

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2020.05.04

基于高分遥感影像的泥石流潜在形成区识别方法探讨

苏轶君

(福建省测绘院, 福建 福州 350003)

摘要: 提前对泥石流可能发生和造成影响的区域进行预测和防范, 一直是地质灾害预测中的重要课题。为充分发挥国产高分影像的空间分辨率优势, 利用 NNDiffuse 和 Gram-Schmidt 两种融合方法实现多光谱和全色波段的融合并作为研究数据, 结合常用的支持向量机(SVM)和基于土壤亮度指数特征的动态聚类(ISODATA) 两种分类方法对泥石流潜在形成区的自然地表覆盖和人类影响区域进行识别和提取, 再利用泥石流隐患沟和集水区的空间和属性关系预测泥石流形成区。研究表明, 不同融合方法会对泥石流形成区的预测产生影响, 本文基于 NNDiffuse 融合方法进行预测的总体效果最好; SVM 方法有最好的效果, 表明先验知识对预测形成区的重要意义, 但无先验知识的 ISODATA 方法结合有效的指数特征在泥石流形成区识别和预测中有较好的表现, 预期未来能在测绘部门有很大的应用潜力。

关键词: 融合方法; 高分辨率影像; 泥石流潜在形成区; 预测

中图分类号: P642.23

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2020)05-0022-10

Probing into the techniques recognizing potential debris flow formation regions

SU Yijun

(Fujian Surveying and Mapping Institute, Fuzhou, Fujian 350003, China)

Abstract: It is an important task to predict and prevent debris flow and its impacted areas in advance. In this paper, RS and GIS technology were adopted to predict the potential debris flow. Taking advantage of the spatial resolution of domestic high-resolution images, using NNDiffuse and Gram-Schmidt methods to realize the fusion of remote sensing images into research data, combining with support vector machine (SVM) and dynamic clustering based on soil brightness index (ISODATA), the natural surface coverage and human impact area of debris flow formation region are identified and extracted, and then the formation region of debris flow is predicted by using the spatial and attribute relationship of hidden gully and catchment. The experiment shows that different fusion methods will affect the result of debris flow extraction. NNDiffuse fusion method has the best overall effect in this paper; SVM method has the best effect, the prior knowledge has the significance in the prediction of forming region, ISODATA method without prior knowledge has better performance in the identification and prediction of debris flow, there is potential application prospect in the future.

Keywords: fusion method; high resolution image; potential formation area of debris flow; prediction

0 引言

泥石流山地灾害会对人类生产和生活带来不同程

度的损害,严重的泥石流会直接威胁人类生命和财产安全^[1]。若能识别出泥石流灾害可能发生和造成影响的区域并提前布设防范措施,则能有效地减小灾害

收稿日期: 2020-04-12; 修订日期: 2020-05-25

作者简介: 苏轶君(1991-),女,福建武夷山人,自然地理学专业,助理工程师,硕士研究生,主要从事遥感、地理信息系统和测绘的相关研究及其工作。E-mail:syjfjschy@163.com

损失,但由于影响泥石流灾害发生的因素比较多,因此这方面的研究一直存在比较大的困难。

早期国内外学者对泥石流的探究主要在泥石流基本特征、形成机理和危害性方面^[2-7],20 世纪 70、80 年代开始逐渐从理论到应用层面引入遥感技术进行泥石流灾害的探究,且引入监督分类、阈值法等遥感分类技术实现泥石流物源区自动化提取,也有通过多种影响因子对泥石流灾害进行危害性评价和风险性预测,且这大多数研究基于已发生泥石流区域灾害现状和变化情况展开,却很少有将 GIS 和 RS 技术结合对泥石流潜在形成区进行识别和预测的研究^[8-18],而本文将针对已发生泥石流形成区的影响因素,利用 RS 和 GIS 各自可实现的技术对潜在泥石流形成区进行识别和预测。面对质量良好的国产高分影像数据,若要充分发挥其高分辨率优势实现泥石流形成区识别和预测,融合方法的选择也是重要的环节,本文应用 NNDiffuse^[19-20]和 Gram-Schmidt^[21-22]两种主流融合方法展开研究,并引入土壤亮度指数特征,利用在统计学习中最有效、最普及的 SVM 支持向量机监督分类^[25]和常用的 ISODATA 动态聚类^[26]非监督分类方法,并融入 GIS 技术实现泥石流形成区的预测,旨在能找到一种适应于当前测绘行业现状,可操作性强的应用性方案,实现潜在的泥石流形成区的最佳预测,利用各部门有效手段减少灾害带来的损失。

1 研究区概况和分析

1978 年至 2017 年间福建省已发生泥石流灾害 164 次,泥石流灾害涉及全省包含安溪县、蕉城区、城厢区、闽清县、延平区等 46 个县市,主要分布在福建北部和东部的山区丘陵地、农村地区和偏远地区(图 1)。通过对 164 次泥石流发生情况调查,福建省泥石流灾害 149 次与沟谷发育有关,且发生在集水盆地、山坡陡峭区、低植被覆盖区、裸露地表、采矿用地和道路周边,图 2 是已发生泥石流灾害的典型区域分布情况。根据前人的研究^[25-27]并结合本研究区内泥石流发生的上述特点,分析得出对泥石流形成区具有重要影响的因素,它包括地形因素、气候因素、土壤因素、沟谷发育情况、植被覆盖和人类活动。要引入这些因素对目标区域采用传统的全局性实地考察是不切实际的^[28],布设防控措施更是难上加难,而 RS 技术可以实现对植被覆盖情况和人类活动影响区域识别和快速提取,GIS 技术可以引入地形因素和沟谷发育情况对泥石流形成区进行预测。

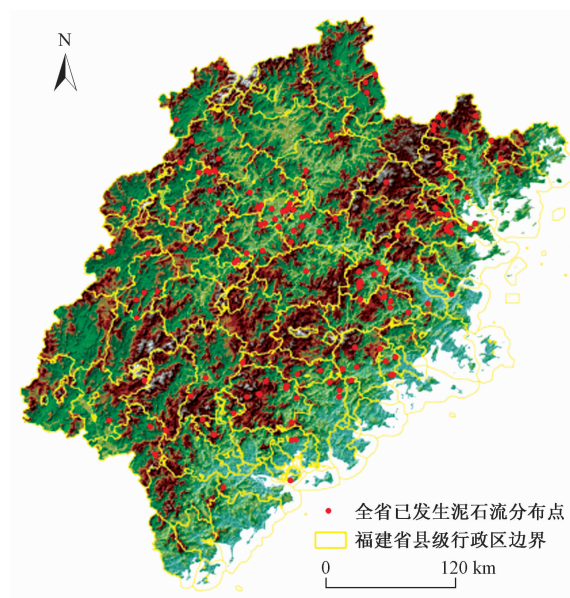


图 1 福建省 1978—2017 年已发生泥石流分布

Fig. 1 distribution of debris flow happened from 1978 to 2017 in Fujian Province

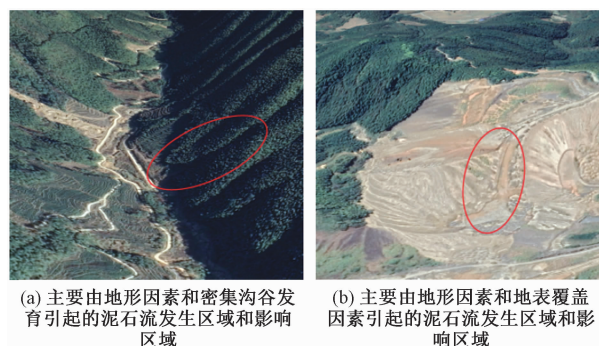


图 2 典型泥石流发生情况分布图

Fig. 2 Distribution map of typical debris flow

本文研究区为福建省宁德市周宁县最南端的咸村镇,平均海拔 568 m,地形总体呈西高东低,且高差悬殊,现辖 23 个行政村和 1 个社区,其中三分之一的村落聚集在东部河谷平原地区,四周环山,其余村落零星分布在偏远山区,这些地形地貌也让其面临不小的泥石流灾害风险(图 3)。咸村镇的气候条件较为湿润,雨季占据全年将近三分之一,相对湿度达到 80%,满足泥石流灾害爆发的条件之一。咸村镇主要以茶叶和粮食农业生产为主,是周宁县主要产粮区和产茶区,泥石流灾害发生将会给当地经济和人民生活带来巨大的损失。

2 数据准备和分析

2.1 数据预处理

本文采用高分二号数据作为数据源(数据获取时

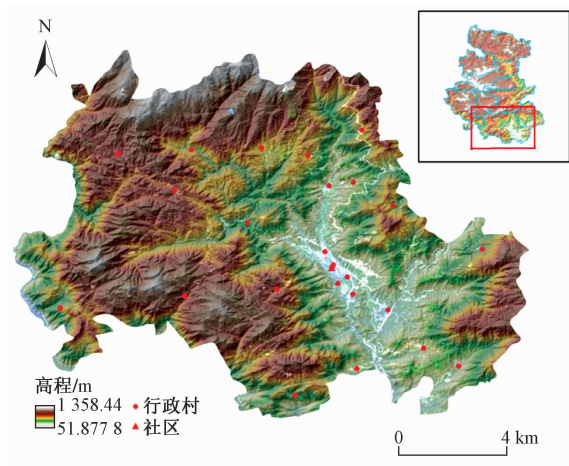


图3 咸村镇地形地貌和村落分布情况

Fig.3 Landform and village distribution of Xiancun Town

间为2017年9月19日),表1是原始数据4个多光谱波段和1个全色波段参数,覆盖研究区范围的4景影像,云量分别为12%、0%、2%和0%,图4是4景影像概视图和研究区分布情况。根据数据产品RPC函数,

运用ENVI平台完成高分二号数据预处理,单景影像依次完成辐射定标、大气校正、正射纠正、影像融合,四景影像的配准、镶嵌和研究区裁切,最后对遥感影像的质量和可行性分析。

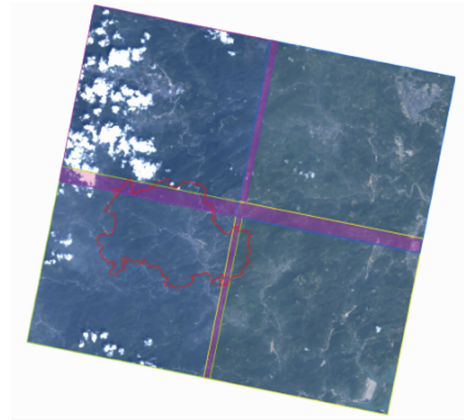


图4 四景高分二号卫星数据情况

Fig.4 GF-2 Four images satellite

表1 高分二号卫星数据参数

Table 1 Data parameters of GF-2

1 m 分辨率全色/4 m 分辨率多光谱相机				2017 年各载荷绝对辐射定标系数			
光谱范围	波段号	波长范围/ μm	空间分辨率/m	Gain		Bias	
				PMS1	PMS2	PMS1	PMS2
多光谱 (MSS)	Band 1	0.45 ~ 0.52	3.24	0.119 3	0.143 4	0	0
	Band 2	0.52 ~ 0.59		0.153	0.159 5	0	0
	Band 3	0.63 ~ 0.69		0.142 4	0.151 1	0	0
	Band 4	0.77 ~ 0.89		0.156 9	0.168 5	0	0
全色 (PAN)		0.45 ~ 0.90	0.81	0.150 3	0.167 9	0	0

2.2 主要融合方法介绍

为了挖掘卫星影像在泥石流形成区识别和提取中的潜力,方便定量统计和目视判读的定性研究,本文充分应用高分二号卫星影像空间分辨率的优势,应用多光谱和全色波段融合的影像展开研究。调研发现,无论是在高分一号、资源三号等国产卫星,还是 Landsat 8、Worldview-2、SPOT5 等国外卫星影像的融合上,对于光谱信息和局部细节保持度较好的 NNDiffuse Pan Sharpening 和 Gram-Schmidt Pan Sharpening 融合方法,在面对不同应用需求、不同传感器、同一传感器的融合表现上都有其表现效果最好的场景^[19-24],而基于这两种融合方法对泥石流形成区进行预测的研究少之又少。

(1) NNDiffuse 融合算法^[19-20]

NNDiffuse 是由美国罗彻斯特理工学院 (RIT)

SUNW 等人最先提出,其原理是首先将全色影像空间分辨率降采样到与多光谱影像一致,通过建立多光谱影像和全色影像线性响应向量,计算全色光谱波段的贡献向量,再运用线性混合模型得到融合影像。这种融合方法在可见光波段表现效果佳,且能很好地保持空间、光谱和色彩信息。

(2) Gram-Schmidt 融合算法^[21-22]

Gram-Schmidt 是由 Cralg A. Laben 于 1998 年提出,该融合算法是将较低分辨率的多光谱影像转换到正交空间,再将高分辨率全色影像替换第一分量,最后利用反变换获得融合图像,这种融合算法可以克服波段数的限制,实现多波段融合,其在近红外波段表现效果佳,能有效保持原始光谱信息,且对真实地物的色彩保真度高。

图5是两种融合方法得到的影像和融合前影像中

典型植被的光谱特征曲线图,融合前图像为原始光谱影像经过预处理后的影像,对比三幅影像中同一植被点的植被波谱曲线,三者光谱曲线都非常接近,融合后影像提高了图像空间分辨率但较好地保持了地物的光谱特征。图6是在1%线性拉伸的图像增强下NNDiffuse和Gram-Schmidt融合法得到的影像目视效果全局和局部的对比图,Gram-Schmidt融合影像中人工地物虽然亮度更亮,但不会因为亮度过大而削弱细节,适合实际工作中生产人员直接进行目视判读,NNDiffuse融合影像中地物更接近人眼真实看到的地物色彩,在实际工作中判读人员对地物的熟识度更高,可提高判读效率。

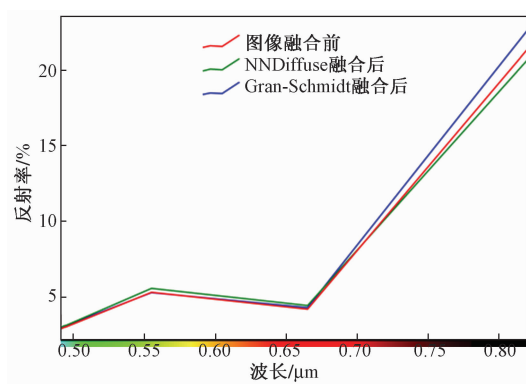


图5 融合前后植被光谱特征曲线

Fig. 5 Spectral characteristic curve of vegetation before and after image fusion

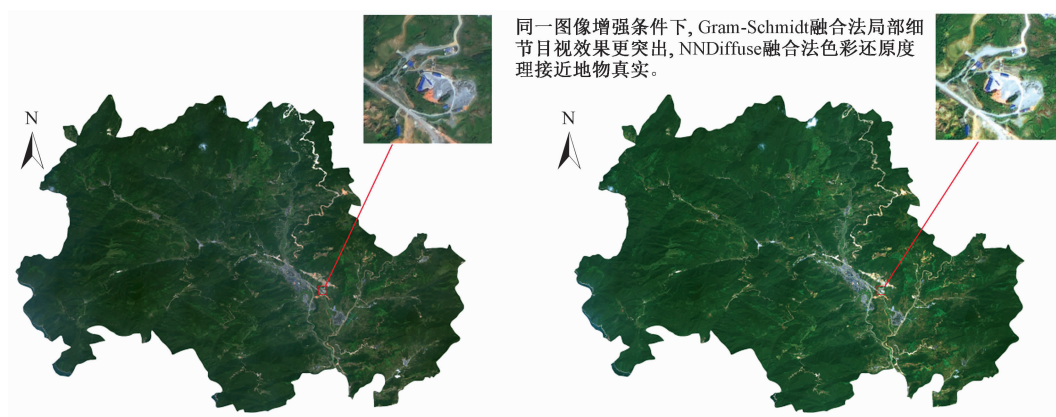


图6 NNDiffuse(左)和Gram-Schmidt(右)融合后研究区目视效果图

Fig. 6 NNDiffuse(Left) and Gram-Schmidt(Right) visual renderings of research area after fusion

3 泥石流潜在形成区识别和分析

3.1 识别方法介绍

RS技术可以对泥石流形成区植被覆盖情况和人类活动影响区域这两类影响因素进行一些判断和预测,具体包括无植被覆盖的自然地物和采矿用地、开垦地、居民地、道路等与人类活动密切相关地物的识别和提取。

3.1.1 支持向量机法介绍

SVM的原理是根据线性函数计算训练样本之间的分离超平面,SVM在高光谱影像中有不错的表现,但随着特征维数的增加,训练样本固定且获取精准的训练样本困难,Hughes现象越发明显,分类精度也有所下降^[31-34]。本文试图基于固定的小样本学习,将SVM算法引入低维多光谱分类的泥石流易发区的提取,一是满足未来应用可操作性、继承SVM的推广性、多适用性,二是探究其潜在能力。Foody曾提出,采用

混合像元的小样本训练集同样可以达到和使用纯净像元的精准度,且在多光谱分类中,混合像元比纯净像元更有效^[21],故本文以特征基元的形式进行样本采集。

3.1.2 基于指数特征的ISODATA动态聚类法介绍

泥石流形成的条件是拥有大量松散固体物质,大气降水、地表水等水源条件,以及陡峭的沟谷等地形地貌条件,根据福建省已发生泥石流地区周边情况可见,泥石流绝大多数发生在植被条件覆盖差或地表覆盖为裸露松散的土质及岩石区域,土壤亮度指数(NDSI)对于影像中高亮的裸地、岩石等地物的光谱特征有增强的作用,NDSI指数特征的运算公式如下:

$$NDSI = \frac{R - G}{R + G} \quad (1)$$

式中:R——多光谱影像的红波段;

G——多光谱影像的绿波段。

本文利用NDSI指数特征以增强泥石流潜在形成区的信息,并利用动态聚类法(ISODATA)将有效信息

进行提取,ISODATA 算法^[30-34]是利用合并和分裂实现地类分类的聚类分析方法,其原理是随机选择初始聚类中心,根据最小距离将样本分配给聚类中心,从而得到初始聚类,两类地类聚类中心距离与阈值之间的关系决定地类是合并为一类还是分裂为两类,在不断的分开和合并中对聚类中心的值进行更新。单纯的 ISODATA 动态聚类法只是基于庞大复杂的影像信息进行统计分类,而由指数特征增强后的影像进行目标提取更具针对性。

3.2 地表覆盖提取结果及分析

分别基于 NNDiffuse 和 Gram-Schmidt 融合方法的结果数据展开泥石流潜在形成区的识别和提取,研究中的训练样本和验证样本依据 1 m 空间分辨率影像、Google Earth 和外业调查数据进行选取,保证样本数据的精确性,以便后续的分类和精度评价。根据目标地物的特征大小,分类用样本以 15 × 15 像素大小进行面状矢量勾画,训练样本总数为 177 个,验证样本大小不定尺寸,验证样本总数为 80 个。SVM 监督分类中影像所包含地类分为水域、云、林地、草地、耕地、裸露地

表和建筑物七类,根据本文泥石流潜在形成区提取目的,将水域、云、林地、草地和耕地归为非目标地类,裸露地表和建筑物归为目标地类。ISODATA 非监督分类基于 NDSI 指数特征结果进行二次迭代,分类结果为 5 类,这是通过 1 ~ 5 次迭代试验和 2 ~ 10 次类别数设置试验后得到的理想参数值,且最终得到的类别数依旧为 5 类,然后根据分类的结果提取出目标地类,图 7 是目标地类提取的可视化图,可见 SVM 分类法得到的目标地类的覆盖面积小,但图斑个数比 ISODATA 分类法多,表 2 是对目标地类和非目标地类进行混淆矩阵精度评价情况,表中的 Kappa 系数是用于衡量分类结果与验证样本一致性情况的精度评价方法,总体精度是被正确分类的像元总和除以总像元数,可见 (1) 利用 SVM 法分类精度比 ISODATA 方法的高,主要原因在于前者有较为准确的训练样本,且对目标地类的提取更具针对性,后者虽然分类精度低,但分类后目标地类中涵盖了前者百分之九十以上的信息,且对目标地物的边界表现得更明显,将影像中更为细节的部分进行了增强,准确的边界有利于泥石流形成区的界

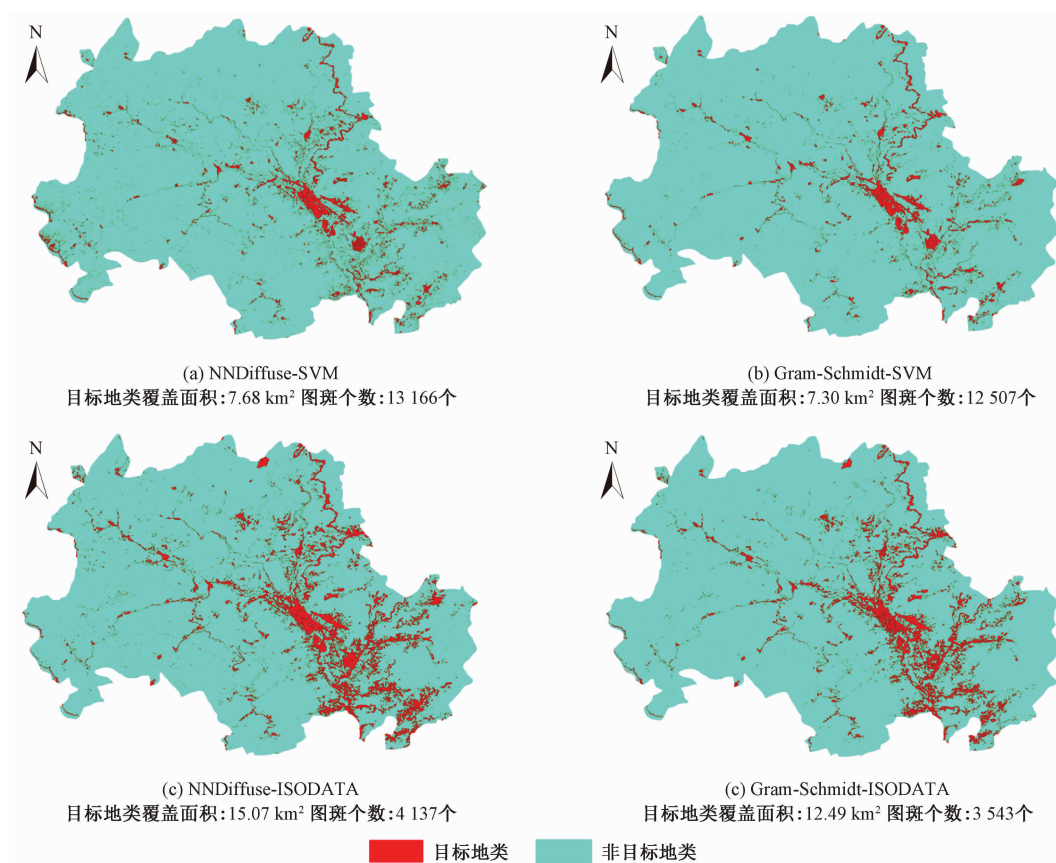


图 7 利用 RS 技术的目标地类提取结果

Fig. 7 The results of target class extraction using RS technology

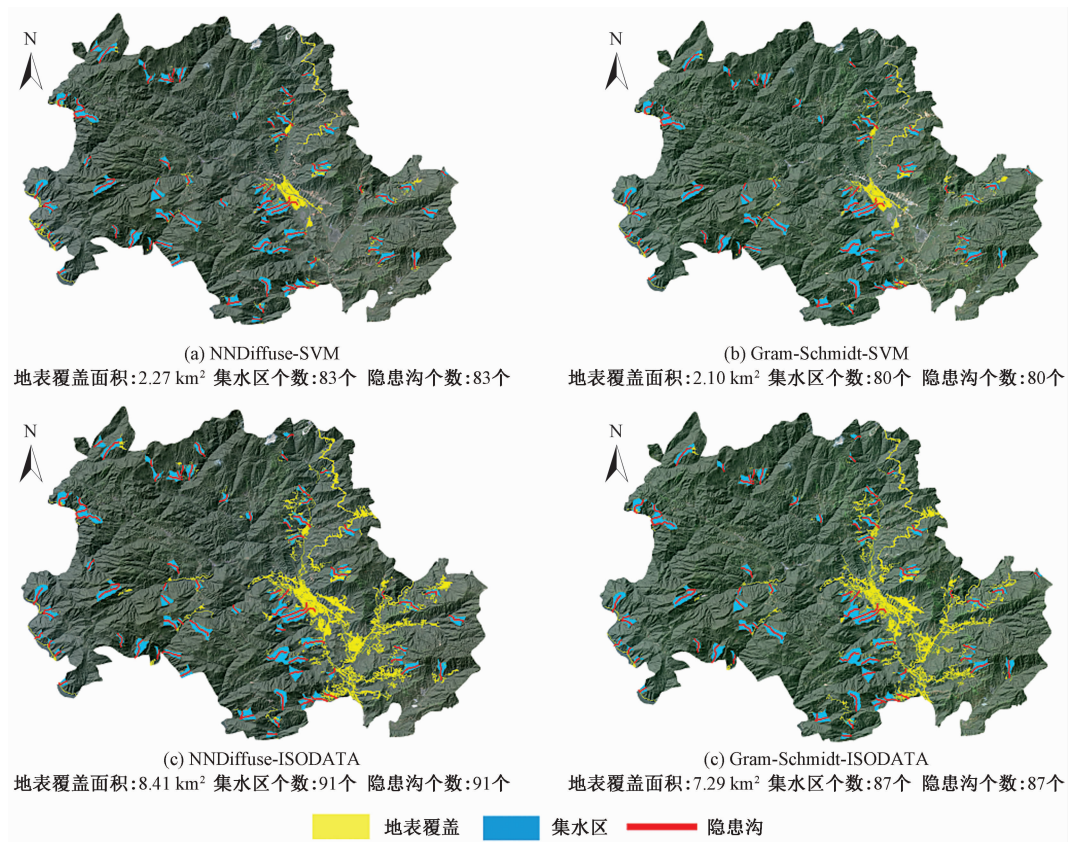


图9 四种方法和综合四种影响因素的泥石流形成区预测情况

Fig. 9 Prediction of debris flow formation region by four methods and four factors

表4 研究区泥石流灾害隐患沟和集水区四种参数量化情况

Table 4 Parameter quantification in potential region and water collection area

识别方法	流水变类型		集水区	
	沟长 平均值/m	坡度平 均值/(°)	相对高差 平均值/m	汇流面积 平均值/km²
NNDiffuse-SVM	585.34	37.20	177.52	0.51
Gram-Schmidt-SVM	592.57	37.35	179.44	0.55
NNDiffuse-ISODATA	583.98	37.24	177.01	0.54
Gram-Schmidt-ISODATA	585.17	37.06	174.70	0.55

在泥石流形成区预测中集水区的筛选分为第一次筛选和第二次筛选,第一次筛选具体指研究区所有4 105个集水区经过与地表覆盖图斑空间位置关系的筛选,第二次筛选是引入沟谷、集水区、汇流点和出水口后通过空间拓扑和属性关系的筛选;与潜在泥石流形成区相关的地表覆盖只有一次筛选,筛选前即应用RS技术分类提取的结果,筛选后即此分类提取的结果与集水区最终筛选结果进行的空间关系筛选,具体的筛选情况见表5,集水区第一次筛选率即集水区剔除的个数占总集水区个数比例,第二次筛选率即将不符合表3中参数的集水区剔除的个数占总集水区个数的

比例,集水区正确个数是通过GoogleEarth Pro的3D图、DEM和高分辨率影像融合叠加的目视判读,及对目视无法确认的区域进行野外核实的结果。结果可见,Gram-Schmidt-SVM第一次筛选率最高,其次是Gram-Schmidt-ISODATA,在第二次筛选中NNDiffuse-SVM筛选率最高,其次是NNDiffuse-ISODATA,但在最终提取准确率上NNDiffuse两种方法比基于Gram-Schmidt两种分类方法提取准确率高,可见,与流水有关的更全面的地形信息的引入有助于提高泥石流潜在形成区的正确提取;NNDiffuse融合方法比Gram-Schmidt融合方法对提取潜在形成区更有效;ISODATA方法比SVM方法更有效;地表覆盖提取精度高并不一定最终泥石流提取的效果就更好,泥石流潜在形成区提取还得依靠地表覆盖与沟谷线、集水区之间的空间和属性关系确定,因为地形要素是泥石流发生的重要因素之一。

综上所述, NNDiffuse-SVM方法在与影响泥石流形成的相关地表覆盖提取和泥石流形成区预测中效果总体最好, NNDiffuse-ISODATA方法在无先验知识情况下的提取效果总体最好, Gram-Schmidt-SVM的效果

总体比 Gram-Schmidt-ISODATA 稍好,在实际应用中,生产人员专业水平的不同也会影响需要先验知识的 SVM 方法预测形成区的效果,综合专家知识、提取效率和适用性来看,建议采取 ISODATA 的方法进行泥石流潜在形成区的提取。从遥感数据快速提取影响泥石流形成的相关地表覆盖的方法是有效的,但更准确的

泥石流形成区提取应该综合考虑植被覆盖情况、人类活动、地形因素和沟谷发育情况才能获得比较好的效果。基于当前测绘行业现状,既要发挥人工操作的灵活性、稳定性和准确性,又要充分发挥自动化提取的省时省力优势,泥石流形成区预测应该在发挥主观能动性基础上应用机器自动化,实现两种方法的优势互补。

表 5 基于空间和属性关系筛选的集水区和地表覆盖情况
Table 5 Catchment area and surface coverage based on spatial and attribute relation screening

	集水区			地表覆盖筛选前后对比	
	第一次筛选个数/筛选率	第二次筛选个数/筛选率	集水区正确个数	筛选前/后个数	筛选前/后面积/km ²
NNDiffuse-SVM	3 364/18.05%	83/97.53%	79	13 166/1 693	7.68/2.27
Gram-Schmidt-SVM	2 893/29.52%	80/97.23%	71	12 507/1 522	7.30/2.10
NNDiffuse-ISODATA	3 613/13.62%	91/97.48%	83	4 137/673	15.07/8.41
Gram-Schmidt-ISODATA	3 151/23.24%	87/97.24%	77	3 543/550	12.49/7.29

5 结论与讨论

本文基于专家知识和机器自动化相结合的方式,实现对泥石流潜在形成区的半自动化提取,引入 RS 应用技术,实现与影响泥石流形成的地表覆盖快速提取,同时引入 GIS 应用技术实现空间信息、拓扑信息和属性信息查询和筛选,实现泥石流形成区的多角度综合提取。针对研究结果和研究过程中存在的问题,本文提出以下总结和展望:

(1) 遥感影像的融合方法选择会影响泥石流形成区预测结果,基于 NNDiffuse 融合方法的泥石流形成区提取结果比 Gram-Schmidt 方法好。本文主要针对高分二号多光谱波段和全色波段融合影像进行研究,在对其它卫星影像泥石流形成区预测是否表现一致具有深入研究的必要。

(2) SVM 的监督分类法在提取泥石流潜在形成区中效果最佳,而无需先验知识的 ISODATA 方法在泥石流形成区预测中有较好的表现,能基本满足当前测绘行业的应用需求。本文主要采用适合当下测绘行业推广性和适用性强的监督分类和非监督分类方法进行研究,分类方法的选择是否会影响提取效果,尤其是非监督分类对泥石流潜在形成区提取的潜力有待进一步挖掘。

(3) 利用遥感应用技术提取地表覆盖和引入地理信息应用技术对沟谷信息筛选的应用方法有较大潜力实现泥石流潜在形成区提取,同时,在后续研究中将引入泥石流的流通区、堆积区等情况进行综合考量。

参考文献:

[1] 李斌,罗德富. 中国泥石流的特征及防治工程 [J]. 水土保持通报,1985(2):15-19. [LI J, LUO D F. Characteristics of debris flow in China and its prevention and control engineering [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1985(2):15-19. (in Chinese)]

[2] A M Johnson, Rahn P H. Mobilization of debris flows. Zeitschrift fur Geomorphologie, 1970, 9 (Supl): 168-186.

[3] HUNGR O. A model for the runout analysis of rapid flow slides, debris flows, and avalanches [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1995, 32(4): 610-623.

[4] IVERSON R M, REID M E, LAHUSEN R G. Debris-flow mobilization from landslides [J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 1997, 25 (1): 85-138.

[5] SASSA K. Mechanisms of landslide triggered debris flows [M] Environmental Forest Science. 1998.

[6] 罗德富,杨庆溪,李斌. 泥石流的基本特征 [J]. 中国水土保持, 1985(8):13-16. [LUO D F, YANG Q X, LI J. Basic characteristics of debris flow [J]. Soil and Water Conservation in China, 1985(8):13-16. (in Chinese)]

[7] 杜榕桓. 泥石流成因、特点及防治意见 [J]. 中国水土保持, 1985(10):20-23. [DU R H. Causes, characteristics and prevention of debris flow [J]. Soil and Water Conservation in China, 1985(10):20-23. (in Chinese)]

- [8] NILSEN T H, BRABB E E. 18 Slope-stability studies in the San Francisco Bay region, California. *Reviews in Engineering Geology*, 1977, 3: 233 – 244.
- [9] 张沅. 遥感技术在泥石流预报中的作用[J]. 铁路航测, 1982(3): 19 – 22. [ZHANG Y. The role of remote sensing technology in debris flow prediction [J]. *Railway Aerial Survey*, 1982(3): 19 – 22. (in Chinese)]
- [10] PRADHAN B, LEE S. Delineation of landslide hazard areas on Penang Island, Malaysia, by using frequency ratio, logistic regression, and artificial neural network models[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2010, 60(5): 1037 – 1054.
- [11] PELFINI M, SANTILLI M. Frequency of debris flows and their relation with precipitation: a case study in the Central Alps, Italy [J]. *Geomorphology*, 2008, 101(4): 721 – 730.
- [12] CHANG M, TANG C, VAN ASCH T W J, et al. Hazard assessment of debris flows in the Wenchuan earthquake-stricken area, South West China [J]. *Landslides*, 2017, 14(5): 1783 – 1792.
- [13] 熊俊楠, 刘志奇, 苏鹏程, 等. 基于 GF-1 卫星影像的金川县泥石流沟空间分布特征研究[J]. 自然灾害学报, 2019, 28(2): 160 – 168. [XIONG J N, LIU Z Q, SU P C, et al. Research on debris flow gully spatial distribution characteristics in Jinchuan County based on GF-1 satellite image [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2019, 28(2): 160 – 168. (in Chinese)]
- [14] 周伟, 邓玖林. 基于 Fisher 判别法的台风暴雨泥石流预测模型[J]. 水科学进展, 2019, 30(3): 392 – 400. [ZHOU W, DENG J L. Predictive model of typhoon-induced debris flow based on Fisher discriminant analysis [J]. *Advances in Water Science*, 2019, 30(3): 392 – 400. (in Chinese)]
- [15] 王晨晖, 张超. 基于主成分分析法和遗传算法优化支持向量机模型的泥石流危险度预测[J]. 河北地质大学学报, 2017(2): 20 – 24. [WANG C H, ZHANG C. Debris flow risk prediction based on PCA-GA-SVM model [J]. *Journal of Shijiazhuang University of Economics*, 2017(2): 20 – 24. (in Chinese)]
- [16] 何超. 基于 GF-2 卫星数据的泥石流自动提取及评价模拟研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018. [HE C. Debris flow automatic extraction and evaluation simulation based on GF-2 satellite data [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2018. (in Chinese)]
- [17] 李春霖. 基于高分辨率国产遥感影像的泥石流自动提取方法研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2016. [LI C L. Research on Automatic Extraction of Debris Flows with Domestic High-resolution Remote Sensing Images [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2016. (in Chinese)]
- [18] 李丽敏, 程少康, 温宗周, 等. 基于改进 KPCA 与混合核函数 LSSVR 的泥石流预测[J]. 信息与控制, 2019, 48(5): 536 – 544. [LI L M, CHENG S K, WEN Z Z, et al. A debris flow prediction model based on the improved KPCA and mixed kernel function LSSVR [J]. *Information and Control*, 2019, 48(5): 536 – 544. (in Chinese)]
- [19] 邵亚奎, 朱长明, 张新, 等. 国产高分卫星遥感影像融合方法比较与评价[J]. 测绘通报, 2019(6): 5 – 10. [SHAO Y K, ZHU C M, ZHANG X, et al. Comparison of different fusion methods and their performance evaluation to high spatial resolution remote sensing data of GF [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2019(6): 5 – 10. (in Chinese)]
- [20] 邵河顺, 窦富国, 于壮, 等. 高分二号影像融合方法比较研究[J]. 黑龙江工程学院学报, 2019, 33(2): 9 – 12. [SHAO H S, DOU F G, YU Z, et al. Comparison of the image fusion methods for GF-2 [J]. *Journal of Heilongjiang Institute of Technology*, 2019, 33(2): 9 – 12. (in Chinese)]
- [21] 赵文驰, 宋伟东, 陈敏. 国产高分辨率遥感卫星融合方法比较[J]. 测绘与空间地理信息, 2019, 42(11): 154 – 158. [ZHAO W C, SONG W D, CHEN M. Comparison of fusion methods in domestic high resolution remote sensing [J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2019, 42(11): 154 – 158. (in Chinese)]
- [22] 刘锟, 付晶莹, 李飞. 高分一号卫星 4 种融合方法评价[J]. 遥感技术与应用, 2015, 30(5): 980 – 986. [LIU K, FU J Y, LI F. Evaluation study of four fusion methods of GF-1 PAN and multi-spectral images [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2015, 30(5): 980 – 986. (in Chinese)]
- [23] 丁杨, 王闯, 张银凤. 基于同源和异源的高分影像融合及质量评价[J]. 测绘与空间地理信息, 2019, 42(6): 122 – 125. [DING Y, WANG C, ZHANG Y F. High-resolution image fusion and quality evaluation based on homology and heterogeneity. [J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2019, 42(6): 122 – 125. (in Chinese)]

- [24] 王华斌, 李国元, 张本奎, 等. 资源三号卫星影像融合算法对比分析[J]. 测绘科学, 2015, 40(1): 47-51. [WANG H B, LI G Y, ZHANG B K, et al. Contrast and analysis of different fusion algorithms for ZY-3 satellite images[J]. Science of Surveying and Mapping, 2015, 40(1): 47-51. (in Chinese)]
- [25] 王杨科, 李楠, 何琼. 山区泥石流特点及其防治[J]. 科技信息, 2013(25): 498-499. [WANG Y K, LI N, HE Q. Characteristics and prevention of debris flow in mountainous areas[J]. Scientific and technological information, 2013(25): 498-499. (in Chinese)]
- [26] 于潇. 北京洪水峪泥石流形成条件探讨[J]. 矿产勘查, 2019, 10(11): 2721-2727. [YU X. Discussion on debris flow formation conditions in Hongshuiyu area, Beijing[J]. Mineral Exploration, 2019, 10(11): 2721-2727. (in Chinese)]
- [27] 刘德玉, 贾贵义, 李松, 等. 地形因素对白龙江流域甘肃段泥石流灾害的影响及权重分析[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(3): 33-39. [LIU D Y, JIA G Y, LI S, et al. Impacts of topographical factors on debris flows and weight analysis at the Gansu segment of the Bailongjiang River Basin [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(3): 33-39. (in Chinese)]
- [28] 董文, 潘建平, 阳振宇, 等. 高分二号卫星数据在地质灾害调查中的应用——以重庆万州区为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(1): 106-111. [DONG W, PAN J P, YANG Z Y, et al. Application of GF-2 satellite data in geological hazard survey: a case study in Wanzhou District of Chongqing City[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(1): 106-111. (in Chinese)]
- [29] 杜培军, 林卉, 孙敦新. 基于支持向量机的高光谱遥感分类进展[J]. 测绘通报, 2006(12): 37-40. [DU P J, LIN H, SUN D X. On progress of support vector machine based hyperspectral RS classification[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2006(12): 37-40. (in Chinese)]
- [30] 韩洁, 郭擎, 李安. 结合非监督分类和几何一纹理-光谱特征的高分影像道路提取[J]. 中国图象图形学报, 2017(12): 1788-1797. [HAN J, GUO Q, LI A. Road extraction based on unsupervised classification and geometric-texture-spectral features for high-resolution remote sensing images[J]. Journal of Image and Graphics, 2017(12): 1788-1797. (in Chinese)]
- [31] 骆剑承, 周成虎, 梁怡, 等. 支撑向量机及其遥感影像空间特征提取和分类的应用研究[J]. 遥感学报, 2002, 6(1): 50-55. [LUO J C, ZHOU C H, LIANG Y, et al. Support vector machine for spatial feature extraction and classification of remotely sensed imagery[J]. Journal of Remote Sensing, 2002, 6(1): 50-55. (in Chinese)]
- [32] FOODY G M, MATHUR A. Toward intelligent training of supervised image classifications: directing training data acquisition for SVM classification[J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 93(1): 107-117.
- [33] 廖东, 戴洪宝, 许继影. 基于 Landsat-8 监督分类与非监督分类的土地利用分类方法比较[J]. 河南科技, 2019(8): 14-16. [LIAO D, DAI H B, XU J Y. Comparison of land use classification methods based on landsat-8 supervised classification and unsupervised classification[J]. Henan Science & Technology, 2019(8): 14-16. (in Chinese)]
- [34] 赵书河. 高分辨率遥感数据处理方法实验研究[J]. 地学前缘, 2006, 13(3): 60-68. [ZHAO S H. Experimental study of methods for high spatial resolution remote sensing data processing[J]. Earth Science Frontiers, 2006, 13(3): 60-68. (in Chinese)]
- [35] 泥石流灾害防治工程勘查规范(试行): T/ACGHP 006—2018[S]. [Code for investigation of debris disaster prevention and Control Engineering (Trial): T/ACGHP 006—2018[S]. (in Chinese)]