

基于 LiDAR 和 DOM 数据的薇甘菊自动识别与分布预测

王瑞瑞^{1,2} 李怡燃^{1,2} 石伟³ 段芸杉^{1,2} 陈兴旺^{1,2}

(1. 北京林业大学林学院, 北京 100083; 2. 北京林业大学精准林业北京市重点实验室, 北京 100083;
3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100083)

摘要: 薇甘菊攀援能力强, 生长速度快, 对生态环境和生物多样性造成了严重威胁。卫星遥感数据是薇甘菊识别和预测的主要数据源, 但现有的数据存在分辨率低、过境时间长和云层遮挡等方面的局限性, 对薇甘菊识别和预测的精度较低, 为此, 提出了一种结合机载激光数据 (LiDAR) 和航摄多光谱数据 (DOM) 的薇甘菊爆发区域自动识别及入侵概率预测方法。采用面向对象的多尺度分割方法对研究区内薇甘菊爆发点进行自动识别, 并利用林场内冠层高度模型、植被覆盖度、坡度、坡向等数据, 采用 Logistic 回归方法对薇甘菊入侵分布概率进行预测。结果表明: 面向对象的多尺度分割方法能较好地提取研究区内薇甘菊爆发区域, 识别精度较好, 错分率为 4.66%, 漏检率为 0.41%; Logistic 回归模型对薇甘菊的入侵分布概率有较好的预测效果, 准确率为 88.46%。该方法可实现大范围

关键词: 薇甘菊; 自动识别; 分布预测; LiDAR; DOM; Logistic 回归

中图分类号: TP751.1; S451.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)11-0263-08

OSID:



Automatic Identification and Predictive Analysis of *Mikania micrantha* Based on LiDAR and DOM Data

WANG Ruirui^{1,2} LI Yiran^{1,2} SHI Wei³ DUAN Yunshan^{1,2} CHEN Xingwang^{1,2}

(1. College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2. Beijing Key Laboratory of Precision Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

3. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: *Mikania micrantha* has strong climbing ability and amazing growth speed, which poses a serious threat to the surrounding ecological environment and biodiversity. Satellite remote sensing data is the main data source for identification and prediction of *Mikania micrantha*. However, the existing data have limitations such as low resolution, long transit time and cloud shielding, and the accuracy of identification and prediction of *Mikania micrantha* is low. In view of this, a method for automatic identification of *Mikania micrantha* outbreak area and invasion probability prediction based on airborne laser data and aerial multispectral data was proposed. Object-oriented multi-scale segmentation method was used to automatically identify the outbreak points of *Mikania micrantha* in the study area, and Logistic regression method was used to predict the invasion distribution probability of *Mikania micrantha* by using canopy height model, vegetation coverage, slope and slope aspect data in the forest farm. The results showed that the object-oriented multi-scale segmentation method could extract the *Mikania micrantha* outbreak area in the study area, and the identification accuracy was high, the misclassification rate was 4.66%, and the missed detection rate was 0.41%. Logistic regression model had a good prediction effect on the invasion distribution probability of *Mikania micrantha*, and the correct rate was 88.46%. This method can realize accurate identification and prediction of *Mikania micrantha* in a wide range, and can serve for comprehensive prevention and control and monitoring of *Mikania micrantha*, providing strong support for invasion monitoring of *Mikania micrantha*.

Key words: *Mikania micrantha*; automatic identification; distribution prediction; LiDAR; DOM; Logistic regression

0 引言

世界各地间的交流日益频繁,外来物种入侵日益严重,给入侵地造成了重大的经济和生态损失^[1-3]。其中,薇甘菊由于攀援能力强,生长速度惊人,破坏力大而被列入世界最具危害的热带和亚热带杂草之一^[4],受到研究者的广泛关注。

薇甘菊原产于南美洲热带地区^[5],20 世纪 80 年代传入我国南部,现已广泛分布在我国广东、广西、云南、香港等地区。为有效控制薇甘菊的蔓延和扩散,需要对薇甘菊空间分布进行识别,对其动态变化进行监控和预测。传统的监控和预测方式为人工实地调查,然而这种方式不但费时费力,时效性和精确性也得不到保证。这就需要运用遥感技术手段对薇甘菊的空间分布进行系统分析。近年来,国内外学者对薇甘菊的基因特征^[6]、生物学特性^[7-9]、生物防治^[4,10-11]、综合防控技术^[12-13]等方面进行了广泛研究,大多采用 RGB 波段运算^[14-17]、深度卷积神经网络^[18]、BP 神经网络^[19-20]、面向对象分割^[21]等方法开展薇甘菊信息的精细提取,采用 MaxEnt 生态位模型^[22]对薇甘菊适生区进行预测。研究区域基本位于薇甘菊入侵严重的地段,且多是盛花期薇甘菊的识别和预测。但卫星遥感数据的分辨率不足以精确识别薇甘菊,再加上卫星数据存在过境时间长和云层遮挡等问题,对小范围薇甘菊的识别和预测更是难以实现。高时空分辨率的低空遥感技术为此提

供了新的研究手段^[23-25]。直升机获取的机载激光雷达数据(LiDAR)和航摄多光谱数据(DOM),精度可达厘米级,且不受云层遮挡的影响,可用作薇甘菊的精确识别和预测。

本研究以直升机多光谱数据(DOM)和机载激光雷达数据(LiDAR)为基础,采用面向对象多尺度分割方法对薇甘菊爆发区域进行自动识别,并利用林场内树冠高度模型、植被盖度、坡度、坡向等数据,采用 Logistic 回归方法建立薇甘菊入侵分布概率的预测模型,为广州市薇甘菊大范围精确预测和管理提供数据支持和治理依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

我国南方地区深受薇甘菊入侵的危害,其中广东省尤为严重。本文选择广东省广州市增城林场作为研究区(23.292°~23.369°N,113.681°~113.815°E),总面积约为2 777.55 hm²,属于亚热带海洋性季风气候,全年温暖多雨、光热充足,年平均气温在20℃以上,年降水量约为1 720 mm,适宜植物生长。林场内植被以乔木为主,主要树种有桉树(*Eucalyptus*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、湿地松(*Pinus elliotii*)、黎蒴(*Castanopsis fissa*)、马尾松(*Pinus massoniana*)等。由于林场面积较大,本研究只选取其中一部分进行研究,面积为141.710 4 hm²。研究区地理位置及直升机真彩色影像如图1所示。

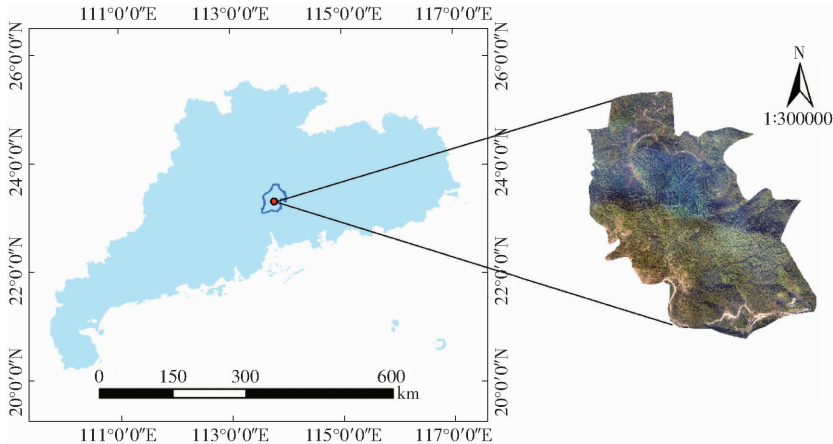


图1 研究区地理位置及影像图

Fig.1 Location and image map of research area

1.2 数据来源

研究数据采集于2019年11月18—19日,为贝尔直升机航拍影像和机载激光雷达影像,飞行高度约500 m,飞行旁向重叠度约为40%。航摄多光谱影像有红、绿、蓝3个波段,地面分辨率为0.07 m。直升机搭载的激光传感器为Galaxy Prime Sensor,具体参数如表1所示。定位定向系统包

括:POS AVTM AP60 (OEM)、220 信道双频 GNSS 接收器、带铍滤波器的 GNSS 机载天线和高准确度 AIMU (Type 57)。航摄时天气晴朗无云,光线充足,基本无风,适合直升机航拍作业。本研究将机载激光雷达数据与直升机拍摄影像结合,可精确识别影像上薇甘菊的分布,为其预测提供高精度的数据源。

表 1 传感器参数配置

Tab.1 Sensor parameters configuration

参数	数值
飞行高度/m	500
激光波长/nm	1 064
脉冲重复率/kHz	50 ~ 1 000
扫描视角/(°)	10 ~ 60
点云平均密度/(点·m ⁻²)	180

2 研究方法

本研究针对目前薇甘菊在可见光下视觉辨识度低,受限野外环境和数据提取精度较低等问题,以直升机多光谱数据和激光点云数据为基础,根据薇甘菊纹理特征、光谱和形状特征采用面向对象多尺度分割方法对其爆发区域进行自动识别;结合机载激光雷达数据和直升机航拍影像提取林区冠层高度、坡度、坡向、高程和郁闭度因子,对选取的影响因子进行相关性分析和似然比检验,剔除不符合要求的因子,利用 Logistic 回归方法建立研究区薇甘菊爆发自动识别范围与各因子之间的线性模型,进而得到研究区薇甘菊入侵分布概率的预测模型。研究技术路线图如图 2 所示。

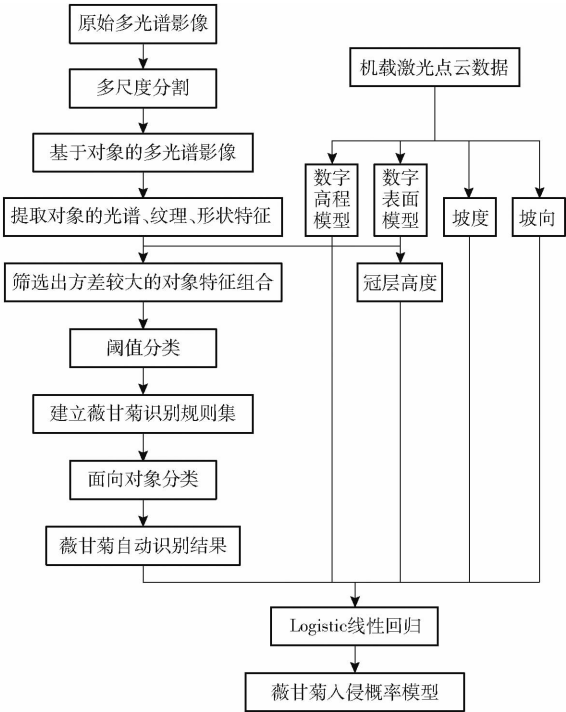


图 2 薇甘菊自动识别及预测方法技术路线图

Fig.2 Technical route diagram of automatic identification and prediction method for *Mikania micrantha*

2.1 薇甘菊爆发区域自动识别

薇甘菊生长分布集中,常连成一片出现。盛花期的薇甘菊在可见光波段内反射率显著高于其他植被^[14],且薇甘菊的氮磷含量显著高于其背景植物,

在影像上呈现泛白的颜色从而与其他植被区别开来^[16]。未开花前的薇甘菊与其他植被的特性相差不大,蓝绿差异指数(BGDI)、绿红差异指数(GRDI)、归一化绿红指数(NGRDI)、过绿指数(EGI)、归一化过绿指数(NEGI)以及植被色素比值指数(PPR)都无法将薇甘菊和其攀附植物直接分离开,但植被色素比值指数可为面向对象的多尺度分割提供参数支持^[21]。

鉴于此,本研究选取图像光谱特征中 G 波段上的像素平均值、亮度、植被色素比值指数和高程数据作为特征指标,借助 eCognition 软件选取薇甘菊分布训练样本点,查看其特征参数值分布范围,经统计得到各个特征参数的最小值和最大值,进而对薇甘菊进行识别和标识,从而确定薇甘菊分类规则集,利用面向对象的多尺度分割方法对薇甘菊爆发区域进行自动识别提取,建立薇甘菊分布识别范围。像素平均值、亮度、植被色素比值指数的计算公式为

$$\overline{C}_L = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_{L_i} \quad (L = 1, 2, \cdots, m) \tag{1}$$

$$\overline{B} = \frac{1}{m} \sum_{L=1}^m \overline{C}_L \tag{2}$$

$$P_{PR} = (G - B) / (G + B) \tag{3}$$

式中 $\overline{C}_L$ ——第 L 图层上构成影像对象像素平均值
n——像素数 m——影像图层数量
 C_{L_i} ——第 L 图层上第 i 个像素的值,也称为
 图层值
 $\overline{B}$ ——亮度
 P_{PR} ——植被色素比值指数
R——红波段像素值
G——绿波段像素值
B——蓝波段像素值

多尺度分割算法 (Multiresolution segmentation, MRS) 包含影像各图层及其权重、分割尺度和同质性准则组合参数,其中分割尺度和同质性准则组合参数最为重要^[26]。本研究利用 eCognition 软件中的最佳分割尺度评价工具 ESP2 计算不同分割尺度参数下影像对象同质性局部方差 (Local variance, LV) 的变化率 (Rates of change of LV, ROC-LV),当 LV 的变化率达到最大时,该点对应的分割尺度就是最佳分割尺度。由于图像信息的不同,计算得到的最优分割尺度往往有多个值,经不同分割参数组合进行对比分析,确定薇甘菊地物的最优分割尺度及其同质性准则参数。采用面向对象基于规则的分类方法从影像对象区块中提取薇甘菊爆发入侵区域,得到薇甘菊分布识别范围。

2.2 影响因子提取

参照薇甘菊入侵分布影响因子^[19,27]的研究可知,地形特征以及土地利用方式是影响薇甘菊入侵分布的重要影响因子。因此,本研究选取海拔、坡度、坡向、冠层高度和郁闭度进行薇甘菊分布范围预测的研究,但由于薇甘菊不仅可以攀援于树冠上,也可以匍匐于灌丛上,本研究使用植被覆盖度(Vegetation fractional coverage,VFC)代替郁闭度。

根据原始激光点云数据和多光谱数据生成数字高程模型数据(DEM),利用 ArcGIS 10.3 空间分析工具生成相应的坡度、坡向;将研究区的数字表面模型和数字高程模型进行差值运算,得到冠层高度。冠层高度计算公式为

C_{HM} = D_{SM} - D_{EM} (4)

式中 C_{HM}——冠层高度
D_{SM}——数字表面高度
D_{EM}——数字高程

由于研究中林场的影像数据只有可见光范围内的 3 个波段,因此选择可见光波段差异性植被指数(VDVI)进行植被覆盖度运算,并根据像元二分法得到植被覆盖度。

VDVI = (2G - R - B) / (2G + R + B) (5)

VFC = (VDVI - VDVI_{soil}) / (VDVI_{veg} - VDVI_{soil}) (6)

式中 VDVI_{soil}——裸土或无植被覆盖像元植被指数
VDVI_{veg}——完全被植被覆盖像元植被指数

植被覆盖度中裸土的 VDVI 理论上接近 0,但由于 VDVI 会受到大气、地表粗糙程度等因素的影响,裸土的 VDVI 会在小范围内波动;VDVI_{veg} 则与季节、植被类型等密切相关^[28],因此,植被覆盖度可表示为

VFC = (VDVI - VDVI_{min}) / (VDVI_{max} - VDVI_{min}) (7)

式中 VDVI_{min}——植被覆盖像元植被指数的最小值
VDVI_{max}——植被覆盖像元植被指数的最大值

参照 VDVI_{min} 和 VDVI_{max} 取值问题的研究^[29]可知,由于不可避免存在噪声,VDVI_{min} 和 VDVI_{max} 一般取在置信区间[5%,95%]获得的最大值与最小值。

2.3 薇甘菊入侵概率模型创建

线性回归模型是目前定量分析研究中常用的统计分析方法,然而在许多情况下,线性回归会受到限制,特别是当因变量是一个分类变量而不是一个连续变量时。Logistic 回归模型能很好地解决这一问题^[30],因此,本研究利用 Logistic 回归方法建立研究区薇甘菊爆发自动识别范围与各因子之间的线性模型,进而得到研究区薇甘菊入侵分布概率的预测模型。在构建 Logistic 回归模型之前,需分析提取的因

子和薇甘菊入侵分布的相关性,得到因子与薇甘菊分布的 Pearson 系数表,然后对符合相关性分析的因子进行似然比检验,将不满足似然比检验的因子变量剔除^[31-33],剩余因子变量利用 Logistic 回归方法建立薇甘菊入侵概率模型,解释影响薇甘菊入侵分布的因子与薇甘菊入侵爆发之间的联系,进而预测薇甘菊入侵爆发的概率。概率计算式为

lg $\frac{p_i}{1 - p_i}$ = β₀ + β₁x_{1i} + β₂x_{2i} + ⋯ + β_mx_{mi} (8)

式中 p_i——薇甘菊入侵爆发概率
β₀——常数项
β_m——自变量 x_{mi}对应的回归系数

2.4 精度检验

为进一步分析薇甘菊入侵概率模型的效果,以林场提供的 11 月初实地调查获取的 52 个薇甘菊分布样区数据作为参考资料,将薇甘菊入侵概率参考图与样区数据进行对比,评价薇甘菊入侵概率模型的精度。

3 结果与分析

3.1 薇甘菊爆发区域自动识别结果及分析

参照文献[34-35],本研究设置初始分割尺度为 50,逐步分割处理每次的增加步长为 1,循环次数即执行分割的次数为 200,形状参数和紧凑度参数设置为 0.5,进行分割尺度遍历,循环结束后,生成折线图(图 3)。局部方差变化率的波峰表示此时尺度为待分割地物的最佳分割尺度^[36]。由于影像信息的丰富性,遍历计算得到的最优尺度通常是多个^[37],本研究对得到的多个最优尺度进行对比分析确定用于薇甘菊识别的分割尺度^[38]。

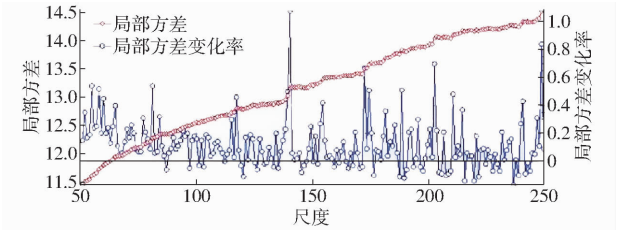


图 3 遍历分割尺度折线图

Fig. 3 Ergodic partition scale line graph

从图 3 可以看出,分割薇甘菊的最优尺度有 60、76、80、100、114、135、148、168、188、201、208、217、245。当分割尺度为 60、76、80 时,薇甘菊被分割的较为破碎,出现了过分割现象;当分割尺度为 100 时,薇甘菊分割较为清晰;当分割尺度为 114 ~ 201 时,薇甘菊和其他植被合并越来越多,不能明确地分割出薇甘菊(图 4)。因此,在形状参数和紧凑度参数都为 0.5 的情况下,分割尺度 100 是本研究

薇甘菊自动识别提取的最优尺度。

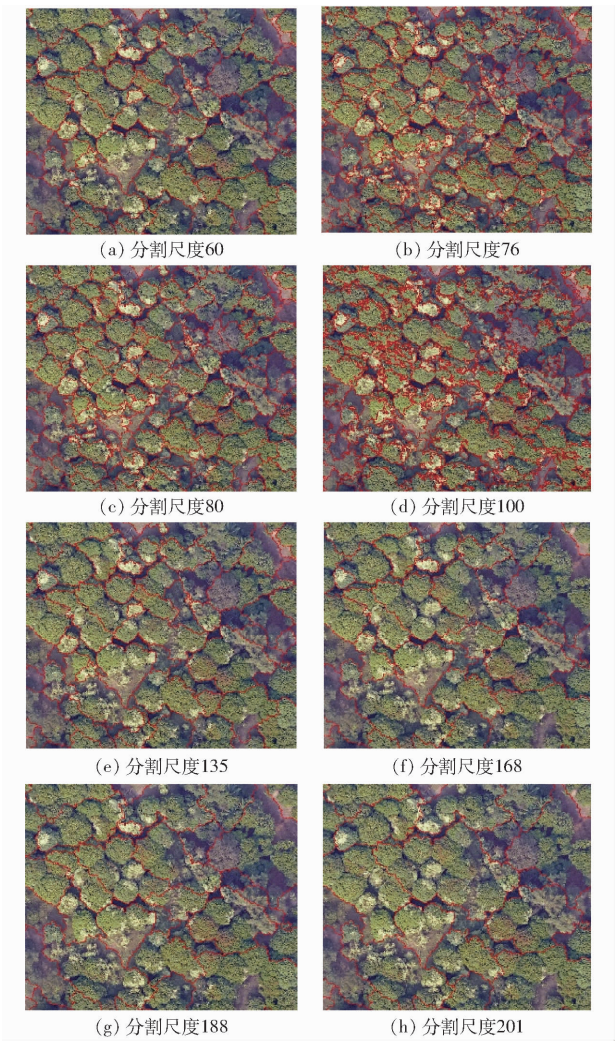


图 4 不同尺度分割的薇甘菊对比

Fig. 4 Comparisons of *Mikania micrantha* with different scales segmentation

利用 G 波段上像素的平均值、亮度、植被色素比值指数和高程特征所包含的信息并借助 eCognition 软件选取薇甘菊分布训练样本点, 查看其特征参数值分布范围, 经统计得到各个特征参数的最小值和最大值, 进而对薇甘菊进行识别和标识^[39-40], 确定薇甘菊分类规则集: 分割尺度为 100, 形状参数为 0.5, 紧凑度为 0.5, 高程为 29~329, 亮度为 190~220, 绿波段均值大于 175, 植被色素比值指数为 0.15~0.25, 实现薇甘菊与攀附植物的分离, 得到薇甘菊爆发区域自动识别范围。虽然薇甘菊在开花季节的颜色和纹理异于其他植被, 但由于其分布比较零散, 与其他植被的特征较为相似, 存在错分情况。本研究薇甘菊自动识别区域 729 处, 错分区域 34 处, 错分率为 4.66%, 漏检 3 处, 漏检率为 0.41%, 漏检较少。错分区域主要存在于影像中的高亮区域, 该部分植被大多在薇甘菊爆发点附近, 可手动进行纠正, 得到准确的薇甘菊自动识别结果(图 5)。

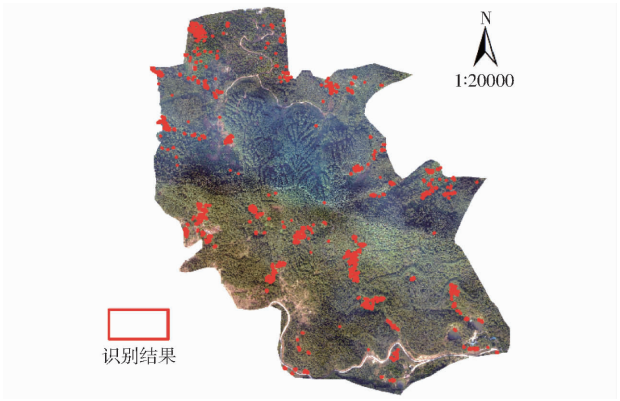


图 5 薇甘菊自动识别结果

Fig. 5 Automatic recognition results of *Mikania micrantha*

3.2 影响因子提取结果及分析

本研究提取的研究区数字高程模型、数字表面模型、坡度、坡向、冠层高度模型如图 6 所示。利用 ENVI 软件统计 $VDVI_{min}$ 和 $VDVI_{max}$ 在累积概率为 5% 和 95% 时的值, 并确定 $VDVI_{min}$ 和 $VDVI_{max}$ 分别为 0.011 075 和 0.426 087, 计算得到植被覆盖度(图 6f)。

根据 Pearson 积差相关性分析得到因子与薇甘菊分布的 Pearson 系数(表 2)。从表 2 可以看出, 影响薇甘菊入侵分布的因子中, 高程和冠层高度处于最重要位置, 相关系数为负值, 即表示这些因子对薇甘菊的分布具有负影响, 高程和冠层高度越高则越不适合薇甘菊的入侵分布。处于第 2 影响位置的因子是坡度和植被覆盖度, 坡度越陡, 植被覆盖越密, 越不适合薇甘菊的攀爬入侵。相比于高程和冠层高度, 坡向对于薇甘菊入侵分布的影响不是特别大。这与薇甘菊在坡度较小、植被稀疏的低地区攀爬生长特性是一致的, 表明 Pearson 积差相关系数的拟合效果较好, 本研究选取的影响因子对薇甘菊入侵分布预测的解释性较强。

3.3 薇甘菊入侵概率预测结果与分析

根据似然比检验结果(表 3)可以看出, 高程、冠层高度、坡度、植被覆盖度都通过了检验, 可作为变量参与建立薇甘菊分布预测模型, 坡向因子没有通过似然比检验被剔除。

通过检验的冠层高度、高程、坡度、植被覆盖度因子设为变量 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 , 经逐步筛选法得到薇甘菊生长分布概率 p , 生成薇甘菊入侵概率图(图 7)。根据计算出的预测概率并结合以往的研究成果^[31,41], 初步判定 $p \geq 0.6$ 为薇甘菊入侵范围, 而 $p < 0.6$ 为非入侵区域, 即图 7 中橘黄色区域和红色区域为薇甘菊入侵范围。薇甘菊匍匐生长, 高坡度、高大密集林木区不利于薇甘菊的生长, 而向阳、水分条件好的地区, 比如林木边缘区、水体周边的半自然

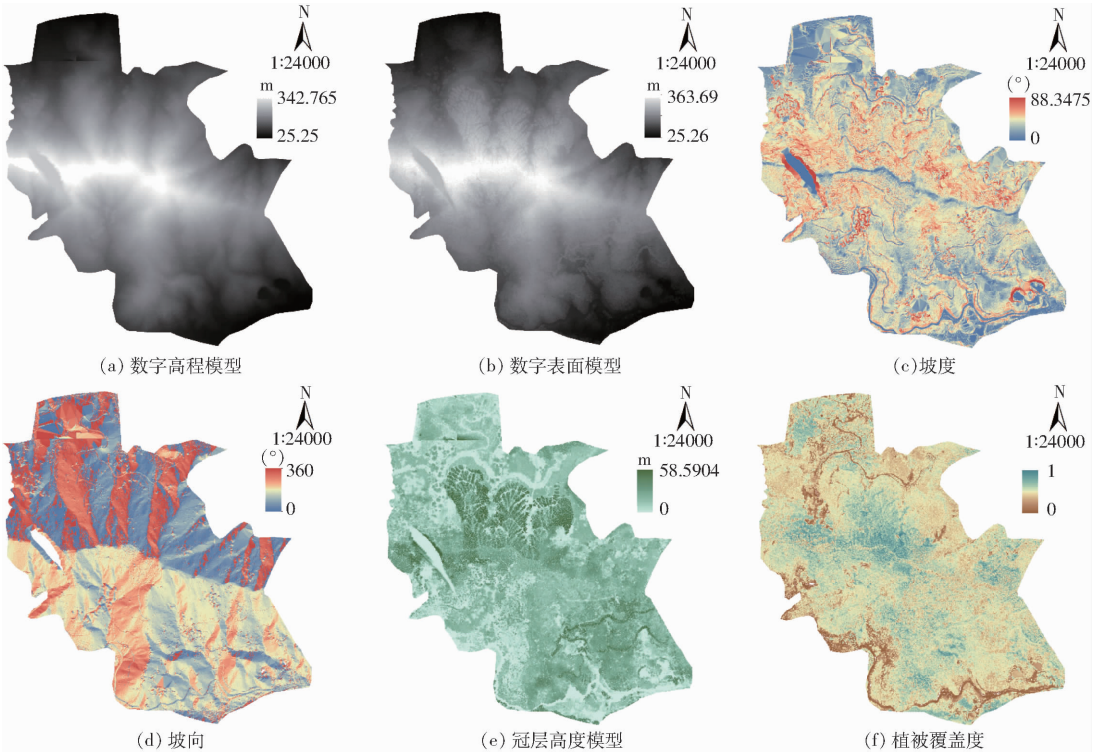


图 6 影响因子

Fig. 6 Dominant factors

表 2 Pearson 系数
Tab.2 Pearson coefficient

影响因子	Pearson 系数
高程	-0. 564 247 9
冠层高度	-0. 538 331 7
坡度	-0. 376 876 5
植被覆盖度	-0. 417 842 4
坡向	-0. 161 784 2

表 3 似然比检验结果
Tab.3 Likelihood ratio test

影响因子	标准差	似然比
高程	0. 000 807 5	$< 2 \times 10^{-16} ***$
冠层高度	0. 009 309 5	$< 2 \times 10^{-16} ***$
坡度	0. 003 439 0	$< 2 \times 10^{-16} ***$
植被覆盖度	0. 423 523 9	$< 2 \times 10^{-16} ***$
坡向	0. 000 536 0	0. 227

注: *** 表示差异显著。

环境等区域,薇甘菊生长分布较多。从图 7 可以看出,薇甘菊入侵分布概率大的区域多在人类活动明显的道路两旁、低矮稀疏林木边缘和坡度低、地势平缓区域。预测结果符合薇甘菊生长扩散机制,预测效果较好。薇甘菊生长分布概率 p 的计算公式为

$$p = \frac{\exp(6.508\,585\,7 - 0.289\,965\,3x_1 - 0.015\,360\,5x_2 - 0.029\,040\,1x_3 - 5.587\,912x_4)}{1 + \exp(6.508\,585\,7 - 0.289\,965\,3x_1 - 0.015\,360\,5x_2 - 0.029\,040\,1x_3 - 5.587\,912x_4)}$$

3.4 精度验证

为进一步验证本文方法对薇甘菊分布预测的效果,以林场提供的 11 月初的薇甘菊调查范围数据

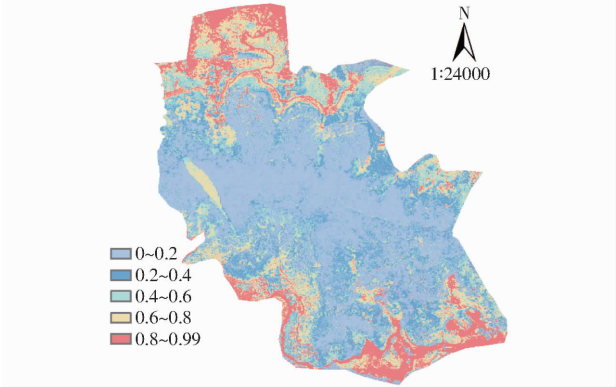


图 7 薇甘菊入侵概率

Fig. 7 Invasion probability map of *Mikania micrantha*

(图 8)作为参考资料,将薇甘菊分布图与分布预测结果进行对比。调查结果有 52 个薇甘菊入侵样本区域,其中 46 个样本落在了薇甘菊入侵发生频率高

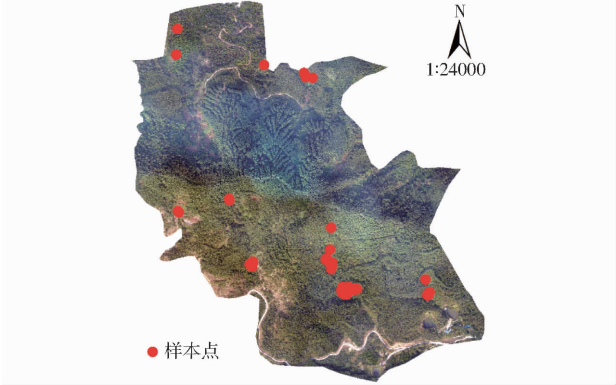


图 8 薇甘菊林场样本区域

Fig. 8 Sample area of *Mikania micrantha*

的地区,即黄色区域内,这些样本均位于水体、林木边缘和地势低缓的向阳处,是薇甘菊生长的典型地形区域;6 个样本落在蓝色区域,即薇甘菊生长的非典型地形区域,这些样本处于研究区地理位置的边缘,周围存在杂草干扰,不太容易识别。综上所述,本文方法预测薇甘菊入侵分布的准确率达 88.46%,整体精度符合要求,具有较高的拟合效果。

4 结论

(1)面向对象的多尺度分割方法可以综合利用影像的多种信息用于地物识别分析,错分率为 4.66%,漏

检率为 0.41%,漏检错分较少,总体精度较高。

(2)高程、冠层高度、坡度、植被覆盖度是研究区内影响薇甘菊入侵分布的重要因子,薇甘菊出现与否和周边的地势高度、坡度以及周围树木冠层高度显著相关。薇甘菊分布范围主要是人类活动明显的道路两旁,低矮稀疏林木边缘以及坡度低、地势平缓的区域。

(3)Logistic 回归模型具有较好的预测拟合效果,准确率达 88.46%,可为大范围薇甘菊自动识别和预测提供一定的理论指导,对广州市薇甘菊综合防治具有现实的指导意义。

参 考 文 献

[1] HOBBS R J, HUMPHRIES S E. An integrated approach to the ecology and management of plant invasions[J]. Conservation Biology, 1995, 9(4):761-770.

[2] KENNEDY T A, NAEEM S, HOWE K M, et al. Biodiversity as a barrier to ecological invasion[J]. Nature, 2002, 417(6889):636-8.

[3] WITH K A. The landscape ecology of invasive spread[J]. Conservation Biology,2002,16(5): 1192-1203.

[4] COCK M J W. Potential biological control agents for *Mikania micrantha* H. B. K. from the Neotropical region[J]. International Journal of Pest Management, 1982, 28(3):242-254.

[5] 王伯荪,廖文波,咎启杰,等. 薇甘菊 *Mikania micrantha* 在中国的传播[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2003,42(4): 47-50.

[6] 李钧敏,董鸣,钟章成. 入侵植物薇甘菊种群的遗传分化[J]. 植物生态学报, 2007,31(4): 680-688.

LI Junmin, DONG Ming, ZHONG Zhangcheng. Population genetic differentiations the invasive plant *Mikania micrantha* in China[J]. Journal of Plant Ecology,2007,31(4): 680-688. (in Chinese)

[7] ZHANG L Y, YE W H, CAO H L, et al. *Mikania micrantha* H. B. K. in China—an overview[J]. Weed Research, 2010, 44(1): 42-49.

[8] 宋莉英,柯展鸿,孙兰兰,等. 模拟酸雨对 3 种菊科入侵植物光合特性的影响[J]. 植物学报, 2013, 48(2): 160-167.

[9] 张炜银,王伯荪,廖文波,等. 外域恶性杂草薇甘菊研究进展[J]. 应用生态学报, 2002,13(12): 1684-1688.

ZHANG Weiyin, WANG Bosun, LIAO Wenbo, et al. Progress in studies on an exotic vicious weed *Mikania micrantha*[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2002,13(12): 1684-1688. (in Chinese)

[10] 咎启杰,孙延军,廖文波,等. 森草净杀灭薇甘菊(*Mikania micrantha*)及其安全性[J]. 生态学报, 2007,27(8): 3407-3416.

ZAN Qijie, SUN Yanjun, LIAO Wenbo, et al. Chemical herbicide salfometuron-Ethyl to controll *Mikania micrantha* and its residue in the soil[J]. Acta Ecologica Sinica ,2007,27(8): 3407-3416. (in Chinese)

[11] 梁启英,咎启杰,王勇军,等. 薇甘菊综合防治技术[J]. 中国森林病虫, 2006,25(1): 26-30.

LIANG Qiyiing, ZAN Qijie, WANG Yongjun, et al. Integrated control techniques of the invasive species *Mikania micrantha* [J]. Forest Pest and Disease,2006,25(1): 26-30. (in Chinese)

[12] 张知晓,泽桑梓,季梅,等. 薇甘菊替代控制技术研究[J]. 西部林业科学, 2018, 47(3): 123-128.

ZHANG Zhixiao, ZE Sangzi, JI Mei, et al. The replacement control technology of *Mikania micrantha*[J]. Journal of West China Forestry Science,2018, 47(3): 123-128. (in Chinese)

[13] 李云琴,季梅,刘凌,等. 云南省林地薇甘菊防控研究进展[J]. 生物安全学报, 2019, 28(1): 1-6.

LI Yunqin, JI Mei, LIU Ling, et al. Progress in prevention and control of *Mikania micrantha* in Yunnan forestland[J]. Journal of Biosafety,2019, 28(1): 1-6. (in Chinese)

[14] 柳帅,林辉,孙华,等. 基于 Pleiades-1 卫星数据薇甘菊信息提取[J]. 中南林业科技大学学报, 2014,34(11): 116-119.

LIU Shuai, LIN Hui, SUN Hua, et al. Information extraction of *Mikania micrantha* based on Pleiades-1 data[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2014,34(11): 116-119. (in Chinese)

[15] 胡佳,林辉,孙华,等. 基于 WorldView-2 的薇甘菊信息精细提取[J]. 中南林业科技大学学报, 2015,35(1): 42-49.

HU Jia, LIN Hui, SUN Hua, et al. Precise extraction of *Mikania micrantha* information based on WorldView-2 data[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2015,35(1): 42-49. (in Chinese)

[16] 陈利,林辉,孙华. 基于 WorldView-2 影像的外来物种薇甘菊入侵遥感监测[J]. 浙江农林大学学报, 2014, 31(2): 185-189.

CHEN Li, LIN Hui, SUN Hua. Remote sensing of a *Mikania micrantha* invasion in alien species with WorldView-2 images [J]. Journal of Zhejiang A&F University,2014, 31(2): 185-189. (in Chinese)

[17] 刘彦君,张贵,王潇,等. 基于无人机高光谱影像波段选择的薇甘菊分类[J]. 测绘通报, 2020(4): 34-39, 52.

LIU Yanjun, ZHANG Gui, WANG Xiao, et al. Classification study of *Mikania micrantha* Kunth from UAV hyperspectral image band selection[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2020(4): 34-39, 52. (in Chinese)

[18] QIAO Xi, LI Yanzhou, SU Guangyuan, et al. MmNet: identifying *Mikania micrantha* Kunth in the wild via a deep convolutional neural network[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2020, 19(5): 1292-1300.

- [19] 邱罗. 广州薇甘菊空间分布预测研究[D]. 长沙:中南林业科技大学, 2010.
- [20] 黄亦其,李婕,赵建晔,等. 基于BP神经网络对薇甘菊预处理方法的选取[J]. 安徽农业科学, 2020, 48(5): 246–249.
HUANG Yiqi, LI Jie, ZHAO Jianye, et al. Selection of pretreatment method for *Mikania micrantha* based on BP neural network[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2020, 48(5): 246–249. (in Chinese)
- [21] 孙中宇,荆文龙,乔曦,等. 基于无人机遥感的盛花期薇甘菊爆发点识别与监测[J]. 热带地理, 2019, 39(4): 482–491.
- [22] 付小勇,泽桑梓,周晓,等. 基于GIS的云南省薇甘菊潜在适生区研究[J]. 西部林业科学, 2015, 44(1): 98–102.
FU Xiaoyong, ZE Sangzi, ZHOU Xiao, et al. Study on potential suitable area of *Mikania micrantha* in Yunnan Province based on GIS[J]. Journal of West China Forestry Science, 2015, 44(1): 98–102. (in Chinese)
- [23] ANDERSON K, GASTON K J. Lightweight unmanned aerial vehicles will revolutionize spatial ecology[J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2013, 11(3): 138–146.
- [24] DARIO F, J W R. Science, technology and the future of small autonomous drones[J]. Nature, 2015, 521(7553): 460–466.
- [25] 王庆,车荧璞,柴宏红,等. 基于无人机可见光与激光雷达的甜菜株高定量评估[J/OL]. 农业机械学报, 2021, 52(3): 178–184.
WANG Qing, CHE Yingpu, CHAI Honghong, et al. Quantitative evaluation of sugar beet plant height based on UAV–RGB and UAV–LiDAR[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(3): 178–184. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20210319&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.03.019. (in Chinese)
- [26] 陈蕊,张继超. 基于eCognition的遥感图像面向对象分类方法研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2020, 43(2): 91–95.
CHEN Rui, ZHANG Jichao. Study on object-oriented classification method of remote sensing image based on eCognition[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2020, 43(2): 91–95. (in Chinese)
- [27] 吴卉晶,昝启杰,曾辉. 区域尺度薇甘菊入侵分布的影响因子[J]. 生态学报, 2009, 29(10): 5442–5449.
WU Huijing, ZAN Qijie, ZENG Hui. Factors influencing *Mikania micrantha* invasion and distribution at regional scale[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(10): 5442–5449. (in Chinese)
- [28] 李苗苗. 植被覆盖度的遥感估算方法研究[D]. 北京:中国科学院研究生院(遥感应用研究所), 2003.
LI Miaomiao. The method of vegetation fraction estimation by remote sensing[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences(Institute of Remote Sensing Applications), 2003. (in Chinese)
- [29] 陈绪志,林长伟,何启明. 像元二分法反演植被覆盖度的NDVI max和NDVI min取值问题初步研究[J/OL]. 北京:中国科技论文在线[2016–06–21]. <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/201606-809>.
- [30] 王济川,郭志刚. Logistic回归模型:方法与应用[M]. 北京:高等教育出版社, 2001.
- [31] AUGUSTIN N H, MUGGLESTONE M A, BUCKLAND S T. An autologistic model for the spatial distribution of wildlife[J]. Journal of Applied Ecology, 1996, 33(2): 339–347.
- [32] HE Fangliang, ZHOU Julie, ZHU Hongtu. Autologistic regression model for the distribution of vegetation[J]. Journal of Agricultural, Biological, and Environmental Statistics, 2003, 8(2): 205–222.
- [33] WU Hulin, HUFFER F R W. Modelling the distribution of plant species using the autologistic regression model[J]. Environmental and Ecological Statistics, 1997, 4(1): 31–48.
- [34] 孙钊,潘磊,孙玉军. 基于无人机影像的高郁闭度杉木纯林树冠参数提取[J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(10): 20–26.
SUN Zhao, PAN Lei, SUN Yujun. Extraction of tree crown parameters from high-density pure Chinese fir plantations based on UAV images[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2020, 42(10): 20–26. (in Chinese)
- [35] 张腾飞. 基于eCognition分类的森林蓄积量估测研究[D]. 西安:西安科技大学, 2012.
- [36] 王瑞瑞,李文静,石伟,等. 基于多源遥感数据的输电线路走廊树种分类[J/OL]. 农业机械学报, 2021, 52(3): 226–233.
WANG Ruirui, LI Wenjing, SHI Wei, et al. Classification of tree species of power line corridor based on multi-source remote sensing data[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(3): 226–233. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20210325&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.03.025. (in Chinese)
- [37] 刘金丽,陈钊,高金萍,等. 高分影像树种分类的最优分割尺度确定方法[J]. 林业科学, 2019, 55(11): 95–104.
LIU Jinli, CHEN Zhao, GAO Jinping, et al. Research on the method of determining the optimal segmentation scale for tree species classification of high-resolution image[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2019, 55(11): 95–104. (in Chinese)
- [38] 李晓靖,彭道黎,王海滨. 基于最优尺度和规则的高分辨率影像分类研究[J]. 测绘工程, 2017, 26(9): 14–22.
LI Xiaojing, PENG Daoli, WANG Haibin. Classification of high-resolution image based on optimal scale and rule[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2017, 26(9): 14–22. (in Chinese)
- [39] 吴宏正,陈曦,陈文惠. 无人机RGB影像植被分类方法研究——以福建省三明市尤溪县为例[J]. 亚热带水土保持, 2020, 32(4): 1–8.
WU Hongzheng, CHEN Xi, CHEN Wenhui. Study on object-oriented UAV RGB image vegetation classification method—case study at Youxi County of Sanming City[J]. Subtropical Soil and Water Conservation, 2020, 32(4): 1–8. (in Chinese)
- [40] 毛学刚,侯吉宇,白雪峰,等. 基于DOM及LiDAR的多尺度分割与面向对象林隙分类[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(9): 152–159.
MAO Xuegang, HOU Jiyu, BAI Xuefeng, et al. Multiscale forest gap segmentation and object-oriented classification based on DOM and LiDAR[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 152–159. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170919&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.019. (in Chinese)
- [41] PANDE A, WILLIAMS C L, LANT C L, et al. Using map algebra to determine the mesoscale distribution of invasive plants: the case of *Celastrus orbiculatus* in Southern Illinois, USA[J]. Biological Invasions, 2007, 9(4): 419–431.