doi:10.3969/j.issn.1671-3168.2025.06.001

基于 UAV 遥感的林分平均胸径估测模型研究

张玉薇[1],卢腾飞[2]
(1.云南省林业调查规划院生态分院,云南 昆明 650031;2.云南省林业调查规划院,云南 昆明 650051)

摘要:林分平均胸径是森林资源调查中重要的因子之一。传统的林分平均胸径是通过直接测量单木胸径,利用公式计算得到,调查工作成本高。以云南松为研究对象,基于无人机遥感影像提取单木冠幅,建立单木胸径模型,在单木胸径模型基础上计算林分平均胸径(D_{g1});此外,基于提取的单木冠幅和树冠面积,计算标准地平均冠幅和树冠面积,建立林分胸径模型,并计算林分平均胸径(D_{g2})。计算结果,基于单木胸径建模结果获取的林分平均胸径(D_{g1})的平均绝对误差为 1.6 cm,绝对相对误差平均值为 7.02%;基于林分平均参数的建模结果获取的林分平均胸径(D_{g2})平均绝对误差为 1.4 cm,绝对相对误差平均值为 6.72%。研究结果表明,利用无人机遥感影像数据估算云南松林分平均胸径具有可行性,基于林分平均参数的平均胸径估算模型具有一定精度保证和实践意义。

关键词:林分平均胸径;估测模型;无人机(UAV)遥感;单木分割

中图分类号:S758.55;S711;S771.8 **文献标识码**:A **文章编号**:1671-3168(2025)06-0001-09

引文格式:张玉薇,卢腾飞. 基于 UAV 遥感的林分平均胸径估测模型研究[J]. 林业调查规划,2025,50(6):1-9,14. doi:10.3969/j.issn.1671-3168.2025.06.001

ZHANG Yuwei, LU Tengfei. Estimation Model of Stand Average DBH Based on UAV Remote Sensing[J]. Forest Inventory and Planning, 2025, 50(6): 1-9,14. doi:10.3969/j.issn.1671-3168.2025.06.001

Estimation Model of Stand Average DBH Based on UAV Remote Sensing

ZHANG Yuwei[1], LU Tengfei[2]
(1. Ecology Branch of Yunnan Institute of Forest Inventory and Planning, Kunming 650031, China;
2. Yunnan Institute of Forest Inventory and Planning, Kunming 650051, China)

Abstract: The average DBH of forest stand is one of the important factors in forest resource surveys. The traditional stand average DBH is calculated by directly measuring the DBH of individual tree and using a formula, which is expensive to investigate. *Pinus yunnanensis* as the research object, the crown width of individual tree was extracted based on the UAV remote sensing image, and the DBH model of individual tree was established, and the average DBH (D_{g1}) of the stand was calculated on the basis of the DBH model of individual tree. In addition, based on the extracted individual tree crown width and canopy area, the average crown width and canopy area of the standard plot were calculated, the stand DBH model was established, and the stand DBH (D_{g2}) was calculated. The results showed that the average absolute error of the stand DBH (D_{g1}) obtained based on the DBH modeling results of individual tree was 1.6 cm, and the average absolute relative error was 7.02%. Based on the modeling results of stand average pa-

收稿日期:2024-07-30;**修回日期**:2024-09-05

第一作者:张玉薇(1997-),女,硕士,助理工程师. 从事林业资源监测工作. Email:765279112@qq.com

责任作者:卢腾飞(1993-),男,硕士,工程师. 从事林业定量遥感研究工作. Email:lutf1008@163.com

rameters, the mean absolute error of stand mean DBH (D_{g2}) was 1.4 cm, and the average absolute relative error was 6.72%. The results proves that it is feasible to estimate the average DBH of *Pinus yunnanensis* stand based on UAV remote sensing image data, and the average DBH estimation model based on average stand parameters has certain accuracy guarantee and practical significance.

Key words: stand average DBH; estimation model; UAV remote sensing; individual tree segmentation

林分平均胸径是反映林木粗度的指标,是森林资源调查中的重要因子之一,林分直径在同龄林和异龄林中存在不同的分布类型[1]。在同龄林中,林分直径一般呈正态分布;在异龄林中,林分直径在幼龄林时呈截尾倒"J"形分布,近熟林时呈钟形分布,成过熟林时呈双峰形分布[2]。传统的林分平均胸径是通过直接测量林分内的单木胸径,在此基础上通过计算得到。而基于遥感提取林分胸径的大部分研究是通过提取立地条件建模得到。云南松(*Pinus yunnanensis*)是我国西南地区荒山造林的先锋树种和主要树种之一[3-4],经济价值高,适应能力强。对云南的经济、社会和环境可持续发展具有重要作用[5]。但是,我国西南地区海拔较高,交通不便,传统的森林资源调查工作成本高,数据获取周期长且受人为操作的影响较大[6]。近年来,随着遥感技术的发展,结合高分辨率的遥感影像数据对单木信息进行自动提取的研究成为学者的研究热点。徐永胜[7]基于哈尔滨樟子松标准地采用改进分水岭算法提取单木冠幅,冠幅平均提取精度为79.84%。WU[8]基于针叶林的空中激光雷达数据,采用局部轮廓树法对单木树冠进行分割,结果表明,研究区域单木树冠分割的总体准确率高达94.21%,分割效果理想。

我国在胸径反演模型方面的研究起步相对较晚[9],在建立胸径估算模型中通常以树高和冠幅为自变量,以胸径为因变量[10-11],主要采用常见的数学模型为幂函数模型、对数函数模型、指数函数模型、三角函数模型和多项式模型等。CHEN 等[12]基于机载激光雷达获取林分树高,通过仿真波形建立树高模型,证明了基于机载激光雷达估测林分树高的可行性。娄明华[13]以天然栎类阔叶混交林为研究对象,利用4期连续清查固定样地数据构建林分平均高与林分平均胸径回归模型,提出了最适宜林分平均高与平均胸径的关系模型。夏洪涛[14]在传统的树高—胸径模型中加入立地条件变量后显著提高了杉木树高—胸径模型的预测效果。何游云[15]以冷杉为研究对象,基于无人机遥感影像分割提取单木冠幅,结果表明,提取的单木冠幅与实测胸径值具有非线性关系,所建立的模型均拟合较好,R^2 较高。证明利用无人机获取的遥感影像通过提取冠幅估算胸径值是可行的。

目前基于无人机(UAV)遥感估算胸径模型在单木尺度上的研究较多,而在林分尺度上的研究相对欠缺,建立相关模型估算林分平均胸径,受到了学者关注,具有重要的实践意义。本研究提出遥感与传统手段相结合的两种估算林分胸径方法,建立回归模型,证明无人机遥感影像数据估算云南松林分平均胸径的可行性,旨在为今后林业无人机遥感技术广泛应用于森林资源调查领域提供方法借鉴。

1 研究区概况

研究区位于云南省富民县罗免乡境内,地处云南省中部,地理坐标为102°28′~102°30′E,25°22′~25°23′N,总面积约750 hm^2。呈北高南低地势,土壤类型为红壤,平均坡度为9°。当地气候为典型的低纬度亚热带高原季风气候,年均降水量708.2 mm,年均温16.8℃。研究区森林植被以云南松天然纯林为主,研究区地理位置如图1所示。

2 研究方法

以53个25 m×25 m的云南松纯林标准地为研究对象,从两个角度计算林分平均胸径:通过标记分水岭分割算法[16-17]进行单木分割,提取各标准地的单木冠幅和树冠面积,建立单木胸径模型,基于单木胸径模型计算林分平均胸径(D_{g1})。此外,基于提取的单木冠幅和树冠面积计算标准地平均冠幅和树冠面积,建立林分胸径模型,计算林分胸径(D_{g2})。最后计算出实测林分平均胸径(D_g)并进行精度验证,技术流程如图2所示。

2.1 标准地调查

采用典型选样方法,于2020年6—7月在研究区内具有代表性的地块设置实测标准地,共调查天然云南松纯林标准地53个、云南松样木790株,标准地规格为25 m×25 m,面积为625 m^2,形状为方形。

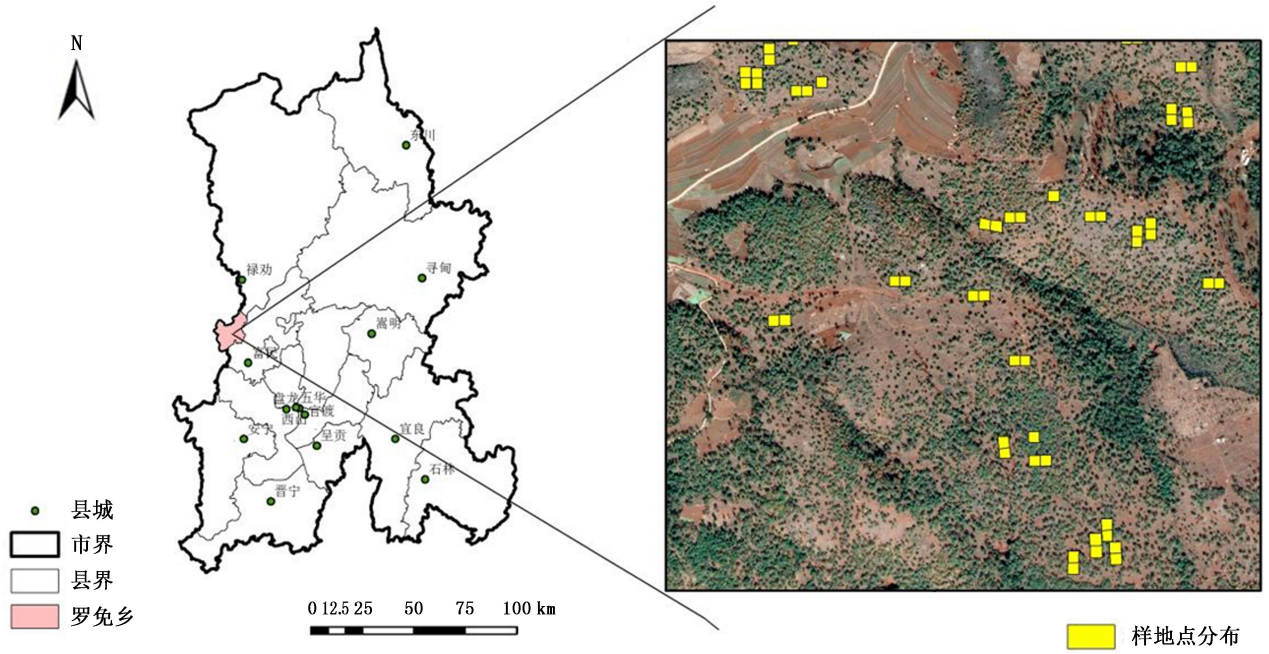

图 1　研究区位置

Fig. 1　Location map of the study area

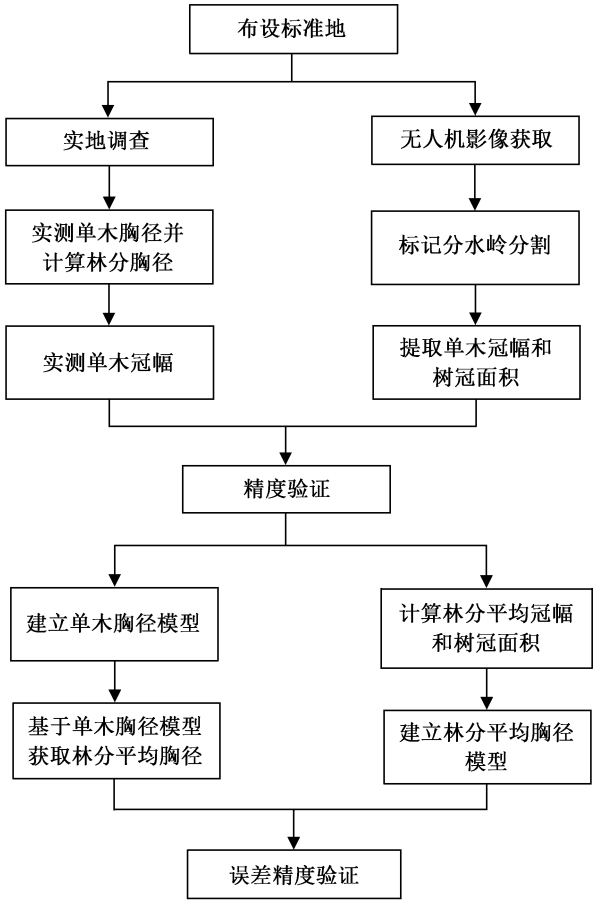

图 2　林分平均胸径估测技术流程

Fig. 2　Technical flowchart for estimating stand average DBH

对标准地内胸径 $D \geq 5.0$ cm 的所有活立木进行每木调查,用皮尺测量每木最长和最短冠幅(水平直径);用胸径尺测量每木的上坡位胸径。

林木冠幅(CW_f)取最大冠幅(CW_{f1})与最小冠幅(CW_{f2})的平均值,计算公式为:

$$CW_f = \frac{CW_{f1} + CW_{f2}}{2} \tag{1}$$

将林木冠幅看作为一个椭圆,最大冠幅(CW_{f1})和最小冠幅(CW_{f2})看作椭圆的长轴和短轴,实测冠幅面积(CA_f),计算公式为:

$$CA_f = \pi \times \frac{CW_{f1}}{2} \times \frac{CW_{f2}}{2} \tag{2}$$

2.2　无人机影像数据采集与处理

无人机航测与地面调查同期开展。采用大疆 PHANTOM 4 PRO 无人机,利用 DJI GS Pro 地面站控制系统对各标准地进行无人机图像采集时,统一设置飞行高度为 50 m(仿地飞行),飞行速度为 2.5 m/s,主航线内重叠区域重叠度为 90%,主航线间重叠区域重叠度为 80%,云台俯冲角度为-90°(垂直摄影),由 DJI GS Pro 自动规划作业航线。

将采集的无人机图像采用 Pix4Dmapper 进行预处理,主要步骤为:

1)在软件中导入筛选出的合格影像和控制点,影像自动获取相关信息;

2)根据要求设置选项参数,进行全自动处理和空三加密,生成 DSM 和 DOM;

3)输出正射影像图、数字表面模型 DSM、数字地形模型 DTM。

据精度报告得出,相对地理定位和校准影像的相对地理误差百分比区间为[-2,2],地理位置平均精度为 99.8%。

2.3 基于无人机影像提取单木冠幅

利用 Pix4Dmapper 软件对无人机原始影像进行全自动处理,以野外实测控制点为基准,拼接生成 DOM、DTM 和 DSM 影像(处理后精度可达到 0.27),并计算得出 CHM;最后采用标记分水岭算法对 CHM 进行分割,自动提取单木冠幅(CW)和树冠面积(CA),并进行精度评价。

标记分水岭即通过增加一个阈值对梯度函数进行标记,减小灰度值变化而引起的过度分割,标记分水岭的计算公式为:

$$g(x,y)=\max(\mathrm{grad}(f(x,y)),g\theta) \tag{3}$$

式中:$g\theta$ 为阈值。

标记分水岭分割方法的难点在于对树冠顶点和树冠轮廓的正确识别。本研究使用基于标记树梢控制分水岭算法对图像进行形态学调整,以此消除来自背景不规则的局部极小值点的干扰,最后对标记后的图像进行分水岭分割。

利用准确率(P_d)、召回率(P_r)和 F 测度进行单木冠幅提取精度评价。准确率指正确分割的树冠个数占所有分割树冠个数的比例;召回率指正确分割的树冠占参考树冠数的比例;F 测度是对准确率和召回率的综合描述,F 测度越高表示结果越好,计算公式为:

$$P_d=\frac{N_c}{N_d}\times 100\% \tag{4}$$

$$P_r=\frac{N_c}{N_r}\times 100\% \tag{5}$$

$$F=\frac{2P_r\times P_d}{P_r+P_d}\times 100\% \tag{6}$$

式中:N_c 为分割正确的树冠数目;N_d 为分割的树冠总数;N_r 为参考树冠总数。

2.4 建立单木胸径估测模型

从所有样本中随机选取 80%的单木(即 632 株云南松)作为建模数据,建立林分平均参数估算模型,其余的 20%单木(即 158 株云南松)用于模型精度检验。以冠幅(CW)和树冠面积(CA)为自变量,胸径(DBH)为因变量构建单木胸径拟合模型,并对模型进行精度验证。

模型估算精度以绝对误差及绝对相对误差体现,计算公式为:

$$\varepsilon=|D_{g'}-D_g| \tag{7}$$

$$\delta=\frac{|D_{g'}-D_g|}{D_{g'}}\times 100\% \tag{8}$$

式中:ε 为绝对误差;δ 为绝对相对误差;D_g 为实测单木胸径值;$D_{g'}$ 为本研究计算的单木胸径。

2.5 计算林分树冠平均参数

林分冠幅平均值能反映该林分内冠幅的总体平均状况,本研究以标准地内林木冠幅的算术平均数表示。实测的标准地冠幅平均值和基于无人机影像提取的标准地冠幅平均值分别以 AvgCW 和 $\mathrm{AvgCW_1}$ 表示,计算公式为:

$$\mathrm{AvgCW}=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\mathrm{CW}_i \tag{9}$$

$$\mathrm{AvgCW_1}=\frac{1}{N_1}\sum_{i=1}^{N_1}\mathrm{CW}_{1i} \tag{10}$$

式中:CW_i 为标准地内第 i 株林木的实测冠幅值;CW_{1i} 为标准地内第 i 株林木的算法自动提取冠幅值;N 为标准地内实测林木株数;N_1 为标准地内基于无人机影像自动提取的林木株数。

林分树冠面积平均值是林分内林木冠幅的算术平均数。实测的标准地树冠面积平均值和基于无人机影像自动提取的标准地树冠面积平均值分别以 AvgCA 和 $\mathrm{AvgCA_1}$ 表示,计算公式为:

$$\mathrm{AvgCA}=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\mathrm{CA}_i \tag{11}$$

$$\mathrm{AvgCA_1}=\frac{1}{N_1}\sum_{i=1}^{N_1}\mathrm{CA}_{1i} \tag{12}$$

式中:CA_i 为标准地内第 i 株林木的实测树冠面积;CW_{1i} 为标准地内第 i 株林木的自动提取树冠面积;N 为标准地内实测林木株数;N_1 为标准地内基于无人机影像自动提取的林木株数。

2.6 林分平均胸径估测模型研究

林分平均胸径是林分平均断面积所对应的直径,以 D_g 表示。林分平均胸径是标准地内所有林木胸径平方的平均数,计算公式为:

$$D_g=\sqrt{\frac{4}{\pi}\bar{g}}=\sqrt{\frac{4}{\pi}\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}g_i}=\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}d_i^2} \tag{13}$$

式中:$\bar{g}$ 为林分平均断面积;N 为林分内林木总株数;g_i 为第 i 株林木断面积;d_i 为第 i 株林木胸径。

2.6.1 基于单木胸径模型计算林分平均胸径

将单木冠幅和单木树冠面积代入单木胸径估算

模型,计算单木胸径,在此基础上计算林分平均胸径,计算公式为:

$$D_{g1} = \sqrt{\frac{1}{N_1}\sum_{i=1}^{N_1} d_{i1}^2} \tag{14}$$

式中:D_{g1} 为基于无人机影像提取数据拟合模型的林分平均胸径;N_1 为基于无人机影像自动提取的林木株数;d_{i1} 为第 i 株基于无人机影像自动提取的林木胸径。

2.6.2 基于林分平均参数拟合林分平均胸径模型

从所有标准地中随机选取 80%的标准地(即 42 个标准地)作为建模数据,建立林分平均参数估算模型,其余 20%的标准地(即 11 个标准地)用于模型精度检验。以林分平均冠幅(AvgCW)、平均树冠面积(AvgCA)为自变量,平均胸径(D_g)为因变量构建林分平均胸径拟合模型并对模型进行精度验证。

3 结果分析

3.1 单木分割提取

将单木树冠分割情况分为匹配、接近匹配、漏分、错分和合并 5 种(图 3)。

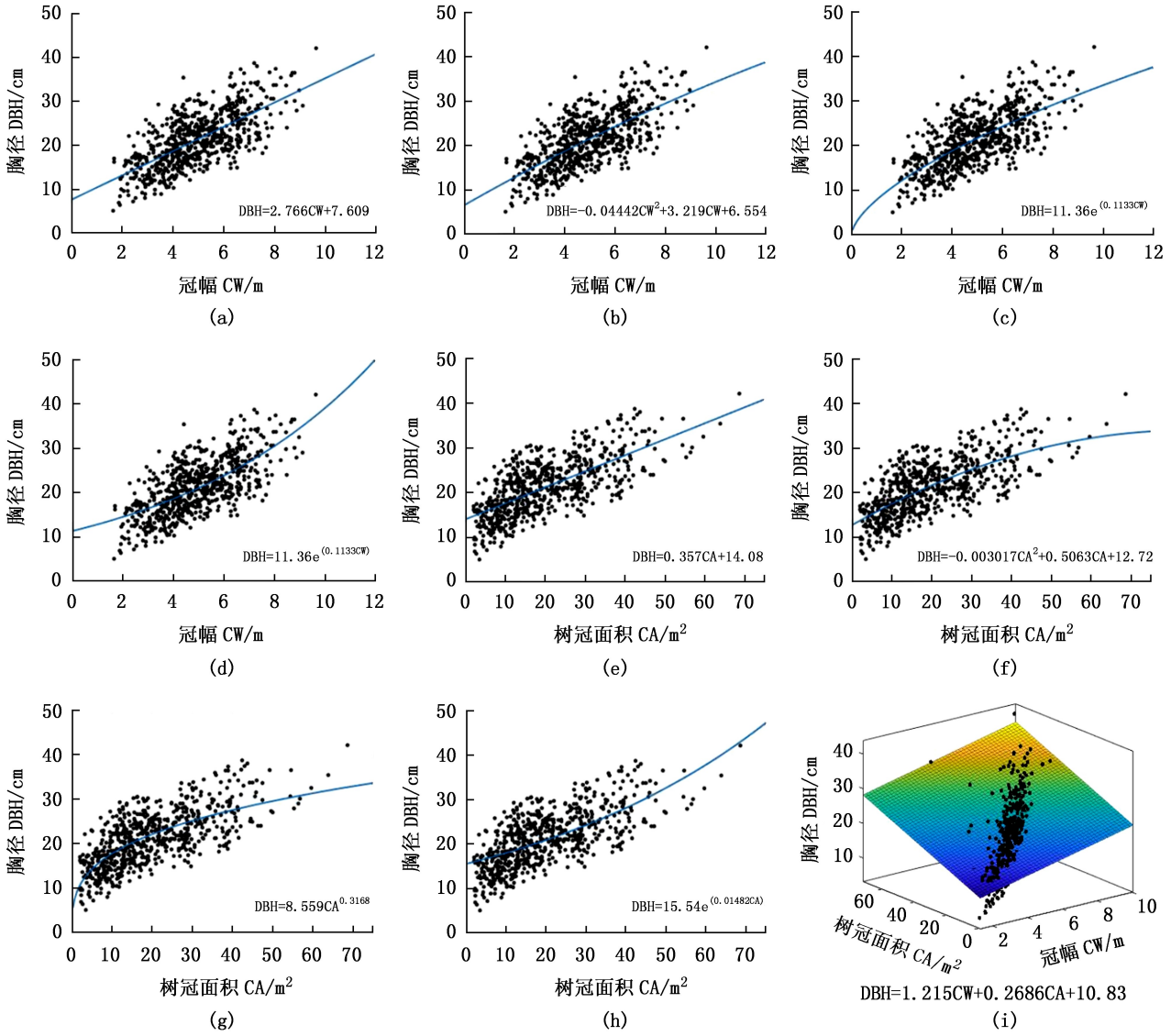

图 3　单木胸径拟合模型

Fig. 3　Fitting model of individual tree DBH

匹配即分割树冠与参考树冠的重叠面积占双方的 50%以上;接近匹配即重叠面积占其中一方的 50%;漏分即参考树冠的 50%面积内无分割树冠;合并即分割树冠中包括多个参考树冠;当分割树冠不

存在对应的参考树冠则为错分。正确分割包括匹配以及接近匹配,漏分误差包括漏分和合并,错分属于错分误差。标记分水岭分割结果如表1所示。

表1 基于标记分水岭的分割结果

Tab. 1 Marked watershed segmentation results

参考树冠总数	自动提取树冠数	正确分割数	匹配	相对匹配	漏分	合并	错分
790	749	662	316	346	41	57	30

参考树冠总数790个,提取树冠总数749个,正确分割数为662个,漏分数为41个,合并数为57个,错分数为30个。

3.2 单木胸径估测模型

3.2.1 相关性分析

首先对790个样本的冠幅、树冠面积和胸径进行皮尔森相关性分析,结果表明,树冠面积与胸径的皮尔森相关性为0.620,冠幅与胸径值的皮尔森相关性为0.590,且均为极显著,说明胸径与树冠面积、冠幅具有较强的相关性。

3.2.2 单木胸径模型

建立冠幅—胸径模型(CW-DBH)、树冠面积—胸径模型(CA-DBH)和冠幅与树冠面积—胸径模型(CW&CA-DBH),拟合结果如图3和表2所示。根据决定系数R^2和均方根误差(RMSE)最大为最优模型原则,拟合效果最好的为冠幅与树冠面积—胸径模型(CW&CA-DBH),R^2为0.541,RMSE为3.801。

3.3 林分树冠平均参数计算结果

以标准地为单位,在标记分水岭算法提取的单木冠幅和树冠面积的基础上,计算林分平均冠幅和林分平均树冠面积。结果表明,标记分水岭算法的林分平均冠幅最大值为6.97 m,最小值为3.85 m,平均值为5.04 m;林分平均树冠面积最大值为39.34 m^2,最小值为12.18 m^2,平均值为20.92 m^2。

3.4 林分平均胸径模型

3.4.1 相关性分析

对53个标准地的林分平均冠幅(AvgCW)、平均树冠面积(AvgCA)和平均胸径(D_g)进行皮尔森相关性分析,分析各参数之间的相关密切程度。结果表明,林分平均树冠面积与平均胸径值的皮尔森相关性为0.534,冠幅与平均胸径值的皮尔森相关性为0.507,均为相关极显著,说明林分平均胸径与林分树冠面积和林分冠幅存在较强的相关性。

表2 单木胸径拟合模型

Tab. 2 Fitting model of individual tree DBH

类型	表达式	决定系数(R^2)	均方根误差(RMSE)
CW-DBH	$DBH=2.766CW+7.609$	0.465	4.473
	$DBH=-0.04442CW^2+3.219CW+6.554$	0.468	4.375
	$DBH=7.853CW^{0.6308}$	0.464	4.472
	$DBH=11.36e^{(0.1133CW)}$	0.454	4.511
CA-DBH	$DBH=0.357CA+14.08$	0.478	4.412
	$DBH=-0.003017CA^2+0.5063CA+12.72$	0.486	4.381
	$DBH=8.559CA^{0.3168}$	0.459	4.365
	$DBH=15.54e^{(0.01482CA)}$	0.457	4.499
CW&CA-DBH	$DBH=1.215CW+0.2686CA+10.83$	0.541	3.801

3.4.2 计算林分平均胸径

计算在研究区内选取的53个标准地的平均胸径,实测标准地平均胸径分布范围为17.3~32.8 cm,平均值为22.6 cm。

1)基于单木胸径模型计算的平均胸径,其分布范围为17.8~29.8 cm,平均值为22.5 cm。

2)基于林分平均参数拟合林分平均胸径模型,林分平均冠幅—平均胸径模型(AvgCW-D_g)、林分平均树冠面积—平均胸径模型(AvgCA-D_g)和林分平均冠幅与树冠面积—平均胸径模型(AvgCW&AvgCA-D_g)拟合结果如图4和表3所示,根据决定系数R^2和均方根误差(RMSE)最大为最优模型原则,拟合效果最好的为林分平均冠幅与树冠面积—平均胸径模型(AvgCW&AvgCA-D_g),其R^2为0.608,RMSE为2.146。

4 精度评价

4.1 单木分割精度评价

标记分水岭算法单木分割精度如表4所示。准确率为88.38%,召回率为83.79%,F测度为85.93%。

4.2 单木胸径模型精度

将20%的单木(即158株云南松)作为验证样本,分别代入各模型中,计算胸径值,与实际测量胸径值相比较,计算误差。采用验证样本对冠幅—胸径模型(CW-DBH)、树冠面积—胸径模型(CA-DBH)和冠幅与树冠面积—胸径模型(CW&CA-DBH)进行检验(表5)。

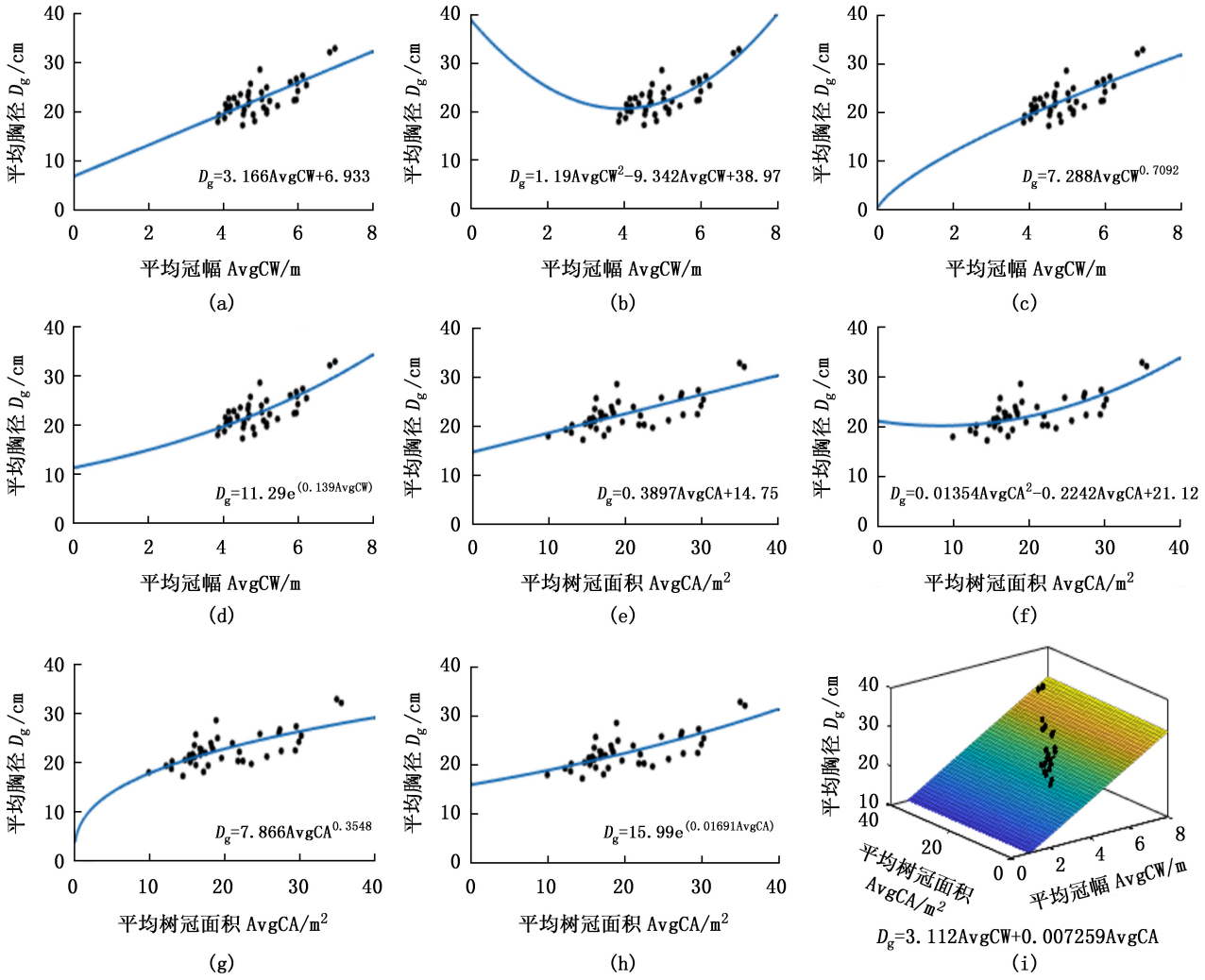

图 4　林分平均胸径拟合模型

Fig. 4　Fitting model of stand average DBH

表 3　林分平均胸径拟合模型

Tab. 3　Fitting model of stand average DBH

类型	表达式	决定系数(R^2)	均方根误差(RMSE)
AvgCW-D_g	D_g=3.166AvgCW+6.933	0.508	2.533
	D_g=1.19AvgCW^2-9.342AvgCW+38.97	0.542	2.473
	D_g=7.288AvgCW$^{0.7092}$	0.485	2.588
	D_g=11.29e$^{(0.139AvgCW)}$	0.523	2.493
AvgCA-D_g	D_g=0.3897AvgCA+14.75	0.543	2.439
	D_g=0.01354AvgCA^2-0.2242AvgCA+21.12	0.569	2.390
	D_g=7.866AvgCA$^{0.3548}$	0.539	2.348
	D_g=15.99e$^{(0.01691AvgCA)}$	0.566	2.376
AvgCW&AvgCA-D_g	D_g=3.112AvgCW+0.007259AvgCA+7.058	0.608	2.146

表 4　单木分割精度评价

Tab. 4　Evaluation of individual tree segmentation accuracy

准确率 P_d/%	召回率 P_r/%	F 测度/%
88.38	83.79	85.93

由表 5 检验结果表明,在拟合的各模型中,冠幅与树冠面积—胸径模型(CW&CA-DBH)验证胸径值误差最小,精度最高,其平均误差和平均相对误差为 0.90 cm 和 4.21%。

4.3 林分树冠平均参数精度

标记分水岭算法提取的平均冠幅的绝对误差平均值为 0.19 m,绝对相对误差平均值为 3.75%;平均树冠面积的绝对误差平均值为 1.18 m^2,绝对相对误差平均值为 5.73%。

表5　单木胸径模型精度验证

Tab. 5　Accuracy verification of DBH model of individual tree

类型	表达式	绝对误差平均值/cm	绝对相对误差平均值/%
CW-DBH	DBH=2.766CW+7.609	1.16	5.27
	DBH=-0.04442CW^2+3.219CW+6.554	1.03	4.90
	DBH=7.853CW$^{0.6308}$	1.26	6.16
	DBH=11.36e$^{(0.1133CW)}$	1.22	5.41
CA-DBH	DBH=0.357CA+14.08	1.03	4.76
	DBH=-0.003017CA^2+0.5063CA+12.72	0.95	4.50
	DBH=8.559CA$^{0.3168}$	1.02	4.69
	DBH=15.54e$^{(0.01482CA)}$	1.01	4.61
CW&CA-DBH	DBH=1.215CW+0.2686CA+10.83	0.90	4.21

4.4 基于林分平均参数拟合林分平均胸径模型精度

将20%的标准地(即11个标准地)作为验证样本,分别代入各模型中,计算胸径值,与实际测量胸径值进行对比,计算误差。

采用验证样本对林分平均冠幅—平均胸径模型(AvgCW-D_g)、林分平均树冠面积—平均胸径模型(AvgCA-D_g)和林分平均冠幅与树冠面积—平均胸径模型(AvgCW&AvgCA-D_g)进行检验(表6)。

表6　林分平均胸径模型精度验证

Tab. 6　Accuracy verification of stand average DBH model

类型	表达式	绝对误差平均值/cm	绝对相对误差平均值/%
AvgCW-D_g	D_g=3.166AvgCW+6.933	1.1	5.24
	D_g=1.19AvgCW^2-9.342AvgCW+38.97	1.1	4.57
	D_g=7.288AvgCW$^{0.7092}$	1.3	5.69
	D_g=11.29e$^{(0.139AvgCW)}$	1.1	4.94
AvgCA-D_g	D_g=0.3897AvgCA+14.75	1.1	4.52
	D_g=0.01354AvgCA^2-0.2242AvgCA+21.12	1.0	4.21
	D_g=7.866AvgCA$^{0.3548}$	1.1	4.61
	D_g=15.99e$^{(0.01691AvgCA)}$	1.0	4.28
AvgCW&AvgCA-D_g	Dg=3.112AvgCW+0.007259AvgCA+7.058	1.0	4.14

由表6验证结果表明,在拟合的各模型中,林分平均冠幅与树冠面积—平均胸径模型(AvgCW&AvgCA-D_g)验证胸径值误差最小,精度最高,其平均误差和平均相对误差为1.0 cm和4.14%。

4.5 林分平均胸径精度评价

将基于单木胸径建模结果获取的林分平均胸径和基于林分平均参数的建模结果获取的林分平均胸径分别与实测标准地平均胸径进行对比,进行精度验证(图5,图6,表7)。

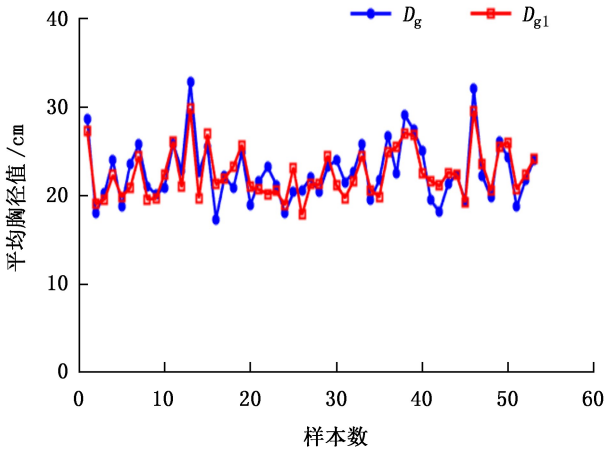

图5　基于单木胸径建模结果获取的林分平均胸径精度验证

Fig. 5　Accuracy verification of stand average DBH based on the DBH modeling results of individual tree

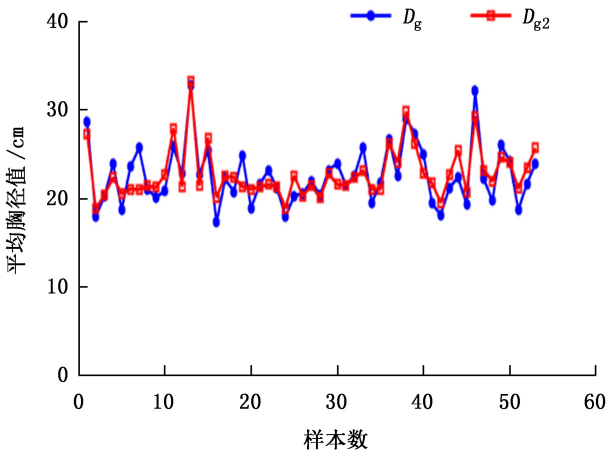

图6　基于林分平均参数建模结果获取的林分平均胸径精度验证

Fig. 6　Accuracy verification of stand average DBH based on the modeling results of the average stand parameters

表 7　林分平均胸径精度验证

Tab. 7　Accuracy verification of stand average DBH

来源	类型	最大值	最小值	平均值
基于单木胸径建模结果获取的林分平均胸径(D_{g1})	绝对误差/cm	3.90	0.00	1.60
	绝对相对误差/%	18.52	0.07	7.02
基于林分平均参数建模结果获取的林分平均胸径(D_{g2})	绝对误差/cm	4.70	0.00	1.40
	绝对相对误差/%	18.65	0.00	6.72

由图 5、图 6 和表 7 可知,基于单木胸径建模结果获取的林分平均胸径(D_{g1})的绝对误差平均值为 1.6 cm,绝对相对误差平均值为 7.02%;基于林分平均参数建模结果获取的林分平均胸径(D_{g2})的绝对误差平均值为 1.4 cm,绝对相对误差平均值为 6.72%,与基于单木胸径建模结果获取的林分平均胸径相比,基于林分平均参数建模结果获取的林分平均胸径的精度更高,说明基于林分平均参数的林分平均胸径估算模型具有一定精度保证和实践意义。

5 结论与讨论

标记分水岭算法与金忠明[18]提出的基于 U-Net 和标记控制分水岭的分割算法相比,准确率提高了 8.93%。无人机可见光传感器仅包含 R、G、B 波段,为更好地提取树冠信息,未来可增设可见光近红外传感器,计算归一化植被指数(NDVI),更准确地提取树冠区域。同时,在本研究中未考虑成像几何和处理精度对结果的影响,今后可提高几何处理精度,减小影像拼接处理误差,更能准确提取单木树冠。在实际森林中,树冠重叠、乔灌交叉现象普遍存在,如何有效、精准地提取森林因子信息是当前林业无人机遥感应用于实践生产中的难点。

基于单木胸径建模结果获取的林分平均胸径的平均绝对误差为 1.6 cm,绝对相对误差平均值为 7.02%。利用标准地平均胸径与标记分水岭算法提取的标准地平均冠幅和树冠面积分别建立的模型中,林分平均冠幅与树冠面积—平均胸径模型(Avg CW&AvgCA-D_g)的验证胸径值误差最小,精度最高。其平均绝对误差为 1.4 cm,绝对相对误差平均值为 6.72%。与周润棺[19]运用多元线性回归,以林龄、郁闭度和单位面积株数为自变量进行的林分胸径估测(平均相对误差为 14.96%)相比,平均相对误差分别降低了 7.94%和 8.24%。与严刚[20]基于 pleiades 影像提取 8 个自变量,利用偏最小二乘回归法建立林分胸径的遥感估测模型相比,本研究提出的林分平均胸径估算模型精度更高。与基于林分平均参数建模获取的平均胸径相比,基于林分平均参数建模获取的平均胸径的精度更高,说明基于林分平均参数的林分平均胸径模型具有一定精度保证和实践意义

基于林分平均胸径估算模型的平均胸径与基于无人机影像自动提取数据获取的平均胸径相比,基于林分平均胸径估算模型的平均胸径的估测精度更高,其主要原因是基于单木胸径估算模型获取的林分平均胸径不仅存在单木提取误差,还存在模型误差,造成误差的积累和传递,导致估测精度降低。本研究提出的林分平均胸径估算模型的自变量虽然不同于其他研究,但仍取得了较高精度,对今后相关研究具有参考价值。

参考文献:

[1] OUZENNOU H, POTHIER D, RAULIER F. Adjustment of the age-height relationship for uneven-aged black spruce stands[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2008, 38(7): 2003-2012.

[2] MCCARTHY J W, WEETMAN G. Stand structure and development of an insect-mediated boreal forest landscape [J]. Forest Ecology and Management, 2007, 241(3): 101-114.

[3] 郑书绿,鲍雪纤,李莲芳,等. 激素浸种对云南松种子发芽期的胚轴和根长的影响[J]. 中南林业科技大学学报,2015,35(8):59-63,68.

[4] 吴征镒,朱彦承,姜汉侨. 云南植被[M]. 北京:科学出版社,1987.

[5] 段旭,李根前,李莲芳. 不同水分控制对云南松幼苗生长及生理特性的影响[J]. 种子,2013,32(3):75-78.

[6] 张玉薇,张超,王娟,等. 基于 UAV 遥感的单木冠幅提取及胸径估算模型研究[J]. 林业资源管理, 2021(3):67-75.

[7] 徐永胜,刘浩然,范伟伟,等. 基于分水岭算法的无人机不同飞行高度下林木冠幅提取研究[J]. 西北林学院学报,2021,36(3):197-202,259.

[8] WU B, YU B, WU Q. Individual tree crown delineation using localized contour tree method and airborne Li DAR data in coniferous forests [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2016, 52: 82-94.

(下转第 14 页)

参考文献:

[1] 林同龙. 杉木人工林近自然经营技术的应用效果研究[J]. 中南林业科技大学学报,2012,32(3):11-16.

[2] 钱越,李铁华,游美,等. 杉木保留密度对杉阔异龄复层林生长量及土壤理化性质的影响[J]. 湖南林业科技,2024,51(3):36-43.

[3] 周柏屹,孙麟均,吴鹏飞,等. 杉木大径材培育研究进展[J]. 世界林业研究,2024,37(1):54-58.

[4] 李光强. 杉木樟树混交比例对林分生长及土壤养分含量的影响[J]. 湖南林业科技,2023,50(6):25-29.

[5] 张大兴. 不同林分林下套种草珊瑚的生长对比分析[J]. 福建林业,2022(4):36-39.

[6] 张冰冰,万晓华,杨军钱,等. 不同凋落物质量对杉木人工林土壤微生物群落结构的影响[J]. 土壤学报,2021,58(4):1040-1049.

[7] 福建农林大学森林与资源系,福建林业学校. 杉木速生丰产林栽培技术规程:DB35/T 518—2003[S]. 福州:福建省质量技术监督局,2003.

[8] 农辉林,陈秋芬,宁大玮. 杉木与红锥混交林生长量及混交比例的研究[J]. 中国林副特产,2022(1):32-34.

[9] 张超. 杉木皆伐更新杉木木荷混交林生长效益分析[J]. 福建林业科技,2023,50(4):44-47.

[10] 孙沉沉,王自强,潘畅,等. 杉木木荷混交对土壤养分和酶活性的影响[J]. 江西农业大学学报,2023,45(3):517-525.

[11] 钟祥顺. 杉木和枫香混交对杉木生长及土壤肥力的影响[J]. 福建林业,2022(4):40-43.

[12] 福建省林业调查规划院,福建省森林资源管理总站,福建农林大学. 主要树种二元立木材积表:DB35/T 1823—2019[S]. 福州:福建省市场监督管理局,2019.

[13] 国家林业局. 森林土壤分析方法:LY/T 1210~1275—1999[S]. 北京:中国标准出版社,1999.

[14] 国家林业局. 桉树丰产林经营技术规程:LY/T 2456—2015[S]. 北京:中国标准出版社,2015.

[15] 国家林业局. 火力楠培育技术规程:LY/T 2461—2015[S]. 北京:中国标准出版社,2015.

[16] 国家林业局. 红锥丰产栽培技术规程:LY/T 1946—2011[S]. 北京:中国标准出版社,2011.

责任编辑:杨竣焓

(上接第 9 页)

[9] 贾鹏刚. 基于无人机影像的单木参数提取与胸径反演研究[D]. 杭州:浙江农林大学,2019.

[10] 李珀任,潘懋,杜世宏. 一种基于标记分水岭的高分辨率遥感影像分割方法[J]. 地理与地理信息科学,2012,28(5):10-15.

[11] KALLIOVIRTA J,TOKOLA T. Functions for estimating stem diameter and tree age using tree height,crown width and existing stand database information[J]. Silva Fennica,2005,39(2):227-248.

[12] CHEN B W, LI, et al. Forest height estimation based on uav lidar simulated waveform[J]. Int Geosci Remote Se,2017(474):2859-2862.

[13] 娄明华,张会儒,雷相东,等. 天然栎类阔叶混交林林分平均高与平均胸径关系模型[J]. 北京林业大学学报,2020,42(9):37-50.

[14] 夏洪涛,郭晓斌,张珍,等. 基于不同立地质量评价指标的杉木大径材林分树高—胸径模型[J]. 中南林业科技大学学报,2023,43(10):80-88.

[15] 何游云,张玉波,李俊清,等. 利用无人机遥感测定岷江冷杉单木树干生物量[J]. 北京林业大学学报,2016,38(5):42-49.

[16] MEYER F, BEUCHER S. Morphological segmentation[J]. Journal of Visual Communication and Image Representation,1990,1(1):21-46.

[17] BEUCHER S,LANTUEJOUL C. Algorithms for watersheds in contour detection[C]//Workshop Image Processing Real-Time Edge and Motion Detetction,1979:391-396.

[18] 金忠明,曹姗姗,王蕾,等. 基于 U-Net 和分水岭算法的无人机单木树冠提取方法[J]. 西北林学院学报,2020,35(6):194-204.

[19] 周润恺. 基于多参数的林分胸径估测研究[D]. 杭州:浙江农林大学,2019.

[20] 严刚. 基于 pleiades 影像的川西南山地常绿阔林林分胸径、树高和冠幅的估测研究[D]. 成都:四川农业大学,2015.

责任编辑:许易琦