

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2020.06.05

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

程素珍, 路璐, 翟淑花, 张长敏, 郝春燕, 任凯珍
(北京市地质研究所, 北京 100120)

摘要: 本文对北京市规划和自然资源委员会发布的《北京市环境公报》(2004—2018 年)和北京市水务局发布的《北京市水资源公报》(2004—2018 年)进行了全面梳理,详细分析了近 15 年来北京市突发地质灾害的类别构成和时空分布规律。北京市突发地质灾害有崩塌、滑坡、泥石流和地面塌陷 4 种类型,其中崩塌是北京市发生数量最多的地质灾害。北京市突发地质灾害规模较小,分布广泛。大部分灾害发生在汛期,表明北京市突发地质灾害与降雨密切相关。极端强降雨发生后,不同类型灾害集中暴发。近年来,北京市突发地质灾害专业监测预警工作积极开展,并取得一定的成绩,但是相关的科研、监测预警技术等地质灾害防治工作仍需提升。本文的相关结论来源于真实数据的统计分析,可为北京市突发地质灾害监测预警工作提供客观数据支撑。

关键词: 突发地质灾害;强降雨;监测预警

中图分类号: P694

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2020)06-0038-09

Temporal-spatial distribution and monitoring and early warning of sudden geological disasters in Beijing during the period of 2004 to 2018

CHENG Suzhen, LU Lu, ZHAI Shuhua, ZHANG Changmin, HAO Chunyan, REN Kaizhen
(Beijing Institute of Geology, Beijing 100120, China)

Abstract: In the paper, annual “Beijing geological environments Bulletin” and “Beijing Water Resources Bulletin” from 2004 to 2018a were comprehensive arranged, then the temporal-spatial distribution discipline and categories of sudden geological disaster in Beijing were analyzed according to all kinds record data. There were four categories in Beijing, such as, rockfall, landslide, debris flow, and ground collapse. Rockfall is the most frequent category of sudden geological disaster. Small harm degree and wide distribution are the common characteristic of them. The year in which the number of sudden geological disasters occurs in Beijing is also the year with large annual precipitation and most of the sudden geological disasters occur in the flood season, which indicates that the sudden geological disasters in Beijing are closely related to rainfall. After heavy rainfall, sudden geological disasters in different categories happened. In recent years, monitoring and early warning of sudden geological disaster in Beijing are in progress, and some achievements have been made. But related scientific research, monitoring and early warning technology and other prevention and control work still need to be improved. The relevant conclusions from real data in the paper, can provide an objective basis for monitoring and early warning of sudden geological disaster in Beijing.

收稿日期: 2020-08-31; 修订日期: 2020-09-29

基金项目: 北京市自然科学基金资助项目(8194062;8182022;8202026);北京市科技计划项目(Z191100001419015)

第一作者: 程素珍(1981-),女,河南洛阳人,博士,高级工程师,从事地质灾害防治和地质遗迹保护研究工作。E-mail:78413450@

qq.com

Keywords: sudden geological disaster; heavy rainfall; monitoring and early warning

北京地处燕山、太行山和华北平原交汇处,地形和地质条件较为复杂,地质构造非常发育,新构造活动频

繁,降水时空分布不均,人为活动剧烈,突发性地质灾害较为发育(图1)。

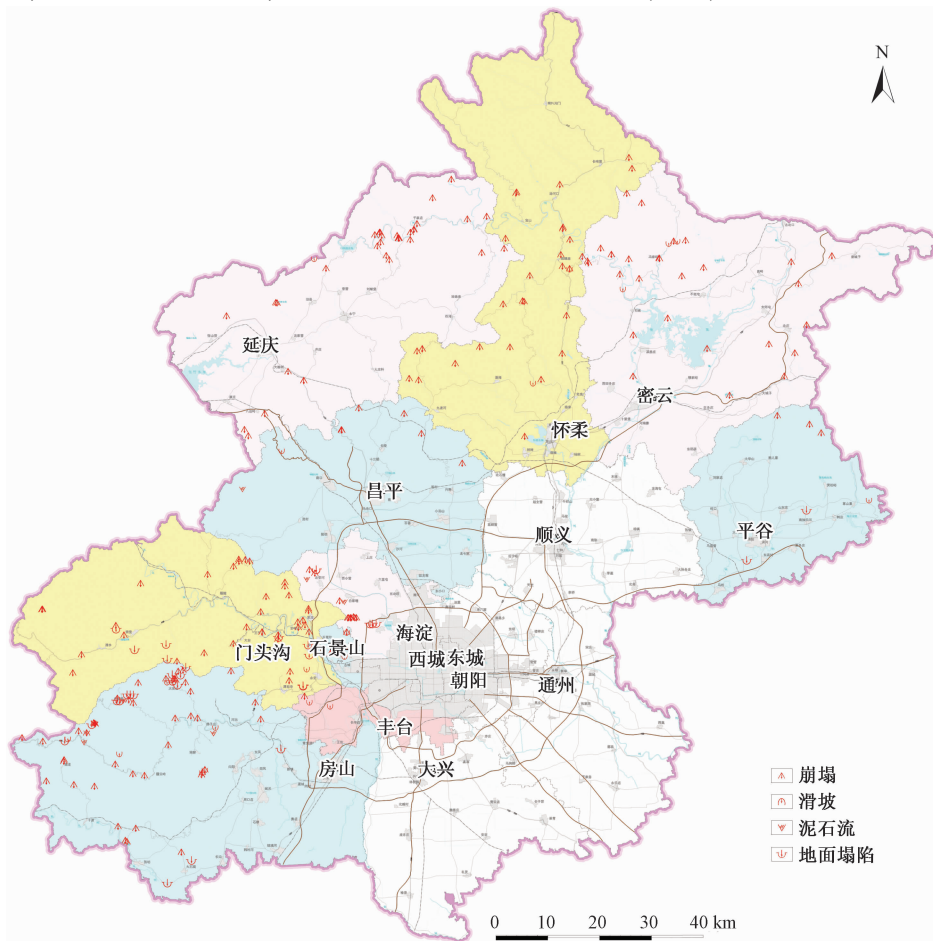


图1 北京市2004—2018年突发地质灾害分布图

Fig.1 Distribution of sudden geological disasters in Beijing from 2004 to 2018

为深入贯彻《地质灾害防治条例》(国务院令第394号),最大限度避免和减轻地质灾害导致的人员伤亡和财产损失,相关单位陆续开展了大量的地质灾害隐患调查工作。截至2019年5月,北京市查明的突发地质灾害隐患点共5 037处,崩塌2 609处,不稳定斜坡1 378处,泥石流901处,滑坡54处,地面塌陷95处(北京市规划和自然资源委员会,2019)。韦京莲、赵忠海等^[1-2]对北京市突发性地质灾害的易发度和危险度方面进行了大量的研究,并组织开展了北京市突发地质灾害易发区划等相关项目。刘传正等^[3]、冯振等^[4]针对国内第一个比较全面的三峡库区地质灾害监测预警系统进行了深入研究。江鸿彬等^[5]针对突发地质灾害的应急监测技术进行了探讨。薛凯喜等^[6]、房浩等^[7]对近年来全国地质灾害发育规律和特

征进行了总结。宁奎斌等^[8]对陕西省2000—2016年发生的地质灾害时空分布规律进行了分析。

北京市第一支突发地质灾害应急调查队成立于2004年,故本文以2004—2018年《北京市地质环境公报》为数据来源,分析近15年来北京市突发地质灾害的类型构成、时空分布情况;以北京市突发地质灾害监测预警系统(一期和二期)工程实际进展情况为依据对北京市突发地质灾害监测预警工作进行梳理,以期北京市突发地质灾害的预警预报工作提供客观依据(图1)。

1 突发地质灾害发生情况

北京市2004—2018年共发生突发地质灾害281处,其中崩塌219处,滑坡20处,泥石流10处,地面塌

陷32处(图2);分别占突发地质灾害总数的77.9%,7.1%,3.6%和11.4%。

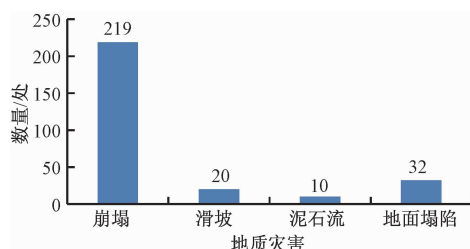


图2 北京市2004—2018年突发地质灾害发生情况

Fig.2 Sudden geological disasters in Beijing from 2004 to 2018

按照《地质灾害防治条例》规定,地质灾害灾情可分为四个等级:(1)特大型:因灾死亡30人以上或者直接经济损失1000万元以上的;(2)大型:因灾死亡10人以上30人以下或者直接经济损失500万元以上1000万元以下的;(3)中型:因灾死亡3人以上10人以下或者直接经济损失100万元以上500万元以下的;(4)小型:因灾死亡3人以下或者直接经济损失100万元以下的。北京市近15年来发生的突发地质灾害仅有1处崩塌(房山区大安山乡军红路X209K18+350m~K18+430m段,2018年)为中型等级,导致军红路双向断路、相关公交车改线及部分景区关停,所幸未造成人员伤亡^[9]。其余全部突发灾害均为小型等级。此外,2006年7月24日,北京市房山区霞云岭乡堂上村碾子沟西坡发生了1处小型坡面泥石流,造成2人死亡。其余的突发地质灾害都没有造成人员伤亡。

1.1 时间分布情况

北京市2004—2018年共发生的281处突发地质灾害(图3),与北京市2004—2018年年均降水量(图4)对比可以看出,突发地质灾害发生数量多的年份,往往也是年均降水量大的年份。近15年来,除了12月份没有发生突发地质灾害外,其余11个月份均有发生,其中243处(85.6%)突发地质灾害发生在北京汛期(6月1日—9月15日);187处(66.5%)突发地质

灾害发生在7月—8月,分别与北京2004—2018年汛期(6月—9月)平均降水量为全年降水量的79.3%(表1)和李海光^[10]分析的北京地区全年降水量的61%集中在7月份和8月份一致。这充分说明北京市突发地质灾害与降雨密切相关。

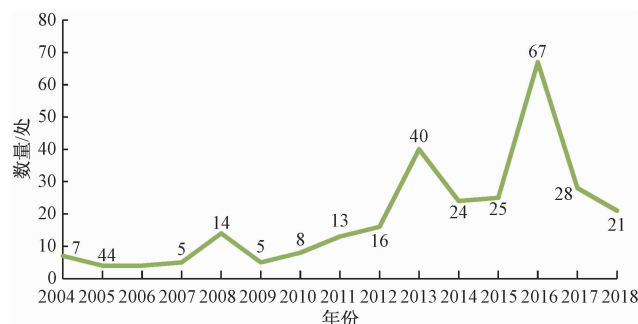


图3 北京市2004—2018年突发地质灾害年度变化情况

Fig.3 Annual occurrence number of sudden geological disasters in Beijing from 2004 to 2018

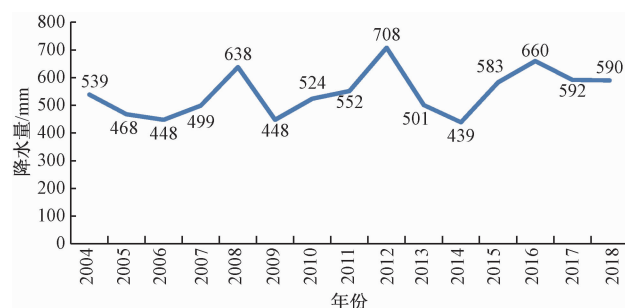


图4 北京市2004—2018年年均降水量

Fig.4 Average annual precipitation in Beijing from 2004 to 2018

1.2 空间分布情况

2004—2018年,北京北部和西部山区和浅山区的房山、门头沟、延庆、怀柔、密云、海淀、昌平、平谷、石景山和丰台10个区均有突发地质灾害发生(图5)。其中,房山区突发地质灾害数量最多(65处),其次是门头沟区(57处)和延庆区(55处),丰台区最少(3处)(图6)。房山区、门头沟区和延庆区3区发生的突发地质灾害数量之和占全市的63.0%(图7)。

表1 北京市2004—2018年降水情况统计表

Table 1 Statistics on precipitation in Beijing from 2004 to 2018

年份	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	平均值
年降水量	539	468	448	499	638	448	524	552	708	501	439	583	660	592	590	—
汛期(6—9月)	441	374	357	341	500	354	353	479	532	457	353	447	519	481	504	—
汛期占比	81.8%	79.9%	79.7%	68.3%	78.4%	79.0%	67.4%	86.8%	75.1%	91.2%	80.4%	76.7%	78.6%	81.3%	85.4%	79.3%



图5 北京市2004—2018年突发地质灾害空间分布图

Fig. 5 Spatial distribution of sudden geological disasters in Beijing from 2004 to 2018

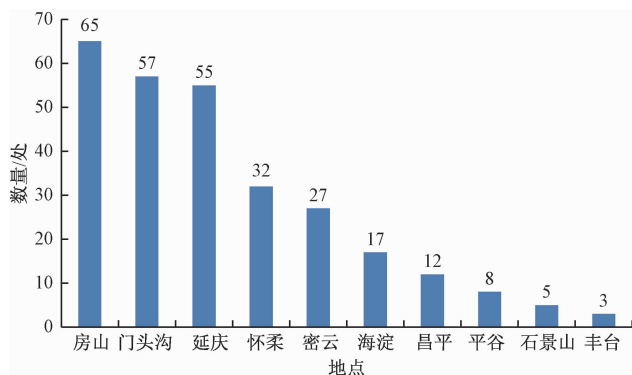


图6 北京市2004—2018年突发地质灾害分布情况

Fig. 6 Distribution of sudden geological disasters in Beijing from 2004 to 2018

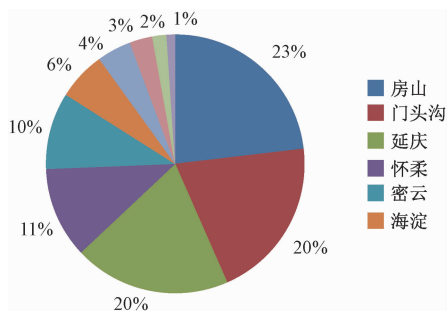


图7 北京市2004—2018年突发地质灾害各区分布占比情况

Fig. 7 Distribution proportion of sudden geological disasters in Beijing from 2004 to 2018

崩塌是北京市近15年来发生数量最多的突发地质灾害,主要分布在延庆、门头沟和房山等10区(图13)。崩塌灾害多与人类工程有关,主要是山区修路过程中,因切坡形成了路旁的高边坡地形,在一定的外力作用下,便发生岩土崩落。如2018年8月军红路(X209)房山段K18+350处崩塌。崩塌所处边坡为岩质边坡,岩性为砂岩,岩层产状为 $352^{\circ}\angle 21^{\circ}$ 。坡高约200 m(公路上方坡高70 m,公路下方坡高130 m),坡向 170° ,坡度约 60° 。坡体表面节理裂隙发育,发育两组节理,产状为 $196^{\circ}\angle 43^{\circ}$ 、 $115^{\circ}\angle 80^{\circ}$ 。陡峻的地形、软硬相间的岩层以及发育的节理裂隙构造为该灾害的发生提供了有利条件,而多日持续的降雨则是导致该灾害发生的主要诱因。本次崩塌落石体积约 $3 \times 10^4 \text{ m}^3$,砸毁道路路面、路基及护栏,损毁路段长约80 m,导致军红路双向断路、相关公交车改线及部分景区关停,所幸在灾害发生前有群测群防员及时发现并果断采取了有效的拦截措施,避免了过往人员伤亡和车辆损毁等损失(图8)。

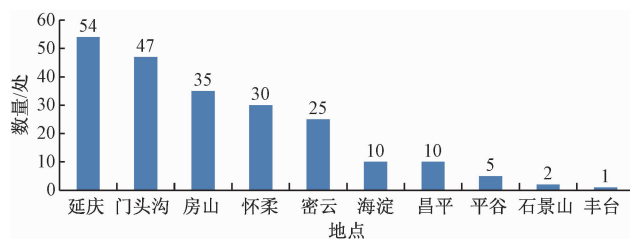


图8 北京市2004—2018年崩塌灾害发生情况

Fig. 8 Distribution of rockfalls in Beijing from 2004 to 2018

滑坡共发生20处,均为小型。其中房山区(7处)、石景山区(3处)、密云区、丰台区和怀柔区各2处,门头沟区、延庆区、平谷区和昌平区各1处(图9)。

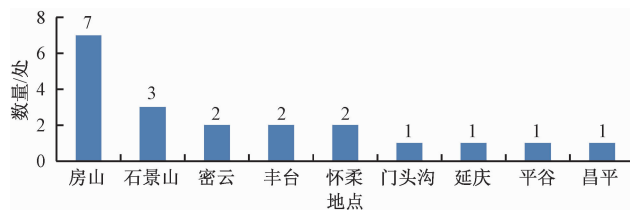


图9 北京市2004—2018年滑坡灾害分布情况

Fig. 9 Distribution of landslides in Beijing from 2004 to 2018

泥石流共发生10处,其中,房山区(7处)、海淀区(2处)、昌平区(1处)(图10),均为小型。

地面塌陷共发生32处,分布在房山区(16处)、门头沟区(9处)、海淀区(5处)和平谷区(2处)(图11)。主要是由采矿塌陷、岩溶塌陷和早期人防工程坍塌引起。其中房山区和门头沟区的地面塌陷大部分是由采矿造成的。海淀区和平谷区的地面塌陷大部分

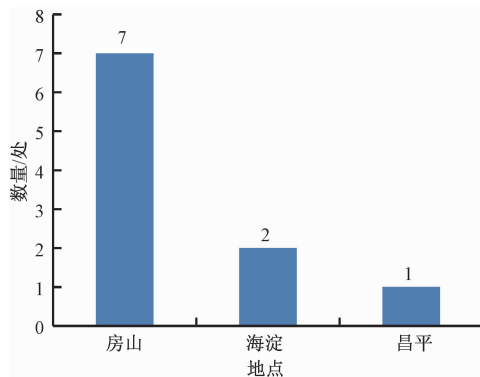


图10 北京市2004—2018年泥石流灾害分布情况

Fig. 10 Distribution of debris flows in Beijing from 2004 to 2018

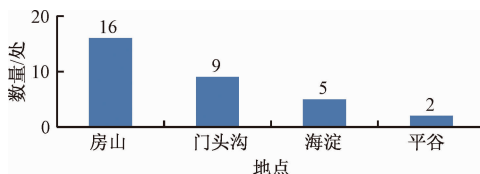


图11 北京市2004—2018年地面塌陷灾害分布情况

Fig. 11 Distribution of ground collapses in Beijing from 2004 to 2018

是岩溶塌陷。

1.3 突发地质灾害与强降雨

2012年“7·21”北京特大暴雨,是新中国成立以来至当年首都最大的强降雨,降雨过程持续20小时,全市平均降雨量170 mm,城区平均降雨量215 mm(数据来源北京市防汛办)。降雨次日,2012年7月22日,石景山、海淀和房山等区共发生小型滑坡3处,小型崩塌1处。

2016年7月19日01时至21日6时,北京全市又发生了一场持续近50个小时的强降雨,全市雨量监测站平均雨量达210.7 mm,降雨总量超过2012年“7·21”北京特大暴雨(数据来源北京市防汛办)。2016年7月20和21日,共发生崩塌、滑坡和泥石流灾害共计37处,之后7月22—26日,又发生崩塌、滑坡和泥石流灾害共计12处。2016年突发地质灾害总数达67处,是近15年来最多的年份。

此外,2017年6月23日强降雨后,门头沟区、密云区和延庆区发生小型崩塌4处;7月8日强降雨后,延庆区和门头沟区发生小型崩塌5处、小型滑坡1处;8月23日强降雨后,发生小型崩塌6处。

这些数据表明,强降雨等极端天气可引发崩塌、滑坡、泥石流和地面塌陷等突发地质灾害集中暴发。

2 突发地质灾害监测预警现状

监测预警是基于遥感技术、地理信息系统和全球定位系统及地质灾害监测技术,以一定范围的滑坡、泥石流及崩塌等地质灾害体为监测对象,对其在时空域的变形破坏信息和灾变诱发因素信息实施动态监测,通过变形因素、相关因素及诱因因素信息的相关分析处理,对灾害体的稳定状态和变化趋势做出判断,以及分析灾害可能出现的时间、规模、危害范围,制定临灾紧急避让行动方案等相关工作《地质灾害防治基本术语(试行)(T/CAGHP 002-2018)》。北京市目前正在实施突发地质灾害监测预警系统(二期)工程项目,均采用国内先进的地质灾害监测预警仪器(技术)(表2)。每一种仪器都有自身的优势和局限性,因此安装不同

表2 北京市突发地质灾害主要监测预警仪器(方法)一览表

Table 2 List of major monitoring and warning instruments (methods) for sudden geological disasters in Beijing

监测仪器(方法)	适用范围	优点	缺点
雨量计	泥石流、崩塌、滑坡、地面塌陷	能够实时监测降雨量。	仅能反映局部降雨情况。
土壤含水率仪	泥石流、滑坡、地面塌陷	能反应松散堆积物的饱和程度和降雨入渗情况。	易受土体类别、土质密度及坡体形态影响。
次声仪	泥石流	能够通过监测泥石流次声频谱发出报警。	易受周围环境干扰。
泥位计	泥石流	可实现非接触式泥水位监测。	受环境影响较大,监测数据不稳定。
视频监控	泥石流、崩塌	可直观反映周边宏观情况。	不能反映灾害体内部变形情况。
多形态崩塌智能监测仪	崩塌	能够准确反映监测体的裂缝变化情况。	不能精确计算崩塌发生的时间。
裂缝位移计	滑坡	能够反映地表裂缝变化情况。	不能精确计算滑坡发生的时间。
GNSS变形位移监测仪	滑坡、地面塌陷	能够对地表变形进行全天候、实时监测。	易受障碍物和无线电发射源影响
深部位移监测仪	滑坡	能在早期发现岩土体内部变形,进行灾害早期预警。	易受岩土体内部剪力而被损坏。
远程应力监测仪	滑坡	能对岩土体内部应力变化进行实时监测和预报。	应力变化预警判断难以确定。
InSAR监测仪	地面塌陷	能够全天候、大范围跟踪观测地面微小变形。	易受大气环境、卫星轨道误差、地表状况等因素影响。
静力水准仪	地面塌陷	能够准确测量垂直沉降量。	不能快速测量沉降变化量。

类型的仪器对同一种突发地质灾害进行联合监测预警。监测预警仪器的选址非常重要,关乎能否准确预测灾情的发展。如泥石流监测网点布置应覆盖泥石流沟形成区、流通区和堆积区整个沟域,雨量计应布设在形成区,一般选择在泥石流沟两岸地势较高处的稳定平台上;次声仪一般布置在支沟的沟口和主沟的中下游或沟口;泥位计一般布设在泥石流流通区的中下部;土壤含水率仪主要布设在泥石流形成区或流通区松散物质厚度较大的区域;视频监控应布置在沟谷出口附近的高地上,能全方位监控泥石流及其危害对象的情况。北京市某泥石流沟监测仪器选址见图12。

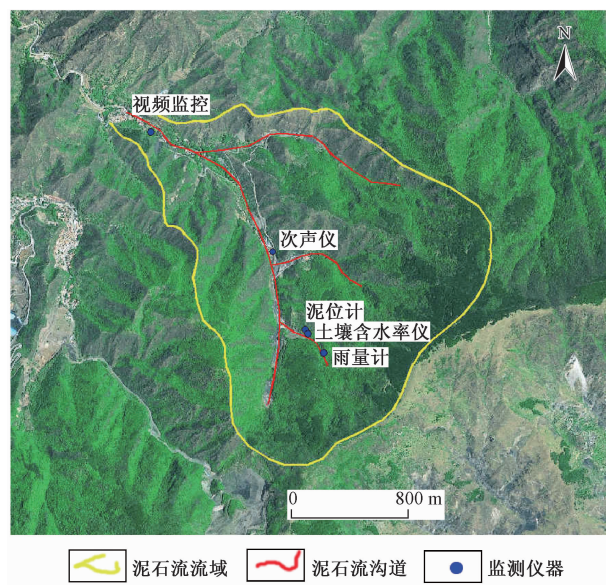


图12 北京市某泥石流沟监测仪器选址图

Fig.12 Location map of a debris flow gully monitoring instrument in Beijing

2.1 泥石流的研究与监测预警

泥石流监测预警作为一种经济、有效和先行的预防手段,越来越受到国内外学者、减灾科技工作者和政府部门的广泛关注^[11-13]。按照《泥石流监测规范(DZ/T0221-2006)》,泥石流监测的主要内容可分为形成条件(物源、水源等)监测、运动特征(流动动态要素、动力要素和输移冲淤等)监测、流体特征(物质组成及其物理化学性质等)监测等。

北京市泥石流监测工作是在北京市地质灾害详细调查的基础上,结合北京市泥石流的临界雨量和形成机理等方面的研究成果开展的。白利平等^[14-15]针对单一降雨因素引发的泥石流临界雨量进行了探讨。赵忠海^[16]从泥石流形成机理和降雨量诱发等多方面对北京山区泥石流灾害预警方法进行讨论。翟淑花

等^[17-19]建立了泥石流松散物源启动模型,从泥石流形成机理方面进行临界雨量反演,并以泥石流流域降雨量、源地土体土壤含水率、泥位计以及次声等信息作为主要预警指标,对房山区南窖泥石流沟开展多设备互证的协同预警研究。

目前,相关部门共安装雨量计、土壤含水率仪、次声仪、一体化泥位计和视频监控等仪器共计1263套(台),为北京市泥石流专业监测预警工作奠定了坚实的基础。

2.2 崩塌的研究与监测预警

北京地区崩塌监测预警研究仍处于起步阶段,仅有少量初步研究成果^[20]。结合国内外崩塌形成机理^[21-22]和《崩塌监测规范(试行)(T/CAGHP007-2018)》对重要崩塌隐患点进行变形监测(地表绝对位移、裂缝相对位移和深部位移)、应力监测(岩土体应力和防治工程受力)和其他影响因素(降水量和地下水位)监测。目前,北京市已完成安装多形态崩塌智能监测仪、雨量计和视频监控等设备共计231套(台)。

2.3 滑坡的研究与监测预警

殷坤龙等^[23-24]早期开展了大量的滑坡研究工作。之后李文军等^[25]于2006年对北京门头沟区戒台寺滑坡的变形机理进行了研究,指出大规模采煤形成采空区是戒台寺滑坡的主要诱发因素。目前尚未发现北京地区滑坡监测预警研究成果。结合国内外学者对不同类型滑坡形成机理的研究成果、《崩塌滑坡泥石流监测规范(DZ/T0221-2006)》和《滑坡推力光纤监测技术指南(试行)(T/CAGHP019-2018)》,相关部门不仅对滑坡体诱发因素如降雨量和人类活动进行实时监测,还对滑坡体内部信息如位移场(地面位移、裂缝张开位移和深部滑动面位移)、地应力场(构造应力、自重应力和外部荷载应力)、孔隙水压力场和水压力场进行实时监测。目前,相关部门已完成GNSS变形位移监测仪、远程应力监测仪、裂缝位移计和深部位移监测仪等设备共计67套(台),为北京市滑坡监测预警工作提供技术支撑。

2.4 地面塌陷的研究与监测预警

京西煤矿开采历史悠久,早年无序开采造成采煤区大面积塌陷,给人民生命财产带来一定的威胁。为保护首都生态环境,相关政府部门有序开展矿山关闭工作,并对矿山环境进行治理和监督。近年来,许多学者^[26-27]对地面塌陷的机理和监测预警进行了深入研究。秦四清等^[26]探讨了煤柱-顶板系统协同作用的脆性失稳与非线性演化机制。王金安等^[27]建立了采空

区内矿柱支撑顶板的弹性基础板力学模型,研究顶板不同阶段的破断模式与突变失稳的力学过程。翟淑花^[28]和邢宇鑫^[29]分别对北京典型煤矿采空塌陷监测技术进行讨论。依据现有的研究成果和《采空塌陷勘查规范(试行)(T/CAGHP005-2018)》及地质灾害地下变形监测技术规范(试行 T/CAGHP046-2018),相关部门在北京地区重要的地面塌陷隐患点(主要是采空塌陷)已完成 GNSS 变形位移监测仪、InSAR 监测仪和静力水准仪等设备共计 326 套(台),为北京市地面塌陷监测预警和矿山环境动态监控工作服务。

多年来针对泥石流、滑坡等突发地质灾害,我国开展了大量监测预警工作,取得了丰硕的成果,但纵观其发展过程,发现预警成功率并不理想,对突发地质灾害进行及时准确的预警仍是当前地质灾害工作的难点^[30]。近年来在众多学者的努力下,也取得了很大的突破^[31-34]。刘艳辉等^[31]对目前国内地质灾害广泛使用的第一代隐式统计气象预警模型和第二代显式统计气象模型进行优化,提高了气象预警的精确度。杜岩等^[32]通过试验发现,自振频率的变化能够反映滑坡体的结构变化,并建立了一套适用于崩塌和滑坡等脆性破坏灾害的、基于动力学指标监测、静力学指标监测和环境量指标监测的三位一体的监测预警指标体系。许强等^[33]结合多年的滑坡监测预警工作实践指出在历史数据统计分析的基础上,研究基于变形、地下水位、雨量等关键指标判据,可提高滑坡预警的准确性。蔡永顺等^[34]采用微震监测技术对地表塌陷过程进行监测与预警,取得了较好的效果。

目前北京市已建立了一套技术较先进、设施较完备的突发地质灾害监测预警系统,但相关人员一定要真正树立监测是手段、预警是目的的工作意识。随着科技的快速发展,今后不仅要优化当前的监测预警技术,更要深入开展地质灾害预警预报研究工作,收集和分析各种监测数据(包括气象、地质灾害和地质背景等),建立科学的地质灾害预警模型,优化各种预警判据,逐步形成指标丰富的监测预警体系,为首都建设提供精准的地质灾害预警预报服务。

3 结论与建议

本文以 2004—2018 年《北京市环境公报》和《北京市水资源公报》(2004—2018 年)为数据来源,统计分析北京市突发地质灾害类别构成及发生比例,剖析了灾害发生数量的年度变化规律,着重分析了各类地质灾害的时间和空间分布规律以及与强降雨的关系

等,并对北京市突发地质灾害监测预警工作进行总结和梳理。上述分析得到的研究结论如下:

北京市突发地质灾害有崩塌、滑坡、泥石流和地面塌陷 4 种类型,其中崩塌是北京市发生数量最多的地质灾害。灾害规模较小,分布广泛。北京市突发地质灾害发生数量多的年份也是年均降水量大的年份,大部分突发地质灾害发生在汛期,这些表明北京市突发地质灾害与降雨密切相关。极端强降雨发生后,不同类型灾害集中暴发。

近年来,北京市突发地质灾害专业监测预警工作和以群众为基础的群防群策工作取得了可喜的成绩。但是,目前的研究成果不丰富,监测预警工作仍需进一步优化和完善。今后,相关项目工作人员应重点加强地质灾害形成机理、风险阈值和监测预警技术等方面的研究,提升地质灾害预警和防治能力;充分发挥无人机倾斜摄影系统、干涉合成孔径雷达、三维激光扫描等多种观测技术,对地质灾害隐患点进行精细调查和科学评判;利用大数据、物联网、移动互联网和人工智能等现代信息技术,进一步完善北京市地质灾害监测预警信息平台,全面提升北京市突发地质灾害监测预警能力。

参考文献:

- [1] 北京市地质矿产勘查开发局,北京市地质研究所. 北京地质灾害[M]. 北京:中国大地出版社,2008. [Beijing Geology Prospecting & Developing Bureau, Beijing Institute of Geology. Disasters in Beijing[M]. Beijing: China Land Press, 2008. (in Chinese)]
- [2] 赵忠海. 北京地区突发性地质灾害易发区划及危险度评价[J]. 资源调查与环境, 2009, 30(3): 213-221. [ZHAO Z H. Regionalization of susceptibility and hazard assessment on unexpected geological disasters in Beijing[J]. Resources Survey & Environment, 2009, 30(3): 213-221. (in Chinese)]
- [3] 刘传正,杨冰. 三峡库区地质灾害调查评价与监测预警新思维[J]. 工程地质学报, 2001, 9(2): 121-126. [LIU C Z, YANG B. A new thought of surveying, evaluating, monitoring and forecasting for the geologic hazards in the three-gorges on Changjiang river[J]. Journal of Engineering Geology, 2001, 9(2): 121-126. (in Chinese)]
- [4] 冯振,李滨,赵超英,等. 三峡库区山区城镇重大地质灾害监测预警示范研究[J]. 地质力学学报, 2016, 22(3): 685-694. [FENG Z, LI B, ZHAO C Y, et al. Geological hazards monitoring and application in mountainous town of Three Gorges reservoir[J]. Journal of Geomechanics, 2016, 22

- (3): 685–694. (in Chinese)]
- [5] 江鸿彬, 谭爱平, 夏春梅, 等. 突发地质灾害应急监测探讨[J]. 地质灾害与环境保护, 2012, 23(1): 13–15. [JIANG H B, TAN A P, XIA C M, et al. On geo-hazard emergency monitoring[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2012, 23(1): 13–15. (in Chinese)]
- [6] 薛凯喜, 胡艳香, 邹玉亮, 等. 近十年中国地质灾害时空发育规律分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2016, 27(3): 90–97. [XUE K X, HU Y X, ZOU Y L, et al. Temporal-spatial distribution discipline of geological disaster in China in recent ten years[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2016, 27(3): 90–97. (in Chinese)]
- [7] 房浩, 李媛, 杨旭东, 等. 2010–2015年全国地质灾害发育分布特征分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2018, 29(5): 1–6. [FANG H, LI Y, YANG X D, et al. Distribution characters of geo-hazards in China during the period of 2010–2015[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2018, 29(5): 1–6. (in Chinese)]
- [8] 宁奎斌, 李永红, 何倩, 等. 2000~2016年陕西省地质灾害时空分布规律及变化趋势[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2018, 29(1): 93–101. [NING K B, LI Y H, HE Q, et al. The spatial and temporal distribution and trend of geological disaster in Shaanxi Province from 2000 to 2016[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2018, 29(1): 93–101. (in Chinese)]
- [9] 赵忠海, 李敏. 北京房山军红路边坡地质灾害特征及成因分析[J]. 城市地质, 2018, 13(4): 32–36. [ZHAO Z H, LI M. Characteristics and cause analysis of the slope geologic disaster near the road from Junxiang to Hongmeichang in Fangshan district, Beijing[J]. Urban Geology, 2018, 13(4): 32–36. (in Chinese)]
- [10] 李海光, 邓文平, 余新晓. 北京地区1951~2011年降水特征分析[J]. 内蒙古水利, 2014(2): 57–58. [LI H G, DENG W P, YU X X. Analysis of Precipitation Characteristics in 1951~2011 in Beijing[J]. Inner Mongolia Water Resources, 2014(2): 57–58. (in Chinese)]
- [11] 吴树仁, 周平根, 雷伟志, 等. 地质灾害防治领域重大科技问题讨论[J]. 地质力学学报, 2004, 10(1): 1–6. [WU S R, ZHOU P G, LEI W Z, et al. Important scientific and technological problems in the field of geological hazard prevention and control—a discussion[J]. Journal of Geomechanics, 2004, 10(1): 1–6. (in Chinese)]
- [12] 杨顺, 潘华利, 王钧, 等. 泥石流监测预警研究现状综述[J]. 灾害学, 2014, 29(1): 150–156. [YANG S, PAN H L, WANG J, et al. A review of the study on debris flow monitoring and early warning[J]. Journal of Catastrophology, 2014, 29(1): 150–156. (in Chinese)]
- [13] 李长江, 麻士华. 反思舟曲灾难事件: 如何最大限度减少人员伤亡? [J]. 地质论评, 2011, 57(5): 687–699. [LI C J, MA T H. Reflections on the catastrophic debris flow event in Zhouqu County: how to minimize casualties? [J]. Geological Review, 2011, 57(5): 687–699. (in Chinese)]
- [14] 白利平, 南赞, 孙佳丽. 北京市泥石流灾害临界雨量研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2007, 18(2): 34–36. [BAI L P, NAN Y, SUN J L. Research on critical rainfall of debris flows in Beijing[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2007, 18(2): 34–36. (in Chinese)]
- [15] 白利平, 孙佳丽, 南赞. 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 L P, SUN J L, NAN Y. Analysis of the critical rainfall thresholds for mudflow in Beijing, China[J]. Geological Bulletin of China, 2008, 27(5): 674–680. (in Chinese)]
- [16] 赵忠海. 北京山区泥石流灾害预警方法研究[J]. 地质灾害与环境保护, 2014, 25(4): 14–19. [ZHAO Z H. Early warning methods for debris-flow disasters in Beijing mountainous areas[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2014, 25(4): 14–19. (in Chinese)]
- [17] 翟淑花, 冒建, 安立伟, 等. 不同雨型下泥石流松散物源体降雨入渗及衰减规律[J]. 人民长江, 2019, 50(7): 22–27. [ZHAI S H, MAO J, AN L W, et al. Rainfall infiltration and attenuation regularity analysis of debris flow loose material under different rainfall pattern[J]. Yangtze River, 2019, 50(7): 22–27. (in Chinese)]
- [18] 翟淑花, 高谦, 张玲玲. 泥石流松散物源堆积体启动预警判据研究[J]. 人民长江, 2017, 48(增刊2): 129–132. [ZHAI S H, GAO Q, ZHANG L L. Research on the critical soil-water content for loose material initiation of debris flow[J]. Yangtze River, 2017, 48(Sup2): 129–132. (in Chinese)]
- [19] 翟淑花, 刘欢欢, 王云涛, 等. 综合监测技术在南窖沟泥石流协调预警中的应用[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(1): 46–50. [ZHAI S H, LIU H H, WANG Y T, et al. Application of comprehensive monitoring technique on collaborative early warning of Nanjiao debris-flow [J]. South-to-North Water

- Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16 (1): 46 – 50. (in Chinese)]
- [20] 韩建超. 北京地区崩塌监测预警初探——以琉辛路监测路段为例[J]. 城市地质, 2020, 15(2): 148 – 153. [HAN J C. Preliminary study on collapse monitoring and early warning in Beijing area—taking the monitoring section of Liuxin road as an example[J]. Urban Geology, 2020, 15(2): 148 – 153. (in Chinese)]
- [21] BERTRAN P. The rock-avalanche of February 1995 at Claix (French Alps) [J]. Geomorphology, 2003, 54 (3/4): 339 – 346.
- [22] 陈洪凯, 鲜学福, 唐红梅. 石质山区崩塌灾害形成机制——以四面山国家级风景名胜区红岩山为例[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2010, 42 (3): 1 – 6. [CHEN H K, XIAN X F, TANG H M. Developing mechanism for collapse disaster in rocky mountain area—taking Mt. Hongyan in the national scenic spots of simianshan as an example[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2010, 42(3): 1 – 6. (in Chinese)]
- [23] 殷坤龙, 汪洋, 唐仲华. 降雨对滑坡的作用机理及动态模拟研究[J]. 地质科技情报, 2002, 21(1): 75 – 78. [YIN K L, WANG Y, TANG Z H. Mechanism and dynamic simulation of landslide by precipitation[J]. Geological Science and Technology Information, 2002, 21(1): 75 – 78. (in Chinese)]
- [24] 殷坤龙. 滑坡灾害预测预报分类[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2003, 14(4): 12 – 18. [YIN K L. Classification of landslide hazard prediction and warning[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2003, 14(4): 12 – 18. (in Chinese)]
- [25] 李文军, 杨让宏. 北京门头沟区戒台寺滑坡的变形机理与特点[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2006, 17(2): 140 – 146. [LI W J, YANG R H. Deformation mechanism and characteristics of Jietai temple landslide, Beijing[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2006, 17(2): 140 – 146. (in Chinese)]
- [26] 秦四清, 王思敬. 煤柱-顶板系统协同作用的脆性失稳与非线性演化机制[J]. 工程地质学报, 2005, 13(4): 437 – 446. [QIN S Q, WANG S J. Instability leading to rockbursts and nonlinear evolutionary mechanisms for coal-pillar-and-roof system [J]. Journal of Engineering Geology, 2005, 13(4): 437 – 446. (in Chinese)]
- [27] 王金安, 尚新春, 刘红, 等. 采空区坚硬顶板破断机理与灾变塌陷研究[J]. 煤炭学报, 2008, 33 (8): 850 – 855. [WANG J N, SHANG X C, LIU H, et al. Study on fracture mechanism and catastrophic collapse of strong roof strata above the mined area[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(8): 850 – 855. (in Chinese)]
- [28] 翟淑花, 李良景, 冒建, 等. 京西小窑采空塌陷勘查与监测技术研究[J]. 徐州工程学院学报(自然科学版), 2018, 33(1): 76 – 82. [ZHAI S H, LI L J, MAO J, et al. Technical research on detecting and monitoring of gob and subsidence of small colliery in the west of Beijing[J]. Journal of Xuzhou Institute of Technology, 2018, 33(1): 76 – 82. (in Chinese)]
- [29] 邢宇鑫, 吴大鹏, 王亚婷, 等. 北京典型煤矿采空塌陷监测技术研究与实践[J]. 城市地质, 2019, 14 (4): 54 – 60. [XING Y X, WU D P, WANG Y T, et al. Research and practice on monitoring technology of mined-out collapse in typical coal mines in Beijing [J]. Urban Geology, 2019, 14(4): 54 – 60. (in Chinese)]
- [30] 吴树仁. 突发地质灾害研究某些新进展[J]. 地质力学学报, 2006, 12(2): 265 – 273. [WU S R. Some progress in the study of sudden geological hazards[J]. Journal of Geomechanics, 2006, 12(2): 265 – 273. (in Chinese)]
- [31] 刘艳辉, 刘传正, 温铭生, 等. 中国地质灾害气象预警模型研究[J]. 工程地质学报, 2015, 23(4): 738 – 746. [LIU Y H, LIU C Z, WEN M S, et al. Study of early warning models for regional geohazards in China[J]. Journal of Engineering Geology, 2015, 23(4): 738 – 746. (in Chinese)]
- [32] 杜岩, 谢谟文, 蒋宇静, 等. 基于动力学监测指标的崩塌早期预警研究进展[J]. 工程科学学报, 2019, 41(4): 427 – 435. [DU Y, XIE M W, JIANG Y J, et al. Research progress on dynamic monitoring index for early warning of rock collapse[J]. Chinese Journal of Engineering, 2019, 41(4): 427 – 435. (in Chinese)]
- [33] 许强. 对滑坡监测预警相关问题的认识与思考[J]. 工程地质学报, 2020, 28(2): 360 – 374. [XU Q. Understanding the landslide monitoring and early warning: consideration to practical issues[J]. Journal of Engineering Geology, 2020, 28(2): 360 – 374. (in Chinese)]
- [34] 蔡永顺, 何德强, 石峰, 等. 基于微震监测技术的地表塌陷监测预警研究[J]. 中国矿业, 2020, 29 (增刊1): 149 – 154. [CAI Y S, HE D Q, SHI F, et al. Study on monitoring and early warning of surface subsidence based on microseismic monitoring technology[J]. China Mining Magazine, 2020, 29 (Sup1): 149 – 154. (in Chinese)]