

## 基于无人机可见光影像的毛竹林郁闭度估测方法

王雨阳<sup>1,2,3</sup>, 王懿祥<sup>1,2,3</sup>, 李明哲<sup>1,2,3</sup>, 梁 丹<sup>1,2,3</sup>

(1. 浙江农林大学 环境与资源学院, 浙江 杭州 311300; 2. 浙江农林大学 省部共建亚热带森林培育国家重点实验室, 浙江 杭州 311300; 3. 浙江农林大学 浙江省森林生态系统碳循环与固碳减排重点实验室, 浙江 杭州 311300)

**摘要:** 【目的】由于毛竹 *Phyllostachys edulis* 的生长特点和经营特点, 使得毛竹林郁闭度在毛竹林经营中尤为重要, 只有保持适宜毛竹生长的郁闭度, 才能提高毛竹生产力。研究无人机可见光影像的毛竹林郁闭度估测方法, 可实现实时快速获取毛竹林的郁闭度。【方法】以普通旋翼无人机可见光毛竹林影像为研究对象, 基于像元的阈值分类、像元的监督分类、多尺度分割的阈值分类、多尺度分割的监督分类等 4 种方法, 选取不同钩梢和郁闭度的样地 36 个, 利用现有软件和 MATLAB 编程, 对各样地的毛竹林竹冠区域进行快速提取, 进而估算林分郁闭度, 对比目视解译的郁闭度真值计算各方法的估算精度, 利用单因素方差分析比较 4 种方法在不同钩梢和不同郁闭度下估算郁闭度的表现。【结果】基于像元的阈值分类、基于像元的监督分类、基于多尺度分割的阈值分类、基于多尺度分割的监督分类等 4 种方法的郁闭度估算总体精度依次为 91.81%、92.96%、93.47%、98.86%, 郁闭度估测值绝对误差依次为 0.038、0.030、0.024、0.004。钩梢和郁闭度等对提取结果没有显著影响。【结论】基于多尺度分割的监督分类方法总体精度最高, 估算绝对误差最小, 能够满足快速、准确提取并估测毛竹林林分郁闭度的要求, 且适用于不同经营类型的毛竹林。图 2 表 6 参 28

**关键词:** 郁闭度; 钩梢; 多尺度分割; 毛竹林; 无人机

中图分类号: S758.5 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2022)05-0981-08

## Estimation method of *Phyllostachys edulis* forest canopy density based on UAV visible image

WANG Yuyang<sup>1,2,3</sup>, WANG Yixiang<sup>1,2,3</sup>, LI Mingzhe<sup>1,2,3</sup>, LIANG Dan<sup>1,2,3</sup>

(1. College of Environment and Resources, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China; 2. State Key Laboratory of Subtropical Silviculture, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China; 3. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Carbon Cycling in Forest Ecosystems and Carbon Sequestration, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China)

**Abstract:** [Objective] Due to the growth and management characteristics of *Phyllostachys edulis* forest, the canopy density of *Ph. edulis* forest is a very important factor in the management. This study aims to explore the estimation method of canopy density of *Ph. edulis* forest based on unmanned aerial vehicle (UAV) visible image, which can achieve real-time and rapid acquisition of *Ph. edulis* forest canopy density. [Method] The visible light image of *Ph. edulis* forest of common rotor UAV was taken as the research object. 4 mature digital image processing methods were adopted, namely, threshold classification based on pixel, supervised classification based on pixel, threshold classification based on multi-scale segmentation, and supervised classification based on multi-scale segmentation. 36 sample plots with different truncation conditions and

收稿日期: 2021-08-19; 修回日期: 2022-05-20

基金项目: 浙江省林业局与中国林业科学研究院合作项目 (2019SY06)

作者简介: 王雨阳 (ORCID: 0000-0002-9496-0891), 从事无人机遥感等研究。E-mail: 2804649121@qq.com。通信作者: 梁丹 (ORCID: 0000-0002-6713-122X), 讲师, 博士, 从事测量误差理论与无人机遥感研究。E-mail: liangdan812345@163.com

canopy density were selected. Using the existing software and MATLAB programming, the *Ph. edulis* canopy area in each sample plot was rapidly extracted, and then the canopy density was estimated. The estimation accuracy of the canopy density of each method was compared with the true value calculated by visual interpretation, and the performance of the 4 methods under different truncation and different canopy density conditions was compared and analyzed. [Result] The overall accuracy of threshold classification based on pixel, supervised classification based on pixel, threshold classification based on multi-scale segmentation, and supervised classification based on multi-scale segmentation was 91.81%, 92.96%, 93.47% and 98.86%, respectively. The absolute error of the estimated value of canopy density of the 4 methods was 0.038, 0.030, 0.024 and 0.004, respectively. Truncation condition and canopy density had no significant effect on the extraction results. [Conclusion] The supervised classification method based on multi-scale segmentation has the highest overall accuracy and the smallest absolute error. It can quickly and accurately extract and estimate the canopy density of *Ph. edulis* forest, and is suitable for different management types of *Ph. edulis* forest. [Ch, 2 fig. 6 tab. 28 ref.]

**Key words:** crown density; truncation; multi-scale segmentation; *Phyllostachys edulis* forest; unmanned aerial vehicle (UAV)

林分郁闭度是指林木树冠垂直投影面积占林地总面积的比例,是反映林分密度的重要指标,在森林资源调查中尤为重要。在传统的森林资源调查中,获取林分郁闭度的主要方法为抬头望法,该方法耗时耗力,获取的数据精度较低,且只适用于面积小、地势缓的林地,难以在地理环境复杂的大区域内应用。随着数字成像技术的发展,HERBERT<sup>[1]</sup>提出利用鱼眼相机拍摄全天空相片进行郁闭度估测,扩大了拍摄的林冠范围;濮毅涵等<sup>[2]</sup>基于普通可见光照片中的树叶、树干和天空进行分类,将估测结果与抬头望法结果进行模型比较,得到决定系数( $R^2$ )为0.77,但该方法适用于地形平坦的林区,在地形复杂的山地难以应用。为克服地形因子的限制,不少学者基于卫星遥感影像对乔木林林分郁闭度的提取进行了研究。高云飞等<sup>[3]</sup>基于SPOT 5影像,对各波段的遥感影像像元亮度值进行组合,建立反演模型,最终得到最佳组合模型的 $R^2$ 为0.66;李擎等<sup>[4]</sup>为提高模型精度,基于高分二号(GF-2)遥感影像,结合光谱信息、纹理特征和地形因子构建郁闭度估测模型,模型精度达89.82%。然而卫星遥感成本高、时效低、灵活性低<sup>[5]</sup>,相比之下无人机可见光遥感在中小型遥感区域作业中能发挥更大的优势,满足动态森林资源监测的条件和需求,并提供更多可能性<sup>[6-8]</sup>。苏迪等<sup>[9]</sup>基于无人机可见光影像,利用主成分分析确定模型的主成分变量,建立郁闭度回归方程,估算精度为83.18%;汪霖<sup>[10]</sup>结合无人机可见光影像得到的数字正射影像(DOM)和冠层高度模型(CHM),使用阈值法对树冠区域进行提取并计算郁闭度,平均精度为92.93%。以上关于乔木林分郁闭度遥感估测的研究都取得了一定的成果,能够满足林业调查需求,然而,目前基于无人机可见光影像的毛竹林林分郁闭度估测研究为数不多。

毛竹作为中国南方重要的笋、竹两用竹种,是最重要的森林资源之一。第九次全国森林清查结果显示:毛竹林面积为467 hm<sup>2</sup>,占竹林总面积的73%<sup>[11]</sup>。由于毛竹林的生长特点(扩鞭)<sup>[12-13]</sup>和经营特点(择伐),使得林分郁闭度在毛竹林经营中尤为重要,出笋率和采伐结果都将反映在郁闭度上,只有保持适宜毛竹生长的郁闭度,才能提高毛竹生产力。毛竹林多分布在地丘陵地区,传统的实地调查工作量大、效率低、工作周期长、精确度低。随着无人机技术的发展,无人机林业遥感为实现低成本、高时效、高分辨率、高灵活性的动态森林资源监测提供了技术基础。基于无人机和图像识别技术的单木树冠提取已有一定进展。然而相比其他乔木林,毛竹林竹冠具有特殊性,分为钩梢与未钩梢2种形态,且竹冠鲜少呈单个状态,具有“重叠性”,目前还没有利用现有方法直接获取单株毛竹竹冠的研究。本研究对无人机可见光影像的毛竹林郁闭度估测方法进行了分析,以期快速获取毛竹林的郁闭度提供参考。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于浙江省湖州市安吉县(30°23′~30°53′N, 119°14′~119°53′E),该区地处长江三角洲腹地,

属于亚热带季风气候，植被类型为亚热带常绿阔叶林，年均气温为 12.2~15.6℃，年均降水量为 1 100~1 900 mm。研究区内光照充足，雨量充沛，竹资源丰富，竹林总面积达 757 km<sup>2</sup>，占森林面积 56.47%，其中毛竹占 79.30%，被誉为“中国竹乡”。

## 1.2 数据获取

1.2.1 样地划分与地面数据获取 根据是否钩梢和郁闭度 2 个因素选设样地，共调查 36 个 10 m×10 m 的样地，其中已钩梢毛竹林样地 24 个，未钩梢毛竹林样地 12 个。利用研究区数字正射影像目视解译获得毛竹林的郁闭度，未钩梢样地为抛荒毛竹林，处于无人经营状态，郁闭度均大于 0.9，故在本研究中不再细分郁闭度等级。样地基本情况见表 1。

1.2.2 无人机系统及数据采集 数据采集所用无人

机遥感系统为大疆 Phantom 4 RTK，飞行系统包括 3 部分：飞行器、云台相机和遥控器。飞行器提供多方位视觉系统，可稳定飞行和精准悬停，进行航点飞行作业；机身装备机载 D-RTK，可提供厘米级高精度准确定位，实现更精准的测绘作业。Phantom 4 RTK 配备 24 mm 广角相机、高精度防抖云台及图像传感器、机械快门，确保成像效果。遥控器的主要功能包括作业设计、远距离信号传输和航拍高清画面实时监测等。

2020 年 11 月 18 日 14:00—15:00，天气晴朗、无风、无云，采用大疆 Phantom 4 RTK 搭载光学相机对选定研究区域进行拍摄。无人机飞行高度为 160 m，飞行范围东西走向为 222.82 m，南北走向为 106.28 m，航向重叠率为 90%，旁向重叠率为 80%，飞行路线设计为“S”型路线。拍摄共得原始照片 142 张，空间分辨率为 3.36 cm，照片共 3 波段：红波段 (R)、绿波段 (G)、蓝波段 (B)。

1.2.3 影像预处理 使用大疆智图软件对无人机所获取照片进行图像处理，通过三维重建技术，生成带有空间参考信息的数字表面模型 (DSM) 和色调自然、无明显接痕的正射影像图。图像处理的主要流程包括：①数据预处理，对照片进行校验、筛选、对齐，剔除一些无法进行后续合成的照片；②空三加密，通过空三计算得到密集点云和纹理；③生成网格，得到带空间参考信息的数字表面模型和数字正射影像。

## 1.3 研究方法

1.3.1 多尺度分割 在毛竹林高分辨率遥感影像中，由于影像信息太多、林间空隙太杂，经常会产生“同物异谱”和“同谱异物”现象，而在分类前执行分割能有效解决该问题<sup>[14-16]</sup>。

多尺度分割是从任意一像元开始，自下而上进行合并的一种分割手段，其参数设置包括分割尺度、形状因子和紧致度因子。其中形状因子的取值为 [0, 1]，它包含了形状和光谱 2 个方面的意义，取值越大，表示在同质性标准中形状因子所占比例越高，光谱因子所占比例就越低，反之亦然。紧致度因子包含紧致度和光滑度，两者权重之和也为“1”。分割尺度作为各参数中最重要的一项，决定了分割所得的多边形对象内部的异质性，分割尺度越大，所生成的对象面积就越大，数目就越少，反之亦然<sup>[17]</sup>。本研究采用 eCognition 软件中的 Estimation of Scale Parameter 2 (ESP2) 插件来确定分割尺度，通过设置一系列的参数进行迭代，计算局部方差以及局部方差变化率 ( $R_{OC}$ )<sup>[18-19]</sup>， $R_{OC}=[V_L-(V_{L-1})]/(V_{L-1})\times 100$ 。其中： $V_L$  表示尺度为  $L$  时分割结果中所有对象局部方差值的方差； $V_{L-1}$  表示尺度为  $L-1$  时分割结果中所有对象局部方差值的方差。

本研究对不同类型的毛竹林进行不同参数组合实验，得到不同毛竹林的最优参数组合 (表 2)。

1.3.2 分类 ①基于像元的阈值分类 (TP)。通过设定不同的特征阈值，将图像分为若干类。常用的特征值包括 2 类：直接来自于原始图像的灰度或彩色

表 1 毛竹林样地基本情况

Table 1 Basic information of plot sites

| 类型  | 郁闭度     | 样地/<br>个 | 平均胸<br>径/cm | 平均树<br>高/m | 坡度/<br>(°) | 坡向  |
|-----|---------|----------|-------------|------------|------------|-----|
| 钩梢  | 0~0.7   | 13       | 8.91        | 9.9        | 11.6       | 北坡  |
| 钩梢  | 0.7~0.8 | 8        | 9.03        | 9.4        | 16.1       | 西北坡 |
| 钩梢  | 0.8~1.0 | 3        | 8.65        | 9.2        | 13.3       | 北坡  |
| 未钩梢 |         | 12       | 8.58        | 9.6        | 17.1       | 东南坡 |

表 2 不同毛竹林的最优参数组合

Table 2 Optimal parameter combination of different Moso bamboo stands

| 类型  | 郁闭度     | 分割尺度 | 形状因子 | 紧致度因子 |
|-----|---------|------|------|-------|
|     | 0~0.7   | 29   | 0.3  | 0.5   |
| 钩梢  | 0.7~0.8 | 31   | 0.3  | 0.5   |
|     | 0.8~1.0 | 29   | 0.3  | 0.5   |
| 未钩梢 |         | 41   | 0.3  | 0.5   |



特征和由原始灰度或彩色值变换得到的特征值。基于无人机影像的毛竹林竹冠区域阈值分类的关键在于选取能有效区分竹冠与非竹冠的最优阈值。通过选取竹冠与非竹冠的样点,得到各样点的阈值,统计不同阈值所包含的像元数目,绘成具有明显峰值与谷值的曲线图<sup>[20-21]</sup>。2个峰值对应位置分别为竹冠与非竹冠的典型特征值,谷值为竹冠与非竹冠交界处对应的特征值,也就是最优阈值(图1)。

特征值的选取对提取精度至关重要,本研究使用 ENVI 软件对数字正射影像中的红、绿、蓝波段

进行主成分分析,得到红光和绿光波段包含 98% 以上的信息量,故选取由红、绿波段变换得到的归一化绿红差异指数 ( $I_{NGRD}$ ) 为特征值<sup>[22-23]</sup>,在 MATLAB 中对竹冠区域进行提取,表达式为  $I_{NGRD}=(G-R)/(G+R)$ 。其中  $R$  为红光波段,  $G$  为绿光波段。②基于像元的监督分类 (SP)。根据已知训练区提供的样本,选取并求出特征参数作为决策规则,建立判别函数对各类图像进行分类的一种方法。本研究建立竹冠区与非竹冠区 2 种样本,并在 ENVI 软件中选择最大似然法作为分类算法进行竹冠区域提取,该方法根据训练样本的均值和方差,评价待分类像元和训练样本之间的相似性进而分类,可同时考虑 2 个以上的波段和类别。③基于多尺度分割的阈值分类 (TM)。与传统基于像元的分类不同,基于多尺度分割的阈值分类是一种面向对象分类,其分类的基本单元为影像对象,基本内容分为影像分割与影像分类 2 个独立模块。结合了多尺度分割的分类方法,在精确分类的同时,很好地兼顾了地物的宏观尺度和微观特征,极大地消除了传统分类带来的“椒盐效应”。在分割的基础上,本研究使用  $I_{NGRD}$  对竹冠区域进行阈值提取。④基于多尺度分割的监督分类 (SM)。该分类也是在多尺度分割的基础上,基于对象进行监督分类。本研究通过 eCognition 软件进行多尺度分割,并选择最邻近值分类法进行分类提取,该方法通过均匀地选择样本,建立训练集,统计样本的特征信息,通过计算未分类对象与样本之间的距离进行分类,并提取竹冠区域。

1.3.3 郁闭度计算 郁闭度是指树冠的总垂直投影面积 ( $m^2$ ) 与该样方的总面积 ( $m^2$ ) 之比,反映林分的密度和林分光能利用程度,是抚育间伐的重要指标,郁闭度=总冠幅/样方总面积。

1.3.4 精度评价 在无人机影像的基础上,根据竹冠部分的亮度、纹理和阴影等特征,在 ArcGIS 软件中对各个小样地进行目视解译,并以目视解译的结果作为真值对 4 种方法进行精度评价<sup>[24]</sup>。分别用正确识别的竹冠总面积 ( $A_C, m^2$ )、真实的竹冠总面积 ( $A_R, m^2$ )、识别的竹冠面积 ( $A_D, m^2$ )、正确识别的非竹冠面积 ( $A_N, m^2$ )、样地面积 ( $A_S, m^2$ )、真实郁闭度 ( $R_D$ )、分类结果得到的郁闭度 ( $D_C$ ) 等 7 个指标进行精度和误差的计算。总体精度 ( $O_A$ )= $(A_C+A_N)/A_S \times 100\%$ ; 用户精度 ( $U_A$ )= $A_C/A_D \times 100\%$ ; 生产者精度 ( $P_A$ )= $A_C/A_R \times 100\%$ ; 郁闭度误差 ( $D_E$ )= $|R_D-D_C|$ 。

1.3.5 单因素方差分析 使用 SPSS 25.0 对各样地的总体精度、用户精度、生产者精度、郁闭度误差进行统计分析,采用单因素方差分析法 (one-way ANOVA) 进行显著性检验,采用 LSD 法进行多重比较分析 ( $P=0.05$ ),文中数据为平均值 $\pm$ 标准差。

## 2 结果与分析

### 2.1 毛竹林竹冠区域提取

从图2可见:无论是在钩梢毛竹林还是未钩梢毛竹林中,基于像元的阈值分类法的结果存在较多错分和漏分的情况,且提取结果存在“碎片化”情况。基于像元的监督分类法的漏分情况较少,但存在较多的错分且提取结果呈“碎片化”;基于多尺度分割的阈值分类法提取的树冠存在较严重的错分和漏分情况;基于多尺度分割的监督分类法基本解决了树冠提取结果“碎片化”的问题,提高了所提取树冠的整体性,减少了错分和漏分的情况。从表3可以看出:基于多尺度分割的监督分类法的总体精度、生产者精度和用户精度都显著高于其他 3 种方法 ( $P<0.05$ );基于多尺度分割的监督分类法郁闭度误差最小,

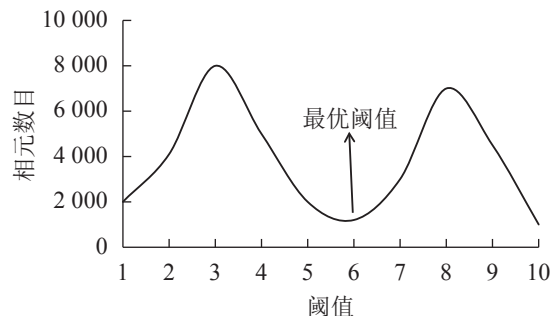
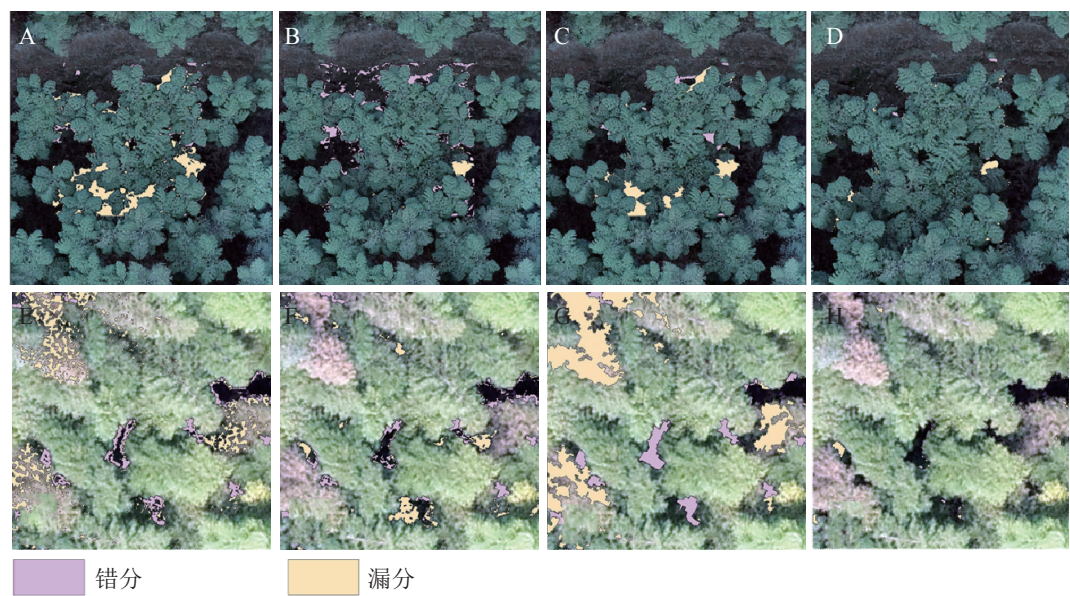


图1 双峰法最优阈值示意图

Figure 1 Schematic diagram of the double peak threshold method



A~D 为钩梢毛竹林；E~H 为未钩梢毛竹林。A、E 表示基于像元的阈值分类法 (TP) 提取结果；B、F 表示基于像元的监督分类法 (SP) 提取结果；C、G 表示基于多尺度分割的阈值分类法 (TM) 提取结果；D、H 表示基于多尺度分割的监督分类法 (SM) 提取结果

图 2 不同方法提取竹冠效果对比示意图

Figure 2 Comparison of the bamboo crown extraction results with different methods

表 3 不同方法的毛竹林竹冠提取精度及郁闭度误差对比

Table 3 Bamboo crown extraction accuracy and canopy density error of different methods

| 方法 | 总体精度/%        | 生产者精度/%      | 用户精度/%       | 郁闭度误差          |
|----|---------------|--------------|--------------|----------------|
| TP | 91.81±3.08 c  | 93.34±3.37 c | 96.24±2.03 b | 0.038±0.026 c  |
| SP | 92.96±3.66 bc | 95.47±3.29 b | 95.64±2.64 b | 0.030±0.026 ab |
| TM | 93.47±2.53 b  | 96.10±2.24 b | 95.57±2.57 b | 0.024±0.018 b  |
| SM | 98.86±0.53 a  | 99.15±0.40 a | 99.36±0.53 a | 0.004±0.003 a  |

说明：同列不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ )

为 0.004，显著低于其他 3 种方法 ( $P<0.05$ )，表明使用基于多尺度分割的监督分类法提取毛竹林郁闭度的结果明显优于其他 3 种方法。

2.2 钩梢与未钩梢对毛竹林竹冠区域和郁闭度提取精度的影响

如表 4 所示：在基于多尺度分割的监督分类法中，是否钩梢对总体精度均没有显著影响，说明基于多尺度分割的监督分类法对钩梢和未钩梢毛竹林均适用；在其他 3 种方法中，钩梢毛竹林总体精度显著高于未钩梢毛竹林，说明这 3 种方法更适用于钩梢毛竹林。无论是钩梢林分，还是未钩梢林分，基于多尺度分割的监督分类法的总体精度均显著高于其他 3 种方法 ( $P<0.05$ )。

从表 5 可见：基于多尺度分割的监督分类法所得到的郁闭度误差最小，在钩梢林分中仅为 0.003，在未钩梢林分中仅为 0.004，显著低于其他 3 种方法 ( $P<0.05$ )。在基于多尺度分割的监督分类法和基于多尺度分割的阈值分类法中，是否钩梢对郁闭度误差没有显著影响；在基于像元的监督分类法和基

表 4 4 种方法下钩梢和未钩梢毛竹林竹冠区域的提取精度

Table 4 Extraction accuracy of the four methods with truncation and non-truncation

| 类型  | 方法 | 总体精度/%        | 生产者精度/%       | 用户精度/%        |
|-----|----|---------------|---------------|---------------|
| 钩梢  | TP | 92.82±2.57 Ab | 93.85±3.11 Ac | 95.96±2.32 Ab |
|     | SP | 93.95±2.74 Ab | 96.67±1.39 Ab | 95.00±2.98 Ab |
|     | TM | 94.05±2.25 Ab | 96.15±2.04 Ab | 95.49±2.90 Ab |
|     | SM | 98.9±0.59 Aa  | 99.14±0.45 Aa | 99.27±0.61 Aa |
| 未钩梢 | TP | 89.80±3.12 Bb | 92.33±3.77 Ac | 96.81±1.15 Ab |
|     | SP | 90.97±4.52 Bb | 93.07±4.57 Bc | 96.92±0.98 Bb |
|     | TM | 92.30±2.77 Bb | 96.01±2.70 Ab | 95.73±1.81 Ac |
|     | SM | 98.78±0.37 Aa | 99.16±0.29 Aa | 99.55±0.22 Aa |

说明：同列不同小写字母表示相同林分类型在不同方法之间差异显著( $P<0.05$ )；同列不同大写字母表示相同方法在不同林分类型之间差异显著( $P<0.05$ )



于像元的阈值分类法中, 钩梢毛竹林的郁闭度误差显著低于未钩梢毛竹林 ( $P<0.05$ )。

### 2.3 郁闭度对毛竹林竹冠区域提取精度的影响

从表6可见: 4种方法对不同郁闭度毛竹林的总体精度均没有显著影响, 说明这4种方法在不同郁闭度的毛竹林中均适用。

## 3 讨论

本研究4种方法提取的毛竹林竹冠区域精度均在90%以上, 而汪霖等<sup>[25]</sup>通过提取单个树冠面积, 得到提取树冠区域的总体精度为93.09%, 高于本研究基于像元的阈值分类法和基于像元的监督分类法, 但低于基于多尺度分割的阈值分类法和基于多尺度分割的监督分类法, 证明在分类前执行分割能有效提高提取精度。4种方法在竹冠区域提取精度上, 基于像元的提取精度小于基于多尺度的提取精度。可能是相比于乔木林, 毛竹林由于其扩鞭生长的特殊性, 竹冠部分难以单个呈现, 具有很强的整体性, 使用传统基于像元的提取方法难以达到对整体性的要求。基于多尺度分割的监督分类法表现最好的原因是在保证对象内部同质性最大的基础上进行的分类, 且结合了光谱、纹理等信息进行分类, 分类依据更全面; 而相较于基于多尺度分割的监督分类法, 基于多尺度分割的阈值分类法由于分类规则只基于光谱信息, 较为单一, 故精度较低。

在基于像元的阈值分类法、基于像元的监督分类法和基于多尺度分割的阈值分类法中, 是否钩梢对竹冠区域提取的影响存在较大影响。其一是由于未钩梢毛竹林郁闭度过高, 林隙较小且颜色与竹冠接近, 导致光学影像的饱和度增高, 对特征量的敏感度随之下降, 造成误差<sup>[26-27]</sup>; 其二是由于未钩梢毛竹林一般处于无人经营状态, 存在毛竹倒伏现象和新老竹之间的光谱差异, 造成误差。但是, 基于多尺度分割的监督分类法则不受毛竹林是否钩梢的影响, 其原因是多尺度分割得到内部同质性最大、外部同质性最小的斑块, 很好保留了分类必需的有效信息, 且避免了高分辨率影像中过于丰富的光谱与纹理信息所带来的干扰, 减少错分与漏分的情况, 基于此进行的监督分类能在保证竹冠整体性的前提下, 通过训练样本分别提取钩梢与未钩梢毛竹林的特征参数, 从而提取毛竹林竹冠区域。

在4种方法中郁闭度对竹冠区域的提取均不存在显著影响, 说明4种方法对不同郁闭度的毛竹林竹冠提取都有较好的适用性。原因是不同郁闭度的毛竹林遥感影像的光谱与纹理特征差别不大, 这4种方法都足以从影像中提取稳定的特征量对竹冠区域进行提取。

就郁闭度估测结果而言, 4种方法提取的郁闭度误差都小于0.04, 其中基于多尺度分割的监督分类法的误差最低, 郁闭度误差仅为0.004, 说明基于无人机的可见光影像可以用于毛竹林的郁闭度提取, 具有很高的应用价值。苏迪等<sup>[9]</sup>基于冠层高度模型数据进行主成分确定自变量建立郁闭度模型, 通过检验得到模型精度为83.18%, 低于本研究的估测精度, 说明基于影像提取的郁闭度优于建模所得的郁闭度。严羽<sup>[28]</sup>使用标记控制分水岭算法对树冠区域与非树冠区域进行分割, 基于分割得到的树冠区域面积与实测面积对比, 得到郁闭度估测误差为2.33%, 高于本研究基于像元的阈值分类法、基于像元的监督

表5 4种方法下钩梢和未钩梢毛竹林的郁闭度误差

Table 5 Canopy density error of the four methods with truncation and non-truncation

| 类型 | 方法 | 郁闭度误差          | 类型  | 方法 | 郁闭度误差           |
|----|----|----------------|-----|----|-----------------|
| 钩梢 | TP | 0.029±0.021 Ab | 未钩梢 | TP | 0.052±0.029 Bc  |
|    | SP | 0.023±0.015 Ab |     | SP | 0.042±0.039 Bbc |
|    | TM | 0.022±0.016 Ab |     | TM | 0.026±0.023 Ab  |
|    | SM | 0.003±0.003 Aa |     | SM | 0.004±0.003 Aa  |

说明: 同列不同小写字母表示相同林分类型在不同方法之间差异显著 ( $P<0.05$ ); 同列不同大写字母表示相同方法在不同林分类型之间差异显著 ( $P<0.05$ )

表6 不同方法下郁闭度对毛竹林竹冠提取精度的影响

Table 6 Effect of canopy density on the extraction accuracy under different methods

| 郁闭度     | 方法 | 总体精度/%        | 生产者精度/%       | 用户精度/%        |
|---------|----|---------------|---------------|---------------|
| 0~0.7   | TP | 93.70±2.44 Ab | 95.04±2.50 Ab | 95.26±2.69 Ab |
|         | SP | 94.98±2.11 Ab | 97.02±1.37 Ab | 95.33±2.90 Ab |
|         | TM | 93.89±2.66 Ab | 96.15±2.52 Ab | 94.70±3.32 Ab |
|         | SM | 98.82±0.69 Aa | 99.11±0.53 Aa | 99.09±0.68 Aa |
| 0.7~0.8 | TP | 92.21±2.65 Ab | 92.43±3.83 Ac | 97.03±1.68 Ab |
|         | SP | 93.62±4.31 Ab | 96.97±1.43 Ab | 95.22±4.78 Ab |
|         | TM | 92.71±1.40 Ab | 96.11±1.43 Ab | 95.19±1.90 Ab |
|         | SM | 98.88±0.48 Aa | 99.08±0.32 Aa | 99.42±0.48 Aa |
| 0.8~1.0 | TP | 90.68±1.46 Ac | 92.46±1.39 Ac | 96.14±0.74 Ab |
|         | SP | 93.62±4.31 Ab | 96.97±1.43 Ab | 95.22±4.78 Ab |
|         | TM | 92.71±1.40 Ab | 96.11±1.43 Ab | 95.19±1.90 Ab |
|         | SM | 99.28±0.33 Aa | 99.48±0.22 Aa | 99.66±0.33 Aa |

说明: 同列不同小写字母表示相同郁闭度在不同方法之间差异显著 ( $P<0.05$ ); 同列不同大写字母表示相同方法在不同郁闭度之间差异显著 ( $P<0.05$ )

分类法和基于多尺度分割的阈值分类法，但低于基于多尺度分割的监督分类法。

## 4 结论

在提取毛竹林竹冠区域和郁闭度的中，本研究基于像元的阈值分类、基于像元的监督分类、基于多尺度分割的阈值分类、基于多尺度分割的监督分类等 4 种方法都达到了较高精度，其中基于多尺度分割的监督分类法的提取结果精度最高，竹冠区域总体精度为 98.86%，郁闭度误差为 0.004，显著优于其他 3 种方法，而且是否钩梢对于基于多尺度分割的监督分类法提取竹冠区域没有影响。在 4 种方法中，郁闭度对竹冠区域的提取均不存在显著影响。总体上，低廉轻便的无人机搭载可见光相机节省了大量的调查时间与精力，提高了调查效率与精度，可以用于大面积毛竹林竹冠区域和郁闭度的提取。

## 5 参考文献

- [1] HERBERT T J. Area projections of fisheye photographic lenses [J]. *Agric For Meteorol*, 1987, **39**(2/3): 215 – 223.
- [2] 濮毅涵, 徐丹丹, 王浩斌. 基于数码相片的林冠郁闭度提取方法研究[J]. *林业资源管理*, 2020(6): 153 – 160.  
PU Yihan, XU Dandan, WANG Haobin. An approach on estimating canopy closure via digital images [J]. *For Resour Manage*, 2020(6): 153 – 160.
- [3] 高云飞, 李智广, 杨胜天, 等. 基于 SPOT 5 影像的郁闭度反演方法[J]. *水土保持研究*, 2012, **19**(2): 267 – 270.  
GAO Yunfei, LI Zhiguang, YANG Shengtian, *et al.* Study on canopy density retrieval method from SPOT 5 [J]. *Res Soil Water Conserv*, 2012, **19**(2): 267 – 270.
- [4] 李擎, 王振锡, 王雅佩, 等. 基于 GF-2 号遥感影像的天山云杉林郁闭度估测研究[J]. *中南林业科技大学学报*, 2019, **39**(8): 48 – 54.  
LI Qing, WANG Zhenxi, WANG Yapei, *et al.* Study on canopy density inversion of *Picea schrenkiana* forest based on GF-2 remote sensing image [J]. *J Cent South Univ For Technol*, 2019, **39**(8): 48 – 54.
- [5] 李蕴雅. UAV/RS 3D 像对森林信息提取方法研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2016.  
LI Yunya. *Study on the Method of Extracting Forest Information from 3D UAV/RS*[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2016.
- [6] JONATHAN L, MARC P D, STÉPHANIE B, *et al.* A photogrammetric workflow for the creation of a forest canopy height model from small unmanned aerial system imagery [J]. *Forests*, 2013, **4**(4): 922 – 944.
- [7] DANDOIS J P, ELLIS E C. High spatial resolution three-dimensional mapping of vegetation spectral dynamics using computer vision [J]. *Remote Sensing Environ*, 2013, **136**(5): 259 – 276.
- [8] 李丹, 张俊杰, 赵梦溪. 基于 FCM 和分水岭算法的无人机影像中林分因子提取[J]. *林业科学*, 2019, **55**(5): 180 – 187.  
LI Dan, ZHANG Junjie, ZHAO Mengxi. Extraction of stand factors in UAV image based on FCM and watershed algorithm [J]. *Sci Silv Sin*, 2019, **55**(5): 180 – 187.
- [9] 苏迪, 高心丹. 基于无人机航测数据的森林郁闭度和蓄积量估测[J]. *林业工程学报*, 2020, **5**(1): 156 – 163.  
SU Di, GAO Xindan. Estimation of forest canopy density and stock volume based on UAV aerial survey Data [J]. *J For Eng*, 2020, **5**(1): 156 – 163.
- [10] 汪霖. 基于无人机高分影像的森林参数估测方法[D]. 南京: 南京林业大学, 2020.  
WANG Lin. *Estimation Method of Forest Parameters based on UAV High Resolution Image*[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2020.
- [11] 申景昕, 范少辉, 刘广路, 等. 毛竹林采伐林窗近地层温度时空分布特征[J]. *生态学杂志*, 2020, **39**(11): 3549 – 3557.  
SHEN Jingxin, FAN Shaohui, LIU Guanglu, *et al.* Spatiotemporal distribution characteristics of temperature on the surface layer of cutting gap of *Phyllostachys edulis* forest [J]. *Chin J Ecol*, 2020, **39**(11): 3549 – 3557.
- [12] 宋庆妮, 杨清培, 刘骏, 等. 毛竹扩张对常绿阔叶林土壤氮素矿化及有效性的影响[J]. *应用生态学报*, 2013, **24**(2): 338 – 344.  
SONG Qingni, YANG Qingpei, LIU Jun, *et al.* Effects of *Phyllostachys edulis* expansion on soil nitrogen mineralization and its availability in evergreen broadleaf forest [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2013, **24**(2): 338 – 344.
- [13] 杨清培, 杨光耀, 宋庆妮, 等. 竹子扩张生态学研究: 过程、后效与机制[J]. *植物生态学报*, 2015, **39**(1): 110 – 124.  
YANG Qingpei, YANG Guangyao, SONG Qingni, *et al.* Ecological studies on bamboo expansion: process, consequence

- and mechanism [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2015, **39**(1): 110 – 124.
- [14] 孙晓艳, 杜华强, 韩凝, 等. 面向对象多尺度分割的 SPOT 5 影像毛竹林专题信息提取[J]. 林业科学, 2013, **49**(10): 80 – 87.
- SUN Xiaoyan, DU Huaqiang, HAN Ning, *et al.* Multi-Scale segmentation, object-based extraction of Moso bamboo forest from SPOT 5 imagery [J]. *Sci Silv Sin*, 2013, **49**(10): 80 – 87.
- [15] 赵敏, 赵银娣. 面向对象的多特征分级 CVA 遥感影像变化检测[J]. 遥感学报, 2018, **22**(1): 119 – 131.
- ZHAO Min, ZHAO Yindi. Object-oriented and muti-feature hierarchical change detection based on CVA for high-resolution remote sensing imagery [J]. *J Remote Sensing*, 2018, **22**(1): 119 – 131.
- [16] 黄慧萍, 吴炳方. 地物提取的多尺度特征遥感应用分析[J]. 遥感技术与应用, 2003(5): 276 – 281.
- HUANG Huiping, WU Bingfang. Analysis of the mutli-scale characteristics with objects extraction [J]. *Remote Sensing Technol Appl*, 2003(5): 276 – 281.
- [17] ADDINK E A, JONG S, PEBESMA E J. The importance of scale in object-based mapping of vegetation parameters with hyperspectral imagery [J]. *Photogramm Eng Remote Sensing*, 2007, **73**(8): 905 – 912.
- [18] DRĂGUȚ L, CSILLIK O, EISANK C, *et al.* Automated parameterisation for multi-scale image segmentation on multiple layers [J]. *ISPRS J Photogramm Remote Sensing*, 2014, **88**: 119 – 127.
- [19] 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]. *Sci Silv Sin*, 2019, **55**(11): 95 – 104.
- [20] PUREVDORJ T, TATEISHI R, ISHIYAMA T, *et al.* Relationships between percent vegetation cover and vegetation indices [J]. *Int J Remote Sensing*, 1998, **19**(18): 3519 – 3535.
- [21] 祁媛, 徐伟诚, 王林琳, 等. 基于无人机遥感影像的沙糖橘果树提取方法研究[J]. 华南农业大学学报, 2020, **41**(6): 126 – 133.
- QI Yuan, XU Weicheng, WANG Linlin, *et al.* Study on the extraction method of sugar tangerine fruit trees based on UAV remote sensing images [J]. *J South China Agric Univ*, 2020, **41**(6): 126 – 133.
- [22] MEYER G E, NETO J C. Verification of color vegetation indices for automated crop imaging applications [J]. *Comput Electron Agric*, 2008, **63**(2): 282 – 293.
- [23] 汪小钦, 王苗苗, 王绍强, 等. 基于可见光波段无人机遥感的植被信息提取[J]. 农业工程学报, 2015, **31**(5): 152 – 159.
- WANG Xiaoqin, WANG Miaomiao, WANG Shaoqiang, *et al.* Extraction of vegetation information from visible unmanned aerial vehicle images [J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2015, **31**(5): 152 – 159.
- [24] 陈时跃. 基于无人机可见光影像的郁闭山地杉木人工林的单木与林分结构参数提取[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2020.
- CHEN Shiyue. *Extraction of Individual Tree and Stand Structure Parameters based on RGB Images UVA in Closed Canopy Mountainous Forest* [D]. Hangzhou: Zhejiang A&F University, 2020.
- [25] 汪霖, 李明阳, 方子涵, 等. 基于无人机数据的人工林森林参数估测[J]. 林业资源管理, 2019(5): 61 – 67.
- WANG Lin, LI Mingyang, FANG Zihan, *et al.* Plantation forest parameter estimation based on UAV data [J]. *For Resour Manage*, 2019(5): 61 – 67.
- [26] 智献坡, 李明泽, 于颖, 等. 应用 4-scale 模型对人工针叶林郁闭度的反演[J]. 东北林业大学学报, 2020, **48**(12): 5 – 11.
- ZHI Xianpo, LI Mingze, YU Ying, *et al.* Artificial coniferous forest remote sensing by using geometric optical model [J]. *J Northeast For Univ*, 2020, **48**(12): 5 – 11.
- [27] 刘赛赛, 陈冬花, 栗旭升, 等. 基于高分一号 PMS 的新疆落叶松林分郁闭度遥感定量估测[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2020, **48**(7): 57 – 66.
- LIU Saisai, CHEN Donghua, LI Xusheng, *et al.* Quantitative estimation of stand closure density of *Larix sibirica* by remote sensing based on GF-1 PMS [J]. *J Northwest A&F Univ Nat Sci Ed*, 2020, **48**(7): 57 – 66.
- [28] 严羽. 基于无人机的林分郁闭度和树高估测研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2019.
- YAN Yu. *Estimation of Canopy Density and Tree Height Based on UAV* [D]. Hangzhou: Zhejiang A&F University, 2019.