

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2023.06.12

引用格式: 巩书华,李少青,王焕银,等. 湖南张家界市永定区地质灾害发育规律及易发性评价研究[J]. 中国地质调查,2023,10(6): 101-110. (Gong S H, Li S Q, Wang H Y, et al. Research on the development law and susceptibility evaluation of geological disasters in Yongding District of Zhangjiajie City in Hunan Province [J]. Geological Survey of China, 2023, 10(6): 101-110.)

湖南张家界市永定区地质灾害发育规律及易发性评价研究

巩书华^{1,2}, 李少青³, 王焕银³, 王克营^{1,2}, 蔡宁波^{1,2}, 杜江^{1,2}

(1. 湖南省地球物理地球化学调查所, 湖南长沙 410114; 2. 湖南省地质新能源勘探开发工程技术研究中心, 湖南长沙 410114; 3. 张家界市永定区自然资源局, 湖南张家界 427000)

摘要: 张家界市复杂的地质构造背景造就了独特的地貌景观,同时存在众多地质灾害隐患。通过分析张家界市永定区2014年至2022年详细的地质灾害调查资料,对区内地质灾害发育规律及易发性进行研究。结果表明:区内地质灾害类型以滑坡为主,地质灾害空间分布以中部断层发育区与东北部页岩地层区最多,时间分布相对集中在5、6、7月雨季;区内地质灾害与地形地貌、岩土体类型、构造活动密切相关,并受降雨及人类工程活动影响;在碎屑岩丘陵地貌中灾害点密度最高;在志留系砂质页岩岩组中地质灾害最易发;受构造影响明显,断褶构造带处灾害点密集;灾害高发期与雨季耦合,诱发因素主要是降雨;不合理地切坡建房、道路建设工程活动加剧地质灾害的发生。采用易发程度指数法,基于ArcGIS信息统计分析,将全区地质灾害易发程度划分为高易发区、中易发区与低易发区。研究可为永定区国土空间规划、地质灾害防治、旅游路线及重大工程建设规划提供指导。

关键词: 地质灾害; 孕灾条件; 发育规律; 易发性; 张家界

中图分类号: P694

文献标志码: A

文章编号: 2095-8706(2023)06-0101-10

0 引言

地质灾害是由内因和外因共同作用影响下使地质环境恶化,并造成生命财产损失或资源环境破坏的灾害事件。内因主要包括地形地貌、岩土体类型、构造活动等;外因包括降雨、地震等自然因素以及人类工程活动等诱发因素^[1]。近年来,地质灾害发生频率与强度不断增大,严重威胁了人民生命财产安全,也制约了社会的可持续发展^[2-3]。随着地质灾害危害性受到越来越多关注,各国学者对地质灾害发育规律及评价方法的研究工作也逐渐深入,针对不同地貌单元、不同地质灾害类型以及不同易发性及风险性评价模型与方法均有较多研究。如徐伟等^[4]对西南红层地区地质灾害发育规

律与成灾模式进行了总结分析;张殿发等^[5]分析了贵州喀斯特地貌地质灾害形成环境;方琼等^[6]研究了湖南省地貌与地质灾害影响关系。传统地质灾害易发性与风险性评价方法主要有信息量法^[7]、逻辑回归法^[8]、频率比和证据权法^[9]、层次分析法^[10]等。近年来,有学者提出不同方法模型组合评价,如确定性系数和逻辑回归的组合模型^[11]、信息量法与遗传法融合模型^[12]、模糊层次分析法与熵权法的主客观赋权模型^[13],提升了易发性评价的精准度。

湘西北张家界市为著名的旅游城市,复杂的地质构造背景造就了绝美的地貌景观,但也存在着众多地质灾害隐患,加之新构造运动、澧水等河流侵蚀等内外地质作用影响,突发性地质灾害易发。以往研究多注重景区等特定范围的地质灾害发育规律分析^[14-15],缺乏对全区的灾害发育特征研究。

收稿日期: 2022-11-07; 修订日期: 2023-10-26。

基金项目: 湖南省自然资源厅“湖南省张家界市永定区1:10 000地质灾害调查和风险评价(编号:湘地调[2022]67)”项目资助。

第一作者简介: 巩书华(1988—),男,高级工程师,主要从事水工环地质调查研究工作。Email: shuhua.gong@qq.com。

质灾害数量占灾害点总数的 89%(图 2)。这 3 个月是研究区每年降雨时间最长、累积降雨量最大的时期,说明降雨是本区地质灾害发生的关键诱发动力。降雨量达到一定量值后,会诱发大量的突发性地质灾害,暴雨来临时要注意区域性的群发地质灾害防治。

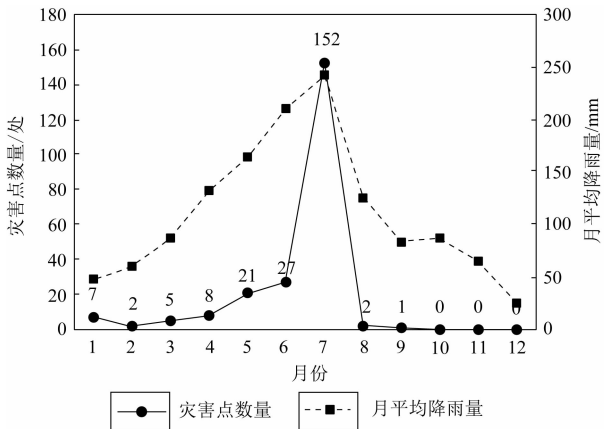


图 2 永定区各月份地质灾害频数

Fig. 2 Frequency of geological disasters in Yongding District by month

3 孕灾地质条件特征

3.1 地形地貌

研究区地貌单元,根据地貌成因、形态、海拔高度和相对切割深度,大体可划分为侵蚀堆积地貌、侵蚀构造地貌、剥蚀构造地貌以及溶蚀构造地貌 4 个大类 8 个亚类(表 1)。不同的地貌单元在斜坡类型、坡高、坡度等微地貌特征上有一定差别,发生的地质灾害类型、数量、规模也不同^[18-19]。统计显示:滑坡、崩塌及不稳定斜坡在各个地貌单元均有发育;泥石流主要分布在具有宽阔的汇水区、丰富物源和合适地形因子(沟谷纵比降与坡度)的碎屑岩低山与丘陵洼地地貌中;地面塌陷主要分布在溶蚀构造地貌中,基本为岩溶塌陷。区内地貌单元与灾害数量及密度的相关分析显示,地质灾害发育密度最高的为碎屑岩丘陵,达到 36.61 处/100 km²,其次为丘陵洼地、碎屑岩低山和红层低丘陵地。

表 1 永定区地质灾害分布统计

成因形态类型		地层岩性	分布面积		地质灾害		
			面积/km ²	百分比/%	数量/处	百分比/%	密度/(处·100 km ⁻²)
侵蚀堆积地貌		第四系黏土、砂土、砂砾层等	87.25	4.27	12	2.88	13.75
侵蚀构造地貌	碎屑岩低山	下志留统一志留统砂页岩	556.08	13.48	126	30.22	22.66
	红层低山	白垩系砂岩	141.90	3.97	14	3.36	9.87
	浅变质岩低山	五强溪组变质长石石英砂岩、板岩	174.51	5.09	13	3.12	7.45
剥蚀构造地貌	红层低丘陵地	白垩系砂岩、砾岩、砂砾岩等	23.01	0.71	5	1.20	21.73
	碎屑岩丘陵	奥陶系—志留系砂页岩	325.06	10.06	119	28.54	36.61
溶蚀构造地貌	中山台地溶丘洼地	寒武系—奥陶系中厚层状灰岩、白云岩	101.13	3.48	7	1.68	6.92
	低山峰丛洼地	寒武系—奥陶系灰岩、白云质灰岩、泥灰岩等	192.62	6.87	14	3.36	7.27
	丘陵洼地	石炭系—二叠系白云质灰岩、灰岩	443.16	16.96	107	25.66	24.14

地形坡度是影响地质灾害发生的重要因素^[20],通过将研究区地形坡度按区间进行划分统计,发现区内 68% 以上的地质灾害分布在[25°,45°)之间,其中以[25°,35°)区间最多,占比为 41.67%(表 2)。针对单一灾种,滑坡、不稳定斜坡在各个坡度区间均有分布,在[20°,45°)地形坡度间数量较集中,此类土质滑坡的坡度集中区间在其他研究中有证实^[21];崩塌坡度范围为 60°以上,且发育较少,以岩质崩塌为主,集中在低山区;泥石流集中在主沟纵坡坡度为[20°,60°)区间,这主要是因为区内泥石流大多是沟谷型,若沟谷纵坡坡度较小,则泥石

流无势能到动能的转换,泥石流运动会停滞,反之,坡度较大,则泥石流能量转换大,运移速度快,在地形上,流程一般较短,汇水面积不大。

表 2 永定区地质灾害与坡度统计

Yongding District						
坡度区间	灾害数量/处	比例/%	滑坡/处	崩塌/处	泥石流/处	地面塌陷/处
[0°,25°)	16	9.52	15	0	0	1
[25°,35°)	70	41.67	66	2	2	0
[35°,45°)	44	26.19	43	0	1	0
[45°,55°)	23	13.69	23	0	0	0
≥55°	15	8.93	11	4	0	0

3.2 岩土体类型

岩土体是各类地质灾害形成的物质基础,其类型特征关系着地质灾害的发生几率和发育时长^[22]。通过分析研究区岩土体类型与地质灾害分布关系(图3)发现:区内滑坡主要发生在碎屑岩类中,在志留系粉砂质页岩、页岩、粉砂岩半坚硬-坚硬岩组中分布最多,灾害点密度最大;崩塌在灰

岩、白云岩夹泥质灰岩半坚硬-坚硬岩组中分布最多,灾害点密度最大;泥石流在粉砂质页岩、页岩、粉砂岩半坚硬-坚硬岩组中分布最多,灾害点密度最大。上述3个岩组为研究区主要易崩滑滑工程地质岩组,其中以志留系砂质页岩岩组中地质灾害最易发,地面塌陷仅在区内碳酸盐岩岩组中有少量分布。

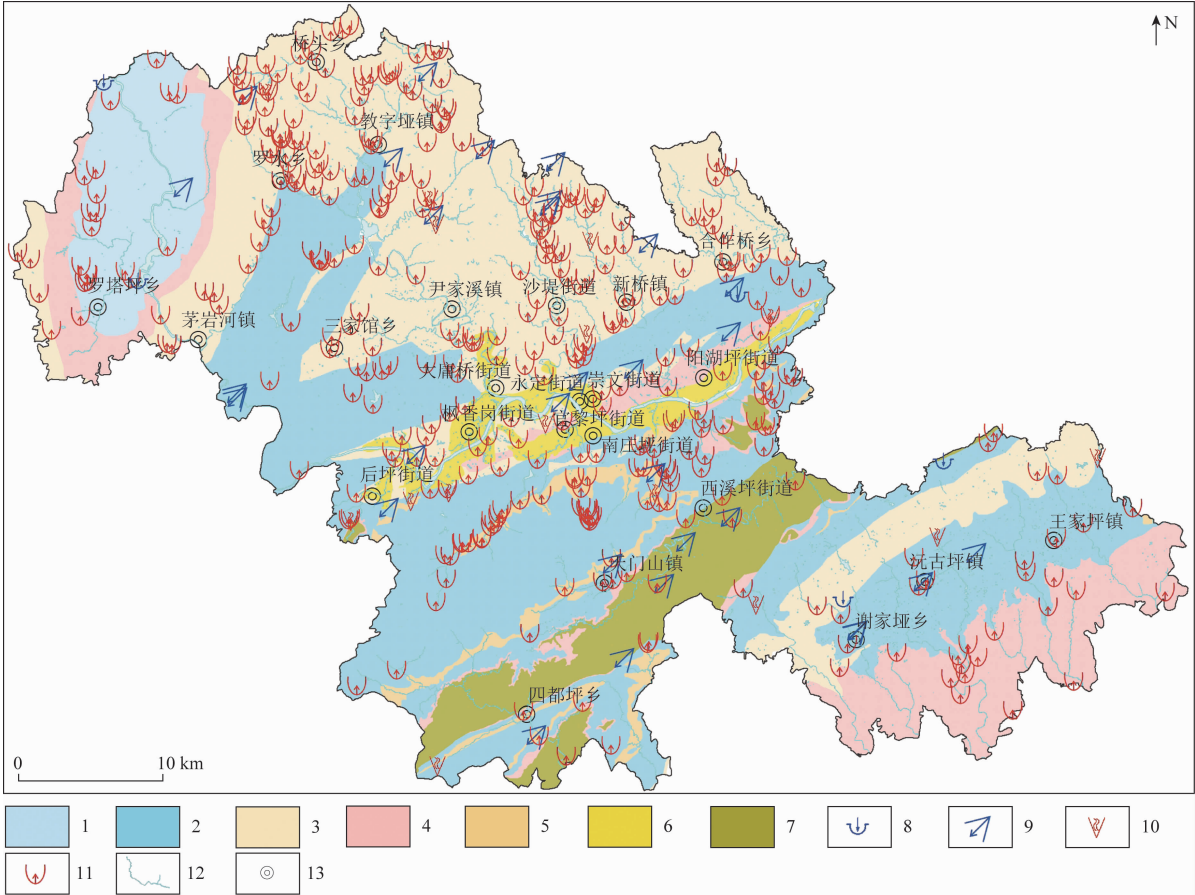


图3 永定区岩土体类型与地质灾害分布关系

Fig.3 Relationship between rock mass types and geological hazard distribution in Yongding District

3.3 构造活动

永定区经历多期构造运动,新构造运动也较为强烈,整体形成 NE—NNE 向断褶构造格局^[23-24]。构造对区内地质灾害分布的影响表现为,邻近大型褶皱与断裂带,灾害点密度明显增大,距离断裂褶皱构造 1 km 范围以内的地质灾害点数量占总数的 55.98%,其中断裂构造附近灾害点数量占总数的 39.23%,褶皱构造附近灾害点数量占总数的

16.75%(图4)。断裂周边分布较多的是滑坡和不稳定斜坡,灾害点沿断裂构造带两侧分布,这主要是由于断层沿走向易形成临空面及沟谷,可为滑坡等地质灾害的发生提供条件。褶皱附近同样以滑坡及不稳定斜坡最为发育,且在顺向坡易形成顺层滑坡,逆向坡则多形成崩塌。此外,由于背斜核部和两翼产生的节理裂隙较向斜多,岩石破碎程度较向斜大,导致背斜分布的地质灾害数量也比向斜略多(图5)。

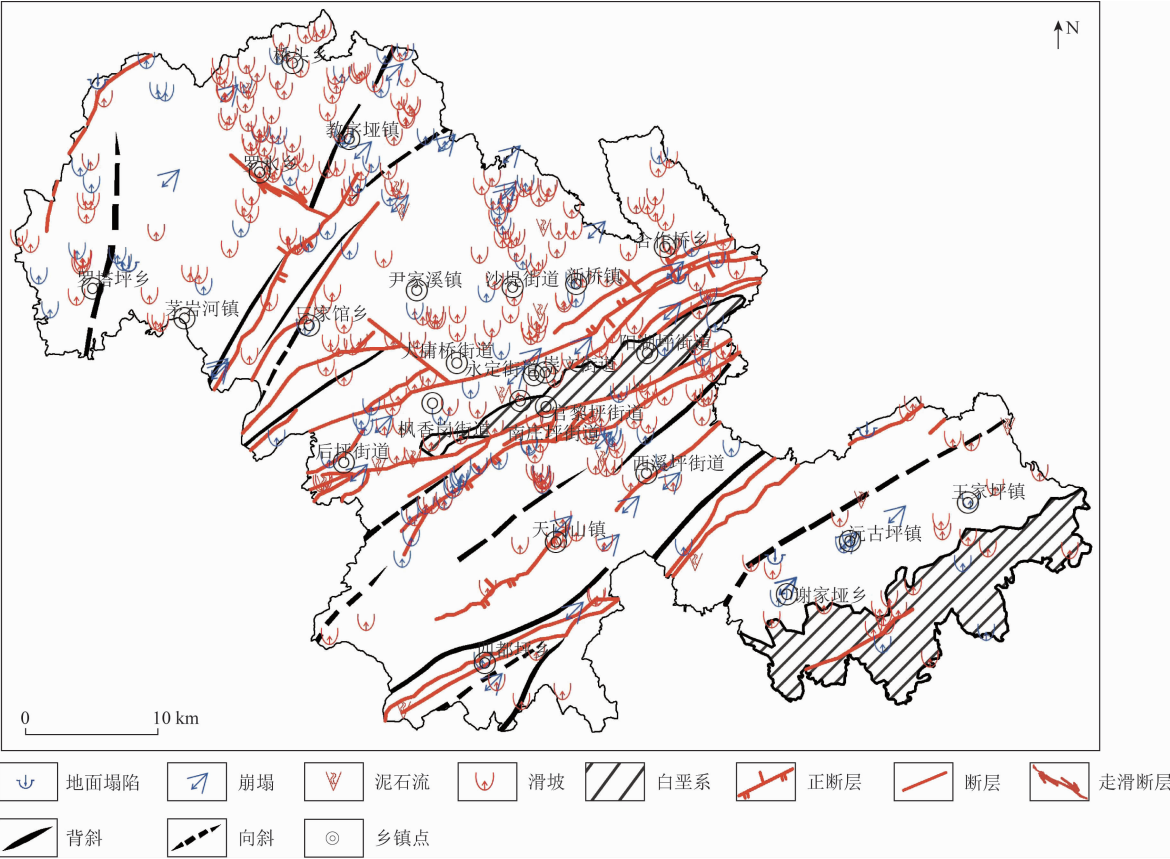


图4 永定区地质构造与地质灾害分布关系

Fig. 4 Relationship between geological structures and geological disaster distribution

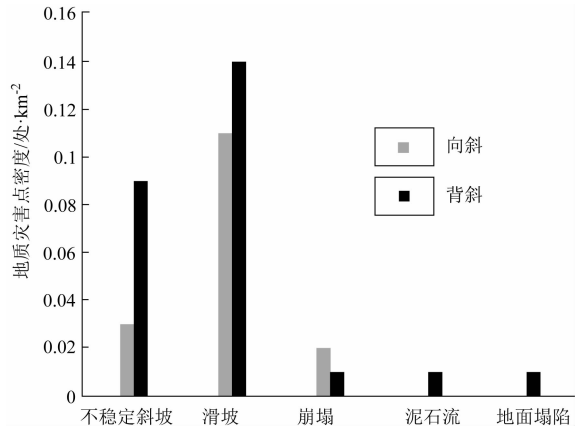


图5 永定区不同褶皱构造与地质灾害分布关系

Fig. 5 Relationship between different fold structures and geological hazard distribution in Yongding District

4 诱发因素分析

4.1 降雨情况

研究区降雨丰沛且集中,常形成短时强降水,这种突发暴雨是区内地质灾害发生的主要诱因

素^[25]。以2003年7月7—9日区内特大暴雨为例,其中8日的降雨量突破417.3 mm,9日降雨量达110 mm,这次暴雨降水量占全年降雨量总和的38.4%。期间全区发生地质灾害66处,占全年地质灾害总数的52.8%。

永定区年均降水量平面分布大致有2个中心,分别为永定区南部地区四都坪和东南部谢家坪一带。区内年降水超过1 500 mm,总体上向东北逐渐减小。在年均降水量[1 000,1 200) mm区间,地质灾害点数量最多,占灾害点总数的51.4%;其次为降水量小于等于1 000 mm区间,灾害点数量占灾害点总数的24.4%;大于1 500 mm降水区间内,灾害点发生数量最少,仅占灾害点总数的3.1%。由此可见,研究区地质灾害的数量并不是单纯随年降水量增多而上升,以往研究也表明,灾害发生前10 d的有效降雨量对地质灾害影响更大^[26-27]。

4.2 人类工程活动

永定区人为因素主导及参与诱发的地质灾害类型基本为滑坡和少量崩塌,统计有97处,占统计

总数量的 43.11%。通过对区内人口密度与地质灾害分布相关性分析(图 6),灾害点主要分布在人类活动程度较高的东北部地区以及澧水南岸 10 km 之内区域,这也说明人口较多的地区对自然环境的

改造程度更多,人为增加了许多地质灾害风险。据调查,区内影响地质灾害发生的人类工程活动主要为不合理地切坡修路、建房,其次为矿山开采、地下水超采、植被破坏等活动。

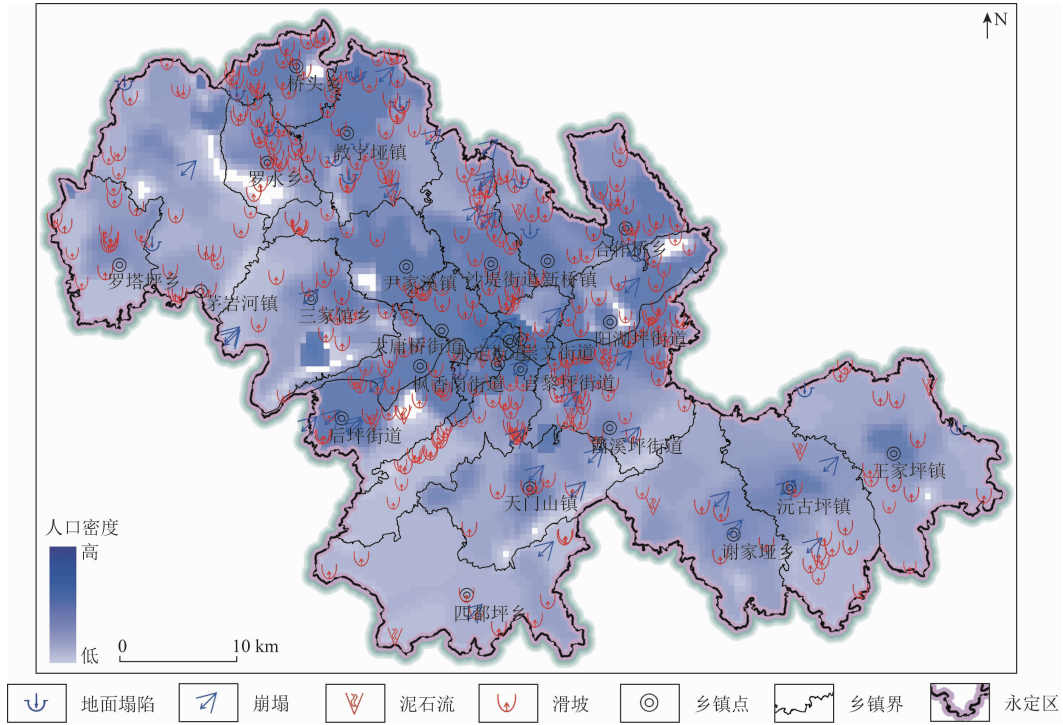


图 6 永定区人口密度与地质灾害分布关系

Fig. 6 Relationship between ropulation density and geological hazard distribution in Yongding District

5 地质灾害易发性分区评价

5.1 评价方法

本次评价方法采取易发程度指数法^[28-30],在研究区选取地形地貌、地质构造、岩土体类型、植被覆盖情况、降雨量、人类工程活动及地质灾害点密度作为灾害易发性分区评价指标,将其与地质灾害发生的关系和权重系数建立地质灾害易发指数模型,对单灾害类型易发程度分区后再综合叠加分析。易发程度指数计算公式为

$$Z_p = \sum_{j=1}^n A_j \times q_j \quad (1)$$

式中: Z_p 为评价单元(1 km × 1 km)地质灾害易发程度指数; A_j 为各评价因子权重; q_j 为各评价因子分级值。

综合崩塌、滑坡、泥石流易发性指数和地面塌陷易发性指数,将两者易发性分区结果叠加分析,其中每个评价单元的信息叠加将满足如下逻辑运

算公式^[28]

$$Z = Z_{BHL} \cup Z_T \quad (2)$$

式中: Z 为评价单元地质灾害易发性综合指数; Z_{BHL} 为崩、滑、流地质灾害易发性指数; Z_T 为地面塌陷地质灾害易发性指数。

计算得到研究区所有地质灾害类型的易发性综合指数值,采用 ArcGIS 自然断点法数据统计,并结合前人经验,得到研究区易发程度分区阈值划分标准:当 $Z > 6$ 时,为地质灾害高易发区; $3 \leq Z \leq 6$,为地质灾害中易发区; $1 \leq Z \leq 3$ 为地质灾害低易发区; $Z < 1$ 时为地质灾害非易发区。

5.2 分区结果

根据易发程度指数评价方法,将全区地质灾害易发程度划分为高、中、低 3 类易发区(图 7)。

高易发区主要分布在区内东北部桥头乡至阳湖坪街道一带及东南端谢家坪乡至王家坪镇南部红层发育区,面积为 860.51 km²。以低山丘陵地貌为主,局部地形切割深,山体坡度陡,断褶构造复杂,岩性以志留系页岩及白垩系砂页岩为主。人口

密度大,多切坡建房与公路修建等工程活动,地质环境较脆弱,灾害点密集。区内有地质灾害点 165 处,占全区灾害点总数的 73.33%,灾害点密度为 19.17 处/100 km²。

中易发区主要分布在西北部罗塔坪乡、三家馆乡南部及四都坪至西溪坪街道一带,面积为 720.21 km²。以中低山丘陵地貌为主,地形坡度较陡,构造发育,岩性以碳酸盐岩为主,人类工程活动多为矿山开采及公铁路施工。区内有地质灾害点

55 处,占全区灾害点总数的 24.44%,灾害点密度为 7.64 处/100 km²。

低易发区主要分布在罗塔坪乡北部局部区域、茅岩河镇至三家馆乡一线、四都坪乡南部及谢家垭乡至王家坪镇北部一带,面积为 588.48 km²。该区域地貌包含低山丘陵、冲洪积阶地平原及中低山台地溶丘洼地,坡度变化大,地质构造相对简单。区内有地质灾害点 17 处,占全区灾害点总数的 2.22%,灾害点密度为 2.89 处/100 km²。

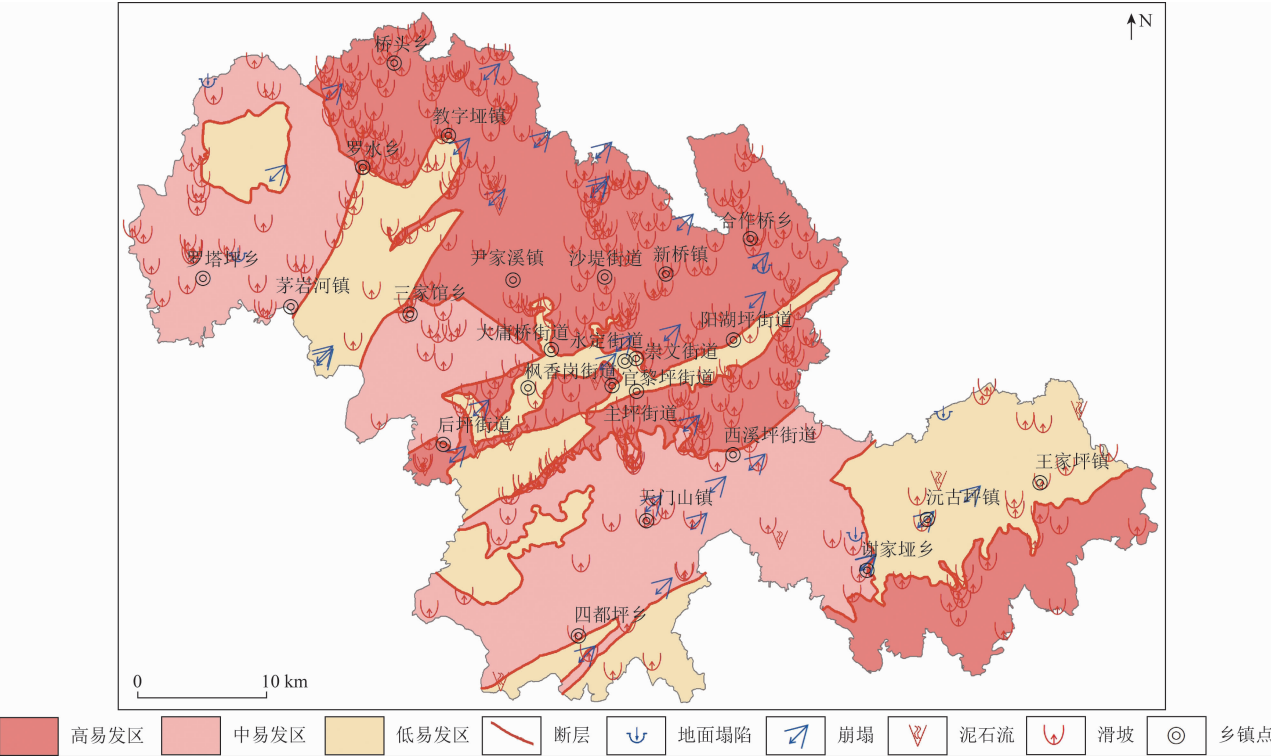


图 7 永定区地质灾害易发程度分区

Fig. 7 Geological disaster susceptibility zoning in Yongding District

6 结论

(1)张家界永定区地质灾害类型以滑坡为主,崩塌、泥石流、地面塌陷等为次。空间分布以中部断层发育区与东北部页岩地层区最多,受岩性控制,以志留系分布区的灾害点数量最多;时间分布相对集中在 5、6、7 月雨季。

(2)区内地质灾害与地形地貌、岩土体类型、构造活动密切相关,并受降雨及人类工程活动影响。主要规律为:在碎屑岩丘陵地貌中灾害点密度最高;在坡度范围[25°,45°)之间,发育 68% 以上的地质灾害,其中以[25°,35°)区间最集中;在志留

系砂质页岩岩组中地质灾害最易发;受构造影响明显,断褶构造带处灾害点密集;灾害高发期与雨季耦合,突发性降雨诱发强烈;人口密集区切坡建房、道路建设等活动强烈,加剧地质灾害的发生。

(3)根据研究区地质灾害现状、孕灾条件要素、人类工程活动等诱发因子,采用易发程度指数法,基于 ArcGIS 信息统计分析,将全区地质灾害易发程度划分为高易发区(东北部桥头乡至阳湖坪街道一带及东南端谢家垭乡至王家坪镇南部红层发育区)、中易发区(西北部罗塔坪乡、三家馆乡南部及四都坪至西溪坪街道一带)与低易发区(罗塔坪乡北部局部区域、茅岩河镇至三家馆乡一线、四都坪乡南部及谢家垭乡至王家坪镇北部一带)。研究成

果可为永定区国土空间规划、地质灾害防治、旅游路线及重大工程建设规划提供指导。

参考文献(References):

- [1] 王高峰,王爱军,田运涛,等. 基于图幅调查的六盘山镇孕灾地质条件分析[J]. 水土保持研究,2016,23(5):364-369.
Wang G F, Wang A J, Tian Y T, et al. Analysis on disaster - pregnant geological environment of Liupanshan town based on map sheet survey[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(5):364-369.
- [2] Guzzetti F, Carrara A, Cardinali M, et al. Landslide hazard evaluation: A review of current techniques and their application in a multi - scale study, Central Italy [J]. Geomorphology, 1999, 31(1-4):181-216.
- [3] Uitto J I, Shaw R. Sustainable Development and Disaster Risk Reduction: Introduction [M]. Tokyo: Springer, 2016.
- [4] 徐伟,冉涛,田凯. 西南红层地区地质灾害发育规律与成灾模式——以云南彝良县为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2021,32(6):127-133.
Xu W, Ran T, Tian K. Developing law and disaster modes of geohazards in red bed region of southwestern China: A case study of Yiliang County of Yunnan Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(6):127-133.
- [5] 张殿发,邹永廖. 喀斯特地质灾害的形成条件及其环境背景——以贵州省为例[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2002, 21(1):39-42.
Zhang D F, Zou Y L. The contributory factors and environmental setting of karst Geohazards: A typical example in Guizhou Province [J]. Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry, 2002, 21(1):39-42.
- [6] 方琼,段中满. 湖南省地形地貌与地质灾害分布关系分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2012, 23(2):83-88.
Fang Q, Duan Z M. Distribution analysis of topography and geological hazards in Hunan province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2012, 23(2):83-88.
- [7] 唐川,马国超. 基于地貌单元的小区域地质灾害易发性分区方法研究[J]. 地理科学, 2015, 35(1):91-98.
Tang C, Ma G C. Small regional geohazards susceptibility mapping based on geomorphic Unit [J]. Scientia Geographica Sinica, 2015, 35(1):91-98.
- [8] Baharvand S, Rahnamarad J, Soori S, et al. Landslide susceptibility zoning in a catchment of Zagros Mountains using fuzzy logic and GIS [J]. Environmental Earth Sciences, 2020, 79(10):204.
- [9] Chen W, Ding X, Zhao R X, et al. Application of frequency ratio and weights of evidence models in landslide susceptibility mapping for the Shangzhou district of Shangluo City, China [J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(1):64.
- [10] 江金进,赖波,江山,等. 珠海市横琴新区地质灾害分布特征及易发性评价[J]. 地质灾害与环境保护, 2022, 33(1):30-36.
- [11] Jiang J J, Lai B, Jiang S, et al. Distribution characteristics and susceptibility evaluation of geological hazards in Hengqin of Zhuhai city [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2022, 33(1):30-36.
- [12] 刘璐瑶,高惠瑛,李照. 基于 CF 与 Logistic 回归模型耦合的永嘉县滑坡易发性评价[J]. 中国海洋大学学报:自然科学版, 2021, 51(10):121-129.
Liu L Y, Gao H Y, Li Z. Landslide susceptibility assessment based on coupling of CF Model and logistic regression model in Yongjia County [J]. Periodical of Ocean University of China: Natural Science Edition, 2021, 51(10):121-129.
- [13] 杨康,薛喜成,李识博. 信息量融入 GA 优化 SVM 模型下的地质灾害易发性评价[J]. 安全与环境工程, 2022, 29(3):109-118.
Yang K, Xue X C, Li S B. Geological hazard susceptibility assessment by incorporating information value into GA optimized SVM model [J]. Safety and Environmental Engineering, 2022, 29(3):109-118.
- [14] 周苏华,付宇航,徐智文,等. 基于主客观赋权法的福建省地质灾害易发性评价[J]. 安全与环境学报, 2023, 23(9):3204-3214.
Zhou S H, Fu Y H, Xu Z W, et al. Geological disasters susceptibility mapping in Fujian Province based on subjective and objective weighting [J]. Journal of Safety and Environment, 2023, 23(9):3204-3214.
- [15] 徐昊,朱鹏程,孟明超,等. 张家界黄龙洞景区危岩崩塌地质灾害评价及防治措施[J]. 国土资源导刊, 2018, 15(1):44-51.
Xu H, Zhu P C, Meng M C, et al. Geological hazard assessment and prevention measures of perilous rock collapse in Huanglong cave scenic area of Zhangjiajie [J]. Land & Resources Herald, 2018, 15(1):44-51.
- [16] 李晋,覃事胜,刘新惠,等. 张家界大峡谷景区危岩体发育规律与防治建议[J]. 地质灾害与环境保护, 2019, 30(3):48-52.
Li J, Qin S S, Liu X H, et al. Development law and control suggestion of unstable rocks in Zhangjiajie grand canyon scenic area [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2019, 30(3):48-52.
- [17] 覃事胜,张弛,申旭辉,等. 湖南省张家界市永定区 1:5 万地质灾害详细调查报告[R]. 长沙, 2016.
Tan S S, Zhang C, Shen X H, et al. Detailed Investigation Report of 1: 50 000 Geological Disasters in Yongding District, Zhangjiajie City, Hunan Province [R]. Changsha, 2016.
- [18] 王克营,巩书华,杜江,等. 湖南省张家界市永定区地质灾害风险普查报告[R]. 长沙, 2022.
Wang K Y, Gong S H, Du J, et al. Geological Hazard Risk Survey Report of Yongding District, Zhangjiajie City, Hunan Province [R]. Changsha, 2022.
- [19] 阳岳龙,周群,林剑. 湖南主要地质灾害与地形地貌之关系[J]. 灾害学, 2007, 22(3):36-40.

- Yang Y L, Zhou Q, Lin J. The relationship between main geological hazards and topography in Hunan[J]. Journal of Catastrophology, 2007, 22(3): 36–40.
- [19] 熊德清, 崔笑烽. 喜马拉雅山脉地震带主要地质灾害与地形地貌关系——以西藏日喀则地区为例[J]. 地质通报, 2021, 40(11): 1967–1980.
- Xiong D Q, Cui X F. The relationship between main geological hazard and topography in the Himalayan seismic belt: A case study in the Xigaze area, Tibet[J]. Geological Bulletin of China, 2021, 40(11): 1967–1980.
- [20] 金福喜, 罗滔, 李杰. 湘东南某市地形地貌对地质灾害发育规律的控制作用分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2014, 25(2): 115–118.
- Jin F X, Luo T, Li J. The analysis of the control action of geography of the development rule of geological hazard in a city of South-eastern of Hunan province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2014, 25(2): 115–118.
- [21] 郭果, 陈筠, 李明惠, 等. 土质滑坡发育概率与坡度间关系研究[J]. 工程地质学报, 2013, 21(4): 607–612.
- Guo G, Chen J, Li M H, et al. Statistic relationship between slope gradient and landslide probability in soil slopes around reservoir[J]. Journal of Engineering Geology, 2013, 21(4): 607–612.
- [22] 杜国梁. 喜马拉雅东构造结地区滑坡发育特征及危险性评价[D]. 北京: 中国地质科学院, 2017.
- Du G L. Development Characteristics and Hazard Assessment of Landslide in the Eastern Himalayan Syntaxis Region of Tibetan Plateau[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2017.
- [23] 巩书华, 朱丽芬. 湘西北地质地貌特征对岩溶石漠化影响研究——以张家界市为例[J]. 中国岩溶, 2021, 40(3): 504–512.
- Gong S H, Zhu L F. Influence of geological and geomorphologic features on karst rocky desertification in northwestern Hunan Province: A case study of Zhangjiajie City[J]. Carsologica Sinica, 2021, 40(3): 504–512.
- [24] 姜端午, 李大明, 梅金华. 湘西北地区岩溶旋回及新构造遥感信息特征[J]. 湖南地质, 2001, 20(3): 225–229.
- Jiang D W, Li D M, Mei J H. Karst circle in westnorthern Hunan and its neotectonics remote sensing interpretation information[J]. Hunan Geology, 2001, 20(3): 225–229.
- [25] 陈静静, 姚蓉, 文强, 等. 湖南省降雨型地质灾害致灾雨量阈值分析[J]. 灾害学, 2014, 29(2): 42–47.
- Chen J J, Yao R, Wen Q, et al. Hazard rainfall threshold analysis of rainfall – induced geological disasters in Hunan Province[J]. Journal of Catastrophology, 2014, 29(2): 42–47.
- [26] 宫清华, 黄光庆, 郭敏, 等. 地质灾害预报预警的研究现状及发展趋势[J]. 世界地质, 2006, 25(3): 296–302.
- Gong Q H, Huang G Q, Guo M, et al. Present status of research and its developmental tendency on prediction and early warning of geologic hazards[J]. Global Geology, 2006, 25(3): 296–302.
- [27] 李明, 杜继稳, 高维英. 陕北黄土高原区地质灾害与降水关系[J]. 干旱区研究, 2009, 26(4): 599–606.
- Li M, Du J W, Gao W Y. Study on the relationship between geological disasters and precipitation in the Loess Plateau in North Shaanxi Province[J]. Arid Zone Research, 2009, 26(4): 599–606.
- [28] 中国地质灾害防治工程行业协会. T/CAGHP 017–2018 县(市)地质灾害调查与区划规范(试行)[S]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2018.
- China Geological Hazard Prevention Engineering Industry Association. T/CAGHP 017–2018 The Specification of Geological Disaster Investigation and Zonation for County[S]. Wuhan: China University of Geoscience Press, 2018.
- [29] 张刘柱, 陈雪梅, 郑立博, 等. 易发程度指数法在宣州区地质灾害易发区划分中的应用研究[J]. 地质灾害与环境, 2019, 30(2): 92–96.
- Zhang L Z, Chen X M, Zheng L B, et al. Application of susceptibility index method in the division of geological hazard prone areas in Xuanchou District[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2019, 30(2): 92–96.
- [30] 许兆军, 肖妮娜, 刘志尧, 等. 基于易发程度指数法的桂阳县地质灾害易发性分区研究[J]. 长春工程学院学报(自然科学版), 2012, 13(3): 54–59.
- Xu Z J, Xiao N N, Liu Z Y, et al. Research on geological disaster – prone area based on susceptibility index method in Guiyang County[J]. Journal of Changchun Institute of Technology (Natural Science Edition), 2012, 13(3): 54–59.

Research on the development law and susceptibility evaluation of geological disasters in Yongding District of Zhangjiajie City in Hunan Province

GONG Shuhua^{1,2}, LI Shaoqing³, WANG Huanyin³, WANG Keying^{1,2}, CAI Ningbo^{1,2}, DU Jiang^{1,2}

(1. Hunan Institute of Geophysical and Geochemical Survey, Hunan Changsha 410114, China; 2. Geological New Energy Exploration and Development Engineering Technology Research Center of Hunan Province, Hunan Changsha 410114, China; 3. Yongding District Natural Resources Bureau of Zhangjiajie, Hunan Zhangjiajie 427000, China)

Abstract: The complex geological structure in Zhangjiajie City has led to its unique landform landscape, meanwhile it has also posed numerous geological hazard risks. By analyzing detailed geological hazard investigation da-

ta of Yongding District from 2014 to 2022 , the authors in this paper have studied its developmental patterns and susceptibility of geological hazards. The results indicate that landslide is the primary type of geological hazard in the area. Geological hazards are spatially most prevalent in the central fault zone and the northeastern shale formation zone , and they are temporally relatively concentrated during the rainy season in May , June and July. Geological hazards in this area are closely related to landform characteristics , lithology , and tectonic activities , and they are also influenced by rainfall and human engineering activities. The density of hazard points is highest in the debris hill landform , and the susceptibility of hazard points is highest in Silurian sandy shale formation. Besides , the geological hazards are significantly influenced by tectonics , with hazard points densely concentrated in fold and thrust structures. The high incidence period of hazards is coupled with the rainy season , and the main triggering factor is rainfall. And the unreasonable engineering activities , such as slope cutting for houses and roads construction , exacerbate the occurrence of geological hazards. By using the susceptibility index method and based on ArcGIS information statistics analysis , the authors in this paper have divided the susceptibility of geological hazards in the entire area into high , moderate , and low susceptibility zones. This study could provide guidance for land spatial planning , geological hazard prevention and control , and planning for tourism routes and major engineering construction in Yongding District.

Keywords: geological hazard ; disaster pregnancy conditions ; development law ; susceptibility ; Zhangjiajie City
(责任编辑: 刘丹)