

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202312027

顾福计, 钱龙, 王梦洁, 等. 太行山河北段“23·7”强降雨引发的地质灾害规律研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2024, 35(2): 55-65.

GU Fuji, QIAN Long, WANG Mengjie, et al. Analysis of geological hazards caused by the “23 · 7” heavy rainfall in the northern section of Taihang Mountain in Hebei Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2024, 35(2): 55-65.

# 太行山河北段“23·7”强降雨引发的地质灾害规律研究

顾福计, 钱 龙, 王梦洁, 沈荣辉, 李 朦, 王立峰, 闫国芹

(河北省地质环境监测院 / 河北省地质资源环境监测与保护重点实验室, 河北 石家庄 050021)

**摘要:** 强降雨是引发地质灾害的主要因素。中国北方地区目前多侧重短时强降雨引发地质灾害方面的研究, 对区域性极端降水条件下地质灾害特征规律方面研究尚存在不足。基于“23·7”强降雨引发的地质灾害样本分析, 研究了太行山河北段地质灾害发生的规律特征。结果表明: (1) 地质灾害呈现出多发、群发性态势, 发生数量达历史新高, 类型以崩塌、滑坡、泥石流为主, 激发新的地质灾害明显增多; (2) 地质灾害发生时空范围与强降雨区域高度吻合, 太行山南段和北段呈现差异性分布; (3) 泥石流造成的损失最大, 坡面型泥石流明显多发, 松散物覆盖型滑坡多发易发。研究结果可为极端降水条件下地质灾害防范提供参考。

**关键词:** 杜苏芮; 极端降水; 地质灾害; 特征规律; 太行山

中图分类号: P694

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2024)02-0055-11

## Analysis of geological hazards caused by the “23 · 7” heavy rainfall in the northern section of Taihang Mountain in Hebei Province

GU Fuji, QIAN Long, WANG Mengjie, SHEN Ronghui, LI Meng, WANG Lifeng, YAN Guoqin

(Hebei Environmental Geology Exploration Institute / Hebei Key Laboratory of Geological Resources and Environment Monitoring and Protection, Shijiazhuang, Hebei 050021, China)

**Abstract:** Heavy rainfall is the main factor triggering geological disasters. In the northern region of China, most of the researches focus on the geologic disasters caused by short-term heavy rainfall, and the researches on the characteristics of geologic disasters under regional extreme precipitation conditions are still insufficient. Based on the sample analysis of geological disasters triggered by the “23 · 7” heavy rainfall, the regular characteristics of geological disasters in the Hebei section of the Taihang Mountains were studied. The results show that: (1) geologic hazards show the trend of multiple and group occurrence, and the number of occurrences reaches a new high in history, and the types of avalanches, landslides, and mudslides are the main ones, which stimulate new geologic hazards to increase significantly; (2) the spatial and temporal scales of occurrence of geologic hazards and the area of heavy rainfall are highly coincident with each other, and the south and north sections of the Taihang Mountains show a differentiated distribution; (3) mudslides cause the most damage, and slope-type mudslides are obviously more frequent, and the loose material-covered landslides are more frequent and easier to occur. cover

收稿日期: 2023-12-25; 修订日期: 2024-01-06

投稿网址: <https://www.zgdzzhyfzxb.com/>

第一作者: 顾福计(1972—), 男, 河北石家庄人, 本科, 正高级工程师, 主要从事水文工程地质、地质灾害防治方面研究。

E-mail: [hkygfj@163.com](mailto:hkygfj@163.com)

通讯作者: 沈荣辉(1978—), 男, 河北石家庄人, 本科, 高级工程师, 主要从事水文工程地质、地质灾害防治方面研究。

E-mail: [30321128@qq.com](mailto:30321128@qq.com)

type landslides are more frequent and prone to occur. The results of the study can provide a reference for the prevention of geologic disasters under extreme precipitation conditions.

**Keywords:** Doksuri; extreme precipitation; geological disaster; characteristic pattern; Taihang Mountain

## 0 引言

太行山河北段地质环境条件复杂,地质灾害发育程度高,区内地质灾害数量占河北总的地质灾害比例为 42.71%<sup>[1]</sup>,是地质灾害防治重点区域。地质灾害的发生主要受内在地质环境条件和外在诱发因素控制,往往地质灾害的发生与降雨在时间上具有较好的对应关系<sup>[2]</sup>,而降雨是最为主要的外在诱发因素,尤其是强降雨影响。

近年来,区内极端降水事件频发,先后出现 2012 年“7·21”、2016 年“7·19”、2021 年 7 月中下旬出现强降雨过程。2023 年 7 月 29 日—8 月 2 日,受台风“杜苏芮”影响,河北省区域发生了致灾严重的极端暴雨事件,地质灾害多发、频发,共发生地质灾害 592 起,其中太行山区域 578 起,占比 98%,发生数量创历史新高。

区内先后开展了山区县 1:5 万地质灾害详细调查、多个重点地质灾害勘查等基础性调查工作,对天然条件下地质灾害发育规律有了初步认识,也对强降雨条件下地质灾害的特征进行了一定研究<sup>[3]</sup>,为本次研究提供了基础。但前几次强降雨过程发生的地质灾害样本数量有限,强降雨引发的地质灾害特征研究还有待加强。

文中通过对“23·7”强降雨及其引发的大量突发地质灾害样本数据的分析整理,研究了强降雨影响下太行山河北段突发地质灾害表现出的发育、分布、危害等特征规律,分析影响突发地质灾害形成的雨量条件,总结预警工作成效,为本区域极端降水条件下地质灾害防范提供参考,以指导今后地质灾害调查、监测、预警等防灾减灾工作。

## 1 太行山河北段地质环境条件

太行山河北段北起张家口涿鹿县、蔚县南部,南至邯郸涉县的河北与河南交界地带,纵贯张家口、保定、石家庄、邢台、邯郸 5 个地市,其中石家庄灵寿、平山以北区域为太行山北段,以南区域为太行山南段。

### 1.1 气象水文

本区属温带大陆性季风气候,具春干多风、夏热多雨、秋爽多晴、冬寒少雪的特点,西、北部山区具有冬早春晚的特点。降雨多集中在 6—8 月份,占多年平均降雨量 70% 以上,多年平均降雨量 577.5 mm,年最大降雨量 1 374.1 mm,年最小降雨量 307.1 mm;降雨在空间

分布上,随地形而异,西部山区大、东部平原较少,在山脉迎风坡雨量最大,据气象资料分析,西部太行山区的易县紫荆山—富岗、阜平下庄—曼山、赞皇西部、沙河禅房一带是长年降雨中心。区内水系发育,河流众多,大的河流有拒马河、唐河、大沙河、唐河、滹沱河、涕河、洺河、滏阳河、漳河等,另有大量间歇性河流分布。

### 1.2 地形地貌

整体地形西高东低、北高南低,最高点为小五台山,海拔 2 882 m,地形起伏悬殊。地貌形态复杂多样,西部、北部属中山区,山高谷深、山势险峻、沟谷切割强烈;东南部为丘陵、山间盆地,以剥蚀堆积和溶蚀堆积为主,山势不陡,谷宽坡缓,河谷阶地发育;二者之间为低山区,以构造侵蚀和构造剥蚀为主,山势一般较陡,山势崎岖,多陡壁,沟谷多,切割深,沟谷有堆积。整体而言,北部山区相对高差大,坡陡、沟深,地形切割强烈,基岩多裸露;南部地区相对高差较小,坡度稍缓,斜坡多残坡积物覆盖,植被较好(图 1)。

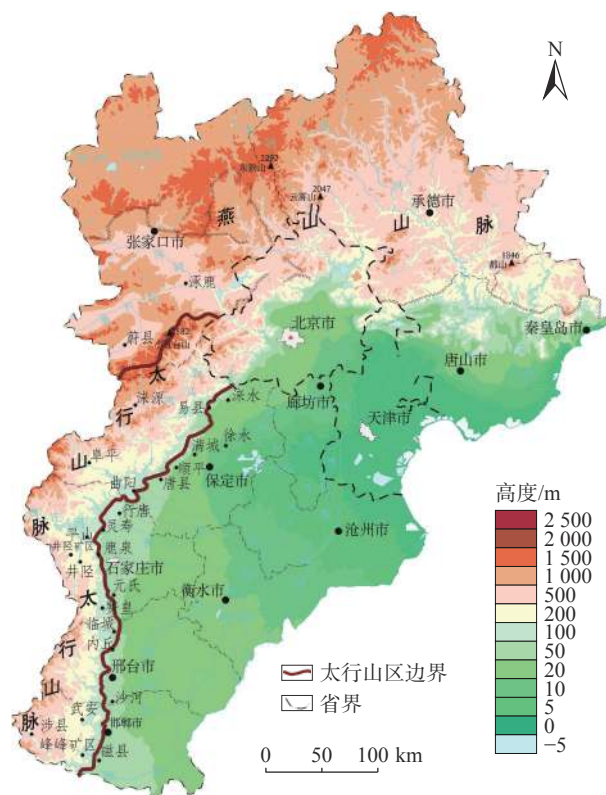


图 1 太行山(河北段)区位及地形地貌图

Fig. 1 Location and topography of Taihang Mountains (Hebei section)

1.3 地层岩性

区域地层发育比较齐全,从太古界到新生界均有出露。总体上岩性以变质岩、沉积岩为主,岩浆岩次之。变质岩主要由片麻岩、变粒岩及各种混合岩等组成,岩石节理裂隙发育、易风化、强度低,主要分布于平山以北至阜平、赞皇以南至沙河区域;沉积岩主要由白云岩、灰岩、石英砂岩、砂岩、砾岩、页岩、鞍山岩、板岩、片岩等组成,主要分布于沙河以南、井陘大部、曲阳、涞源、涞水、易县等地;岩浆岩主要由花岗岩、二长花岗岩、花岗闪长岩、石英闪长岩等组成,岩体裂隙较发育,主要分布于涿鹿县南部、易县、涞源、赞皇一带;第四系岩性主要由未胶结或半胶结的砾石、砂砾石、砂、亚砂土、亚黏土等组成,分布在山间盆地,河谷地带及山麓边缘。

1.4 地质构造

本区地质构造复杂,展布方向以北东向及北北东向为主,北西向次之,褶皱、断裂众多。主要有3条区域性的断裂,第一条为上黄旗—灵山区断裂,整体呈北北东向,北支分布于涿鹿大河南—阜平白石台一线,南支分布于涞水岭南台—井陘南峪一线;第二条为南口—青龙区域断裂,沿蔚县—南口—密云呈近东西向蛇曲状展布;第三条为白岸—衡水构造带两条分界区域断裂,呈平行状北北东向展布,在信都白岸西部延入山西、赞皇东—白岸一带露头。断裂带内均发育有多期构造岩类,具有多期长期活动性、倾向与多变特点,断裂区域岩体裂隙发育、破碎严重,是孕育地质灾害主要区域。总体上,太行山北段断裂构造更为密集,岩体裂隙更为发育。

2 “23·7”强降雨引发地质灾害概况

2.1 “23·7”强降雨情况

受台风“杜苏芮”影响,华北地区出现区域性大暴雨到特大暴雨过程,特大暴雨区位于太行山前河北地区迎风坡一侧和山前平原,降雨过程从7月29日8时开始至8月2日8时结束,全省142个国家气象站均出现降雨,平均降雨量176.3 mm,119个站过程降雨量超过50 mm(83.8%),93个站超过100 mm(65.5%),39个站超过250 mm(27.5%)。强降雨中心位于西部太行山区和保定、雄安西部、廊坊西北部,累计降雨量超过了400 mm(图2)。国家气象站易县最大511.1 mm,主要降雨集中在29日8时—8月1日8时;区域站邢台临城赵庄梁家庄最大为1 003.4 mm,主要降雨时段集中在29日8时—31日3时;79个国家气象站过程累计降雨

量超过本站7月整月降雨量常年值,赞皇(411.7 mm)、易县(511.1 mm)、顺平(447 mm)等16个国家气象站过程累计降雨量超过本站整个夏季(6—8月)降雨量总和的常年值。降雨强度强,75个国家气象站最大小时雨强超过20 mm,7个国家气象站超过50 mm,国家气象站监测最大小时雨强73.5 mm(保定站),水文站监测最大小时雨强115 mm(磁县西王女水库),有103个国家气象站最大降雨量达到暴雨及以上(占比72.5%),57个国家气象站达到大暴雨及以上,4个国家气象站达到特大暴雨等级,10个国家站日最大降雨量突破本站历史极值,30日8时—31日8时是降雨最强时段,最大雨强为110.9 mm/h。

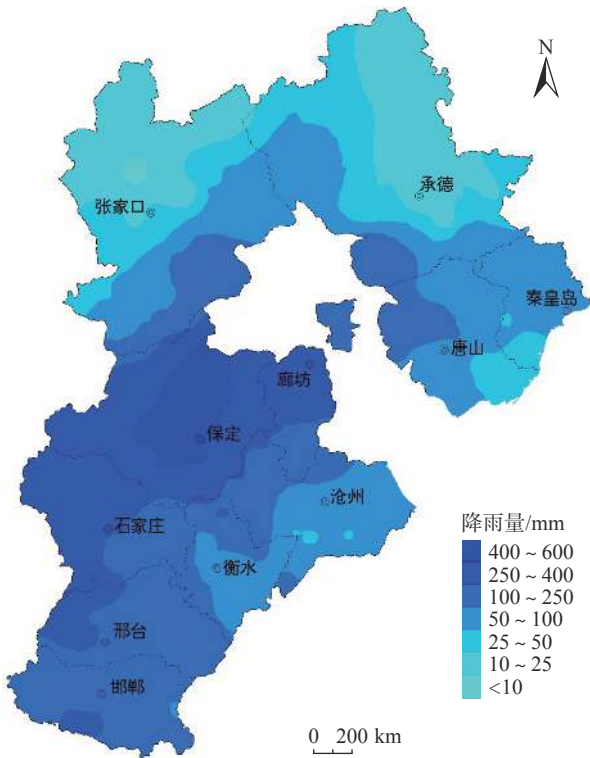


图2 河北省降雨量分布图(7月29日—8月1日)  
Fig. 2 Rainfall distribution map of Hebei Province (for the period from July 29 to August 1)

2.2 强降雨引发地质灾害概况

据灾后调查,全省共发生592处地质灾害,按类型统计,崩塌269处、滑坡199处、泥石流107处、地面塌陷17处,其中已有地质灾害隐患点诱发210处,占比35%,新发生地质灾害隐患382处,占比65%;总体上看,发生的地质灾害以崩塌、滑坡泥石流灾害为主,以激发新的地质灾害隐患居多,诱发已有地质灾害隐患次之。

2.2.1 崩塌

全省发生崩塌269处,其中已有崩塌隐患点诱发



76 处、新发生崩塌点 193 处, 分别占比 28%、72%, 按分布县(区)统计, 涿鹿县 62 处、阜平县 51 处、信都区 36 处、涞水县 26 处、易县 24 处、临城县 16 处、内丘县 11 处、涞源县 9 处、满城区 6 处、曲阳县 5 处、唐县 5 处、赤城县 4 处、怀来县 4 处、沙河市 3 处、海港区

2 处、顺平县 2 处、徐水区 1 处、崇礼区 1 处、阳原县 1 处。总体来看, 发生数量较多的县区( $\geq 10$  处)由多到少依次为涿鹿县、阜平县、信都区、涞水县、易县、临城县、内丘县, 新发生数量较多的县区( $\geq 10$  处)由多到少依次为涿鹿县、阜平县、信都区、易县、涞水县(图 3)。



(a) 张家口市怀来县王家楼乡旧站堡村西崩塌



(b) 保定市满城区刘家台乡慈家台西坡崩塌

图 3 典型崩塌地质灾害点

Fig. 3 Typical landslide geohazard sites

### 2.2.2 滑坡

全省发生滑坡 199 处, 其中已有滑坡隐患点诱发 72 处、新发生滑坡 127 处, 分别占比 36%、64%, 按分布县(区)统计, 信都区 71 处、涞水县 20 处、涿鹿县 16 处、临城县 15 处、阜平县 14 处、内丘县 13 处、易县 13 处、涞源县 12 处、沙河市 5 处、徐水区 5 处、满

城区 4 处、顺平县 4 处、曲阳县 3 处、唐县 2 处、赤城县 1 处、平山县 1 处。总体来看, 发生总数较多的县区( $\geq 10$  处)由多到少依次为信都区、涞水县、涿鹿县、临城县、阜平县、内丘县、易县、涞源县; 新发生数量较多的县区( $\geq 10$  处)由多到少依次为信都区、涿鹿县、涞水县、易县(图 4)。



(a) 邢台市信都区宋家庄镇前白也掌村北沟大地西坡滑坡



(b) 邢台市信都区宋家庄镇明水村张家庄滑坡

图 4 典型滑坡地质灾害点

Fig. 4 Typical landslide geohazard sites

### 2.2.3 泥石流

全省发生泥石流 107 处, 其中已有泥石流隐患点诱发 50 处、新发生泥石流 57 处, 分别占比 47%、53%, 按分布县(区)统计, 涞水县 34 处、涿鹿县 32 处、内丘县 8 处、唐县 8 处、阜平县 6 处、曲阳县 4 处、易县 4 处、涞源县 3 处、满城区 2 处、信都区 2 处、临城县 1 处、顺平县 1 处、兴隆县 1 处、徐水区 1 处。总体来看, 发生总数较多的县区( $\geq 10$  处)由多到少依次为涞水县、

涿鹿县; 新发生数量较多的县区( $\geq 10$  处)由多到少依次为涿鹿县、涞水县(图 5)。

## 3 地质灾害时空分布

3.1 地质灾害发生时空范围与强降雨时空区域高度重合, 呈现出多发、群发性态势, 具有灾害规模小的特点

从空间分布上看, 发生的地质灾害主要分布在 2 个



(a) 保定市涞水县三坡镇马庄村西沟泥石流 (b) 保定市涞水县三坡镇上庄村东港沟泥石流

图 5 典型泥石流地质灾害

Fig. 5 Typical mudslide geologic hazards

集中区域,第一个集中区域是在太行山北段的保定市西北部、涿鹿县南部,第二个集中区域是太行山南段的邢台市西部山区,分布范围与 2 个降雨中心区域基本一致(图 6)。太行山北段共发生地质灾害 396 处,占比近 67%,主要分布在保定市的涞水县、阜平县、易县、涞源县以及张家口市涿鹿县南部一带;太行山南段共发生地质灾害 182 处,占比近 31%,主要分布在邢台市的信都区、内丘县、临城县以及沙河市一带。

量依次为 10 处、38 处、454 处、75 处、3 处、7 处、2 处、2 处、1 处,其中 7 月 31 日发生数量最多,发生在 7 月 29 日 8 时—8 月 2 日 8 时特大暴雨时段内的地质灾害有 580 处,占比近 98%,与降雨历时过程高度吻合(图 7)。

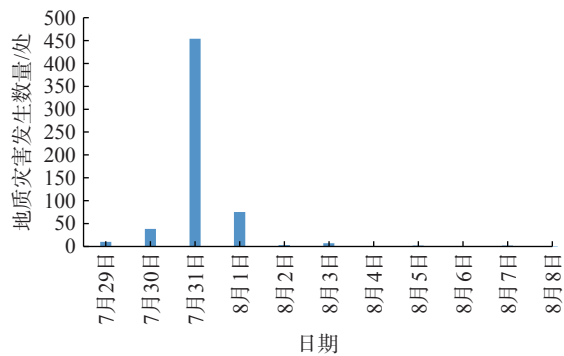


图 7 台风“杜苏芮”影响期间地质灾害发生时间分布图

Fig. 7 Distribution of geologic hazards during the impact of Typhoon Doksuri

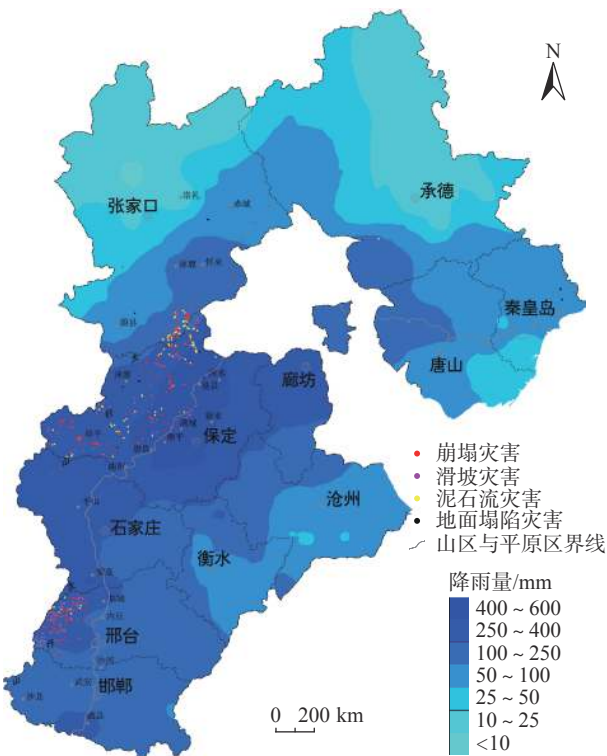


图 6 台风“杜苏芮”影响发生地质灾害与降雨量关系图

Fig. 6 Map of geologic hazards occurring under the influence of Typhoon Doksuri in relation to precipitation

从发生时间上看,地质灾害发生的时段在 7 月 29 日—8 月 8 日期间,7 月 29 日开始,发生地质灾害数

受降雨分布和地质环境条件影响,地质灾害具有显著群发性。以乡镇为尺度统计,群发数量较高( $\geq 10$  处)的乡镇有 21 个,共发生地质灾害 390 处,占比 66%,其中涿鹿县蟒石口镇发生数量 34 处,为群发数量最多的乡镇;群发数量高( $\geq 20$  处)的乡镇有 8 个,分布在涿鹿县的大河南镇、河东镇、蟒石口镇、谢家堡乡,涞水县的三坡镇、信都区的宋家庄镇、阜平县的阜平镇、内丘县的侯家庄乡。以村庄为尺度统计,群发数量较高的( $\geq 2$  处)的村庄 123 个,共发生地质灾害 356 处,占比约 60%,其中阜平镇王林口乡五丈湾村周边区域群发地质灾害数量 13 处,为群发数量最多的村庄;群发量高( $\geq 5$  处)的村庄有 12 个,分布在涿鹿县的大河南镇辛安庄村、蟒石口镇穆家庄村、苗树村以及谢家堡乡南将石村、桃园沟村、梨园村,阜平县的王林口镇五丈湾村、阜平镇南辛庄村,涞源县的白石山镇斗军弯村,易

县的安格庄乡金坡村,信都区的宋家庄镇金鑫村、北小庄乡东石善村。

强降雨引发的地质灾害数量达近 73 a 统计以来历史新高,为地质灾害多年平均数量的 17 倍(图 8)。发

生的地质灾害规模等级以小型为主,共有小型为 548 处,占比 93%,其中崩塌规模等级全部为小型,滑坡规模等级中型 1 处、小型 198 处,泥石流规模等级中型 30 处、小型 77 处。

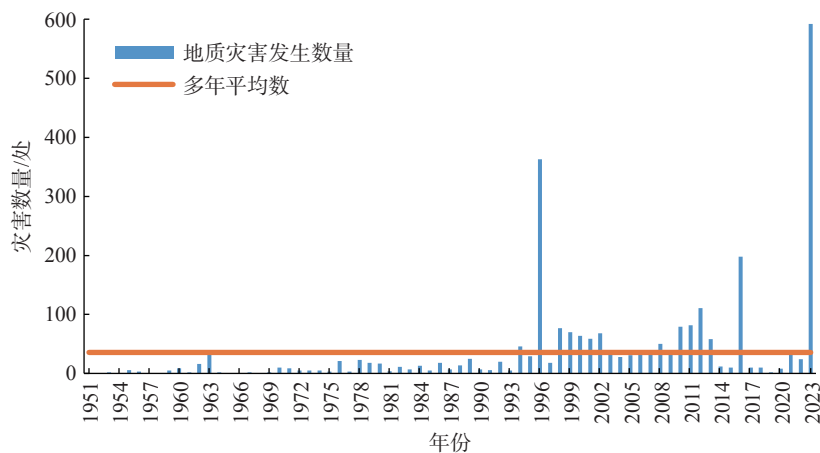


图 8 河北省历史发生地质灾害时间分布图

Fig. 8 Time distribution of historical geologic hazards in Hebei Province

### 3.2 受降雨和地形地貌控制,地质灾害在南北区域上呈现差异性分布

从发生数量分析,太行山北段发生地质灾害 396 处、太行山南段发生地质灾害 182 处,北段是南段的 2 倍多,整体呈北多南少特点;从灾害类型对比,太行山北段共发生崩塌 196 处、滑坡 93 处、泥石流 95 处、地面塌陷 12 处,太行山南段共发生崩塌 66 处、滑坡 105 处、泥石流 11 处(图 9),太行山北段崩塌、泥石流发生多、南段滑坡多,北段较南段多出地面塌陷灾种,具有雨量越大激发地质灾害的类型、数量越多的规律特征<sup>[4]</sup>。

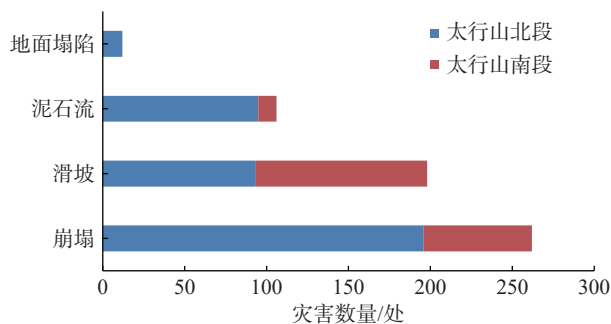


图 9 太行山南段和北段地质灾害发生情况对比图

Fig. 9 Comparison of the occurrence of geologic hazards in the southern and northern sections of the Taihang Mountains

降雨分布和地形地貌是形成南北差异主要因素。本次大暴雨主要集中在太行山东部,形成 2 个降雨中心,第一个降雨中心位于太行山北段保定的沿山及山前平原地区,其中保定和雄安新区共有 18 个国家气象站

累计降雨量均在 250 mm 及以上,该地区特大暴雨范围之广为历史首次,区域的极值中心易县紫荆关的降雨量为 732.7 mm,400 mm 及以上降雨主要集中在太行山北段海拔高度 300 ~ 600 m 迎风坡上<sup>[5]</sup>,主要影响涿鹿县、涿水县、涿源县、阜平县、易县、曲阳县、满城区、唐县、顺平县、蔚县等地的中低山区和丘陵区,地质灾害集中分布在侵蚀剥蚀构造中低山区及丘陵区,地层岩性以片麻岩、浅粒岩、火成岩、石灰岩、白云岩为主,其中以变质岩、火成岩为主的低山区地质灾害分布最为集中,共有 370 处、占比 93%。崩塌、滑坡发生在高程 200 ~ 1 000 m 的斜坡上,坡度大于 40°,主要分布于山区农村削坡建房、交通沿线等人类工程活动较强烈的地段;泥石流以沟谷型稀性泥石流为主,冲出物源量普遍高于太行山南段。

第二个降雨中心位于太行山南段,范围为河北石家庄西部、邢台西部的山前及浅山区,极值中心位于邢台的临城、内丘一带,区域的极值中心临城梁家庄降雨量为 1 003.4 mm,250 mm 及以上降雨分布在太行山东部海拔高度 300 ~ 800 m 迎风坡上<sup>[5]</sup>,主要影响信都区、内丘县、临城县、沙河市、平山县等地的中低山区,地层岩性以变质岩、碳酸盐岩为主,其中以变质岩为主的中低山区地质灾害较集中,共有 135 处,占比 74%。崩塌多发生坡度大于 60°的硬质岩地层斜坡,滑坡发生于地形坡度 25° ~ 45°的斜坡地段,泥石流以坡面型泥石流居多。



**3.3 泥石流是地质灾害群死群伤事件潜在的重大隐患**

极端降水为泥石流的形成提供了充足的水源条件,降雨落区内有一定汇水条件且松散物源丰富的沟谷和坡面,极易激发泥石流灾害<sup>[6]</sup>。据统计,全省共发生泥石流灾害 107 处,其中沟谷型泥石流 90 处、坡面型泥石流 17 处。据调查,沟谷型泥石流沟口开阔地带以及坡面型泥石流的坡脚处是主要物源堆积区,这些区域往往人口聚集、经济建设活动频繁,是山区的主要人员密集

区以及民房、农田、道路等集中区;本次发生的泥石流最大冲出体积达  $20\times 10^4\text{ m}^3$ ,据直接经济损失统计,泥石流造成损失 1 886.42 万元、滑坡造成损失 956.12 万元、崩塌造成损失 764.38 万元、地面塌陷造成损失 538.25 万元(表 1),分别占比 46%、23%、18%、13%,泥石流造成的损失最大,是造成山区房屋、道路甚至整个村庄损毁最严重的灾害,具有地质灾害群死群伤事件潜在的重大隐患。

表 1 河北省特大暴雨洪地质灾害灾情汇总表

Table 1 Summary table of extraordinarily heavy rainfall floods and geological disasters in Hebei Province

| 县区    | 按灾害类型划分 |        |          |        | 按威胁对象划分  |        |        |
|-------|---------|--------|----------|--------|----------|--------|--------|
|       | 崩塌      | 滑坡     | 泥石流      | 地面塌陷   | 居民点      | 道路     | 其它     |
| 涞水县   | 66.5    | 138    | 925      | 0.05   | 1 059    | 70.5   | 0.05   |
| 易县    | 210     | 206    | 30.5     | 486    | 901.5    | 31     |        |
| 阜平县   | 261.5   | 49.7   | 405      |        | 296      | 20     | 400.2  |
| 满城区   | 82      | 221.6  | 31       |        | 62.6     | 272    |        |
| 曲阳县   |         |        | 180      | 20     | 20       |        | 180    |
| 涞源县   | 1       | 81.8   | 17       | 6      | 105.8    |        |        |
| 徐水区   | 0.6     | 0.5    | 0.7      | 25.2   | 26.5     | 0.5    |        |
| 唐县    | 10      |        |          |        |          |        | 10     |
| 涿鹿县   | 89      | 65.72  | 260.72   |        | 127.96   | 259.84 | 27.64  |
| 怀来县   | 34      |        |          |        | 26       | 8      |        |
| 赤城县   | 0.15    | 0.5    |          |        | 0.65     |        |        |
| 平山县   |         | 66     |          |        | 66       |        |        |
| 信都区   | 3.9     | 115.5  |          |        | 119.4    |        |        |
| 内丘县   | 5       |        | 36.5     |        | 41.5     |        |        |
| 沙河市   |         | 10.7   |          |        | 10.7     |        |        |
| 临城县   | 0.23    | 0.1    |          |        | 0.33     |        |        |
| 海港区   | 0.5     |        |          | 1      | 1.5      |        |        |
| 合计/万元 | 764.38  | 956.12 | 1 886.42 | 538.25 | 2 865.44 | 661.84 | 617.89 |

**3.4 坡面型泥石流明显多发,呈现出隐蔽性特征**

与以往情况对比,坡面型泥石流数量明显增多,共发生坡面型泥石流 17 起,占发生泥石流总数的 16%,直接经济损失近百万元。据调查,坡面型泥石流主要发生在第四系残坡积碎石土覆盖较厚、坡面有相对凹洼微地貌且具备一定汇水条件的陡峭坡面上,集中分布在变质岩为主的低山区,风化破碎程度高的白云岩和花岗岩中低山区也有一定分布,主要特征是坡面坡度一般  $40^{\circ}\sim 70^{\circ}$ ,松散层厚度  $0.5\sim 2\text{ m}$ ,流通通道均小于  $100\text{ m}$ ,冲出方量  $30\sim 900\text{ m}^3$ ,规模相对较小。

坡面型泥石流具有较高的隐蔽性。主要表现在一是隐患位置很难提前发现,坡面型泥石流的发生位置多处于沟谷形态不明显、植被生长茂盛的地带,植被覆盖率在 80% 以上,未发生时很难发现;二是发生过程历时短、很难提前监测预警,因坡度大、流通通道短,形成的

泥石流流速较沟谷型泥石流快,持续时间仅几分钟;三是启动条件具有不确定性,从雨量统计分析,我省发生坡面型泥石流激发雨强均为大暴雨以上级别,小时雨强均在  $30\text{ mm/h}$  以上,与雨强大小高度相关,但受地质环境条件、坡体稳定性、松散物特征等影响,类似条件下,不一定激发泥石流,造成坡面型泥石流群发性特征不明显,与一般坡面型泥石流群发性突出不同<sup>[7]</sup>。

**3.5 松散物覆盖型滑坡多发、易发**

从滑坡的物质组成和结构分析,发生滑坡的滑体均为第四系残坡积碎石土,滑带多为上覆第四系松散物与下伏基岩面接触面,属松散物覆盖型滑坡。据调查分析,引发滑坡的累计降雨量均超过  $150\text{ mm}$ ,所在斜坡坡度大于  $25^{\circ}$ ,其前缘一般为人工开挖坡脚修建房屋、道路等形成的陡坎,后缘以第四系和基岩的接触界线为界,形状上呈现为四周高,中间低,下部有开口的“漏斗

状”洼地;滑动部位均为坡体的中下部,以下部居多;滑动面普遍与坡面一致,滑动体量最大近 3 000 m<sup>3</sup>,最小 3 m<sup>3</sup>,以小于 100 m<sup>3</sup> 居多;滑坡主要发育在片麻岩、安山岩、花岗岩、灰岩、白云岩和砂页岩等地层中,该地层易风化剥蚀,在坡面形成覆盖堆积,堆积厚度小于 5 m;形成坡面堆积物结构松散,易渗水,强降雨过程中,迅速饱和,重度增大,软化滑体,降低滑动带土体的力学强度,促使滑体变形,产生滑动<sup>[8-10]</sup>。综上,强降雨、地形地貌、地层岩性及人类工程活动共同作用造成了覆盖型滑坡多发易发。

### 3.6 地质灾害在一定程度上呈现出不可抗拒的特点

2023 年 7 月 29 日 8 时—8 月 2 日 8 时,受台风“杜苏芮”减弱环流北上影响,河北省西部太行山地区出现

特大暴雨,降雨持续时间达 96 h,累计降雨量 250 mm 及以上的观测站为 743 个,占比 23.5%,8 个观测站过程雨量超过 700 mm,10 个观测站 24 h 降雨量突破历史极值,与河北有气象记录以来的前 4 次极端暴雨过程相比(表 2),本次降雨过程,出现大暴雨以上站点数量已超过“63·8”(1963 年 8 月)、“96·8”(1996 年 8 月)和“12·7”(2012 年 7 月)过程,仅次于“16·7”(2016 年 7 月)过程,过程雨量极值为 1 003.4 mm<sup>[5]</sup>,另据气象部门降雨反演,涞水—涿鹿累计降雨量在 1 000 mm 左右。综上,本次降雨过程持续时间长、累计雨量大、影响范围广、降雨强度强,具有突出的极端性,导致太行山区域土体超饱和,叠加复杂的地质环境条件,发生地质灾害是必然事件。

表 2 河北省极端降水引发地质灾害情况表

Table 2 Table of geological hazards caused by extreme rainfall in Hebei Province

| 极端降水年月 | 过程起止日期         | 小时最大雨强/(mm·h <sup>-1</sup> ) | 最大过程降雨量/mm | 发生地质灾害数量/起 |
|--------|----------------|------------------------------|------------|------------|
| 63·8   | 1963年8月1—10日   | 104.3                        | 2 051.0    | 38         |
| 96·8   | 1996年8月3—6日    | 80.1                         | 670.0      | 363        |
| 12·7   | 2012年7月21—22日  | 112.0                        | 372.6      | 111        |
| 16·7   | 2016年7月19—21日  | 102.8                        | 816.5      | 198        |
| 23·7   | 2023年7月29—8月2日 | 110.9                        | 1 003.4    | 592        |

根据河北省地质灾害预警研究,太行山北段 1 h 临界激发降雨量 94.8 mm、24 h 临界激发降雨量 111.5 mm,太行山南段 24 h 临界激发降雨量 171.4 mm<sup>[1]</sup>,本次降雨的小时雨强和过程雨量远超激发地质灾害的降雨阈值,发生地质灾害具有不可抗拒性。

## 4 地质灾害预警预报

河北省地质灾害区域预警模型研发历经两个阶段。第一阶段(2003—2012 年)预警模型采用的是基于临界雨量的预报预警方法,通过统计地质灾害发生情况与降雨关系,确定各预警区的临界雨量,根据前期降雨量和未来 24 h 预测降雨量,确定预警区域和等级,该方法的优点是简单、明了、易操作,但未充分考虑到地质灾害形成的内在因素,针对性不强,往往预报预警范围过大。第二阶段预警模型(2013 年至今)采用显式统计预报预警方法,其基于潜势度原理,把地质环境因素与激发因素相迭加耦合后建立判据模型,并通过预警软件对区域自动剖分计算取得预警结果,提高了预报预警精度和效率。

### 4.1 预警预报模型

综合考虑地质灾害分布密度及地质环境条件因子图层的图斑密度,同时兼顾软件系统计算效率,将全省

山区以 5 km×5 km 的单元网格精度进行网格剖分,共剖分成 5 071 个单元格,每个单元格作为一个预警单元进行地质灾害预警预报。取单元格的潜势度值( $G$ )作为地质环境基础因素,选取当日雨量( $R_d$ )和前期雨量( $R_p$ )作为降雨激发因素的值,前期雨量取前 72 h 或 144 h 雨量。选取区域内历史上发生的地质灾害作为分析样本,其中每个历史灾害点相匹配的逐日降雨数据和相应单元格  $G$  值参加统计,统计样本导入 spss 统计软件进行线性回归分析,计算出河北省地质灾害的发生与地质环境基础因素( $G$ )、降雨激发因素( $R_d$ 、 $R_p$ )之间的线性关系公式作为预警预报模型:

$$T = -4.647 + 8.958G + 2.948R_d + 0.614R_p \quad (1)$$

其中:  $T$ ——地质灾害预警指数,表征地质灾害发生可能性大小;

$G$ ——地质灾害潜势度;

$R_d$ ——当日雨量,地质灾害发生当天的日雨量,在实际计算中当日雨量为地质灾害预报时段内(24 h)的雨量;

$R_p$ ——前期雨量,地质灾害发生前一个降雨过程的累计雨量,在实际计算中前期雨量为地质灾害预报时的累计雨量。



地质灾害气象预报预警结果按等级以不同颜色分区显示, 预报预警等级的大小以地质灾害气象预报预警指数( $T$ )的大小进行分段(表 3)。

表 3 地质灾害气象风险预警等级与指数对应表  
Table 3 Geological disaster meteorological risk warning level and index corresponding table

| 地质灾害气象风险预警等级 | 地质灾害预警指数        | 灾害概率/%       |
|--------------|-----------------|--------------|
| 4级(蓝色预警)     | $T < -2$        | $< 20$       |
| 3级(黄色预警)     | $-2 \leq T < 0$ | $20 \sim 50$ |
| 2级(橙色预警)     | $0 \leq T < 2$  | $50 \sim 80$ |
| 1级(红色预警)     | $T \geq 2$      | $> 80$       |

4.2 预警预报结果

台风“杜苏芮”影响期间, 全省发布预警 11 期, 其中红色预警 4 期, 橙色预警 5 期, 黄色预警 2 期。7 月 29 日, 太行山南段局地出现红色预警, 分布在石家庄市

的元氏县、赞皇县、井陘县, 邢台市的临城县、内丘县、沙河市、信都区以及邯郸市武安市, 太行山北段主要为橙色预警; 7 月 30 日—7 月 31 日, 太行山河北段大范围为红色预警, 分布在保定市的涞水县、涞源县、易县、阜平县、顺平县、唐县、曲阳县、徐水区、满城区, 张家口市的怀来县、涿鹿县、蔚县, 石家庄市的平山县、灵寿县、行唐县、元氏县、赞皇县、鹿泉区、井陘矿区、井陘县, 邢台市的临城县、内丘县、沙河市、信都区, 邯郸市的武安市、涉县; 8 月 1 日, 太行山北段区域为红色预警, 分布在张家口市的怀来县、涿鹿县、蔚县, 保定市的涞水县、涞源县、易县、阜平县、顺平县、唐县、曲阳县、徐水区、满城区, 石家庄市的平山县、灵寿县、行唐县、井陘矿区、井陘县, 太行山南段主要为橙色预警(图 10)。复盘强降雨全过程情况, 预警结果和降雨实况吻合度较好。

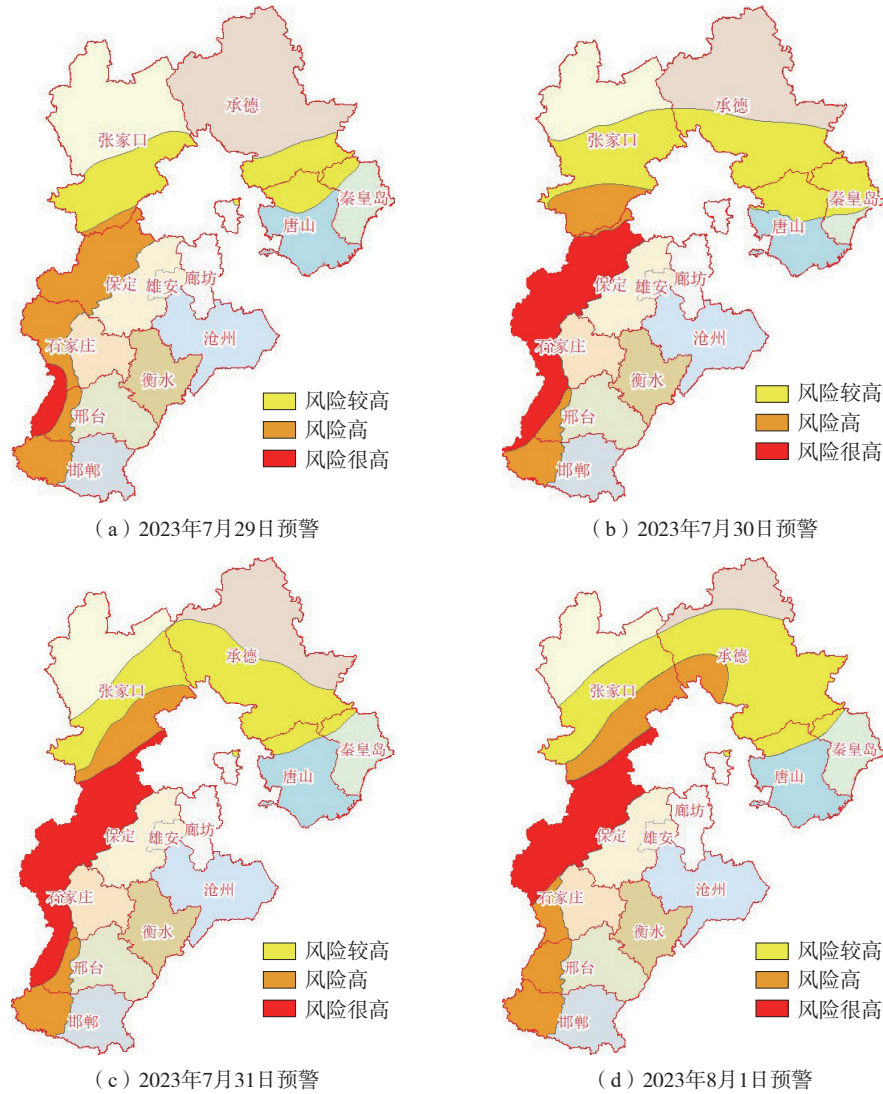


图 10 7 月 29 日—8 月 1 日河北省地质灾害气象风险预警成果

Fig. 10 Results of meteorological risk warning of geological disasters in Hebei Province from July 29 to August 1

4.3 预警预报成效

预警时间检验。在确定的区域和时段内,计算地质灾害区域预警的时间准确率、漏报率、空报率、预警偏差和预警效率,作为预警时间的评价标准,计算公式如下:

$$\begin{aligned} \text{准确率 } F_1 &= \frac{N_a}{N_a + N_b + N_c} & \text{空报率 } F_2 &= \frac{N_b}{N_a + N_b} \\ \text{漏报率 } F_3 &= \frac{N_c}{N_a + N_c} & \text{预警偏差 } F_4 &= \frac{N_a + N_b}{N_a + N_c} \\ \text{预警效率 } F_5 &= \frac{N_a + N_d}{N_a + N_b + N_c + N_d} \end{aligned}$$

式中:  $N_a$ ——有预警且实际发生地质灾害的天数;  
 $N_b$ ——有预警但实际未发生地质灾害的天数;  
 $N_c$ ——无预警但实际发生地质灾害的天数;  
 $N_d$ ——无预警且实际未发生地质灾害的天数。

经计算,台风“杜苏芮”影响期间,预警准确率  $F_1=82\%$ ,空报率  $F_2=18\%$ ,漏报率  $F_3=0$ ,预警偏差  $F_4=1.22$ ,预警效率  $F_5=0.82$ ,从时间标准看,预警时段较准确。

预警空间检验。根据各地质灾害点具体的发生时间、地点,对照各地质灾害点是否落入预警区范围内,将落入预警区范围内的地质灾害点数除以总的地质灾害点数即为预报准确率(表 4)。据计算,发生地质灾害点基本落在预警区范围内,仅有个别灾害点不在预警区域内,强降雨期间(7 月 29 日—8 月 1 日),红色预警区域内发生地质灾害 557 处,预报准确率为 97%,预报准确率较高;橙色预警区域和黄色预警区域地质灾害发生数量较少,预报准确率较低。强降雨过后 4 d 内(8 月 2 日—8 月 5 日),预警区域内局地仍有地质灾害发生,表明极端降水过后一段时间内地质灾害发生可能性还

很大,很有必要继续进行地质灾害预警预报。强降雨过后 5 d(8 月 6 日以后),预警区范围内无地质灾害发生,预报准确率较低。

强降雨期间,预警结果考虑了雨量的极端性,将当日雨量( $R_d$ )系数由 1.0 调整为 1.2,即预测雨量增大 1.2 倍,预警指数( $T$ )相应增大,加大了红色预警区范围,从红色预警区域内较高的预报准确率看,极端降水条件下,适当增加预测雨量数值,比较符合预警预报实际情况,但也同时扩大了预警范围,造成部分区域预报准确率很低;强降雨过后,预警结果考虑了地质灾害滞后性,降雨落区内岩土体已基本饱和,雨后一段时间内地质灾害发生可能性还很大,根据不同预警区域的致灾经验,通过人机交互干预修正预警模型、预警参数和预警结果,将预警的时间延长,受人工修正经验的影响,部分时段和区域的预报准确率低。

5 结论

(1)受台风“杜苏芮”影响,河北省共发生 592 处地质灾害,其中太行山区域 578 处,极端降水导致已有地质灾害隐患点诱发 210 处,新发生地质灾害隐患 382 处。总体上看,发生的地质灾害数量达历史新高,类型以崩塌、滑坡泥石流灾害为主,以激发新的地质灾害隐患居多,诱发已有地质灾害隐患次之。

(2)地质灾害的发生范围与 2 个降雨中心区域基本一致,其中太行山北段共发生地质灾害 396 处,主要集中在保定市的涞水县、阜平县、易县、涞源县以及张家口市涿鹿县南部一带;太行山南段共发生地质灾害 182 处,主要集中分布在邢台市的信都区、内丘县、临城县以及沙河市一带;地质灾害的发生时段集中在 7 月 29 日—2 日,其中 7 月 31 日发生数量最多,与降雨历时高度吻合。

(3)涿鹿县的大河南镇、河东镇、蟒石口镇、谢家堡乡,涞水县的三坡镇、信都区的宋家庄镇、阜平县的阜平镇、内丘县的侯家庄乡是地质灾害群发性较高的乡镇,发生的地质灾害规模等级以小型为主。

(4)太行山北段发生地质灾害 396 处、太行山南段发生地质灾害 182 处,整体呈北多南少特点,北段崩塌、泥石流发生多,南段滑坡多,北段较南段多出地面塌陷灾种。

(5)泥石流造成的损失最大,严重损毁山区房屋、道路等,具有地质灾害群死群伤事件潜在的重大隐患。

(6)极端降水诱发坡面型泥石流明显增多,具有隐蔽性,群发性特征不明显,诱发的小时雨强均在 30 mm

表 4 台风杜苏芮影响期间地质灾害预警预报成效情况表

Table 4 Table of the effect of geological disaster warning and forecast during the influence of Typhoon Doksuri

| 序号 | 日期    | 预警等级 | 红色预 | 橙色预 | 黄色预 | 无预警 | 灾害发 | 生总数 | 预报  |
|----|-------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|    |       |      | 警区地 | 警区地 | 警区地 | 区地质 |     |     |     |
|    |       |      | 质灾害 | 质灾害 | 质灾害 | 灾害发 | 生数  | 生数  | 准确率 |
|    |       |      | /处  | /处  | /处  | /处  | /处  | /处  | /%  |
| 1  | 7月29日 | 红色预警 | 3   | 7   | 0   | 0   | 10  | 100 |     |
| 2  | 7月30日 | 红色预警 | 37  | 0   | 0   | 1   | 38  | 97  |     |
| 3  | 7月31日 | 红色预警 | 450 | 0   | 0   | 4   | 454 | 99  |     |
| 4  | 8月01日 | 红色预警 | 67  | 7   | 1   | 0   | 75  | 100 |     |
| 5  | 8月02日 | 橙色预警 | 0   | 3   | 0   | 0   | 3   | 100 |     |
| 6  | 8月03日 | 橙色预警 | 0   | 6   | 1   | 0   | 7   | 100 |     |
| 7  | 8月04日 | 橙色预警 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |     |
| 8  | 8月05日 | 橙色预警 | 0   | 2   | 0   | 0   | 2   | 100 |     |
| 9  | 8月06日 | 橙色预警 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |     |
| 10 | 8月07日 | 黄色预警 | 0   | 0   | 0   | 2   | 2   | 0   |     |
| 11 | 8月08日 | 黄色预警 | 0   | 0   | 0   | 1   | 1   | 0   |     |

以上,累计降雨量均超过 150 mm。

(7)台风“杜苏芮”形成的大暴雨以上站点数量超过“63•8”、“96•8”和“12•7”过程,仅次于“16•7”过程,地质灾害在一定程度上呈现出不可抗拒的特点。

(8)台风“杜苏芮”期间,地质灾害发生与强降雨过程高度相关,预报强区域内发布红色预警的预警成效显著,强降水过程后应持续开展预警预报工作。

(9)本文结论是基于灾后应急调查成果数据研究获得,因“23•7”极端降水致灾严重,地质灾害应急调查的重点是查清灾险情状况,对地质灾害的发育特征和成因机理等调查深度和精度不足,导致地质灾害特征规律研究不够深入,有待后人进一步深入分析。

## 参考文献(References):

- [1] 河北省 1:5 万地质灾害详细调查与研究报告[R]. 河北省地质环境监测院, 2016. [Detailed survey and research report on 1:50,000 geological hazards in Hebei Province[R]. Hebei Environmental Geology Exploration Institute, 2016. (in Chinese)]
- [2] 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)]
- [3] 朱小龙,李玉龙,唐立强,等.河北省保定地区“7•21”群发地质灾害特征分析[J].中国地质灾害与防治学报,2014,25(1):90-96. [ZHU Xiaolong, LI Yulong, TANG Liqiang, et al. The analysis of geological hazard of the “7•21” rainstorm in Baoding in Hebei province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2014, 25(1): 90-96. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 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. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 张江涛,何丽华,李江波,等.河北“23•7”极端暴雨过程特征及成因初探[J].大气科学学报,2023,46(6):884-903. [ZHANG Jiangtao, HE Lihua, LI Jiangbo, et al. Preliminary study on the characteristics and causes of the “23•7” extreme rainstorm in Hebei[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2023, 46(6): 884-903. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 刘帅,王涛,刘甲美,等.基于优化随机森林模型的降雨群发滑坡易发性评价研究——以西秦岭极端降雨事件为例[J/OL].地质通报,(2024-01-19)[2024-03-09].<https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=Ma1nt2RbXaiCVYmTY10t4hBKE8E88KDCaireXxHDxs0AgcilbaQNWe-aW6MFZOAMZ4SHVmtNptvmVEyZQKhYHuCNFUSVuDpmascK0QsGWjp0A9CEQrFDO0IRiCabjCibf6zdaz5jL-0=&uniplatform=NZKPT&language=CHS>. [LIU Shuai, WANG Tao, LIU Jiamai, et al. A case study on susceptibility assessment of precipitation-induced mass landslides based on optimal random forest model, west Qinling Mountains[J/OL]. Geological Bulletin of China, (2024-01-19)[2024-03-09] (in Chinese with English abstract)]
- [7] 王海芝,胡福根,于森,等.北京市房山区霞云岭“7•20”坡面泥石流特点及形成因素浅析[J].城市地质,2021,16(4):399-403. [WANG Haizhi, HU Fugen, YU Miao, et al. Characteristics and formation factors of slope debris flow on “7•20” in Xiayunling, Fangshan District, Beijing[J]. Urban Geology, 2021, 16(4): 399-403. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 刘佳意,陈春利,付昱凯,等.降雨诱发的浅表堆积层滑坡成因机理与稳定性预测模型[J].水文地质工程地质,2024,51(2):183-191. [LIU Jiayi, CHEN Chunli, FU Yukai, et al. Mechanism of rainfall-induced shallow landslide and stability prediction model[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(2): 183-191. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 孟生勇,江兴元,杨义,等.降雨诱发堆积体滑坡水土响应与稳定性时空演化试验研究[J].水文地质工程地质,2023,50(1):104-112. [MENG Shengyong, JIANG Xingyuan, YANG Yi, et al. An experimental study of spatial-temporal evolution of water-soil response and stability of a rainfall-induced accumulation landslide[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(1): 104-112. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 潘元贵,伍中庚,孙东,等.四川渠县“8•8”特大暴雨引发的地质灾害分布特征与成因分析[J].中国地质灾害与防治学报,2022,33(4):125-133. [PAN Yuangui, WU Zhonggeng, SUN Dong, et al. Analysis on the distributive characteristics and causes of the geological disasters induced by the “8•8” heavy rainstorm in Qu County, Sichuan Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(4): 125-133. (in Chinese with English abstract)]