

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.04-17

北京山区突发性地质灾害易发性评价

罗守敬, 王珊珊, 付德荃
(北京市地质研究所, 北京 100120)

摘要:北京山区地质环境条件复杂,发育大量突发地质灾害隐患,既直接威胁山区村庄、道路、景区的人员及设施的安全,又会对城镇的规划建设构成威胁。通过开展地质灾害易发性评价工作,划分出地质灾害易发区,以评价结果指导城镇建设规划,减轻地质灾害的威胁,这是一项十分重要的工作。文章在阐述北京山区崩塌、滑坡及泥石流突发地质灾害发育情况的基础上,选取了坡度、起伏度、工程地质岩组、地质构造、地貌类型及降水等 6 个影响因子,采用综合信息量模型方法,分别对北京山区斜坡类灾害(崩塌、滑坡)和泥石流灾害的易发性进行评价,并根据“就高不就低”的原则,叠加各灾种的易发性评价结果划分出北京山区突发地质灾害易发性分区图,为城镇建设适宜性评价、编制国土空间规划及完善空间治理提供科学的依据。

关键词:双评价;突发地质灾害;综合信息量模型方法;影响因子;易发性评价

中图分类号: P694 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-8035(2021)04-0126-08

Assessment on the susceptibility of sudden geological hazards in mountainous areas of Beijing

LUO Shoujing, WANG Shanshan, FU Dequan
(Beijing Institute of Geology, Beijing 100120, China)

Abstract: The geological environment conditions of Beijing mountainous area are complex, and there are a lot of sudden geological hazards, which not only directly threaten the safety of people and fundamental facilities, roads and scenic spots in mountainous areas, but also threaten the planning and construction of cities and towns. It is a very important work to divide the geological disaster prone areas by evaluation of geological hazard susceptibility, so as to guide the urban construction planning and reduce the threat of geological disasters with the evaluation results. Based on the description of the sudden geological hazards development of rock fall, landslide, unstable slope and debris flow in Beijing mountainous area, the article selects six influencing factors, including slope, fluctuation, rock group of engineering geological, geological structure, geomorphic type and precipitation, and adopts the method of integrated information model to analyze the susceptibility of slope hazards including rock fall, landslide, unstable slope and debris flow in Beijing mountainous area. Then according to the principle of "high not low", the results of susceptibility of various hazards were superimposed to divide the susceptibility of sudden geological hazards in mountainous areas, which provides scientific basis for the suitability evaluation of urban construction, the compilation of land spatial planning and the improvement of spatial governance.

Keywords: double evaluation; sudden geological hazards; method of integrated information model; influencing factor; susceptibility assessment

0 引言

2019 年 4 月,党中央、国务院印发《关于建立国土

空间规划体系并监督实施的若干意见》(中发[2019]

18 号)明确“国土空间规划是国家空间发展的指南、可

收稿日期: 2020-07-02; 修订日期: 2020-09-01

第一作者: 罗守敬(1984-),男,安徽马鞍山人,硕士,高级工程师,主要从事地质灾害评价及防治研究。E-mail: 27484366@qq.com

持续发展的空间蓝图,是各类开发保护建设活动的基本依据”。资源环境承载能力和国土空间开发适宜性评价(简称“双评价”)则是编制国土空间规划、完善空间治理的基础性工作^[1]。“双评价”工作主要从农业生产、生态保护及城镇建设三个方面来开展评价,上述工作的基础就是资源环境承载能力评价,它是对自然资源禀赋和生态环境本底的综合评价,是在土地资源、水资源、生态系统资源、自然灾害(包括地震、地质、气候灾害)承载能力专项评价的基础上开展的。城镇建设适宜性等级评价,作为“双评价”工作的重要组成部分,适宜性等级受各种因素的影响。北京山区面积约占市辖区总面积的62%,突发性地质灾害发育,所辖16个区中有10个山区发育大量突发性地质灾害,具有点多面广、汛期突发、群发的特点,对城镇建设规划及后续开发利用影响很大。因此,需要先开展地质灾害易发性评价工作,为城镇建设适宜性等级评价和“双评价”工作奠定基础。

基于信息系统技术的发展,当前地质灾害易发性评价的方法主要分为两类:定性评价和定量评价。定性评价主要基于专家经验认知,主观性较强,人为干扰较大;定量评价主要基于统计学,如层次分析法、灰色系统理论、信息量法等,客观性较强^[2-4]。信息量模型方法属于定量评价,其原理清晰,容易建模,评价结果与地质灾害发育的实际情况基本一致,众多国内学者大多利用该方法进行地质灾害易发性评价工作^[5-8]。本文在对北京山区突发地质灾害调查评价资料全面搜集的基础上,根据崩塌、滑坡及泥石流的发育情况和地质环境条件,选取6个影响因子,利用综合信息量模型方法进行信息量计算,基于ArcGIS软件的空间分析功能,分别计算斜坡类灾害及泥石流灾害的易发性。然后根据“就高不就低”的原则,将崩塌、滑坡等斜坡类灾害和泥石流灾害的易发性分区图进行叠加,得到北京山区突发地质灾害易发性分区图,为北京“双评价”工作提供基础数据,为城镇建设适宜性评价结果提供科学的修正依据。

1 突发地质灾害发育概况

北京位于华北平原的西北边缘,总面积 $1.641 \times 10^4 \text{ km}^2$,其中山区占61.4%,平原占38.6%。受地形地质条件复杂、断裂构造发育、降水时空分布不均以及人类工程活动的影响,北京山区发育着较多的崩塌、滑坡和泥石流等突发性地质灾害隐患^[9],威胁着山区人民的生命财产安全。根据北京市突发地质灾害统计台账(2019年)中的数据^[10],北京市域范围内经上报、调查已发现的地质

灾害隐患点共有5037个,其中崩塌2609个,滑坡54个,不稳定斜坡1378个,泥石流901个,地面塌陷95个。其中崩塌、滑坡等斜坡类灾害和泥石流灾害占总数的98.12%,分布在北京的十个山区(图1),崩塌、滑坡及泥石流的易发程度对山区的城镇化建设有着十分重要的影响。

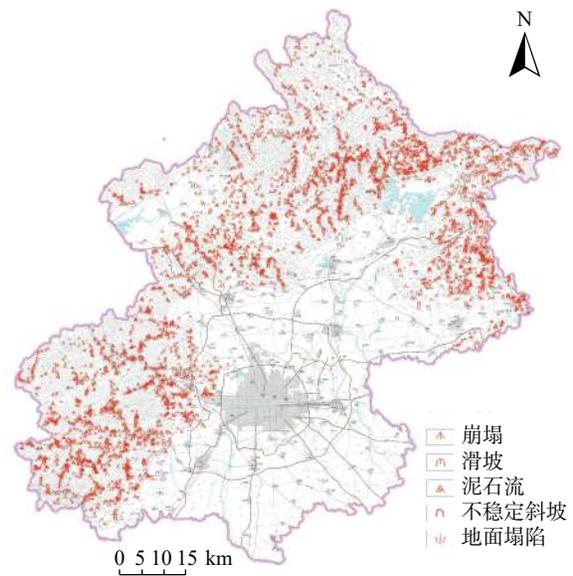


图1 北京山区地质灾害现状分布图

Fig. 1 Distribution of geological hazards in mountainous areas of Beijing

2 地质灾害易发性评价方法

2.1 综合信息量模型方法

地质灾害易发程度是指在一定的地质环境和人类工程活动影响条件下,地质灾害发生可能性的难易程度。地质灾害的发生受多种因素影响,各种因素所起作用的大小和性质是不同的。不同的因素构成各种不同的地质环境,有些因素对地质灾害发生的影响较大,而有些因素则较小。因此,地质灾害的易发程度是各种因子综合作用的结果。信息预测的观点认为,地质灾害的产生与否,与预测过程中所获取的信息的数量和质量有关,是可以信息量来衡量的。信息量值越大,表明地质灾害易发性程度越高^[11]。综合信息模型方法就是—定区域内所获取的与灾害相关的信息的数量和质量^[1],用公式表示为:

$$I_{A_j \rightarrow B} = \ln \frac{N_j/N}{S_j/S} \quad (j = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (1)$$

$I_{A_j \rightarrow B}$ 表示标志 A 在 j 状态显示灾害(B)发生的信息量; N_j 为具有标志 A_j 出现灾害的单元数; N 为内已知

灾害所分布单元的总数; S_j 为标志 A_j 的单元数; S 为单元总数。

由于每个评价单元受多因素综合影响, 各状态因素组合条件下灾害产生的总信息量可按式确定:

$$I = \sum_{i=1}^n \ln \frac{N_i/N}{S_i/S} \quad (2)$$

I 值直接指示该单元产生灾害的可能性, 是灾害易发性划分的关键性指标。

2.2 评价单元的确定

根据北京山区突发地质灾害调查工作的精度和灾害发育分布, 综合考虑“双评价”工作评价单元与计算精度的要求, 将北京山区划分成 $500 \text{ m} \times 500 \text{ m}$ 的评价网格单元, 共划分了 41 957 个网格单元(图 2)。

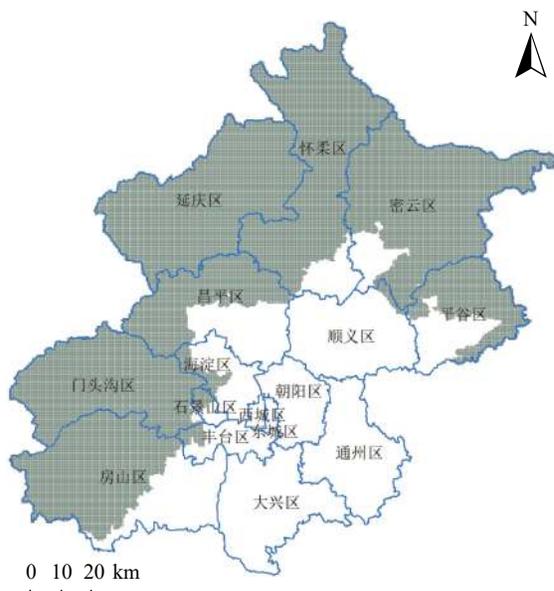


图 2 北京山区地质灾害易发性分区评价网格图

Fig. 2 Evaluation grid of geological hazards prone area in mountainous area of Beijing

2.3 影响因子的选取

根据北京山区突发地质灾害的发育分布规律及地质环境条件, 结合北京突发地质灾害隐患点台账(2019年)、各类地质灾害调查评价及应急调查等成果资料^[12-13], 综合选取影响地质灾害发生、发展的因素作为影响因子。

根据北京市突发地质灾害统计台账(2019年), 北京共发育不稳定斜坡 1 378 个, 依据地质灾害调查技术要求(1:50 000)(DD 2019-08)等规范, 不稳定斜坡不是地质灾害类型, 结合该地区不稳定斜坡灾害形式主要表现为崩塌落石, 本次工作将不稳定斜坡全部归类于崩塌

灾害类型来参与评价及统计。崩塌、滑坡等斜坡类灾害都是因边坡失稳造成的地质灾害。因此选择坡度、起伏度、工程地质岩组、地质构造、地貌类型 5 个影响因子, 作为斜坡类地质灾害易发性评价分区的影响因子^[9,14]。

泥石流的发生一般需要满足三个基本条件: 有力的地形地貌、充足的固体松散物源以及突发性的水动力条件, 三者缺一不可^[15-19]。在北京地区, 泥石流发生的水动力条件主要来自降雨, 因此泥石流灾害的易发性评价需在上述 5 个影响因子的基础上增加降水这个影响因子^[9]。

因此, 本次突发地质灾害易发性评价共计选取了 6 个影响因子, 分别为:

(1) 坡度

坡度表示坡面倾斜程度, 由北京数字高程图形(DEM)即可得到北京山区的地形坡度数据($25 \text{ m} \times 25 \text{ m}$), 地形坡度范围 $0^\circ \sim 80^\circ$ 。依据评价单元网格对地形坡度进行平均计算, 结果分为 $>35^\circ$ 、 $35^\circ \sim 15^\circ$ 和 $<15^\circ$ 三类坡度等级。

(2) 起伏度

地形起伏度是指在限定面积范围内的地表上高程差的最大值, 它可以直观的反映地形起伏特征。综合涂汉明、刘振东等^[20]总结的中国地势起伏度等级及张竞等^[21]总结的京津冀地区地形起伏度等级, 将北京山区的地形起伏度分成 5 类, 即平坦($0 \sim 30 \text{ m}$)、微起伏($30 \sim 70 \text{ m}$)、小起伏($70 \sim 200 \text{ m}$)、中起伏($200 \sim 500 \text{ m}$)及大起伏($500 \sim 1\,000 \text{ m}$)。

(3) 工程地质岩组

北京地层属华北地层分区, 除个别时代地层缺失外, 从太古界的古老变质岩系直到第四系均有出露。根据地层出露情况及工程地质特征, 将北京山区岩土体分为坚硬岩组(如花岗岩、片麻岩等)、较坚硬岩组(如灰岩、白云岩、砂岩等)、较软岩组(页岩、泥岩等)及松散岩组(第四系地层)四类^[22]。

(4) 地质构造

北京山区地质灾害发育分布与地质构造密切相关。地质构造发育地段, 岩体结构相对较破碎, 地质灾害发育数量较多。据统计, 山区沿断裂构造带上各类地质灾害点发育程度明显高于周边区域。根据山区断裂发育分布的实际情况, 按评价网格分布将山区断裂分布情况分为无断裂分布、1 条断裂分布、2 条断裂分布、3 条及以上断裂分布四类^[23-24]。

(5)地貌类型

根据北京地貌图(1:100 000)^[25-26],地貌类型分为山区和平原,其中山区又划分为中山、低山、山间河谷、丘陵、山间湖泊及山间盆地。其中中山、低山是山区最主要的地貌类型,地质灾害相对也较其它地貌类型更发育,其它地貌类型则相对较少。

(6)降水

根据北京年均降水量等值线图,北京主要有两个降雨中心,分别位于密云怀柔南部及房山中东部,这也是历史上北京泥石流灾害较发育的两个地区。根据降水等值线图,将降水划分为>650 mm、650~550 mm、550~450 mm 及<450 mm 四个等级。

3 地质灾害易发性评价

崩塌、滑坡等同属于斜坡类灾害,成因机制相近,故合并评价。而泥石流灾害与斜坡类灾害成因机制不同,因此斜坡类灾害与泥石流灾害的易发性分别进行评价。

3.1 崩塌、滑坡等斜坡类灾害易发性评价

崩塌、滑坡等斜坡类灾害易发性评价选择坡度、起

伏度、工程地质岩组、地质构造及地貌类型 5 个影响因子,结合斜坡类灾害发育情况,采用综合信息量模型方法进行计算评价,各评价因子信息量值见表 1。

之后利用 ArcGIS 的空间分析功能对 5 个评价影响因子图层进行空间叠加分析,利用统计学中的自然断点法(natural break)将易发性区划重新分类后(表 2),生成以信息量大小衡量的山区崩塌、滑坡等斜坡类灾害易发性分区图,并结合北京崩塌滑坡发育分布图及近 20 年统计的已发生的崩塌、滑坡灾害对图件进行局部修正,得出高、中、低易发区(图 3)。

3.2 泥石流灾害易发性评价

泥石流灾害易发性评价选择坡度、起伏度、工程地质岩组、地质构造、地貌类型及降水 6 个影响因子,结合泥石流灾害发育情况,采用综合信息量模型方法进行计算评价,各评价因子信息量值见表 3。

之后利用 ArcGIS 的空间分析功能对 6 个评价因子图层进行空间叠加分析,利用统计学中的自然断点法(natural break)将易发性区划重新分类后(表 4),生成以信息量大小衡量的山区泥石流灾害易发性分区图,综合

表 1 崩塌、滑坡等斜坡类灾害易发性评价各评价因子信息量统计表

Table 1 Statistical table of information quantity of each evaluation factor for the assessment of the susceptibility of rock fall, landslide and unstable slope

评价因子	状态	信息量计算				信息量值	评价因子	状态	信息量计算				信息量值
		N_i	S_i	N	S				N_i	S_i	N	S	
坡度	<15°	658	10 264	3 084	41 957	-0.136 775	地质构造	无断裂分布	2 364	35 489	3 084	41 957	-0.098 450
	15°~35°	2 302	27 693	3 084	41 957	0.123 016		1条断裂分布	532	5 256	3 084	41 957	0.319 936
	>35°	124	4 000	3 084	41 957	-0.863 350		2条断裂分布	134	941	3 084	41 957	0.661 314
	0~30	8	2 514	3 084	41 957	-3.139 771		3条及以上断裂分布	54	271	3 084	41 957	0.997 283
起伏度/m	30~70	120	2 343	3 084	41 957	-0.361 278	中山	249	9 340	3 084	41 957	-1.014 191	
	70~200	1 457	14 085	3 084	41 957	0.341 687	低山	1 756	20 188	3 084	41 957	0.168 368	
	200~500	1 483	22 271	3 084	41 957	-0.098 800	丘陵	796	7 843	3 084	41 957	0.322 640	
	500~1 000	16	744	3 084	41 957	-1.229 034	地貌类型	山间河谷	223	1 146	3 084	41 957	0.973 557
工程地质岩组	坚硬岩组	1 367	18 366	3 084	41 957	0.012 535	山间盆地	0	11	3 084	41 957	0.000 000	
	较坚硬岩组	1 204	17 247	3 084	41 957	-0.051 571	山间湖泊	6	398	3 084	41 957	-1.584 275	
	较软岩组	124	923	3 084	41 957	0.603 070	平原	54	3 031	3 084	41 957	-1.417 246	
	松散岩组	389	5 421	3 084	41 957	-0.024 038							

表 2 崩塌、滑坡等斜坡类灾害易发性分区等级与实际地质灾害分布对比表

Table 2 Comparison between the grade of prone area of rock fall, landslide and unstable slope and the distribution of actual geological hazards

易发程度	信息量值	a/%	c/个	b/%	b/a
高易发区	0.770 977~2.233 424	10.71	1 287	31.85	2.97
中易发区	-0.881 988~0.770 977	56.76	2 589	64.07	1.13
低易发区	-4.983 309~-0.881 988	32.53	165	4.08	0.13

注: 1、a为本类易发性等级的面积占研究区总面积的百分比;b为落在该易发性分区内的灾害占灾害点总数的百分比;c为落在该类易发性分区内的灾害数量。2、上述面积统计不含密云水库的面积。

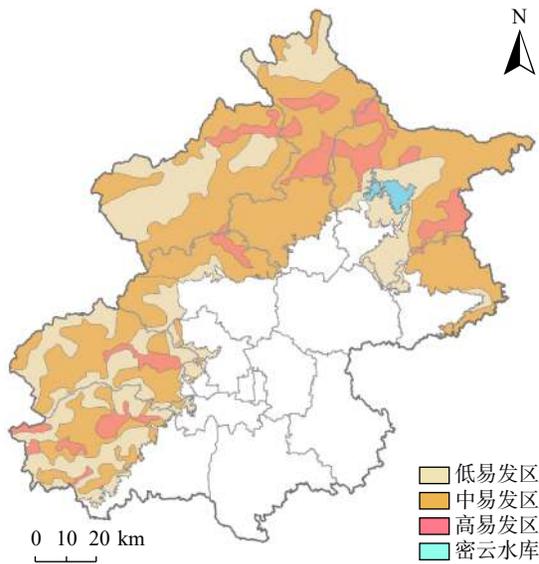


图 3 斜坡类灾害易发性评价结果图

Fig. 3 Assessment of the susceptibility of slope hazards

泥石流沟的分布及历史上已发生的泥石流灾害对图件进行局部修正^[12-13], 得出高、中、低及不易发区(图 4)。

3.3 地质灾害易发性评价分区

依据《资源环境承载能力和国土空间开发适宜性评价技术指南(试行)》、《地质灾害危险性评估规范》(DZ/T 0286-2015)的要求, 当评价区存在两个以上(含两个)灾种时, 应在单一灾种易发评价分区的基础上, 对同一评价区内不同灾种的易发评价结果进行叠加, 按“就高不就低”原则得出多灾种易发评价分区结果。北京山区崩塌、滑坡及泥石流地质灾害易发性分区结果见图 5、表 5, 具体特征如下:

北京山区斜坡类灾害及泥石流灾害易发性分区评价结果为高易发区 10 个, 中易发区 16 个, 低易发区 23 个。其中高易发区面积 2 718.98 km², 区内发育泥石流 606 个, 崩塌 1 879 个, 滑坡 27 个, 地质灾害隐患点密度为 0.92 个/km², 其主要分布在房山区张坊、霞云岭、南窖, 门头沟区妙峰山—雁翅, 昌平区延寿, 延庆区千家店, 怀柔区渤海、怀北、琉璃庙, 密云区石城、冯家峪、不老屯, 平谷区镇罗营、黄松峪等地; 中易发区面积 4 908.23 km², 区内发育泥石流 277 个, 崩塌 1 991 个, 滑

表 3 泥石流灾害易发性评价各评价因子信息量统计表

Table 3 Statistical table of information quantity of each evaluation factor for the assessment of the susceptibility of debris flow

评价因子	状态	信息量计算				信息量值	评价因子	状态	信息量计算				信息量值
		N_i	S_i	N	S				N_i	S_i	N	S	
坡度	<15°	806	10 264	11 379	41 957	-1.239 438	地貌类型	丘陵	892	7 843	11 379	41 957	-0.869 035
	15°~35°	8 771	27 693	11 379	41 957	0.155 146 9		山间河谷	61	1 146	11 379	41 957	-1.628 283
	>35°	1802	4 000	11 379	41 957	0.507 478 5		山间盆地	0	11	11 379	41 957	0.000 000
起伏度	0~30 m	1	2 514	11 379	41 957	-6.524 755	山间湖泊	4	398	11 379	41 957	-3.295 282	
	30~70 m	70	2 343	11 379	41 957	-2.205 816	平原	18	3 031	11 379	41 957	-3.821 4	
	70~200 m	2 650	14 085	11 379	41 957	-0.365 675	无断裂分布	9 308	35 489	11 379	41 957	-0.033 473	
工程地质岩组	200~500 m	8 320	22 271	11 379	41 957	0.320 252 6	1条断裂分布	1 661	5 256	11 379	41 957	0.152 925 3	
	500~1 000 m	338	744	11 379	41 957	0.515 880 6	2条断裂分布	323	941	11 379	41 957	0.235 584 9	
	坚硬岩组	6 108	18 366	11 379	41 957	0.203 974	3条及以上断裂分布	87	271	11 379	41 957	0.168 665	
地貌类型	较坚硬岩组	4 718	17 247	11 379	41 957	0.008 622 5	降水	>650 mm	3 275	8 431	11 379	41 957	0.359 278 2
	较软岩组	418	923	11 379	41 957	0.512 727 9	650~550 mm	5 730	18 002	11 379	41 957	0.160 108 4	
	松散岩组	135	5 421	11 379	41 957	-2.387 885	550~450 mm	2 072	12 880	11 379	41 957	-0.522 286	
地貌类型	中山	4 056	9 340	11 379	41 957	0.470 766 7	<450 mm	302	2 644	11 379	41 957	-0.864 745	
	低山	6 348	20 188	11 379	41 957	0.147 927 2							

表 4 泥石流灾害易发性分区等级与实际地质灾害分布对比表

Table 4 Comparison between the grade of prone area of debris flow and the distribution of actual geological hazards

易发程度	信息量值	a/%	c/个	b/%	b/a
高易发区	1.120 6~2.124 3	20.99	565	62.71	2.99
中易发区	-0.145 3~1.120 6	26.80	276	30.63	1.14
低易发区	-3.332 9~-0.145 3	46.63	60	6.66	0.14
不易发区	-14.871 7~-3.332 9	5.58	-	-	-

注: 1、a为本类易发性等级的面积占研究区总面积的百分比; b为落在该易发性分区内的灾害占灾害点总数的百分比; c为落在该类易发性分区内的灾害数量。2、上述面积统计不含密云水库的面积。

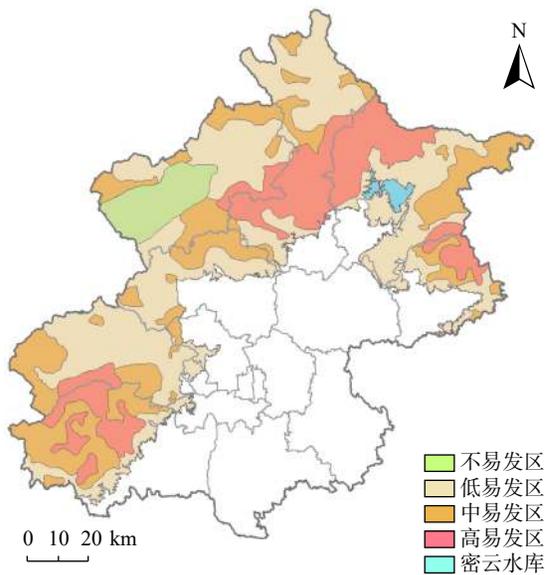


图4 泥石流灾害易发性评价结果图

Fig. 4 Assessment of the susceptibility of debris flow

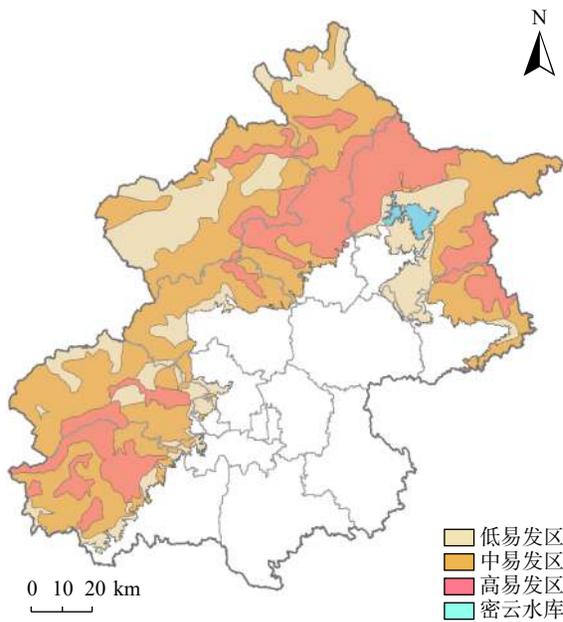


图5 北京山区斜坡类灾害及泥石流灾害易发性评价结果图

Fig. 5 Assessment of the susceptibility of slope failure and debris flow in mountainous areas of Beijing

表5 北京山区斜坡类灾害及泥石流灾害易发性分区统计表

Table 5 Statistical table of debris flow prone areas in mountainous areas of Beijing

易发性	高易发区	中易发区	低易发区
面积/km ²	2 718.98	4 908.23	2 348.03
比例/%	27.26	49.20	23.54
地质灾害隐患点数量/个	2 512	2 293	137
地质灾害隐患点密度/(个·km ⁻²)	0.92	0.47	0.06

备注:上述面积统计不含密云水库的面积。

坡 25 个,地质灾害隐患点密度为 0.47 个/km²,其主要分布在房山区十渡、蒲洼、佛子庄、河北镇,门头沟区清水—雁翅,昌平区流村—延寿,延庆区张山营、千家店、八达岭—四海,怀柔区琉璃庙—长哨营,密云区古北口、新城子—大城子,平谷区大华山、熊儿寨、金海湖等地;低易发区面积 2 348.03 km²,区内发育泥石流 18 个,崩塌 117 个,滑坡 2 个,地质灾害隐患点密度为 0.06 个/km²,其主要分布在怀柔区喇叭沟门,门头沟区雁翅—斋堂北部,延庆盆地,密云高岭、太师屯、穆家峪及昌平区、海淀区、丰台区、石景山区等山前地区。

3.4 易发性分区结果分析

对比本次易发区评价分区的结果与地质灾害实际分布、发生情况,本次易发性分区等级与实际地质灾害发生情况有着很好的相关性,95% 以上崩塌、滑坡灾害发生在斜坡类灾害高易发区及中易发区;泥石流灾害及隐患的分布也与泥石流易发区等级基本对应。同时本次评价结果与 2014 年、2017 年采用地质灾害综合指数法评价的易发性分区成果整体上基本一致。因此本次易发性评价分区结果比较理想,符合北京山区突发地质灾害发育的实际情况。

4 结论及建议

(1)在搜集前人地质灾害调查评价资料及分析地质灾害发育情况及分布规律的基础上,选取了坡度、起伏度、工程地质岩组、地质构造、地貌类型及降水 6 个影响因子,采用综合信息量模型方法对北京山区崩塌、滑坡等斜坡类灾害及泥石流灾害分别进行了地质灾害易发性评价,并按“就高不就低”原则得出北京山区斜坡类灾害及泥石流灾害易发评价分区结果。

(2)泥石流灾害在图面上以流域的形式存在,因此在易发性评价时地质灾害点的确定不能与斜坡类灾害一样用点来表示,不能以沟口位置来代替整个泥石流灾害,应以流域及评价网格分布综合确定。

(3)北京山区斜坡类灾害及泥石流灾害易发性评价结果与地质灾害实际发生、以往易发性分区成果基本一致,反映了本次分区结果的合理性和可靠性。

(4)本次评价工作为区域性的评价,可作为在山区开展工程建设和地质灾害防治工作的参考,如在地质灾害易发区开展工程建设,还需要进一步开展地质灾害危险性评估、地质灾害勘查等详细的评价工作。

参考文献 (References) :

[1] 自然资源部. 资源环境承载能力和国土空间开发适宜性

- 评价技术指南(试行)[S]. 2020. [Ministry Of Natural Resources of the People's Republic of China. Technical guide for assessment of resources and environment carrying capacity and suitability of land and space development (Trial)[S]. 2019. (in Chinese)]
- [2] 赵帅, 赵洲. 基于信息量模型的地质灾害易发性评价 [J]. 水力发电, 2019, 45(3): 27-32. [ZHAO Shuai, ZHAO Zhou. Geological hazard risk assessment based on information quantity model [J]. Water Power, 2019, 45(3): 27-32. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 崔志超, 王俊豪, 崔传峰, 等. 基于层次分析法和模糊数学相结合的甘肃东乡八丹沟泥石流易发性评价 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(1): 44-50. [CUI Zhichao, WANG Junhao, CUI Chuanfeng, et al. Evaluation of the susceptibility of debris flow in Badan Gully of Dongxiang County of Gansu based on AHP and Fuzzy mathematics [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(1): 44-50. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 孙长明, 马润勇, 尚合欣, 等. 基于滑坡分类的西安市滑坡易发性评价 [J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(3): 173-181. [SUN Changming, MA Runyong, SHANG Hexin, et al. Landslide susceptibility assessment in Xining based on landslide classification [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(3): 173-181. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 张以晨, 秦胜伍, 翟健健, 等. 基于信息量的长白山地区泥石流易发性评价 [J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(2): 150-158. [ZHANG Yichen, QIN Shengwu, ZHAI Jianjian, et al. Susceptibility assessment of debris flow based on GIS and weight information for the Changbai mountain area [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45(2): 150-158. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 樊芷吟, 苟晓峰, 秦明月, 等. 基于信息量模型与 Logistic 回归模型耦合的地质灾害易发性评价 [J]. 工程地质学报, 2018, 26(2): 340-347. [FAN Zhiyin, GOU Xiaofeng, QIN Mingyue, et al. Information and logistic regression models based coupling analysis for susceptibility of geological hazards [J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(2): 340-347. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 张波, 石长柏, 肖志勇, 等. 基于 GIS 和加权信息量的湖北鄂州地质灾害易发性区划 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2018, 29(3): 101-107. [ZHANG Bo, SHI Changbo, XIAO Zhiyong, et al. Geologic hazards susceptibility assessment in Ezhou City of Hubei Province based on GIS and weighted information value [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2018, 29(3): 101-107. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 王雷, 吴君平, 赵冰雪, 等. 基于 GIS 和信息量模型的安徽池州地质灾害易发性评价 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(3): 96-103. [WANG Lei, WU Junping, ZHAO Bingxue, et al. Susceptibility assessment of geohazards in Chizhou City of Anhui Province based on GIS and informative model [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(3): 96-103. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 北京地质矿产勘查院. 北京“双评价”地质灾害专项评价报告[R]. 2019. [Beijing Geology Prospecting Institute. Special evaluation report on "double evaluation" geological hazards in Beijing[R]. 2019. (in Chinese)]
- [10] 北京规划和自然资源委员会. 北京地质灾害统计台账[G]. 2019. [Beijing Municipal Commission of Planning and Natural Resources. Beijing geological disaster statistics account [G]. 2019. (in Chinese)]
- [11] 彭珂, 彭红霞, 梁峰, 等. 基于信息量模型的赣州市地质灾害易发性分区 [J]. 安全与环境工程, 2018, 25(5): 22-28. [PENG Ke, PENG Hongxia, LIANG Feng, et al. Susceptibility zoning of geo-hazards in Ganzhou City based on the information model [J]. Safety and Environmental Engineering, 2018, 25(5): 22-28. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 北京水文地质工程地质大队, 北京地质研究所. 北京北山地区泥石流灾害勘查及其防治方案研究报告[R]. 1993. [Beijing Institute of Hydrogeology and Engineering Geology, Beijing Institute of Geology. Hazard investigation and control report of debris flow disaster in Beishan area of Beijing[R]. 1993. (in Chinese)]
- [13] 北京地质研究所. 北京门头沟区清水河流域泥石流灾害勘查报告[R]. 1995. [Beijing Institute of Geology. Hazard investigation report for debris flow at Qingshui river watershed in mentougou district of Beijing[R]. 1995. (in Chinese)]
- [14] 闫举生, 谭建民. 基于不同因子分级法的滑坡易发性评价——以湖北远安县为例 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(1): 52-60. [YAN Jusheng, TAN Jianmin. Landslide susceptibility assessment based on different factor classification methods: A case study in Yuan'an County of Hubei Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(1): 52-60. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 罗守敬, 张国华. 北京月玉沟潜在泥石流特征及其动力学指标 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2016, 27(1): 44-48. [LUO Shoujing, ZHANG Guohua. Exploration and analysis of movement condition of Yueyugou potential debris flow [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2016, 27(1): 44-48. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 曹鹏, 侯圣山, 陈亮, 等. 基于数值模拟的群发性泥石流

- 危险性评价:以甘肃岷县麻路河流域为例 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(2): 100-109. [CAO Peng, HOU Shengshan, CHEN Liang, et al. Risk assessment of mass debris flow based on numerical simulation: An example from the Malu River basin in Min County [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(2): 100-109. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 李晓婷, 刘文龙. 模糊综合评判法在甘肃陇南武都区石门乡泥石流危险性评价中的应用 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(4): 71-76. [LI Xiaoting, LIU Wenlong. Application of fuzzy comprehensive evaluation method to debris flow risk evaluation in Shimen Township in Wudu District of Longnan City, Gansu Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(4): 71-76. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 刘佳, 赵海军, 马凤山, 等. 基于改进变异系数法的G109拉萨—那曲段泥石流危险性评价 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(4): 63-70. [LIU Jia, ZHAO Haijun, MA Fengshan, et al. Risk assessment of G109 Lhasa-Naqui Debris flow based on improved coefficient of variation [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(4): 63-70. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 张书豪, 吴光, 张乔, 等. 基于子流域特征的泥石流泥石流易发性评价 [J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(2): 142-149. [ZHANG Shuhao, WU Guang, ZHANG Qiao, et al. Debris-flow susceptibility assessment using the characteristic factors of a catchment [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45(2): 142-149. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 涂汉明, 刘振东. 中国地势起伏度研究 [J]. 测绘学报, 1991, 20(4): 311-319. [TU Hanming, LIU Zhendong. Study on relief amplitude in China [J]. Acta Geodetica et Cartographic Sinica, 1991, 20(4): 311-319. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 张竞, 杜东, 白耀楠, 等. 基于DEM的京津冀地区地形起伏度分析 [J]. 中国水土保持, 2018(9): 33-37. [ZHANG Jing, DU Dong, BAI Yaonan, et al. Terrain fluctuation analysis of Beijing-Tianjin-Hebei area based on DEM [J]. Soil and Water Conservation in China, 2018(9): 33-37. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 工程地质手册编委会. 工程地质手册(第四版): [M]. 北京: 2006. [Editorial Committee of Engineering Geology Manual. Geological Engineering Handbook (the 4th edition): [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2006. (in Chinese)]
- [23] 北京地质研究所. 北京突发地质灾害详细调查报告(1:50000)[R]. 2014. [Beijing Institute of Geology. The detailed investigation report for sudden geological disasters of Beijing(1:50000) [R]. 2014. (in Chinese)]
- [24] 郭学飞, 王志一, 焦润成, 等. 基于层次分析法的北京市地质环境质量综合评价 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(1): 70-76. [GUO Xuefei, WANG Zhiyi, JIAO Runcheng, et al. Comprehensive evaluation method of geological environment quality in Beijing based on AHP [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(1): 70-76. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 北京地质研究所. 北京地貌图(1:100000)编制说明书[R]. 2017. [Beijing Institute of Geology. Compilation specification of Beijing geomorphologic map (1:100000)[R]. 2017. (in Chinese)]
- [26] 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)]