

玉米全生长期叶面积指数收获测量法的改进

姚延娟^{1,2,3}, 范闻捷¹, 刘强², 李丽², 陶欣¹, 辛晓洲², 柳钦火²

(1. 北京大学遥感与地理信息系统研究所, 北京 100871; 2. 中国科学院遥感应用研究所
遥感科学国家重点实验室, 北京 100101; 3. 环境保护部卫星环境应用中心, 北京 100029)

摘要: 农作物全生长期冠层表现不同的结构, 常规的叶面积指数测量仪器不能适用于全生长期的叶面积指数测量, 提出改进的收获测量法可进行玉米全生长期叶面积指数的测量, 并且测量结果也具有可比性, 该法在减少常规直接测量法工作量的同时也减少了对玉米的破坏。通过对比不同生长期单株样本叶面积计算的两种方法, 得出二元二次回归法比常规的形状因子法计算精度高的结论。同时, 分析不同生长期玉米秆所占总面积比例的规律, 得出进行叶面积指数的准确测量, 玉米秆的表面积必须进行准确考虑。该研究可为同类作物叶面积指数测量提供参考, 可以有效推动叶面积指数的准确快速测量及遥感反演的验证工作。

关键词: 玉米, 叶面积指数, 测量

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2010.08.032

中图分类号: TP391.41, TP79

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2010)-08-0189-06

姚延娟, 范闻捷, 刘强, 等. 玉米全生长期叶面积指数收获测量法的改进[J]. 农业工程学报, 2010, 26(8): 189-194.
Yao Yanjuan, Fan Wenjie, Liu Qiang, et al. Improved harvesting method for corn LAI measurement in corn whole growth stages[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(8): 189-194. (in Chinese with English abstract)

0 引言

叶面积指数 (leaf area index, LAI) 可用来反映作物的生长状况, 其变化体现了植被生长发育的不同状态^[1], 与植被的光合作用、作物蒸发、蒸散等过程密切相关, 是应用于作物监测、估产和病害评价的一个关键的生态参数^[2-3]。准确测量 LAI 具有重要的意义。LAI 通常定义为单位地表面积上的叶子表面积总和的一半^[4], 计算主要分为点上叶面积指数的计算与面上叶面积指数的计算^[5]。面上叶面积指数的获得主要基于遥感图像的反演得到, 这种方法又称为空间检测法^[6], 面上 LAI 反演的精度验证和不同遥感传感器反演产品的相互对比, 都需要点上 LAI 的准确测量。点上 LAI 主要通过地面实测的方法获取^[7-8], 主要有两种方法: 直接测量法和间接测量法, 直接测量法也是间接测量法订标或评价的标准。

直接测量法包括收获测量法 (harvesting), 落叶收集法 (litter collection) 和异速生长测定法 (allometry)^[7], 本法以具有破坏性、工作量大的特点而在实际应用中受到限制^[7-8]。间接测量法是指通过测量冠层辐射的透过率, 利用辐射传输方程计算 LAI^[9], 这种方法基于叶子在冠层内分布的统计与概率的理论^[10], 具有非破坏性和工作量小的特点, 缺点在于仪器设计的原理都有一定的使用条件及仪器设计时的假定都会带来一定的测量误差^[11]。用

于测量透过冠层的辐射量常用的仪器有 SunSCAN, AccuPAR, LAI-2000, DEMON, TRAC, MVI^[12], 不同的 LAI 测量仪器适合于不同的观测目标。与直接测量方法相比, 间接测量方法常常低估 LAI, 不同类型的冠层, 低估范围通常在 25%~50%^[13-15]。虽然目前有许多方案来克服由于聚集所带来的偏差, 但间接测量的偏差问题并没有根本解决。

成行种植是中国许多农作物的种植方式, 在玉米生长的初期, 冠层为特别稀疏的结构, 如果采用间接的仪器测量法, 由于不满足仪器准确测量的基本条件而使测量结果有较大的误差甚至是错误的; 随着玉米的生长, 冠层的结构特征变为比较均匀的结构, 可以用 LAI-2000 进行 LAI 测量。但由于直接测量法与间接测量法精度不同, 不同生长期测量的玉米叶面积指数没有可比性。这样实际工作中需要一种破坏性小、精度高、测量结果具有可比性的 LAI 测量方法。本文提出改进的收获测量法 (improved-harvesting method, IHM) 对玉米的叶面积指数进行测量, 其出发点是直接测量法, 但改进了通常收获测量法的破坏性及工作量大的缺点, 这对于遥感验证时需要大量的实地 LAI 测量尤为实用。

1 试验简介

具备鲜明高寒与干旱区伴生为主要特征的黑河流域 (东经 96°42'~102°00', 北纬 37°41'~42°42'), 是典型的内陆河流域, 包括高山冰雪带、森林草原带、平原绿洲带及戈壁荒漠带等不同的景观类型。本文的试验区盈科灌区绿洲站位于黑河中游, 试验场周围平坦开阔, 是个比较理想的绿洲农田观测站。地面测量工作平均每隔 5 d 测量 1 次, 可以及时捕捉叶面积指数的变化规律。试

收稿日期: 2009-10-15 修订日期: 2010-03-30

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目资助 (2007CB714402); 国家自然科学基金资助项目 (NSFC40801125; NSFC40871186); 中国博士后科学基金资助项目 (No. 20070420242) 资助

作者简介: 姚延娟 (1974-), 女, 河南洛阳人, 博士, 主要从事地表参数反演及不确定性研究。北京 北京大学遥感与地理信息系统研究所, 100871。
Email: yjyao2008@yahoo.com.cn

验期为 2008 年 5 月中下旬—2008 年 7 月，具体试验日期如表 1 所示，有效地形成了玉米的生长初期、中期和中后期的观测序列。

表 1 地面试验测量日期及相应的玉米叶片数、播种天数表

Table 1 Date of experiment and corresponding leaf number of corn and number of days after planting

测量日期(年-月-日)	叶片数	播种天数/d
2008-05-20	6	32
2008-05-25	7	37
2008-05-28	7	40
2008-05-31	9	43
2008-06-06	9	49
2008-06-11	13	54
2008-06-16	14	59
2008-06-22	15	65
2008-06-27	15	70
2008-07-02	14	75
2008-07-09	14	82

注：表中的叶片数是指采样样本的平均叶片个数进行统计的。

2 IHM 法介绍及 LAI 结果分析

2.1 改进的收获测量方法简介

IHM 法包括室外和室内两部分工作。室外工作包括 3 点：一是统计单位面积内玉米的株数；二是测量有代表性植株的每片叶子的长和宽；三是选择有代表性的玉米进行收获以进行室内测量。室内测量工作主要是测量收获的每株玉米每片叶子的长、宽和面积及秆的面积。

具体计算公式为公式 (1)、(2)

$$LAI = S \times N \tag{1}$$

$$S = f(Len, Wid) / (1 - R_s) \tag{2}$$

式中： LAI ——叶面积指数； S ——单株作物总面积； N ——单位面积内株数； $f(Len, Wid)$ ——由叶子的长和宽计算叶面积的函数； R_s ——秆表面积占每株总面积的比例

IHM 方法的关键在于田块测量的每片叶子的长宽值如何高精度计算出的整株玉米的叶面积及秆面积所占每株总面积的规律的分析，下面就这两个方面进行分析并进行 LAI 的计算。

2.2 单株玉米叶子总面积的计算

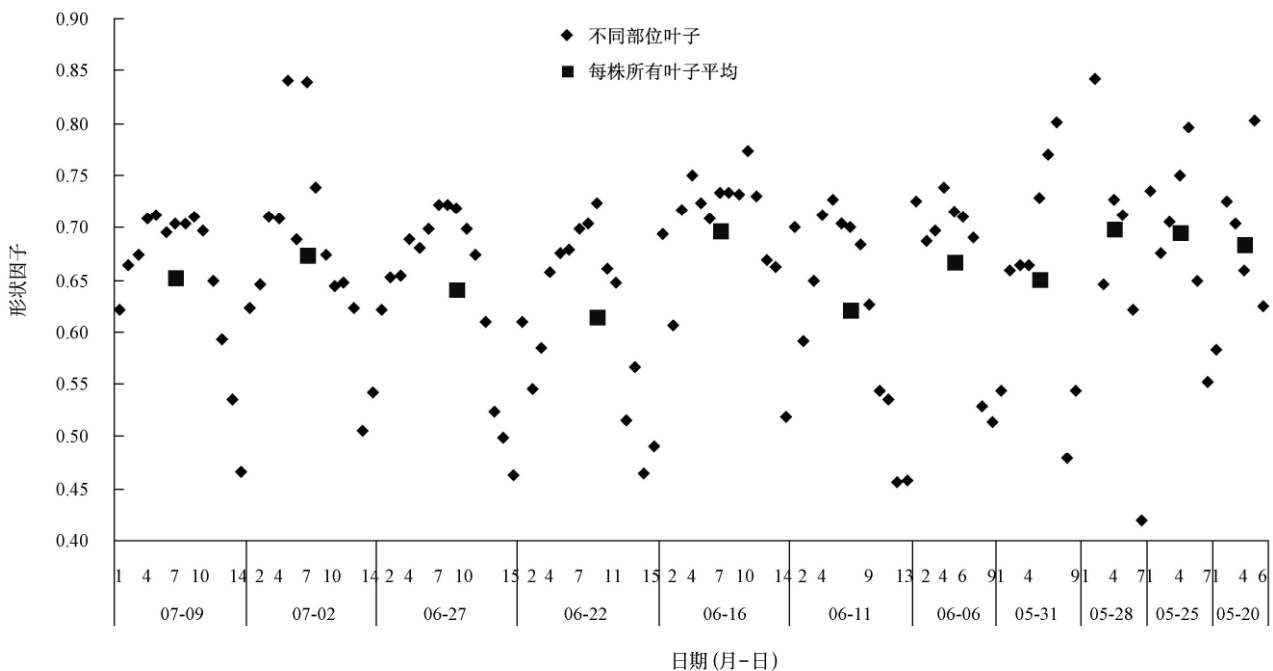
为了保护庄稼及减少工作量，进行单株叶面积的计算，IHM 法不采用大量采样取平均，而是利用叶片的长宽值与叶面积的关系进行单株叶面积的计算。下面对所计算叶面积的两种方法进行介绍及精度对比分析。

2.2.1 形状因子法

计算单片叶面积通常的做法是在叶子“长×宽”的基础上再乘以一个修正因子，修正因子这里称为形状因子，本文称该方法为形状因子法。形状因子法计算叶面积如公式 (3) 所示，由公式可以看出，形状因子法的关键在于了解形状因子的变化规律。对于同类作物同一生长期来讲，影响形状因子的主要因素是叶子在植株的不同位置。本文对不同生长期植株不同部位叶子的形状因子进行计算，分析不同部位的叶子的形状因子变化规律。同时，将每天采样植株的形状因子进行平均进行形状因子随生长期变化规律分析。不同日期，不同叶序的形状因子如图 1 所示。

$$S_i = f(Len, Wid) = Len \times Wid \times f_i \tag{3}$$

式中： Len, Wid ——叶片的长度与宽度； f_i ——形状因子。



注：图中横坐标处数字表示叶子序号

图 1 不同日期、不同顺序叶子的形状因子

Fig.1 Shape factor of different dates and leaf of different positions on the stalk

从图 1 可以看出，对于同一测量日期，玉米不同部位叶子的形状因子是不一样的，总体规律是以所有叶子平均值(图 1 中的■)为中心呈方向向下的类抛物线分布，第一片叶子与最后一片叶子的形状因子通常偏离均值较远，尤其是最后一片叶子偏离均值最远，这是因为最后一片叶子接近植株的部位没有完全展开，所以其形状与前面所有叶子的形状不一样，事实上，植株上部的最后几片叶子都存在这个问题，这与玉米的结构特征有关。从不同测量日期来看，植株不同叶序形状因子组成的曲线形状有很大的相似之处。

对所有日期、所有叶片的形状因子(图 1 中的◆)进行线性拟合，得到表达式的拟合因子 R^2 只有 0.0024，即所有日期全部的测量数据一起考虑，很难找到形状因子代表性的规律。对每个测量日期所有叶子形状因子的均值(图 1 中的■)进行拟合，拟合因子 R^2 为 0.1646，拟合度有所提高，但还是比较低，所以，玉米整个生长期采用一个形状因子进行叶面积指数的计算是不合适的。另外，不同作物，形状因子的变化规律也有所不同。从提高叶面积指数计算精度考虑，采样计算当天的形状因子是提高精度的可行方法。

2.2.2 二元二次回归法及精度评价

形状因子法进行叶面积的计算是比较简单通用的方法，然而存在一定的误差及不确定性。理论上讲，建立自变量与因变量的高次拟合关系的计算精度通常比一次拟合高，并且这种考虑既不增加试验的工作量，又可以提高计算精度，应该比较合理的方法。为了避免数值

上的过度拟合而失去物理含义，这里只对叶片长宽与面积的二次关系进行分析，以进行方法初探。假定叶片面积与长宽值的关系如下

$$S_l = f(Len, Wid) = A \times Len + B \times Wid + C \times len \times Wid + D \times Len^2 + E \times Wid^2 \tag{4}$$

式中：A、B、C、D、E——拟合系数。

根据采样样本的叶面积与长宽值，拟合出系数 A、B、C、D、E，基于公式(4)，就可以进行叶面积的计算。本次试验 11 d 共采样 80 株玉米，公式(4)的拟合系数按日期进行拟合，每天得到一个表达式，同时，每天计算一个平均的形状因子，对采样的所有样本根据长宽值，用形状因子法与二元二次回归法进行所有叶子面积的计算。基于公式(5)，分析两种方法的误差，进行不同方法的效果对比。

$$R_{error}(\%) = \frac{(S_{c-l} - S_{true}) \times 100}{S_{true}} \% \tag{5}$$

式中： R_{error} ——不同方法计算叶面积的误差度； S_{c-l} ——不同方法计算出来的叶面积； S_{true} ——叶子的真实面积。

为了显示清晰，11 个采样日的所有样本数据分为回归法精度高的为一类、形状因子法精度高的为一类，每类都按回归法误差从小到大的顺序进行排列，两种不同叶面积计算方法所有采样样本的误差度对比结果如图 2a 所示。对每个日期样本数进行平均，得到每个采样日期的两种方法的误差度对比结果如图 2b 所示。

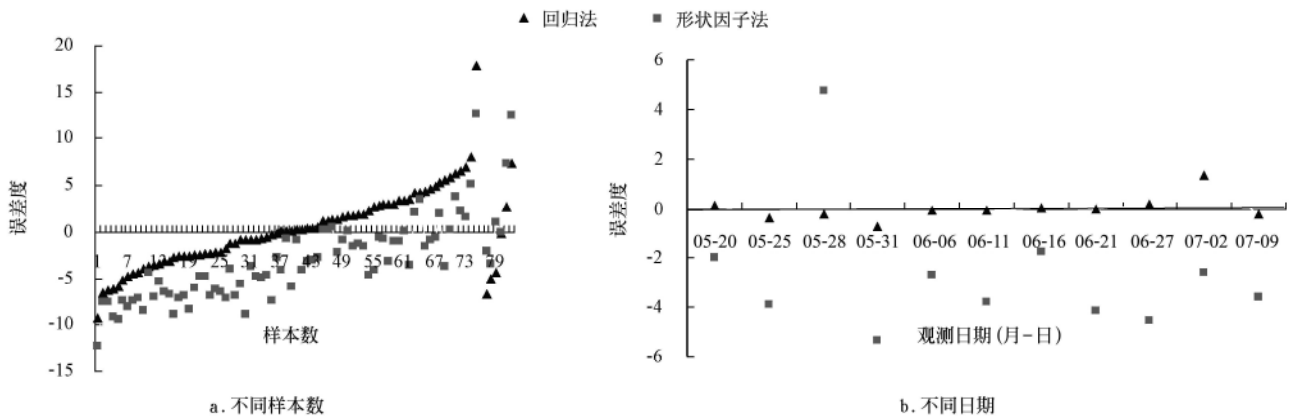


图 2 回归法与形状因子法效果对比图
Fig.2 Contrast results between the shape factor method and regression method

从图 2a 可以看出，从样本量来讲，75 株样本是回归法精度高，占总样本数的 92.59%；6 株样本是形状因子法精度高，占总样本数的 7.41%。总体上看，回归法的精度要优于形状因子法，两方法差距最大可达 9.3%左右，说明用回归法计算单片叶子的面积是很有意义的。对于每天的平均情况来看(图 2b)，两方法相差结果最大可到 5%左右。总之，无论从所有样本平均情况来看，还是从采样日期的平均情况来看，回归法的计算叶面积的精度都高于形状因子法。并且，回归法在提高叶面积指数计算精度的同时、没有增加田间工作量，这对于作为验证

与建模起点的地面试验数据测量来讲，通过回归法进行叶面积的计算是非常有意义的。

2.3 秆所占的面积比例规律分析

由室内测量结果，计算出试验日期所有样本点的秆比重值变化规律如图 3 所示。

由图 3 可以看出：生长初期，当玉米叶子有 6~7 片时，秆的表面积所占每株总面积的比例为 6%左右，播种天数增加，秆所占的面积比例就增加为 10%左右，这是因为玉米这个生长期变化很快，秆迅速的长高长粗，随着叶子片数的继续增加，秆所占的面积比例开始减少，

这是因为此时秆基本没有大的变化，叶子的总片数与每片叶子的长宽都有增加，这个规律从不同日期的叶面积指数变化规律也可以看出（表 2），随后，随着播种天数的增加，下层叶片开始枯萎，有效的绿色叶片数不增反减，相应地，秆所占的面积比例又有增加，7 月 2 号秆的面积比例为 4.8%，7 月 9 号为 6.2%。总之，秆面积比例

不同生长期是不一样的，变化范围从 3.8%~9.18%，有 5.4% 的变化幅度，如果对秆面积计算不准，对 LAI 的计算将会带来同样的误差。所以玉米整个生长期的秆面积比例用一个值进行 LAI 计算也会带来相应的误差。用 IHM 方法进行测量，可以有效的避免这个问题。

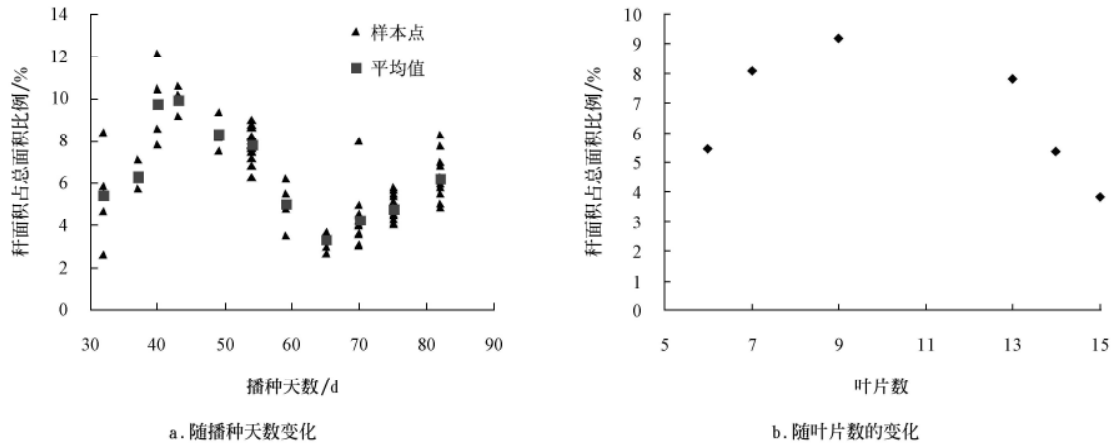


图 3 玉米秆面积占植株面积的比例变化规律
Fig.3 Change rule of the ratio of stalk area to the total area of corn

2.4 叶面积指数计算结果

基于每个采样日期田间测量的 20 株玉米的每片叶子的长宽值和室内对少量采样样子的数据处理，可以计算出每个采样日期的叶面积指数。表 2 是分别基于形状因子法与回归法计算的叶面积指数。

由图 2 可以看出，回归法每天的误差度最小，所以 LAI 变化率的计算选择以回归法 LAI 为基准。除了 5 月 25 日与 6 月 21 日以外，LAI 的变化率的变化规律，与图 2 误差度的变化规律一致。5 月 25 日与 6 月 21 日误差度变化规律与实际计算出来的 LAI 变化规律不一样的原因从图 4a、4b 可以看出，对于形状因子法而言，样本的误差度都是偏小，而回归法有的样本点计算误差是偏小的，有的是偏大的，计算平均误差时就存在正负抵消的情况，所以出现了 5 月 25 日与 6 月 21 日两天计算的 LAI 的变化率与实际误差度不一致的情况，但从总体上来讲，两种方法计算的 LAI 的变化率与对应的误差率是一致的，

说明回归法是一种计算叶面积指数比较好的方法。

表 2 不同方法计算的叶面积指数及精度分析
Table 2 LAI and accuracy evaluation based on different methods

日期(月-日)	LAI		LAI 变化率/(±)%
	形状因子法	回归法	
05-20	0.2296	0.2309	-0.5536
05-25	0.3391	0.3066	10.5994
05-28	0.3709	0.3429	8.1818
05-31	0.4622	0.4965	-6.9089
06-06	0.8955	0.9816	-8.7718
06-11	1.0508	1.1628	-9.6257
06-16	1.7568	1.8607	-5.5853
06-21	2.5232	2.3591	6.9548
06-27	3.5915	3.6416	-1.3750
07-02	4.5160	4.5299	-0.3086
07-09	5.2982	5.6390	-6.0430

注：LAI 变化率= [(LAI_形状因子法-LAI_回归法)×100/LAI_回归法]%

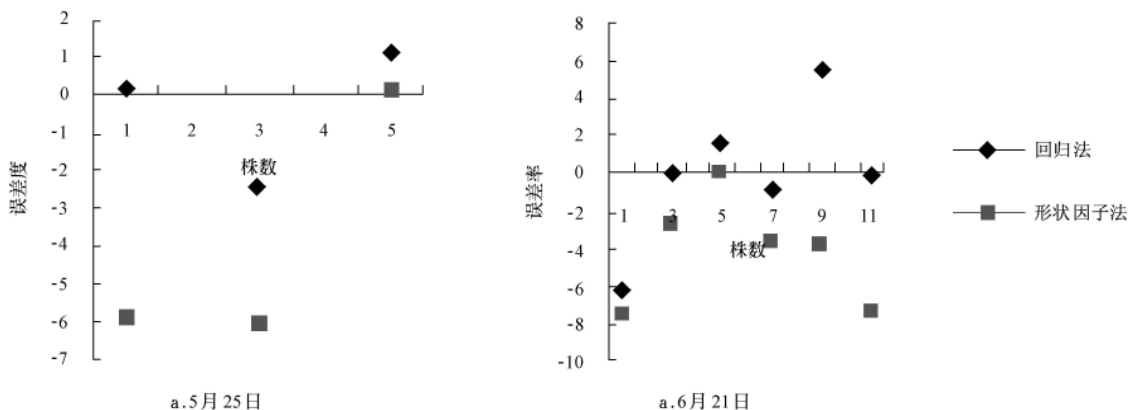


图 4 两个日期样本误差结果示意图
Fig.4 Sample errors for different methods on two observation dates

3 讨 论

运用 IHM 法进行叶面积指数测量过程中, 有些细节是要注意的, 第一, 室外选择样本进行每株每片叶子的长宽值测量时, 样本数不可太少, 需要根据玉米长势是否均一而定; 第二, 室外采样进行室内每个叶片的长宽和面积测量时选择的样本要有代表性。

玉米单株作物总面积(叶面积与秆面积之和)的误差就是所计算出来的叶面积指数的误差, 作为验证数据的误差, 会对后续的建模与反演验证直接起到误导作用。所以准确计算单株作物总面积对于提高地面叶面积指数测量精确是至关重要的。一方面, 本文在对 5—7 月共 11 次的测量结果分析的基础上, 总结了形状因子法与回归法在计算单株总叶面积方法上的异同, 得出回归法是计算叶面积及叶面积指数比较好的方法的结论。另一方面, 通过分析不同生长期秆占总面积比例, 可以看出秆占总面积比例对叶面积指数的影响范围在 4%~10%, 得出秆的面积准确计算需要试验当天采样计算而不是整个生长期采用一个数值的结论。

4 结 论

由于农作物通常的成行种植方式及不同生长期的生长特点, 使得采用各种 LAI 测量仪器进行 LAI 的测量受到不同程度的限制, 所以对于农作物、尤其是玉米, 叶面积指数的测量用直接测量法效果较好。通常的直接测量法由于破坏性大、工作量大而使其应用起来比较困难, 本文提出的改进的收获测量法田间采样工作只是通常直接测量法的十分之一到五分之一即可, 在尽量减少对作物破坏的同时也减少了工作量; 本文提出的回归法计算的叶面积比形状因子法计算的叶面积精度平均可以提高 5% 左右, 如果玉米整个生长期用一个形状因子, 回归法的计算精度会更高; 秆表面积占植株总面积比例平均在 6.5%。可见对于玉米这类秆比较粗的作物, 计算叶面积指数时考虑秆的影响是非常重要的。所以, 从叶面积指数计算精度及工作量角度考虑, 本文提出的改进收获测量法比较适合玉米全生长期的叶面积指数测量。

本文介绍的 IHM 法进行玉米叶面积指数的测量、对叶片面积计算方法的改进及对秆所占面积的分析, 不仅为玉米叶面积指数的测量提供方法借鉴及先验知识, 同时也可以为别的农作物叶面积指数的测量提供方法参考, 从而可以为参数定量反演提供好的验证及配套参数。

致谢: 本文的工作采用了黑河综合遥感联合试验的数据, 本试验由中国科学院西部行动计划项目(二期):

“黑河流域遥感-地面观测同步试验与综合模拟平台建设”与国家重点基础研究发展计划(973)项目“陆表生态环境要素主被动遥感协同反演理论与方法”支持, 同时感谢中国科学院遥感科学国家重点室开放基金的大力支持, 谨此致谢。

[参 考 文 献]

[1] Holben B N, Tucker C J, Fan C J. Spectral assessment of

- soybean leaf area and leaf biomass[J]. *Photogram Eng Remote Sens*, 1980, 46: 651—656.
- [2] Rasmussen M S. Operational yield forecast using AVHRR NDVI data: reduction of environmental and inter-annual variability[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1997, 18(5): 1059—1077.
- [3] 宋开山, 张柏, 李方, 等. 高光谱反射率与大豆叶面积及地上鲜生物量的相关分析[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(1): 36—40.
Song Kaishan, Zhang Bai, Li Fang, et al. Correlative analyses of hyperspectral reflectance, soybean LAI and aboveground biomass[J]. *Transactions of the CSAE*, 2005, 21(1): 36—40. (in Chinese with English abstract)
- [4] Jing M Chen, Black T A. Defining leaf area index for non-flat leaves[J]. *Plant Cell and Environment*, 1992, 15(4): 421—429.
- [5] 姚延娟. 叶面积指数反演及不确定性分析[D]. 北京: 中国科学院遥感应用研究所, 2007.
Yao Yanjuan. LAI inversion and Uncertainty Analysis, PhD. Dissertation[D]. Beijing: Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, 2007. (in Chinese with English abstract)
- [6] 唐延林, 王秀珍, 王福民, 等. 农作物 LAI 和生物量的高光谱法测定[J]. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2004, 32(11): 100—104.
Tang Yanlin, Wang Xiuzhen, Wang Fumin, et al. Study on the determination of LAI and biomass of crop by hyperspectral[J]. *Jour of Northwest Sci-Tech Univ of Agri and For: Nat Sci Ed*, 2004, 32(11): 100—104. (in Chinese with English abstract)
- [7] Nathalie J J Breda. Ground-based measurements of leaf area index: A review of methods, instruments and current controversies[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2003, 54(392): 2403—2417.
- [8] 吴伟斌, 洪添胜, 王锡平, 等. 叶面积指数地面测量方法的研究进展[J]. *华中农业大学学报*, 2007, 26(2): 270—275.
Wu Weibin, Hong Tiansheng, Wang Xiping, et al. Advance in ground based LAI measurement methods[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2007, 26(2): 270—275. (in Chinese with English abstract)
- [9] Ross J. The radiation regime and architecture of plant stands[M]. The Hague, the Netherlands: Dr Junk W. 1981.
- [10] Jones H G. Plant and Microclimate, 2nd edn.[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1992.
- [11] 任海, 彭少麟, 张祝平, 等. 鼎湖山季风常绿阔叶林林冠结构与冠层辐射研究[J]. *生态学报*, 1996, 16(2): 174—179.
Ren Hai, Peng Shaolin, Zhang Zhuping, et al. Study on canopy structure and canopy radiation of monsoon evergreen broad leaf forest in dinghushan biosphere reserve[J]. *Guangdong, Acta Ecologica Sinica*, 1996, 16(2): 174—179. (in Chinese with English abstract)
- [12] Kucharik C J, Norman J M, Murdock L M, et al. Characterizing canopy nonrandomness with a Multiband Vegetation Imager MVI[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102 (D24): 455—473.

- [13] Smith N J, Chen J M, Black T A. Effects of clumping on estimates of stand leaf area index using the Li-Cor LAI-2000[J]. Canadian Journal of Forest Research, 1993, 23: 1940—1943.
- [14] Lang A G R. Application of some of Cauchy's theorems to estimation of surface areas of leaves, needles and branches of plants, and light transmittance[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1991, 55(3/4): 191—212.
- [15] Chason J, Baldocchi D, Hutson M. A comparison of direct and indirect methods for estimating forest leaf area[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1991, 57(1/2/3): 107—128.

Improved harvesting method for corn LAI measurement in corn whole growth stages

Yao Yanjuan^{1,2,3}, Fan Wenjie¹, Liu Qiang², Li Li², Tao Xin¹, Xin Xiaozhou², Liu Qinhuo²

(1. Institute of Remote Sensing and GIS, Peking University, Beijing 100871, China;

2. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

3. Satellite Environment Center, Ministry of Environmental Protection, Beijing 100029, China)

Abstract: Considering different canopy structures for the whole crop growth stages, it is not suitable to use traditional instrument to measure crop LAI for some growth stages, such as crop early growth stages with very sparse canopy structure. In order to obtain comparable and coherent LAI, the authors proposed the new method for corn LAI measurement, namely improved harvesting method (IHM). The IHM can reduce the measurement workload and the corn damage. Through the single corn total area comparison based on the two computing methods, namely the regression method and the shape factor method, it is shown that the regression method is better than shape factor method. Furthermore, based on the analysis of the ratio of stalk area to total area for the whole growth stages, the authors draw the conclusion that the stalk area must be considered for accurate LAI measurement. This work can provide some references for similar research and can accumulate the *priori* knowledge. The research of this paper will improve the study of LAI inversion and validation for remote sensing data.

Key words: corn, leaf area index, measurement method