

王洋洋, 孙 伟, 贾永倩, 等. 利用智能手机图像无损快速估测荒漠灌木地上生物量——以梭梭为例[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(11): 171–174.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2017.11.047

利用智能手机图像无损快速估测荒漠灌木地上生物量——以梭梭为例

王洋洋¹, 孙 伟¹, 贾永倩², 石洪亮³

(1. 新疆农业大学计算机与信息工程学院, 新疆乌鲁木齐 830052; 2. 新疆农业大学林学与园艺学院, 新疆乌鲁木齐 830052;

3. 新疆农业大学农学院, 新疆乌鲁木齐 830052)

摘要:荒漠灌木是干旱区脆弱生态系统的重要组成部分, 其生物量至关重要, 但野外测量难度较大。以新疆生产建设兵团第六师 102 团区域内的荒漠灌木梭梭为例, 利用智能手机摄像头拍照并获取梭梭高度(H)、侧面宽度(D)、侧面像元面积(S)等参数, 建立基于这些参数组合的梭梭地上生物量拟合方程。结果表明, 侧面像元面积(S)与梭梭灌木的地上生物量密切相关, 呈正相关关系, 相关系数高达 0.949。经检验, 以梭梭灌木侧面照相面积(S)、侧面宽度(D)等为自变量建立回归模型, 可用来快速估测灌木地上生物量, 这为无损快速估测灌木地上生物量提高工作效率。

关键词:梭梭; 生物量; 数码相机; 无损估测; 荒漠灌木; 地上生物量; 野外调查; 信息获取效率

中图分类号: TP391.4; S126 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2017)11-0171-03

森林资源调查与监测是森林科学经营与管理的重要数据来源, 传统的森林资源调查方法多为人为调查, 分级上报的方法不但费时、费力, 而且可能所得数据具有一定的主观性, 存在一定程度的误差^[1]。自 20 世纪 80 年代以来, 随着网络技术、“3S”技术和物联网技术的逐步引进, 森林资源调查与监测技术在数据获取、处理与分析等方面有许多创新与发展^[2]。但是, 现阶段主要采用传统的地面调查结合“3S”技术以及计算模型等技术手段测定森林生物量, 且多聚集在乔木上, 对灌木林的相关研究较少^[3-6]。较乔木林野外调查与测量, 灌木林的植株矮小、近地面分枝多、树冠距离地面近, 它的主要测树因子[如冠幅直径(C)、地径(D)和植株高度(H)等]获取难度偏大, 野外调查和室内数据处理的工作量都比较大, 不能直接照搬乔木林测量中较为成熟的测量手段和方法。因此, 寻求一种快速、有效、精准的森林资源调查和监测的方法具有一定意义。到目前为止, 国内外有一些学者做了相关研究, 例如 Sah 等通过以植株高度与冠幅直径平方的乘积为自变量来估测生物量, 取得了良好的效果^[7]; Damiran 等通过数码相机拍摄的图片获取灌木的叶面积值, 成功估测了灌木的生物量^[8]; Foroughbakhch 等在对墨西哥东北部的灌木研究时, 以灌木枝条的数量为自变量, 估算的灌木叶子生物量 R^2 值大部分在 0.8 以上, 尤其自变量是有规则形状的冠幅体积, 得到的结果较为理想^[9]; 李荣春等用数码相机拍摄大田玉米拔节和大喇叭口期的冠层图像, 提取的图像覆盖度 CC

与干物质积累量间极显著相关^[10]; 吴秀花等利用照相技术对枸杞地上生物量建立了拟合方程, 发现侧面照相面积与枸杞的生长状况密切相关^[11]; 苏占雄等利用数码拍照法对狼牙刺等灌木建立了生物量拟合方程, 估算精度较好^[12]。由此可见, 通过利用图像无破坏的估测灌木的生物量技术, 有效地开展野外调查是目前可行的方法。尽管这些学者对生物量估测模型进行了研究, 但吴秀花等在图像中读取标尺长度时会引进人为测量误差, 从而导致最后估测模型的结果也存在误差^[11-12]。因此, 本研究在前人研究的基础上, 通过利用智能手机摄影测量技术和图像分析技术对荒漠灌木生物量进行快速、无损、精准估测, 寻求一种适用于灌木林大面积野外调查的推广应用, 进而降低劳动强度和数据采集成本, 提高灌木林的信息获取效率, 提升森林生态系统资源数据采集的智能化水平。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于新疆生产建设兵团第六师, 地处天山东段北麓, 准噶尔盆地东南缘(43°31'16"~45°33'20"N, 86°07'30"~91°11'48"E), 属温带大陆性气候, 光照充足, 昼夜温差大, 气温变化剧烈, 降水量少; 最高气温 40~42℃, 最低气温 -38~-43℃, 年均降水量 200 mm; 海拔 420~610 m, 地势由东南向西北倾斜, 栽植的作物被列为新疆维吾尔自治区保护的有梭梭[*Haloxylon ammodendron* (C. A. Mey.) Bunge]、红柳(*Tamarix ramosissima*)、新疆阿魏(*Ferula sinkiangensis* K. M. Shen)、胡杨(*Populus euphratica*)、西伯利亚落叶松(*Larix sibirica* Ledeb)等, 这些植物都为荒漠固沙起到了十分重要的作用。

1.2 图像数据与地上生物量的获取

2015 年 9 月下旬, 在新疆生产建设兵团第六师 102 团内选择生长良好、地径集中在 1.5~10 cm 之间、高度在 3 m 以

收稿日期: 2016-03-12

基金项目: 新疆维吾尔自治区研究生科研创新项目(编号: XJGR12015087)。

作者简介: 王洋洋(1991—), 男, 吉林舒兰人, 硕士研究生, 研究方向为时空数据挖掘、嵌入式。E-mail: 694875779@qq.com。

通信作者: 孙 伟, 博士, 研究方向为林业 GIS 开发与应用和海量数据存储与智能分析。E-mail: maplesunw@163.com。

下、冠幅在 30 ~ 170 cm 范围之间、并能很好反映试验区内核梭实际生长状况的样本,样地设置为 30 m×50 m,随机布设 4 块样地,每块样地选取 10 株样木,共计 40 株样木。拍照前准备好白色背景布、手机(相机)、测量标杆,选择冠幅为东西面和南北面作为拍摄的侧面,以白色背景布作为植株的拍摄背景,拍照时保持背景布与地面垂直,同时在植株右侧树立 1 根 3 m 高的测量标杆,保持相机镜头和梭梭侧面垂直,调节相机与梭梭的水平距离,使相机中相片显示的最上端和最下端恰好与测量标杆的最高点和最低点重合,以保证最后拍摄照片的实际高度为 3 m,每株样本的东西面与南北面分别拍摄有效照片 2 张。

拍摄完成后,实地测量并记录每株梭梭的株高、地径、冠幅等数据,记录植株附近的环境要素,将梭梭地上部分全部收割并编号,带回实验室截成若干部分,置于真空干燥箱内,在 85 ℃ 恒温下烘干至恒质量,用精度为 1 g 的电子天平对每株样本分别称质量,逐一记录下干质量。

1.3 图像数据处理方法

应用 Adobe Photoshop CS6 电脑版软件处理图像,打开图像后,图像大小面板中显示的高度值(H_1)即为 3 m 测量标杆对应的像素大小,记录此时显示的 H_1 值,然后根据梭梭灌木植株图像的最大高度和宽度裁剪照片,调整曲线值,消除因拍摄角度等造成的背景白色差别,从而使梭梭灌木图像易于从白色背景中区分出来。记录此时图像大小面板中显示的宽度值 W 和高度值 H_2 ,根据公式(1)计算出梭梭的实际高度值(H),求得的数值单位为 cm;根据公式(2)计算出梭梭的实际宽度(D)的值。

$$H = \frac{300 \times H_2}{H_1}; \tag{1}$$

$$D = \frac{W \times H}{H_2}。 \tag{2}$$

在直方图中显示的像素大小就是整个矩形图像的像素,记为 P 。选择灌木图像时,经过多次试验,发现设置取样大小为 3×3 平均,容差设置为 80 时取样效果较好,可适当调整选区,此时直方图窗口中显示的像素值即为所选灌木图像的像素,记为 P_1 。每株灌木选取图片效果较好的正面($S_{正}$)与侧面($S_{侧}$)各 1 张,梭梭灌木植株的像元面积(S)可通过公式(3)、(4)、(5)计算:

$$S_{正} = \frac{\text{灌木图像的像素}(P_{1正}) \times \text{矩形的实际面积}(H \times D_{正})}{\text{矩形像素}(P_{正})}; \tag{3}$$

$$S_{侧} = \frac{\text{灌木图像的像素}(P_{1侧}) \times \text{矩形的实际面积}(H \times D_{侧})}{\text{矩形像素}(P_{侧})}; \tag{4}$$

$$S = \frac{S_{正} + S_{侧}}{2}。 \tag{5}$$

1.4 生物量模型构建

所有数据的统计和检验均采用 SPSS 19.0 和 Microsoft Excel 2010 软件进行。目前在估测乔木和灌木生物量的研究中拟合模型有一元线性函数、幂函数、指数函数等,但最为常见的模型是幂函数模型^[13-20]。

在 40 个样本中,选取其中 30 个作为建模样本,先将梭梭

地上生物量与不同自变量进行相关性分析,并根据分析结果,选出最佳的建模数据构建实测生物量与图像提取的参数构建生物量模型。用剩下的 10 个样本作为检验样本,利用检验数据预测每株灌木的地上生物量,并与实测值进行比较。采用常用的相关系数(r^2)、均方根差($RMSE$)对模型的估测值和实测值之间的符合度进行验证和评价,均方根差可用公式(6)计算。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}}。 \tag{6}$$

式中: y_i 和 \hat{y}_i 分别为实测值和估测值; n 为样本数。

2 结果与分析

2.1 实测梭梭地上生物量与不同自变量的相关性分析

对各个自变量分别与实测梭梭灌木生物量作相关性分析,结果如表 1 所示。由表 1 可见, H 、 S 、 D 、 D^2H 、 DH^2 、 DH 与实测梭梭地上生物量均有较好的相关性,以 S 与地上生物量的相关关系最好,相关系数达 0.949,且呈现正相关;其次是 D^2H ,相关系数为 0.945。

表 1 实测梭梭地上生物量与不同自变量的相关系数

自变量	与地上生物量的相关系数
H	0.669
S	0.949
D	0.921
DH^2	0.890
D^2H	0.945
DH	0.929

2.2 利用手机图像建立梭梭地上生物量估算模型

通过在不同拟合模型下估测生物量值进行比较,结果见表 2。由表 2 可知,以幂函数进行拟合效果最优, r^2 值都在 0.8 以上。因此,本研究中各参数下估测地上生物量均选择幂函数模型。

表 2 不同拟合模型下估测地上生物量的 r^2 值

模型参数	r^2 值				
	指数函数	线性函数	对数函数	多项式	幂函数
S	0.859 6	0.899 9	0.721 8	0.917 1	0.929 1
D	0.895 4	0.847 9	0.749 3	0.874 9	0.928 8
DH^2	0.719 2	0.792 7	0.601 1	0.792 8	0.801 7
D^2H	0.788 4	0.920 4	0.719 5	0.920 4	0.929 0
DH	0.846 2	0.862 7	0.671 4	0.885 2	0.882 2

由表 1 得出,梭梭地上生物量与 H 、 S 、 D 、 D^2H 、 DH 、 DH^2 有很理想的相关性,选取相关性较好的 S 、 D 、 D^2H 、 DH^2 、 DH 建立回归模型,结果(表 3)发现,以 S 为自变量建立的回归模型 r^2 值最高,为 0.929 1。

表 3 不同自变量下的地上生物量估测模型

自变量	回归方程	r^2 值	样本数	F 值	P 值
S	$y = 0.081x^{1.065\ 6}$	0.929 1	30	222.612	0.000
D	$y = 0.015\ 2x^{2.334\ 7}$	0.928 8	30	221.855	0.000
DH^2	$y = 0.004\ 9x^{0.83}$	0.801 7	30	68.738	0.000
D^2H	$y = 0.003\ 2x^{0.879\ 5}$	0.929 0	30	222.507	0.000
DH	$y = 0.002\ 9x^{1.315\ 7}$	0.882 2	30	127.363	0.000

2.3 手机图像估算地上生物量模型的检验

为了检验检测模型的合理性,有必要对所建模型进行精度检验。以 S (r^2 值最高) 为例,即以 S 为自变量估测模型进行梭梭地上生物量的反演,将未参加回归模型的 10 个检验样本数据代入模型,对地上生物量估测值和实测值的符合度进行检验,并绘制估测值和实测值的 1:1 比较图,其拟合优度指数为 0.902 8,结果如图 1 所示。

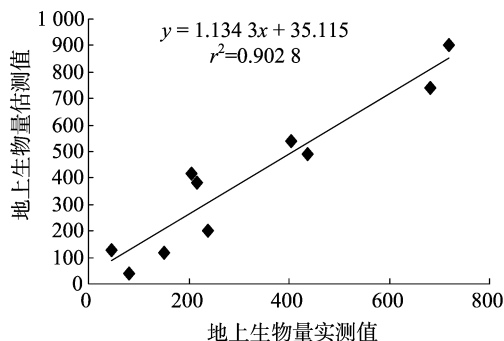


图1 以 S 为自变量建立的模型估测值与实测值的相关分析

2.4 实地测量与图像估测地上生物量的差别

为了检验本研究方法与实地测量值估测模型方法的差别,在采集的 40 个样本中,利用人工测量侧面宽度 (D)、高度 (H)、冠幅面积 (C) 等相关参数的建模方法,选择其中 30 个作为建模样本,由于人工测量值无法获取到侧面像元面积 (S) 值,所以不能利用 S 为自变量进行建模,用相关性分析结果较好的自变量建立回归模型,结果如表 4 所示。

表 4 实地测量值估测地上生物量模型

自变量	回归方程	r^2 值	样本数	F 值	P 值
D	$y = 0.0146x^{2.3401}$	0.9207	30	197.356	0.000
DH^2	$y = 0.0063x^{0.8133}$	0.8149	30	74.839	0.000
D^2H	$y = 0.0045x^{0.85}$	0.9275	30	217.578	0.000
DH	$y = 0.0046x^{1.267}$	0.8774	30	121.650	0.000
CH	$y = 0.0237x^{0.7699}$	0.7999	30	35.984	0.000

从表 4 中的 r^2 值可以看出,只有以 DH^2 为自变量建立模型的 r^2 值 (0.814 9) 高于利用图像提取 DH^2 为自变量建立模型的 r^2 值 (0.801 7),其他以 D 、 D^2H 、 DH 、 CH 为自变量建立的 r^2 值分别为 0.920 7、0.927 5、0.877 4、0.799 9,均不如手机图像估测生物量模型的 r^2 值高。使用未参加回归模型的 10 个样本进行验证,对地上生物量估测值和实测值的符合度进行检验,以 D 为自变量检验时,拟合优度指数为 0.861 2,以 D^2H 检验时,拟合优度指数为 0.884 9,以 DH^2 检验时,拟合优度指数为 0.811 6,以 DH 检验时,拟合优度指数为 0.852 5。通过实地测量方法得到的生物量估测模型相对误差值为 8.72% ~ 45.13%,相对平均误差为 14.31%。而利用手机图像提取的梭梭灌木像元面积 (S) 值为自变量进行拟合时,相对误差为 10.178% ~ 44.98%,相对平均误差为 13.26%,由此可见,利用图像提取出 S 值所建立的估测模型相对平均误差略低于以实地测量值所建立估测模型的相对平均误差。因此,以灌木像元面积 (S) 为自变量建立模型的方法是切实可行的,能够更准确、快速、无损估算梭梭灌木地上生物量。

3 结论与讨论

本研究以 40 株梭梭灌木地上生物量为例,利用幂函数构

建侧面像元面积 (S) 与梭梭灌木的地上生物量模型,对实地测量与图像估测地上生物量这 2 种方法进行详细的对比分析,得知图像估测方法能有效估测梭梭地上生物量,拟合效果比较接近。总体而言,本研究所选用图像估测几种方法的精度都相对较高,这与苏占雄等利用数码相机估算狼牙刺等灌木生物量模型中结论^[12]基本一致。

利用含有 S 的估测模型对梭梭地上生物量进行预测,估测值与实测值的相关系数为 0.902 8,可计算出梭梭灌木的地上生物量值,显示了利用手机图像估测单株梭梭灌木生物量的可行性。其方法新颖,数据获取速度快,能够实现无损测量,可解决传统人工目测和手工测量方法带来的误差,减少主观人为因素,节省人力、物力,也节约获取梭梭灌木地上生物量的时间,对于无损获取梭梭灌木这种国家二级保护植物的生物量来讲,具有很大的应用价值。

对于梭梭灌木的树冠距离地面较近、近地面分枝较多来说,植株的颜色与地面的颜色不易区分,在提取有效的拍照面积时须要进行深入的探究,林龄较大的植株较高,在梭梭生长密集的区域通过手机数码相机进行拍摄就较为困难,在下一步利用智能手机平台来处理图像时要克服智能手机无专门的图形加速器,需要计算量小、占用内存空间少的特性,这些问题都需要在今后的研究中进一步的探索。利用图像分析技术对荒漠灌木生物量进行无损快速估测,可以降低劳动强度和数据采集成本,提升森林生态系统资源数据采集的智能化水平,具有一定的实际意义。

参考文献:

- [1] 赵芳. 测树因子遥感获取方法研究[D]. 北京:北京林业大学,2014.
- [2] 乔永平. 森林资源产权场内交易分析——基于南方林业产权交易所的数据[J]. 江苏农业科学,2014,42(9):430-433.
- [3] 王远,王德建,张刚,等. 基于数码相机的水稻冠层图像分割及氮素营养诊断[J]. 农业工程学报,2012,28(17):131-136.
- [4] 白金顺,曹卫东,熊静,等. 应用数码相机进行绿肥翻压后春玉米氮素营养诊断和产量预测[J]. 光谱学与光谱分析,2013(12):3334-3338.
- [5] 张慧春,郑加强,周宏平. 精确林业 GPS 信标差分定位精度分析[J]. 农业工程学报,2011,27(7):210-214.
- [6] 贾彪. 基于计算机视觉技术的棉花长势监测系统构建[D]. 石河子:石河子大学,2014.
- [7] Sah J P, Ross M S, Koptur S, et al. Estimating aboveground biomass of broadleaved woody plants in the understory of Florida Keys pine forests[J]. Forest Ecology & Management, 2004, 203(1):319-329.
- [8] Damiran D, Delcurto T, Johnson D E, et al. Estimating shrub forage yield and utilization using a photographic technique[J]. Northwest Science, 2006, 80(4):259-263.
- [9] Foroughbakhch R R, Reyes G, Alvarado V A, et al. Use of quantitative methods to determine leaf biomass on 15 woody shrub species in northeastern Mexico[J]. Forest Ecology & Management, 2005, 216(1):359-366.
- [10] 李荣春,陶洪斌,张竹琴,等. 基于图像处理技术的夏玉米群体长势监测研究[J]. 玉米科学,2010(2):128-132.
- [11] 吴秀花,刘清泉,郭永盛,等. 基于照相技术的枸杞地上生物量模型研究[J]. 林业调查规划,2014,39(5):20-24.

姚巧鸽,夏银红. 基于邻域算法的农业害虫图像分割[J]. 江苏农业科学,2017,45(11):174-177.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2017.11.048

基于邻域算法的农业害虫图像分割

姚巧鸽¹, 夏银红²

(1. 黄淮学院信息工程学院,河南驻马店 463000; 2. 黄淮学院数学与统计学院,河南驻马店 463000)

摘要:针对分割农业害虫图像时不能区分相邻灰度值的问题,提出邻域算法。首先确定像素的邻域度,像素的邻域通过移除低于某一给定阈值的所有边并将所有相连的样本点作为域类而获得;然后采用基于关系权重方法区分邻域类别,从全局的角度衡量了每个特征项对所有类别的区分能力;接着基于可变聚类半径对像素数据排重,删除重复性数据;最后给出了算法流程。仿真试验结果表明,本研究算法分割农业害虫图像的效果清晰,消耗的时间较少。

关键词:邻域关系;像素;聚类;权重;农业害虫;图像分割

中图分类号: TP391.41 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2017)11-0174-04

农业生产中需要检查农产品中是否存在害虫,避免农业灾害的发生,在农业害虫的检测中图像背景复杂,害虫在图像中很难与背景分离^[1-2]。

传统的检测技术主要依赖于人眼,是农民自己对农产品的每个细节进行检查。但是检查环境往往很恶劣,同时受天气干扰,检查工作很难展开,利用计算机视觉处理代替人工检测成为了一种必然的发展趋势。目前使用的算法主要有以下几种,K均值算法(K-means)是基于划分的算法,只有农业图像数据聚类簇的平均值被定义的情况下才能使用,对噪声和孤立点数据敏感^[3];基于统计信息算法(statistical information grid, STING)将农业图像空间区域划分为矩形单元,单元中存储着预先计算的统计信息,可处理高维数据,但是检测质量取决于网格的粒度,由于聚类的边界是直线,检测质量较低^[4];基于动态模型的层次聚类算法(dynamic model hierarchical clustering, DMHC)不依赖于静态模型,适应被合并簇的内部特征,但是算法过于复杂,在每次判断子类的相似度时都

要做最小连接二等分^[5];基于密度与噪声应用的空间聚类算法(density-based spatial clustering of applications with noise, DBSCAN)对农业图像数据聚类中的每个对象通过连接区域划分为簇,但是对参数敏感,若没有采用空间索引,时间复杂度^[6];基于共享型邻居聚类算法(shared neighbor clustering, SNC)具有对输入样本的顺序不敏感、输入参数的邻域知识最小化等特点,但是存在孤立点的预处理不够,同时代表点的确过程不够全面^[7]。

本研究通过邻域算法(neighborhood relationship, NR)对农业害虫图像分割,首先确定像素邻域度,像素的邻域通过移除低于某一给定阈值的所有边并将所有相连的样本点作为域类而获得;然后采用基于关系权重的方法对邻域类别区分,从全局的角度衡量了每个特征项对所有类别的区分能力;接着基于可变聚类半径对像素数据排重,删除重复性数据,最后给出了算法流程。

1 图像像素邻域关系数据聚类划分

1.1 像素邻域度计算

在图像像素集合 $S = (s_1, s_2, \dots, s_m)$ 中 2 个元素 (s_q, s_p) ($q = 1, 2, \dots, m; p = 1, 2, \dots, m$) 间的关系 $R = (r_1, r_2, \dots, r_m)$ 为有限集 $A = (x_1, x_2, \dots, x_m)$, 对于任何 r_i ($i = 1, 2, \dots, m$), 通过 x_j ($x_j \in A$) 描述 2 个元素 (s_q, s_p) 相对 r_i 的邻域度, 邻域函数 $\mu_{r_i}(X_j)$ 表示邻域度, A 中所有集合的共同作用反映 (s_q, s_p) 相对于 r_i ($i = 1, 2, \dots, m$) 的邻域度 $\mu_{r_i}(s_q, s_p) : \mu_{r_i}(s_q, s_p) = c_1\mu_{r_i}(x_1) + c_2\mu_{r_i}(x_2) + \dots + c_m\mu_{r_i}(x_m)$ 。其中, c_1, c_2, c_m 为权重

45-50.

[17] 万里强, 李向林, 苏加楷, 等. 长江三峡地区灌木生物量及产量估测模型[J]. 草业科学, 2001, 18(5): 5-10, 15.

[18] 黄劲松, 邸雪颖. 帽儿山地区 6 种灌木地上生物量估算模型[J]. 东北林业大学学报, 2011, 39(5): 54-57.

[19] 孙钦平, 李吉进, 邹国元, 等. 应用数字图像技术对有机肥施用后玉米氮营养诊断研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2010(9): 2447-2450.

[20] 李飞飞, 吕国玮, 刘涛, 等. 北京地区乔木郁闭度测量研究[J]. 林业资源管理, 2011(1): 91-95, 99.

收稿日期: 2016-11-18

基金项目: 河南省高等学校重点科研项目(编号: 16B510003); 黄淮学院青年教师科研能力提升项目(编号: 201512711)。

作者简介: 姚巧鸽(1984—), 女, 河南洛阳人, 硕士, 讲师, 主要从事图像信号处理、嵌入式技术等研究。E-mail: xj20142015@foxmail.com。

通信作者: 夏银红, 硕士, 讲师, 主要从事计算数学、算法研究及应用。E-mail: xyh2017@foxmail.com。

[12] 苏占雄, 石辉, 郭晋伟, 等. 利用数码照片估算灌木地上生物量的研究[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(7): 3620-3624.

[13] 孙伟, 马志波, 曹珊珊, 等. 林业资源数据特征分析[J]. 西北林学院学报, 2014, 29(6): 200-206, 233.

[14] 尹英姬. 基于数字摄影测量的森林调查因子的提取[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2012.

[15] 闫飞. 森林资源调查技术与方法研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2014.

[16] 何列艳, 亢新刚, 范小莉, 等. 长白山区林下主要灌木生物量估算与分析[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2011, 35(5):