

# 基于鱼镜头的林冠郁闭度简易测量方法

祁有祥 骆 汉 赵廷宁

(北京林业大学水土保持学院, 水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室)

**摘要:**为探究一种精度高、操作简便、成本低、便携性高的郁闭度观测方法和设备,于2008年8月在水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室方山试验站土桥沟流域进行了对比观测试验,提出了采用鱼镜头获取林分冠层图像,应用Photoshop软件测定林分郁闭度的新方法(CCPS法),并以冠层分析仪所测28个固定样地的郁闭度值为基准值,对CCPS法所获冠层图像客观性和方法的系统偏差、精度和稳定性进行检验与测试,探讨了不同测量高度、林冠选择方式和林木主干对郁闭度测量结果的影响。结果表明:建立多边形林冠测量范围,其测量精度可达99.43%;在距地面90~130 cm高度范围内测量结果最为稳定,且便于操作;林木主干使郁闭度测量值均偏大,尤其对针叶林影响较大;该方法的稳定系数可达92.86%。

**关键词:**鱼镜头;郁闭度;数字图像;测量方法

**中图分类号:** S753.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1522(2009)06-0060-07

QI You-xiang; LUO Han; ZHAO Ting-ning. **Simplified approach to measure canopy closure based on fish lenses.** *Journal of Beijing Forestry University* (2009) 31(6) 60-66 [Ch., 12 ref. ] Key Laboratory of Soil and Water Conservation & Desertification Combating of Ministry of Education, School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, 100083, P. R. China.

This study provides a new approach to measure the canopy closure (CCPS), which is simple, with high accuracy, low cost, easy to handle and portable. In August of 2008, the comparison study was done in Tuqiaogou watershed of Fangshan Field Station of Key Laboratory of Soil and Water Conservation & Desertification Combating. We used canopy digital images from fish-eye lenses and analyzed them using Photoshop software. Twenty eight sample sites were selected to test their canopy closure. Based on the data from canopy analysis system, the objectivity of canopy digital images was examined, and the systemic deviation, precision and stability of this method were also tested. The effects of measurements at different heights, canopy shape, and bole on the final results were analyzed and discussed in this paper. The results indicated that: 1) the precision of CCPS was 99.43% with the maximum polygonal canopy; 2) the most stable range of the measurement heights was between 90—130 cm; 3) the existence of bole caused the higher CCPS values, especially for the coniferous forest; 4) according to the tested results, the stable coefficient of CCPS for different operators can reach 92.86%.

**Key words** fish-eye lenses; canopy closure; digital image; measuring method

郁闭度是描述森林系统状态与环境指标的重要特征之一<sup>[1]</sup>,是森林资源普查的重要调查因子,已被广泛应用于水土流失、水源涵养、林分质量评价、森林景观建设等方面,在林中光照<sup>[2-3]</sup>、林冠多样性<sup>[4]</sup>、野生动植物生境以及森林经营管理等研究领域<sup>[5]</sup>也取得新进展。随着应用研究的深入,郁闭度的测定

方法与仪器得到不断完善和发展。赵彤等<sup>[6]</sup>对树冠投影法、样点抬头观测法与郁闭度测定器法进行了比较研究,结果表明:郁闭度测定器最优,相对误差为±3%。李永宁等<sup>[7]</sup>综述了7类14种郁闭度测量方法。近年来,3S技术在森林郁闭度估测中得到很好的应用和发展<sup>[8-9]</sup>。在诸多方法中,树冠投影法精

收稿日期:2008-11-06

<http://www.bjfujournal.cn>, <http://journal.bjfu.edu.cn>

基金项目:“十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAD3A1201)、国际科技合作专项(2008DFA32270)。

第一作者:祁有祥,博士。主要研究方向:工程绿化及荒漠化防治。电话:010-62338154 Email: qiyx1980@sohu.com 地址:100083 北京林业大学水土保持学院。

责任作者:赵廷宁,教授,博士生导师。主要研究方向:工程绿化及荒漠化防治。电话:010-62338154 Email: zhtning@bjfu.edu.cn 地址:同上。

度高,但效率较低;仪器测定法(Moosehom 观测仪、球面密度计、郁闭度测定器、冠层分析仪)设备成本昂贵,难以推广应用;遥感图像判读和理论计算法则需具备有关操作技能和素质。因此,这些方法多用于科学研究层面,在生产实践中仍较多地采用目测法、样线法、抬头望等方法。可见探索一种精确高、操作简便的方法和成本低、易携带的测量设备,对提高森林郁闭度观测准确度具有现实意义。

单反数码相机和鱼镜头具有多功能性和便携性,在郁闭度测量中表现出更大的优势。数码全天空影像能记录更小的林冠孔隙,与普通像片相比,具有效率高、成本低等优点<sup>[10]</sup>,并可用于建立林冠动态模型<sup>[11]</sup>。应用数码照片测定林分郁闭度,外业工作简便快捷,可提高精度,但照片处理较为复杂,且拍摄的照片质量受天气影响,强光会导致叶片明亮,难以与天空影像区分<sup>[12]</sup>。笔者应用了 Adobe Photoshop 软件直方图面板信息和色彩范围选择命令,很好地实现了冠层和天空影像分离。

## 1 数字图像郁闭度测定法(CCPS 法)

### 1.1 设备组成

CCPS 法所需设备有:视角为 180°的鱼镜头、与镜头相配套的单反数码相机(光学相机图像经扫描后也可适用该方法)、三维云台三脚架、快门线(没有遥控拍照功能的相机选配)、罗盘仪。

### 1.2 设备安装

1)将鱼镜头连接到数码相机上,摄影模式调整为全自动摄影,调试好遥控器(快门线)。

2)将三脚架架设在待测点上,根据样地情况调整三脚架高度,在 90~130 cm 之间为宜,此高度范围内便于操作,测量结果稳定。将相机固定在三脚架云台上,调整云台为天空摄影方式,并使照相机主光轴与水平面垂直。

3)打开罗盘仪,转动云台,使相机快门按钮指向正北方向。

4)拍照,并及时检查所获取图像,勿将操作人员和设备摄进影像。

5)在同一个样地内重复测量时,设备移动位置后,重复 2、3 步骤。测量下一样地时,为保护设备和方便搬运,应将设备拆分。

### 1.3 图像获取与处理

在待测样地内沿对角线均匀选择 3 个待测点,在各测量点上获取林冠影像,并记录样地号和对应影像编号。鱼镜头视角大,工作人员及其他设备应在测量点附近,并低于相机,避免摄入影像。充分利用数码相机图像即时浏览功能,及时查看图像,若

有不清晰、曝光过度以及摄入非林冠要素等因素,需重新拍照。

将获取的影像导入 Photoshop,将图像转为灰度双色调图像,以便测量郁闭度使用。图像转换命令为图像(I)→模式(M)→灰度(G)和双色调(D)。

### 1.4 郁闭度计算

在 Photoshop 软件直方图统计的信息中,标准偏差为选区内层次值的变换幅度,该值越小,选区内像素的色调分布越靠近平均值。像素数量为所选区域内影像的像素总数。以直方图中标准偏差数值作为色彩范围选择的容差值(F),理论上可以完全分离冠层图像中空隙影响。

将处理后的图像导入 Photoshop,运行窗口(W)→直方图命令,应用多边形套索工具,圈除图像中林地、林下灌木以及样地以外林木的影像,应用选择(S)→反选(I)命令建立林冠封闭选区,记录直方图中显示的林冠范围的像素数量 A。运行选择(S)→色彩范围(C)命令,将直方图所显示标准偏差值作为色彩范围对话框中颜色容差值(F),在已建立的林冠封闭选区内,用吸管在天空影响较亮的地方单击吸取参考颜色,分离林冠测量选区中的天空影像,并统计其像素数量 a,按式(1)计算郁闭度 ε。

$$\epsilon = 1 - \frac{a}{A} \tag{1}$$

式中:ε 为郁闭度;A 为林冠像素值;a 为林冠范围内空隙像素值。

## 2 CCPS 法检验

### 2.1 检验材料

本研究以教育部水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室方山试验站土桥沟流域 28 个固定样地为研究对象,各固定样地详细情况见表 1。对每个固定样地分别采用鱼镜头和冠层分析仪获取 3 张冠层图像,共获得固定样地冠层图像 2 组,共 168 张。

### 2.2 检验方法

#### 2.2.1 CCPS 法精度检验

在各类郁闭度测量工具中,冠层分析仪是被广为应用、且受公认的仪器之一,本研究以冠层分析仪所测数据为基准,对 CCPS 法进行冠层图像的客观一致性、系统偏差、精度和稳定性检验与测试,技术路线见图 1。

基准方法是以冠层分析仪测得各样地郁闭度作为 CCPS 法检验的基准值;方法 1 用于鱼镜头获取冠层图像与冠层分析仪获取图像客观一致性验证;方法 2 用于 Photoshop 软件进行郁闭度测量的系统偏差分析;方法 3 和 4 用于林冠选择形式对测量结

表 1 样地概况  
TABLE 1 General situation of the sample sites

样地 编号	经纬度		海拔/m	主要树种	株行距/(m×m)	平均胸径/cm	平均树高/m
	N 37°	E 111°					
01	43°30"	14°31"	1 270	油松、刺槐	不规则造林	6.80	12.20
02	43°20"	15°15"	1 452	油松	1.5×1.5	5.85	7.85
03	43°19"	15°13"	1 445	油松	1.0×2.0	4.44	8.41
04	43°19"	15°05"	1 416	大果榆、油松	2.0×2.0	5.23	10.18
05	43°25"	14°53"	1 357	油松	1.0×3.0	5.20	8.30
06	43°27"	14°45"	1 313	油松、刺槐	1.0×3.5	7.60	10.34
07	43°29"	14°38"	1 299	油松、刺槐	1.5×2.0	6.42	12.40
08	43°29"	14°32"	1 291	刺槐	1.0×2.0	8.20	9.60
09	43°32"	14°25"	1 287	华北落叶松、油松、刺槐	1.0×2.0	5.44	9.12
10	43°33"	14°24"	1 285	华北落叶松、油松	1.0×2.0	3.35	4.68
11	43°29"	14°17"	1 268	刺槐	2.0×2.0	6.10	9.05
12	43°29"	14°14"	1 263	油松、刺槐	2.0×3.5	4.95	6.75
13	43°30"	14°09"	1 258	刺槐	2.0×2.5	8.18	12.80
14	43°27"	14°59"	1 270	刺槐	2.0×3.0	7.20	10.50
15	43°25"	14°05"	1 256	侧柏	2.0×2.0	5.20	5.90
16	43°26"	14°06"	1 264	刺槐	1.5×3.0	8.22	10.81
17	43°26"	14°07"	1 265	侧柏	2.0×4.0	4.76	7.70
18	43°25"	14°06"	1 226	刺槐	2.0×5.0	7.47	11.10
19	43°24"	14°06"	1 220	白榆	2.0×4.0	7.10	12.00
20	43°26"	14°03"	1 226	白榆、刺槐	2.0×4.0	4.95	6.80
21	43°26"	14°59"	1 216	刺槐	2.0×4.0	7.20	8.40
22	43°28"	13°59"	1 230	刺槐	2.0×4.0	7.60	10.40
23	43°27"	14°01"	1 231	白榆	2.0×6.0	5.60	10.70
24	43°29"	13°56"	1 213	侧柏	2.0×4.0	3.80	5.10
25	43°27"	13°54"	1 183	刺槐	2.0×4.0	7.80	8.90
26	43°31"	13°50"	1 187	刺槐	1.0×5.0	7.30	7.70
27	43°33"	13°47"	1 193	刺槐、侧柏	不规则造林	5.35	6.35
28	43°33"	13°38"	1 187	刺槐	不规则造林	6.60	8.30

注:油松 (*Pinus tabulaeformis*)、刺槐 (*Robinia pseudoacacia*)、大果榆 (*Ulmus macrocarpa*)、华北落叶松 (*Larix principis-rupprechtii*)、侧柏 (*Platycladus orientalis*)。

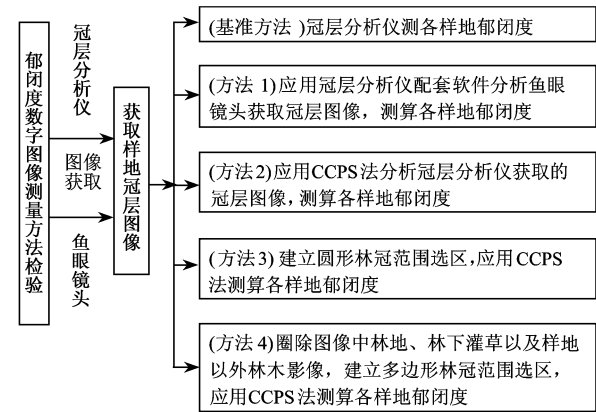


图 1 技术路线图  
FIGURE 1 Technology framework

果的影响分析,提出 CCPS 法测定林分郁闭度的林冠选择方式。

2.2.2 测量高度对精度的影响分析

在同一观测点,距地面每 10 cm 为 1 个高度级别,采用鱼眼镜头获取样地冠层图像,分析距地面不同测量高度对 CCPS 法测量结果的影响。本研究测量高度范围为 50~150 cm(三脚架高度范围)。

2.2.3 林木主干对测量结果的影响分析

冠层图像中,林木主干占据一定比例的面积,直接影响郁闭度测量结果。采用 Photoshop 软件多边形套索工具和从选区中减去的选择模式,将林木主干从林冠影像中分离,并计算郁闭度,分析林木主干对郁闭度测量结果的影响(图 2),白色区域原为非林冠影像和林木主干。



图 2 剔除林木主干的林冠影像  
FIGURE 2 Removal of boles from canopy film

2.2.4 CCPS 法的稳定性检验

分别由 30 人独立完成同一块样地 3 张冠层图

像分析,测试员包括研究生、本科生和基层林业工作者;其中有非林业相关工作测试员 2 名,第 1 次接触 Photoshop 软件的基层林业工作者 2 名。回访调查每个测量人员对该方法操作要领和关键步骤的领会程度,测试该方法的正确使用率和测量误差范围,检验该方法的稳定性。

3 结果与分析

3.1 CCPS 法精度检验

3.1.1 基准值获取

本研究以冠层分析仪测定的 28 个固定样地郁闭度为基准值,对 CCPS 法进行图像客观性、测量方法的系统偏差和精度检验,各样地郁闭度基准值见表 2。

3.1.2 冠层图像客观性检验

由图 3 可以看出:应用冠层分析仪配套的分析系统分析鱼镜头所获取的各固定样地冠层图像,

表 2 冠层分析仪所测各样地郁闭度的基准值  
TABLE 2 Base values of canopy closure in sample sites measured by canopy analysis system

样地 编号	郁闭 度	样地 编号	郁闭 度	样地 编号	郁闭 度	样地 编号	郁闭 度
01	0.70	08	0.72	15	0.42	22	0.74
02	0.77	09	0.43	16	0.78	23	0.71
03	0.73	10	0.49	17	0.61	24	0.40
04	0.47	11	0.57	18	0.71	25	0.81
05	0.75	12	0.60	19	0.66	26	0.82
06	0.72	13	0.70	20	0.72	27	0.75
07	0.68	14	0.75	21	0.71	28	0.76

测得 28 个固定样地郁闭度,其中小于基准值的样地有 10 个,相等的有 10 个,大于基准值的有 8 个,分别占总样地数的 35.7%、28.6%、35.7%,与基准值的相关系数为 0.984 5。表明采用装备鱼镜头的数码相机获取的冠层图像与冠层分析仪获取的图像客观性一致,能够准确地记录冠层信息。

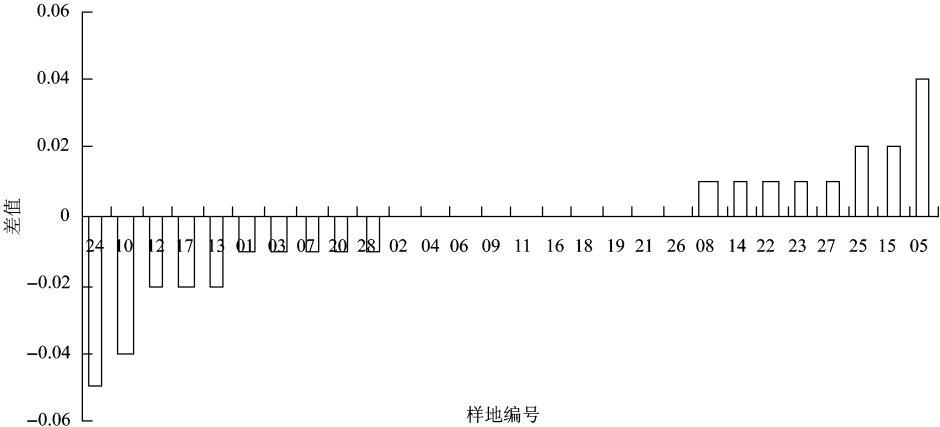


图 3 方法 1 测量值与冠层分析仪所测基准值的差值分布图  
FIGURE 3 Difference distribution of measuring base values by method 1 and canopy analysis system

3.1.3 系统偏差检验

由图 4 可以看出:应用 Photoshop 软件分析冠层分析仪所获取的各固定样地冠层图像,测定 28 个固

定样地的郁闭度,其中小于基准值的样地有 9 个,等于基准值的有 7 个,大于基准值的有 12 个,分别占总样地数的 32.1%、25.0%、43.9%,与基准值的相

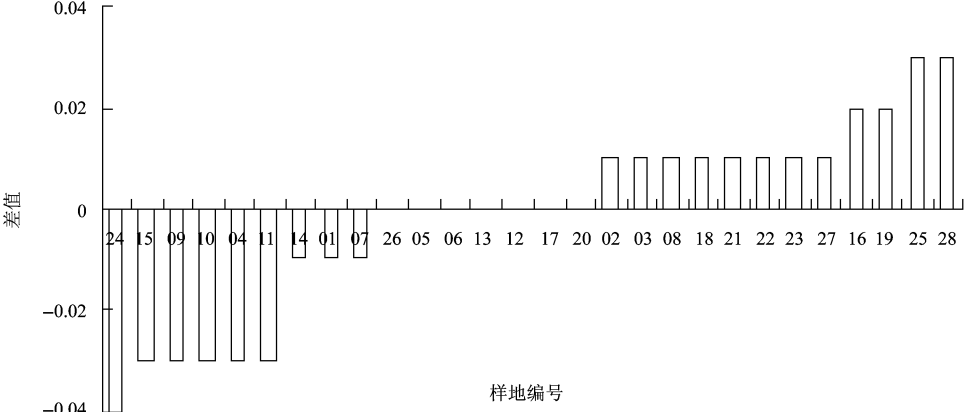


图 4 方法 2 测量值与冠层分析仪所测基准值的差值分布图  
FIGURE 4 Difference distribution of measuring base values by method 2 and canopy analysis system  
(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

关性高达 0.984 1。表明采用 Photoshop 软件建立林冠范围的封闭选区,利用直方图统计林冠和天空影像像素数量,进而求得林分郁闭度的方法,不会出现系统性偏差。

3.1.4 林冠选择形式分析

方法 3 和 4 分别对鱼眼镜头获取的冠层图像建立圆形和冠层图像的多边形林冠测量选区,测得 28

个固定样地的郁闭度,与基准值的相关系数分别为 0.982 8和0.994 3。通过建立多边形林冠选区使得最大绝对误差降低了 0.02,使得绝对误差为小于 0.01 的样地数量明显增多,虽然对郁闭度的计量没有较大影响,但对于郁闭度较低或者存在开阔性林冠空隙的林分,提高了其郁闭度测量精度(图 5、6)。

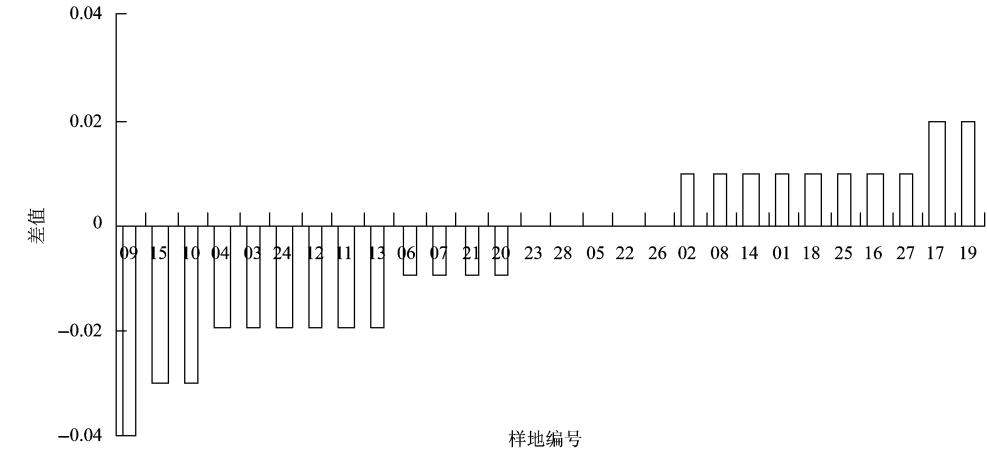


图 5 方法 3 测量值与冠层分析仪所测基准值的差值分布图

FIGURE 5 Difference distribution of measuring base values by method 3 and canopy analysis system

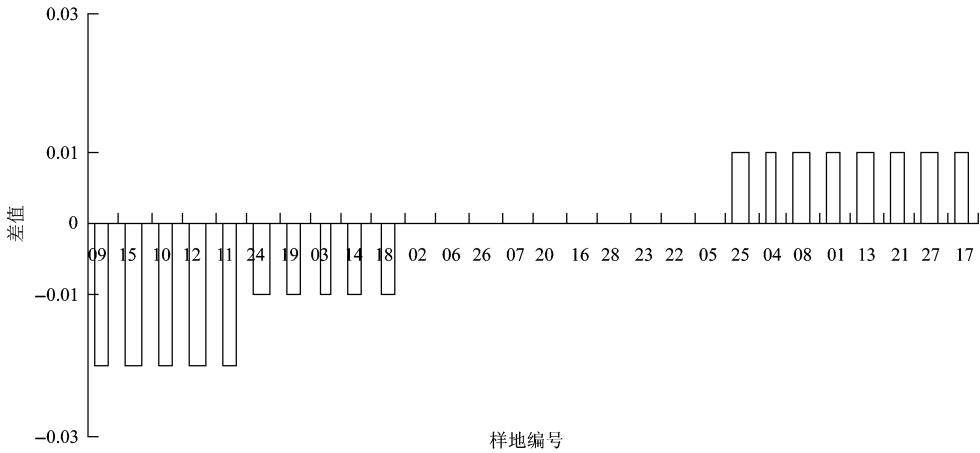


图 6 方法 4 测量值与冠层分析仪所测基准值的差值分布图

FIGURE 6 Difference distribution of measuring base values by method 4 and canopy analysis system

由图 5、6 可以看出:不论采取多边形林冠测量选区,还是圆形的林冠测量选区,所测得 4、9、10、11、12 和 15 等 6 个样地郁闭度值与基准值的差值较大。主要由于这 6 块样地都存在较为宽阔的林冠空隙,使得 Photoshop 直方图所统计的标准差值更偏向于天空影像色彩范围,在天空影像范围选择时,其边缘区域将更多地包含林冠边缘,使得天空影像像素数量偏大,导致所计算的郁闭度值小于基准值,误差较大。

3.2 测量高度对精度的影响

由图 7 可看出,CCPS 法测量林分郁闭度,在距地 50~150 cm 范围内,以十分制计郁闭度,其结果相同。但在 90~130 cm 高度范围内,其测量结果分别

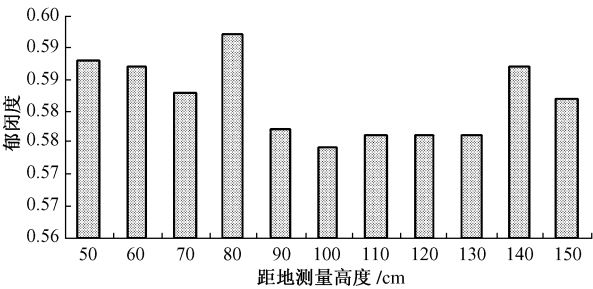


图 7 距地不同测量高度的测量结果

FIGURE 7 Measuring results for different measuring heights

为 0.577、0.574、0.576、0.576、0.576,结果几近完全一致。表明在此范围内,采用 CCPS 法测量林分郁闭度,稳定性较好,且便于操作,同时也可减小林木

主干对测量结果的影响。

### 3.3 林木主干对测量结果的影响

由图 8 可以看出：抠除林木主干后，所测得各样地郁闭度均小于 CCPS 法(方法 4)所测值，其中相差较大的样地有 2、3、5、8、16、20 和 21 号 7 个样地，其余各样地测量值的差值均小于 0.02。抠除林木主干所占影像，仅直接缩小了林冠测量选区，使测量值均有所减小。2、3 和 5 号等 3 个样地均为油松林，

林分密度较大，透光空隙细碎密集、数量较多，而且林相颜色灰暗，对林冠测量范围和通过色彩范围分离天空影像均有影响。16、20 和 21 号样地林木主干对郁闭度测量影响次之，主要是因为图像获取点距离单株主干太近，突显了主干在林冠影像中所占的比例，因此，采用 CCPS 法测量针叶林林分郁闭度时，应该抠除林木主干的影像。此外，在冠层图像获取点位设置时，不要距离林木太近。

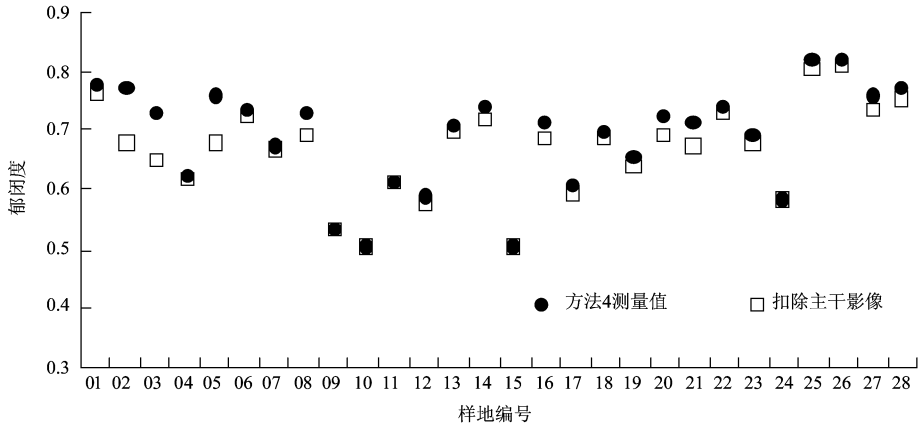


图 8 林木主干对郁闭度测量结果影响  
FIGURE 8 Effects of boles on the measuring canopy closure results

### 3.4 CCPS 法稳定性测试

#### 3.4.1 正确使用率测试

30 个测试员通过阅读 CCPS 测量方法，并独立完成 14 号样地林冠图像处理与郁闭度测量。其中，有 28 人独立完成了测量工作，另外 2 名非林业相关工作的测试员因不理解郁闭度、林冠等概念，在圈除林地、林下植被以及样地以外林木影像时，未建立正确的林冠选区，但均表示能理解该方法的操作步骤和要领，测试结果显示该方法的正确使用率可以达到 93.33%。

#### 3.4.2 测量结果稳定性测试

测试员所测值与本研究测量结果 0.739 相比，其中大于笔者测量结果的有 13 人，相差最小的为 0.740，最大的为 0.744，小于笔者测量结果的有 10 人，相差最小的为 0.738，最大的为 0.735(图 9)。2 名非林业工作测试员未完成测试，仅以林业相关工作人员计算，有 26 人测量结果误差范围在 0~0.05 之间，该方法的稳定性可达 92.86%。

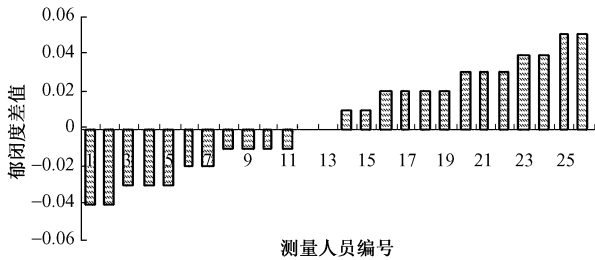


图 9 测试结果差值图  
FIGURE 9 Difference among different measuring results

(CCPS 法)。采用该方法观测了房山试验站 28 块固定样地郁闭度，以冠层分析仪所测各样地郁闭度值为基准值，对 CCPS 法进行了图像客观性、系统偏差和精度检验，通过建立多边形林冠测量范围，其测量精度可达 99.43%。对距地面不同高度所获图像分析得出，在距地面 90~130 cm 范围内，测量结果最为稳定，且便于操作。受林木主干的影响，其郁闭度测量值略有偏大，针叶林郁闭度测量受林木主干影响较大，采用 CCPS 法测量针叶林郁闭度时，应抠除林木主干的影像。测试试验表明，该方法的正确使用率达 93.33%，稳定性可达到 92.86%。

### 4.2 讨论

1) 鱼镜头的焦距范围一般为 6~16 mm，视角范围多在 180°左右，有些甚至达到 230°，有全圆形和全幅面两种类型。采用鱼镜头测定林分郁闭度，

## 4 结论与讨论

### 4.1 结论

本研究系统地提出了采用鱼镜头获取林冠数字图像，应用 Photoshop 软件直方图的统计信息和色彩范围选择命令，分离了林冠影像中天空影像，并分别统计其像素数量，进而计算林分郁闭度的新方法

应该选择视角为 180°的定焦全幅镜头。

2)采用数字图像法定测定林分郁闭度,地形对其测定结果影响较大。根据实践经验,当坡度接近 10°时,图像中出现部分林地影像,但对测量结果影响较小。鱼镜头的视角范围为 180°,可以由图 10 几何关系得出冠层图像获取点距样地上边缘的距离公式:

$$L = H\sin^{-1}\theta \tag{2}$$

式中: $L$  为冠层图像获取点位距样地边缘的距离; $H$  为图像获取高度; $\theta$  为样地坡度。

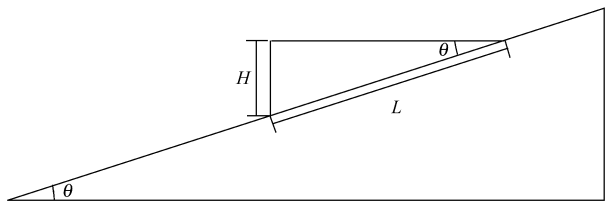


图 10 观测点与样地边缘几何关系图

FIGURE 10 Geometric map between testing points and the shape of sample sites

按照 CCPS 法,距地摄影高度范围 90~130 cm,对于坡度为 10°的林地,冠层图像获取点与样地上边缘的距离为 4.3~7.6 m。因此,对于标准样地采取 130 cm 摄影高度,沿对角线均匀设置 3 个观测点,可获取林分冠层图像。在山地林分郁闭度测定时,图像获取点上位部分坡面进入冠层图像是无法避免的客观事实,能否通过科学合理的布设冠层图像摄取点,使得林冠图像能够正确反映林冠信息,提高较大坡度林分郁闭度测量精度,有待于进一步的试验探讨。

3)作为一种新方法,其实用条件仍需深入研究探讨,例如林分密度和林木高度以及影像获取时的日照强度和云量等因素,对 CCPS 法测量结果是否产生较大影响。笔者将在本研究基础上,继续开展相关试验研究,以完善该方法的应用。

参 考 文 献

[ 1 ] LOEFFLER A E, GORDON A M, GILLESPIE T J. Optical porosity and wind speed reduction by coniferous windbreaks in southern Ontario[J]. *Agrofor Sys*, 1992, 17: 119-133.

[ 2 ] JENNINGS S B, BROWN N D, SHEIL D. Assessing forest canopies and understorey illumination: Canopy closure, canopy cover and other measures [J]. *Forestry*, 1999, 72: 59-73.

[ 3 ] KORHONEN L, KORHONEN K T, RAUTIAINEN M, *et al.* Estimation of forest canopy cover: A comparison of field measurement techniques [J]. *Silva Fennica*, 2006, 40 (4): 577-588.

[ 4 ] DAVIS L R, WARERHOUSE M J, ARMLEDER H M. A comparison of the breeding bird communities in seral stages of the Engelmann spruce-subalpine fir zone in east central British Columbia [EB/OL]. (2006-01-13) [2008-04-19]. <http://www.for.gov.bc.ca/hfd/pubs/Docs/Wp/Wp39.htm>.

[ 5 ] MAY C A, PETERSBURG M L, GUTIEREZ R J. Mexican spotted owl nest and roost site habitat in northern Arizona [J]. *Journal of Wildlife Management*, 2004, 68(4): 1 054-1 064.

[ 6 ] 赵彤堂, 李凤鸣, 刘清玉, 等. 几种测定郁闭度方法的比较 [J]. *中南林业调查规划*, 1995, 14(2): 42-44.

[ 7 ] 李永宁, 张宾兰, 秦淑英, 等. 郁闭度及其测定方法研究与应用[J]. *世界林业研究*, 2008, 21(1): 40-46.

[ 8 ] 李崇贵, 石强, 赵宪文, 等. 用龄估计研究以 RS 和 GIS 为基础的森林郁闭度估测[J]. *林业科学*, 2001, 37(5): 24-30.

[ 9 ] 孙雪文, 高德武, 李日新, 等. ArcView GIS 支持下的林地郁闭度的快速精确测定方法[J]. *黑龙江水专学报*, 2005, 32(3): 89-90.

[ 10 ] ENGLUND S R, O B 'RIEN J J, CLARK D B. Evaluation of digital an film hemispherical photography and spherical densiometry for measuring forest light environments[J]. *Can J For Res*, 2000, 30: 1 999-2 005.

[ 11 ] VALVERDE T, SILVEROWN J. Canopy closure rate and forest structure [J]. *Ecology*, 1997, 78(5): 1 555-1 562.

[ 12 ] BROWN N, JENNINGS S, WHEELER P, *et al.* An improved method for the rapid assessment of forest understorey light environments [J]. *The Journal of Applied Ecology*, 2000, 37(6): 1 044-1 053.

(责任编辑 李 契)