

# 利用冠层分析仪测算苹果园叶面积指数及其可靠性分析

张继祥<sup>1</sup>, 魏钦平<sup>2,\*</sup>, 张 静<sup>3</sup>, 王连新<sup>1</sup>, 孙协平<sup>1</sup>, 王翠玲<sup>1</sup>, 宋 凯<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 山东农业大学园艺科学与工程学院, 作物生物学国家重点实验室, 山东泰安 271018; <sup>2</sup> 北京市农林科学院林业果树研究所, 北京 100093; <sup>3</sup> 山东省蓬莱市农业局果树站, 山东蓬莱 265600)

**摘 要:** 以山东省苹果主产区成龄密植园、间伐园和疏枝园苹果树为材料, 利用方框取样法(直接法, di)和冠层分析仪法(间接法, in)分别测定了叶面积指数(LAI)。结果表明: 冠层分析仪法与方框取样法测量的 LAI 平均值分别为  $3.0 \pm 0.2$  和  $4.3 \pm 0.2$ , 前者比后者平均低 30.2%, 且随着 LAI 增加, 二者相差增大。密植园、间伐园和疏枝园相应偏低 32.0%、35.5% 和 25.0%。统计分析表明, LAI<sub>di</sub> 与 LAI<sub>in</sub> 相关性极显著, 密植园、间伐园和疏枝园中的相关系数( $r$ )分别为 0.91、0.89 和 0.92。把冠层分析仪鱼眼摄像头最外圈去掉(平均视天顶角为  $68^\circ$ ) LAI<sub>di</sub> 与 LAI<sub>in</sub> 之间相差在 13% 以内, 校正后密植园、间伐园和疏枝园中二者的相关系数( $r$ )分别为 0.93、0.93 和 0.94。尽管方框取样法和冠层分析仪法测量的 LAI 具有极显著的相关性, 但冠层分析仪法的测值偏低, 因此, 在应用冠层分析仪估计苹果园的 LAI 时, 要改进冠层分析仪的测量方法, 并利用方框取样法测得的结果对其进行校正, 以便提高准确性。在本研究中, 密植园、间伐园和疏枝园内冠层分析仪的校正系数分别为 1.3004、1.2077 和 1.1762。

**关键词:** 苹果; 果园; 叶面积指数; 冠层分析仪; 方框取样法

**中图分类号:** S 661.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0513-353X(2010)02-0185-08

## Leaf Area Index Estimated with Plant Canopy Analyzer in Apple Orchards and Analysis of Its Reliability

ZHANG Ji-xiang<sup>1</sup>, WEI Qin-ping<sup>2,\*</sup>, ZHANG Jing<sup>3</sup>, WANG Lian-xin<sup>1</sup>, SUN Xie-ping<sup>1</sup>, WANG Cui-ling<sup>1</sup>, and SONG Kai<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>State Key Laboratory of Crop Biology, College of Horticultural Science and Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018, China; <sup>2</sup>Institute of Forestry & Pomology, Beijing Academy of Agriculture & Forestry Sciences, Beijing 100093, China; <sup>3</sup>Pomology Station, Penglai Bureau of Agriculture, Penglai, Shandong 265600, China)

**Abstract:** It was studied that leaf area index (LAIs) were respectively estimated with sampling with a cubic frame (direct method) and using a plant canopy analyzer (indirect method) in more than 40 adult apple orchards (including unthinned, thinned and partially-cut-branch orchards) selected randomly in Shandong Province. The results showed that LAIs estimated with direct and indirect methods in all orchards tested were  $3.0 \pm 0.2$  and  $4.3 \pm 0.2$ , respectively. Compared to LAI with the direct method (LAI<sub>di</sub>), average under

**收稿日期:** 2009-09-04; **修回日期:** 2009-12-28

**基金项目:** 国家现代苹果产业技术体系(MATS)功能岗位专家项目; 国家高技术研究发展计划('863'计划)项目(2008AA10Z219); 国家科技支撑计划项目(2008BAD92B08)

\* 通信作者 Author for correspondence (E-mail: qpwei@sina.com)

estimation of LAIs with indirect method ( $LAI_{in}$ ) was 30.2%, in which the underestimation of LAIs were 32.0%, 35.5% and 25.0%, respectively in unthinned, thinned and partially-cut-branch orchards. In addition, the larger LAI was, the more serious underestimation was in various types of orchards. LAIs estimated with direct and indirect methods were strongly and linearly interrelated to each other ( $r = 0.91, 0.89$  and  $0.92$ , respectively, in three types of orchards,  $P < 0.00001$ ). When omitting the reading of the external ring of the plant canopy analyzer and being recalculated, the linear correlation between  $LAI_{di}$  and  $LAI_{in}$  was more significant ( $r = 0.93, 0.93$  and  $0.94$ , respectively, in three types of orchards,  $P < 0.00001$ ), and the difference became less (less than 13%). When LAI of apple orchards is estimated by a plant canopy analyzer, further correction of the data can improve its performance and produce reliable estimation through being modified by direct reference measurement. At this study, the modified coefficients of plant canopy analyzer were 1.3004, 1.2007 and 1.1762, respectively, in three types of orchards, that is to say, real LAIs in three types of orchards were about 1.3, 1.2 and 1.2 times respectively, more than estimated values (modified) of plant canopy analyzer.

**Key words:** apple; orchard; leaf area index; plant canopy analyzer; sampling with a cubic frame

叶片是植物与大气之间进行能量、 $CO_2$  和水分交换的主要界面。叶面积指数 (LAI) 是果树冠层生物学特征的一个重要参数, 与果园的光能截获及利用、产量和品质的形成等过程关系密切, 在一定程度上决定了果园的生产效率 (Gholz, 1982; Waring, 1983; Bolstad & Gower, 1990; Chason et al., 1991; 张显川 等, 2005, 2006; 岳玉苓 等, 2008)。如何快速、便捷、准确地测定果园的 LAI 一直是果树栽培和生理生态工作者力求解决的问题。

目前测量或估计 LAI 的方法可分为直接测量法和间接估计法 (Chason et al., 1991, 高登涛 等, 2006)。直接测量法具有破坏性, 费时费力, 不能重复, 操作困难且难以测量叶面积的动态变化等 (Smith et al., 1991; Martens et al., 1993; 王谦 等, 2005) 诸多现实问题。近几年, 间接地估计森林或果园 LAI 的方法得到了迅速发展和广泛应用。间接法又分为异速生长 (或相对生长) 法和光学法 (Bolstad & Gower, 1990; Vose et al., 1995)。

在光学法中, 基于冠层图像数字分析的植物冠层分析仪 (如 LI-2000, LI-COR, USA; CI-110, CID, USA) 因其携带方便, 且无需另外的资料处理, 能直接迅速地给出 LAI 值 (Chason et al., 1991; Dufrene & Breda, 1995) 而得到广泛应用。但是, 这类仪器是在假定植物冠层内的各种元素 (如叶、枝、干和果等) 随机分布, 依据冠层间隙度 (gap fraction) 或光学特性反演 LAI; 另外, 用冠层分析仪测量 LAI 时, 忽略了其它元素 (枝、干和果等) 对辐射传输的影响, 所测 LAI 与实际的 LAI 必然存在较大的偏差。

先前的研究表明, 冠层分析仪法测量的 LAI 往往比直接测量的 LAI 低, 且叶片的聚集效应越强, 二者的差异性越大 (Chason et al., 1991; Chen & Black, 1991; Chen et al., 1991; Gower & Norman, 1991; Wang et al., 1992)。因此在应用冠层分析仪测量 LAI 时, 一般需要用直接法校正 (Deblonde et al., 1994; Vose et al., 1995)。

目前, 国内外用冠层分析仪法和直接法测量森林 LAI 的对比研究较多, 但用于果园等人工生态系统 LAI 测量研究的较少, 且缺少直接测量方法的效果验证 (王谦 等, 2006)。

本研究中通过直接测量法和间接测量法的比较与分析, 探讨了植物冠层分析仪在不同类型苹果园中测量 LAI 的准确性和可行性, 提出了对冠层分析仪法测量误差的校正方法和校正参数, 目的是找出能迅速、便捷、准确可靠的估计果园 LAI 的方法, 且能连续地观测其时空动态, 为苹果园的科学管理和果树生理生态的研究提供数据支撑。

# 1 材料与方法

## 1.1 试验地概况

试验于 2008 年 10—11 月（采果后），在山东省苹果 3 个产区（胶东半岛、沂蒙山区和鲁西平原；114° 19' E ~ 122° 43' E, 34° 22' N ~ 38° 22' N）选取了树势相对中庸，状态比较均一且具有一定代表性的盛产期密植园（24 个）、间伐园（5 个）和疏枝园（12 个）等共计 41 个富士苹果园，其中，胶东半岛 18 个（栖霞市 8 个，招远市和蓬莱市各 5 个）；沂蒙山区 12 个（沂源市和蒙阴市各 6 个）；鲁西平原 10 个（嘉祥县和巨野县各 5 个）。果园面积在 0.3 ~ 2.0 hm<sup>2</sup> 之间，树龄在 10 ~ 20 a，树形多为疏散分层形（一般分上、中、下 3 层，上层的主枝量为 2 个，中层为 2 ~ 3 个，下层为 3 个，上中两层的间距在 1.0 ~ 1.2 m 之间，中下两层在 0.8 ~ 1.1 m 之间）。密植园的栽植密度一般为 3 m × 4 m，南北行向；间伐园和疏枝园均为密植园的改造园，改造时间为 2006 或 2007 年，改造方式为隔行间伐（间伐园）或每棵树选择性的疏除 1 ~ 3 个主枝（疏枝园）。苹果园树体基本情况见表 1。所有果园均按当地生产习惯进行常规的田间管理。

表 1 山东省（3 个苹果产区）苹果园树体结构基本特征

Table 1 Main characteristics of apple tree structure in Shandong Province

果园类型 Orchard type	调查数量 The number of tested orchard	主枝量 The number of main branches	树高/m Tree height	冠高/m Canopy height	干高/m Height of main trunks	南北冠幅/m Tree canopy width in NS	东西冠幅/m Tree canopy width in EW	树冠体积/m <sup>3</sup> Tree canopy volume
密植 Unthinned	24	7.2±0.5	2.7±0.5	2.11±0.32	0.62±0.15	4.62±0.25	4.72±0.25	24.1±0.38
疏枝 partially-cut-main-branch	12	5.0±0.4	2.6±0.5	2.22±0.34	0.84±0.12	4.74±0.32	4.83±0.47	26.6±0.35
间伐 Thinned	5	7.4±0.5	2.8±0.5	2.32±0.40	0.64±0.11	4.81±0.41	5.05±0.32	29.2±0.43
加权平均值 Weighted average		7.0±0.5	2.7±0.5	2.15±0.31	0.66±0.12	4.68±0.22	4.87±0.22	25.7±0.41

注：调查日期：2008 年 10—11 月；树冠近似椭球体，体积  $V = 4/3\pi abc$  (m<sup>3</sup>)，式中 a、b、c 分别代表椭球体的半径，即分别为冠高、南北冠幅和东西冠幅的一半。

Note: Testing date: from Oct. to Nov., 2008; The shape of tree canopy is similar to an ellipsoid, which volume is:  $V = 4/3\pi abc$  (m<sup>3</sup>), where a, b and c stand for the radii of the ellipsoid, namely, a half of canopy height, canopy width in NS and in EW, respectively.

## 1.2 试验方法

依据试验果园的大小，在每个果园分别选取 3 ~ 5 个测点，在每个测点分别用方框取样法和冠层分析仪法测量或估算叶面积指数。

间接法——冠层分析法：冠层分析仪（CI-110, CID, USA）的感应器是 1 个鱼眼摄像头，内置 5 个相对独立的环状硅感光片，分别对应测量天空 5 个范围的散射辐射，这 5 个范围的中心视天顶角分别为 7°、23°、38°、53° 和 68°，分别于冠层上部和下部测量辐射通透密度（Gower & Norman, 1991; Cutini et al., 1998），并根据转换模型估算叶面积指数（LAI<sub>m</sub>）。

在每一个测点均在冠层顶部测 1 次，下部（行间及行内）重复测量 6 ~ 10 次。冠层下方的测量在同一水平面上（距地面 10 cm 左右），且在无直接辐射（阴天或早晨、傍晚）的条件下进行。为了避免光环境迅速的变化对测量结果的影响，最好选择阴天条件下进行。然后，用冠层分析仪附带的软件对测量的资料进一步加工以校正估算的 LAI 值，即删除鱼眼摄像头上最外一圈感光片（对应的平均视天顶角为 68°）的读数重新计算 LAI。

直接法——方框取样法：用钢管制作 50 cm × 50 cm × 50 cm 的正方体方框。测量时，将方框随机放在树冠，将方框内的叶片全部摘下，用叶面积仪测量框内的叶面积，然后根据树冠体积和栽植密度计算叶面积指数（LAI<sub>di</sub>）。测点的选择与冠层分析法相同，每个测点选择邻近的 4 棵树，每棵树在 4

个方位上各测量 1 次，并与冠层分析仪法同时进行。

以  $LAI_{di}$  作为对照，将  $LAI_{in}$  与  $LAI_{di}$  作对比分析，并将二者的测量值或估计值进行线性回归拟合，同时检验 ( $t$ -test) 斜率、截距和相关系数的显著性差异，然后，计算方框取样法与冠层分析仪法测量的 LAI 之间差异的百分率  $[(LAI_{in} - LAI_{di})/LAI_{di} \times 100]$ 。为了比较全面系统地了解冠层分析仪法对苹果园 LAI 估计的可靠性或准确性，就所试果园（所有调查的 41 个果园）、密植园、间伐园和疏枝园内用方框取样法测得的  $LAI_{di}$  与用冠层分析仪估计的  $LAI_{in}$  及校正（除掉冠层分析仪鱼眼摄像头最外一圈的读数）后的 LAI 分别进行了对比，同时进行了相关的统计学分析。

2 结果与分析

2.1 所试果园中直接与间接测量的叶面积指数对比分析

在所试果园中，用方框取样法测得 LAI 为 1.3 ~ 5.8，平均值  $4.3 \pm 0.2$ ；而用冠层分析仪校正前估计 LAI 为 0.9 ~ 4.5，平均值  $3.0 \pm 0.2$ ，二者平均相差 30.2%，即冠层分析仪法低估 30% 左右（表 2）。

表 2 校正前后冠层分析仪法与方框取样法估算的果园 LAI 差异性分析

Table 2 Difference of measured LAI with direct and indirect methods before and after being modified

果园类型 Orchard type	校正前 LAI unmodified			校正后 LAI modified		
	$LAI_{di}$	$LAI_{in}$	差值率/% Difference	$LAI_{di}$	$LAI_{in}$	差值率/% Difference
密植 Unthinned	$5.0 \pm 0.2$	$3.3 \pm 0.2$	- 32.0	$5.0 \pm 0.1$	$4.4 \pm 0.1$	- 12.0
疏枝 Partially-cut-main-branch	$3.1 \pm 0.3$	$2.0 \pm 0.2$	- 35.5	$3.1 \pm 0.3$	$2.7 \pm 0.2$	- 12.9
间伐 Thinned	$3.6 \pm 0.2$	$2.7 \pm 0.3$	- 25.0	$3.6 \pm 0.1$	$3.2 \pm 0.2$	- 11.1
加权平均值 Weighted average	$4.3 \pm 0.2$	$3.0 \pm 0.2$	- 30.2	$4.3 \pm 0.2$	$3.8 \pm 0.1$	- 11.6

相关分析（图 1）表明，方框取样法测量的 LAI 与冠层分析仪法估计的 LAI 存在极显著的线性相关关系 ( $LAI_{di} = 1.4684 LAI_{in} - 0.0088$ ,  $r = 0.92$ ,  $P < 0.00001$ ,  $s.d. = 0.64$ )。然而，所拟合的直线（图

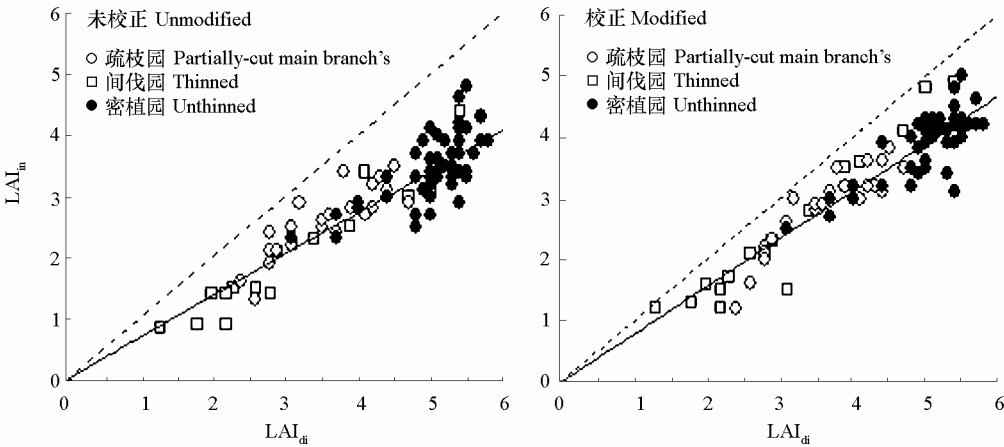


图 1 所试果园中方框取样法 ( $LAI_{di}$ ) 与冠层分析仪法 ( $LAI_{in}$ ) 校正前后估计结果比较分析

Fig. 1 Comparative analysis of measured LAI with direct and indirect methods between the unmodified and modified in all orchards tested

1 中实线)严重偏离 1:1 的对角线(图 1 中虚线),且所有数据均在对角线的下方,这是因为冠层分析仪法的估计值总是比方框取样法相应测量值偏低的缘故。就绝对值而言,随着 LAI 的增加,冠层分析仪估计的 LAI 与方框取样法的测定值相差越大。一般而言,果园的 LAI 越大,叶片之间相互重叠的机率也越大,且 LAI 越大,树冠内膛内的光环境就越差,内膛内的叶片较少,而大多数的叶片分布在树冠的外围,尤其是树冠的上层分布的较多,因此也增加了叶片的聚集效应,所以,随着果园 LAI 的增大,两方法得到结果也相差越大,但 LAI 与两种方法测量结果差值的百分率之间没有显著的相关关系(资料略)。

将冠层分析仪鱼眼摄像头最外圈的读数删除后重新估计 LAI(校正值)。如图 1 所示,校正后的冠层分析仪估计的 LAI 的范围在 1.1~4.8 之间,其平均值为  $3.8 \pm 0.1$ , 比校正前提高了 26.7%(与校正前冠层分析仪估计的 LAI 相比),且通过校正,冠层分析仪的估计值与方框取样法的测量值之间的差值率减少到了 11.6%(表 2)。相关分析表明(图 1),校正后冠层分析仪的估计值与方框取法的测值之间的线性相关关系更为显著( $LAI_{di} = 1.2839 LAI_{in} - 0.0003$ ,  $r = 0.94$ ,  $P < 0.00001$ ,  $s.d. = 0.53$ ),尽管所拟合直线仍位于对角线下方,但与校正前相比,二者之间的差距已明显缩小。通过校正明显地提高了冠层分析仪估计 LAI 的准确性。

## 2.2 密植园中直接与间接测量的叶面积指数对比分析

在密植园中,用方框取样法测得 LAI 的范围在 3.2~5.8 之间,其平均值为  $5.0 \pm 0.2$ ;而校正前用冠层分析仪估计 LAI 的范围在 2.3~4.8 之间,其平均值为  $3.3 \pm 0.2$ ,冠层分析仪法低估了 32.0%(表 2)。与疏桃园相比,密植园的 LAI 较大,叶片的重叠效应和聚集效应较强,因此,冠层分析仪的估计值相应也较低。相关分析表明(图 2),用方框取样法测得的 LAI 与校正前用冠层分析仪法测量的 LAI 存在极显著的线性相关关系( $LAI_{di} = 1.4327 LAI_{in} - 0.046$ ,  $r = 0.91$ ,  $P < 0.00001$ ,  $s.d. = 0.62$ )。

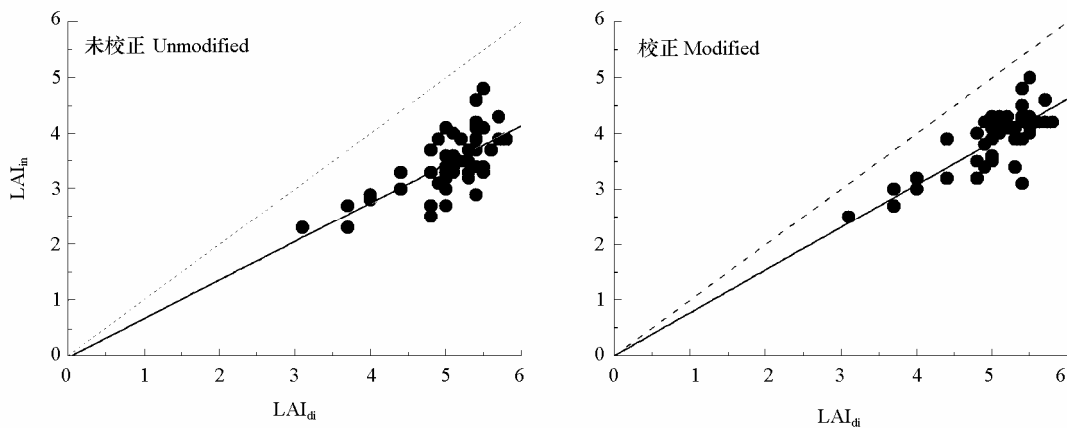


图 2 密植园中方框取样法(LAI<sub>di</sub>)与冠层分析仪法(LAI<sub>in</sub>)校正前后估计结果比较分析

Fig. 2 Comparative analysis of measured LAI with direct and indirect methods between the unmodified and modified in unthinned orchards

校正后,冠层分析仪估计的 LAI 的范围在 2.5~5.2 之间,其平均值为  $4.4 \pm 0.1$ ,比校正前提高了 33.3%,且通过校正,冠层分析仪的估计值与方框取样法的测量值之间的差值率减少到了 12.0%(表 2)。相关分析表明(图 2),校正后冠层分析仪的估计值与方框取法的测值之间的线性相关关系更为显著( $LAI_{di} = 1.3004 LAI_{in} - 0.0091$ ,  $r = 0.93$ ,  $P < 0.00001$ ,  $s.d. = 0.51$ )。

## 2.3 间伐园中直接与间接测量的叶面积指数对比分析

在间伐园中,用方框取样法测得 LAI 的范围在 2.3~4.6 之间,其平均值为  $3.6 \pm 0.2$ ;而校正前用

冠层分析仪估计 LAI 的范围在 1.2 ~ 3.3 之间, 其平均值为  $2.0 \pm 0.2$ , 冠层分析仪法低估了 35.5% (表 2)。

与密植园相比, 间伐园的 LAI 较小, 也是所试果园中 LAI 最小的一种类型, 尽管间伐大幅度地减少了果园的 LAI, 但叶片间的重叠效应和聚集效应没有改变, 且叶片的空间分布更不均匀, 因此, 冠层分析仪的估计值相应也较低。

相关分析 (图 3) 表明, 用方框取样法测得的 LAI 与校正前用冠层分析仪法估计的 LAI 存在极显著的线性相关关系 ( $\text{LAI}_{\text{di}} = 1.4025 \text{ LAI}_{\text{in}} + 0.0030$ ,  $r = 0.89$ ,  $P < 0.00001$ ,  $s.d. = 0.66$ )。

校正后 (图 3), 冠层分析仪估计的 LAI 的范围在 1.4 ~ 3.9 之间, 其平均值为  $2.7 \pm 0.2$ , 比校正前提高了 35.0%, 且通过校正, 冠层分析仪的估计值与方框取样法的测量值之间的差值率减少到了 12.9% (表 2)。

相关分析表明 (图 3), 校正后冠层分析仪的估计值与方框取法的测值之间的线性相关关系更为显著 ( $\text{LAI}_{\text{di}} = 1.2077 \text{ LAI}_{\text{in}} + 0.0705$ ,  $r = 0.93$ ,  $P < 0.00001$ ,  $s.d. = 0.51$ )。

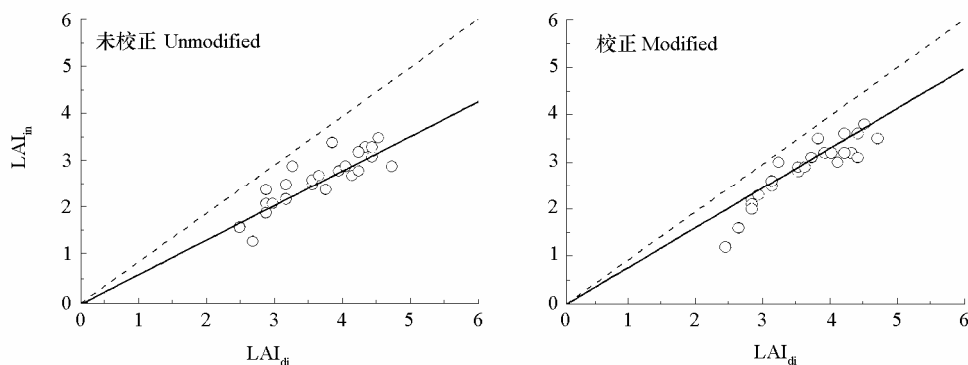


图 3 间伐园中方框取样法 ( $\text{LAI}_{\text{di}}$ ) 与冠层分析仪法 ( $\text{LAI}_{\text{in}}$ ) 校正前后估计结果比较分析

Fig. 3 Comparative analysis of measured LAI with direct and indirect methods between the unmodified and modified in thinned orchards

## 2.4 疏枝园中直接与间接测量的叶面积指数对比分析

在疏枝园中, 用方框取样法测得 LAI 的范围在 1.5 ~ 5.6 之间, 其平均值为  $3.1 \pm 0.3$ ; 而校正前用冠层分析仪估计 LAI 的范围在 0.8 ~ 3.3 之间, 其平均值为  $2.7 \pm 0.3$ , 冠层分析仪法低估了 25.0% (表 2)。

与密植园和间伐园相比, 疏枝园的 LAI 变化幅度较大, 这主要与疏枝量的大小有密切的关系, 疏枝量越大, 果园的 LAI 就越小。

另外, 疏枝园内叶片的空间分布更为均匀, 因此叶片间的重叠效应和聚集效应较小, 冠层分析仪的估计值相应也得到了提高。

相关分析 (图 4) 表明, 用方框取样法测得的 LAI 与校正前用冠层分析仪法测量的 LAI 存在极显著的线性相关关系 ( $\text{LAI}_{\text{di}} = 1.4706 \text{ LAI}_{\text{in}} + 0.0147$ ,  $r = 0.92$ ,  $P < 0.00001$ ,  $s.d. = 0.65$ )。

校正后, 冠层分析仪估计的 LAI 的范围在 1.6 ~ 4.6 之间, 其平均值为  $3.2 \pm 0.2$ , 比校正前提高 35.0%, 且通过校正, 冠层分析仪的低估减少到了 11.1% (表 2)。

相关分析 (图 4) 表明, 校正后冠层分析仪的估计值与方框取法的测值之间的线性相关关系更为显著 ( $\text{LAI}_{\text{di}} = 1.1762 \text{ LAI}_{\text{in}} + 0.0600$ ,  $r = 0.94$ ,  $P < 0.00001$ ,  $s.d. = 0.49$ )。

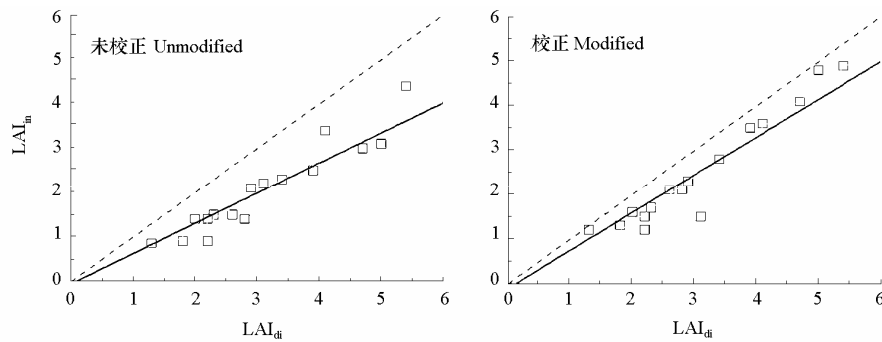


图4 疏枝园中方框取样法 ( $LAI_{di}$ ) 与冠层分析法 ( $LAI_{in}$ ) 校正前后估计结果比较分析

Fig. 4 Comparative analysis of measured LAI with direct and indirect methods between the unmodified and modified in orchards with partially-cut main branches

### 3 讨论

尽管所试果园内冠层结构、种植密度和管理措施不同,但是用冠层分析仪估计的和用方框取样法测量的 LAI 有极显著的线性相关关系,表明用冠层分析仪法和方框取样法得到的 LAI,据有较好的一致性。如果不进行校正,用冠层分析仪估计苹果园的与方框取样法测量的 LAI 相差较大,通过对不同类型苹果园的研究发现,前者普遍比后者偏低 25% ~ 35%。先前的研究也表明,用冠层分析仪估计落叶林的 LAI 总是比实测值小 (Deblonde et al., 1994; Sampson & Allen, 1995),如 Dufrene 和 Breda (1995) 在法国落叶林中的研究结果显示,用 LI-COR 2000 冠层分析仪估计的 LAI 比实测值小 30% 左右。尽管普遍存在估计值偏低的情况,由于用冠层分析仪估计的 LAI 与方框取样法的实测值存在极显著的线性相关关系,因此通过这种关系及适当的校正方法可提高冠层分析仪估计的准确性和可靠性。

随着 LAI 的增加,冠层分析仪估计值与方框取样法的测量值相差越大,这可能是随着叶面积的增大,叶片多集中分布于树冠的外层或上层,增加了叶片的聚集性和重叠效应,从而使冠层分析仪法的估计值更低。与密植园相比,间伐园冠层内叶片空间分布的差异性增大,叶片水平方向上的随机分布性较差,增大了透过率。然而冠层分析仪估计 LAI 的原理是建立在叶片随机分布的假设之上的 (Sampson & Allen, 1995),所以,间伐园比密植园和疏枝园内用冠层分析仪估计 LAI 的偏差更大。

删除鱼眼镜头最外圈 (平均视天顶角为  $68^\circ$ ) 的读数后,冠层分析仪法的估计值更接近用方框取样法测量值,其低估率从 25% ~ 35% 左右下降到 11% ~ 13%,通过校正显著地提高了冠层分析仪估计的准确性,这也与 Dufrene 和 Breda (1995) 的研究结果是一致的。鱼眼镜头最外圈所感应的包括了距测点较远的其他物体和低高度太阳光等方面的信息,并且在苹果园中,叶片多集中于树冠的上层,而鱼眼镜头外圈感应的主要是冠层之下包括树干在内的等非叶片因素的信息,所以,当去掉鱼眼摄像头最外圈的读数重新估计 LAI 时,可大幅度的提高冠层分析仪估计的可靠性。

另外,利用冠层分析仪法测量或估算果园的 LAI 时,尤其是测量果园 LAI 的动态变化时,还要考虑结果数量,果实的生长量和空间分布,以及农业技术措施 (如套袋) 对测量结果的影响,这些问题还需进一步的研究。

### References

- Bolstad P V, Gower S T. 1990. Estimation of leaf area index in fourteen southern Wisconsin forest stand using a portable radiometer. *Tree Physiology*, 7: 115 - 124.

- Chason J W, Baldocchi D D, Huston M A. 1991. A comparison of direct and indirect methods for estimating forest canopy leaf area. *Agricultural and Forest Meteorology*, 57: 107 - 128.
- Chen J M, Black T A. 1991. Measuring leaf area index of plant canopies with branch architecture. *Agricultural and Forest Meteorology*, 57: 1 - 12.
- Chen J M, Black T A, Adams R S. 1991. Measuring leaf area index of plant canopies with branch architecture. *Agricultural and Forest Meteorology*, 56: 129 - 143.
- Cutini A, Matteucci M, Mugnozza G S. 1998. Estimation of leaf area index with the Li-Cor LAI 2000 in deciduous forest. *Forest Ecology and Management*, 105: 55 - 65.
- Deblonde G, Penner M, Royer A. 1994. Measuring leaf area index with the LI-COR LAI 2000 in pine stands. *Ecology*, 75 (5): 1507 - 1511.
- Dufrene E, Breda N. 1995. Estimation of deciduous forest leaf area index using direct and indirect methods. *Oecologia*, 104: 156 - 162.
- Gao Deng-tao, Han Ming-yu, Li Bing-zhi, Zhang Lin-sen, Bai Ru. 2006. The characteristic of light distribution in apple tree canopy using WinsCanopy.2004a. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 15 (3): 166 - 170. (in Chinese)
- 高登涛, 韩明玉, 李丙智, 张林森, 白茹. 2006. 冠层分析仪在苹果树冠结构光学特性方面的研究. *西北农业学报*, 15 (3): 166 - 170.
- Gholz H L. 1982. Environmental limits on aboveground net primary production, leaf area and biomass in vegetation zones of the Pacific Northwest. *Ecology*, 63 (2): 469 - 481.
- Gower S T, Norman J M. 1991. Rapid estimation of leaf area index in conifer and broad-leaf plantation. *Ecology*, 72: 1896 - 1900.
- Marshall J D, Waring R H. 1986. Comparison of methods of estimating leaf-area index in old growth Douglas-Fir. *Ecology*, 67 (4): 975-979.
- Martens S N, Ustin S L, Rousseau, R A. 1993. Estimation of tree canopy leaf area index by gap fraction analysis. *Forest Ecology and Management*, 61: 91 - 108.
- Sampson D A, Allen H L. 1995. Direct and indirect estimates of Leaf Area Index (LAI) for lodgepole and loblolly pine stands. *Trees*, 9: 119 - 122.
- Smith F W, Sampson D A, Long J N. 1991. Comparison of leaf area index estimates from tree allometrics and measured light interception. *Forest Science*, 37 (6): 1682 - 1688.
- Vose J M, Sullivan N H, Clinton B D, Bolstad P V. 1995. Vertical leaf area distribution, light transmittance, and application of the Beer-Lambert law in four mature hardwood stands in the southern Appalachians. *Can J For Res*, 25: 1036 - 1043.
- Wang Qian, Chen Jing-ling, Sun Zhi-qiang. 2005. Determination of the height of active surfaces of the crop colonies using Li-2000 Canopy Analyzer. *Transactions of the CSAE*, 21 (8): 70 - 73. (in Chinese)
- 王 谦, 陈景玲, 孙治强. 2005. 用 LI-2000 冠层分析仪确定作物群体外活动面高度. *农业工程学报*, 21 (8): 70 - 73.
- Wang Qian, Chen Jing-ling, Sun Zhi-qiang. 2006. The utility of LAI-2000 canopy analyzer studying the sunlight distribution characteristics in different plant colonies. *Scientia Agricultura Sinica*, 39 (5): 922 - 927. (in Chinese)
- 王 谦, 陈景玲, 孙治强. 2006. LAI-2000 冠层分析仪在不同植物群体光分布特征研究中的应用. *中国农业科学*, 39 (5): 922 - 927.
- Wang Y S, Miller J M, Welles J M, Heisler G M. 1992. Spatial variability of canopy foliage in an oak forest estimated with fisheye sensors. *Forest Science*, 38: 854 - 865.
- Waring R H. 1983. Estimating forest growth and efficiency in relation to canopy leaf area. *Adv Ecol Res*, 13: 327 - 354.
- Yue Yu-ling, Wei Qin-ping, Zhang Ji-xiang, Wang Xiao-wei, Liu Jun, Zhang Qiang. 2008. Relationship between the distribution of relative light intensity and fruit quality of Trellis-trained 'Hwangkumbae'. *Acta Horticulturae Sinica*, 35 (5): 625 - 630. (in Chinese)
- 岳玉苓, 魏钦平, 张继祥, 王小伟, 刘 军, 张 强. 2008. 黄金梨棚架树体结构相对光照强度与果实品质的关系. *园艺学报*, 35 (5): 625 - 630.
- Zhang Xian-chuan, Gao Zhao-quan, Shu Xian-yu, Wei Qin-ping. 2005. The different ability of photosynthesis and transpiration in different canopy positions of apple with open-center system. *Acta Horticulturae Sinica*, 34 (3): 537 - 542. (in Chinese)
- 张显川, 高照全, 舒先迁, 魏钦平. 2005. 苹果开心形树冠不同部位光合与蒸腾能力的研究. *园艺学报*, 32 (6): 975 - 979.
- Zhang Xian-chuan, Gao Zhao-quan, Fu Zhan-fang, Fang Jian-hui, Li Tian-hong. 2006. Influences of tree form reconstruction on canopy structure and photosynthesis of apple. *Acta Horticulturae Sinica*, 34 (3): 537 - 542. (in Chinese)
- 张显川, 高照全, 付占方, 方建辉, 李天红. 2006. 苹果树形改造对树冠结构和冠层光合能力的影响. *园艺学报*, 34 (3): 537 - 542.