

doi: 10.6046/zrzyyg.2022292

引用格式: 王宁,姜德才,郑向向,等. 基于多源异构数据斜坡地质灾害隐患易发性评价——以深圳市龙岗区为例[J]. 自然资源遥感,2023,35(4):122–129. (Wang N, Jiang D C, Zheng X X, et al. Assessing the susceptibility of slope geological hazards based on multi-source heterogeneous data: A case study of Longgang District, Shenzhen City[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2023, 35(4):122–129.)

基于多源异构数据斜坡地质灾害隐患易发性评价 ——以深圳市龙岗区为例

王 宁¹, 姜德才^{1,2,3}, 郑向向^{1,2,4}, 钟 昶^{1,5}

(1. 中国自然资源航空物探遥感中心, 北京 100083; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院西北生态环境资源研究院, 兰州 730000; 4. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094; 5. 国防科技大学智能科学学院, 长沙 410073)

摘要: 为摸清深圳市龙岗区斜坡地质灾害隐患底数,查明该地区灾害易发区域分布情况,以多源遥感卫星数据为基础,利用地质灾害解译平台,采用专家判读方法解译斜坡地质灾害隐患,并采用野外验证与百度街景数据相结合的方式对部分解译隐患进行验证。最后利用信息量法,以坡高、坡度、降雨量、地表岩性和土地覆被等为评价因子,获得龙岗区斜坡地质灾害隐患易发区分布情况;同时利用已发地质灾害点与易发性评价结果进行叠加分析。结果显示评价结果与已发灾害点分布完全吻合,说明该方法在斜坡地质灾害易发性评价的有效性,同时也侧面证明了遥感解译斜坡地质灾害隐患的准确性。

关键词: 地质灾害隐患识别; 时序 InSAR; 易发性评价; 信息量模型

中图法分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-034X(2023)04-0122-08

0 引言

中国是自然灾害最为严重的国家之一,随着经济的快速发展及城市化加速推进,诱发自然灾害形成的因素更加复杂,应对以及防范自然灾害的形势更显严峻。政府部门一直对风险评估和管理研究工作的开展以及防灾减灾工作的推进十分关注。2020年国务院办公厅发布了《国务院办公厅关于开展第一次全国自然灾害综合风险普查的通知》(国办发〔2020〕12号),通过开展普查,摸清全国自然灾害风险隐患底数,查明重点地区抗灾能力,客观认识全国和各地区自然灾害综合风险水平,为中央和地方各级人民政府有效开展自然灾害防治工作、切实保障经济社会可持续发展提供权威的依据。

针对地质灾害风险防治的实际需求,许多学者在地质灾害隐患调查评价方面已经开展了大量的工作。吴志斌^[1]从工程地质的角度分析了龙岗区地质灾害的成因;熊金安等^[2]从地质条件、地貌条件、

人为因素分析了地质灾害特征及成因;姚玲等^[3]利用已发地质灾害点,结合地质、岩性等因子,开展了深圳市地质灾害隐患易发性评价工作。评价方法主要是基于 GIS 平台,结合信息量模型^[4-6]、层次分析法^[7-9]和机器学习^[10-11]等,对斜坡地质灾害易发性评价进行研究。分析了诸多学者开展的工作,地质灾害隐患评价分析主要是利用已发灾害点或光学遥感解译灾害点(实地验证)进行,取得了一定的成果,但也存在一定的问题。首先,利用已发灾害点开展工作,对于已知灾害发生较少区域,不具有普适性,不能客观地评价整体地质灾害易发程度;其次,对于植被覆盖茂密地区,受到植被影响,仅采用光学遥感解译地质灾害隐患存在一定的困难,无法全面了解区域地质灾害隐患分布情况;最后,面对大范围地质灾害易发性评价工作,传统的方法手段需要耗费大量人力物力,且短时间难以完成。

基于以上情况,本文以深圳市龙岗区为研究对象,利用中国自然资源航空物探遥感中心地质灾害三维解译平台,使用高分辨率光学遥感影像、高精度

收稿日期: 2022-07-27; 修订日期: 2023-03-25
基金项目: 中国地质调查局项目“基础地质遥感调查”(编号: DD20230011)和自然资源部航空地球物理与遥感地质重点实验室课题“基于深度学习的黄河源区岩屑坡提取及成因机理研究”(编号: 2023YFL25)共同资助。
第一作者: 王 宁(1988-), 硕士, 高级工程师, 研究方向为航空物探遥感数据处理与应用。Email: Ning. - Wang@163.com。
通信作者: 钟 昶(1988-), 硕士, 教授级高级工程师, 研究方向为遥感卫星地质应用。Email: 415440331@qq.com。

数字高程模型(digital elevation model,DEM)和合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture Radar,InSAR)地表形变监测结果,开展研究区斜坡地质灾害隐患遥感解译,并利用百度街景地图,对部分解译隐患进行验证。在此基础上,结合降雨量、地表覆被和地表岩性等多源数据,根据“地质灾害风险调查评价技术要求(1:50 000)”相关要求^[12],开展斜坡地质灾害易发性评价研究。并利用已发地质灾害点对易发性评价结果进行验证,确保易发性评价结果的准确性,为龙岗区土地利用规划、建设以及地质灾害防控提供技术支撑。

1 研究区概况

龙岗区隶属广东省深圳市,位于深圳市东北部,地处亚热带海洋季风带,气候温和湿润,该区雨季在5—9月,1—3月和10—12月为旱季,深圳市国家基本气象站年累积雨量常年气候平均值为1 935.8 mm,最大降雨量达到2 662.2 mm;龙岗区母岩风化强烈,表层多分布有较厚残积土、砂质黏性土等,自然地质环境条件复杂^[8];地形以低山丘陵为主,总地势西南高东北低,在低山与丘陵之间形成一些冲积台地及山间盆地;海岸地貌发育,长达130 km的海岸线。

2 技术方法

2.1 总体技术路线

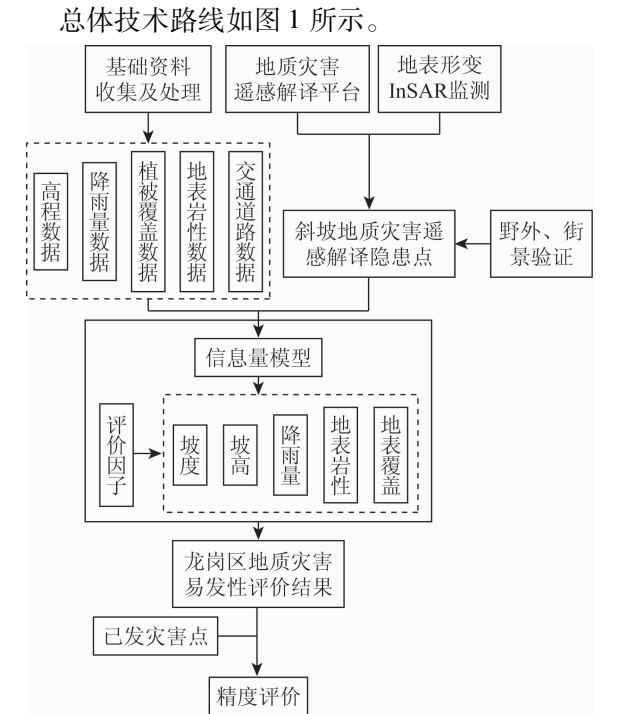


图 1 斜坡地质灾害隐患易发性评价技术路线
Fig.1 Technical route for evaluating the susceptibility of slope geological hazards

通过研究分析龙岗区地质灾害情况、地质背景、气候条件和人类工程活动情况等数据资料,利用中国自然资源航空物探遥感中心三维解译平台,结合InSAR 地面沉降监测结果,开展龙岗区斜坡地质灾害隐患解译工作,提高地质灾害隐患遥感识别准确率。在此基础上,采用信息量模型评价方法,以降雨量、地表覆被、地表岩性、坡度和坡高为评价因子,根据“地质灾害风险调查评价技术要求(1:50 000)”相关要求,开展龙岗区斜坡灾害易发性评价,并利用已发地质灾害点对结果进行精度验证。

2.2 斜坡地质灾害隐患遥感解译方法

斜坡地质灾害隐患遥感识别是基于高分辨率遥感影像、DEM 数据和 InSAR 地表形变监测数据,采用人机交互专家判读方式来获取隐患区域的相关信息。其原理是以 InSAR 地表形变监测结果为参考依据,基于斜坡体与其背景地质体之间存在的色调、形状、阴影、纹理及图形的差异(表 1),在遥感影像上显示为特定的色调、纹理及几何形态组合,进而建立斜坡地质灾害隐患识别的解译标志^[13]。

表 1 地质灾害光学影像特征

Tab.1 Optical image characteristics of geological hazards

序号	类型	光学影像特征
1	滑坡	影像上表现为圈椅状地形、双沟同源、坡体后部出现平台洼地,与周围河流阶地、构造平台或与风化差异平台不一致的大平台地形,“大肚子”斜坡、不正常河流弯道等
2	崩塌	影像上一般呈现白色调或者浅色调,在崩塌体上部色调较亮,下部亮度稍微较暗;对于新发生的崩塌,呈现出新鲜的结构面,对光谱具有加强的反射能力,使得影像呈浅色调
3	泥石流	影像具有树枝状、痕状冲沟,植被镶嵌其中,呈条状或者零星状,真彩色影像中颜色为绿、紫红相间,绿色植被部分似突起的“山脊”
4	不稳定斜坡	无明显特征,主要参考 InSAR 形变监测数据

2.3 InSAR 地面沉降监测方法

龙岗区内人工建筑设施和天然的岛屿、礁石、海蚀崖、桥、柱等可以构成时间序列 InSAR 稳定性高相干点目标。采用较为成熟的 SBAS-InSAR 技术开展龙岗区地表沉降监测。

SBAS-InSAR 是一种与 PS-InSAR 技术采用不同策略的时间序列 InSAR 分析方法^[14-16],该方法通过将获取的数据进行合适组合,得到一系列短空间基线差分干涉图,这些差分干涉图能够较好地克服空间去相关(失相干)现象。在求解形变速率时,SBAS 方法采用了奇异值分解法(singular value decomposition,SVD),可以将被较大空间基线分开的孤立 SAR 数据集连接起来,提高了观测数据时间采样率。SBAS-InSAR 技术基本原理是通过简单和

高效地合成所有可用的小基线干涉图对,然后再基于形变速率的最小范数准则,通过应用 SVD 方法获取相干目标的形变速率及其时间序列^[17]。SBAS-InSAR 技术的优点是能够利用具有较短时一空基线的影像对产生干涉图提高相干性,进而提高干涉相位解缠正确率^[18]。

SBAS-InSAR 技术数据处理流程(图 2)的主要步骤可以分为 7 步:①估算所有 SAR 图像的基线,根据短时空基线原则确定时空基线阈值,生成连接图;②对图像进行配准,生成干涉纹图,精确估算空间基线,结合 DEM 数据去除平地相位和地形相位,对差分干涉图进行滤波等;③对所有差分图进行基线精化、重新去除平地与地形相位、相位解缠;④根据相干系数图,选择图像上的高相干点;⑤对结果进行第一次反演,建立线性模型,利用矩阵 SVD 方法,估算形变速率和高程系数;⑥对结果进行第二次反演,去除大气效应和地形残余相位,得到最终的相干点形变速率,并确定相干点三维位置信息,然后计算非线性形变速率并得到相干点形变序列;⑦得到最终的位置时间序列后,可以进行必要的地理编码和时序分析。

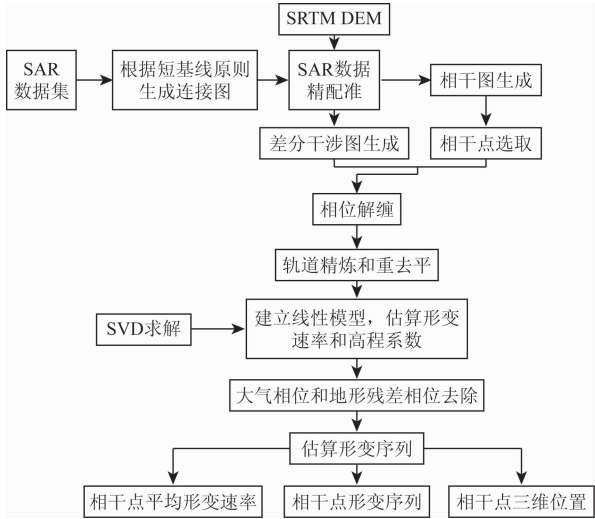


图 2 SBAS-InSAR 处理过程
Fig.2 SBAS-InSAR processing

2.4 信息量模型

地质灾害的形成受多种因素影响,信息量模

型^[12]反映了一定地质环境下最易致灾因素及其细分区间的组合,具体是通过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相比较实现的。对应某种因素特定状态下的地质灾害信息量的公式为:

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

式中: $IA_{j \rightarrow B}$ 为对应因素 A 在 j 状态(或区间)下地质灾害 B 发生的信息量; N_j 为对应因素 A 在 j 状态(或区间)下地质灾害分布的单元数; N 为调查区已知有地质灾害分布的单元总数; S_j 为因素 A 在 j 状态(或区间)分布的单元数; S 为调查区单元总数。

当 $IA_{j \rightarrow B} > 0$ 时,反映了对应因素 A 在 j 状态(或区间)下地质灾害发生倾向的信息量较大,地质灾害发生的可能性较大,或者说利于地质灾害发生;当 $IA_{j \rightarrow B} < 0$ 时,表明因素 A 在 j 状态(或区间)条件下,不利于地质灾害发生;当 $IA_{j \rightarrow B} = 0$ 时,表明因素 A 在 j 状态(或区间)不提供有关地质灾害发生与否的任何信息,即因素 A 在 j 状态(或区间)可以剔除掉,排除其作为地质灾害预测因子。

由于每个评价单元受众多因素的综合影响,各因素又存在若干状态,各状态因素组合条件下地质灾害发生的总信息量的公式为:

$$I = \sum_{j=1}^n \ln \frac{N_j/N}{S_j/S}, \quad (2)$$

式中 I 为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。

3 斜坡地质灾害易发性评价

3.1 InSAR 地表形变监测

采用 SBAS-InSAR 技术,利用欧空局的 C 波段(5.6 cm)的 Sentinel-1A 数据集及精密轨道数据,通过下载获取 27 景 2018 年 10 月 16 日—2019 年 12 月 10 日、26 景 2019 年 8 月 12 日—2020 年 8 月 30 日 2 个时段 Sentinel-1A 数据集开展了龙岗区地表沉降反演。SAR 数据集基本参数如表 2 所示。

表 2 Sentinel-1A 数据集基本参数
Tab.2 Basic parameters of Sentinel-1A dataset

传感器名称	成像模式	轨道方向	波长/cm	分辨率(Az × Rg) ^① /m	入射角/(°)	获取日期
Sentinel-1A	TOPS 模式	升轨	5.6	13.9 × 3.7	38.94	20181016—20191210 20190812—20200830

①: Az × Rg 表示方位向 × 距离向。

按照龙岗区行政边界并外扩约 1/4 范围,对 Sentinel-1A 影像裁剪,对裁剪的子区域开展时序

InSAR 数据处理,其中多视处理参数设置为: Az × Rg = 1 × 4,地面分辨率分别为 13.9 m × 14.8 m。2

个时段的 SBAS-InSAR 处理结果如图 3 所示。从 Sentinel-1A 反演获得的龙岗区地表形变结果可以看出,同一时段的地表形变整体趋势较为一致,但在局部不一致情况,原因可能是云雾雨天气引起大

气相位误差。因为龙岗区水系较多且邻海,夏秋两季多云多雾多雨,所以气候温和湿润。此种气象因素会引起较严重的大气相位噪声,增加大气相位去除难度,引起相位解缠误差,甚至局部失相干。

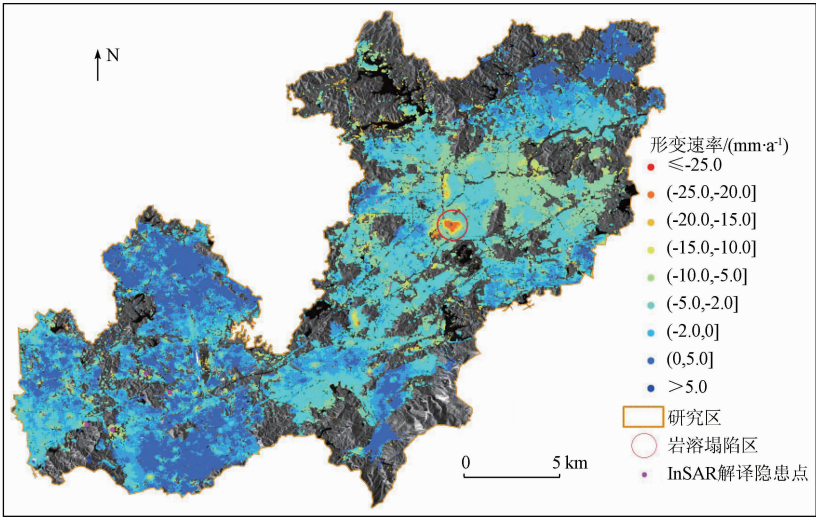


图 3 地表形变 InSAR 监测及斜坡地质隐患解译结果

Fig. 3 InSAR monitoring of surface deformation and interpretation results of slope geological hazards

为验证 SBAS-InSAR 形变结果的准确性,采用 PS-InSAR 技术形变结果与 SBAS-InSAR 形变结果进行对比分析^[19],结果显示反演的研究区地表形变分布和范围与 SBAS-InSAR 反演结果基本一致,验证了 SBAS-InSAR 获取的研究区地表形变信息是准确可靠的。该验证方法与结果在参考文献^[19]中进行了详细描述,本文将不再赘述。

3.2 斜坡地质灾害隐患遥感解译

利用中国自然资源航空物探遥感中心地质灾害三维解译平台(图 4)开展工作,该平台已经完成发布涵盖基础影像数据、基础地理地形数据、基础地质数据、InSAR 地面沉降数据和地球物理数据等服务,能够充分支撑斜坡地质灾害隐患解释工作开展。

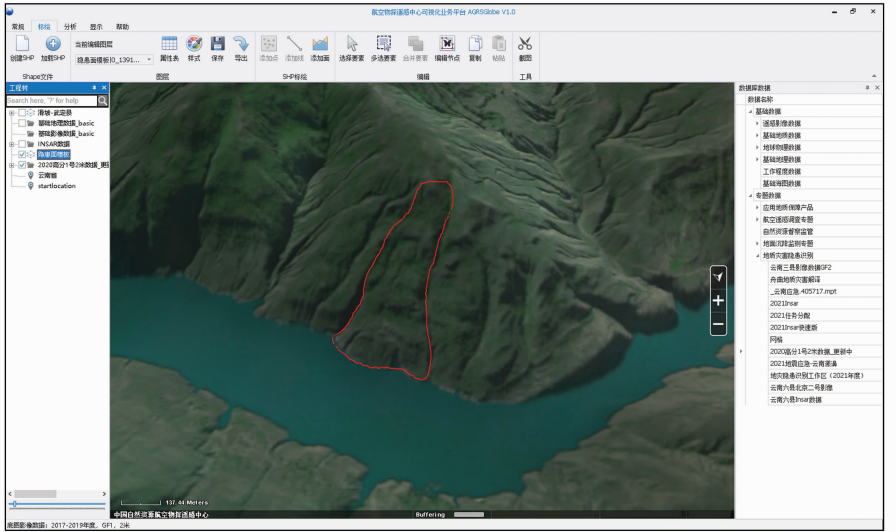


图 4 斜坡地质灾害隐患解译平台

Fig. 4 Slope geological hazard interpretation platform

通过人机交互解译共获得 43 处斜坡地质灾害隐患,其中光学遥感卫星解译隐患 39 处(图 5),InSAR 地表形变解译隐患 4 处(图 3)。采用野外地面验证结合百度街景数据,对遥感解译隐患进行验证,

为城市地质灾害隐患调查提供新思路。由于街景数据只展示道路两旁的实景信息,39 处遥感卫星影像解译隐患验证了 6 处,其中实地勘察验证 4 处,街景数据验证 2 处。街景验证分别为坂里大道与坂澜大

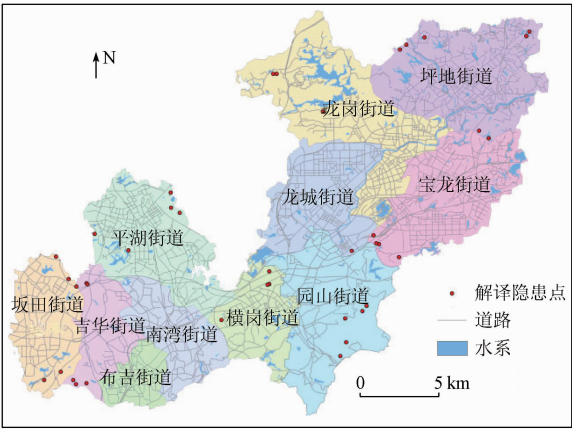


图 5 光学遥感解译斜坡地质灾害隐患分布
Fig. 5 Distribution of slope geological hazards
by optical remote sensing interpretation

道交叉口北 250 m 处(图 6(a))、坂李大道与清平高速交叉西 160 m 处(图 6(b)),从街景照片可以很清晰地验证 2 处遥感解译隐患的准确性。野外验证斜坡地质灾害隐患 4 处,分别位于龙岗区杜鹃公园东门西南 80 m 处(图 7(a))、龙岗区圆山风景区内(图 7(b))、深圳市新安玻璃有限公司东北 500 m 处(7(c))、龙岗区景基御景半山花园小区西南 120 m 处(7(d)),野外验证结果与遥感解译结果吻合。由于龙岗区植被覆盖较为茂密,且受到工厂、小区等围墙阻拦,给野外实地验证带来较大的困难。因此,除野外验证外,在 3.4 节中,利用已发地质灾害对易发性评价结果进行验证,验证结果也反向证明了遥感解译斜坡地质灾害隐患结果的准确性。



(a) 坂里大道与坂澜大道交叉口北 250 m 处



(b) 坂里大道与清平高速交叉西 160 m 处

图 6 斜坡地质灾害隐患街景验证

Fig. 6 Street view verification of slope geological hazards



(a) 龙岗区杜鹃公园东门西南 80 m 处



(b) 龙岗区圆山风景区内



(c) 深圳市新安玻璃有限公司东北 500 m 处



(d) 龙岗区景基御景半山花园小区西南 120 m 处

图 7 斜坡地质灾害隐患野外验证

Fig. 7 Field verification of slope geological hazards

3.3 易发性评价

在全面收集、整理历史地质灾害点、1:5 万地质灾害详细调查和地质灾害遥感解译复核地质灾害(隐患)点数据基础上,结合地表岩性、坡度、坡高、地表覆被和降雨量数据等数据资料,利用信息量模型方法计算各个因子信息量值(结果如表 3 所示,

为保证区域计算的完整性,对于没有隐患点的区域,整体取-1.50),开展区域斜坡地质灾害易发性评价。按照不同地质灾害类型分别评价,形成以斜坡地质灾害为主的易发程度分区。易发程度划分为极高易发区、高易发区、中易发区、低易发区 4 个等级。

表 3 信息量计算结果
Tab.3 Information content calculation results

坡高分档/m	面积/ km ²	隐患点数/个	信息量值	坡度分档/度	面积/km ²	隐患点数/个	信息量值
[0,30]	130.51	2	-2.57	[0,5]	148.07	3	-1.60
(30,50]	188.85	7	-1.15	(5,10]	104.88	10	-0.15
(50,70]	43.11	13	1.01	(10,15]	55.70	12	0.67
(70,100]	10.87	12	2.31	(15,20]	39.50	9	0.70
(100,120]	5.09	6	2.46	(20,25]	22.26	6	0.80
>120	10.07	3	1.08	(25,30]	11.60	2	0.54
				(30,90)	6.46	1	0.43
土地覆被	面积/km ²	隐患点数/个	信息量值	地表岩性	面积/km ²	隐患点数/个	信息量值
耕地	2.93	2	1.88	土体	99.67	8	-0.35
林地	69.68	13	0.51	坚硬的块状岩组	83.52	3	-1.02
草地	18.75	6	0.72	坚硬的层状岩组	8.04	3	0.90
灌木林	60.51	5	-0.44	坚硬的碎屑岩岩组	41.76	2	-1.43
人造地表	226.15	17	-0.31	较坚硬的块状岩组	73.87	18	0.82
水体	—	—	-1.50	较坚硬的碎屑岩岩组	68.19	9	0.27
降雨量/mm	面积/km ²	隐患点数/个	信息量值	较软的块状岩组	2.03	0	-1.50
[1588,1732]	23.59	1	-0.86	较软的层状岩组	3.77	0	-1.50
(1732,1808]	93.58	7	-0.45	较软的碎屑岩岩组	6.85	0	-1.50
(1808,1872]	111.14	10	-0.21				
(1872,1946]	135.93	17	0.15				
(1946,2071]	23.54	8	1.08				

根据表 3 中计算获取的各个影响因子信息量值,利用 ArcGIS 平台对各个因子进行栅格运算,并利用自然断点法进行分级,最终获得龙岗区斜坡地质灾害隐患易发性评价结果,如图 8 所示。

评价结果进行面积统计,低易发区面积为 136.53 km²,约占研究区总面积的 34.94%;利用已发地质灾害点(数据来源为深圳市规划和自然资源局龙岗管理局)与易发性评价结果进行叠加统计,可知已发地质灾害在低易发区分布 1 个、中易发区 8 个,高易发区 26 个,极高易发区 4 个(表 4)。

表 4 易发区面积及已发灾害分布统计
Tab.4 Statistics on the area of susceptible zones and the distribution of occurred disasters

	低易发区	中易发区	高易发区	极高易发区	总计
已发灾害数量/个	1	8	26	4	39
面积/km ²	136.53	107.07	129.50	17.55	390.65
面积占比/%	34.95	27.41	33.15	4.49	100

此外,叠加建城区矢量图,可以看出低易发区主要集中在建城区(图 9),易发区则主要分布在山区丘陵地带。根据以上数据叠加分析及统计结果,可以证明基于多源遥感卫星数据解译地质灾害隐患易发性评价结果的可靠性,为大区域范围进行斜坡地质灾害隐患易发性评价提供了方法依据。

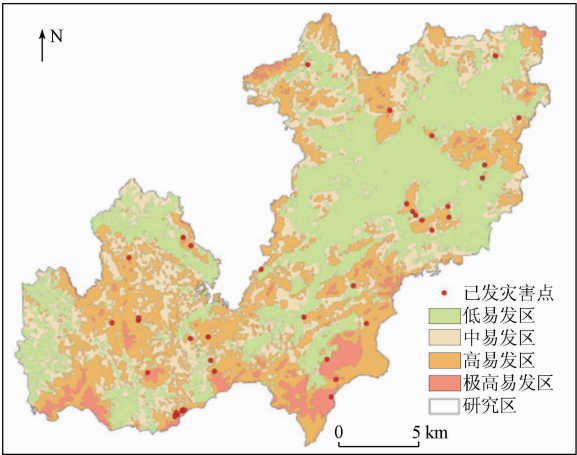


图 8 斜坡地质灾害隐患易发性评价结果
Fig.8 Assessment results of slope geological hazards

3.4 易发性评价结果验证

利用信息量法,结合多源异构数据对龙岗区开展了斜坡地质灾害易发性评价工作。通过对易发性

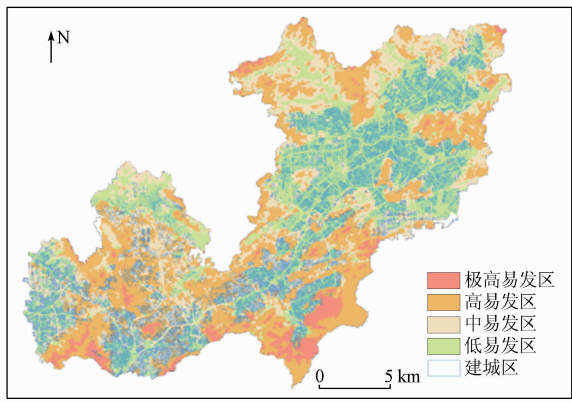


图 9 斜坡地质灾害隐患易发区分布

Fig. 9 Distribution of slope geological hazards

4 结 论

以深圳市龙岗区为研究区,利用光学卫星数据和 InSAR 地表形变监测结果,开展了龙岗区斜坡地质灾害隐患解译,在此基础上完成了该区域地质灾害易发性评价,并对评价结果进行了验证,形成了以数据驱动和专家经验相结合的客观可靠的易发性评价成果,能够在大区域范围地质灾害防治与应急减灾中提供快速、可靠的科学依据。通过结合光学、雷达卫星数据的优势,充分发挥多源卫星数据在斜坡地质灾害易发性评价中的作用,大大提高了评价结果的精度。同时使用了百度街景数据进行隐患点验证,为城市地质调查提供了新思路。

本研究技术方法在实际工程化应用中取得了较好的效果,但也存在一定的局限性,主要是对于植被覆盖茂密区,遥感地质灾害隐患解译需要作业人员具有较为丰富的经验,而短期培训无法实现作业人员快速、准确地开展解译。为解决这一问题,对于植被茂密的重点地质灾害隐患地区,可使用 LiDAR 数据获取穿透植被灌木林高精度 DEM,能够快速、准确实现地质灾害隐患解译,为开展地质灾害隐患防治提供可靠的基础数据支撑。

参考文献 (References) :

[1] 吴志斌. 深圳龙岗区突发性地质灾害成因浅析[J]. 中国水运 (理论版), 2006(2): 104 - 105.
Wu Z B. Analysis on the causes of sudden geological disasters in Longgang District, Shenzhen [J]. China Water Transport (Theory Edition), 2006(2): 104 - 105.

[2] 熊金安,汪 磊. 深圳斜坡类地质灾害特征及成因分析[J]. 地质灾害与环境保护, 2013, 24(3): 70 - 75.
Xing J A, Wang L. Characteristics and causes of slope geo - hazards in Shenzhen [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2013, 24(3): 70 - 75.

[3] 姚 玲,雷呈斌,王明龙,等. 基于 RS 和 GIS 技术的深圳市斜坡

类地质灾害易发程度评价[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2017, 36(3): 66 - 72.

Yao L, Lei C B, Wang M L, et al. Evaluation of the susceptibility of slope disasters in Shenzhen City based on RS and GIS technique [J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2017, 36(3): 66 - 72.

[4] 薛 强,张茂省,李 林. 基于斜坡单元与信息量法结合的宝塔区黄土滑坡易发性评价[J]. 地质通报, 2015, 34(11): 2108 - 2115.

Xue Q, Zhang M S, Li L. Loess landslide susceptibility evaluation based on slope unit and information value method in Baota District, Yan' an [J]. Geological Bulletin of China, 2015, 34(11): 2108 - 2115.

[5] 张向营,张春山,孟华君,等. 基于 GIS 和信息量模型的京张高铁滑坡易发性评价[J]. 地质力学学报, 2018, 24(1): 96 - 105.

Zhang X Y, Zhang C S, Meng H J, et al. Landslide susceptibility assessment of new Jing - zhang high - speed railway based on GIS and information value model [J]. Journal of Geomechanics, 2018, 24(1): 96 - 105.

[6] 邓 辉,何政伟,陈 晔,等. 信息量模型在山地环境地质灾害危险性评价中的应用——以四川泸定县为例[J]. 自然灾害学报, 2014, 23(2): 67 - 76.

Deng H, He Z W, Chen Y, et al. Application of information quantity model to hazard evaluation of geological disaster in mountainous region environment: A case study of Luding County, Sichuan Province [J]. Journal of Natural Disasters, 2014, 23(2): 67 - 76.

[7] 杨根云,周 伟,方教勇. 基于信息量模型和数据标准化的滑坡易发性评价[J]. 地球信息科学学报, 2018, 20(5): 674 - 683.

Yang G Y, Zhou W, Fang J Y. Assessment of landslide susceptibility based on information quantity model and data normalization [J]. Journal of Geo - Information Science, 2018, 20(5): 674 - 683.

[8] 王 兵,李爱军,黄 丽. 局域层次分析法 (AHP) 的地质灾害易发性评价研究[J]. 资源环境与工程, 2013, 27(2): 179 - 183.

Wang B, Li A J, Huang L. Evaluation of geological disasters susceptibility by local analytic hierarchy process (AHP) [J]. Resources Environment and Engineering, 2013, 27(2): 179 - 183.

[9] 陈绪钰,李明辉,王德伟,等. 基于 GIS 和信息量法的四川峨眉山市地质灾害易发性定量评价[J]. 沉积与特提斯地质, 2019, 39(4): 100 - 112.

Chen X Y, Li M H, Wang D W, et al. Quantitative evaluation of geo - hazards susceptibility based on GIS and information value model for Emeishan City, Sichuan [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2019, 39(4): 100 - 112.

[10] 文海家,胡东萍,王桂林. 汶川县地震滑坡易发性 LR 与 NN 评价比较研究[J]. 土木工程学报, 2014, 47(s1): 17 - 23.

Wen H J, Hu D P, Wang G L. A comparative study on the susceptibility mapping of earthquake triggered landslide by neural network and logistic regression model, Wenchuan County [J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(s1): 17 - 23.

[11] 黄发明,殷坤龙,蒋水华,等. 基于聚类分析和支持向量机的滑坡易发性评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(1): 156 - 167.

Huang F M, Yin K L, Jiang S H, et al. Landslide susceptibility assessment based on clustering analysis and support vector machine [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018,

37(1):156–167.

[12] 自然资源部. FXPC/ZRZY P-01 地质灾害风险调查评价技术要求(1:50 000)[R]. 北京:自然资源部,2021.

Ministry of Natural Resources. FXPC/ZRZY P-01 Technical requirements for geological hazard risk investigation and evaluation (1:50 000)[R]. Beijing:Ministry of Natural Resources,2021.

[13] 童立强,郭兆成. 典型滑坡遥感影像特征研究[J]. 国土资源遥感,2013,25(1): 86–92. doi:10.6046/gtzyyg. 2013.01.16.

Tong L Q,Guo Z C. A study of remote sensing image features of typical landslides[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2013,25(1):86–92. doi:10.6046/gtzyyg. 2013.01.16.

[14] 张 路,廖明生,董 杰,等. 基于时间序列 InSAR 分析的西部山区滑坡灾害隐患早期识别——以四川丹巴为例[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2018,43(12):2039–2049.

Zhang L,Liao M S,Dong J,et al. Early detection of landslide hazards in mountainous areas of west China using time series SAR interferometry:A case study of Danba,Sichuan[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University,2018,43(12):2039–2049.

[15] 苏晓军,张 毅,贾 俊,等. 基于 InSAR 技术的秦岭南部略阳县潜在滑坡灾害识别研究[J]. 山地学报,2021,39(1): 59–70.

Su X J,Zhang Y,Jia J,et al. InSAR-based monitoring and identification of potential landslides in Lueyang County, the Southern Qinling Mountains, China[J]. Mountain Research,2021,39(1): 59–70.

[16] 陆会燕,李为乐,许 强,等. 光学遥感与 InSAR 结合的金沙江白格滑坡上下游滑坡隐患早期识别[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2019,44(9):1342–1354.

Lu H Y,Li W L,Xu Q,et al. Early detection of landslides in the upstream and downstream areas of the Baige landslide, the Jinsha River based on optical remote sensing and InSAR technologies[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University,2019,44(9):1342–1354.

[17] Ferretti A,Prati C,Rocca F. Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2000,38(5):2202–2212.

[18] Ferretti A,Prati C,Rocca F. Permanent scatterers in SAR interferometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001,39(1):8–20.

[19] 姜德才,郑向向,王 宁,等. 时序 InSAR 技术在珠三角地区地质灾害隐患识别中的应用[J]. 自然资源遥感,2023,25(3): 292–301. doi:10.6046/zrzyyg. 2022190.

Jiang D C,Zheng X X,Wang N,et al. Application of time series InSAR technology in the identification of geological hazards in Pearl River Delta region[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2023,25(3):292–301. doi:10.6046/zrzyyg. 2022190.

Assessing the susceptibility of slope geological hazards based on multi-source heterogeneous data: A case study of Longgang District, Shenzhen City

WANG Ning¹, JIANG Decai^{1,2,3}, ZHENG Xiangxiang^{1,2,4}, ZHONG Chang^{1,5}

(1. China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Natural Resources, Beijing 100083, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 4. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China; 5. College of Intelligence Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: This study aims to investigate the fundamental facts concerning slope geological hazards in Longgang District, Shenzhen City, as well as the distributions of disaster-prone zones in the district. Based on the multi-source remote sensing satellite data, this study interpreted the slope geological hazards using the expert interpretation method on a geological hazard interpretation platform. Furthermore, some interpreted geological hazards were verified through field verification combined with Baidu Street View data. Finally, the distributions of zones susceptible to slope geological hazards in Longgang District were determined using the information value method, with the slope height, slope gradient, rainfall, surface lithology, and land cover as assessment factors. Additionally, existing geological hazard sites were superimposed with the susceptibility assessment results for analysis, yielding completely consistent results. This confirms the effectiveness of the method used in this study for assessing the susceptibility of slope geological hazards, as well as the accuracy of remote sensing interpretation of slope geological hazards.

Keywords: identification of geological hazards; time-series InSAR; susceptibility assessment; information value model