



峨眉山玄武岩区地质灾害的地质约束 ——以贵州省水城县为例

陈静¹, 况忠², 邓卫卫¹, 许林江¹

1. 贵州省地质环境监测院, 贵州 贵阳 550001; 2. 贵州省地质调查院, 贵州 贵阳 550005

摘要:玄武岩在贵州省境内出露仅占省域面积的 2.08%, 但却孕育着较大的地质灾害风险隐患。这些区域植被覆盖率高, 使地质灾害具有隐蔽性和突发性, 常常难以有效进行识别和防范。本文以水城县为例, 采用 ArcGIS 软件对玄武岩区发育的各类地质灾害风险隐患点数据和地质、地理信息进行叠加和系统处理分析, 再结合野外现场大比例尺调查检验, 得出水城县玄武岩区地质灾害风险隐患发育的地质约束明显的结论, 即呈土岩二元结构的滑坡、不稳定斜坡、风险斜坡为该区主要地质灾害风险隐患, 较集中展布于北西向褶皱构造翼部和北西向、北东向断褶构造交汇部位, 这些区域通常地势较为平缓, 土地资源丰富, 自然村寨分布较多。玄武岩体的内生条件和外生条件影响了其风化程度, 风化土的物理力学性质又决定了其对环境的极其敏感性。

关键词: 峨眉山玄武岩; 地质灾害; 地质约束; 贵州省

GEOLOGICAL CONSTRAINT OF GEOHAZARDS IN EMEISHAN BASALT AREAS: A Case Study of Shuicheng County in Guizhou Province

CHEN Jing¹, KUANG Zhong², DENG Wei-wei¹, XU Lin-jiang¹

1. Guizhou Geological Environment Monitoring Institute, Guiyang 550001, China;

2. Guizhou Geological Survey Institute, Guiyang 550005, China

Abstract: Basalts in Guizhou Province carry great hidden danger of geohazards, although they account only for 2.08% of the total area. Due to the dense coverage of vegetation, it is often difficult to identify and prevent the hidden and sudden geological disasters effectively in these basalt areas. Taking Shuicheng County as an example, the paper uses ArcGIS for the superposition and systematic analysis of various geohazard hidden point data as well as geological and geographic information in the basalt areas. Combined with the large scale field investigation and verification, it is concluded that the constraint of geohazards in the basalt areas of Shuicheng County is obvious. The main hidden geohazards in the area include soil-rock dual structure landslide, unstable slope and risk slope, which are distributed in the intersection of NW fold structure wing and NW and NE fault-fold structure. The terrain in the area is relatively gentle, rich in land resources and distributed with multiple natural villages. The endogenous and exogenous conditions

收稿日期: 2022-03-25; 修回日期: 2022-04-18. 编辑: 李兰英.

基金项目: 财政部、自然资源部基础专项项目“重点省份地质灾害综合防治体系建设”之子项目“贵州省地质灾害综合防治体系重点省份建设”(财办建[2018]163号); 贵州省委全面深化改革重大研究专项项目“贵州山区地质灾害成灾机理及防治对策研究”(E.000101, 贵改办发[2021]4号); 贵州省自然资源厅重大科技专项项目“贵州地质灾害风险隐患区人员避险搬迁课题研究”。

作者简介: 陈静(1968—), 女, 高级工程师, 主要从事地质环境保护与矿业权评估工作, 通信地址 贵州省贵阳市观山湖区 贵州省地质博物馆 7 楼, E-mail/cj892-gy@qq.com

通信作者: 况忠(1976—), 男, 地质高级工程师, 主要从事区域地质、遥感地质研究工作, 通信地址 贵州省贵阳市观山湖区石林西路 171 号 贵州省地质科技园 7 号楼, E-mail/812613218@qq.com

of basalts affect the weathering degree, and the weathered soil is extremely sensitive to the environment due to its physical and mechanical properties.

Key words: Emeishan basalt; geohazard; geological constraint; Guizhou Province

0 引言

峨眉山玄武岩是中国西南地区特有的岩石地层单位,在贵州境内主要集中分布于大方—织金—清镇—关岭—兴仁一线以南、以西地区^[1],出露面积3 664.69 km²,占省域面积的2.08%,却孕育着较大的地质灾害风险隐患。据贵州1155监测预警平台数据,截至2022年初,峨眉山玄武岩出露区共有各类地质灾害风险隐患814处,面密度为21处/100 km²,高于全省27 997处地质灾害风险隐患总数的平均面密度数(16处/100 km²),其中以六盘水市(396处)和毕节市(313处)分布最多,而六盘水市则以水城县占比最大(200处)。这些地质灾害风险隐患不仅有较强的隐蔽性和突发性,而且造成的损失巨大。目前国内外将峨眉山玄武岩自然禀赋与地质灾害相联系并进行研究的并不多,在国内仅徐则民等^[2]对峨眉山玄武岩地质灾害的发生机理进行过探讨,认为滑坡规模、失稳方向及灾害程度受到区内地质构造的严格约束;在省内曾有韩宝智等^[3]、姚智等^[4]利用遥感对该省地质灾害进行过普查解译研究,其余少见有人触及。本文以水城县为例,利用ArcGIS软件将对各风险隐患点与地质、地理信息进行系统集成处理和叠加分析,再结合野外现场大比例尺调查核验,总结归纳水城县玄武岩分布区地质灾害风险隐患孕育地质条件约束机制,为玄武岩分布区地质灾害防治和国土空间规划提供参考。

1 区域地质背景

水城县位于贵州省西部,县域面积3 605.98 km²(含青林、金盆、木果、保华、南开等5个乡镇),属亚热带高原季风气候区,多年平均降雨量约1 200 mm,其中6—8月降雨量占全年的50%以上,且年平均暴雨日数也主要集中在6—8月,占全年暴雨日数的79%(51天)^[5]。地表水体以山体雨源型河流为主,河水位具暴涨陡降特点。区内地下水以碳酸盐岩岩溶裂隙水为主,除沟木底向斜核部上三叠统一侏罗统砂岩含有具局部供水意义的基岩裂隙水外,其余地层含

水性差。

研究区大地构造位置处于特提斯—喜马拉雅与滨太平洋两大全球巨型构造域结合部位,扬子准地台西南缘,威宁隆起区之威宁穹盆构造变形区与六盘水裂陷槽六盘水北西向褶皱带、北北东向普安旋扭构造变形区交汇部位。水城县地貌上属于滇东高原向黔中丘原过渡的梯级大斜坡地带,受多次间歇性掀斜抬升和乌江与北盘江两大河流侵蚀切割,地形呈梯级起伏,形成多个夷平面,总体地势北西高、南东低,山脉多追踪地质构造线展布,北部地形切割较浅,南部地形切割相对较深,相对高差多在200~700 m。区内出露地层自泥盆系下统到白垩系均有出露,以碳酸盐岩(52.98%)分布最为广泛,陆源碎屑岩(29.27%)次之。峨眉山玄武岩出露区面积640.14 km²,占县域面积的17.75%。第四系以零星分布残坡积为主,其力学性质常随母岩不同而异。

水城县位于峨眉山大火成岩省东岩区,以大陆溢流拉斑玄武岩为主的一套多期次多旋回岩浆喷溢组合在县域分布广泛,厚度一般都在100 m以上,在都格一带玄武岩厚度600~800 m。按喷发环境的差异和岩石组合不同,可大致分为3个大旋回^[6-9]。在都格、鸡场一带玄武岩顶部时见4~12 m含植物化石的玄武岩屑砂岩、黏土岩及煤线。峨眉山玄武岩出露明显受地质构造约束,主要集中连片出露于威宁隆起区之新发北东向断褶带、发耳穹盆区,呈条带状零星出露于六盘水裂陷槽六盘水北西向断褶带和北北东向普安旋扭构造变形区龙吟断褶带西侧(图1)。

2 研究方法

对于地质灾害的研究,前人有较多的探索^[3-4,10-17],方法也较多,但信息量法对地质灾害进行拟合分析是目前较为适用的研究方法之一。基于作者对历年来贵州省地质灾害发育分布特征、地质灾害防治工程勘查设计和对已经发生的地质灾害灾情、险情的研究,认为影响地质灾害发育的因素主要包括两个方面,一是地

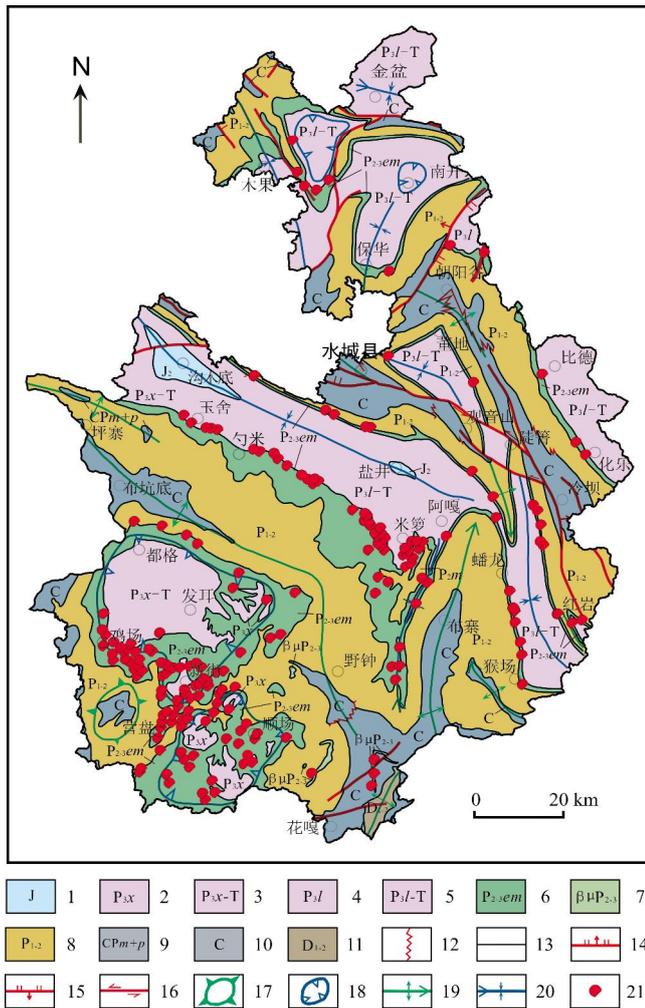


图1 水城县峨眉山玄武岩区出露分布图

Fig. 1 Distribution map of Emeishan basalt areas in Shuicheng County

1—侏罗系 (Jurassic); 2—上二叠统宣威组 (Upper Permian Xuanwei fm.); 3—宣威组-三叠系 (Xuanwei fm.-Triassic); 4—上二叠统龙潭组 (Upper Permian Longtan fm.); 5—龙潭组-三叠系 (Longtan fm.-Triassic); 6—峨眉山玄武岩 (Emeishan basalt); 7—辉绿岩 (diabase); 8—中下二叠统 (Middle-Lower Permian); 9—石炭系马平组+二叠系平川组 (Carboniferous Maping fm. and Permian Pingchuan fm.); 10—石炭系 (Carboniferous); 11—中下泥盆统 (Middle-Lower Devonian); 12—沉积相变界线 (boundary of sedimentary facies); 13—地质界线 (geological boundary); 14—正断层 (normal fault); 15—逆断层 (reverse fault); 16—平移断层 (strike-slip fault); 17—穹状背斜 (dome anticline); 18—盆状向斜 (pericline); 19—线状背斜及倾覆端 (linear anticline and overturned end); 20—线状向斜及昂起端 (linear syncline and raised end); 21—地质灾害风险隐患点 (potential geohazard point)

质灾害孕育的地质环境本底,另一个是外在诱发因素。地质环境本底主要包括地形地貌、地层岩性、地质构

造、斜坡岩土体组合、坡体结构类型等;外在因素主要为降雨、人类工程活动等。笔者以水城县出露的峨眉山玄武岩为主要研究对象,利用 ArcGIS 10.2 软件平台,依据水城县地质灾害区划和详查资料以及现状地质灾害风险隐患数据,以 30 m × 30 m 精度 DEM 数据和区域地质图构建岩石地层单元分组数据,通过空间叠加分析功能,建立信息量分析模型,聚合各参评因子,对峨眉山玄武岩出露区地质灾害进行了评价研究,并开展了实地查验。

3 结果与讨论

3.1 地质灾害特点

根据近 20 年来地质灾害风险隐患数据统计(表 1),水城县主要地质灾害风险隐患为滑坡、崩塌、不稳定斜坡,以及在人口和财产分布区域具备孕灾地质条件,且可能发展成地质灾害趋势的自然斜坡(即风险斜坡)。

据不完全统计,2008—2021 年中央和省级财政共下拨地质灾害防治专项资金超过 2.2 亿元,对水城县近 100 处地质灾害隐患点实施了工程治理。通过对顺场滑坡群、米箩地质灾害带、营盘不稳定斜坡群、都格初级中学滑坡等治理工程的实施,有效保证了人民群众生命财产安全,共撤销玄武岩区地质灾害台帐隐患点 21 处。按同口径统计,即不考虑风险斜坡,地质灾害台帐隐患点总数略有下降,而峨眉山玄武岩出露区地质灾害隐患却表现出上升态势(表 2),台帐隐患点较 20 年前增加了 25 处。

2011—2021 年水城县发生各类地质灾害灾情险情共计 28 起,发生的灾情、险情类型以滑坡为主(22 起),占比达 78.57%。其中以 2019 年 7 月 23 日水城县鸡场镇坪地村滑坡地质灾害的危害最大。

3.2 地质灾害孕育的地质约束

3.2.1 地质构造

区内各类地质灾害风险隐患主要分布于沟木底向斜和发耳构造盆地区,基本追踪地质构造形迹发育(表 3,图 1),仅这两个区域就有滑坡、不稳定斜坡、风险斜坡、泥石流等地质灾害风险隐患共计 154 处,占峨眉山玄武岩区 200 处地质灾害风险隐患的 77%。在沟木底向斜南西翼,地质灾害风险隐患点较集中分布在北西向新发断褶带和北北东向龙吟断褶带交汇部位,仅米箩一带就分布有各类地质灾害风险隐患点 30 处。在

表1 2002—2022年水城县各类型地质灾害风险隐患点统计表

Table 1 Potential geohazard point statistics of various types in Shuicheng County during 2002–2022

统计年	滑坡	崩塌	不稳定斜坡	地面塌陷	地裂缝	地面沉降	泥石流	风险斜坡	合计
2002	数量/处	143	45	30	7	21	1	42	289
	占比/%	49.48	15.57	10.38	2.42	7.27	0.35	14.53	
2011	数量/处	235	63	54	8	3	1		364
	占比/%	64.56	17.31	14.84	2.20	0.82	0.27		
2022	数量/处	194	115	30	4	10	3	383	739
	占比/%	26.25	15.56	4.06	0.54	1.35	0.41%	51.83	

表2 2002—2022年峨眉山玄武岩区地质灾害风险隐患统计

Table 2 Hidden danger statistics of geohazards in Emeishan basalt area during 2002–2022

统计年	合计/处	滑坡	不稳定斜坡	崩塌	泥石流	地裂缝	风险斜坡
2002	53	35	6	3	6	3	
2022	200	49	7	21	1		122

表3 不同地质构造区域内的地质灾害

Table 3 Statistics of geohazards by structural areas

构造区域	合计/处	滑坡	不稳定斜坡	崩塌	地面塌陷	泥石流	地裂缝	风险斜坡
沟木底向斜南西翼	57	15	1	2		1		38
发耳构造穹盆区	97	24	4	10				59

发耳构造盆地区,较密集发育于穹状背斜和盆状向斜结合部位,仅新街、营盘、龙场区域就有各类地质灾害风险隐患点43处,占总数的21.5%。以各地质灾害风险隐患所处斜坡坡向划分,受北西向构造控制的有143处,北东及北北东向构造控制的57处。

3.2.2 地形地貌

贵州省境内自西向东可分为4级台面:第一级地形台面海拔标高1900 m以上,台面上地面坡度平缓,风化壳深厚;第二级地形台面主要分布在第一级地形台面的东南缘,分布较为零散,海拔多在1400~1900 m,为贵州主要大河的分水岭,丘状起伏的剥夷面与深切的峡谷、嶂谷构成的山原地貌景观为其显著特征^[18];第三级台面海拔标高900~1400 m,是贵州岩溶丘原、山原的典型分布区;第四级台面海拔900 m以下,大多在600~800 m之间,主要分布于省内东部,是贵州低山丘陵的主要分布区。水城县主要位于第一级台面

向第二级台面过渡的斜坡地带,区内地势总体西高东低。按发育高程划分,1400~1900 m发育的各类地质灾害风险隐患点共计114处,占比为57%(表4)。

表4 不同高程内地质灾害分布

Table 4 Statistics of geohazards by elevations

高程/m	合计/处	滑坡	不稳定斜坡	崩塌	泥石流	风险斜坡
800~1000	5	2				3
1000~1400	68	12	4	5	1	46
1400~1900	114	31	3	12		68
≥1900	13	4		4		5

按地形坡度划分,≤10°、10~20°、20~30°的斜坡共发育分布有各类地质灾害风险隐患计180处,分别占比17.5%、48%和24.5%(表5)。30°以下地质灾害风险隐患点分布高程在1000~1900 m的有165处,占比82.5%。地形切割深度超过200 m的11处,100~200 m的有32处,50~100 m的13处,切割深度小于50 m的144处(其中滑坡34处,风险斜坡102处,不稳定斜坡5处,崩塌2处,泥石流1处)。由此可见,并非山高谷深地质灾害风险隐患就大,反而是在平缓开阔褶皱、不同方向褶皱接合部位及褶皱转折端等应力集中区域地质灾害风险隐患较为发育(图1),而这些宽缓谷坡地形相对平缓,通常也是人们聚居的生产生活区域。

3.2.3 地层岩性

峨眉山玄武岩在水城县内呈岩被状产出,属稳定地块裂隙阶段至二叠纪非造山期产物,在水城县分布具自西向东、自南向北厚度减薄特点^[19-20]。垂直方向通常发育3组节理,形成柱状节理,加之其特有喷发韵

表 5 不同地形坡度下地质灾害分布

Table 5 Statistics of geohazards by topographic gradients

地形坡度/(°)	合计/处	滑坡	不稳定斜坡	崩塌	泥石流	风险斜坡
≤10	35	5	1	2		27
10-20	96	30	4	2		60
20-30	49	10	1	5	1	32
30-40	11	3	1	5		2
>40	9	1		7		1

律层,节理加“层理”的组合恰好将岩体劈成大小不等的块体,且在露头区有相当的临空面.如果在地形深切切割区有较大的临空面时,最易形成崩塌.经野外核查,区内东部蟠龙、阿嘎和北部的保华、玉舍一带,玄武岩体的柱状节理小而密,岩体常呈碎裂状,风化强烈;南部的都格、顺场一带,柱状节理大而稀,岩体常见块状.这与东部、北部地质灾害隐患主要为滑坡,而崩塌则主要分布在南部相吻合,如北部米箩、勺米、阿嘎、玉舍、保华等 5 个乡镇现有滑坡地质灾害隐患 17 处,占全县峨眉山玄武岩区滑坡隐患 4 总数的 34.69%,而南部仅营盘和花嘎两个乡镇就有崩塌地质灾害隐患 7 处,占全县峨眉山玄武岩出露区崩塌总数的 33.33%.

在水城地区普遍存在着分布广泛而稳定、厚数米至数十米的峨眉山玄武岩古风化壳,根据前人研究成果^[16, 20-22],以实地查验的水城县顺场乡营盘村顺场街上滑坡为例,峨眉山玄武岩风化壳垂向结构自上而下大致可以分为表土层、强风化层和弱风化层.表土层褐黄色,见植物根茎,结构松散,层厚为 0.3~1.2 m;强风化层多呈棕黄色-棕白色夹褐色等杂色,半固结-松散碎块状,分选性差,颗粒级配不均匀,主要成分为黏土矿物,少量玄武岩块体局部见残留杏仁体,孔隙比大于 1,一般厚数米至数十米;弱风化层,钻孔揭露未见底,柱状节理发育,属较硬岩,岩心呈短柱状、碎块状,岩石矿物成分基本未变化,黏土矿物含量较少.

3.3 地质灾害形成机理

水城县峨眉山玄武岩出露区现有的 200 处地质灾害风险隐患中,有滑坡、不稳定斜坡、风险斜坡、泥石流共计 179 处,占比 89.5%.峨眉山玄武岩组中较为发育的柱状节理+韵律“层面”的组合破坏了岩体完整性,在地形切割较深临空面处常形成崩塌(危岩体).而在

分布广泛而稳定的古风化壳中,土状-半土状强风化层与下伏弱风化层岩组形成土岩二元结构,通常具有双重地下水径流系统(土岩接触面上覆强风化层含水系统与下伏弱风化层含水系统),在其接触面上常见有水渗出.在降雨入渗作用下,强风化层中的地下水一方面浸泡土体降低其力学强度,另一方面随着土体中静水压力的增大,土体中的有效应力不断降低,当静水压力转换成动水压力时,土体中的细小颗粒更容易被渗流带走,造成土体骨架的溃散^[23],土体强度锐减甚至失效,在不同地貌部位形成滑坡、不稳定斜坡、泥石流等地质灾害.

以水城县鸡场镇坪地村滑坡为例^[16],县道 X244 施工对切方边坡坡体进行了清表工作,大大增加了降雨入渗补给系数,2021 年 7 月 18 日 20 时—23 日 20 时的持续强降雨使得强风化层中形成了地下水渗流,这在滑坡发生后,滑源区后壁基覆界面处见地下水呈带状流出得到了证实,而县道 X244 施工切方未支护边坡处因地下水渗流的水力坡降陡然增大,造成土体强度锐减甚至失效,滑坡剪出.另一方面,在地形坡度较平缓地带,导致峨眉山玄武岩土体滑坡产生的内部机制不一定是“地下水浸泡作用降低滑带土的抗剪强度”,有时渗流作用和增重效应反而是影响斜坡稳定性的主因.还以水城县鸡场镇坪地村滑坡为例,在滑坡发生后的 3 个分区^[16]中,滑源区整体地形坡度较陡,一般为 50°,高程 1 545~1 660 m;铲刮-流通区整体坡度则相对较缓,一般为 35°;堆积区为平缓沟口洼地和东西向发育槽状地形,坡度 0~10°.而造成巨大损害的主要因素也是铲刮-流通区形成的碎屑流.

4 结论

(1)峨眉山玄武岩呈岩被状产出,柱状节理发育,二者共同破坏了岩体的完整性,在县域南部形成切割较深临空面处,易形成崩塌(危岩体)地质灾害.峨眉山古风化壳在垂向上通常具有土岩二元结构,多孕育滑坡、不稳定斜坡、风险斜坡等地质灾害风险隐患,亦是玄武岩区主要地质灾害类型.

(2)并非山高坡陡地质灾害风险隐患就多,反而是平缓开阔褶皱区、不同方向褶皱接合部位及褶皱转折端等应力集中区域,地质灾害点风险隐患密度较大,危险性也较大.而这些区域地形相对平缓,通常是人

们聚居的生产生活区域,地质灾害风险容易被忽略。

(3)对于具有大孔隙比的峨眉山玄武岩强风化层滑坡,灾害形成的内部机制不一定是“地下水浸泡作用降低滑带土的抗剪强度”,渗流作用和增重效应反而是影响斜坡稳定性的主要因素。

(4)人类工程活动尤其是切方边坡施工,一方面由于卸荷裂隙增大降雨入渗,另一方面未支护坡面存在水力坡降陡变,当斜坡土体中产生地下水渗流时,在切方处常常出现土体坍塌和泻溜,最终形成牵引式滑坡。

综上所述,峨眉山玄武岩区古构造格局控制了其分布范围,后期新构造运动间歇性上升决定了其出露范围,其韵律组合影响了完整性。这三者共同控制了水城县峨眉山玄武岩区地质灾害风险隐患的孕育和形成。降雨和人类工程活动则决定了其发生时间、表现形式。因此,地应力集中区域是水城县地质灾害防治重点区域,尤其应加强对该区域人类工程活动强度的限制和干预。

致谢:成文过程中审稿专家和编辑部老师对论文提出许多宝贵意见,在此一并致以诚挚谢意!

参考文献(References):

- [1]贵州省地质调查院. 中国区域地质志·贵州志[M]. 北京:地质出版社, 2017: 769-787.
Guizhou Institute of Geological Survey. Regional geology of China: Guizhou[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2017: 769-787. (in Chinese)
- [2]徐则民, 黄润秋. 峨眉山玄武岩大规模灾难性崩滑事件的地质构造约束[J]. 地质论评, 2010, 56(2): 224-236.
Xu Z M, Huang R Q. The geological structure constraint for massive and catastrophic landslides in Permian Emeishan basalt[J]. Geological Review, 2010, 56(2): 224-236.
- [3]韩宝智, 姚智, 倪学文. 黔西北滑坡、崩塌、泥石流遥感研究[J]. 贵州地质, 1996, 13(2): 196-201.
Han B Z, Yao Z, Ni X W. Using remote sensing for the study of landslides, rockfalls and mud-rock flows in northwestern Guizhou[J]. Guizhou Geology, 1996, 13(2): 196-201.
- [4]姚智, 罗孝桓, 况顺达. 贵州西部峨眉山玄武岩的遥感影像特征[J]. 贵州地质, 2004, 21(3): 156-160.
Yao Z, Luo X H, Kuang S D. Essentials of remote sensing images of Emeishan basalts, West Guizhou[J]. Guizhou Geology, 2004, 21(3): 156-160.
- [5]严锐, 董瑞, 龙园, 等. 全球气候变暖背景下水城县近 30 a 气温与降水变化的新特征[J]. 中低纬山地气象, 2020, 44(3): 5-12.
Yan R, Dong R, Long Y, et al. The new change characteristics of temperature and precipitation of Shuicheng in recent 30 years under the global climate warming[J]. Mid-Low Latitude Mountain Meteorology, 2020, 44(3): 5-12.
- [6]王砚耕, 王尚彦. 峨眉山大火岩省与玄武岩铜矿——以贵州二叠纪玄武岩分布区为例[J]. 贵州地质, 2003, 20(1): 5-10, 4.
Wang Y G, Wang S Y. Emeishan large igneous provinces and basalt copper deposits: An example from Permian basalt areas in Guizhou [J]. Guizhou Geology, 2003, 20(1): 5-10, 4.
- [7]郑启铃. 贵州境内峨眉山玄武岩的基本特征及其与成矿作用的关系[J]. 贵州地质, 1985, 2(1): 1-10.
Zheng Q Q. The basic features of Emei Mountain basalt and the relation of its mineralization in Guizhou[J]. Guizhou Geology, 1985, 2(1): 1-10.
- [8]陈文一, 刘家仁, 王中刚, 等. 贵州峨眉山玄武岩喷发期的岩相古地理研究[J]. 古地理学报, 2003, 5(1): 17-28.
Chen W Y, Liu J R, Wang Z G, et al. Study on lithofacies palaeogeography during the Permian Emeishan basalt explosion in Guizhou province[J]. Journal of Palaeogeography, 2003, 5(1): 17-28.
- [9]田景春, 卢武长, 尹观. 贵州早二叠世玄武岩喷发环境及其古海洋效应研究[J]. 成都地质学院学报, 1993, 20(1): 27-33.
Tian J C, Lu W C, Yin G. The research on the early Permian basalt eruption environment in Guizhou and it's effect to the paleoceanography [J]. Journal of Chengdu College of Geology, 1993, 20(1): 27-33.
- [10]王国卫, 李明波, 蒋明光, 等. 基于加权信息量模型的湖南省麻阳县地质灾害危险性评价与区划[J]. 地质与资源, 2020, 29(3): 266-272.
Wang G W, Li M B, Jiang M G, et al. Risk assessment and zoning of the geological hazards in Mayang County of Hunan Province based on weighted information model[J]. Geology and Resources, 2020, 29(3): 266-272.
- [11]李信, 阮明, 杨峰, 等. 基于 GIS 技术和信息量法的地质灾害易发性研究——以海南省昌江县为例[J]. 地质与资源, 2022, 31(1): 98-105.
Li X, Ruan M, Yang F, et al. Evaluation of geological hazard susceptibility based on GIS and information method: A case study of Changjiang County, Hainan Province [J]. Geology and Resources, 2022, 31(1): 98-105.
- [12]郭邦梅, 权开兄. 基于 ArcGIS 的青海隆务河流域灾害风险性评价[J]. 地质与资源, 2019, 28(3): 289-292.
Guo B M, Quan K X. ArcGIS-based disaster risk assessment of Longwu River basin in Qinghai Province[J]. Geology and Resources, 2019, 28(3): 289-292.
- [13]温金梅, 杨龙, 苟敬, 等. 基于信息量法的地质灾害易发性评价——以重庆市巫山县县城为例[J]. 地质与资源, 2021, 30(2):

- 193-198, 192.
- Wen J M, Yang L, Gou J, et al. Evaluation of geohazard susceptibility based on information method: A case study of Wushan County in Chongqing Municipality[J]. *Geology and Resources*, 2021, 30(2): 193-198, 192.
- [14]高萌萌, 李瑞敏, 徐慧珍, 等. 基于 MapGIS 建立的中国地质环境图系数据库[J]. *中国地质*, 2019, 46(S2): 130-140.
- Gao M M, Li R M, Xu H Z, et al. Database of geological environmental map system of China based on MapGIS[J]. *Geology in China*, 2019, 46(S2): 130-140.
- [15]郭芳芳, 杨农, 孟晖, 等. 地形起伏度和坡度分析在区域滑坡灾害评价中的应用[J]. *中国地质*, 2008, 35(1): 131-143.
- Guo F F, Yang N, Meng H, et al. Application of the relief amplitude and slope analysis to regional landslide hazard assessments [J]. *Geology in China*, 2008, 35(1): 131-143.
- [16]李华, 史文兵, 朱要强, 等. 贵州省水城县“7·23”灾难性滑坡形成机制研究[J]. *自然灾害学报*, 2020, 29(6): 188-198.
- Li H, Shi W B, Zhu Y Q, et al. Study on the formation mechanism of “7·23” catastrophic landslide in Shuicheng County, Guizhou Province, China [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2020, 29(6): 188-198.
- [17]杨志华, 吴瑞安, 郭长宝, 等. 川西巴塘断裂带地质灾害效应与典型滑坡发育特征[J]. *中国地质*, 2022, 49(2): 355-368.
- Yang Z H, Wu R A, Guo C B, et al. Geo-hazard effects and typical landslide characteristics of the Batang fault zone in the western Sichuan[J]. *Geology in China*, 2022, 49(2): 355-368.
- [18]江新荣. 贵州不同海拔高度地形台面及其地貌组合特征[J]. *贵州师大学报(自然科学版)*, 1990(2): 12-16.
- Jiang X R. Topographical table and its geomorphic combination characteristics at different altitudes in Guizhou[J]. *Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences)*, 1990(2): 12-16. (in Chinese)
- [19]朱和书, 陈建书, 彭成龙, 等. 贵州水城地区二叠纪峨眉山玄武岩地质特征及其成矿响应探讨[J]. *贵州地质*, 2019, 36(1): 37-48.
- Zhu H S, Chen J S, Peng C L, et al. Geological characteristics and metallogenic response study of Permian Emeishan basalt in Shuicheng area, Guizhou Province[J]. *Guizhou Geology*, 2019, 36(1): 37-48.
- [20]孙书勤. 峨眉山玄武岩结构面类型及其工程效应研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2011: 29, 31-35, 56-99.
- Sun S Q. Study on the types of rock mass structural plane and engineering effects of Emeishan basalt [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011: 29, 31-35, 56-99.
- [21]侯海峰, 杜庆安, 林建绥, 等. 贵州水城-纳雍地区峨眉山玄武岩风化壳离子吸附型稀土矿床地质特征及资源潜力[J]. *地质与勘探*, 2019, 55(S1): 351-356.
- Hou H F, Du Q A, Lin J S, et al. Geological characteristics and resource potential of ion adsorption rare earth deposits in weathering crust of Emeishan basalt in the Shuicheng-Nayong area, Guizhou[J]. *Geology and Exploration*, 2019, 55(S1): 351-356.
- [22]王伟, 杨瑞东, 鲍淼, 等. 贵州峨眉山玄武岩区风化壳与成矿关系[J]. *贵州大学学报(自然科学版)*, 2006, 23(4): 366-370.
- Wang W, Yang R D, Bao M, et al. Discussion on the mineralization associated with the weathering crust on E'meishan basalt in Guizhou Province, China[J]. *Journal of Guizhou University (Natural Science Edition)*, 2006, 23(4): 366-370.
- [23]李广信. 论土骨架与渗透力[J]. *岩土工程学报*, 2016, 38(8): 1522-1528.
- Li G X. On soil skeleton and seepage force[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(8): 1522-1528.