

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201809022



采用决策树方法的高分一号 PMS 影像 山区森林覆盖提取

刘 恺^{1,2}, 周小成^{1,2}

(1. 福州大学 卫星空间信息技术综合应用国家地方联合工程研究中心, 福建 福州 350108;
2. 福州大学 空间数据挖掘与信息共享教育部重点实验室, 福建 福州 350108)

摘要: 以福建省龙岩市新罗区为例,选取单期国产高分一号(GF-1)PMS 影像,采用面向对象决策树模型进行森林覆盖提取. 针对山区地形因素引起的阴坡森林区域光谱值异常现象,灵活运用坡度因子、红绿比值植被指数、比值植被指数、归一化水体指数特征进行森林覆盖提取,并将该方法与其他分类器算法进行对比. 结果表明:决策树模型的森林制图精度为 96.1%,Kappa 系数为 0.84;该模型可提取高精度的山区森林覆盖信息,且具有可靠性.

关键词: 山区; 森林覆盖; 决策树模型; 面向对象; 高分一号

中图分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2019)03-0376-08

Forest Cover Extraction From Gaofen-1 PMS Image in Mountain Area Using Decision Tree

LIU Kai^{1,2}, ZHOU Xiaocheng^{1,2}

(1. National and Local Joint Engineering Research Center of Satellite Geospatial Information Technology,
Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;
2. Key Laboratory of Spatial Data Mining and Information Sharing of Ministry of Education,
Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: Taking Xinluo District, Longyan City, Fujian Province as an example, a single phase domestic gaofen-1 satellite (GF-1) PMS image was selected, and an object-oriented decision tree model was used for forest cover extraction. Aiming at the anomalous optical spectral value of shady forest area caused by mountainous terrain factors, the slope coverage, red-green ratio vegetation index, ratio vegetation index and normalized water body index are used to extract forest cover, and the used method is combined with other classifier algorithms comparing. The results show that the forest mapping accuracy of the decision tree model is 96.1%, and the Kappa coefficient is 0.84. This model can extract high-precision mountain forest coverage information with reliability.

Keywords: mountain area; forest cover; decision tree model; object oriented; gaofen-1 satellite

森林约占地球陆地面积的三分之一,在环境保护及国民经济方面扮演着重要的角色. 因此,掌握年度森林资源覆盖率(面积)对及时评价全球气候和生态环境情况,以及评估森林资源变化、辨识人类活动

收稿日期: 2018-09-11

通信作者: 周小成(1977-),男,副研究员,博士,主要从事高分辨率遥感影像信息提取的研究. E-mail: zhouxc@fzu.edu.cn.

基金项目: 中央引导地方科技发展专项(2017L3012); 福建省自然科学基金资助项目(2015H6008)

影响等方面有着重要的意义^[1]. 相较于林业部门传统的人工勾绘等方法, 遥感技术具有覆盖范围广、实时性强、成本低等优势, 为获取森林覆盖面积提供有效的技术支持. 高分一号 (GF-1) 卫星的发射对于中国自主把握航天遥感的主动权具有重要的意义. 目前, 基于 GF-1 WFV 影像的应用研究较多集中于提取大豆、玉米及小麦等农作物^[2-4]; 对 PMS 影像进行信息提取的研究中, 在盐渍化^[5]、农作物^[6]、居民地提取^[7]中均有应用. 在森林覆盖识别上, GF-1 WFV 影像应用较多^[8-9], 而 GF-1 PMS 影像的应用并不常见. 任冲等^[10]结合 SPOT 5 与 GF-1 PMS 影像对小陇山百花林场进行林地类型划分, 在 GF-1 影像上的类型划分到有林地一类, 说明有林地在 GF-1 PMS 影像上具备可识别性. 目前, 基于 GF-1 PMS 影像在山区森林覆盖提取方面的研究还较为少见. 决策树模型结构简单、直观易懂、灵活性高, 已被应用于各种遥感影像信息的提取中^[11-16]. 综合考虑 GF-1 PMS 数据在山区森林覆盖提取的应用现状, 本文对影像采用面向对象分析技术, 使用决策树模型进行森林覆盖提取.

1 研究区及数据源

1.1 研究区概况

新罗区属福建省龙岩市, 其地理位置如图 1 所示. 图 1 中: 右侧的影像为融合后 GF-1 PMS 影像, 分辨率为 2 m, 影像大小为 27 611 px×37 205 px. 新罗区总面积为 2 685.4 km², 平均海拔 658 m, 是典型的山区代表. 新罗区是福建省的重要林区, 其森林覆盖率居龙岩市第二. 根据《森林资源规划设计调查主要技术规定》, 森林覆盖面积包括有林地面积和国家特别规定的灌木林面积. 其中, 有林地指连续面积大于 0.067 hm², 郁闭度 0.20 以上, 附着有森林植被的林地. 根据《“国家特别规定的灌木林地”的规定》, 新罗区无国家特别规定的灌木林地面积, 故新罗区森林覆盖面积即有林地面积.

1.2 数据获取及预处理

获取 6 景高分一号 PMS 数据, 幅宽为 60 km, 多光谱 (MSS) 和全色 (PAN) 波段的空间分辨率分别为 2, 8 m. 其中, 多光谱数据有蓝 (0.45~0.52 μm)、绿 (0.52~0.59 μm)、红 (0.63~0.69 μm)、近红外 (0.77~0.89 μm) 4 个波段, 全色波段谱段范围为 0.45~0.90 μm. 辅助数据来源于中科院地理空间数据云网站 GDEM V2 高程数据 (空间分辨率为 30 m, 垂直分辨率为 17 m)、Google Earth 影像数据及新罗区行政边界矢量数据. 影像数据名称为高分一号 PMS, Google Earth, 时相为 2016/12/19, 地理坐标为 WGS_1984; 辅助数据名称为 GDEM V2, 时相为 2011/10, 地理坐标为 WGS_1984.

数据预处理包括以下 2 点. 1) 正射校正. 利用影像自带的 RPC 文件对高分一号 MSS, PAN 数据进行正射校正, 对图像中的每个像元进行地形变形的校正, 使图像符合正射投影的要求. 2) 影像融合. 通过 NNDiffuse Pan Sharpening 方法, 对正射校正后的 MSS, PAN 影像进行图像融合, 生成分辨率为 2 m 的影像. 该融合方法不仅融合速度快、支持国产卫星, 且对色彩、纹理和光谱信息均有很好的保留^[17].

2 研究方法

基于 GF-1 PMS 数据, 采用面向对象方法, 建立决策树模型, 对新罗区进行森林覆盖提取. 总体的技术流程, 如图 2 所示.

技术流程分为以下 4 个部分. 1) 数据预处理. 2) 影像分割. 分为多尺度分割和光谱差异分割. 3) 森林覆盖的提取. 在研究区建立影像解译标志, 选取样本并分析

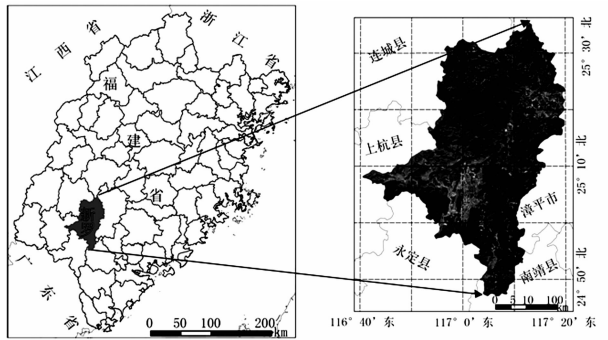


图 1 研究区地理位置及影像
Fig. 1 Geographical location and image of study area

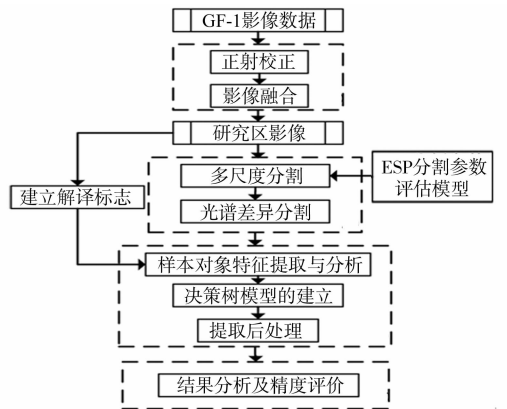


图 2 总体技术流程
Fig. 2 Overall process

样本特征,建立决策树模型,进行新罗区森林覆盖的定量提取.4) 结果分析及精度评价.

2.1 影像分割

面向对象方法在高分辨率遥感影像的应用中得到广泛使用. 其中,影像分割是面向对象方法中重要的一步,直接影响信息提取的精度,分割对象与地物边界吻合度越高,对信息提取结果越有益^[18].

2.1.1 多尺度分割 目前,多尺度分割方法是面向对象影像分析技术中的基础与核心内容. 在分割中,需同时考虑影像的光谱特征、形状特征和空间特征,并遵循异质性最小的原则^[19]. 异质性度量公式为

$$M = \theta_1 \times c + (1 - \theta_1) \times s, \tag{1}$$

$$s = \theta_2 \times s_1 + (1 - \theta_2) \times s_2. \tag{2}$$

式(1),(2)中: M 为异质性准则; θ_1, θ_2 分别为颜色因子、平滑度因子的权重; c, s 分别为颜色差异性因子与形状差异性因子; s_1, s_2 分别为平滑度与紧致度.

多尺度分割的标准流程从根本上决定了这是一个基于视觉评估分割适宜性的不断优化的过程^[20]. Drăgut 等^[21]提出一种多尺度分割参数评价模型 ESP. 根据不同分割尺度下影像对象同质性的局部方差(LV)的变化率(ROC-LV)确认分割最佳尺度,当 ROC-LV 处于峰值状态时,该点被认为是一个有意义的分割点. 该模型最大的特点是能够利用客观计算辅助主观判断,使多尺度分割的尺度判断更加科学. 文中使用该模型辅助判断最优分割尺度.

2.1.2 光谱差异分割 光谱差异分割算法根据已有分割对象层中相邻分割对象的灰度差异值是否满足给定的阈值,决定是否将对象进行合并^[22]. 该算法将灰度值接近的图像对象进行合并,以此优化分割结果. 与使用多层次多尺度分割和逐次实验寻找最佳尺度参数相比较,具有更强的普适性和推广性.

相邻对象 a, b 的光谱差异值的计算公式为

$$P = \sum_{i=1}^n \left[\frac{W_{K_i}}{\sum_{i=1}^n W_{K_i}} |K_{i_a} - K_{i_b}| \right], \quad i = 1, 2, 3, \dots, n. \tag{3}$$

式(3)中: P 为光谱差异值; W_{K_i} 为 i 对象层的权重; K_{i_a}, K_{i_b} 为分别 i 层 a, b 对象的灰度值.

2.2 影像特征分析

2.2.1 植被指数可用性分析 实现森林覆盖的定量提取,植被指数是必不可少的特征. 新罗区为山区,山体阴阳坡的光谱会产生较大差异,这种情况造成了影像上森林区域的光谱异常. 在研究过程中发现,在坡度较高、山体阴影明显的地方,使用最常用的差异归一化植被指数(NDVI)进行森林覆盖提取时,会出现森林与其他地物混淆的情况.

同一区域的影像对比,如图 3 所示. 图 3(a)为融合后标准假彩色显示的 GF-1 影像;图 3(b)为对应区域的 NDVI 影像,颜色越亮表示 NDVI 越大. 图 3 中:黄色矩形框为阴坡区域的森林;蓝色矩形框为建筑用地、裸地等非森林区域. 由图 3(a),(b)可知:原影像上阴坡森林部分的 NDVI 接近裸地,二者在该特征图像上发生混淆,难以区分.

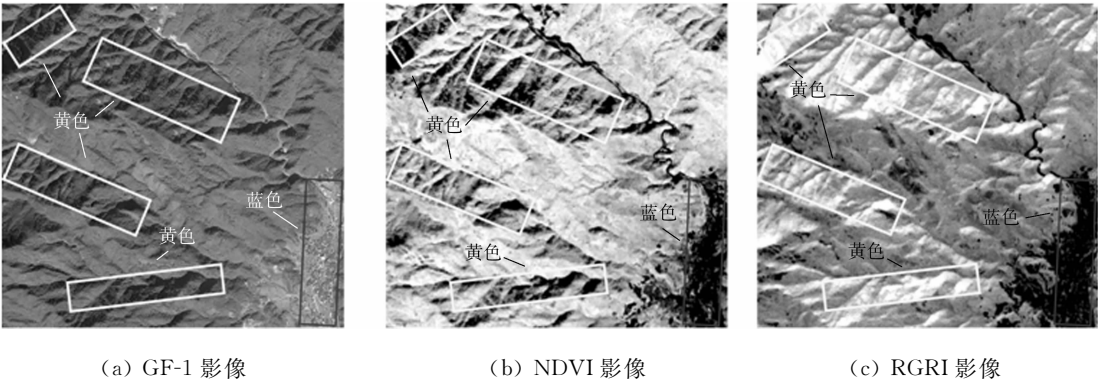


图 3 同一区域的影像对比
Fig. 3 Image comparison in same area

为了探究基于高分一号影像面向复杂山区地形的植被指数实用性,对不同类型的 12 种植被指数进行评估,如表 1 所示.

表 1 植被指数及其计算式
Tab. 1 Vegetation index and its computational

植被指数	公式
比值植被指数(RVI)	$RVI=NIR/Red$
差异归一化植被指数(NDVI)	$NDVI=(NIR-Red)/(NIR+Red)$
差值植被指数(DVI)	$DVI=NIR-Red$
绿色归一化差值植被指数(GNDVI)	$GNDVI=(NIR-Red)/(NIR+Red)$
红色植被指数(RGNDI)	$RGNDVI=(Red-Green)/(Red+Green)$
再归一化植被指数(RDVI)	$RDVI=(Red-Green)/\sqrt{Red+Green}$
转换型植被指数(TNDVI)	$TNDVI=\sqrt{[(NIR-Red)/(NIR+Red)]}+0.5$
归一化差异绿度指数(NDGI)	$NDGI=(Green-Red)/(Green+Red)$
绿度植被指数(GVI)	$GVI=NIR/Green$
红绿比值植被指数(RGRI)	$RGRI=Red/Green$
绿光与红光波段归一化植被指数(GRNDVI)	$GRNDVI=(NIR-(Red+Green))/(NIR+Red+Green)$
增强植被指数(EVI)	$EVI=(NIR-Red)/(NIR+C_1\times Red-C_2\times Blue+L)$, $L=1.5C_1=6C_2=7.5$

在 GF-1 影像上,选取植被、水体、阴坡植被、裸地、不透水面等 5 类常见地物,各 30 个样本,计算相应的植被指数,并对每种植被指数的各地物类别样本均值进行归一化处理. 各植被指数的地物识别能力,如图 4 所示.

由图 4 可知:除 RGNDI,NDGI,RGRI 外,其余的植被指数中,阴坡植被易与裸地或不透水面混淆,或是植被与阴坡植被夹杂着其他地类,不易使用阈值直接区分. 此外, RGNDI,NDGI,RGRI 均为红光波段与绿光波段的线性组合,说明红光波段与绿光波段的组合能够有效区分阴坡植被与其他地类. 这 3 种植被指数相互间具有很强的线性相关性. 由于比值型植被指数可克服大气、阴影、地形影响,故采用 RGRI 开展研究. 需要注意的是, RGRI 植被的取值小于不透水面、裸地等地类. 为了更清晰地显示效果, RGRI 取负值出图,图 3(c)为同一地区的 RGRI 结果图. 对比 NDVI 影像图可知:背阴坡森林与建筑地等其他地类区分开,未发生混淆.

2.2.2 样本特征提取与分析 为了实现森林覆盖的定量提取,将研究区划分为森林、其他植被、耕地、不透水面、未利用地、水体等 6 类. 根据建立的解译标志,采集样本进行特征提取及分析.

研究区典型地物坡度分布图,如图 5 所示. 由图 5 可知:森林整体上处于坡度(δ)较高的区域,水体、耕地均处于坡度低于 20° 的区域,其他植被类型大部分也处于该区域. 这可能是由于低坡度区域会发生更多人为活动,原本有希望成为森林的区域受到干扰,未达到成林的标准. 当坡度高于 20° 时,其他植被、未利用地、不透水面仅有少数或个别存在,坡度越高的区域地物类型结构越简单,且森林占大多数. 故利用坡度阈值 20° 进行分层,提取森林区域.

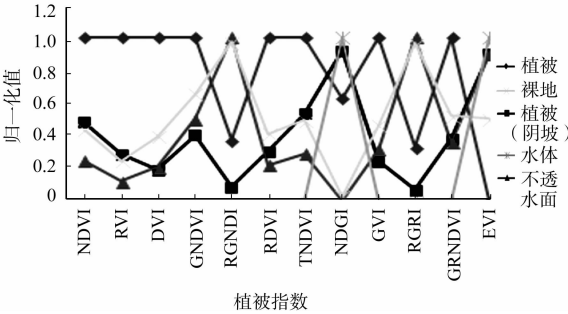


图 4 不同植被指数比较

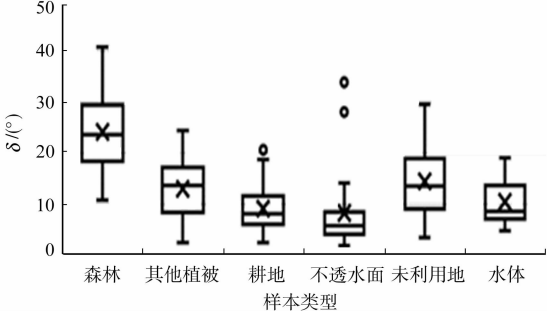


图 5 研究区典型地物的坡度分布

Fig. 4 Comparison of different vegetation index Fig. 5 Slope distribution of typical objects in study area
森林与其他地类植被指数可分性,如图 6 所示. 由图 6(a)可知:在该特征上,未利用地、耕地、不透水面易于与森林区分开. 其原因是研究地区植被常绿,但影像时间为 12 月,耕地处于休耕状态,易于区分. 水体的 RGRI 低于森林且有部分交叉,为了保证精度,使用归一化水体指数(NDWI)先将水体剔除. 由于阴坡森林的 NDWI 接近水体,而图 5 中水体的坡度均处于 20° 以下,二者在坡度特征上有较大区

别,故使用 NDWI 及坡度因子剔除水体,以保证提取精度. 部分其他植被与森林不能够区分,分析样本发现,这些区域一般处于坡度较低处. 将这些与森林混淆的样本进行进一步分析发现,RVI 对这些 RGRI 接近的其他植被样本和森林样本有很好的区分度. 由图 6(b)可知:其他植被的 RVI 低于森林,验证了 RVI 对更高植被覆盖度和密集植被有更强的敏感性.

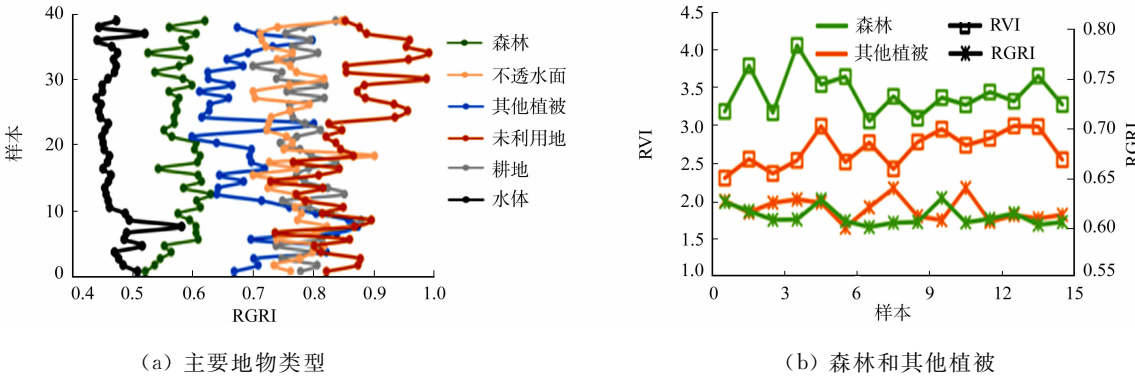


图 6 森林与其他地类植被指数可分性

Fig. 6 Vegetation index separability between forest and other ground objects

2.3 决策树模型的构建

构建的决策树模型,如图 7 所示. 图 7 中: $T_1 \sim T_5$ 为指标阈值. 使用 NDWI 结合坡度因子剔除水体,以 20° 坡度阈值将研究区分为高坡度区域和低坡度区域. 在高坡度区域,由于地物类型单一,森林占大多数,仅使用 RGRI 剔除其他类型地物. 在低坡度区域,利用 RGRI 剔除不透水面、耕地、未利用地和部分稀疏林地及提取部分森林后,对于部分与森林区域混淆的其他植被,使用 RVI 将其剔除,完成森林覆盖的定量提取工作.

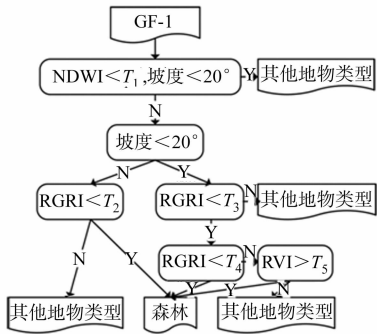


图 7 森林提取决策树

Fig. 7 Decision tree of extracting forest

3 结果与分析

3.1 影像分割结果

影像分割采用多尺度分割和光谱差异分割算法. 多尺度分割中利用 ESP 模型进行分割尺度评估. 由于森林斑块基本上无特定形状,选择形状因子为 0.1,紧致度因子为 0.5. 初始分割尺度设置为 100,步长设置为 2,计算结果如图 8 所示. 为了将森林与其他地物类型尽可能区分,选取尺度参数有意义点中的最小值,即将 118 作为分割尺度参数,进行多尺度分割. 在多尺度分割结果中,对于山区中地物类型单一的情况,其分割结果显得过于破碎. 光谱差异分割前后对比,如图 9 所示.

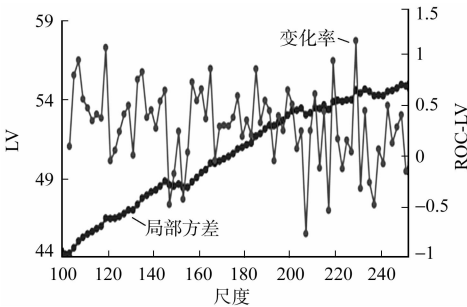


图 8 ESP 分割尺度结果

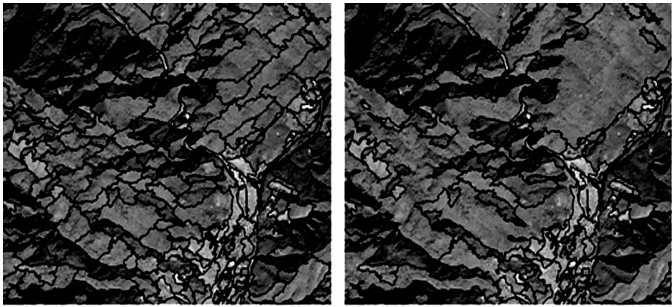


图 9 光谱差异分割前后对比

由图 9(a)可知:居民地与森林部分区分开的同时,山区森林却分割得过于破碎. 由图 9(b)可知:加入光谱差异分割算法后,可保证非森林与森林的区分度,并改善山区森林分割过于破碎的状况. 经过比

较实验,将光谱差异分割的阈值设置为 30.

3.2 提取结果与精度分析

3.2.1 决策树模型的可用性 为研究该决策树模型的可靠性,选择影像大小为 2 200 px×2 200 px 的实验区. 基于高分一号 PMS 影像,先进行多尺度分割,分割尺度为 118,形状因子为 0.1,紧致度因子为 0.5. 然后,使用光谱差异分割法对分割结果进行优化. 采用决策树算法(Cart 5.0)、最近邻法(KNN)、支持向量机(SVM)、随机森林算法(RF)与建立的决策树模型方法,对分割后得到的结果进行比较. 其中,训练样本均相同,分类器算法与决策树模型提取结果使用同一样本进行精度验证. 在分割后的影像上,选取森林、其他植被、耕地、不透水面、未利用地、水体各 30 个样本. 训练样本选择光谱特征、纹理特征、空间特征和自定义特征等 52 个特征,如表 2 所示. 文中建立的决策树模型所使用的特征也包含其中.

表 2 训练样本的特征汇总

Tab. 2 Feature summary of training samples

特征种类	特征名称	特征数/个	特征种类	特征名称	特征数/个
光谱特征(13)	各波段均值	4	自定义特征(4)	RVI	1
	各波段比率	4		NDWI	1
	各波段标准差	4		RGRI	1
	亮度	1		坡度	1
纹理特征(28)	各波段同质性	4	空间特征(7)	面积	1
	各波段标准差	4		长度	1
	各波段对比度	4		长宽比	1
	各波段平均值	4		宽度	1
	各波段信息熵	4		紧致度	1
	各波段差异性	4		形状指数	1
	各波段差异性	4		对象主方向	1
	各波段差异性	4			

完成分类后,将除森林类型外的结果合并为非森林类别. 不同方法的森林提取效果对比的部分结果,如图 10 所示. 在研究区内,参照同时相 Google Earth 影像目视解译出随机抽样的 200 个点,使用混淆矩阵计算相应指标,进行精度验证. 不同方法的森林提取精度,如表 3 所示. 表 3 中: η_1 、 η_2 分别为森林的制图精度与用户精度; η_t 为总体精度.

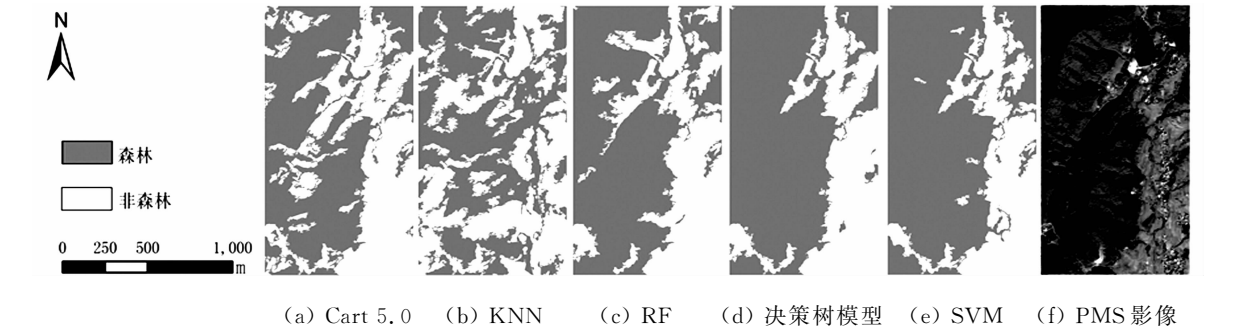


图 10 不同方法的森林提取效果对比

Fig. 10 Comparison of forest extraction effects by different methods

对比图 10 及表 3 可知:KNN 效果最差,与决策树模型相同分类思想的 Cart 5.0 的精度也低于决策树模型,说明基于先验知识的决策树模型更具有科学性;RF 和 SVM 都获得了很高的精度;决策树模型的制图精度虽低于精度最高的 SVM,但达到了《森林资源规划设计调查主要技术规定》对有林地的正判率为 90%的要求. 此外,对于样本区小的情况,对比试验中的 Cart 5.0,KNN 等算法本

表 3 不同方法的森林提取精度比较

Tab. 3 Comparison of forest extraction accuracy by different methods

算法	η_1 / %	η_2 / %	η_t / %	Kappa 系数
Cart 5.0	87.12	90.55	86.00	0.68
KNN	70.45	77.50	67.00	0.29
RF	93.94	91.18	90.00	0.77
决策树模型	93.94	91.85	91.00	0.79
SVM	94.70	88.03	88.00	0.72

身就具有一定的优势,但在大区域推广方面,决策树模型则不需要选取大量样本,效率更高.

3.2.2 新罗区森林提取结果与精度验证 通过样本分析建立知识型决策树模型,基于高分一号 PMS 数据,使用面向对象方法进行森林覆盖面积提取,并对提取结果进行后处理.对提取结果中出现的一些孤立斑块,采用形态学处理方法,依次对结果进行 5×5 窗口的数学形态学滤波膨胀运算、卷积滤波主要分析运算、形态学滤波腐蚀运算和卷积滤波主要分析运算^[6].对结果进行面积统计时,将投影方式转换成 Albers 等积投影,这是因为等积投影面积与实地面积相等,能保证统计面积的准确性.提取结果如图 11 所示.新罗区政府官方公布的 2016 年森林覆盖面积为 209 434.3 hm^2 ,覆盖率为 77.99%.文中方法提取的新罗区 2016 年森林面积为 205 138.9 hm^2 ,森林覆盖率为 76.40%,与官方公布的森林覆盖率相差 1.59%.提取结果与官方公布森林面积差值占官方公布森林面积的 2.05%,就面积统计结果而言,提取结果可靠性较高.

为了进一步验证结果的准确性,采用独立参考像元进行精度评价.为了使验证点分布均匀且随机,创建边长为 1 500 m 的格网,在每个格网中随机生成 1 个点,得到 1 043 个随机点.以同时相 Google Earth 影像为参考进行判读,采用混淆矩阵进行精度评价,计算相应参数及 Kappa 系数.基于 GF-1 影像的新罗区森林覆盖提取精度,如表 4 所示.表 4 中: δ_1 、 δ_2 分别为漏分误差与错分误差.由表 4 及相关计算可知:森林区域的制图精度 η_1 达 96.13%,用户精度 η_2 达 96.49%,总体精度为 94.34%,分类的 Kappa 系数为 0.84,提取结果与验证结果具有高度的一致性.

表 4 基于 GF-1 影像的森林提取精度

Tab.4 Forest extraction accuracy based on GF-1 image

区域	被评价图像数量			$\eta_1/\%$	$\delta_1/\%$	$\eta_2/\%$	$\delta_2/\%$
	森林	非森林	总和				
森林	769	31	800	96.13	3.88	96.49	3.51
非森林	28	215	243	88.48	11.52	87.40	12.60
总和	797	246	1 043				

4 结论

1) 将多尺度分割算法与光谱差异分割算法相结合,改善多尺度分割中同一分割尺度下部分大面积地物分割破碎的情况,同时,保证小面积地物的分割效果.在应用方面比多层次多尺度分割的效率更高,执行过程更简单,对于工程化作业有重要意义.

2) 对于山区阴坡光谱异常的现象,使用红绿波段线性组合的指数类型能够完整提取阴坡森林区域,解决常用 NDVI 等植被指数不能区分阴坡植被和阳坡植被区域、阴坡植被易与建筑用地和裸地等发生混淆的问题;地形因子在山区提取工作中有重要的作用,利用坡度分层提取森林可以简化提取步骤,对提取结果而言,也可以保证地块的完整度.

3) 基于先验知识和样本分析建立的决策树模型结构简单,使用地形因子和光谱特征进行森林覆盖的定量提取,山区坡度高的区域地物更加完整,且多为森林覆盖等先验知识的加入使提取过程更加简洁,对分类器算法,无需选择大量训练样本,效率更高.

4) 提取的新罗区 2016 年森林覆盖率为 76.40%,与官方公布的森林覆盖率相差 1.59%.森林区域的制图精度为 96.13%,Kappa 系数为 0.84,提取结果满足《森林资源规划设计调查主要技术规定》对有林地的正判率为 90%的要求.该研究为新罗区的森林覆盖的定量提取提供简单准确的方法,为新罗区的森林资源调查工作打下坚实的基础.但文中只进行森林覆盖的定量提取,未对森林覆盖类型进行分类,这是未来工作值得展望的一部分.

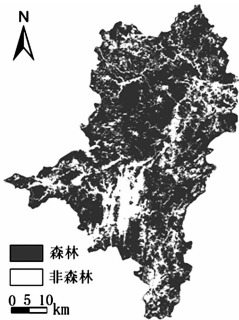


图 11 新罗区森林覆盖提取结果
Fig. 11 Extraction result of forest cover in Xinluo District

参考文献:

- [1] HANSEN M C,POTAPOV P V,MOORE R,*et al.* High-resolution global maps of 21st-century forest cover change [J]. *Science*,2014,344(6187):850. DOI:10.1126/science.1244693.
- [2] 黄健熙,侯裔焯,苏伟,等.基于 GF-1 WFV 数据的玉米与大豆种植面积提取方法[J]. *农业工程学报*,2017,33(7):164-170. DOI:10.11975/j.issn.1002-6819.2017.07.021.
- [3] YANG Yanjun,HUANG Yan,TIAN Qingjiu,*et al.* The extraction model of paddy rice information based on GF-1 satellite WFV images[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*,2015,35(11):3255-3261. DOI:10.3964/j.issn.1000-0593(2015)11-3255-07.
- [4] 郭燕,武喜红,程永政,等.用高分一号数据提取玉米面积及精度分析[J]. *遥感信息*,2015(6):31-36. DOI:10.3969/j.issn.1000-3177.2015.06.006.
- [5] 牛增懿,丁建丽,李艳华,等.基于高分一号影像的土壤盐渍化信息提取方法[J]. *干旱区地理*,2016,39(1):171-181.
- [6] 田海峰,周伯燕,陈燕芬,等.县域尺度上基于 GF-1 PMS 影像的冬小麦种植面积遥感监测[J]. *中国农业大学学报*,2017,22(10):139-146. DOI:10.11841/j.issn.1007-4333.2017.10.17.
- [7] 林熙,罗小军,郭红梅,等.基于语义约束的 GF-1 遥感影像山区居民地提取方法[J]. *山地学报*,2017,35(1):102-111. DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000201.
- [8] 徐磊,巫兆聪,罗飞,等.基于 GF-1/WFV 与 MODIS 时空融合的森林覆盖定量提取[J]. *农业机械学报*,2017,48(7):145-152. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.018.
- [9] 尹凌宇,覃先林,孙桂芬,等.利用 KPCA 法检测高分一号影像中的森林覆盖变化[J]. *国土资源遥感*,2018,30(1):95-101. DOI:10.6046/gtzyyg.2018.01.13.
- [10] 任冲,鞠洪波,张怀清,等.多源数据类型的精细分类方法[J]. *林业科学*,2016,52(6):54-65. DOI:10.11707/j.1001-7488.20160607.
- [11] MCIVER D K,FRIEDL M A. Using prior probabilities in decision-tree classification of remotely sensed data[J]. *Remote Sensing of Environment*,2002,81(2):253-261. DOI:10.1016/s0034-4257(02)00003-2.
- [12] 陈利,林辉,孙华,等.基于决策树分类的森林信息提取研究[J]. *中南林业科技大学学报*,2013,33(1):46-51.
- [13] 杨存建,周其林,任小兰,等.基于多时相 MODIS 数据的四川省森林植被类型信息提取[J]. *自然资源学报*,2014(3):507-515. DOI:10.11849/zrzyxb.2014.03.014.
- [14] 罗朝沁,林辉,孙华,等.基于 MODIS 影像大尺度森林资源信息提取方法研究[J]. *中南林业科技大学学报*,2015(11):21-26. DOI:10.14067/j.cnki.1673-923x.2015.11.005.
- [15] 徐伟燕,孙睿,金志凤.基于资源三号卫星影像的茶树种植区提取[J]. *农业工程学报*,2016(增刊1):161-168.
- [16] 任传帅,叶回春,崔贝,等.基于面向对象分类的芒果林遥感提取方法研究[J]. *资源科学*,2017,39(8):1584-1591. DOI:10.18402/resci.2017.08.14.
- [17] ZHAO Jinling,GUO Junjie,CHENG Wenjie,*et al.* Assessment of SPOT-6 optical remote sensing data against GF-1 using NNDiffuse image fusion algorithm[J]. *Modern Physics Letters B*,2017,31(19/20/21):1740043. DOI:10.1142/S0217984917400437.
- [18] GAO Yan,MAS J F,KERLE N,*et al.* Optimal region growing segmentation and its effect on classification accuracy [J]. *International Journal of Remote Sensing*,2011,32(13):3747-3763. DOI:10.1080/01431161003777189.
- [19] BLASCHKE T,HAY G J. Object-oriented image analysis and scale-space: Theory and methods for modeling and evaluating multi-scale landscape structure[J]. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*,2001,34:22-29.
- [20] WHITESIDE T G,BOGGS G S,MAIER S W. Comparing object-based and pixel-based classifications for mapping savannas[J]. 2011,13(6):884-893. DOI:10.1016/j.jag.2011.06.008.
- [21] DRĂGUT L,CSILLIK O,EISANK C,*et al.* Automated parameterisation for multi-scale image segmentation on multiple layers[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*,2014,88(100):119-127.
- [22] TRIMBLE. Cognition developed reference book[M]. Munich:Trimble Germany GmbH,2014.

(责任编辑:钱筠 英文审校:吴逢铁)