

基于厘米级无人机影像的水土保持措施精准识别

夏晨真^{1,2}, 张月^{1,2}

(1.吉林农业大学资源与环境学院,长春 130118;2.吉林省商品粮基地土壤资源可持续利用重点实验室,长春 130118)

摘要: 基于厘米级高分辨率无人机影像,应用面向对象方法(Object-Based Image Analysis, OBIA)对吉林省伊通县椽子沟流域的横坡改垄、地埂植物带、生态恢复乔木林、生态恢复草地等水土保持措施进行自动精准识别。应用超绿指数(Excess Green Index, ExG)、超红指数(Excess Red Index, ExR)、归一化差异指数(Normalized Difference Index, NDI)等光谱指数,形状的主方向、形状指数等形状特征,均值(Mean)、方差(Variance)、对比度(Contrast)等纹理特征进行措施的特征提取。结果表明:研究区水土保持措施识别的总体精度可达 91.24%,Kappa 系数为 0.87;对垄台、垄沟等线性水土保持措施总体精度可达 72.33%,Kappa 系数为 0.63。基于厘米级无人机影像,应用面向对象方法基本可实现对黑土区水土保持措施的精准识别,也可对垄台垄沟等线性措施进行自动识别,研究结果可为水土保持措施实施范围及完好程度的动态监测提供参考依据。

关键词: 厘米级; 无人机影像; 面向对象; 黑土区; 水土保持措施; 多尺度分割

中图分类号:S157.1 文献标识码:A 文章编号:1009-2242(2020)05-0111-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.05.016

Accurate Identification of Soil and Water Conservation Measures Based on Centimeter-resolution UAV Images

XIA Chenzhen^{1,2}, ZHANG Yue^{1,2}

(1.College of Resources and Environment, Jilin Agricultural University, Changchun 130118; 2.Key Laboratory of Soil Resource Sustainable Utilization for Jilin Province Commodity Grain Bases, Jilin Agricultural University, Changchun 130118)

Abstract: Based on the centimeter-resolution Unmanned Aerial Vehicles (UAV) image, the Object-Based Image Analysis (OBIA) was applied to identify the soil and water conservation (SWC) measures, including contour ridges, ridge plants, ecological restoration forest, ecological restoration grassland, in the Chuanzi-gou catchment of Yitong district, Jilin province. Spectral indices including Excess Green Index (ExG), Excess Red Index (ExR), Normalized Difference Index (NDI), shape features including principal direction and shape index, and texture features including mean, variance and contrast were used to extract the features of SWC measures. Finally, the overall accuracy and Kappa coefficient of the identification of SWC measures in the study area was 91.24% and 0.87, respectively. The overall accuracy of the identification of linear SWC measures such as ridges and ridge-furrows was 72.33% with a Kappa coefficient of 0.63. The research showed that the centimeter-resolution UAV image, combined with the OBIA methods had the ability to accurately identify SWC measures in black soil area. They can also identify linear measures such as ridges and ridge-furrows automatically. The research can provide a reference basis for the dynamic monitoring of the implementation scope and integrity of SWC measures.

Keywords: centimeter-resolution; UVA image; object-based image analysis; black soil region of Northeast China; soil and water conservation measures; multi-scale segmentation

我国东北黑土区存在严重的水土流失现象,据统计,东北黑土区 2018 年水土流失面积达 22.16 万 km²,占土地总面积的 20.38%^[1]。这对我国粮食安全造成了较大威胁,同时也危及着人们生存与发展的

环境。鉴于此状况,全国修建了大量水土保持措施工程来进行防治,仅 2011 年全国水土保持措施累计面积就为 109.66 km²,但根据 2012 年全国水利普查情况来看,相较于 2011 年水土保持措施覆盖面积减少

收稿日期:2020-03-27

资助项目:国家自然科学基金项目(U19A2061);国家重点研发计划项目(2006YFE0202900);吉林省教育厅科学技术研究项目(JJKH20190915KJ)

第一作者:夏晨真(1997-),男,在读硕士研究生,主要从事农业遥感研究。E-mail:Summul_R@163.com

通信作者:张月(1985-),女,博士,硕士生导师,主要从事农田养分遥感反演与地物信息精准识别研究。E-mail:lisa_ling7892002@163.com

了 9.85%^[2]。因此,及时、准确地获得水土保持措施的覆盖面积和完好程度为水土保持普查的一项重要工作。传统水土保持措施的普查方法多以分层抽样野外调查法为主,这势必耗费大量人力、物力、财力和时间。随着数据采集手段的不断多样化、信息处理技术的迅速发展,如何采取快速、准确、有效的方法对这些措施的实施范围和保存完好程度进行动态监测具有十分重要的意义。

遥感技术的迅猛发展,使越来越多的研究者尝试利用遥感影像进行水土保持措施的快速、精准识别。已有研究者^[2]基于 MODIS、Landsat 等中等分辨率遥感影像进行面状水土保持措施分布的研究,研究结果相对传统方法更加准确、高效,但受到分辨率的限制,这些研究无法对如梯田、地埂植物带、等高耕作等水土保持措施信息进行自动精准、定量识别。近年来,遥感影像空间分辨率的不断提高,以及无人机技术的飞速发展使水土保持措施的自动精准识别成为可能^[1,3],利用高分辨率遥感影像获取水土保持措施信息已逐渐开始成为水土保持研究的热门领域之一。侯群群^[4]利用 SPOT5 影像进行基于面向对象方法的坝地和梯田信息识别,识别结果的总体精度为 77.34%;党恬敏^[5]基于 GF-1 号高分辨率遥感影像实现对黄土高原梯田的精准识别,识别精度达 96.60%;Zhang 等^[6]基于 GF-1 号高分辨率遥感影像进行梯田信息的自动识别研究,识别精度达 80%以上;Alessandra 等^[7]基于无人机高分辨率影像进行梯田信息的识别,梯田和非梯田景观识别精度分别达到 93%和 98%。无人机以其低成本、不受云层影响、限制较小等优势在目前水土保持监测和调查中作用越来越大^[8],但是目前应用厘米级无人机影像对水土保持措施信息进行精准识别的研究还十分有限,因此如何对影像信息进行全自动、高精度的提取,其方法需要积极探讨。

在对遥感影像信息进行识别的时候,其识别方法是影响识别精度的重要因素之一。目前,主要的识别方法包括目视解译、决策树、神经网络和支持向量机等^[7,9],多采用半自动化手段结合目视解译来实现。这些方法多只适用于较小区域,如区域过大就会造成劳动力和成本过高而难以开展,因此,如何进行区域尺度上水土保持措施的全自动识别成为当前亟待解决的问题之一^[10]。以前基于中低空间分辨率影像的识别中,水土保持措施的目标较小,其内部像元较为一致,且包含信息比较有限,只需要通过面向像元的方法就可提取^[3]。但在厘米级影像中,水土保持措施包含了更多的信息,其形状、纹理等信息更加丰富清晰,如使用面向像元的方法会造成椒盐噪声现象,导

致精度降低,因此面向对象的分类方法更适用于厘米级影像的水土保持措施提取^[4,11]。面向对象的分类方法可综合利用影像对象的光谱、形状和纹理等特征,充分挖掘高分辨率影像所蕴含的信息,使识别结果具有更丰富的语义,精度更高^[11]。同时,面向对象影像分类更多地关注对影像语义信息的理解,对影像的分析与理解层次更高,更加符合人脑的认知方式。

因此,本研究以吉林省伊通县椴子沟流域为研究区,基于厘米级无人机影像获取水土保持措施的光谱与空间特征,通过面向对象方法实现水土保持措施的自动精准识别。旨在研究厘米级无人机影像在水土保持措施自动识别方面的精度及其适用性问题,为黑土区水土保持措施自动识别方法的选择提供借鉴,为黑土区水土流失防治与整治工作提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区选择位于东北典型黑土区的伊通河流域内的椴子沟流域(44°02′—44°53′N, 125°14′—126°24′E),流域面积 18.79 km²,行政区划隶属于吉林省四平市伊通满族自治县,为国家重要商品粮基地(图 1)。研究区属于温带大陆性季风气候,年平均气温 5.5℃,年平均降水量 651.7 mm,无霜期 138 天。主要土壤类型为棕壤、冲积土、黑土、白浆土和草甸土等^[12]。水土保持措施主要包括横坡改垄、地埂植物带、生态恢复乔木林、生态恢复草地等。

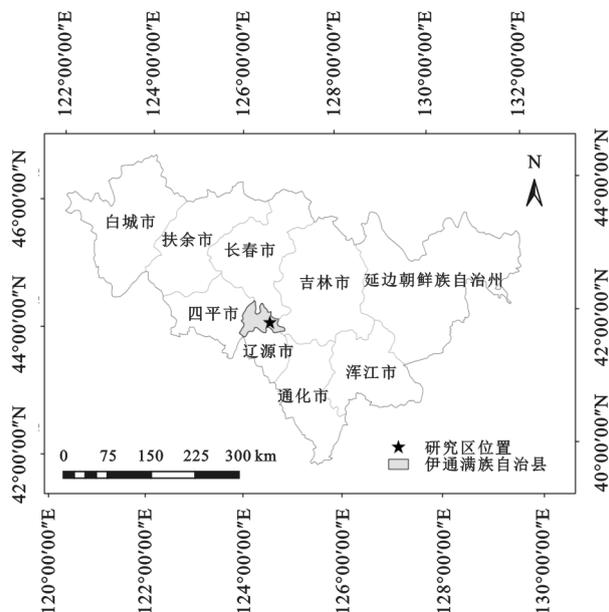


图 1 研究区地理位置

1.2 数据源

本研究的影像数据来自无人机航拍影像,飞行时间为 2018 年 5 月 26 日 11:00—14:00,设定航高为 150 m。采用广州南方测绘科技有限公司的 HO1300 型无人机,搭载 4 000×3 000 像素的索尼 RX1R II

型传感器,所采集影像为 RGB 3 波段影像,空间分辨率为 0.05 m。经过地面 GPS 坐标校正,对所采集影像进行建立密集点云、生成网格、生成纹理、导出正射影像等预处理后得到研究区影像图。所用其他数据还包括数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM),分辨率 0.26 m,以及对横坡改垄的垄台、垄沟及地埂植物带宽度的实地测量数据,用于对线性水土保持措施的识别结果进行验证。

1.3 研究方法

面向对象的分类方法是指将同质邻近像元在分类前构建为一个对象,并将其作为提取地物的最小单元,利用每个对象上丰富的特征信息对这些影像对象进行分类,进而识别目标地物的特征^[13]。OBIA 可减少由于高分辨率影像同种地物光谱变异较大而引起的“椒盐现象”,以及“同物异谱”和“同谱异物”造成的错分、漏分等现象^[11]。基于 OBIA 方法对影像的处理包括影像对象的构建和影像分类 2 个步骤,即首先通过对预处理影像的分割完成影像对象的构建,然后基于地物信息提取的要求选择合适的特征,构建影像分类规则并完成目标地物的识别。

1.3.1 影像分割 影像分割在 OBIA 中发挥着极其重要的作用,是指将影像划分为若干个互不重叠的子区域,区域内部像元具有均致性,即子区域内部具有相同或类似的颜色、灰度、形状、纹理等信息,而相邻区域间具有显著差异,最后从中提取目标地物的过程^[14]。影像分割分为 2 步:首先根据预先设置的分割尺度阈值,将影像中所有像元划分为亮度不同的小区域,即对整幅影像构建尺度空间;然后根据分割阈值生成影像对象^[5]。常见的影像分割方法主要有基于边界分割法、基于区域分割法、多尺度影像分割法等。

本研究采用的是多尺度影像分割法,该方法基于异质性最小准则,将固定分辨率的遥感影像划分为不

同尺度下具有更高层次语义信息的多边形影像对象,最终可生成代表地表实体不同尺度的等级层次网状结构^[4]。这使得在结构内部的相同等级层次具有相同或相似的均质性标准,而不同等级层次间则具有传递性,尽可能使所有空间地物都能在合适的尺度下得到较好描述。本研究主要通过 eCognition 9.0 软件的多尺度分割模块中设置分割阈值、图层权重、形状指数和紧密度等参数实现影像分割。而在影像分割时分割尺度的确定决定着分割效果的优劣与影像信息提取精度具有很大的相关性。目前,最优分割尺度的确定往往采取定性法中的试错法,即通过变换分割尺度阈值和分割参数对影像进行分割,在设置分割阈值后通过预览窗口目视确定其分割量值^[13]。

1.3.2 水土保持措施的特征选择 分割后的影像对象包含影像对象的特征信息,是基于面向对象方法进行影像分类的最基本单元^[15]。这些特征信息可通过数学模型定量描述,因此也叫特征参数^[5],主要包括:光谱特征、形状特征、纹理特征、自定义特征(波段比值以及色彩空间)等。

为获得水土保持措施信息的精准识别结果,本研究主要从无人机影像中提取光谱、地形、纹理和形状等特征信息。不同的水土保持措施会随着土壤水分、阴影、作物种植、作物生育期特征的不同而呈现出不同色调,不同地物类型的植被覆盖特征可通过红、绿、蓝 3 个波段反射率之间的运算得到。因此,为快速识别植被覆盖特征,基于无人机影像的光谱信息,本研究采用的常用光谱指数,包括 ExR^[16]、NDI^[17]、超绿指数 ExG^[18]、超绿超红差分指数(Excess Green Minus Excess Red, ExGR)^[19]、植被提取颜色指数(Color Index of Vegetation Extraction, CIVE)^[20]、植被因子(Vegetative Index, VEG)^[21]、植被指数组合(Combination of Vegetation indices, COM)^[22]等,相应计算公式见表 1。

表 1 本研究所用的光谱指数

光谱指数	计算公式
超红指数 ExR	$ExR = 1.4r - g$
超绿指数 ExG	$ExG = 2G - R - B$
超绿超红差分指数 ExG-ExR	$ExGR = ExG - ExR$
归一化植被指数 NDI	$NDI = \frac{G - R}{G + R}$
植被提取颜色指数 CIVE	$CIVE = 0.441r - 0.811g + 0.385b + 1.78745$
植被因子 VEG	$VEG = \frac{G}{R^{0.667} B^{0.333}}$
植被指数组合 COM	$COM = 0.25ExG + 0.3ExGR + 0.33CIVE + 0.12VEG$

注:R、G、B 为可见光红色、绿色、蓝色波段的反射率;r、g、b 分别为红色、绿色、蓝色波段反射率的归一化值,计算公式为 $r = \frac{R}{R+G+B}$, $g =$

$$\frac{G}{R+G+B}, b = \frac{B}{R+G+B}。$$

地形特征包括高程、坡度、坡向和地形湿度指数等,其中,坡度和坡向可利用 ArcGIS 空间分析工具从 DEM 中提取,而地形湿度指数(TWI)^[23]的表达式为:

$$TWI = \ln(S/\tan \beta)$$

式中:TWI 为地形湿度指数;S 为地表水所流经的单位长度等高线上的上游区域面积(m^2/m),即上坡汇水面积; $\tan \beta$ 为区域地形坡度的正切值,其中 β 为弧度坡度($^\circ$)。

纹理特征是所有地物实体表面所共有的内在特征,且不依赖于地物的颜色与亮度,可反映区域内的灰度变化,并可通过量化值来描述^[24]。这些量化值主要包括均值(Mean)、方差(Variance)、逆差距(Homogeneity)、对比度(Contrast)、差异性(Dissimilarity)、熵(Entropy)、二阶矩(Second Moment)和相关性(Correlation)。本研究采用灰度共生矩阵(Gray Level Co-occurrence Matrix, GLCM)的纹理分析法,基于二阶概率统计方法(Co-occurrence Measures)来对这 8 种滤波特征进行提取。

形状特征主要包括面积(Area)、密度(Density)和主要方向(Main Direction)等。本研究选取的是主要方向(Main Direction),即属于 2 个特征值较大特征向量的方向,来源于影像对象空间分布的协方差矩阵。

1.3.3 水土保持措施信息的识别 为识别研究区内的水土保持措施信息,本研究采用基于规则的影像分类方法,即在对影像进行多尺度分割的基础上,根据分割后的影像对象所包含的不同特征,从中选优并建立相应的规则集,完成对不同水土保持措施信息的识别。在此过程中,不同水土保持措施需要采用不同的规则,而且对规则的采用具有先后顺序,需依次完成。

2 结果与分析

2.1 影像多尺度分割

由于本研究所采用厘米级无人机影像的空间分辨率较高,导致在提取线性水土保持措施垄台和垄沟信息时,如果分割阈值设置过小,沟垄内部的异质性会导致分割过于破碎,也就是“过分割”现象;在厘米级影像中,相邻地物特征是连续变化的,因此地物边缘具有模糊性,如果分割尺度过大会导致分割对象大于目标,也就是“欠分割”现象,不利于沟垄的提取。本研究经过多次尝试,反复目视对分割结果进行对比以获得较优的分割结果。首先,基于无人机影像的红、绿、蓝 3 个波段进行影像分割。将形状指数和紧密度的权重固定为 0.1, 0.5, 分割尺度分别设定为 25, 35, 45, 发现分割尺度为 25 时,横坡改垄存在过度分割情况;分割尺度为 45 时,横坡改垄存在欠分割情况;分割尺度为 35 时,整体分割结果较好(图 2)。然

后,将分割尺度和紧密度的权重固定为 35, 0.5, 将形状指数的权重分别设定为 0.1, 0.4, 0.7, 发现形状指数的权重为 0.1 时,分割结果较好(图 2)。最后,将分割尺度和形状指数的权重固定为 35, 0.1, 将紧密度的权重分别设定为 0.1, 0.5, 0.9, 发现紧密度的权重为 0.5 时,分割结果较好(图 2)。因此,最终影像的分割尺度为 35, 形状指数为 0.1, 紧密度为 0.5。

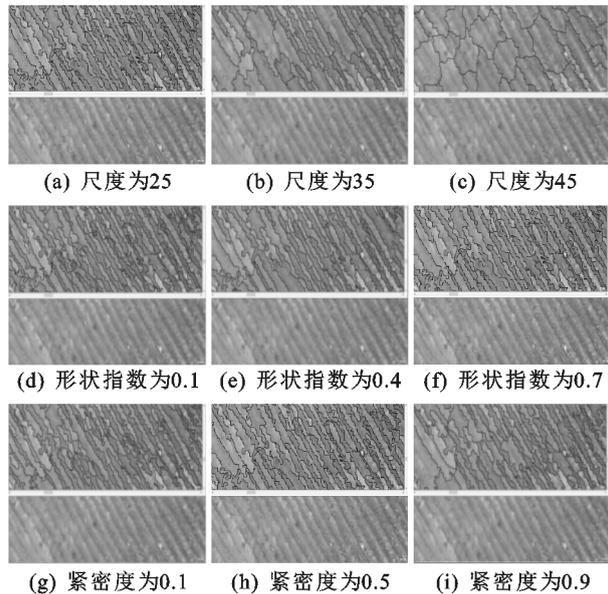


图 2 不同参数设置下的影像分割结果(研究区局部)

2.2 影像特征提取

采用确定的尺度对影像进行分割后,仍有部分影像对象的轮廓与地物实际情况不相吻合(图 2),主要是因为仅基于影像进行分割,利用的信息非常有限。因此本研究还选取光谱、地形和纹理特征参与后续分割,以获得更好的影像分割效果。本研究添加光谱特征即 7 种植被指数参与分割后,影像分割结果见图 3,大部分影像对象的分割得到优化,尤其是对于植被和非植被的分割,影像对象的轮廓与地物的真实轮廓也更加吻合。由于无人机影像在拍摄过程中受到光照、拍摄时间、风速等因素的影响,相同地物亮度并不一定相同,仍需要借助其他特征辅助分割。

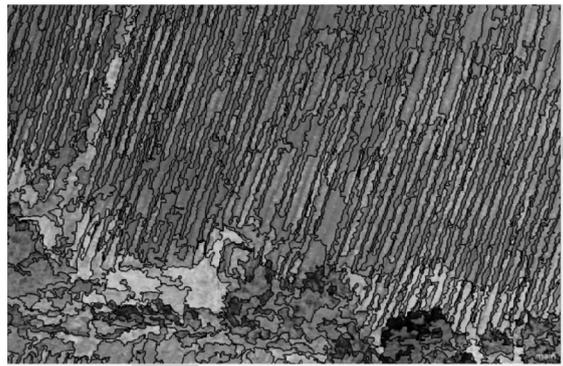


图 3 光谱特征参与多尺度分割结果(研究区局部)

在此基础上,又加入地形特征参与分割,尝试利用坡度、坡向和 TWI 等地形特征帮助分割线性水土

保持措施。由图 4 可知,有些地物被分割为很多小方格形状的图斑,与原地物的边缘轮廓并不一致,不仅不能帮助分割地埂植物带、垄台和垄沟等线性水土保持措施,反而使其更加破碎。这可能是由于厘米级影像分辨率较高,包含的信息更加丰富,而且对于地形特征也就是对坡度、坡向、TWI 的识别更加精确,尤其是由于不同土质或者光照原因导致同一地物 TWI 的细微差异,使其被分割成不同的对象。因此,本研究中地形特征的参与并没有改善影像分割效果,不利于水土保持措施信息的提取,后续分割中并没有使用。

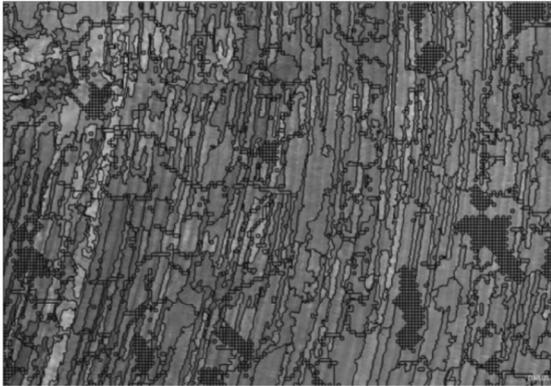


图 4 地形特征参与多尺度分割结果(研究区局部)

另外,本研究还加入纹理特征参与分割,并尝试借助 Canny 边缘检测算子来优化多尺度分割结果。Canny 边缘检测算子可以使地物的边界更加清晰,纹理特征参与后可将各图斑分割为与地物轮廓相吻合的形状,不过于破碎,将垄台与垄沟的分割更加细化。因此,最终参与分割的图层包括无人机影像的红、绿、蓝 3 个波段,7 种植被指数及纹理特征。各特征参与分割权重的设定同样影响着最终分割的效果,通过上述不同特征参与分割后的结果分析,本研究最终将 RGB 3 波段的权重赋为 0.2,植被指数、纹理特征权重赋为 0.5,Canny 边缘检测算子的权重赋为 1,达到了较好分割效果(图 5)。

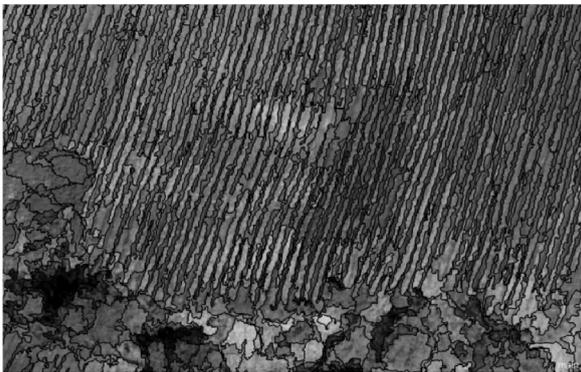


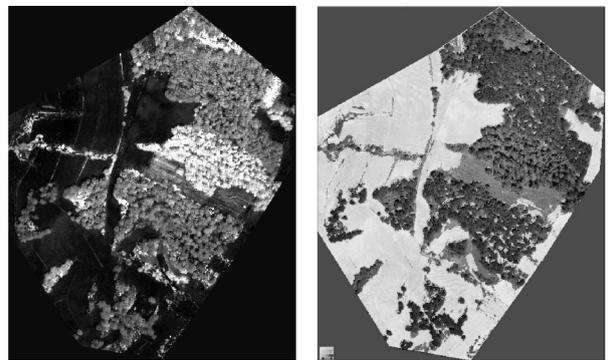
图 5 多尺度分割的最终结果(研究区局部)

2.3 基于面向对象的水土保持措施信息识别

经影像分割后,影像的基本单元由像元变成了包含各种特征信息的影像对象;依据需要提取水土保持措施的特点及影像对象所提供的特征信息,本研究通

过某一种或多种特征信息的组合对各水土保持措施进行识别。

植被指数可以较好区分植被与非植被,通过对不同水土保持措施设定阈值间的差异,对比 7 种植被指数的区分效果发现,ExG 在本研究中可以较好地将植被与非植被分开,如图 6(a)所示,植被部分较亮,非植被部分较暗。但植被中包含生态恢复乔木林、生态恢复草地和地埂植物带等措施,ExG 并不能直接将这 3 种措施区分开,所以对植被取反,即先将非植被进行定义,将 $-6 \leq \text{ExG} < 20$ 的未分类对象定义为横坡改垄,如图 6(b)中较亮的部分。



(a) ExG 的提取结果

(b) 应用 ExG 的水土保持措施提取结果

图 6 应用植被指数 ExG 的信息识别

由于生态恢复乔木林和生态恢复草地均属于植被类型,所以利用光谱特征难以将两者有效区分,需要结合纹理特征对其进行分类。通过对比灰度共生矩阵中的 8 种滤波特征发现,均值的提取效果较好,即将 $30 \leq \text{均值} < 45$ 的未分类对象定义为生态恢复草地,再将 $17 \leq \text{ExG} < 131$ 的未分类对象定义为生态恢复乔木林。在对横坡改垄进行分类时,乔木林的空隙中漏出的土地会被错分为横坡改垄,为减小土壤背景对其的影响,通过 NDI 对其进行优化,将 $-0.01 < \text{NDI} \leq 8$ 的未分类对象和横坡改垄对象定义为生态恢复乔木林。

在植被指数提取后,虽然基于厘米级无人机影像可以通过肉眼清楚看出地埂植物带的分布情况,但因为地埂植物带的植被与生态恢复草地的植被在空间形态上表现基本一致,而且有些地埂植物带的植被生长状况不好,很难通过规则的建立将地埂植物带与生态恢复草地和横坡改垄区分开。另外,研究区中还存在一些如侵蚀沟、裸露地块等地物的错分,需要对其加以人工目视解译。最终,研究区水土保持措施的识别结果见图 7,生态恢复乔木林、生态恢复草地这类水土保持措施多分布于研究区的东北方向,横坡改垄多分布于西南方向,而地埂植物带则分布于各个垄块之间。各水土保持措施的分布面积见表 2,其中横坡改垄的面积最大,占 5.81 hm^2 ,地埂植物带的面积最小,仅占 0.17 hm^2 。



图 7 水土保持措施信息识别图

表 2 研究区内各水土保持措施面积

水土保持措施类型	面积/hm ²
生态恢复乔木林	5.77
生态恢复草地	1.25
横坡改垄	5.81
地埂植物带	0.17

为进一步识别影像中更加细微的地物,也就是线性水土保持措施,本研究在上述分类的基础上,对横坡改垄中的垄台和垄沟进行了识别。由于厘米级无人机影像中土壤类型和质地的差别对于垄台和垄沟的分类影响较大,因此本研究利用几何特征中的形状指数主方向,通过不同阈值的设定将横坡改垄分为 3 个垄块。通过对比纹理特征中的不同参数阈值的差异,发现对比度对于垄台和垄沟的区分更加容易。通过比较对比度的阈值,先分别定义各垄块中的垄沟,再对垄沟进行取反,将不是垄沟的对象定义为垄台,其分类结果见图 8。

2.4 精度分析与评价

精度评价对于影像分类或地物信息识别是至关重要的一个环节。影像的分类精度主要是指分类结果与地表实际地物的吻合情况,也就是验证分类方法的有效性和适用性,从而对其分类方法进行优化,使得分类效果得到改善。

本研究利用 ArcGIS 软件在整个研究区内随机选取 300 个验证点,通过目视解译确定这些样点上的水土保持措施类型,通过 eCognition 软件将其与最终分类结果进行精度评价,并生成混淆矩阵与一系列精度评价指标(表 3)。由表 3 可知,所有非线性水土保持措施识别的总体精度可达 90.24%,Kappa 系数

为 0.85,分类精度较高。其中,横坡改垄和生态恢复乔木林的分类精度可达 97.35%和 96.61%,说明基于厘米级无人机影像的大面积水土保持措施的分类精度相较于高分辨率遥感影像更高。而生态恢复草地的漏分误差较高,达到了 37.8%,多被错分为生态恢复乔木林,这主要是由于生态恢复草地和生态恢复乔木林相似的特征较多,由于分辨率的提高,同谱异物现象有所增加,在区分过程中分类特征干扰因素较大,同时还有一些影子造成的影响,给分类增加了难度,最终降低了总体分类精度。

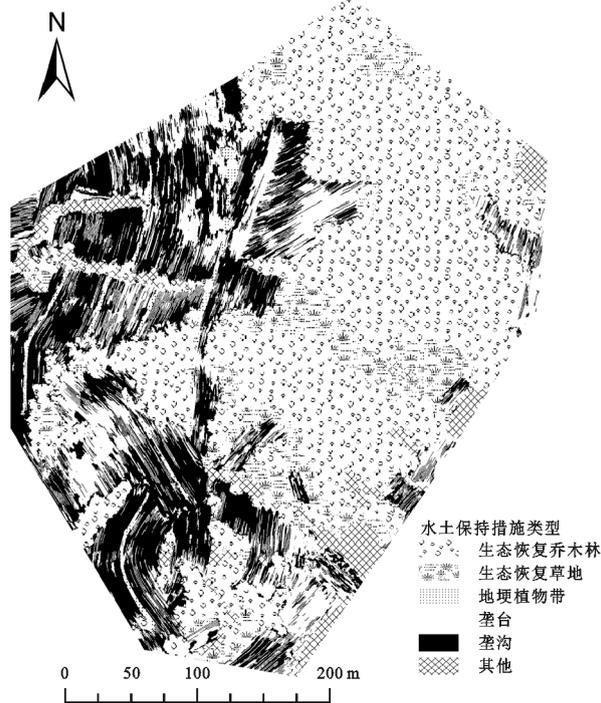


图 8 加入线性水土保持措施的信息提取结果

包含线性水土保持措施的总体识别精度如表 4 所示,总体精度为 72.33%,Kappa 系数为 0.63,分类质量较好。总体分类精度低于非线性水土保持措施,主要是因为垄沟和垄台的漏分误差较高,分别为 41.7%和 48.3%,错分误差分别为 58.9%和 34.8%。在对垄沟和垄台进行识别时,由于土质不同,导致其亮度不同,且有的地方存在过度曝光,在区分过程中干扰较大,增加了分类难度。

针对线性水土保持措施,本文不仅进行了总体精度评价,还将研究区随机选取的实地测量数据与分类结果中提取参数的进行对比。从表 5 可以看出,提取的分类图中线性水土保持措施数据与实测数据相比基本相符,由于地埂植物带上长有一些植物,造成其提取宽度较宽,而垄沟和垄台的宽度偏宽可能是由于土质松动,从图中提取的宽度会存在一些误差。可见,在提取大部分非线性水土保持措施的基础上,本研究可实现对大部分线性水土保持措施信息的全自动识别,且识别精度可以满足实际应用。

表 3 分类结果的精度评价

精度评价		被分类别						
内容		地埂植物带	横坡改垄	生态恢复草地	生态恢复乔木林	其他	未分类	总计
参考类别	生态恢复乔木林	0	1	1	114	2	0	118
	其他	0	1	0	0	9	3	13
	地埂植物带	7	1	0	0	0	0	8
	横坡改垄	1	110	0	2	0	0	113
	生态恢复草地	0	3	28	13	1	0	45
	总计	8	116	29	129	12	3	297
精度评价/%	生产精度	87.50	97.35	62.22	96.61	69.23	—	—
	用户精度	87.50	94.83	96.55	88.37	75.00	—	—
	单一类别 Kappa 系数	0.87	0.96	0.58	0.94	0.68	—	—
总体精度/%	90.24							
Kappa 系数	0.85							

表 4 加入线性水土保持措施的精度评价

精度评价		被分类别						
内容		地埂植物带	垄台	垄沟	生态恢复草地	生态恢复乔木林	其他	总计
参考类别	地埂植物带	4	0	0	0	0	0	4
	垄台	2	45	38	0	1	1	87
	垄沟	0	19	28	0	1	0	48
	其他	0	0	0	1	0	8	9
	生态恢复草地	0	3	1	25	4	4	37
	生态恢复乔木林	0	2	1	4	107	1	115
精度评价/%	总计	6	69	68	30	113	14	300
	生产精度	100	51.72	58.33	67.57	93.04	88.89	—
	用户精度	66.67	65.21	41.18	83.33	94.70	57.14	—
单一类别 Kappa 系数	1.00	0.37	0.46	0.64	0.89	0.88	—	
总体精度/%	72.33							
Kappa 系数	0.63							

表 5 线性水土保持措施的实测与识别数值对比

线性水土保持措施类型	单位:m	
	实地测量宽度	识别宽度
地埂植物带	0.3~1.1	0.7~1.8
垄台	0.2~0.6	0.3~0.7
垄沟	0.1~0.2	0.2~0.3

3 讨论

厘米级无人机影像相较于卫星遥感影像具有更加丰富的地物形状、纹理等空间特征,而且无人机遥感具有灵活性高、云下飞行、影像分辨率高等诸多优点,更加方便快捷,为水土保持措施的精准识别提供了更加精细的数据源。在利用面向对象方法进行分类时,影像分割可以较好解决噪声椒盐现象,提高分类质量,因此分类精度也会依赖于分割尺度的确定。

分割尺度的设定大多由人工目视判别,具一定主观性,但是由于分割尺度会直接影响到地物信息的识别精度,因此后续研究考虑将对分割结果的优劣进行评价,以细化对误差来源的划分,进一步改善水土保持措施的识别精度。在影像分割过程中,为优化影像分割结果,需要选取多种特征参与。由于本研究采用的无人机影像只具有红、绿、蓝这 3 个波段,所以对于

光谱特征即其中植被指数的选择受到了一定限制。而且在进行分类规则构建的时候,在已选择的特征中有多种参数可供选择,为选择合适的特征参数组合并确定其量化值范围需要进行多次对比分析,也会存在一定误差。同时,在利用 ExG 进行信息识别分类时,有 3 类水土保持措施的量化值范围有一定重叠,是因为其中一部分由于光照、杂草等导致其特异性较小,会对其单一类别的识别精度有所影响。

而在精度评价时,本研究针对非线性水土保持措施的提取精度与侯群群^[4]、党恬敏^[5]研究结果相近,表明面向对象方法在厘米级无人机影像信息识别中同样适用,而且利用面向对象的方法来对水土保持措施的识别是可行的。总体分类精度尤其是加入线性水土保持措施后相较于一些学者^[5,7]的研究较低,主要是由于:(1)利用规则集进行多种水土保持措施的提取时,在影像分割和特征选择方面会受到分割尺度、特征及其参数选择、量化值范围等因素的影响;(2)这些学者^[4-7]的研究仅针对于非线性水土保持措施的提取,而线状水土保持措施相较于面状水土保持措施更加细微,提取更加困难,同时一些外界干扰因素如杂草、植被种类、土壤类型等对其干扰更强;(3)无人机影像随着空间

分辨率的增加,同一类别的类内异质性将增大,不同类别类间异质性将减小^[25],光谱信息更加丰富,拍摄时间和植被生长状况会导致一些水土保持措施识别分类精度较低,例如生态恢复草地如果生长状况不佳,光谱反射就会偏暗,容易被误分为横坡改垄。

但就对于本研究区水土保持措施识别的总体精度和 Kappa 系数来说,不论是非线性水土保持措施的识别,还是线性水土保持措施的识别,都已经达到了较高的识别精度。这说明随着影像分辨率的提高,面向对象方法可以识别更细微的地物类型,意味着水土保持措施的动态监测将更加精准。但是由于本研究是在小流域尺度上进行的,并没有在大尺度区域进行应用,因此适用性现在也不得而知,需要进一步研究。而且,目前尚缺乏对其他区域同类地物的识别精度研究,因此针对线性水土保持和其他细微地物的适用性仍需探讨。另外,在数据源的选取方面,能否采用多光谱影像和其他植被指数,并对分类规则加以优化使其构建的更加快速,实现线性水土保持措施自动识别精度的提高,希望以后可以对其进行精确分析验证。

4 结论

(1) 基于厘米级无人机影像可实现研究区水土保持措施的精准识别,针对大面积水土保持措施的识别精度相较于高分辨率遥感影像精度更高,线性水土保持措施如垄台与垄沟在纹理、空间关系中与其他地物的特异性明显,其识别相较于中等分辨率卫星影像更具优势。

(2) 面向对象方法能够充分挖掘厘米级无人机影像的大部分特征信息,有效实现对水土保持措施的快速、精准识别。本研究对面状水土保持措施信息的识别精度可达 90.24%, Kappa 系数为 0.85; 线性水土保持措施识别精度可达 72.33%, Kappa 系数为 0.63, 满足实际应用需求。

参考文献:

- [1] 王岩松,姜艳艳,常诚,等.2018 年度松辽流域水土流失动态监测结果分析[J].中国水土保持,2019(12):7-10.
- [2] 刘震.我国水土保持情况普查及成果运用[J].中国水土保持科学,2013,11(2):1-5.
- [3] 赵帮元,马宁,杨娟,等.基于不同分辨率遥感影像提取的水土保持措施精度分析[J].水土保持通报,2012,32(4):154-157.
- [4] 侯群群.面向对象的遥感影像水土保持措施信息提取研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2013.
- [5] 党恬敏.基于高分影像的黄土高原梯田提取技术研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2017.
- [6] Zhang Y, Shi M C, Zhao X, et al. Methods for automatic identification and extraction of terraces from high spatial resolution satellite data (China-GF-1)[J]. International Soil and Water Conservation Research, 2017, 5(1):17-25.
- [7] Alessandra C, Lammert K, Lorenzo B. A novel approach for detecting agricultural terraced landscapes from historical and contemporaneous photogrammetric aerial photos[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2018, 73:800-810.
- [8] 赵俊喜.无人机遥感监测在水土保持监测中的应用[J].中国新技术新产品,2018(10):9-10.
- [9] 汪传建,赵庆展,马永建,等.基于卷积神经网络的无人机遥感农作物分类[J].农业机械学报,2019,50(11):161-168.
- [10] 松辽委水土保持处.松辽流域应用无人机遥感技术发展水土保持监管成效显著[J].中国水土保持,2016(12):79.
- [11] 常虹,詹福雷,杨国东,等.面向对象的高分遥感影像信息提取技术研究[J].测绘通报,2015(1):99-101,130.
- [12] 陈宇琼,李晓燕,钟太洋.伊通县土壤侵蚀敏感性分析[J].江西农业学报,2016,28(1):98-103.
- [13] 陈杰.高分辨率遥感影像面向对象分类方法研究[D].长沙:中南大学,2010.
- [14] Yang J, He Y H, Caspersen J, et al. A discrepancy measure for segmentation evaluation from the perspective of object recognition[J]. Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2015, 101:186-192.
- [15] 岳安志,杨建宇,张超,等.基于多尺度形态学滤波的高分辨率遥感影像分割[J].农业工程学报,2013,29(增刊1):89-95.
- [16] Meyer G E, Neto J C. Verification of color vegetation indices for automated crop imaging applications[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2008, 63(2):282-293.
- [17] Tucker P W, Hazen E E, Cotton F A. Staphylococcal nuclease reviewed: A prototypic study in contemporary enzymology [J]. Molecular & Cellular Biochemistry, 1979, 23(2):67-86.
- [18] Woebbecke D M, Meyer G E, Von Bargen K, et al. Color indices for weed identification under various soil, residue, and lighting conditions[J]. Transactions of the ASAE, 1995, 38:259-269.
- [19] Neto J C, Mayer G E. Crop Species Identification Using Machine Vision of Computer Extracted Individual Leaves[C]//Bellingham. Optical Sensors and Sensing Systems for Natural Resources and Food Safety and Quality. WA: SPIE, 2005:599-608.
- [20] Kataoka T, Kaneko T, Okamoto H, et al. Crop Growth Estimation System Using Machine Vision[C]//Piscataway. ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM 2003). NJ: IEEE, 2003:1079-1083.
- [21] Hagur T, Tillett N D, Wheeler H. Automated crop and weed monitoring in widely spaced cereals[J]. Precision Agriculture, 2006, 7(1):21-32.

过程模拟研究具有一定的指导意义。

4 结论

(1) 秸秆覆盖下的水稻田土壤空间染色形态呈现由土壤表层均匀整体分布向深层带状和团块状态转变,而非秸秆覆盖水稻田土壤染色形态表现为明显的枝状染色形态分化现象,其平均土壤染色斑块形状系数(13.96)大于秸秆覆盖水稻田(11.60),二者之间差异显著($P < 0.05$)。

(2) 非秸秆覆盖水稻田土壤空间内的水流分布相对秸秆覆盖水稻田更集中,平均密度可达 0.117,且土壤空间中的土壤优先流平均分布密度最低值为 0.049,是秸秆覆盖的 1.10 倍。

(3) 在相同的外部供水条件下,秸秆覆盖措施相比非覆盖措施在一定程度上可以增加水稻田土壤水分入渗量,平均染色面积比可达 46.69%,显著高于非覆盖水稻田(35.00%),同时降低田间土壤优先流程度,其平均土壤优先流比仅为 27.47%,显著低于非秸秆覆盖下的水稻田。秸秆覆盖种植技术通过改变稻田田间土壤环境进而影响了土壤水流运动状况,在一定程度上有助于提高田间作物的水肥利用效率。

参考文献:

- [1] Worthington S R H. Diagnostic tests for conceptualizing transport in bedrock aquifers[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 529: 365-372.
- [2] Hamoud Y A, Guo X, Wang Z, et al. Effects of irrigation water regime, soil clay content and their combination on growth, yield, and water use efficiency of rice grown in South China[J]. *International Journal of Agricultural & Biological Engineering*, 2018, 11(4): 144-155.
- [3] 付佑胜, 刘伟中, 张凯, 等. 麦秸秆高留茬条件下不同秸秆覆盖量对稻田杂草及水稻产量的影响[J]. *西南农业学报*, 2019, 32(10): 2313-2318.
- [4] 靳苗苗, 胡正锴, 朱柏菁, 等. 环境胁迫对不同水分管理措施下稻田土壤功能稳定性的影响[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(11): 3795-3803.
- [5] Zhang Z B, Zhou H, Zhao Q G, et al. Characteristics of cracks in two paddy soils and their impacts on preferential flow[J]. *Geoderma*, 2014, 228/229: 114-121.
- [6] 张展羽, 陈于, 孔莉莉, 等. 土壤干缩裂缝几何特征对入

渗的影响[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(10): 192-197.

- [7] Qi W, Zhang Z Y, Wang C, et al. Crack closure and flow regimes in cracked clay loam subjected to different irrigation methods[J]. *Geoderma*, 2020, 358: 1-11.
- [8] Zhao Y, De Maio M, Vidotto F, et al. Influence of wet-dry cycles on the temporal infiltration dynamic in temperate rice paddies[J]. *Soil & Tillage Research*, 2015, 154: 14-21.
- [9] Anyusheva M, Lamers M, La N, et al. Persistence and leaching of two pesticides in a paddy soil in Northern Vietnam[J]. *Clean-Soil, Air, Water*, 2016, 44(7): 858-866.
- [10] Fuhrmann I, Maarastawi S, Neumann J, et al. Preferential flow pathways in paddy rice soils as hot spots for nutrient cycling[J]. *Geoderma*, 2019, 337: 594-606.
- [11] Flury M, Flüher H, Jury W A, et al. Susceptibility of soils to preferential flow of water: A field study[J]. *Water Resources Research*, 1994, 30(7): 1945-1954.
- [12] Van Schaik N. Spatial variability of infiltration patterns related to site characteristics in a semi-arid watershed[J]. *Catena*, 2009, 78: 36-47.
- [13] Bettinger P, Bradshaw G A, Weaver G W. Effects of geographic information system vector-raster-vector data conversion on landscape indices[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1996, 26(8): 1416-1425.
- [14] Wang C, Zhang Z Y, Fan S M, et al. Effects of straw incorporation on desiccation cracking patterns and horizontal flow in cracked clay loam[J]. *Soil & Tillage Research*, 2018, 182: 130-143.
- [15] 张欣, 张洪江, 张福明, 等. 西南山区农地土壤前期含水量对优先流的影响[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(2): 4-10, 17.
- [16] 蒋小金, 王恩姐, 陈祥伟, 等. 典型黑土耕地土壤优先流环绕特征[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(12): 3127-3132.
- [17] Lahue G T, Linquist B A. The magnitude and variability of lateral seepage in California rice fields[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 574: 202-210.
- [18] 李向东, 陈源泉, 隋鹏, 等. 中国南方集约多熟稻田保护性耕作制度[J]. *生态学杂志*, 2007, 26(10): 1653-1656.
- [19] 陈晓冰, 严磊, 陈廷速, 等. 西南岩溶区粉垄耕作和免耕方式下甘蔗地土壤优先流特征[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(4): 58-66.
- [20] 李振东, 朱彦光, 陈晓冰, 等. 桂北岩溶区典型农地土壤优先流特征[J]. *水土保持研究*, 2019, 26(5): 68-74.

ter Resource Research, 1994, 30: 1029-1044.

(上接第 118 页)

- [22] Guijarro M, Pajares G, Riomoros I, et al. Automatic Segmentation of Relevant Textures in Agricultural Images[J]. *Computers & Electronics in Agriculture*, 2011, 75(1): 75-83.
- [23] Barling R D, Moore I D, Grayson R B. A quasi-dynamic wetness index for characterizing the spatial distribution of zones of surface saturation and soil water content[J]. *Wa-*

- [24] 胡玉福, 邓良基, 匡先辉, 等. 基于纹理特征的高分辨率遥感图像土地利用分类研究[J]. *地理与地理信息科学*, 2011, 27(5): 42-45, 68.
- [25] Zhong Y F, Zhao B, Zhang L P. Multiagent object-based classifier for high spatial resolution imagery[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(2): 841-857.