



基于“3S”技术的地质灾害风险调查评估技术方法 ——以黑龙江省东宁市为例

高永志^{1,2,3}, 王恩宝⁴, 陈卓^{1,2,3}, 杨佳佳²

1. 中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心, 黑龙江 哈尔滨 150081;

2. 中国地质调查局东北地质科技创新中心, 辽宁 沈阳 110034;

3. 自然资源部哈尔滨黑土地地球关键带野外科学观测研究站, 黑龙江 哈尔滨 150086;

4. 黑龙江省自然资源调查院, 黑龙江 哈尔滨 150036

摘要: 充分利用以遥感技术(RS)、地理信息系统(GIS)和北斗卫星导航系统(BDS)为核心的“3S”技术,开展多方法、分层次、多尺度综合调查。该方法基于遥感技术全面开展地质灾害隐患早期识别;借助北斗定位导航系统进行地面验证;利用地理信息系统开展成果资料整理和地质灾害风险的综合信息预测评价分析。通过调查摸清东宁市地质灾害风险隐患,并进行科学的地质灾害风险评价,为研究区应急管理和地质灾害防治提供客观、实时、动态的地质灾害数据。

关键词: 地质灾害;遥感;地理信息系统;北斗卫星导航系统;隐患识别;风险评价;黑龙江省

RS-GIS-BDS-based technical methods for geological disaster risk investigation and assessment: A case study of Dongning City, Heilongjiang Province

GAO Yong-zhi^{1,2,3}, WANG En-bao⁴, CHEN Zhuo^{1,2,3}, YANG Jia-jia²

1. Harbin Natural Resources Comprehensive Survey Center, CGS, Harbin 150081, China; 2. Northeast China Geological Science and Technology Innovation Center, CGS, Shenyang 110034, China; 3. Harbin Observation and Research Station of Earth Critical Zone in Black Soil, MNR, Harbin 150086, China; 4. Heilongjiang Institute of Natural Resources Survey, Harbin 150036, China

Abstract: The technologies of remote sensing (RS), geographic information system (GIS), and Beidou navigation satellite system (BDS) are used to achieve a comprehensive multi-method, multi-level, and multi-scale survey, among which RS is for early identification of hidden geological hazards, BDS for ground validation, while GIS for organization of survey results and comprehensive information prediction analysis and risk assessment of geological hazards. Through

收稿日期:2024-04-18;修回日期:2024-06-26. 编辑:张哲.

基金项目:中国地质调查局东北地质科技创新中心区创基金项目“东北黑土区基于天-空-地一体化技术的侵蚀沟遥感监测方法研究”(QCJJ2023-32);中国地质调查局地质调查项目“东北地区矿山开发与生态修复状况遥感监测”(DD20230762).

作者简介:高永志(1981—),男,硕士,正高级工程师,主要从事遥感地质、环境地质和自然资源研究工作,通信地址 黑龙江省哈尔滨市南岗区保健副路1号, E-mail//gaoyongzhi@mail.cgs.gov.com

通信作者:陈卓(1989—),男,硕士,高级工程师,主要从事资源环境遥感工作,通信地址 黑龙江省哈尔滨市南岗区保健副路1号, E-mail//chenz121@163.com

引用格式:高永志,王恩宝,陈卓,杨佳佳. 基于“3S”技术的地质灾害风险调查评估技术方法——以黑龙江省东宁市为例[J]. 地质与资源, 2025, 34(4): 461-468, 450.

Gao Y Z, Wang E B, Chen Z, Yang J J. RS-GIS-BDS-based technical methods for geological disaster risk investigation and assessment: A case study of Dongning City, Heilongjiang Province [J]. Geology and Resources, 2025, 34(4): 461-468, 450.

investigation, the geological hazard risks and hidden dangers in Dongning City are identified and mapped out, as well as scientific risk assessment of geological hazards. The results provide objective, real-time, and dynamic geological hazard data to support emergency management and disaster prevention efforts in the study area.

Key words: geological disaster; RS; GIS; BDS; hidden danger identification; risk assessment; Heilongjiang Province

0 引言

地质灾害的发生发展,主要是以地貌、构造和地层岩性等地质环境条件为基础,同时受人类开垦种植、房屋道桥建设和矿山建设等工程活动影响^[1-2],进而加强了不良地质现象的发育,甚至诱发了灾害的发生,从而对人类生命和社会经济造成威胁和破坏。当前防范地质灾害的核心工作是要搞清楚隐患点在哪里,围绕这一核心,开展区域地质灾害隐患调查与评估工作,提升主动防范能力和水平。

近些年来很多地质工作者开展了“3S”技术(RS, GIS, GPS/BDS)在地质灾害调查领域的应用研究工作,取得大量成果,积累了丰富的经验^[3-23]。本次研究应用

遥感技术(RS)、地理信息系统(GIS)和北斗卫星导航系统(BDS),对遥感卫星、传感器技术、北斗定位导航、计算机技术、空间分析等多项技术措施进行高度集成整合,实现对“地质灾害隐患点在哪里”这个空间信息的动态采集、整理分析、管理表达和分析应用。在此技术思路基础上以黑龙江省东宁市为研究对象开展地质灾害风险调查,以期为该区域地质灾害管理提供客观的、时效性更强的地质灾害风险隐患底数基础数据,并且实现地质灾害风险评价及预警。

1 研究区概况

研究区位于黑龙江省东宁市行政区范围内(图1),

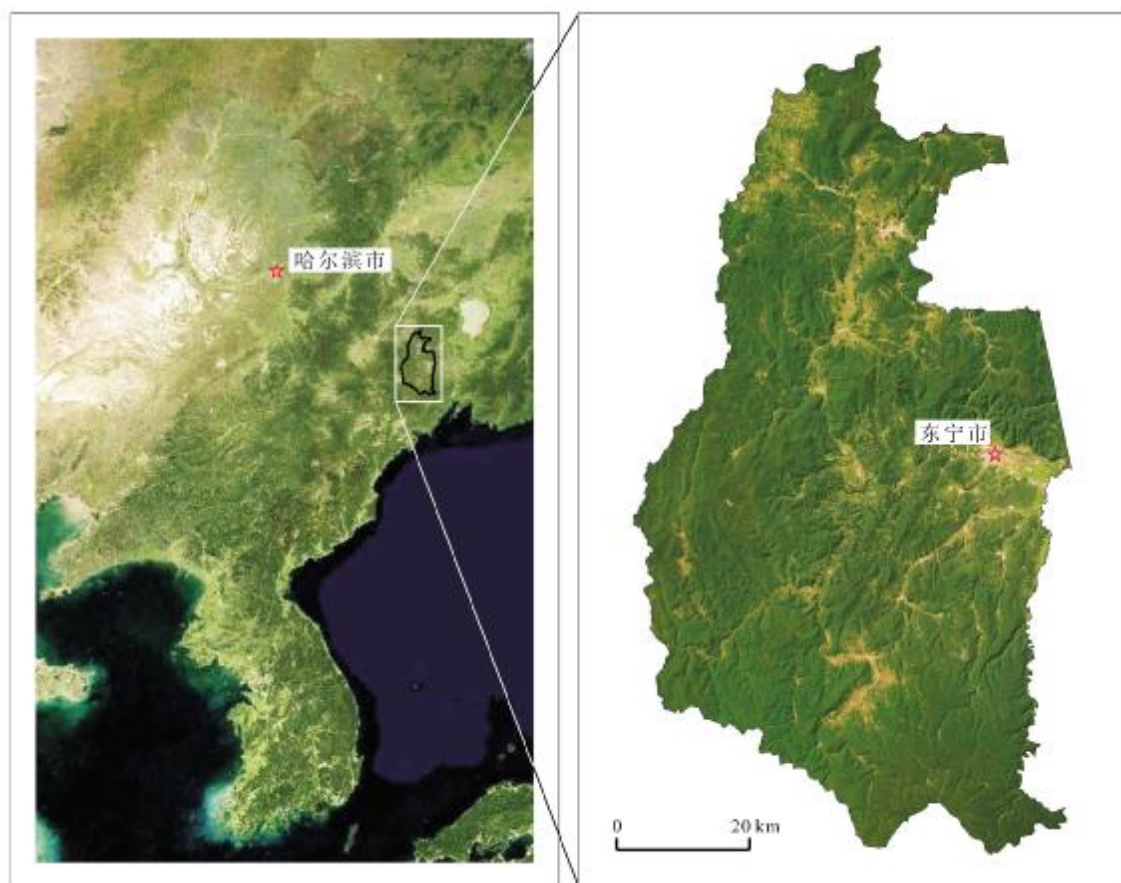


图1 研究区位置图

Fig. 1 Location map of the study area

地处中纬度寒温带,属大陆性季风气候区。东宁市地貌特征以山地为主,山地占城区总面积 80%以上,耕地仅占 5.5%。区内有大小河流 160 余条,水量充沛。东宁市矿产资源丰富,已探明的矿产有煤炭、石灰石、石英、叶腊石、黄金等 20 多种,是全国重点煤炭生产基地之一。丰富的矿产资源为黑龙江省国民经济发展提供了良好的物质条件,同时也引发了一系列环境地质问题。该地区的地质灾害孕灾地质条件、诱发因素和发育规律认识尚未全面研究,亟需开展风险调查评价。

2 技术方法

本次研究主要是按照《地质灾害风险调查评价技术要求》^[24],在充分收集利用东宁市已有地质灾害、工程地质、水文地质、环境地质、岩土工程勘察等已有成果资料基础上,综合应用“3S”技术进行调查。利用遥感卫星范围广、获取周期短^[25],可为监测提供大量高时间分辨率、高光谱分辨率和高空间分辨率的数据的特点,实现对地质灾害过去、现在、未来趋势的综合解译。实地调查阶段则是利用北斗卫星导航系统全天候、全天时、高精度的定位、导航功能,准确测定灾害位置。采用追索法及穿越法,结合实际需求绘制实测剖面,针对性使用物探、槽探以及钻探等勘查手段,准确获取灾害的诱发因素、类型、规模、形态、边界、空间分布、承灾体等基本特征。资料整理分析阶段则是利用 GIS 空间信息平台(如 ArcGIS)灵活快捷地处理、分析和管理 RS、BDS 数据及其他统计数据,借助深度数据信息挖掘技术和空间分析功能,找出地质灾害隐患点位置,实现地质灾害风险评价。应用流程见图 2。

2.1 基于遥感技术的调查准备

按照《地质灾害风险调查评价技术要求》^[24],获取东宁地区符合要求的最新高分辨率国产数据,应用几何校正、影像配准、影像镶嵌、影响融合、影像增强等遥感数据预处理手段制作合格的遥感影像图。

利用 ArcGIS 平台,基于遥感影像中地质灾害的光谱、纹理、形态、色调、阴影等特征,建立东宁市滑坡、崩塌、泥石流、地面塌陷、地裂缝、地面沉降的遥感识别解译标志。根据最新的采矿权、工程地质、水文地质、环境地质、规划以及以往地质灾害数据,采用目视解译和人机交互解译法,主要采用类比法、直译法、排除法、推测法等方式对研究区进行地质灾害遥感解译工作。提取

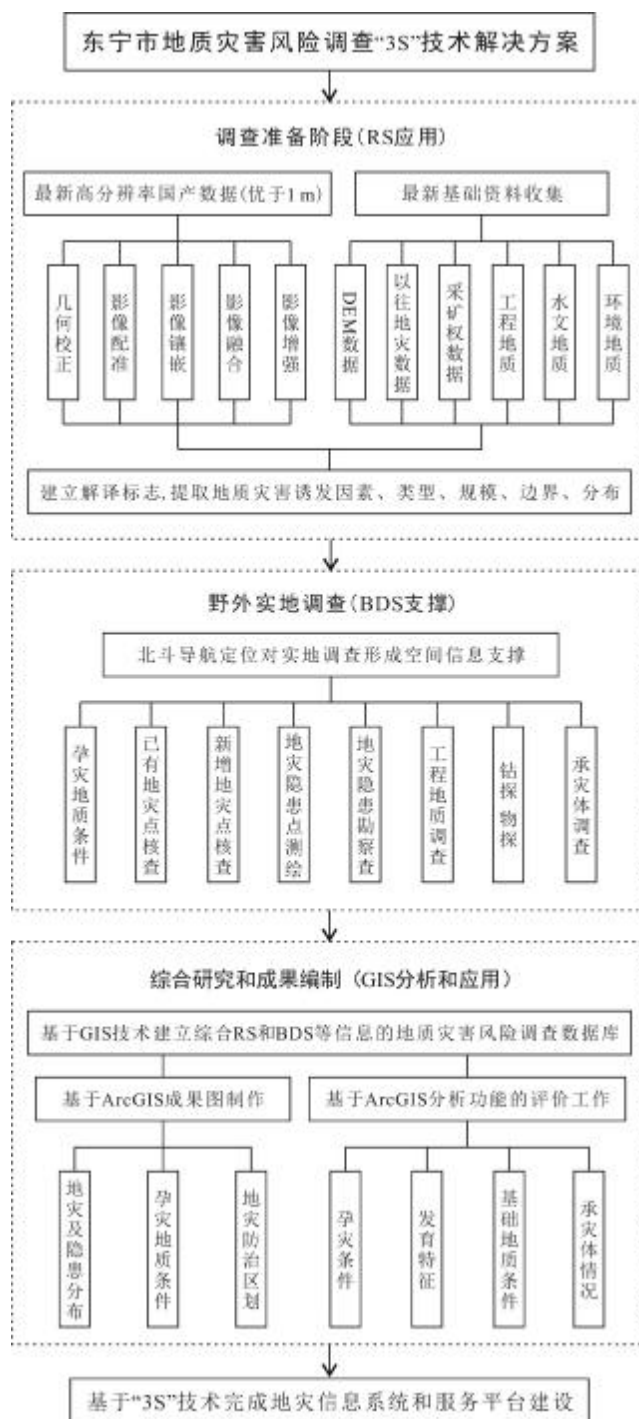


图2 地质灾害风险调查“3S”技术应用流程图

Fig. 2 Flowchart of RS-GIS-BDS technologies for geological hazard risk investigation

地质灾害的类型、边界、规模、形态和分布范围等初步信息。

基于遥感影像,开展地质灾害隐患识别相关的地形地貌、地理信息、土地利用现状、人类工程活动、地表形变信息、地表覆盖变化信息等孕灾背景数据提取收

集工作,以东宁市已有地质灾害为案例,建立地质灾害隐患的综合识别标志,采用人机交互解译工作方法对地质灾害隐患的位置、类型和活动性展开初步解译。

基于遥感影像和 DEM 数据生成三维遥感影像图,根据遥感影像情况初步圈定地质灾害影响范围和危害对象等承灾体的特征属性信息。

2.2 基于北斗卫星定位导航系统技术的实地调查

利用 BDS 定位导航技术,基于 GIS 和前期遥感解译成果,通过预制导航或坐标导航方式,实时动态指引野外调查路线,结合地形地物识别,快速、准确确定调查点位置^[26]。

实地调查过程中,利用 BDS 技术的高精度、高效率、全天候、全自动的特点,准确测定已有和新增地质灾害点及地质灾害隐患点各项基础数据,准确调查出滑坡后缘中部、泥石流堆积扇扇顶、崩塌前缘、地面塌陷坑的周缘、地面沉降中心及地裂缝位移最大区段等空间信息。

孕灾地质条件调查主要是针对斜坡构造、活动构造、工程地质岩组、易崩易滑地层点的具体地理位置信息和其他地质信息实地调查。

承灾体实地调查主要是在遥感解译的初步信息基础上,针对人口、基础设施(交通运输设施、通信设施、能源设施、市政设施、水利设施)、公共服务系统、三次产业、资源和环境等重要承灾体的空间位置信息和灾害属性信息进行调查。

2.3 基于地理信息系统技术的风险分析

地理信息系统是“3S”技术的核心部分^[27],通过地理信息系统平台综合管理和处理基于遥感技术和卫星定位导航系统获取的地质灾害风险调查数据,对评价区域的专题矢量图层进行属性运算,对栅格图层进行重分类,将专题图层的属性提取到评价单元上,将各个评价单元按照数学模型进行属性运算,生成地质灾害易发性指数矢量图层,实现地质灾害风险评价和成果图制作。地质灾害风险评价主要通过地质灾害易发性评价、危险性评价、易损性评价及最终的综合评价来实现。

2.3.1 地质灾害易发性评价

采用信息量模型作为具体数学模型,以反映在特定地质环境下最易致灾因素及其细分区间的组合,该模型通过比较特定评价单元内某种因素作用下地质灾害发生频率与区域地质灾害发生频率来确定总信息

量,考虑到每个评价单元受多种因素综合影响且各因素存在多种状态,各状态因素组合条件下地质灾害发生的总信息量可用下式确定:

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

式中, I —对应特定单元地质灾害发生的总信息量,指示地质灾害发生的可能性,可作为地质灾害易发性指数; N_i —对应特定因素第 i 状态(或区间)条件下的地质灾害面积或地质灾害点数; S_i —对应特定因素第 i 状态(或区间)的分布面积; N —研究区地质灾害总面积或总地质灾害点数; S —研究区总面积。

根据计算获得的地质灾害易发性指数数值和划分要求,对地质灾害易发性指数矢量图层进行属性运算,通过上述信息量模型,将各因子图层分级后,计算各因子的分级面积及区域内分布的斜坡地灾点数量,然后将各数据代入上述公式,得到各因子分级的信息值,利用软件重分类功能,将各因子图层赋值,形成下一步易发性叠加的基础数据。根据式(1)进行评价因子的加权叠加计算,采用自然间断法(Natural Break)将叠加计算的值为地质灾害低易发区、中易发区、高易发区和极高易发区 4 个等级,获得地质灾害易发性分区结果。

1) 评价因子选取

评价因子选取和指标体系建立的合理与否,是地质灾害易发区划分的客观前提。根据评价的原则,在对众多因子进行分析的基础上,选择重要因子进行评价。结合前人有关该类地质灾害易发性评价的研究方法,充分考虑调查区内地质灾害孕灾地质条件,选取包括高程、坡度、坡向、坡形、工程地质岩组、与断层距离、与公路距离,作为本次评价的因子。

2) 因子分级及信息量计算

将各因子图层分级后,计算各因子的分级面积及区域内分布的斜坡地灾点数量,然后将各数据代入公式(1),得到各因子分级的信息值(表 1)。利用软件重分类功能,将各因子图层赋值,形成下一步易发性叠加的基础数据。

2.3.2 危险性评价

易发性评价是针对灾害体本身的影响因子指标分析,而地质灾害危险性是指在某种诱发因素作用下,一定区域内某一时间段发生特定规模和类型地质灾害的可能性。根据区域特征,选用降雨作为诱发因素进行危

表 1 各因子信息量计算结果一览表
Table 1 Calculation information values of each factor

因子	区间	信息量
高程/m	<200	1.97
	200~500	0.55
	500~1100	-2.12
坡度/(°)	<15	-0.32
	15~25	0.85
	25~35	1.96
	35~45	/
	>45	/
坡向/(°)	292.5~22.5	-1.27
	22.5~67.5	-0.48
	67.5~112.5	0.41
	112.5~157.5	0.0003
	157.5~202.5	0.93
	202.5~247.5	0.41
	247.5~292.5	-0.48
工程地质岩组	松散岩组	1.72
	坚硬的碎屑岩岩组	0.27
	坚硬的侵入岩岩组	0.03
	坚硬的变质岩岩组	-1.16
	坚硬的喷出岩岩组	-1.00
	较软岩岩组	/
与断层距离/m	<1000	0.15
	1000~2000	-0.02
	2000~4000	-0.27
	>4000	0.07
与公路距离/m	<100	3.10
	100~200	0.92
	200~300	0.66
	300~500	-1.09
	>500	-1.48
斜坡剖面形态	凹形坡	0.92
	直线型坡	-1.59
	凸形坡	0.19

险性评价。
本研究以易发性表征地质灾害的空间概率,以降雨重现概率表征时间概率,危险性按下式计算:

$$H=I\times\frac{H_{24p}}{H_{24}}$$

(2)

式中, H —每个单元的危险性指数; I —每个单元的信息量; H_{24p} —不同重现期下研究区年最大日降雨量; H_{24} —年最大日降雨量均值。

2.3.3 易损性评价

主要开展人口易损、道路易损和建筑物易损评价,最后叠加获取评价范围内的综合易损。易损性赋值见表 2。

表 2 一般调查区承灾体易损性赋值建议表
Table 2 Vulnerability valuation of disaster-bearing bodies in general investigation areas

承灾体类型	分级	赋值
受地质灾害直接威胁人口数量/人	≥ 1000	0.8~1.0
	100~1000	0.5~0.8
	10~100	0.3~0.5
	<10	0~0.3
交通设施	高速公路	0.8~0.9
	国家级公路	0.5~0.8
	省级公路	0.3~0.5
	城市道路	0.2~0.3
	一般公路	0.1~0.3
	高速铁路	0.8~1.0
其他生活设施	一般铁路	0.3~0.6
	油气线路	0.8~1.0
	输水线路	0.4~0.7
	输电线路	0.4~0.7
	通讯线路	0.3~0.6

2.3.4 风险评价

按照前文得到易发性、危险性和易损性评价结果,将易损性和危险性进行矩阵叠加分级。根据《地质灾害风险评价调查技术要求》中表 D.2 的风险评价矩阵(表 3),将易损性和危险性进行矩阵叠加分级,得到县域单元的风险评价图。

表 3 地质灾害风险等级划分建议表
Table 3 Grading of geological disaster risks

风险等级/危险性 易发性	极高	高	中	低
极高	极高	极高	高	中
高	极高	高	中	中
中	高	高	中	低
低	高	中	低	低

在此基础上,结合东宁市地质灾害特点、承灾体情况,对不同等级风险性评价单元进行人工修正,最终将东宁市划分为地质灾害高风险区、中风险区和低风险区 3 个风险区(图 3)。高风险区(Ⅰ)面积 107.03 km²,占全域面积的 1.50%,灾害点密度为 17.75 个/100 km²;中风险区(Ⅱ)面积 284.54 km²,占全域面积的 4.00%,灾害点密度为 9.14 个/100 km²;低风险区(Ⅲ)面积 6 726.67 km²,占全域面积的 94.50%,灾害点密度为 0.37 个/100 km²。

地质灾害高风险区临近东宁镇、大肚川镇等人口密集区,人口密度大,人类工程活动强烈。地质灾害类型以崩塌为主,主要威胁区域为主干公路及城镇,该区域构造较发育,岩土体物理力学性质较差;地质灾害中风险区主要分布于道河镇、绥阳镇、东宁镇、三岔口镇及周边,该区域人口集中,筑路建房等人类工程活动较强,区内地貌类型主要为低山区;地质灾害低风险区为高风险区、中风险区以外的其他区域,这些区域整体致灾作用较弱,地质灾害发育程度弱,人口密集程度较低,人类工程活动较弱。东宁市地质灾害易发性以低易发与非易发为主。该评价结果与实际较相符。

3 地质灾害现场验证

利用 BJ2、GF2、GJ2 等国产高分辨率遥感影像数据,开展基于“3S”技术的地质灾害风险调查工作。结果表明,东宁市主要地质灾害包括崩塌、滑坡、不稳定斜坡、泥石流、切坡建房和地裂缝,共计 348 处地灾,以崩塌为主。通过调查在区域内共发现滑坡灾害及隐患点 59 处,崩塌灾害及隐患点 207 处,不稳定斜坡 36 处,泥石流灾害及隐患点 40 处,切坡建房 5 处,地裂缝 1 处。

崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害,主要分布在露天

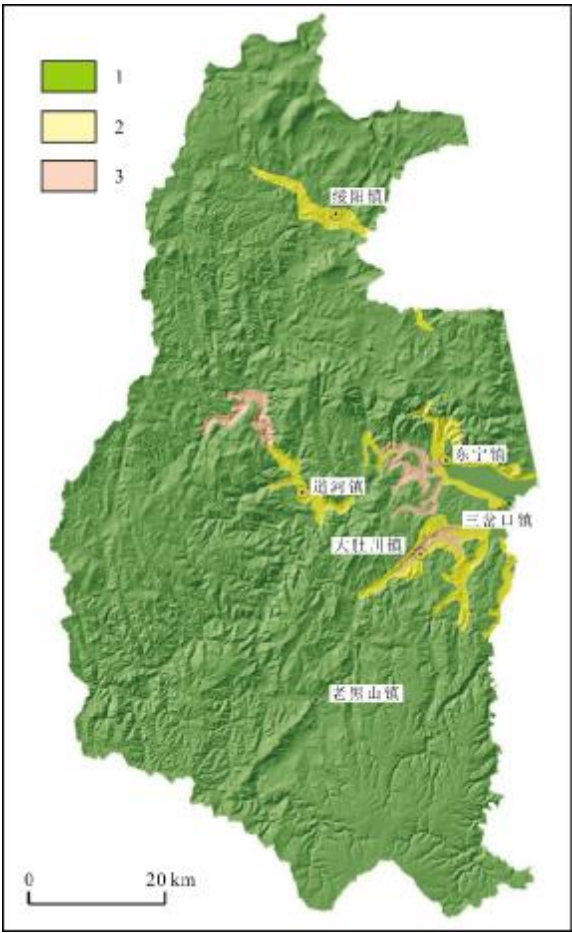


图 3 东宁市地质灾害风险评价区划图
Fig. 3 Geological hazard risk zoning map of Dongning City
1—低风险(low risk); 2—中风险(medium risk); 3—高风险(high risk)

矿山采场区、交通干线两侧、居民点周边。崩、滑、流主要是由于人类活动造成,例如位于东宁市绥阳镇东胜村北的一处崩塌地质灾害,经实地验证该处为东宁鼎盛石材有限责任公司采石场的开采面,在崩塌底部形成倒石堆(见图 4)。



图 4 东宁市东胜村北崩塌遥感影像图
Fig. 4 RS image of collapse in Dongsheng Village

东宁市道河镇金厂西村北部存在2处滑坡,滑坡体长约107 m,平面面积0.58 hm²,坡体前缘高程268 m,滑坡起点山腰后缘高程340 m,滑坡坡度63°,破坏了山体植被,严重威胁道河镇农田(见图5)。此处滑坡灾害的形成,主要是由于采石场开采,山体坡脚开挖,造成坡体失稳,加之此处植被覆盖稀疏,表层松散的碎屑堆积物在重力、降水、冻土冻融等作用下整体向下滑动引起的。



图5 东宁市金厂西村北滑坡遥感影像图

Fig. 5 RS image of landslide in northern Jinchang West Village

绥阳镇东风村中部存在一处泥石流,如图6所示。泥石流沟位于新近系船底山组砂质泥岩覆盖层之上,表现出强烈风化碎裂;而下部则是晚三叠纪一早侏罗纪二长花岗岩,在上部露头部位呈全风化至强风化状态,下部为中度风化。该泥石流属于山坡型泥石流类型,并未明显形成源头冲刷带、输移通道和堆积扇等不同功能片段;其源头冲刷带呈漏斗形态;输移通道呈“V”字谷形态,平均坡度约25°,平均宽度约7 m;堆积扇沟口较窄,在源头冲刷带和输移通道位置有一些崩塌事件产生。泥石流主沟谷较为深切,长度约为400 m,流域平面形态呈现为梨形,流域内海拔最高点位于物源供给范围内,高程约565 m;而海拔最低点位于堆积扇位置,高程约475 m。整个流域相对高差约90 m,沟床平均比降151.8‰,这为泥石流的发生提供了比较充分的动力条件。流域面积约为0.14 km²,虽然流域面积较小不利于泥石流灾害形成,但是沟床纵比降较大,沟谷内水流的汇聚速度较快,对于松散物质的启动较为有利。泥石流流域上游的斜坡部位发育有一定数量的崩塌灾害,崩塌产生的松散堆积物以及坡体原有的大量坡积物等为泥石流的形成提供了主要的物源条件。

总的来说,该流域内岩土体的工程地质较差,冲沟深切,冲沟纵坡大,松散物丰富,但其汇水面积及沟床纵坡比较小。利用地质灾害风险调查评价规范中的评分表对该处泥石流进行综合评分,最终判断该处泥石流灾害点属轻度易发泥石流。



图6 东宁市东风村北泥石流遥感影像图

Fig. 6 RS image of debris flow in northern Dongfeng Village

通过现场调查及野外验证,孕灾地质条件、灾害点类型及分布、财产易损性等实际状况与评价结果一致性较高,符合客观实际。

4 结论

1)应用“3S”技术开展地质灾害综合风险调查可以全面客观地反映地质灾害实际情况,为灾害调查和风险评估提供技术支撑。

2)东宁市地质灾害数量较多,但以小型地质灾害为主,且地质灾害种类较为集中,主要为崩塌灾害。

3)东宁市地质灾害主要是由于矿山开采、道路修建和房屋建设等人类活动诱发或加剧。

参考文献(References):

- [1]Lee J, Barbato M, Lee D K. Rockfall hazard analysis based on the concept of functional safety with application to the highway network in South Korea[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2021, 54(12): 6633–6647.
- [2]Lu Z K, Yu C L, Liu H N, et al. Application of AHP-ICM and AHP-EWM in collapse disaster risk mapping in Huinan County[J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2023, 12(10): 395.
- [3]罗真富, 齐信, 易静. 遥感三维可视化在南沟泥石流调查中的运用[J]. 环境科学与管理, 2010, 35(1): 144–146.
- Luo Z F, Qi X, Yi J. Application of three-dimensional visualization of remote sensing images in the investigation of the Nangou debris flow[J].

- Environmental Science and Management, 2010, 35(1): 144–146.
- [4] 杜瑞玲, 赵志芳, 洪友堂, 等. 安宁磷矿区基于 3S 技术的矿山地质灾害隐患三维判识[J]. 国土资源遥感, 2012, 24(2): 138–142.
- Du R L, Zhao Z F, Hong Y T, et al. Three-dimensional discriminate of mine hidden geological disaster based on 3S technology of Anning phosphate area[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2012, 24(2): 138–142.
- [5] 高永志, 初禹, 杨元江. 遥感技术在矿致滑坡成因分析中的应用[J]. 地质与资源, 2021, 30(2): 161–167.
- Gao Y Z, Chu Y, Yang Y J. Application of remote sensing technology in cause analysis of mining-induced landslide[J]. Geology and Resources, 2021, 30(2): 161–167.
- [6] 高永志, 初禹, 薛广垠, 等. 黑龙江省矿山地质灾害遥感调查研究[J]. 地质与资源, 2017, 26(2): 161–164, 189.
- Gao Y Z, Chu Y, Xue G Y, et al. Remote sensing survey of geological hazards of mines in Heilongjiang Province[J]. Geology and Resources, 2017, 26(2): 161–164, 189.
- [7] Ubaidulloev A, Hu K H, Rustamov M, et al. Landslide inventory along a national highway corridor in the Hissar-Allay Mountains, Central Tajikistan[J]. GeoHazards, 2021, 2(3): 212–227.
- [8] Albanwan H, Qin R J, Liu J K. Remote sensing-based 3D assessment of landslides: A review of the data, methods, and applications[J]. Remote Sensing, 2024, 16(3): 455.
- [9] Li Y L, Ding M T, Zhang Q, et al. Old landslide detection using optical remote sensing images based on improved YOLOv8[J]. Applied Sciences, 2024, 14(3): 1100.
- [10] Zhao S F, Zeng R Q, Zhang Z L, et al. Landslide mapping and causes of landslides in the China-Nepal transportation corridor based on remote sensing technology[J]. Remote Sensing, 2024, 16(2): 356.
- [11] Zhou S S, Chen B L, Lu H Y, et al. Analysis of the spatial distribution and deformation types of active landslides in the Upper Jinsha River, China, using integrated remote sensing technologies[J]. Remote Sensing, 2024, 16(1): 100.
- [12] 王正庆, 李策, 陈雨林, 等. 基于遥感技术的地质灾害解译及评价监测进展[J]. 南华大学学报(自然科学版), 2023, 37(2): 31–36.
- Wang Z Q, Li C, Chen Y L, et al. Progress in interpretation, evaluation and monitoring of geohazards based on remote sensing technology[J]. Journal of University of South China (Science and Technology), 2023, 37(2): 31–36.
- [13] 张光敏, 戴王飞. 遥感技术在繁昌区地质灾害风险调查评价中的应用[J]. 西部资源, 2023(4): 93–94.
- Zhang G M, Dai W F. Application of remote sensing technology in geological disaster risk investigation and evaluation in Fanchang District[J]. Western Resources, 2023(4): 93–94. (in Chinese)
- [14] 兰盈盈, 郭昶成, 朱云福. 地质灾害易发性评价方法综述[J]. 地质与资源, 2024, 33(1): 65–73.
- Lan Y Y, Guo C C, Zhu Y F. Review on the evaluation methods of geological hazard susceptibility[J]. Geology and Resources, 2024, 33(1): 65–73.
- [15] 陈曦, 胥兵, 陈爱明, 等. 遥感技术在提取滑坡背景环境因素的应用——以湖北省房县地区滑坡地质灾害为例[J]. 资源环境与工程, 2014, 28(6): 950–959.
- Chen X, Xu B, Chen A M, et al. Application of remote sensing technology in extraction of environmental background factors of landslide[J]. Resources Environment & Engineering, 2014, 28(6): 950–959.
- [16] 王娜, 徐素宁, 王赛, 等. 多源遥感数据在新疆精河县震后滑坡调查中的应用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2018, 29(4): 58–63.
- Wang N, Xu S N, Wang S, et al. The application of post-earthquake landslide investigation based on multi-source remote sensing data in Jinghe County of Xinjiang[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2018, 29(4): 58–63.
- [17] 童立强, 张晓坤, 程洋, 等. “8·7”甘肃舟曲县特大泥石流灾害遥感解译与评价研究[J]. 遥感信息, 2011, 33(5): 109–113.
- Tong L Q, Zhang X K, Cheng Y, et al. Remote sensing interpretation and evaluation of super-large geological disasters caused by “8·7” debris flow of Zhouqu[J]. Remote Sensing Information, 2011, 33(5): 109–113.
- [18] 徐启业. 基于 GIS 的地质灾害风险性评价与区划——以四川省得荣县为例[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2020.
- Xu Q Y. Risk assessment and division of geological disasters based on GIS: Take Derong County of Sichuan Province as an example[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2020.
- [19] 李向东, 王俊彪. 基于 GIS 的武胜县地质灾害风险调查评价[J]. 区域治理, 2020(46): 134–135, 140.
- Li X D, Wang J B. Geological disaster risk investigation and evaluation in Wusheng County based on GIS[J]. Regional Governance, 2020(46): 134–135, 140. (in Chinese)
- [20] Kundu J, Sarkar K, Ghaderpour E, et al. A GIS-based kinematic analysis for jointed rock slope stability: An application to Himalayan slopes[J]. Land, 2023, 12(2): 402.
- [21] Malka A. GIS-based landslide susceptibility modelling in urbanized areas: A case study of the tri-city area of Poland[J]. GeoHazards, 2022, 3(4): 508–528.
- [22] Dhungana G, Ghimire R, Poudel R, et al. Landslide susceptibility and risk analysis in Benighat Rural Municipality, Dhading, Nepal[J]. Natural Hazards Research, 2023, 3(2): 170–185.

- soil nutrient distribution and determination of reasonable sampling density[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2014, 45(3): 556-561.
- [17]黄绍文, 金继运. 土壤特性空间变异研究进展[J]. 土壤肥料, 2002, 39(1): 8-14.
- Huang S W, Jin J Y. Advance in study on spatial variability of soil properties[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2002, 39(1): 8-14.
- [18]王云强, 张兴昌, 李顺姬, 等. 小流域土壤矿质氮与地形因子的关系及其空间变异性研究[J]. 环境科学, 2007, 28(7): 1567-1572.
- Wang Y Q, Zhang X C, Li S J, et al. Spatial variability and the relationships of soil mineral N and topographic factors in a small watershed[J]. Environmental Science, 2007, 28(7): 1567-1572.
- [19]沈思渊. 土壤空间变异研究中地统计学的应用及其展望[J]. 土壤学进展, 1989(3): 11-24, 35.
- Shen S Y. The application and prospects of geostatistics in the study of soil spatial variation [J]. Progress in Soil Science, 1989(3): 11-24, 35. (in Chinese)
- [20]姜秋香, 付强, 王子龙. 空间变异理论在土壤特性分析中的应用研究进展[J]. 水土保持研究, 2008, 15(1): 250-253.
- Jiang Q X, Fu Q, Wang Z L. Research progress of the spatial variability theory in application to soil characteristic analysis[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2008, 15(1): 250-253.
- [21]冯娜娜, 李廷轩, 张锡洲, 等. 不同尺度下低山茶园土壤有机质含量的空间变异[J]. 生态学报, 2006, 26(2): 349-356.
- Feng N N, Li T X, Zhang X Z, et al. The spatial variability of the content of organic matter in hilly tea plantation soils with different sampling scales[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(2): 349-356.
- [22]范曼曼, 吴鹏豹, 张欢, 等. 采样密度对土壤有机质空间变异解析的影响[J]. 农业现代化研究, 2016, 37(3): 594-600.
- Fan M M, Wu P B, Zhang H, et al. Effect of sampling density on spatial variability analysis of soil organic matter [J]. Research of Agricultural Modernization, 2016, 37(3): 594-600.
- [23]黄绍文, 金继运, 杨俐苹, 等. 县级区域粮田土壤养分空间变异与分区管理技术研究[J]. 土壤学报, 2003, 40(1): 79-88.
- Huang S W, Jin J Y, Yang L P, et al. Spatial variability and regionalized management of soil nutrients in the grain crop region in Yutian County[J]. Acta Pedologica Sinica, 2003, 40(1): 79-88.
- [24]姚丽贤, 周修冲, 蔡永发, 等. 不同采样密度下土壤特性的空间变异特征及其推估精度研究[J]. 土壤, 2004, 36(5): 538-542.
- Yao L X, Zhou X C, Cai Y F, et al. Spatial variability of soil properties at different sampling intensities and accuracy of their estimation [J]. Soils, 2004, 36(5): 538-542.
- [25]黄利红, 周卫军, 田珂, 等. 基于 GIS 的醴陵市耕地土壤肥力变异研究[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2009, 43(1): 156-161.
- Huang L H, Zhou W J, Tian K, et al. Study on the changes of the cultivated soil fertility in Liling County based on GIS [J]. Journal of Huazhong Normal University (Natural Sciences), 2009, 43(1): 156-161.
- [26]王淑英, 路苹, 王建立, 等. 北京市平谷区土壤有机质和全氮的空间变异分析[J]. 北京农学院学报, 2007, 22(4): 21-25.
- Wang S Y, Lu P, Wang J L, et al. Spatial variance of soil organic matter and total nitrogen in Pinggu of Beijing [J]. Journal of Beijing University of Agriculture, 2007, 22(4): 21-25.

(上接第 468 页/Continued from Page 468)

- [23]冯旻譔, 毛伊敏, 贾俊, 等. 地质灾害危险性评价中不同机器学习方法优劣对比: 以宁强县大安镇为例[J]. 中国地质, 2025, 52(1): 205-214.
- Feng M X, Mao Y M, Jia J, et al. Comparison of the advantages and disadvantages of different machine learning methods in geohazard risk assessment: Taking Da'an Town, Ningqiang County as an example[J]. Geology in China, 2025, 52(1): 205-214.
- [24]中华人民共和国地质矿产行业标准 DZ/T 0438—2023 地质灾害风险调查评价规范(1:50 000) [S]. 2023-04-19.
- Geological and mineral industry standards of the People's Republic of China DZ/T 0438—2023 Specification of geological hazard risk survey and assessment (1:50 000) [S]. 2023-04-19. (in Chinese)
- [25]张丽雯, 鲁海峰. 3S 技术在煤矿地质灾害中的应用现状综述[J]. 软件工程与应用, 2021, 10(4): 549-556.
- Zhang L W, Lu H F. Summary of application status of 3S technology in coal mine geological hazards[J]. Software Engineering and Applications, 2021, 10(4): 549-556.
- [26]杨旭东, 李媛, 佟彬, 等. 基于移动 3S 技术的地质灾害野外调查数据采集系统设计与实现[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2016, 27(4): 93-96, 113.
- Yang X D, Li Y, Tong B, et al. Design and implementation of field data acquisition system for geo-hazards survey based on mobile 3S technology [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2016, 27(4): 93-96, 113.
- [27]朱双燕, 马艳洁. 3S 技术在矿山地质灾害监测及防治中的应用研究[J]. 工程技术与应用, 2018(16): 46-47.
- Zhu S Y, Ma Y J. Research on the application of 3S technology in mine geological disaster monitoring and prevention [J]. Engineering Technology and Application, 2018(16): 46-47. (in Chinese)