均降雨强度的临界雨量的对比发现,过去基于平均雨强的临界雨量,尽管有较大的保险系数,但可能有较大误报率,基于实时数据的临界雨量具有更高的精确性。因此,今后的工作应加强基于实时数据的临界雨量研究。

## 参考文献 (References) :

- [1] 北京市地质研究所.北京市突发地质灾害应急调查报告 [R]. 2003—2020. [Beijing Institute of Geology. Emergency investigation report on sudden geological disasters in Beijing [R]. 2003—2020. (in Chinese)]
- [2] PALLADINO M R, VIERO A, TURCONI L, et al. Rainfall thresholds for the activation of shallow landslides in the Italian Alps: The role of environmental conditioning factors [J]. *Geomorphology*, 2018, 303: 53 - 67.
- [3] ROSI A, SEGONI S, CANAVESI V, et al. Definition of 3D rainfall thresholds to increase operative landslide early warning system performances [J]. *Landslides*, 2021, 18(3): 1045 - 1057.
- [4] SEGONI S, PICIULLO L, GARIANO S L. A review of the recent literature on rainfall thresholds for landslide occurrence [J]. *Landslides*, 2018, 15(8): 1483 - 1501.
- [5] 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): 656 - 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): 656 - 661. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 孙继松,何娜,王国荣,等.“7·21”北京大暴雨系统的结构演变特征及成因初探 [J]. *暴雨灾害*, 2012, 31(3): 218 - 225. [SUN Jisong, HE Na, WANG Guorong, et al. Preliminary analysis on synoptic configuration evolvement and mechanism of a torrential rain occurring in Beijing on 21 July 2012 [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 2012, 31(3): 218 - 225. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 刘艳辉,唐灿,吴建波,等.地质灾害与不同尺度降雨时空分布关系 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2011, 22(3): 74 - 83. [LIU Yanhui, TANG Can, WU Jianbo, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of geo-hazards and rainfall in different scales [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2011, 22(3): 74 - 83. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 丁桂伶,王翊虹,冒建,等.北京市泥石流易发区降雨阈值研究 [J]. *水文地质工程地质*, 2017, 44(3): 136 - 142. [DING Guiling, WANG Yihong, MAO Jian, et al. A study of the rainfall threshold of debris flow forewarning in Beijing based on susceptibility analysis [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2017, 44(3): 136 - 142. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 北京市地质研究所.北京市7·21地质灾害应急调查报告 [R]. 2012. [Beijing Institute of Geology. Beijing 7·21 geological disaster emergency investigation report [R]. 2012. (in Chinese)]
- [10] 汪新文.地球科学概论 [M].北京:地质出版社,1999: 24-25. [WANG Xinwen. Introduction to earth science [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1999: 24 - 25. (in Chinese)]
- [11] 罗守敬,王珊珊,付德荃.北京山区突发性地质灾害易发性评价 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2021, 32(4): 126 - 133. [LUO Shoujing, WANG Shanshan, FU Dequan. Assessment on the susceptibility of sudden geological hazards in mountainous areas of Beijing [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2021, 32(4): 126 - 133. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 程素珍,路璐,翟淑花,等.2004—2018年北京市突发地质灾害时空分布特点和监测预警状况 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2020, 31(6): 38 - 46. [CHENG Suzhen, LU Lu, ZHAI Shuhua, et al. Temporal-spatial distribution and monitoring and early warning of sudden geological disasters in Beijing during the period of 2004 to 2018 [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2020, 31(6): 38 - 46. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 王宇虹,徐国强,贾丽红,等.太行山对北京“7·21”特大

- 暴雨的影响及水汽敏感性分析的数值研究 [ J ] . 气象, 2015, 41(4): 389 - 400. [ WANG Yuhong, XU Guoqiang, JIA Lihong, et al. Numerical simulation analysis on impact of Taihang mountain and vapor sensitivity on the 21 July 2012 extremely severe rainstorm in Beijing [ J ] . Meteorological, 2015, 41(4): 389 - 400. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 14 ] 降水量等级: GB/T 28592-2012 [ S ] . 2012. [ Precipitation grade: GB/T 28592-2012 [ S ] . 2012. (in Chinese) ]
- [ 15 ] 潘安君. 北京“7·21”特大暴雨山洪泥石流灾害应对与反思 [ J ] . 中国减灾, 2013(3): 18 - 19. [ PAN Anjun. Response and reflection on the disasters of torrential rain and debris flow in Beijing [ J ] . Disaster Reduction in China, 2013(3): 18 - 19. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 16 ] 尤焕苓, 任国玉, 吴方, 等. 北京“7·21”特大暴雨过程时空特征解析 [ J ] . 气象科技, 2014, 42(5): 856 - 864. [ YOU Huanling, REN Guoyu, WU Fang, et al. Spatial and temporal characteristics of a summer rainstorm in 2012 in Beijing [ J ] . Meteorological Science and Technology, 2014, 42(5): 856 - 864. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 17 ] 地质灾害分类分级(试行): DZ0238-2004 [ S ] . 2004. [ Classification and classification of geological hazards (Trial): DZ0238-2004 [ S ] . 2004. (in Chinese) ]
- [ 18 ] 王海芝. 北京山区基于历史资料的泥石流临界雨量研究 [ J ] . 城市地质, 2008, 3(1): 18 - 21. [ WANG Haizhi. A study of the critical rainfall volume for mudflows based on historical data in the mountainous area of Beijing [ J ] . City Geology, 2008, 3(1): 18 - 21. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 19 ] 白利平, 孙佳丽, 南赟. 北京地区泥石流灾害临界雨量阈值分析 [ J ] . 地质通报, 2008, 27(5): 674 - 680. [ BAI Liping, SUN Jiali, NAN Fu. Analysis of the critical rainfall thresholds for mudflow in Beijing, China [ J ] . Geological Bulletin of China, 2008, 27(5): 674 - 680. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 20 ] 吴正华. 北京泥石流灾害及其降水触发条件 [ J ] . 水土保持研究, 2001, 8(1): 67 - 72. [ WU Zhenghua. The mud-rock flow disaster and their touch off condition by rainfall in Beijing area [ J ] . Research on Soil and Water Conservation, 2001, 8(1): 67 - 72. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 21 ] 涂剑, 马超, 杨海龙. 北京山区暴雨泥石流激发雨量条件 [ J ] . 中国水土保持科学, 2017, 15(5): 103 - 110. [ TU Jian, MA Chao, YANG Hailong. Rainfall condition of triggering debris flows in Beijing mountain regions [ J ] . Science of Soil and Water Conservation, 2017, 15(5): 103 - 110. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 22 ] MA C, WANG Y J, DU C, et al. Variation in initiation condition of debris flows in the mountain regions surrounding Beijing [ J ] . Geomorphology, 2016, 273: 323 - 334.
- [ 23 ] 王海芝. 北京地区暴雨泥石流预警阈值研究 [ J ] . 第四纪研究, 2020, 40(5): 1371 - 1380. [ WANG Haizhi. Early warning thresholds of the rainfall-induced debris flows in Beijing [ J ] . Quaternary Sciences, 2020, 40(5): 1371 - 1380. (in Chinese with English abstract) ]