

基于植物冠层分析仪单线多角度测量的叶面积指数与叶倾角分布关系*

王绪鹏 范文义** 曲迪

(东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040)

摘要 叶面积指数(LAI)和叶倾角分布(LAD)作为研究植被冠层结构的重要参数,二者间存在一定的定量关系。以白桦(*Betula platyphylla*)纯林为研究对象,基于单线多角度观测结果、Norman和Campbell线性最小二乘反演技术(NC技术)以及Campbell模型三者结合,分析LAI和LAD间的定量关系。NC技术能很好地反演叶倾角分布,对实测的叶倾角分布的解释能力达90%以上;根据NC技术计算得到的叶倾角概率密度较实际偏大,Campbell模型模拟结果则偏小,尤其在 $[0^\circ, 10^\circ]$ 区间内;2种技术存在一种互补关系,而2种技术计算得到的结果取平均时,对实测叶倾角分布的解释能力得到一定提高,达96%以上;此外,多角度测量中利用NC技术反演时,叶倾角分布区间个数一般以取观测太阳天顶角个数的1/2为最佳。本研究为LAI和LAD的间接测量提供了方法,同时为大范围的LAI测量提供了验证手段,也为定量遥感模型参数优化提供了理论依据。

关键词 多角度;叶面积指数;叶倾角分布;椭球分布

中图分类号 Q948, TP79 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2014)12-3209-07

Relationship between leaf area index and leaf angle distribution based on single line, multi-angle measurement by TRAC. WANG Xu-peng¹, FAN Wen-yi^{1**}, QU Di¹ (*College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China*). *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(12): 3209-3215.

Abstract: A quantitative relationship exists between leaf area index (LAI) and leaf inclination angle distribution (LAD), two important parameters in study of vegetation canopy structure. In this study, the quantitative relationship between LAI and LAD of *Betula platyphylla* pure forest was analyzed based on the data of single line, multi-angle measurement by TRAC, with Norman and Campbell's linear least-square inversion technique (NC technique) and Campbell model. The NC technique received a very good inversion result of leaf inclination angle distribution, and its interpretation capacity to the measured leaf angle distribution was up to 90%. The leaf inclination probability density calculated by the NC technique was slightly higher than the real density, while the fitting result of Campbell model was relatively lower, especially in the interval of $[0^\circ, 10^\circ]$. Considering the complementary relationship between the results of the two techniques, the correlation between the mean values of the results of the two techniques and the measured results was up to 96%. Besides, when using the NC technique, it is best that the number of the leaf angle interval is half of the number of the solar zenith angle during multi-angle measurements. Our study provides an algorithm for LAI and LAD and a theoretical basis for parameter optimization of quantitative remote sensing. Meanwhile, the quantitative inversion of LAI can provide strong authentication in a wide range of LAI measurements.

Key words: multi-angle; leaf area index; leaf angle distribution; ellipsoidal distribution.

叶面积指数(leaf area index, LAI)和叶倾角分布(leaf angle distribution, LAD)都是表征植被冠层

结构的重要参数,用来反映植物叶面数量、叶子角度分布、植被群落生命活力及其环境效应,为植物冠层表面物质和能量交换的描述提供结构化的定量信息,是植被定量遥感研究中的关键问题。LAI是一

* 十二五国家科技支撑项目(2011BAD37B01)资助。

** 通讯作者 E-mail: fanwy@163.com

收稿日期: 2014-04-28 接受日期: 2014-07-07

个无量纲度量的参数,其大小与植被种类、生长期、LAD、叶簇和非生物量等因素有关(席建超等,2004;王希群等,2005;谭一波等,2008;徐希孺等,2009;王伟民,2010)。

LAI 的测定包括直接测量和间接测量。直接测量对叶片具有破坏性,如格点法、方格法、落叶收集法和分层收割法等。间接测量的方法主要是通过光学仪器测量相关参数直接或间接推算得到 LAI,测量相对方便快捷(Neumann *et al.*, 1989; Norman *et al.*, 1989)。间接测量方法依据测量原理可以分为 2 类:一种是基于冠层空隙率分析得到 LAI,如 Licor_2000(植被冠层分析仪)(王谦等,2006)等;另一种是基于冠层空隙大小的分布来确定 LAI,如植物冠层分析仪(tracing radiation and architecture of canopies, TRAC)(Chen *et al.*, 1991)和半球摄像仪器(如鱼镜头)等。

近年来, LAI 测量相关的研究已有很多(Leblanc, 2002; 周宇宇等, 2003; 李轩然等, 2007; 蒙继华等, 2007; 杨鹏等, 2007; 马泽清等, 2008), 直接测量法大多用于作物 LAI 的研究。对森林冠层测量 LAI 主要用间接方法。TRAC(Leblanc, 2002)作为新兴测量仪器,根据贝尔定律可确定 LAI 与空隙率(p_{gap})、聚集指数(Ω)及消光系数($G(\theta, \alpha)$)之间的定量关系,以其物理意义真实,理论推导严谨,测量操作简单得到广泛运用。TRAC 测量同时可得到林分冠层的空隙率、聚集指数等重要参数。 $G(\theta, \alpha)$ 又与叶片叶倾角和太阳天顶角直接相关。

以往研究多是在单一太阳天顶角下测量得到的 LAI,本研究则是针对同一地点多个太阳天顶角观测。TRAC 原理与贝尔定律一致,在多个太阳天顶角的情况下观测,结合 NC(Norman 和 Campbell)线性最小二乘理论(Chen *et al.*, 1991),可以反演出对应 LAD 区间的 LAI 分布,定量确定 LAI 与 LAD 的关系。Campbell 椭球分布函数则可以拟合出不同树种的 LAD,反推则可以反演出对应树种叶倾角的椭球分布参数(χ , 椭球横半轴与纵半轴之比),以 LAD 为纽带,对比分析两种理论可以判断 TRAC 测量的准确性。尽管 TRAC 测量可以直接得到 LAI,但本研究利用 TRAC 测量得到的相关参数,以 NC 线性最小二乘理论反演得出 LAI,并结合实测结果及验证后的 Campbell 模型拟合得到的叶倾角概率分布结果对比分析,找出准确计算不同 LAD 区间的 LAI 的方法。在过去,大范围的 LAI 的获取比较困难,现

在测定技术的发展和遥感技术的应用为大范围 LAI 的测量提供了条件,但是遥感手段得到的 LAI 仍需要进一步的地面验证。本研究的目的一方面得到定量准确的测定 LAI 方法,另一方面,为大范围的 LAI 测量提供有力的验证理论基础,同时也为 LAD 的获取提供方法。

1 研究区域与数据来源

1.1 研究区域概况

黑龙江省大兴安岭地区塔河林业局盘古林场始建于 1969 年,位于塔河县城西北部 96.5 km 处,地理坐标为 $52^{\circ}41'57.1''N$, $123^{\circ}51'56.5''E$,施业区面积 152127 km²,林场辖区内森林覆盖率为 88.86%,主要树种有落叶松(*Larix gmelinii*)、樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)、白桦(*Betula platyphylla*)等,森林中有黄芪(*Astragalus membranaceus*)、五味子(*Schisandra chinensis*)等药材和雪兔(*Lepus timidus*)、飞龙(*Bonasia bonasia*)等珍贵动物资源。

1.2 数据来源

本实验数据于 2011 年 8 月 11 日于盘古林场调查获得,在一片白桦纯林选定中心点,利用 TRAC 仪器每隔一段时间(约 0.5 h),做一条垂直于太阳光线方向的样线,每条样线长为 100 m(沿样线方向中心点两侧各 50 m)(图 1),TRAC 测量时采样间隔为 10 m,每条样线测量时均是 TRAC 手持杆采样传感器部分高于和低于草本灌木往返测 2 次。经测量计算该白桦纯林叶片的平均叶宽为 36.7 mm,木质部的比率经计算(拍摄样线入射光线一侧的林分照片,进一步对照片处理过后,计算木质部分占总面积的比率)是 0.12,由于是阔叶林,所以针枝比为 1(表 1)。其中叶倾角数据也是同年同月在盘古林场

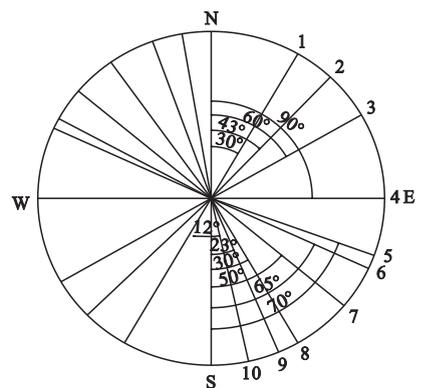


图 1 TRAC 单线多角度测量样线示意图

Fig. 1 Diagram of single line and multi-angle measurement by TRAC

表1 TRAC 测量白桦纯林样地单线多角度测量结果

Table 1 Results of single line and multi-angle measurement in *Betula platyphylla* pure forest sample by TRAC

序号	时间	α	ω (mm)	磁北角度 (°)	长度 (m)	纬度 (N)	经度 (E)	γ	采样间隔 (m)
1	9:10	0.12	36.7	北偏东 30	100	52°42'43"	123°50'7"	1	10
2	10:00			北偏东 43					
3	10:35			北偏东 60					
4	11:20			正东					
5	12:20			南偏东 70					
6	12:50			南偏东 65					
7	13:30			南偏东 50					
8	14:25			南偏东 30					
9	14:50			南偏东 23					
10	15:20			南偏东 12					

时间为 2011 年 8 月 11 日,实际观测时,视天空云量情况定,所以时间间隔并非完全一致。 α : 木质部的比率; ω : 平均叶宽; γ : 针枝比。

实测得到,处理结果参见王绪鹏等(2013)的拟合结果。

2 理论基础与研究方法

2.1 理论基础

本研究参照的主要理论包括:Chen 等(1991)的 NC 线性最小二乘理论和 Campbell(1990)的叶倾角椭球分布理论。前者基于贝尔定律,对公式做巧妙转换得到多个太阳高度角观测下透光率 $T(\theta)$ 、消光系数和有效叶面积指数 (L_e) 之前的关系式(式 1)。需要注意的是,当观测的太阳高度角个数 m 不太大或叶倾角分布区间个数 n 较大时,得到的解可能是病态、不稳定的(即对 T 的微小变化很敏感),为解决这一问题,可采用 Norman 和 Campbell(1989)提出的方法,在式中加入一个“阻尼因子”,“阻尼因子”被定义为方阵,其主对角线上除左上角和右下角为 1 外,其余为 2,与主对角线相邻的元素均为 -1,方阵其他元素均为 0,例如对 4 阶方阵(式 2)。 λ 为一正常数,在确定其值时,可对上式各个元素人为地附加一个微小的随机误差,然后让 λ 从 0.001 开始逐渐增大,直到求得的解对 T 的随机误差不太敏感时为止(Chen *et al.*, 1991; 刘安国, 1994)。

$$p(\theta) = e^{-G(\theta, \alpha)\Omega L \cos\theta} \quad (1)$$

$$K = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & \cdots & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & \cdots & K_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ K_{m1} & K_{m2} & \cdots & K_{mn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

后者中, Campbell 认为服从椭球面叶倾角分布的冠层,叶倾角密度函数等同于椭球面叶角密度分布,可用面积表示,并最终得出叶倾角密度函数(叶

倾角概率密度与叶倾角之前的函数关系,解算这种函数关系的关键是对参数 χ (为椭球水平半轴和垂直半轴的比值)的求解)。综上所述,2 种不同的理论中,均与叶倾角概率密度 $[g(\alpha)]$ 分布有关。虽然在 NC 线性最小二乘理论中未直接出现 $g(\alpha)$,但可以分别用对应不同叶倾角分布区间的有效叶面积指数与总有效叶面指数间的比值来确定,这也是研究叶面积指数与叶倾角分布间关系的重要部分。

2.2 研究方法

本研究的目的是基于 TRAC 单线测量多角度样线数据,通过 NC 线性最小二乘反演理论求得对应不同叶倾角区间的有效 LAI,并分别与 Campbell 叶倾角椭球分布理论拟合结果及实测结果对比分析,来研究 LAI 与 LAD 的关系。无论是 TRAC 的原理还是 NC 线性最小二乘反演理论都是基于贝尔定律,实际测量中,冠层下的空隙率(透光率)可以用 TRAC 测量得到,这样在 NC 理论中除了有效 LAI 未知外,其他参数都已知或可以间接推算出(聚集指数由 TRAC 提供;太阳天顶角可以通过时间及经纬度坐标计算得出;叶倾角则是根据太阳天顶角的个数定义分布的区间个数及各个区间的中值)。

NC 线性最小二乘最终得出的是对应叶倾角分布区间的有效 LAI,与总有效 LAI 和叶倾角分布区间间隔的积之比就可以计算出白桦不同叶倾角区间下的叶倾角概率密度。而 Campbell 理论的核心就是叶倾角的概率密度分布函数,王绪鹏等(2013)已验证了 Campbell 应用在大兴安岭地区 LAD 的分析是可行的,且已求出白桦的 Campbell 椭球分布函数的参数 χ 为 2.573,则可以用 Campbell 模型直接求算白桦的叶倾角概率密度分布。2 种理论结果结合实测数据统计结果对比分析,即可验证 TRAC 仪器

测量的准确性,又可验证 Campbell 拟合得到白桦的 LAD 参数的正确性。

本研究所用的 2 种理论均是用 MatlabR2010a 编程实现。NC 理论程序化后主要包括 3 个模块:太阳天顶角和方位角计算模块、G 函数(消光系数矩阵)、解算有效 LAI 模块,在解算有效 LAI 模块中的“阻尼因子”作者给定初值 0.001,以步长为 0.001,直到最终解对透光率(T)的随机误差不太敏感时为止;Campbell 模型在本研究中不用拟合参数,参数已知,程序化后只有一个 g 函数(叶倾角概率密度分布函数)模块。

3 结果与分析

NC 线性最小二乘理论,所需要的已知参数包括:太阳天顶角、冠层下的透光率和叶片的聚集指数(表 2),计算出冠层的有效 LAI,结合聚集指数推算出真正有效 LAI。表 2 给出的是 TRAC 测量的数据,结果中已经分别给出冠层的有效和近似真实的 LAI,留作与 NC 理论反演结果对比分析。太阳天顶角可以根据气象学公式计算得到(罗新宇,1993;庄肃,1993;王国安等,2007;贺晓雷等,2008;朱艳伟,2012),公式参数则是 TRAC 测量记录的每条样线的时间及 GPS 记录的样线中心点坐标;此外,表 3 也给出计算得到的对应时刻的太阳的方位角。从表 2 和表 3 可以看出,TRAC 自带程序得到的太阳天顶角与根据气象学公式计算结果有些许差别,本研究对比分析中,为严谨起见统一参数,如太阳天顶角均采用由 TRAC 自带程序提供的结果。

太阳方位角即太阳所在的方位,指太阳光线在地平面上的投影与当地子午线的夹角,可近似地看作是竖立在地面上的直线在阳光下的阴影与正南方的夹角,太阳方位角在本研究中以目标物正北方向的方位角为 0° ,东侧方向的方位角为正,西侧则为负。为了记录方便,表 3 记录的全为方位角的绝对值,计算结果是由作者编写程序计算得出,实测结果可以参见表 1,实测的太阳方位角是根据实测的样线方向的磁北方位角与太阳位置的几何关系得到

的,实测与计算得到的方位角相差在 4 度以内,而实测的磁北角不可避免的会有人为误差出现,所以可以判定计算与实测太阳方位角,两者是近乎一致的,进而说明实测的对应时刻的太阳天顶角和方位角是正确的,可以应用于 NC 理论的反演中。

NC 理论反演时,公式(10)的求解过程实际上就是求解多元方程组,因太阳天顶角的个数($m=10$)必须大于叶倾角在 0° 到 90° 内所分的区间个数(n),方程组才可解。表 4 分别是在当区间数为 $n=2,3,\dots,8$ 的时候,反演得到的对应区间的有效 LAI,以及增加的约束矩阵的“阻尼因子”数值。从表 4 可以看出,在区间个数为 2 时得到的有效 LAI 是异常的,对应的叶倾角区间之间的有效 LAI 近乎相同,且阻尼因子是其初始值,说明给定的阻尼因子从 0.001 起以 0.001 为步长增加,迭代求解时并未得到一个合理的解,因此在接下来的对比分析中 $n=2$ 情况将剔除。剔除异常值后,NC 理论反演得到的总有效 LAI 平均值为 2.209,表 2 中 TRAC 测量计算得到的平均总有效 LAI 平均为 2.181,两者的相对误差为 1.28%,从对比结果看,差别较小,因此,调查区域的白桦纯林的有效 LAI 在 2.181~2.209。

NC 理论反演得到各个叶倾角区间内的有效 LAI,根据公式(13)就可以求出对应区间的叶倾角概率密度分布情况(表 5),表 5 同时给出了 n 在不同取值时各区间的叶倾角的中值,将表 5 制图为叶

表 2 TRAC 测量处理结果

Table 2 Processing result of TRAC measurement

序号	太阳天顶角	空隙率	聚集指数	叶面积指数	有效叶面积指数
1	48.940	0.131	0.89	2.65	2.359
2	42.370	0.227	0.83	2.32	1.926
3	39.070	0.195	0.80	2.80	2.240
4	37.260	0.154	0.89	2.95	2.626
5	37.930	0.293	0.87	1.97	1.714
6	38.545	0.227	0.82	2.49	2.042
7	42.610	0.151	0.84	2.91	2.444
8	48.760	0.138	0.89	2.57	2.287
9	52.000	0.147	0.86	2.41	2.073
10	56.300	0.118	0.91	2.31	2.102

表 3 通过经纬度及测量时间计算得到的太阳天顶角和方位角

Table 3 Sun zenith angle and azimuth angle calculated with latitude and longitude, and time epoch

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
太阳天顶角	47.783	40.789	37.778	35.489	36.182	37.998	40.989	47.151	50.506	54.690
太阳方位角	计算结果	121.738	140.179	152.955	173.839	164.247	151.930	139.640	123.242	116.485
	实测结果	120.000	143.000	150.000	180.000	160.000	155.000	140.000	120.000	113.000

表 4 叶倾角分为 n 个区间时 NC 线性最小二乘反演结果

Table 4 Inversion results of the NC linear least-square inversion theory at different leaf angle interval

	$n=8$	$n=7$	$n=6$	$n=5$	$n=4$	$n=3$	$n=2$
有效 LAI	0.697	0.792	1.026	1.099	1.642	1.780	1.654
	0.602	0.654	0.676	0.720	0.005	0.002	1.659
	0.417	0.386	0.000	0.000	0.474	0.181	-
	0.148	0.000	0.227	0.088	0.596	-	-
	0.000	0.051	0.295	0.111	-	-	-
	0.031	0.074	0.312	-	-	-	-
	0.045	0.079	-	-	-	-	-
	0.048	-	-	-	-	-	-
总有效 LAI	1.988	2.036	2.536	2.018	2.717	1.963	3.313
阻尼因子	1.661	0.872	0.162	0.440	0.057	0.152	0.001

表 5 叶倾角分为 n 个区间时 NC 理论求算各区间的叶倾角概率密度

Table 5 Leaf angle probability density at different intervals calculated by the NC linear least-square inversion theory

	$\bar{\alpha}_i$	$n=8$	$\bar{\alpha}_i$	$n=7$	$\bar{\alpha}_i$	$n=6$	$\bar{\alpha}_i$	$n=5$	$\bar{\alpha}_i$	$n=4$	$\bar{\alpha}_i$	$n=3$
叶倾角概率	5.625	1.791	6.429	1.733	7.500	1.989	9.00	1.733	11.250	2.072	15.000	1.731
密度分布	16.875	1.548	19.286	1.432	22.500	1.311	27.000	1.136	36.250	0.006	45.000	0.002
	28.125	1.072	32.143	0.844	37.500	0.001	45.000	0.001	61.250	0.598	75.000	0.176
	39.375	0.380	45.000	0.000	52.500	0.440	63.000	0.139	86.250	0.752	-	-
	50.625	0.000	57.857	0.111	67.500	0.571	81.000	0.174	-	-	-	-
	61.875	0.079	70.714	0.161	82.500	0.605	-	-	-	-	-	-
	73.125	0.114	83.571	0.174	-	-	-	-	-	-	-	-
	84.375	0.123	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

$\bar{\alpha}_i$ 为对应叶倾角区间的中值。

倾角概率密度曲线对比(图 2)。对比图 2 和表 5 可以看出,当叶倾角区间的个数越多叶倾角概率密度曲线越平滑,但仍不能确定出,太阳天顶角个数 $m=10$ 为前提,叶倾角区间个数 n 取值为多少时,NC 理论反演的结果是最优的,还需要通过与实测结果进行线性回归分析。

NC 理论反演结果作为预测结果,实测的叶倾角的统计结果作为已知结果,两者进行线性回归分析,

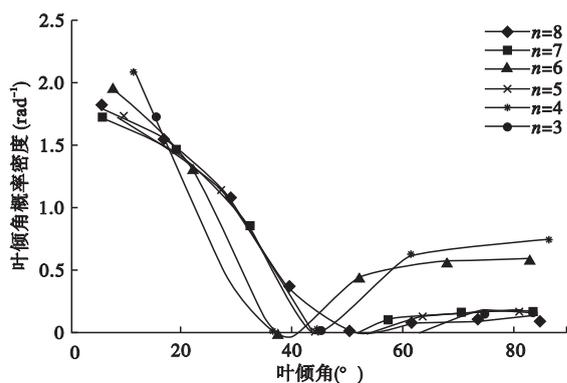


图 2 叶倾角分为 n 个区间时 NC 理论求算各区间叶倾角概率密度

Fig.2 Curve charts of the leaf angle probability density at different intervals calculated by the NC linear least-square inversion theory

分析结果整理在表 6。从表 6 可以看出, n 的取值在 3、4、5、6、7 和 8 时,均方根误差(RMSE)随 n 的取值波动,且在 $n=8$ 和 $n=5$ 时最小,说明此时 NC 反演结果精度最高;判定系数(R^2)越大越接近 1,说明预测值与已知值的偏差越小,在 $n=5$ 和 8 时, R^2 均达 90% 以上,此时 NC 理论的反演结果对已知结果的解释能力最强。因此可以得出,虽然“阻尼因子” λ 取 0~0.5 就可使结果的状态大为改善。但是,即使加入了“阻尼因子”,仍需在 $n < m$ 时的特定值时,NC 理论才能得到更好的反演结果。

图 3 是实测的叶倾角统计后的概率密度分布、NC 理论反演得到的叶倾角概率密度分布和

表 6 NC 反演结果及实测结果间的线性回归分析参数

Table 6 Parameters of the linear regression analysis between results of the NC linear least-square inversion theory and the measured results

	RMSE	R^2
$n=8$	0.168	0.939
$n=7$	0.215	0.892
$n=6$	0.448	0.525
$n=5$	0.211	0.904
$n=4$	0.303	0.353
$n=3$	0.327	0.823

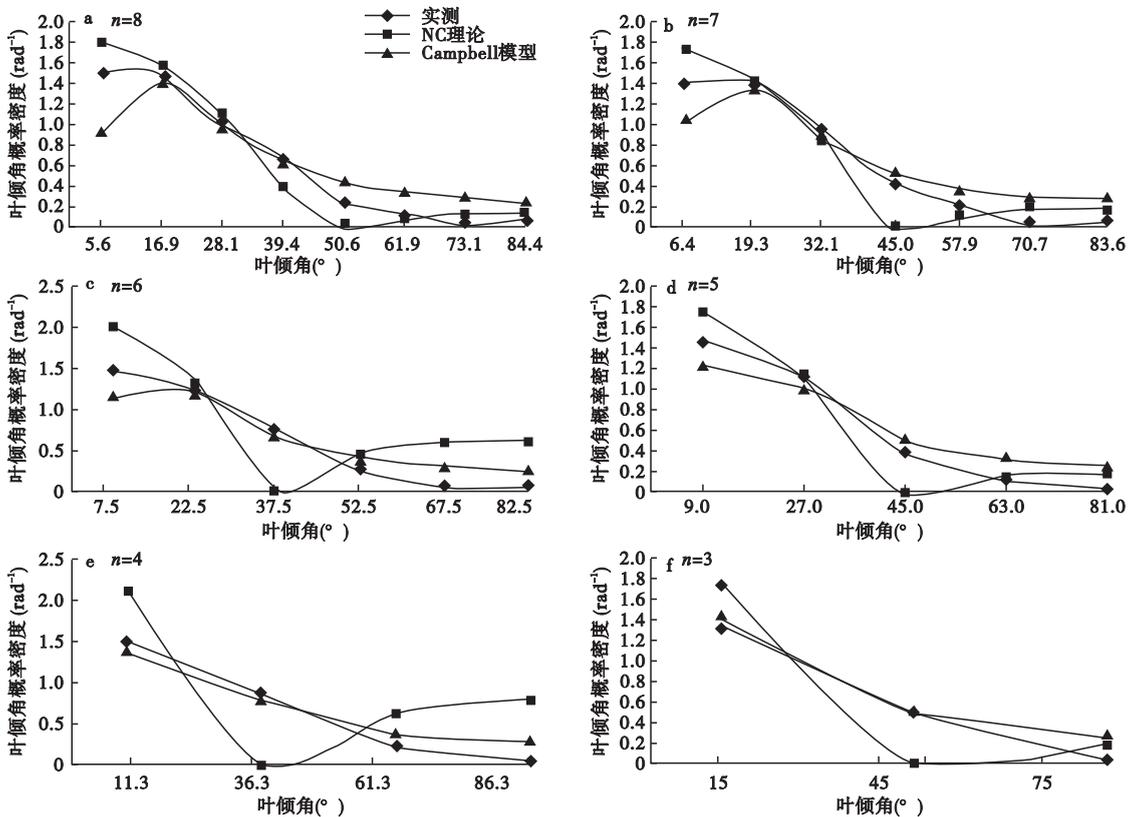


图3 实测结果、NC反演结果和Campbell拟合结果的叶倾角概率密度分布对比

Fig. 3 Comparison of leaf angle probability density distribution between results of the measurement, the NC linear least-square inversion theory and the fitting results of Campbell ellipsoid distribution function

Campbell 椭球分布函数拟合得到的叶倾角概率密度分布在 n 取不同值间的对比结果。从图3可以看出,3种结果的叶倾角概率密度分布曲线均属于单峰型曲线,而无论 n 取何值时,实测结果的叶倾角概率分布曲线均是介于NC理论反演结果和Campbell函数拟合结果曲线之间。比如在叶倾角区间为 $[0^\circ, 10^\circ]$ 区间内,由于Campbell函数在当叶倾角为 0° 时拟合的叶倾角概率密度也为0(Thomas *et al.*, 2000),Campbell函数拟合的概率密度要比实测的要

偏小,而NC理论由于得到的是对应叶倾角区间中值的离散结果,反演结果偏大。在其他叶倾角区间时,2种理论从曲线对比上可以看出,两者间存在一种互补关系,因此,当2种理论得到的对应叶倾角区间的概率密度取平均值,与实测结果再做线性化回归分析(表7)。从表7可以看出,同样的在 $n=5$ 和 $n=8$ 时反演的结果最好,且比单纯用NC理论反演结果时,对实测LAD情况的解释能力要强,判定系数高达96%以上。

表7 NC反演结果与Campbell拟合结果的平均值与实测结果间的线性回归分析参数

Table 7 Parameters of the linear regression analysis between results of the NC linear least-square inversion theory and the fitting results of Campbell ellipsoid distribution function

	RMSE	R^2
$n=8$	0.087	0.972
$n=7$	0.104	0.958
$n=6$	0.23	0.774
$n=5$	0.106	0.961
$n=4$	0.163	0.653
$n=3$	0.198	0.903

4 结论与讨论

本研究主要得出以下几点结论:TRAC测量研究区域白桦纯林的总的有效LAI在2.181~2.209,经聚集指数变换后得出的真实LAI在2.536~2.569;在太阳天顶角个数取10时,叶倾角在区间 $[0^\circ, 90^\circ]$ 内区分区间个数为5或8时,NC理论的反演结果最好;NC理论与Campbell模型得到的结果存在一种互补,两者提到的叶倾角概率密度分布取平均值,与实测结果线性回归分析时,解释能力更强,达96%以上,且RMSE更小。

虽然本研究中太阳天顶角为 10 时,分析后得出的结论是叶倾角区间分为 5 或 8,NC 理论的反演结果最好,但是为了一般化叶倾角区间个数的确定,作者定义太阳天顶角个数的 1/2 作为 NC 理论反演时最佳叶倾角区间个数。NC 理论与 Campbell 理论两者的结果的均值作为最终反演结果,能更好地解释实际情况,且弥补了 Campbell 模型在当叶倾角取零时叶倾角根概率密度也为零的不足,更加准确地确定出 LAI 与 LAD 间的定量关系。相比单角度测量,基于多个太阳天顶角观测得到的 LAI,人为误差大大降低。此外,实测数据统计结果、NC 理论反演结果和 Campbell 模型拟合结果,3 种结果对比分析能很好验证结论的准确性。本研究不仅提供了 LAI 和 LAD 的计算方法,更是为定量遥感模型(如 4-SCALE 模型)中部分参数优化提供理论依据。

综上所述,确定个数的太阳天顶角观测下 TRAC 测量得到的植被 LAI,可以定量确定叶倾角的分布情况(叶倾角的分布区间个数是观测太阳天顶角个数的 1/2 最佳)。同样,在已知叶倾角分布情况时,也可以定量计算不同太阳天顶角观测时的 LAI。但在实际的应用中,LAI 还是直接用 TRAC 或 LAI200 测量获取即可,本研究的主要目的是找到另一种方法来获取 LAD。在 4-SCALE 模型中,模型中代入的是平均叶倾角,而消光系数也多用常数 0.5。基于本研究,在模型中引入叶倾角分布,不仅可以定量确定消光系数,进而定量确定冠层的空隙率;而且叶倾角分布可以定量求算对应叶倾角分布区间的有效叶面积指数和总有效叶面积指数,在已知真实叶面积指数的情况下,又可以得到冠层叶片的聚集指数,对冠层结构的描述也更加逼近真实、更加准确。

参考文献

贺晓雷,于贺军,李建英,等. 2008. 太阳方位角的公式求解及其应用. 太阳能学报, **29**(1): 69-73.
李轩然,刘琪璟,蔡哲,等. 2007. 千烟洲针叶林的比叶面积及叶面积指数. 植物生态学报, **31**(1): 93-101.
刘安国. 1994. 作物叶面积指数和叶倾角分布函数的一种推算方法. 中国农业气象, **15**(6): 10-14.
罗新宇. 1993. 太阳赤纬的近似计算. 铁路航测, (2): 18-21.
马泽清,刘琪璟,曾慧卿,等. 2008. 南方人工林叶面积指数的摄影测量. 生态学报, **28**(5): 1971-1980.
蒙继华,吴炳方,李强子. 2007. 全国农作物叶面积指数遥感估算方法. 农业工程学报, **23**(2): 160-167.
谭一波,赵仲辉. 2008. 叶面积指数的主要测定方法. 林业调查规划, **33**(3): 45-48.

王谦,陈景玲,孙治强. 2006. 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.
王国安,米鸿涛,邓天宏,等. 2007. 太阳高度角和日出日落时刻太阳方位角——年变化范围的计算. 气象与环境科学, **30**(增刊1): 161-164.
王伟民. 2010. 基于多角度高光谱 CHRIS 观测的叶面积指数和叶倾角分布同步反演研究. 遥感定量反演算法研讨会.
王希群,马履一,贾忠奎,等. 2005. 叶面积指数的研究和应用进展. 生态学杂志, **24**(5): 537-541.
王绪鹏,范文义,温一博. 2013. 椭球分布函数的大兴安岭地区主要树种叶倾角分布模拟. 应用生态学报, **24**(11): 3199-3206.
席建超,张红旗,张志强. 2004. 应用遥感数据反演针叶林有效叶面积指数. 北京林业大学学报, **26**(6): 36-39.
徐希孺,范闻捷,陶欣. 2009. 遥感反演连续植被叶面积指数的空间尺度效应. 中国科学(D辑): 地球科学, **39**(1): 79-87.
杨鹏,吴文斌,周清波,等. 2007. 基于作物模型与叶面积指数遥感影像同化的区域单产估测研究. 农业工程学报, **23**(9): 130-136.
于贺军. 2006. 气象用太阳赤纬和时差计算方法研究. 气象水文海洋仪器, (3): 50-53.
周宇宇,唐世浩,朱启疆,等. 2003. 长白山自然保护区叶面积指数测量及结果. 资源科学, **25**(6): 38-42.
朱艳伟. 2012. 光伏发电系统效率提高理论方法及关键技术研究(博士学位论文). 北京:华北电力大学.
庄肃. 1993. 太阳赤纬 δ 值的订正. 太阳能, (1): 10, 31.
Campbell GS. 1986. Extinction coefficients for radiation in plant canopies calculated using an ellipsoidal inclination angle distribution. *Agricultural and Forest Meteorology*, **36**: 317-321.
Campbell GS. 1990. Derivation of an angle density function for canopies with ellipsoidal leaf angle distributions. *Agricultural and Forest Meteorology*, **49**: 173-176.
Chen JM, Black TA, Anams RS. 1991. Evaluation of hemispherical photography for determining plant area index and geometry of a forest stand. *Agricultural and Forest Meteorology*, **56**: 129-143.
Leblanc SG. 2002. Correction to the plant canopy gap-size analysis theory used by the tracing radiation and architecture of canopies instrument. *Applied Optics*, **41**: 7667-7670.
Neumann HH, Den Hartog G, Shaw RH. 1989. Leaf area measurements based on hemispheric photographs and leaf-litter collection in a deciduous forest during autumn leaf fall. *Agricultural and Forest Meteorology*, **45**: 325-345.
Norman JM, Campbell GS. 1989. Canopy structure// Pearcy RW, Ehleringer JR, Mooney HA, eds. *Plant Physiological Ecology: Field Methods and Instrumentation*. London: Chapman and Hall: 301-325.
Thomas SC, Winner WE. 2000. A rotated ellipsoidal angle density function improves estimation of foliage inclination distributions in forest canopies. *Agricultural and Forest Meteorology*, **100**: 19-24.