

许风雯,狄靖月,李宇梅,等,2020.北京“7·16”暴雨诱发地质灾害成因分析[J].气象,46(5):705-715. Xu F W, Di J Y, Li Y M, et al, 2020. Cause analysis of the geological hazards induced by the 16 July 2018 rainstorm in Beijing[J]. Meteor Mon, 46(5): 705-715(in Chinese).

北京“7·16”暴雨诱发地质灾害成因分析*

许风雯^{1,2} 狄靖月^{1,2} 李宇梅^{1,2} 王 志³ 包红军^{1,2} 刘海知^{1,2}

1 国家气象中心,北京 100081

2 中国气象局-河海大学水文气象研究联合实验室,北京 100081

3 中国气象局公共气象服务中心,北京 100081

提 要:从 2018 年 7 月 16 日北京暴雨过程雨情和地质灾害灾情出发,介绍了此次过程的地质灾害气象预警及检验;并基于北京区域地质灾害易发度信息,结合多源融合定量降水估测(QPE)驱动 CREST 水文模型模拟径流量与土壤湿度特征、过程雨强特征,分析了北京本次地质灾害气象成因。结果表明,北京北部和西部处于地质灾害中、高易发区,区(县)小时累计雨量达到 50 mm 以上易发生灾害,降水持续 24 h 后是地质灾害的高发时段,灾害常发生于雨强较大峰值后的 15 h 内;基于雨强-降水持续时间推求的地质灾害致灾临界雨量阈值对北京地区地质灾害气象预警有一定的借鉴意义;基于水文模型的北京区域径流量、坡面径流深、土壤湿度等水文过程要素模拟对预警也有较好的指导意义。

关键词:地质灾害,气象成因分析,雨强-降水持续时间关系,CREST 水文模型,北京

中图分类号: P641.457

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.05.011

Cause Analysis of the Geological Hazards Induced by the 16 July 2018 Rainstorm in Beijing

XU Fengwen^{1,2} DI Jingyue^{1,2} LI Yumei^{1,2} WANG Zhi³ BAO Hongjun^{1,2} LIU Haizhi^{1,2}

1 National Meteorological Centre, Beijing 100081

2 CMA-HHU Joint Laboratory for Hydrometeorological Studies, Beijing 100081

3 Public Meteorological Service Centre of CMA, Beijing 100081

Abstract: The heavy rainfall occurred on 16 July 2018 in Beijing resulted in a series of serious hazards such as urban water logging and collapse hazards. Starting with the analysis on the features of rain regime and its associated geological hazard situations, this paper mainly analyzes and summarizes the forecast and verification on the early warning of meteorological geological hazards for this kind of extremely intense rainfall. Based on the detailed information of geological hazards, this study further analyzes the causes of geological hazards in Beijing by combining the characteristics of rainfall intensity, soil moisture and the runoff evolution (derived from the CREST model driven by quantitative precipitation estimation data). The results indicate that the northern and western parts of Beijing are areas characterized by the mid- and high-risk susceptibility degree, the accumulated area-rainfall beyond 50 mm is prone to result in the occurrence of geological hazards and the occurrence time is during the next 15 h after the high peak of precipitation. Based on the rainfall intensity and precipitation duration, the threshold of critical rainfall of geological

* 国家重点研发计划(2018YFC1508102)、国家自然科学基金项目(41775111、41871020、41875131)、国家气象中心水文气象预报团队项目和中国气象局预报员专项(GMAYBY2020-156)共同资助

2018 年 12 月 9 日收稿; 2020 年 2 月 23 日收修定稿

第一作者:许风雯,主要从事应用气象研究. Email: xufw@cma.gov.cn

hazards can be derived as a reference for geological hazard meteorological forecast in the area. The simulation of hydrological process elements such as runoff, depth of overland flow, and soil moisture of hydrological model also has a good guiding significance for early warning of meteorological geological hazards in Beijing.

Key words: geological hazard, meteorological cause analysis, relationship of rainfall intensity-duration, CREST hydrological model, Beijing

引言

我国是世界上地质灾害最严重的国家之一,其种类多、分布广、危害大,严重制约和威胁着地质灾害多发地区国民经济发展和人民生命财产安全。国家一直致力于地质灾害监测预防,经过长期的努力,地质灾害气象预警预报工作已被社会各界尤其是地质灾害易发区人民群众广泛接受,取得了明显的社会效益。

地质灾害预报技术研究始于19世纪后期,从初期的现象预报与经验方程预报阶段,发展到位移时间统计分析预报阶段,非线性预报、预报判据及综合预报研究阶段(黄润秋,2004;曾裕平,2009;张国平等,2010)。我国地质灾害气象预警技术既有通用的地质灾害预警理论支撑,也有预警模型支撑,如把地质环境因素的作用隐含在降水参数的地质灾害隐式统计预报(刘传正,2004;刘传正等,2009;姚学祥等,2005;薛建军等,2005)、地质环境因素变化与激发因素相迭加耦合而后建立判据模型显式统计预报(刘艳辉等,2008;徐晶等,2007)和考虑地质体在降水过程中自身动力变化过程而建立数学物理判据方程动力预报(王光谦等,1991;Glade et al,2005;廖谦等,2000)等,适应各自典型地域特点的针对性预警模型也逐渐开展(彭贵芬等,2008;张国平,2014)。近年来,国内外学者对地质灾害预警经验性降水阈值的建立方法进行了多方面尝试和改进,如建立区域或局部降水阈值(Guzzetti et al,2007;沈军等,2017)、丰富用于刻画降水表征的参数(Corominas and Moya,1999;何爽爽等,2018)、降水表征的参量进行标准化(赵衡和宋二祥,2011)、改进历史数据的统计方法(Guzzetti et al,2007)等方面取得了丰富的研究成果。统计模型难以考虑降水入渗与产汇流等流域水文过程对滑坡响应的影响(He et al,2016),基于物理动力机理的滑坡预报模型利用地形、地质环境与水文信息,实现边坡失稳过程模拟也逐渐开展试验(Dietrich et al,1995;Wu and Sidle,1995;Lu

and Godt,2008;Wooten et al,2008;Ren et al,2009;2015;Zhang et al,2016;陈悦丽等,2016;包红军等,2017),这些技术成果将会推动地质灾害气象预警精细化程度,但目前业务应用推广不多。未来在气候变暖的大背景下,地质灾害事件有增加的趋势(何爽爽等,2018),地质灾害气象预报预警水平亟待提高。自然资源部(原国土资源部)和中国气象局联合发布全国地质灾害气象预警,当达到黄色及其以上(分为黄、橙、红三种预警颜色)预警时对公众发布(刘传正,2004)。国家级地质灾害气象预警业务模型为基于气象观测降水的统计预报(姚学祥等,2005;薛建军等,2005;徐晶等,2007),应用中发现该模型存在空漏报率较大、精细化程度低等问题。如何在统计模型基础上有针对性地考虑区域地质地貌特点、精细化降水资料,结合水文过程要素预报等进行订正预报一直是业务中的难点。

北京地区三面环山,山区面积占61.4%,地形地质条件复杂、断裂构造发育、降水时空分布不均匀,加上人类活动带来的明显地质环境问题,存在泥石流、崩塌、滑坡等突发性地质灾害风险,其中崩塌尤为严重。2003—2018年北京发生崩塌占灾害总数的79.41%(王海芝等,2019)。崩塌与滑坡一般都属于斜坡岩土体失稳问题,成因上往往相互关联,可以作为一类问题考虑(刘传正,2014),此次降水过程引发的均为崩塌灾害,文中提到的地质灾害特指崩塌。2018年7月15日20时开始,北京及周边地区陆续迎来2018年最强的暴雨天气过程(以下简称“7·16”),降水过程中崩塌频发,造成了较大的社会影响。

本文介绍“7·16”北京暴雨过程国家级地质灾害气象预警情况及预警效果。利用观测降水反演降水过程的陆面主要特征,从北京灾害易发度、雨强特征与灾害发生关系等角度分析暴雨期间地质灾害频发的原因。从强降水致灾成因分析中总结预报经验,以期提高对这种持续时间长、雨强大的降水过程地质灾害气象预警的精细化水平,探索北京地质灾害短期、短时精细化预警方法。

1 资料和模型简介

本研究使用的北京 349 个气象自动站的 1 h 雨量资料、日降水资料、定量降水估测(QPE)资料(空间分辨率: $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$, 时间分辨率为 1 h)来自国家气象信息中心。易发度计算的高程、坡度通过全国 1:25 万数字高程模型数据提取获得,工程岩组数据来源于全国 1:400 万地质环境数据,断层密度提取自全国 1:50 万数字地质图。近 10 年(2006—2015 年)公路损毁灾害点数据来源于交通运输部公路交通路况信息系统。

研究使用 CREST (Coupled Routing and Excess Storage) 复合尺度分布式水文模型(Wang et al, 2011),该模型由美国俄克拉何马大学水文气象遥感实验室和美国航空航天局 SERVIR 项目组共同开发,模型采用适于多尺度模拟的次网格尺度表示土壤蓄水能力和适于多尺度模拟的产流过程,同时还应用分布式率定参数方法。2015 年,国家气象中心引入 CREST 水文模型,基于降水及卫星的定量降水估算、定量降水预报等方面的优势,开展了水文模型的本地化应用、检验评估及汛期洪水过程应用模拟等工作,模型的空间分辨率为 12.5 km,时间分辨率为 24 h。

国家级地质灾害气象统计预报模型主要有基于雨量的潜势预报模型和基于雨量、地质灾害危险度的 Logistic 统计模型。基于雨量的潜势预报模型是利用历史地质灾害灾情以及雨量资料分区建立全国范围气象站点的气象潜势预报模型(姚学祥等,

2005;薛建军等,2005)。基于雨量、地质灾害危险度的 Logistic 统计模型是以降水观测和数值预报作为模型的动态输入,利用信息量模型集成地学因子得到的总信息量作为模型的静态预报因子,应用 Logistic 回归拟合地质灾害发生概率(徐晶等,2007)。

2 降水概况和地质灾害灾情分析

2018 年 7 月 15 日 20 时北京市西南部开始出现降水,截至 18 日 06 时北京超过 100 mm 的降水主要分布在密云、怀柔南部、昌平、平谷、房山等地,其中,房山、怀柔和密云雨量超过 200 mm。此次降水过程主要集中在 15 日 20 时至 16 日 20 时,16 日 20 时到 17 日 20 时北京大部降水明显减小,密云局地仍出现超过 100 mm 降水(图 1)。北京这次降水过程主要有几个特点:降水持续时间长,约为 58 h;多峰值,降水期间北京北部出现 2~3 次的较大雨强,有的区域出现 4 次较大雨强;单点雨强大,16 日 02—03 时,密云西白莲峪 1 h 降水量达 117 mm,雨强超过“7·21 暴雨”的单点极值(100.3 mm,平谷挂甲峪)。

北京市规划和国土资源管理委员会发布的地质灾害灾情数据显示(表 1),7 月 16—17 日,共发生地质灾害 23 起(全部为小型道路崩塌),均未造成人员伤亡。灾害分布于怀柔、房山、密云、昌平、平谷、丰台、延庆 7 个区(县),其中怀柔出现灾情数最多,达 12 起,占比为 52%,其次是房山 5 起(表 1)。崩塌发生于 17 日的有 15 起,占比为 65%,强降水次日灾情较重,20 时至次日 07 时发生为 5 起,占比为 20%,灾情多发生于白天。

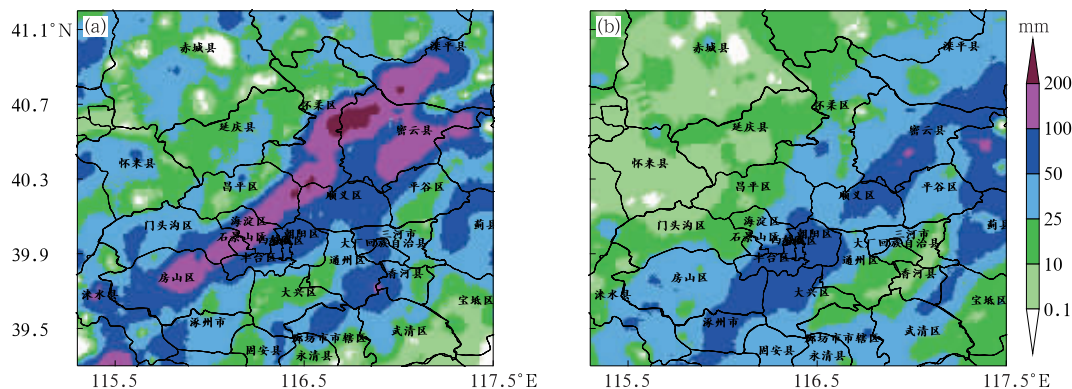


图 1 2018 年 7 月 15 日 20 时至 16 日 20 时(a)、16 日 20 时至 17 日 20 时(b)北京区域自动站降水量分布

Fig. 1 Accumulated precipitation distribution of automatic weather station in Beijing from 20:00 BT 15 to 20:00 BT 16 (a) and 20:00 BT 16 to 20:00 BT 17 (b) July 2018

表 1 北京市 2018 年 7 月 16—17 日地质灾害灾情统计表

灾情	怀柔	房山	密云	昌平	平谷	丰台	延庆
灾害数/起	12	5	2	1	1	1	1
灾害类型	崩塌	崩塌	崩塌	崩塌	崩塌	崩塌	崩塌

3 国家级地质灾害气象预警及检验

3.1 检验方法介绍

根据中国气象局有关业务规范^{*},地质灾害气象预警准确率用命中率、漏报率和空报率表示,检验时以县级区域和地质灾害点为检验对象。命中率(TSR)、漏报率(PO)和空报率(FAR)的计算方案如下:

命中率: $TSR = \frac{NA}{NA + NB + NC}$ (1)

漏报率: $PO = \frac{NC}{NA + NC}$ (2)

空报率: $FAR = \frac{NB}{NA + NB}$ (3)

式中:NA 为预警服务产品发布正确次数,NB 为空报次数,NC 为漏报次数,这里以县级区域为检验对象。

3.2 国家级地质灾害预警及检验

国家气象中心汛期每日 08 时、20 时制作全国未来 24 h 地质灾害气象预警指导产品,20 时与自然资源部联合发布未来全国 24 h 地质灾害预警。研究主要关注 15—17 日的预报情况。

7 月 15 日 20 时,预计未来 24 h,北京中部有大

雨,而北京前 14 天有效降水小于 20 mm,各地质灾害模型预报级别较低,均未达到黄色预警级别,因此,15 日 20 时未对外发布北京地质灾害气象预警。

16 日 20 时起报的未来 24 h 基于降水的地质灾害气象预警模型显示(图 2):北京密云北部、怀柔南部、房山等地为橙色预警,密云南部、门头沟以黄色为主;而基于 Logistic 的地质灾害预警模型除在北京西部延庆等地为蓝色预警外,北京大部为黄色预警区,根据两个模型过去的历史表现,一般而言,雨量模型空漏报偏多,Logistic 模型空报偏多。与自然资源部会商后,综合考虑模型预报结果等因素,16 日 20 时对外发布北京北部和西南部黄色预警,其中,密云、怀柔、延庆和房山发布橙色预警(图 3)。

17 日 08 时起报的未来 24 h 地灾气象预警橙色预警区域着重考虑北部的怀柔、密云、平谷;17 日 20 时,黄色预警区域主要预报于北京北部,橙色预警区域仍预报于怀柔、密云、平谷(图 3)。

根据每日 20 时未来 24 h 的地质灾害气象预警产品检验结果,15 日地质灾害气象预警为漏报。16 日预报区域共包含北京 5 个区(县)站,其中怀柔、房山、延庆出现多次地质灾害事件,密云、门头沟空报,昌平、平谷、丰台漏报,根据式(1)~式(3),16 日预警的命中率为 37.5%,空报率、漏报率分别是 40%和 50%,17 日预报的命中率为 33.3%,空报率为 66.7%(表 2)。

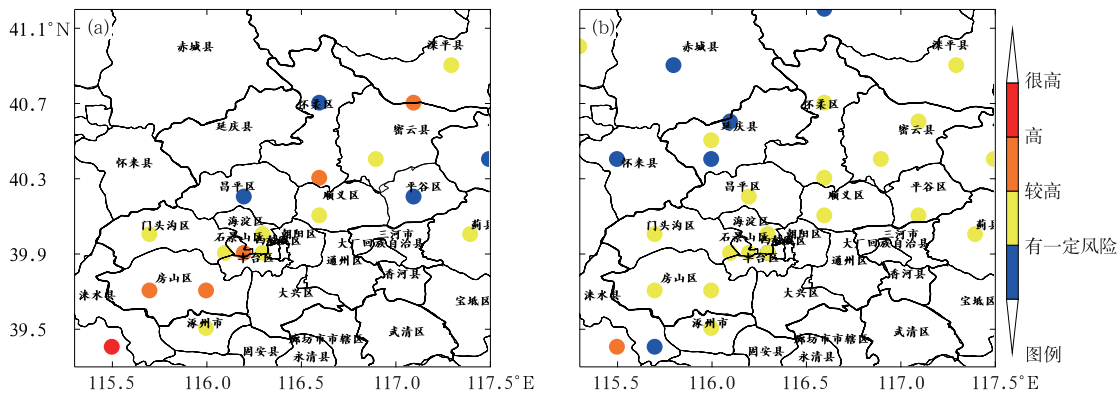


图 2 2018 年 7 月 16 日 20 时基于降水量(a)和基于 Logistic(b)的北京气象站点未来 24 h 地质灾害潜势预报散点图
Fig. 2 Scatter diagrams of potential geological hazard prediction based on precipitation (a) and Logistic (b) models over the next 24 h starting from 20:00 BT 16 July 2018

^{*} 中国气象局,2016,暴雨诱发地质灾害气象风险预警业务规范。

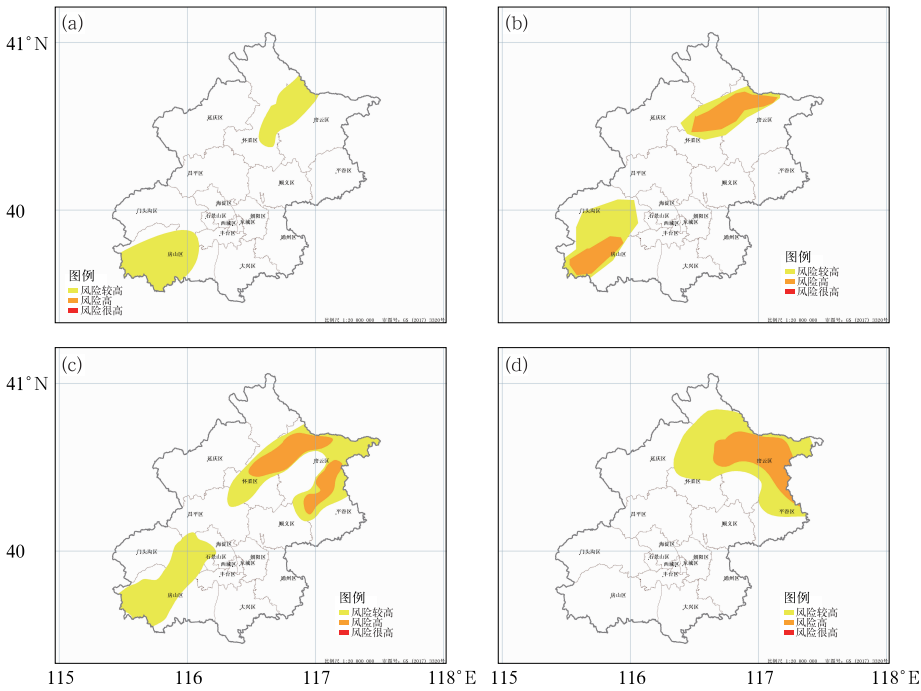


图 3 2018 年 7 月 16 日 08 时(a),20 时(b),17 日 08 时(c)和 20 时(d) 起报的未来 24 h 北京地质灾害气象预警

Fig. 3 Early meteorological warning of geological hazards over the next 24 h starting from 08:00 BT 16 (a), 20:00 BT 16 (b), 08:00 BT 17 (c) and 20:00 BT 17 (d) July 2018

表 2 北京 2018 年 7 月 15—17 日地质灾害气象预报检验评分

Table 2 Test scores of geological hazard meteorological forecast for Beijing during 15—17 July 2018

预报检验	TSR/%	FAR/%	PO/%
15 日预报检验	0	0	100
16 日预报检验	37.5	40	50
17 日预报检验	33.3	66.7	0

以上检验以县级行政区域为单位,分辨率较粗,但总体而言,相对其他过程命中率评分较高,却存在两个方面的问题:一是 16 日开始预警偏晚,二是空报、漏报偏大,预报分析中发现降水的偏差、地质灾害气象预警模型高估降水作用以及精细化程度不高都是造成偏差的主要原因。

4 地质灾害成因分析

降水对非饱和土壤边坡稳定的影响机制有比较一致的结论,其影响机制主要体现在两方面:一是降水入渗导致边坡土体饱和度增加,吸力下降,土体抗剪强度降低,进而导致边坡稳定性下降;二是降水在入渗过程中如遇基岩或渗透性突降的土层,会在界

面附近出现滞水层,处于滞水层的土体除吸力会下降外,某些特殊土本身还会因为饱水而产生软化现象,粘聚力和摩擦角等力学参数明显降低,进而抗剪强度降低,导致边坡稳定性下降(杨攀,2014)。本研究基于此,从易发度角度探寻地质灾害的静态不稳定因素,从雨量和陆面过程物理量的角度分析地质灾害动态不稳定因素,总结北京此次降水过程的地质灾害发生条件,为以后的预报提供借鉴。

4.1 北京地质灾害易发度分析

4.1.1 信息量模型

信息量模型属于统计分析模型(朱良峰等,2004),通过某些因素对研究对象提供的信息量大小评价影响因素与研究对象关系的密切程度。本研究所用的易发度是王志等(2018)根据已有地质灾害资料,将反映各种影响因素的观测值转换为反映地质灾害危险性的信息量数值,再计算未知区域的综合信息量。最后对各计算单元的综合信息量进行分级,从而确定北京地质灾害的易发度等级(图 4)。

地质灾害(Y)的产生受多种因素的影响,各种

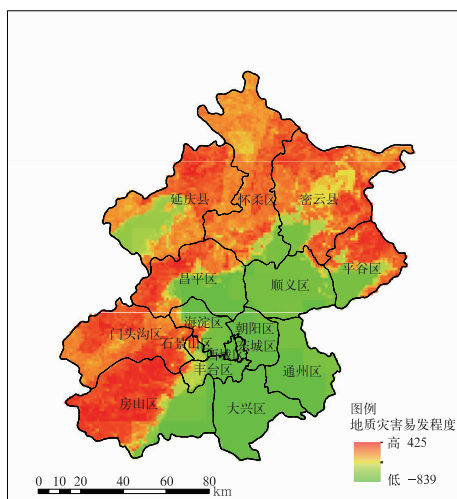


图 4 北京地质灾害易发度分布

Fig. 4 Assessment of susceptibility degree of geological disasters in Beijing

因素的作用大小和性质不同。因此,地质灾害危险性评价需要综合研究区域内地质灾害的影响因素类别和具体状态的组合。地质灾害危险性研究中信息量模型考虑的是一定区域内获取的与灾害相关的所有信息的数量和质量,信息量表示为:

$$I(Y, X_1 X_2 X_3 \cdots X_n) = \ln \frac{P(Y, X_1 X_2 X_3 \cdots X_n)}{P(Y)} \quad (4)$$

式中: $I(Y, X_1 X_2 X_3 \cdots X_n)$ 为各因素 $X_1 X_2 X_3 \cdots X_n$ 综合对地质灾害发生提供的信息量; $P(Y, X_1 X_2 X_3 \cdots X_n)$ 为各因素综合条件下地质灾害发生的概率。

在地质灾害危险性研究中,为了计算方便,通常将总体概率采用样本概率进行估算,一般采用面积比计算信息量,则信息量可以表示为:

$$I(Y, X_i) = \ln \frac{N_i/N}{S_i/S} \quad (5)$$

式中: $I(Y, X_i)$ 为单因素 X_i 的信息量值, Y 为地质灾害事件, X_i 为第 i 个评价因素; S 为研究区总面积; N 为研究区所含有的地质灾害总面积; S_i 为研究区内含有评价因素 X_i 的面积数; N_i 为分布在因素 X_i 内特定类别内的地质灾害面积数。

对于单个评价单元内的总信息量值则根据下式计算:

$$I_{\text{total}} = \sum_i I(Y, X_i) = \sum_i \ln \frac{N_i/N}{S_i/S} \quad (6)$$

式中: I_{total} 为评价单元总的信息量值; n 为参评因子数;其他参数同前。

根据调查与分析,地质灾害的主要影响来源于区域地质、地形条件及降水,同时考虑采用 GIS 进行地质灾害危险性评价所要求的因子容量和可操作性等,确定评价指标为高程、坡度、最大高程差、工程岩性、断层密度及最大小时雨强、强降水出现频率及持续时间等 8 个因子,并对每个因子指标进行分级。

4.1.2 北京地质灾害易发度分布

根据北京易发度结果可知,北京怀柔、密云、延庆、平谷东部和北部、昌平西部和北部、门头沟、房山中西部、丰台西部等地均属于地质灾害中度易发和高度易发区。特别是房山西部、门头沟北部和东部、昌平北部、延庆北部、怀柔中北部、密云北部和东部、平谷北部为地质灾害高易发区。

4.2 北京小时面雨量特征分析

地质灾害的发生与降水时间分布有很大的关系,特别是短时强降水发生的强度分布、维持时间等,直接会影响地质灾害出现的时间。单站的降水不具有区域代表性,本研究对北京区(县)的小时面雨量进行分析,计算的雨量为北京 349 个自动气象站资料。由于站点密度大,直接用区域平均值法计算面雨量,以下所有提到的雨量、雨强均为面雨量的雨量和雨强。

自 7 月 15 日 22 时至 18 日 04 时的 54 h 内,过程面雨量最大的是密云,为 174.2 mm,其次是平谷和顺义,延庆面雨量最小,仅为 37.6 mm;小时面雨量房山最大,为 27.6 mm,出现在 16 日 02 时(表 3)。根据各区面雨量的小时演变(图 5)可以发现,北部的昌平、密云和怀柔有共同的降水特征,即过程降水最大出现在 16 日,且降水有 3 个峰值,分别是 00—07 时、09—13 时、14—21 时,密云、怀柔、平谷在 17 日 09 时还出现了一个峰值。多峰型降水是崩塌发生的直接诱因,为探寻降水的地质灾害发生时间的对应关系,这里将灾点发生时间对比降水时序以分析两者的关系(图 5)。

对发生灾情最多的怀柔进行分析,从雨强-崩塌发生时序图中可以看出,16 日 3 次强降水峰值后对应了 3 次崩塌过程,灾情发生时间分别为降水峰值后的 2 h、1 h、1 h 后发生。17 日地质灾害相对更为频繁,共发生了 8 起,其中 1 起发生于 17 日 09 时面雨量出现一个峰值期,其他崩塌发生于峰值后的 12 h 内。

对所有灾点进行雨量和灾害发生时间的分析

(表 4),主要分析灾前总面雨量、雨强峰值与灾害发生的滞后时间、激发雨强。灾前总面雨量是灾害发生前的总面雨量,从 16 日 20 时开始统计,滞后时间指的是灾害发生时间距离前一个降水峰值的时间差,峰值为面雨量大于 5 mm 以上的值,激发雨量指的是灾害发生时间内的小时面雨量。

从表 4 可以发现,一般灾前总面雨量达到 50 mm 以上发生的灾害,占总灾情的 90%,100 mm

以上降水发生灾情的占 30%,延庆灾前总面雨量最小,为 28.8 mm,平谷初次灾害发生的灾前降水最大,为 90.9 mm。灾害发生都在临近雨强峰值的 15 h 内发生,灾害发生于降水峰值期的仅有 1 例,1~4 h 内的占 52%。另外,从地质灾害发生时的激发雨强来看,仅有一例大于 $10\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$,其他面雨量均小于 $4\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$,可见,对于此次北京地质灾害过程,雨量峰值区并不是灾害发生的高峰时段,而

表 3 2018 年 7 月 15 日 22 时至 18 日 04 时北京区(县)过程面雨量、最大小时面雨量(单位:mm)

Table 3 Area accumulated and the hourly max-precipitation in Beijing from 22:00 BT 15 to 04:00 BT 18 July 2018 (unit: mm)											
雨量	密云	平谷	顺义	怀柔	房山	昌平	门头沟	通州	大兴	延庆	城八区
过程面雨量	174.2	144.0	129.3	116.1	107.6	85.9	82.4	76.0	76.8	37.6	112.8
最大小时面雨量	18.4	14.2	21.4	13.7	27.6	13.0	13.1	12.4	10.3	6.6	21.9

表 4 2018 年 7 月 16—18 日灾点的灾前总面雨量、滞后时间和激发雨量

Table 4 Total area precipitation ahead of disaster, the lag time and triggered areal precipitation of the hazards in Beijing during 16—18 July 2018											
区域灾点及编号	延庆	平谷	密云 1	密云 2	丰台	昌平	房山 1	房山 2	房山 3	房山 4	
灾前降水/mm	28.8	90.9	66.7	125.0	90.4	78.9	53.0	55.2	77.9	94.7	
滞后时间/h	14	12	3	2	1	16	9	13	1	2	
激发雨量/mm	1.2	2.3	0.2	0.1	1.0	1.6	0.1	2.2	3.4	2.3	
区域灾点及编号	房山 5	怀柔 1、2	怀柔 3	怀柔 4	怀柔 5	怀柔 6、7	怀柔 8、9	怀柔 10	怀柔 11	怀柔 12	
灾前降水/mm	108.7	47.8	68.1	87.8	106.9	109.0	109.8	112.3	113.6	116.1	
滞后时间/h	1	3	1	4	0	2	3	6	7	15	
激发雨量/mm	1.2	0.9	1.0	0.1	10.8	0.7	0.8	1.5	1.2	0.1	

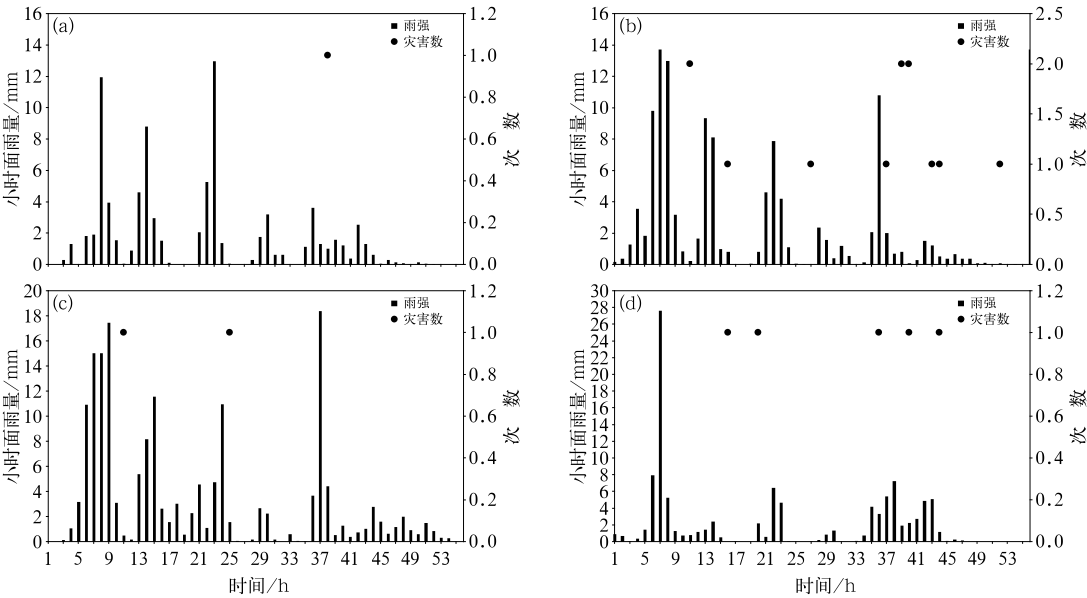


图 5 2018 年 7 月 15 日 21 时至 18 日 04 时昌平(a)、怀柔(b)、密云(c)、房山(d)小时面雨量及地质灾害次数时序图

Fig. 5 Time series of hourly areal precipitation over the districts of Changping (a), Huairou (b), Miyun (c), Fangshan (d) from 21:00 BT 15 to 04:00 BT 18 July 2018

是雨量峰值区结束后十多小时内,是短时预警地质灾害发生的主要时段。

将崩塌发生前的降水持续时间(D)和平均雨强(I)相结合做散点图(图 6),发现有明显的幂函数特征。

分析发现,此次北京强降水过程的地质灾害并不是在雨强最大时发生,而是有一定的滞后时间,滞后 15 h 以内,降水峰值后 1~4 h 发生灾害占一半以上,而发生灾害前的累计面雨量 90% 灾情超过 50 mm,根据雨强和持续时间得到北京此次过程的地质灾害预警阈值曲线。

4.3 模拟水文要素过程变化及致灾成因分析

输入 CREST 水文模型数字高程、流向等的基础资料,结合初始条件、QPE 模拟北京的这次降水过程水文特征,根据模式输出量,对降水造成的陆面特征进行分析。主要分析模型输出的土壤湿度(SM)、流量(R)、坡面流(RS),以反映土体不稳定变化。

土壤含水量在确定边坡是否失稳上起着至关重要的作用,土壤含水增加是土体不稳定基础。图 7 是模拟的 15—18 日土壤湿度,从图中可以发现以下特征,土壤湿度较大值由 15 日的 40%~50% 到 16 日怀柔南部和房山激增到为 60%~70%,17 日土壤湿度 60%~70% 以上的区域扩展到延庆、昌平、房山一线以东,范围明显扩大,18 日大值区继续扩展,北京范围的强度变化不大。16 日降水最强,但土壤湿度大值区范围小,大值区范围较大时间主要为 17 日、18 日,17 日降水较强,地质灾害多发生于 17 日。

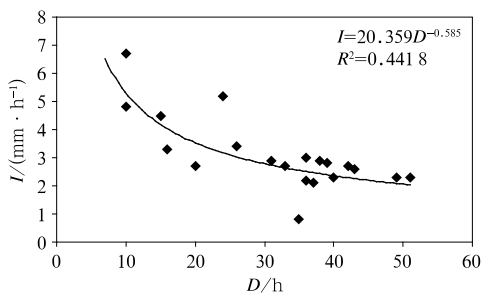


图 6 “7·16”北京降水过程地质灾害平均雨强和降水持续时间散点和回归阈值线

Fig. 6 The scatter diagram of rain average intensity and duration and the regression plot of threshold value during the 16 July rainfall process in Beijing

土壤湿度高值维持时间较长的区域分别是怀柔南部、昌平西部和房山等区(县),地质灾害高易发区叠加,与地质灾害发生区域相一致。

在边坡失稳前,一般会产生一系列裂隙,降水强度大于地表积水点后,产生地表径流,地面汇集的雨水将沿快速通道渗入土体内部,此时的降水入渗远远大于无张拉裂隙的坡面降水入渗,形成了区域汇水入渗,含水量增加,边坡的不稳定性增加(唐正光, 2013)。从流量、坡面径流深来检验土体增加的不稳定程度。从流量的演变特征看(图 8):16 日径流量在怀柔中部出现超过 $40 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,极值更是达到了 $80 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,径流大值区仅在怀柔中部面积小于 125 km^2 ,而在同时刻降水也较强的房山的径流量增幅不大;17 日径流量超过 $20 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 的面积明显扩展到怀柔、密云、昌平等地,大于 $40 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 区域主要分布于怀柔和密云;18 日径流量大值区向东扩展,大于 $40 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 区域分布于密云、顺义、延庆等地,中心值为 $80 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。可以看出,径流量高值区主要影响怀柔、密云、延庆和顺义,而高值区维持时间长的区域主要在怀柔中南部,而怀柔正是此次过程地质灾害发生最多的地区。

坡面流是指由降水或融雪形成的,并在重力作用下沿坡面流动的薄层水流,它是降水量超过土壤入渗和地面洼蓄能力时产生的。坡面水流与一般的明渠水流相比有很多不同之处,受土壤类型、植被覆盖、土地利用类型、降水特征等因素影响。从坡面径流深的演变来看,径流深和流量有相似的变化特征,大于 $20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 在 16 日、17 日出现在怀柔中南部区域,18 日密云南部也出现了,而区域分布特点与流量的大值分布相似(图 9)。

从以上的分析可以发现,北京地质灾害频发时间与 CREST 模拟的 60%~70% 土壤湿度维持时段内再发生较强降水的时间相一致,而发生区域则与地质灾害易发区内模拟土壤湿度大值区维持时间较长区域相一致。流量高值区维持在怀柔中南部,与地质灾害频发区域吻合。总之,土壤相对湿度和流量是分析的重要因素,区域土壤相对湿度较大,且大值维持时间长,加上降水的再次影响,地质灾害在此区域频繁发生。在过程预报中,考虑土壤相对湿度变化量的同时,还要注意流量较大的区域土体的不稳定程度的增加,此时易引发地质灾害。

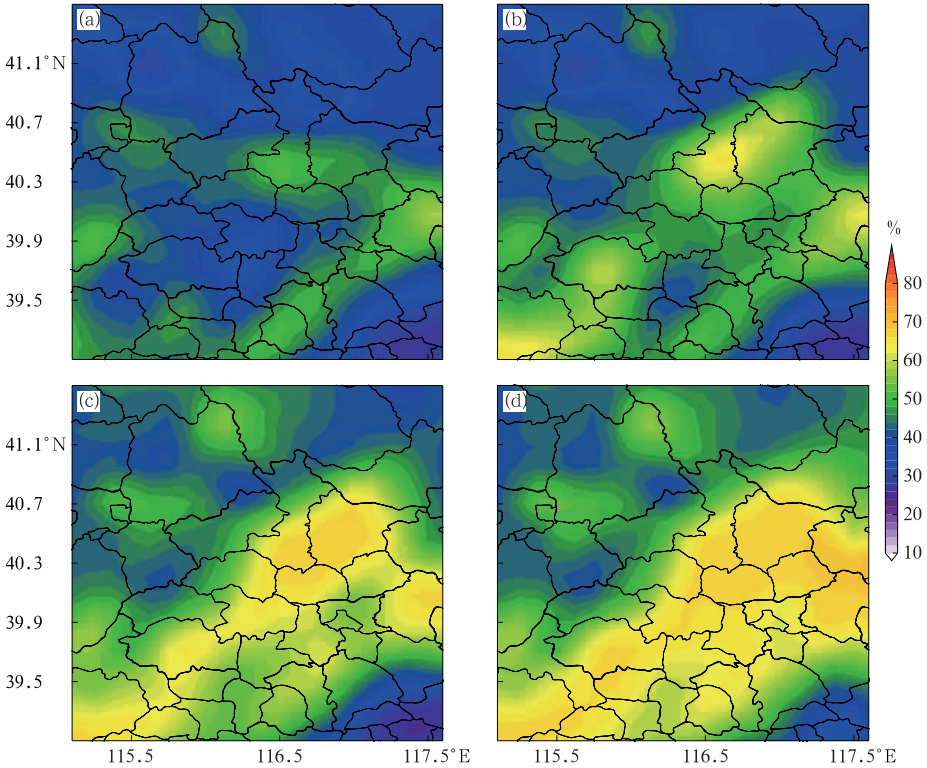


图 7 CREST 水文模型模拟 2018 年 7 月 15 日(a),16 日(b),17 日(c),
18 日(d)北京土壤湿度分布

Fig. 7 CREST simulated soil moisture in Beijing on
15 (a), 16 (b), 17 (c),18 (d) July 2018

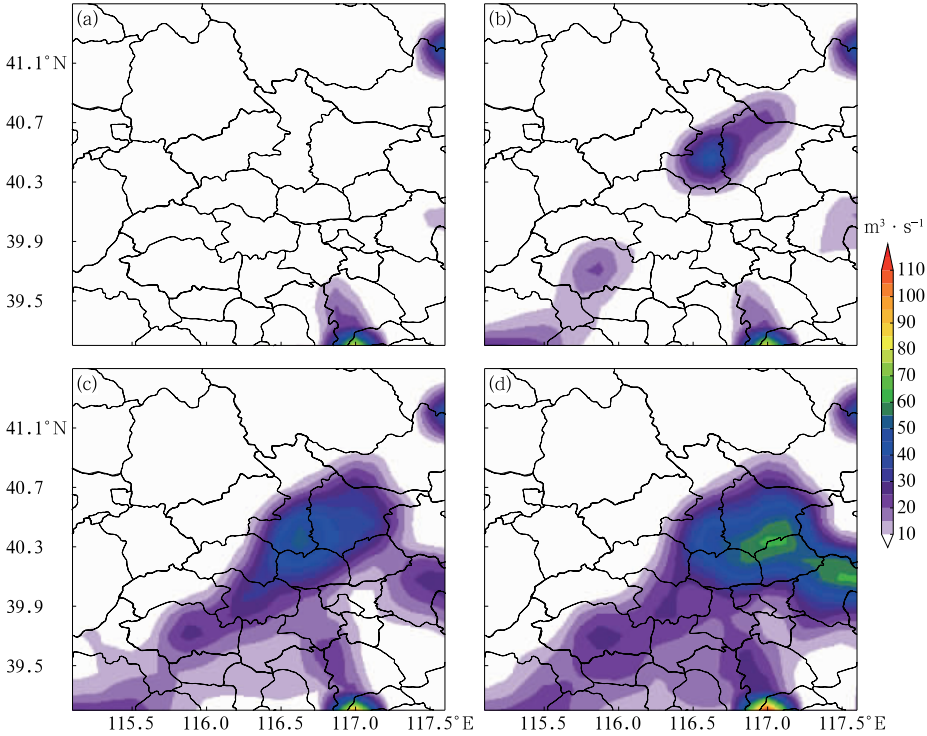


图 8 同图 7,但为径流量

Fig. 8 Same as Fig. 7, but for runoff

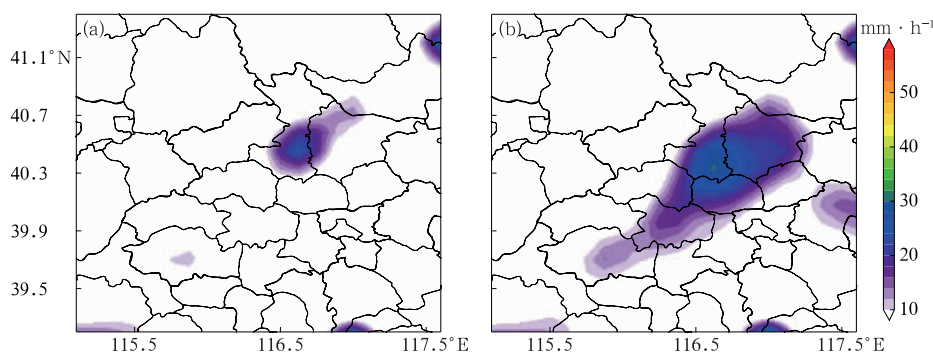


图 9 CREST 水文模型模拟 7 月 16 日(a),17 日(b)北京坡面径流深分布

Fig. 9 CREST simulated depth of overland flow in Beijing on 16 (a), 17 (b) July 2018

5 结论与讨论

“7·16”北京暴雨过程的地质灾害主要出现在怀柔 and 房山,时间集中在 16—17 日,从整个过程的地质灾害气象预警的检验来看,命中率得分较高,但存在两个方面的问题,一是 16 日开始预警偏晚,二是空报、漏报偏大。其主要原因是降水预报的偏差、地质灾害气象模型的偏差以及精细化水平限制。

根据地质灾害易发度显示,北京西部和北部为地质灾害中高易发区。由区(县)面雨量小时演变特征与灾情发生的对应关系可知,降水持续 24 h 后是灾害高发期,累计面雨量达到 50 mm 以上,灾害在临近雨强峰值的 15 h 内发生,根据灾点雨强-降水持续时间的散点拟合得到此次北京降水过程的地质灾害发生的降水阈值,对相似过程有一定的借鉴意义。水文要素的分析表明,此次北京地质灾害频发时间与 CREST 模型模拟的 60%~70%土壤湿度维持时段内较强降水的时间相一致,而发生区域则与地质灾害易发区内模型土壤湿度大值区维持时间较长区域相一致。模型流量高值区主要在怀柔中南部,与地质灾害频发区域吻合。

北京此次降水过程的群发性地质灾害在降水和水文要素上有较明显的特征,如何在预报中找到此类特征,有效地提高预报准确率还要在业务中进行实践。另外,文中对 CREST 水文模型模拟要素使用还是定性的,接下来的研究将进一步释用水文要素预报,将其与地质要素结合,定量确定土体不稳定程度。

参考文献

包红军,张珂,晁丽君,等,2017. 基于水土耦合机制的流域滑坡预报研究[J]. 气象,43(9):1117-1129. Bao H J, Zhang K, Chao L J, et al, 2017. Landslides forecasting using a physically-based,

coupled hydrological-geotechnical framework[J]. Meteor Mon, 43(9):1117-1129(in Chinese).

陈悦丽,陈德辉,李泽椿,等,2016. 降雨型滑坡的集合预报模型及其初步应用的试验研究[J]. 大气科学,40(3):515-527. Chen Y L, Chen D H, Li Z C, et al, 2016. An ensemble prediction model for rainfall-induced landslides and its preliminary application[J]. Chin J Atmos Sci, 40(3):515-527(in Chinese).

何爽爽,汪君,王会军,2018. 基于卫星降水和 WRF 预报降水的“6.18”门头沟泥石流事件的回报检验研究[J]. 大气科学,42(3):590-606. He S S, Wang J, Wang H J, 2018. Hindcast study of “6.18” Mentougou debris-flow event based on satellite rainfall and WRF forecasted rainfall[J]. Chin J Atmos Sci, 42(3):590-606(in Chinese).

黄润秋,2004. 论滑坡预报[J]. 国土资源科技管理,21(6):15-20. Huang R Q, 2004. On time predication of landslide[J]. Sci Technol Manag Land Resour, 21(6):15-20(in Chinese).

廖谦,倪晋仁,曲轶众,等,2000. 阵性泥石流运动与堆积的欧拉-拉格朗日模型—II. 应用[J]. 自然灾害学报,9(4):53-58. Liao Q, Ni J R, Qu Y Z, et al, 2000. An Euler-Lagrangian model for non-continuous flow: application[J]. J Nat Dis, 9(4):53-58(in Chinese).

刘传正,2004. 区域滑坡泥石流灾害预警理论与方法研究[J]. 水文地质工程地质,31(3):1-6. Liu C Z, 2004. Study on the early warning methods of landslide-debris flows[J]. Hydrogeol Eng Geol, 31(3):1-6(in Chinese).

刘传正,2014. 中国崩塌滑坡泥石流灾害成因类型[J]. 地质论评,60(4):858-868. Liu C Z, 2014. Genetic types of landslide and debris flow disasters in China[J]. Geol Rev, 60(4):858-868(in Chinese).

刘传正,刘艳辉,温铭生,等,2009. 中国地质灾害区域预警方法与应用[M]. 北京:地质出版社:12. Liu C Z, Liu Y H, Wen M S, et al, 2009. Regional Warning Method and Application of Geological Hazards in China[M]. Beijing: Beijing, Geological Publishing House:12(in Chinese).

刘艳辉,刘传正,连建发,等,2008. 基于显式统计原理的地质灾害区域预警方法初步研究[J]. 中国地质,35(2):344-350. Liu Y H, Liu C Z, Lian J F, et al, 2008. Method of regional early warning of geohazards based on the explicit statistical theory[J]. Geol China, 35(2):344-350(in Chinese).

彭贵芬,段旭,张杰,等,2008. 云南滑坡泥石流灾害精细化气象预警

- 系统[J]. 气象科技, 36(5): 627-630. Peng G F, Duan X, Zhang J, et al, 2008. Refined weather-based warning system of debris flow disasters for Yunnan Province[J]. Meteor Sci Technol, 36(5): 627-630(in Chinese).
- 沈军, 方琼, 吴贤云, 等, 2017. 湖南古丈山体滑坡影响因子分析[J]. 气象, 43(11): 1410-1419. Shen J, Fang Q, Wu X Y, et al, 2017. Analysis of impact factor of landslide in Guzhang County of Hunan Province[J]. Meteor Mon, 43(11): 1410-1419(in Chinese).
- 唐正光, 2013. 降雨入渗影响因素与滑坡的研究[D]. 昆明: 昆明理工大学: 85-86. Tang Z G, 2013. Research into factors affecting rainfall infiltration and landslide[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology: 85-86(in Chinese).
- 王光谦, 刘大有, 费祥俊, 1991. 泥石流的两相流模型和基本方程[M]//中国博士后论文集(第四集). 北京: 北京大学出版社: 230-239. Wang G Q, Liu D Y, Fei X J, 1991. Conceptual two-phase flow model and basic equation of debris flow[M]//Chinese Postdoctoral Essays (Part 4). Beijing: Peking University Press: 230-239(in Chinese).
- 王海芝, 胡福根, 王晟宇, 等, 2019. 北京市崩塌灾害发生特点及管理模式初探[J]. 城市地质, 14(3): 53-57. Wang H Z, Hu F G, Wang S Y, et al, 2019. Preliminary study on the characteristics and management model of collapse disasters in Beijing[J]. Urban Geol, 14(3): 53-57(in Chinese).
- 王志, 田华, 狄靖月, 等, 2018. 降水引发的中国公路损毁灾害时空变化特征[J]. 气象与环境学报, 34(4): 98-104. Wang Z, Tian H, Di J Y, et al, 2018. Research on the tempo-spatial characteristics of road damage induced by precipitation in China[J]. J Meteor Environ, 34(4): 98-104(in Chinese).
- 徐晶, 张国平, 张芳华, 等, 2007. 基于 Logistic 回归的区域地质灾害综合气象预警模型[J]. 气象, 33(12): 3-8. Xu J, Zhang G P, Zhang F H, et al, 2007. Regional integrated meteorological forecasting and warning model for geological hazards based on Logistic regression[J]. Meteor Mon, 33(12): 3-8(in Chinese).
- 薛建军, 徐晶, 张芳华, 等, 2005. 区域性地质灾害气象预报方法研究[J]. 气象, 31(10): 24-27. Xue J J, Xu J, Zhang F H, et al, 2005. Study on forecast of regional meteorological geognosy disaster[J]. Meteor Mon, 31(10): 24-27(in Chinese).
- 杨攀, 2014. 基于力学模型的非饱和土边坡滑坡预警降雨阈值研究[D]. 北京: 清华大学: 6-10. Yang P, 2014. Research on rainfall thresholds for forecasting unsaturated soil slope failure based on mechanical model[D]. Beijing: Tsinghua University: 6-10(in Chinese).
- 姚学祥, 徐晶, 薛建军, 等, 2005. 基于降水量的全国地质灾害潜势预报模式[J]. 中国地质灾害与防治学报, 16(4): 97-102, 129. Yao X X, Xu J, Xue J J, et al, 2005. A potential forecast model for geological-related disasters based on precipitation[J]. Chin J Geol Hazard Control, 16(4): 97-102, 129(in Chinese).
- 曾裕平, 2009. 重大突发性滑坡灾害预测预报研究[D]. 成都: 成都理工大学. Zeng Y P, 2009. Study on forecast and prediction of large scale and sudden landslide hazard[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology(in Chinese).
- 张国平, 2014. 有效雨量和滑坡泥石流灾害概率模型[J]. 气象, 40(7): 886-890. Zhang G P, 2014. Study on the relation between effective precipitation and landslide/debris-flow with probabilistic model[J]. Meteor Mon, 40(7): 886-890(in Chinese).
- 张国平, 许凤雯, 赵琳娜, 2010. 中国降水型泥石流研究现状[J]. 气象, 36(2): 81-86. Zhang G P, Xu F W, Zhao L N, 2010. Review of the study of rainfall-triggered debris flows[J]. Meteor Mon, 36(2): 81-86(in Chinese).
- 赵衡, 宋二祥, 2011. 诱发区域性滑坡的降雨阈值[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 41(5): 1481-1487. Zhao H, Song E X, 2011. Rainfall thresholds for regional landslides[J]. J Jilin Univ (Earth Sci Ed), 41(5): 1481-1487(in Chinese).
- 朱良峰, 吴信才, 殷坤龙, 等, 2004. 基于信息量模型的中国滑坡灾害风险区划研究[J]. 地球科学与环境学报, 26(3): 52-56. Zhu L F, Wu X C, Yin K L, et al, 2004. Risk zonation of landslide in China based on information content model[J]. J Earth Sci Environ, 26(3): 52-56(in Chinese).
- Corominas J, Moya J, 1999. Reconstructing recent landslide activity in relation to rainfall in the Llobregat River Basin, Eastern Pyrenees, Spain[J]. Geomorphology, 30(1/2): 79-93.
- Dietrich W E, Reiss R, Hsu M L, et al, 1995. A process-based model for colluvial soil depth and shallow landsliding using digital elevation data[J]. Hydrol Process, 9(3/4): 383-400.
- Glade T, Anderson M, Crozier M J, 2005. Landslide Hazard and Risk [M]. Chichester: John Wiley & Sons Ltd: 493-516.
- Guzzetti F, Peruccacci S, Rossi M, et al, 2007. Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe[J]. Meteor Atmos Phys, 98(3/4): 239-267.
- He S S, Wang J, Wang H J, 2019. Projection of landslides in China during the 21st Century under the RCP8. 5 scenario[J]. J Meteor Res, 33(1): 138-148.
- He X G, Hong Y, Vergara H, et al, 2016. Development of a coupled hydrological-geotechnical framework for rainfall-induced landslides prediction[J]. J Hydrol, 543: 395-405.
- Lu N, Godt J, 2008. Infinite slope stability under steady unsaturated seepage conditions[J]. Water Resour Res, 44(11): W11404.
- Ren D D, Leslie L M, Shen X Y, et al, 2015. The gravity environment of Zhouqu Debris flow of August 2010 and its implication for future recurrence[J]. Int J Geosci, 6(4): 317-325.
- Ren D D, Wang J H, Fu R, et al, 2009. Mudslide-caused ecosystem degradation following Wenchuan Earthquake 2008[J]. Geophys Res Lett, 36(5): L05401.
- Wang J H, Hong Y, Li L, et al, 2011. The coupled routing and excess storage (CREST) distributed hydrological model[J]. Hydrol Sci J, 56(1): 84-98.
- Wooten R M, Gillon K A, Witt A C, et al, 2008. Geologic, geomorphic, and meteorological aspects of debris flows triggered by Hurricanes Frances and Ivan during September 2004 in the Southern Appalachian Mountains of Macon County, North Carolina (southeastern USA)[J]. Landslides, 5(1): 31-44.
- Wu W M, Sidle R C, 1995. A distributed slope stability model for steep forested basins[J]. Water Resour Res, 31(8): 2097-2110.
- Zhang K, Xue X W, Hong Y, et al, 2016. iCRESTRIGRS: a coupled modeling system for cascading flood- landslide disaster forecasting[J]. Hydrol Earth Syst Sci, 20(12): 5035-5048.