

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第 31 卷 第 11 期 Vol.31 No.11 **2011**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 31 卷 第 11 期 2011 年 6 月 (半月刊)

目次

微生物介导的碳氮循环过程对全球气候变化的响应·····	沈菊培, 贺纪正 (2957)
巢湖蓝藻水华形成原因探索及“优势种光合假说”·····	贾晓会, 施定基, 史绵红, 等 (2968)
我国甜菜夜蛾间歇性暴发的非均衡性循环波动·····	文礼章, 张友军, 朱 亮, 等 (2978)
庞泉沟自然保护区华北落叶松林的自组织特征映射网络分类与排序·····	张钦弟, 张金屯, 苏日古嘎, 等 (2990)
上海大莲湖湖滨带湿地的生态修复·····	吴 迪, 岳 峰, 罗祖奎, 等 (2999)
芦芽山典型植被土壤有机碳剖面分布特征及碳储量·····	武小钢, 郭晋平, 杨秀云, 等 (3009)
土壤微生物群落结构对中亚热带三种典型阔叶树种凋落物分解过程的响应·····	张圣喜, 陈法霖, 郑 华 (3020)
中亚热带几种针、阔叶树种凋落物混合分解对土壤微生物群落碳代谢多样性的影响·····	陈法霖, 郑 华, 阳柏苏, 等 (3027)
桂西北喀斯特峰丛洼地表层土壤养分时空分异特征·····	刘淑娟, 张 伟, 王克林, 等 (3036)
重金属 Cd 胁迫对红树蚬的抗氧化酶、消化酶活性和 MDA 含量的影响·····	赖廷和, 何斌源, 范航清, 等 (3044)
海南霸王岭天然次生林边缘效应下木质藤本与树木的关系·····	乌玉娜, 陶建平, 奚为民, 等 (3054)
半干旱黄土丘陵区不同人工植被恢复土壤水分的相对亏缺·····	杨 磊, 卫 伟, 莫保儒, 等 (3060)
季节性干旱对中亚热带人工林显热和潜热通量日变化的影响·····	贺有为, 王秋兵, 温学发, 等 (3069)
新疆古尔班通古特沙漠南缘多枝桉柳光合作用及水分利用的生态适应性·····	王珊珊, 陈 曦, 王 权, 等 (3082)
利用数字图像估测棉花叶面积指数·····	王方永, 王克如, 李少昆, 等 (3090)
野生大豆和栽培大豆光合机构对 NaCl 胁迫的不同响应·····	薛忠财, 高辉远, 柳 洁 (3101)
水磷耦合对小麦次生根特殊根毛形态与结构的影响·····	张 均, 贺德先, 段增强 (3110)
应用物种指示值法解析昆崙山植物群落类型和植物多样性·····	孙志强, 张星耀, 朱彦鹏, 等 (3120)
基于 MSIASM 方法的中国省级行政区体外能代谢分析·····	刘 晔, 耿 涌, 赵恒心 (3133)
不同生态区烟草的叶面腺毛基因表达·····	崔 红, 冀 浩, 杨惠娟, 等 (3143)
B 型烟粉虱对 23 种寄主植物适应度的评估和聚类分析·····	安新城, 郭 强, 胡琼波 (3150)
杀虫剂啶虫脒和毒死蜱对捕食蜘蛛血细胞 DNA 的损伤作用·····	李 锐, 李生才, 刘 佳 (3156)
杀真菌剂咪鲜安对蓼花臂尾轮虫的影响·····	李大命, 陆正和, 封 琦, 等 (3163)
长、短期连续孤雌生殖对蓼花臂尾轮虫生活史和遗传特征的影响·····	葛雅丽, 席貽龙 (3170)
专论与综述	
区域景观格局与地表水环境质量关系研究进展·····	赵 军, 杨 凯, 邵 俊, 等 (3180)
露水对植物的作用效应研究进展·····	叶有华, 彭少麟 (3190)
葡萄座腔菌科研究进展——鉴定, 系统发育学和分子生态学·····	程燕林, 梁 军, 吕 全, 等 (3197)
人工林生产力年龄效应及衰退机理研究进展·····	毛培利, 曹帮华, 田文侠, 等 (3208)
树木年轮在干扰历史重建中的应用·····	封晓辉, 程瑞梅, 肖文发, 等 (3215)
植物中逆境反应相关的 WRKY 转录因子研究进展·····	李 冉, 娄永根 (3223)
研究简报	
三江源地区高寒草原土壤微生物活性和微生物量·····	任佐华, 张于光, 李迪强, 等 (3232)
3 种黑杨无性系水分利用效率差异性分析及相关 <i>ERECTA</i> 基因的克隆与表达·····	郭 鹏, 夏新莉, 尹伟伦 (3239)
猕猴桃园节肢动物群落重建及主要类群的生态位·····	杜 超, 赵惠燕, 高欢欢, 等 (3246)

期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 298 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 33 * 2011-06



封面图说: 盘锦市盘山县水稻田——盘锦市位于辽宁省西南部, 自古就有“鱼米之乡”的美称。这里地处温带大陆半湿润季风气候, 有适宜的温度条件和较长的生长期以供水稻生长发育, 农业以种植水稻为主, 年出口大米达 1 亿多公斤, 是国家级水稻高产创建示范区和重要的水稻产区。

彩图提供: 沈菊培博士 中国科学院生态环境研究中心 E-mail: jpshe@reccs.ac.cn

利用数字图像估测棉花叶面积指数

王方永¹, 王克如^{1,2}, 李少昆^{1,2,*}, 肖春华¹, 王 琮¹, 陈江鲁¹, 金秀良¹, 吕银亮¹

(1. 新疆兵团绿洲生态农业重点开放实验室 / 新疆作物高产研究中心, 新疆石河子 832003;

2. 中国农业科学院作物科学研究所 / 农业部作物生理生态与栽培重点开放实验室, 北京 100081)

摘要:通过 3a 不同种植密度、品种、施氮量和灌水量的田间试验,在棉花不同的生育期用数码相机、LAI-2000 冠层仪和线性光量子传感器采集数据并进行破坏性取样测定,分析图像透光率的有效性和建立 LAI 估测模型,进而对图像方法、LAI-2000 和破坏性取样方法进行比较和分析。结果表明:(1)在太阳高度角最大且变化最小的正午时段,数码相机测量的图像透光率与线性光量子传感器测量的冠层透光率较一致且相对稳定。(2)图像透光率能反映除吐絮期以外各时期的冠层透光状况,但是当 LAI 大于 5 时图像透光率出现饱和。(3)综合分析 2009 和 2010 年数据,建立了图像透光率估测 LAI 的模型($R^2 = 0.8438$, $SE = 0.5605$);利用 2007 年独立试验资料检验估测模型的性能,模型检验的拟合度较高($R^2 = 0.8767$)且预测误差较小($RMSE = 0.4305$),当 LAI>5 时模型的预测能力降低。(4)数字图像、LAI-2000 和破坏性取样 3 种方法测量的 LAI 值之间均呈现显著的线性相关($R^2 > 0.85$),但是图像透光率的饱和性致使当 LAI>5 时明显低估叶面积指数。

关键词:棉花;叶面积指数;数字图像;透光率;LAI-2000

Estimation of leaf area index of cotton using digital Imaging

WANG Fangyong¹, WANG Keru^{1,2}, LI Shaokun^{1,2,*}, XIAO Chunhua¹, WANG Qiong¹, CHEN Jianglu¹, JIN Xiuliang¹, LÜ Yinliang¹

1 Key Laboratory of Oasis Ecology Agriculture of Xinjiang Construction Crops, Center of Crop High-yield Research, Shihezi 832003, China

2 Key Laboratory of Crop Physiology and Production, Ministry of Agriculture, Institute of Crop Sciences, Chinese Academy of Agriculture Sciences, Beijing 100081, China

Abstract: Leaf area index (LAI) is one of the most important structural characteristics for understanding cotton (*Gossypium hirsutum* L.) growth, yield, and population structure. Destructive measurements are tedious, time consuming, and labor intensive. Modern techniques such as remote sensing and measurements from ground-based optical instruments are non-destructive and effective methods to rapidly measure LAI. The objective of this study was to determine the feasibility of using images from a common digital camera to measure LAI of cotton. We compared the results obtained using a digital camera with those obtained using a destructive sampling method and an LAI-2000 Plant Canopy Analyzer. Three field experiments were conducted with different planting densities, cultivars, nitrogen rates, and irrigation rates. A digital camera, an LAI-2000 Plant Canopy Analyzer, and an LI-191SA linear quantum sensor were used to observe the cotton canopy and record data. Leaves were also sampled destructively at their main growth stages. The digital camera images were captured looking downwards onto the canopy, and then an algorithm was used to separate the components of each image into four classes; sunlit leaves (SL), sunlit soil (SS), shaded leaves (ShL), and shaded soil (ShS). The parameter of image transmittance (T_{imag}) was calculated from SL and SS based on the Beer-Lambert Law. The validity of T_{imag} was analyzed and a quantitative model of T_{imag} and LAI was developed. The three methods for determining LAI (digital imaging, LAI-2000, and destructive sampling) were compared. Analysis of the diurnal pattern of transmittance of the cotton canopy showed that the best time for measuring T_{imag} was around solar noon, because at this time the solar elevation angle is high and remains

基金项目:国家高技术研究发展计划(863 计划)(2006AA10Z207,2006AA10A302);国家自然科学基金资助项目(30860139)

收稿日期:2010-09-16; **修订日期:**2011-03-28

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: Lishk@mail.caas.net.cn

relatively constant during measurements. Around solar noon, T_{imag} was in good agreement with T_{quan} (transmittance measured with a linear quantum sensor). By analyzing the relationships among T_{imag} , T_{quan} , and diffuse non-interceptance (DIFN), we determined that T_{imag} could be used to estimate light attenuation in the cotton canopy at different stages, except for the boll opening stage. In addition, T_{imag} was saturated at $\text{LAI} > 5$. We analyzed the relationship between LAI_{dest} (LAI measured destructively) and T_{imag} using data from 2009 and 2010. The R^2 and SE of the calibration model were 0.8438 and 0.5605, respectively. The ability of T_{imag} to predict LAI was validated using an independent dataset (2007 data). The determination coefficient and RMSE of the validation model were 0.8767 and 0.4305, respectively. However, the model underestimated LAI as the LAI exceeded 5. The T_{imag} saturation, which was largely because of errors in image recognition and segmentation, resulted in underestimation of LAI . Intercomparisons of LAI estimates showed that there were small discrepancies and significant correlations among data obtained from digital images, the LAI -2000, and destructive sampling methods. Data from the LAI -2000 was highly consistent with that obtained by destructive sampling. Our results indicate that T_{imag} data is not as robust as that obtained using other techniques, in that it does not reliably detect non-green leaves, and it is affected by radiation conditions. Nonetheless, it is a simple, reliable, and reproducible approach for general estimates of LAI . The digital camera could be mounted on a tractor or farm vehicle for real-time, non-destructive monitoring of LAI to support field management.

Key Words: cotton; LAI ; digital image; transmittance; LAI -2000

叶面积指数(Leaf area index, LAI)是对陆地植被绿叶面积的度量^[1],由于绿色叶片在各种植被冠层的生物物理过程中起着重要的作用^[2-3],所以 LAI 是陆地生态系统中描述植被冠层结构和功能的关键特征参数^[4]。首先, LAI 决定了植物冠层的光截获量,和光合作用的 CO_2 同化量直接相关^[5];其次, LAI 控制植物冠层对降水的截获量以及冠层和土壤的水分蒸散量^[6],能够反映生态系统中水文要素的变化动态;进而可知, LAI 和植物的生长发育状况^[7]、水分利用效率^[8]和净初级生产力^[9]乃至杂草控制和土壤侵蚀状况^[10-11]等密切相关。 LAI 已被广泛应用于农学、林学和生态学及其交叉学科等多个领域的研究。

LAI 的测定有直接和间接两种方法^[12-14]。经典的直接测量方法需要进行破坏性取样,费工费时且难以连续监测,但是测量精度相对较高,常用于校验间接测量方法。利用传感器可以对植物冠层进行非接触性间接测量,主要包括基于冠层光谱反射特征的遥感方法和基于冠层辐射传输理论的方法。国内外许多学者应用不同平台的遥感数据监测了小麦^[15-18]、玉米^[19-21]、水稻^[22-24]、棉花^[19,25-26]和大豆^[19,27]等主要作物的叶面积指数。用冠层辐射传输理论方法获取 LAI 是基于对冠层间隙率或/和冠层间隙大小分布的分析,这是目前测量 LAI 的主要商业仪器 LAI -2000^[2-4,7,10,28-29]、SunSCAN^[10]、AccuPAR^[10-11,29]、TRAC^[2-4]、CI-110^[9]和带有鱼眼镜头的数码相机^[2,4,8,29]等的工作原理,国内外研究人员已进行了大量的相关研究。

随着数码相机的快速发展和普及,其性价比不断提升,许多学者将普通数码相机应用于农业等领域关键指标的监测研究,进一步拓宽了利用传感器实时、无损估测叶面积指数的研究思路。前人研究表明,植被冠层图像能够简单、精确的估算植被覆盖度^[28],而且基于图像的覆盖度能够估测不同植被的叶面积指数^[4,28,30]。此外,国内学者利用不同的图像算法处理小麦图像,提取的由群体侧面像识别的绿色叶面积^[31]、冠层图像叶面积指数(ILAI)^[32]和冠层图像叶片面积和土壤面积的比值^[33]等指标可以估测小麦叶面积指数。另一方面,植被冠层的光照和阴影等分量的变化直接与冠层属性相关^[34]。Law 等^[35]分析发现 2 种灌木冠层数字图像的光照叶片、阴影叶片和阴影背景 3 个分量占总场景的比例和 LAI 之间呈现显著的对数关系。Peddle 等^[36]研究发现使用阴影分量(包括叶片和土壤)比使用归一化差值植被指数(NDVI)能更好的估测北方森林 LAI 。Casa 等^[37]将马铃薯冠层图像分为光照叶片和土壤、阴影叶片和土壤 4 分量,并用植被冠层数字模型成功地反演了 LAI 。上述研究结果表明,利用图像光照和阴影分量信息估测叶面积指数具有有效性和可行性,但是不同研究对象和试验条件下用于估测的分量指标有所不同,图像分量方法在作物叶面积指数估测中的应用需要

进行广泛和深入的研究。

新疆地区是我国最主要的商品棉生产基地,实时、精确地获取能够指示棉花长势、产量形成和高产群体调控等重要信息的叶面积指数对于棉花生产意义重大。本文利用图像分量方法提取基于图像算法的透光率,间接估测 LAI(顶视法),这与目前主流商业仪器(底视法)的测定方法不同。本研究以不同年份、种植密度、品种、施氮量和灌水量的田间小区试验为基础,比较分析数字图像透光率与其他光学仪器测的透光率之间的关系,建立图像透光率和棉花叶面积指数的定量关系模型,并对数字图像、LAI-2000 和破坏性取样 3 种方法测量的 LAI 进行了比较,以期对棉花生长发育过程中的叶面积动态监测提供新的技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2007、2009 和 2010 年在石河子大学新疆兵团绿洲生态农业重点实验室田间试验站(N 44.3138°、E 86.0583°)进行。土壤质地为壤质灰漠土,施用 P_2O_5 150 kg/hm² 和 K_2O 75 kg/hm² 作为基肥。种植行向为南北向,采用膜下滴灌,于 4 月下旬进行膜上点播,干播湿出。施肥和灌水的方法是按棉花各生育期的需肥和需水规律,用水表控制灌量,随水滴施氮肥。按照大田棉花高产栽培模式进行田间栽培管理。

2007 年试验采用 15 cm+50 cm 宽窄行配置方式。4 月 23 日播种,7 月 16 日打顶。小区面积 48 m²,栽培密度为 24 万株/hm²。品种试验选择株型由紧凑到松散的新陆早 13 号(XLZ-13)、炮台 1 号(PT-1)、标杂 A1(BZ-A1);氮素试验设 0(N0)、150(N1)、300(N2)、450(N3)、600(N4) kg/hm² 5 个施氮(纯氮)水平。各处理均重复 3 次,随机区组设计。各试验处理的灌水量均为 4050 m³/hm²,品种试验的施氮量为 300 kg/hm²,氮素试验的供试品种为 297-5。测定日期为 6 月 29 日(初花期)、7 月 16 日(盛花期)、8 月 1 日(盛铃前期)和 8 月 19 日(盛铃后期),进行冠层图像采集和取样测定 LAI。

2009 年试验采用 30 cm+50 cm 宽窄行配置模式。4 月 23 日播种,7 月 12 日打顶。小区面积 64 m²。品种试验选用不同株型的 81-3、标杂 A1(BZ-A1)、炮台 1 号(PT-1)和新陆早 36 号(XLZ-36);密度试验设 12(D1)、21(D2)和 30(D3) 万株/hm² 3 个栽培密度;氮素试验设 0(N0)、150(N1)、300(N2)、450(N3)、600(N4) kg/hm² 5 个施氮(纯氮)水平。各试验的灌水量均为 4500 m³/hm²,品种和密度试验的施氮量为 300 kg/hm²,密度和氮素试验的供试品种为新陆早 33 号,品种和氮素试验的种植密度为 21 万株/hm²。使用 LAI-2000 冠层分析仪、LI-250A 型量子/辐射/照度计和 LI-191SA 线性光量子传感器、数码相机采集棉花冠层结构信息之后取样测定 LAI,测定日期为 6 月 19 日(蕾期)、7 月 11 日(盛花期)、7 月 25 日(盛铃前期)、8 月 18 日(盛铃后期)和 9 月 8 日(吐絮期)。此外,于 7 月 2 日进行棉花群体透光率日动态监测,数据采集时间段为 10 点到 19 点,每隔 1 h 获取棉花冠层图像和光合有效辐射数据。

2010 年试验采用 20 cm+50 cm 宽窄行配置模式。4 月 25 日播种,7 月 15 日打顶。小区面积 98 m²。密度试验设 10.5(D0)、15.75(D1)、21(D2)和 31.5(D3) 万株/hm² 4 个栽培密度;水分试验设 1500(W0)、3000(W1)、4500(W2)、6000(W3) m³/hm² 4 个水平。各试验的施氮量均为 300 kg/hm²,供试品种为新陆早 33 号。密度试验的灌水量为 4500 m³/hm²,水分试验的种植密度为 31.5 万株/hm²。使用 LAI-2000 冠层分析仪、LI-250A 型量子/辐射/照度计耦合 LI-191SA 线性光量子传感器、数码相机采集棉花冠层结构信息之后取样测定 LAI,测定日期为 6 月 11 日(蕾期)、7 月 1 日(初花期)、7 月 13 日(盛花期)和 8 月 9 日(盛铃期)。

1.2 研究项目及测定方法

1.2.1 棉花冠层图像采集方法

于晴朗无风或风速较小之日的太阳高度角变化较小的中午时段(北京时间 13:00—15:00),在田间自然光照条件下,使用 OLYMPUS 数码相机(Model No. C-5060 Wide Zoom, Olympus Corporation)采集棉花冠层图像,相机镜头垂直距棉花冠层约 150 cm。相机设置为固定焦距、自动曝光和自动白平衡模式,采用 2592×1944 像素的图像分辨率,以 JPEG 格式存储并传输至计算机。

1.2.2 LAI-2000 植物冠层分析仪测量方法

LAI-2000 的鱼镜头由 5 个同心环(天顶角范围分别为 0—13°、16—28°、32—43°、47—58°和 61—74°)

组成,每个环同时测量 360° 方位角的 320—490 nm(蓝光)的入射辐射。LAI-2000 反演 LAI 是基于对每个环的冠层透光率(冠层下方和上方辐射测量数值的比值)的测量。LAI-2000 软件的算法基于以下假设:(1)叶片不透光且无反射,(2)叶片随机排列,(3)叶片面积相对于每环的观测范围是很小的,(4)叶片方位角随机。

在图像采集前 1 天的傍晚(北京时间 20:00—22:30)使用 LAI-2000 植物冠层分析仪(LI-COR, USA)获取 LAI、天空可见度(DIFN,与透光率几乎相等^[38])等群体结构参数。测量时,操作员用背挡住太阳,用 270° 的视角盖挡住操作员和太阳,调整传感器至水平。测量次序为先在棉花冠层上方测量 1 个数据(A),再在冠层下方测量 4 个数据(B,将探测镜头分别水平放置在样点内宽行和窄行对角线的横断面上),之后重复测量 1

次。记录数据时,在 2 次蜂鸣声之间,保持传感器水平不动。在所选样点重复测量 3 次,取平均值作为测量的 LAI_{2000} (LAI estimated nondestructively with LAI-2000)。

1.2.3 线性光量子传感器的测量

与图像采集工作同步,使用美国 LI-COR 公司生产的 LI-250A 型量子/辐射/照度计耦合 LI-191SA 线性光量子传感器分别测量各个样点棉花冠层顶部(PAR_c)和底部(PAR_b)的光合有效辐射(Photosynthetically active radiation, PAR, $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)。测定时保持传感器感应面水平,将传感器放置于冠层上方测定 PAR_c ,之后分别放置在宽行和窄行的垂直行向位置测量底部 PAR,之后求均值作为 PAR_b 。线性光量子传感器测量的冠层透光率 T_{quan} (Transmittance measured with linear quantum sensor) = PAR_b/PAR_c 。

1.2.4 破坏性取样测量方法

在田间各项数据采集改正完毕后立即取样,每个样点取有代表性的植株 3 株,将叶片分离后无重叠的平铺在标有刻度的白纸上,用数码相机垂直拍照后用数字图像处理方法^[39]测量叶片面积,计算 LAI_{dest} (LAI measured destructively)。

1.3 棉花冠层图像透光率

1.3.1 图像透光率的原理

植物冠层是由大小、位置和取向不同的叶片在三维空间排列而成,日本学者 M. Monsi 和 T. Saeki 假设冠层是均一的整体,将 Beer-Lambert 定律用于描述植物冠层中光的传输和分布^[40]。用 LAI 表示冠层顶部直至一定深度所分布的叶量,如冠层顶部的水平光强度和冠层内部一定深度的水平光强度分别为 I_0 和 I ,则三者间可成立如下关系:

$$I = I_0 e^{(-K \times LAI)} \quad (1)$$

式中, e 为自然对数的底数, K 为群体消光系数。根据(1)式可以推出:

$$LAI = -\ln(I/I_0)/K \quad (2)$$

式中, I/I_0 为透光率。虽然 K 值因不同群体而异,但是 LAI 与 I/I_0 之间的关系具有相当的普遍性及高度适应性。

在观测角度不同的条件下,视场范围内植株和土壤的比例也不相同。当太阳光入射方向与观测方向一致时,在视场范围内只有光照植被和光照土壤两部分;而太阳方向与观测方向不同时,在视场内存在光照植被、光照土壤、阴影植被和阴影土壤 4 个分量^[41]。因此,可以将棉花冠层图像也分为光照叶片(Sunlit Leaves, SL)、光照土壤(Sunlit Soil, SS)、阴影叶片(Shaded Leaves, ShL)和阴影土壤(Shaded Soil, ShS),并统计各分



图 1 棉花冠层图像便携式采集架田间观测示意图

Fig. 1 The portable platform in situ of cotton canopy image collection

量的像素数 N_{SL} , N_{SS} , N_{ShL} 和 N_{ShS} 。假设叶片不透光且无反射和叶片随机分布,以图像中光照分量的像素数之和表示冠层顶部光合有效辐射,而以光照土壤的像素数表示冠层底部的光合有效辐射,从图像的角度定义的图像透光率 T_{imag} (Transmittance calculated with image fractions) = $N_{SS}/(N_{SL}+N_{SS})$,从而估算棉花冠层的 LAI。

1.3.2 图像四分量的分割算法

利用 Microsoft Visual Studio. NET 开发的软件系统读取数字图像,获取 RGB 颜色模型的颜色值。对于一幅棉花冠层图像,如果 $R < 2.6B$ & $R < G - 5$ & $G > B + 5$,则为绿色叶片,否则为土壤;对于绿叶部分,如果 $R + G + B < 200$,则为光照叶片,否则为阴影叶片;而对于土壤部分,如果 $R + G + B > 250$,则为光照土壤,否则为阴影土壤;之后统计各分量的像素数。

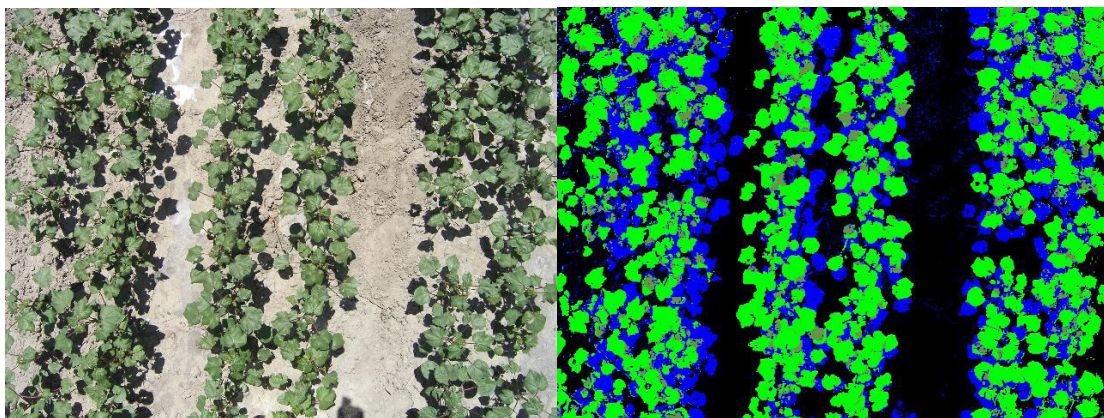


图2 棉花冠层图像4个分量的分割

Fig. 2 The segmentation with 4 parts of cotton canopy image

浅绿色为光照叶片,深绿色为阴影叶片,黑色为光照土壤,蓝色为阴影土壤

2 结果与分析

2.1 棉花叶面积指数随生育期的变化

叶面积指数是反映棉花群体光辐射特征和长势好坏的重要参数。以 2009 年试验为例,分析了不同密度、品种和施氮量条件下棉花 LAI 随生育进程的变化趋势。总体上,在盛铃前期之前,LAI 快速增长,在盛铃前期达到峰值,之后随着叶片的衰老 LAI 逐渐下降;此外,对于相同因子的试验,在生长前期群体较小时,不同处理间 LAI 的差异较小,随着生育进程的推进,不同试验处理之间棉花的个体发育和群体结构的差异逐渐增大。高密度和高施氮量的处理在整个生育期的 LAI 都相对较高,而高施氮量处理在棉花封垄之后会出现严重的郁闭状况,致使后期棉株的中下部叶片脱落,所以 LAI 在吐絮期时快速下降(图 3)。

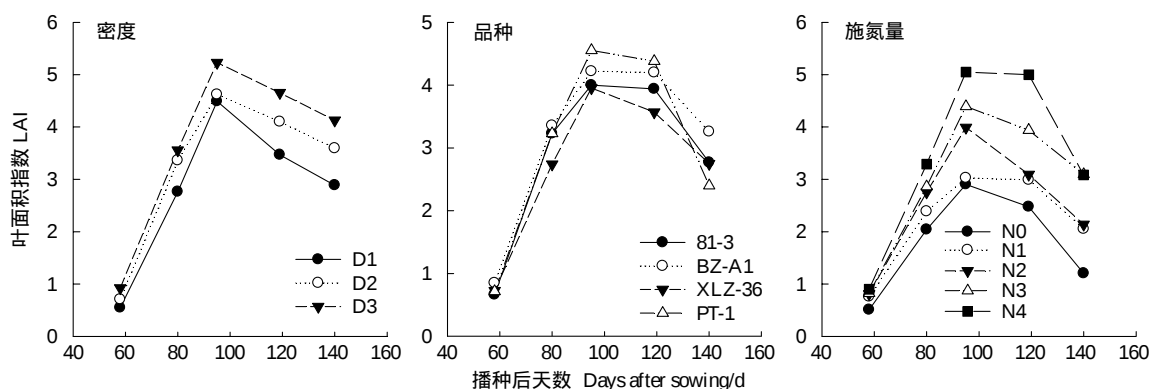


图3 棉花不同生育时期的叶面积指数(2009)

Fig. 3 Leaf area index of cotton at different growth stages in 2009

2.2 棉花冠层 T_{imag} 和 T_{quan} 的日变化

由图 4 可见,用线性光量子传感器测量的棉花冠层透光率(T_{quan})在一天中呈现先增后减的单峰变化趋势,在北京时间 14:00 左右时达到最大值。分析不同 LAI 条件下数码相机测定的冠层图像透光率(T_{imag})的日变化,可见, T_{imag} 的日变化趋于“W”形。在 LAI 为 1.8 时, T_{imag} 在 13:00—15:00 与 T_{quan} 较一致;而在 LAI 为 3.3 时,二者在 12:00 到 17:00 均较一致,但是仍然以 13:00—15:00 时段的变化趋势相对平稳。总体而言,在 11:00 以前和 17:00 以后的 T_{imag} 反而表现出上升的趋势,即太阳高度角越小时二者差异越大,原因在于此类条件下光强较弱,影响棉花冠层图像四分量的分类精度,对光照部分的误分割导致了 T_{imag} 值异常。因此,本实验的数据采集工作选择在太阳高度角变化较小的时间段(13:00—15:00)进行(图 4)。

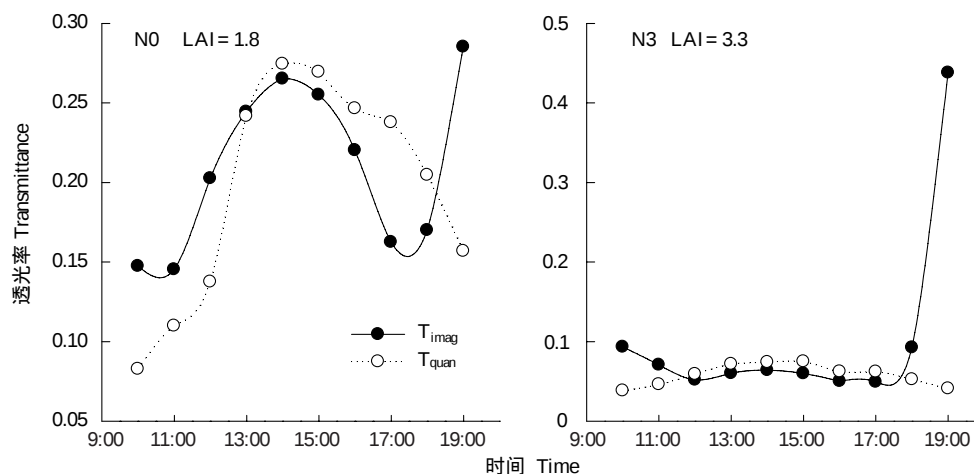


图 4 棉花冠层透光率的日变化

Fig. 4 The diurnal dynamic observation of transmittance of cotton canopy

2.3 T_{imag} 与 T_{quan} 和天空可见度(DIFN)的关系

为了确定数字图像处理技术结合 Beer-Lambert 定律更加便捷、有效的估测棉花 LAI 的动态变化的可行性,分析了棉花冠层图像透光率(T_{imag})与线性光量子传感器测量的透光率(T_{quan})和天空可见度(DIFN)之间的关系。由图 5a 和 b 可以看出,2009 年吐絮期(9 月 8 日)的图像透光率和 DIFN 及 LI-191SA 传感器测量的透光率的对应关系较差。原因在于吐絮期棉花叶片因衰老而失绿,在对棉花冠层图像进行分类时,将光照的失绿叶片和棉絮等错误识别为光照土壤,致使 T_{imag} 值偏大。因此,将去除吐絮期的 2009 年数据($n=125$)与 2010 年数据($n=90$)合并进行综合分析,结果表明, T_{imag} 与 T_{quan} (图 5c)和 DIFN (图 5d)之间高度相关,决定系数分别为 0.9332 和 0.9603,说明 T_{imag} 测量冠层透光率的有效性。此外, T_{imag} 与 DIFN 的拟合度高于与 T_{quan} 的,可能是因为图像方法和 LAI-2000 的算法都基于叶片不透光且无反射和叶片随机分布的假设, T_{imag} 和 DIFN 不测量植物冠层内透过叶片的透射光和经叶片多次反射的反射光,而线性光量子传感器能感应到这部分光^[35,42]。另一方面,本文 T_{imag} 的取值范围为 0.0142—0.8491,与 T_{quan} (0.0041—0.8613)和 DIFN (0.0080—0.8872)不同,尤其是 T_{imag} 最小值分别为 T_{quan} 和 DIFN 的最小值的 1.8 倍和 3.5 倍,说明 LAI 较大时图像透光率出现饱和现象。因为 LAI 较大时冠层接近或完全覆盖地表,光照土壤分量趋近于 0,而冠层图像中光照的花、失绿的植株器官被误分割为光照土壤,导致计算的 T_{imag} 偏大,限制了 T_{imag} 的识别精度。

2.4 图像透光率估算 LAI 模型的建立及检验

上述分析表明, T_{imag} 能够反映棉花冠层底部的透光情况,可以作为估算 LAI 的指标。将吐絮期以外的 2009 年数据($n=125$)和 2010 年数据($n=90$)作为建模样本,分析图像透光率与破坏性取样测定的 LAI 回归关系,建立了 T_{imag} 估测棉花 LAI_{dest} 的定量模型(图 6),模型的决定系数为 0.8438,估计标准误(SE)为 0.5605。从图 6 可以看出,当 LAI 大于 3 时 T_{imag} 的数值取值范围很小($T_{\text{imag}} < 0.1$),此时对冠层图像光照分量的错误分

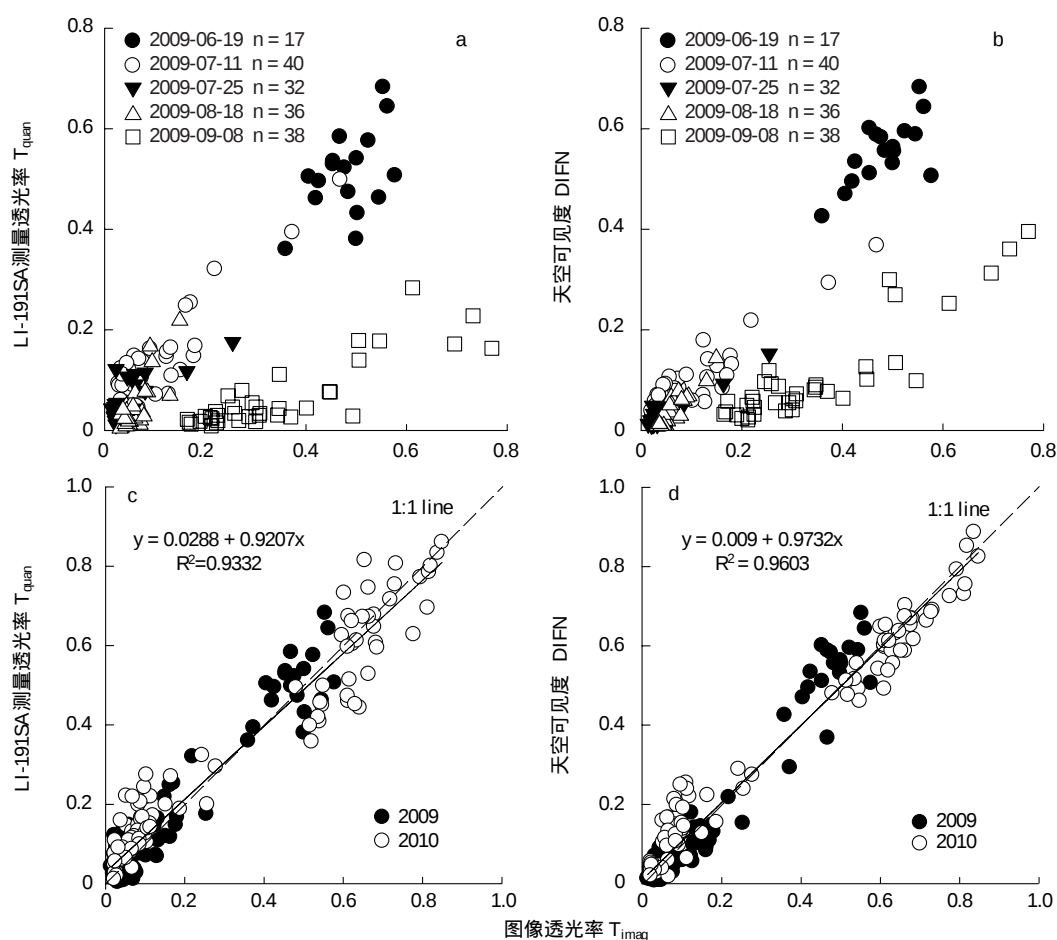


图5 图像透光率 T_i 与线性量子传感器测量的透光率 T 和天空可见度 DIFN 之间的关系

Fig. 5 Relationship between T_{imag} and T_{quan} and DIFN

类识别对 T_{imag} 的影响作用较大,对 LAI 的估测会逐渐趋于饱和。

用 2007 年独立数据 ($n=106$) 检验所建立的棉花 LAI_{dest} 估测模型,采用估测的均方根误差 (RMSE)、相对均方根误差 (RRMSE, RMSE 与 LAI_{dest} 均值的比值)、决定系数 (R^2) 等统计指标对估测模型进行综合评定。由图 7 可见,利用图像透光率估算的 LAI_{imag} 与破坏性取样方法测量的 LAI_{dest} 呈现密切的线性关系 ($R^2 = 0.8767$),预测模型的 RMSE 为 0.4305 (占 LAI_{dest} 均值的 16.73%),回归直线的斜率和截距分别为 0.8418 和 0.2067。然而,由于图像透光率是基于对棉花冠层图像中光照冠层和光照土壤像素的分类识别,而 LAI 达到 5 左右时,误识别的光照土壤像素使得计算的图像透光率偏大,导致所建模型对 LAI 的估测出现饱和现象。

2.5 3 种 LAI 测定方法的相互比较

以 2009 年和 2010 年试验资料为基础,分析数字图像方法、LAI-2000 和破坏性取样测定的 LAI 的相互关系 (表 1 和图 8)。结果表明,3 种方法测量的 LAI 值之间均呈现显著的线性相关 ($R^2 > 0.85$)。首先, LAI_{imag} 分别低估了 LAI_{dest} 和 LAI_{2000} 的 2.54% 和 0.11% (表 1 中的负偏差),而且在 LAI 值较大时 ($\text{LAI} > 5$) 表现尤为明显 (图 8a 和 b),出现对 LAI 估测的饱和现象,因为此时计算的 T_{imag} 值偏大,致使低估了叶面积指数。其次, LAI-2000 相对于破坏性取样方法测量的叶面积指数的平均偏差为 -0.0392 (低估 LAI_{dest} 的 1.39%),而且在 $5 < \text{LAI}_{\text{dest}} < 6$ 时没有出现饱和现象;与数字图像方法相比, LAI-2000 与破坏性取样测定的 LAI 之间的拟合度较高,误差较小 (为 LAI_{dest} 均值的 16.81%),而且 Hicks^[7] 对棉花的研究结果也表明 LAI_{2000} 与 LAI_{dest} 有很好的—致性 ($R^2 = 0.89$)。

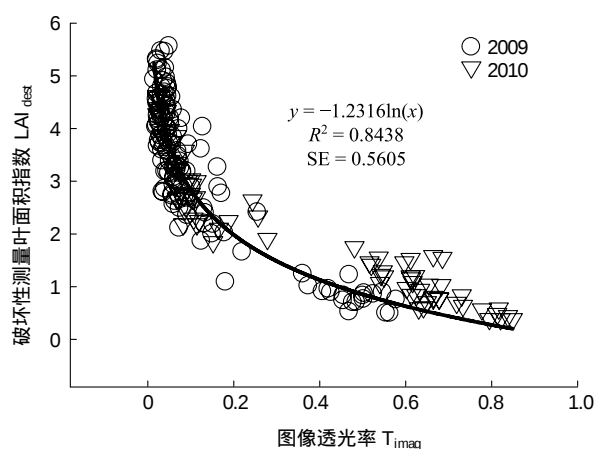
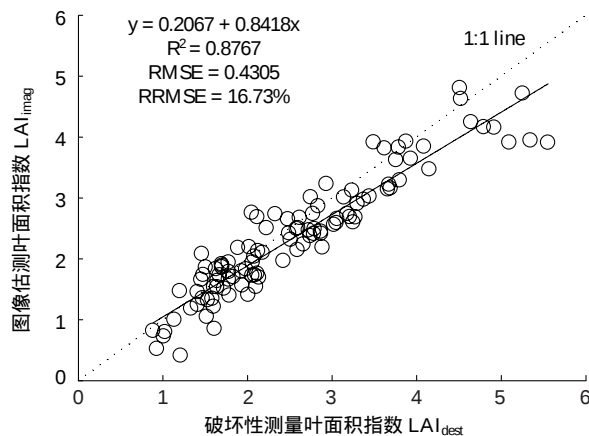
图6 图像透光率 T_{imag} 与 LAI_{dest} 的回归分析Fig. 6 Regression analysis between T_{imag} and LAI_{dest} 

图7 棉花 LAI 的估测值与实测值之间的比较

Fig. 7 Comparison of estimated and observed LAI in cotton

表1 三种 LAI 测定方法的比较分析

Table 1 Comparison analysis of three methods of LAI measurement

方法 Methods	决定系数 R^2	均方根误差 RMSE	相对均方根误差 RRMSE/%	偏差 BIAS
LAI_{dest} vs. LAI_{imag}	0.8558	0.5592	19.76	-0.0720
LAI_{2000} vs. LAI_{imag}	0.8521	0.6143	22.01	-0.0328
LAI_{dest} vs. LAI_{2000}	0.9163	0.4758	16.81	-0.0392

3 讨论

本研究利用数字图像的二维平面信息提取了棉花立体冠层的图像透光率。当数码相机固定拍摄方向观测某一点时,太阳高度角的变化影响图像中各分量的比例,使得 T_{imag} 值具有日变化特征(图4)。分析叶面积不同小区的 T_{imag} 日变化的结果显示,在正午前后的时段(13:00—15:00)测定的 T_{imag} 与 T_{quan} 之间的差异较小且相对稳定。Adams^[43]指出在正午前太阳高度角最大而且冠层的光截获变化最小,是利用图像方法测量覆盖度的最佳时间。Purcell^[44]发现在正午时段用线性光子传感器测量的大豆冠层光截获与数码相机测量的冠层覆盖度之间有显著的一一对应关系。可见,在研究冠层截获和透过的光时,光强的稳定性是选择适宜测量时间的决定因素。

比较分析了 T_{imag} 与 T_{quan} 和 DIFN 之间的关系。一方面,说明本文采用的图像方法不适用于测量吐絮期的冠层透光率,原因在于该时期光照的失绿叶片和棉絮在冠层图像中占有较大的比例。本文只研究了健康棉田,如果棉田因缺素、病虫害和药害等因素导致大量的叶片失绿,也会导致在图像分割获取的光照叶片和光照土壤的比例发生变化并最终得到偏大的 T_{imag} 。另一方面,在去除上述影响因素后,证实了 T_{imag} 能够反映光在不同冠层中的衰减状况(图5),但是在 LAI 较大时会出现 T_{imag} 的饱和现象。Gower^[13]也指出在 LAI 达到 5—6 时间隙率(在黑体假设和叶片随机分布条件下,透光率和间隙率相等^[29])会饱和,这与本文结果一致。

根据公式(2),建立了图像方法估测 LAI 的定量模型(图6)。综合独立数据样本的检验结果(图7)和图像方法与 LAI-2000 和破坏性取样测量的 LAI 的比较结果(图8a和b),可见,在 LAI>5 时,图像方法估测的 LAI 均出现饱和现象,其根源在于图像透光率的饱和。Gower^[13]认为由于冠层叶片的非随机分布(即聚集),所有用光学仪器间接测量的 LAI 都会低估 LAI,而且当 LAI>6 时,只有直接测量方法是有效的。在本研究中,数字图像方法和 LAI-2000 冠层仪都低估了直接测量的 LAI(表1)。此外, LAI-2000 在 LAI<6 的范围内都与直接测量的 LAI 关系密切,这与前人在棉花^[7]($R^2=0.89$)、玉米^[10](不同品种的 R^2 分别为 0.69 和 0.93)和菜

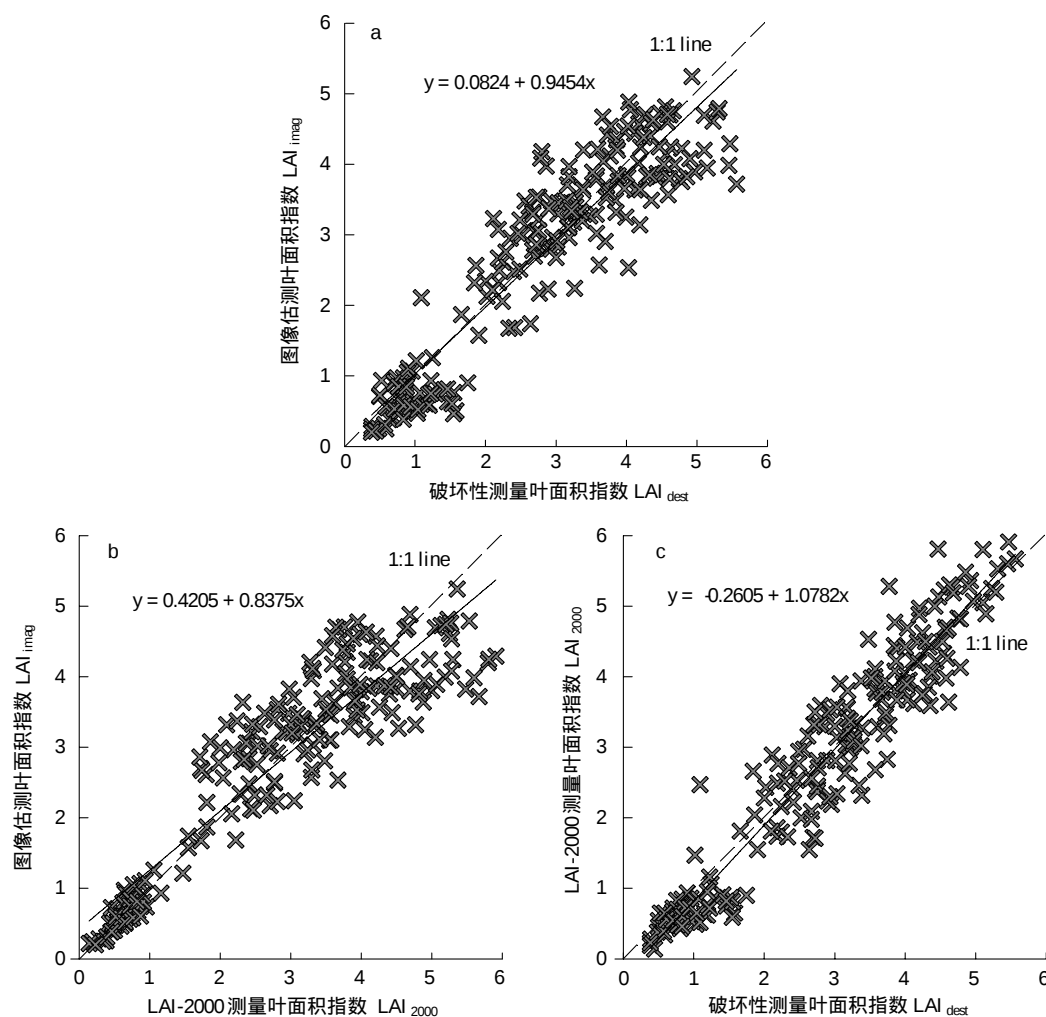


图 8 棉花叶面积指数 3 种测定方法之间的相互比较

Fig. 8 Intercomparison of LAI_{imag} , LAI_{2000} and LAI_{dest} in cotton

豆^[45] ($R^2=0.97$) 等作物上研究结果相同。

Law^[35] 利用光照叶片和阴影分量估测 LAI, Peddle^[36] 只用了阴影分量, 而本研究则用了图像的光照分量。虽然研究方法、尺度和估测指标有所差异, 但是证实了用光照和阴影分量量化植被的冠层结构信息的有效性。本文的数字图像方法在限定的条件下可以有效的估测棉田的 LAI, 估测受限的原因是 T_{imag} 的饱和。冠层数字图像的 4 分量的分割阈值是精确计算 T_{imag} 的关键, 说明本文的图像分量分割算法不适用于棉田 LAI 大于 5、叶片失绿和吐絮等条件, 本文的遗憾在于没有改进图像分量的分割算法。然而, 数字图像是一种包含冠层结构基本信息的近距离遥感成像, 它可以永久记录冠层几何分布状况, 可以存储后用于将来发展和改进的方法分析研究^[46]。此外, 虽然数字图像方法 (顶视法) 的直接测量 LAI 的估测精度要低于 LAI-2000 (底视法), 但是数码相机可以安装在拖拉机等运载工具上估测 LAI, 为精准农业中的精准监测提供新的技术支持, 而 LAI-2000 则不适合田间自动化运行^[47]。近年来, 结构小巧、操作简单、稳定性高、成本低廉的智能相机已成功用于监测工业领域的多种自动化生产过程。作为一种高度集成化的微小型机器视觉系统, 智能相机通过传感器将目标物转换成图像信号并传送至图像处理系统, 将像素分布、亮度、颜色等信息转变成数字信号后进行各种运算来提取目标的特征, 并返回结果。因此, 如能改进图像分割的算法和设计满足限定条件的装置, 将数字图像估测 LAI 的算法集成到智能相机后搭载在田间运载工具上, 则可实时、无损地监测棉田 LAI, 从而促进农业生产精准监测技术的发展。

4 结论

叶面积指数是作物群体结构重要的特征参数。图像光照和阴影分量与冠层结构特征关系密切。本研究基于不同年份、生育时期、种植密度、品种类型、施氮量和灌水量的试验资料。明确了正午时段的图像透光率能够反映吐絮期以外各时期光在棉花冠层中的衰减状况,但是在 LAI 超过 5 以后图像透光率出现饱和现象。综合 2009 与 2010 年数据,确立了图像透光率与破坏性取样测量 LAI 的定量关系,利用 2007 年数据对模型的检验结果表明当 LAI 大于 5 时模型的预测能力较差。与传统的破坏性取样方法和 LAI-2000 冠层仪比较分析显示,图像方法在 LAI<5 时可以准确估测棉田的叶面积指数,虽然用 LAI-2000 测量 LAI 更加可靠,但是操作方法限制了 LAI-2000 在精准农业的大面积监测中的应用,而图像方法为数码相机安装在拖拉机等运载工具上实时、无损的监测棉田 LAI 提供了新的理论基础和研究思路。

References:

- [1] Fensholt R, Sandholt I, Rasmussen M S. Evaluation of MODIS LAI, fAPAR and the relation between fAPAR and NDVI in a semi-arid environment using in situ measurements. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 91(3/4): 490-507.
- [2] Chen J M, Rich P M, Gower S T, Norman J M, Plummer S. Leaf area index of boreal forests: theory, techniques, and measurements. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(D24): 29429-29443.
- [3] Nasahara K N, Muraoka H, Nagai S, Mikami H. Vertical integration of leaf area index in a Japanese deciduous broad-leaved forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148(6/7): 1136-1146.
- [4] Ryu Y, Sonnentag O, Nilson T, Vargas R, Kobayashi H, Wenk R, Baldocchi D D. How to quantify tree leaf area index in an open savanna ecosystem: a multi-instrument and multi-model approach. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010, 150(1): 63-76.
- [5] dePury D G G, Farquhar G D. Simple scaling of photosynthesis from leaves to canopies without the errors of big-leaf models. *Plant, Cell and Environment*, 1997, 20(5): 537-557.
- [6] Baldocchi D D, Xu L K. What limits evaporation from Mediterranean oak woodlands—The supply of moisture in the soil, physiological control by plants or the demand by the atmosphere?. *Advances in Water Resources*, 2007, 30(10): 2113-2122.
- [7] Hicks S K, Lascano R J. Estimation of leaf area index for cotton canopies using the LI-COR LAI-2000 plant canopy analyzer. *Agronomy Journal*, 1995, 87(3): 458-464.
- [8] Macfarlane C, Grigg A, Evangelista C. Estimating forest leaf area using cover and fullframe fisheye photography: thinking inside the circle. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, 146(1/2): 1-12.
- [9] Juárez R I N, Da Rocha H R, Figueira A M S, Goulden M L, Miller S D. An improved estimate of leaf area index based on the histogram analysis of hemispherical photographs. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 149(6/7): 920-928.
- [10] Wilhelm W W, Ruwe K, and Schlemmer M R. Comparison of three leaf area index meters in a corn canopy. *Crop Science*, 2000, 40(4): 1179-1183.
- [11] Tewolde H, Sistani K R, Rowe D E, Adeli A, Tsegaye T. Estimating cotton leaf area index nondestructively with a light sensor. *Agronomy Journal*, 2005, 97(4): 1158-1163.
- [12] Bréda N J J. Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies. *Journal of Experimental Botany*, 2003, 54(392): 2403-2417.
- [13] Gower S T, Kucharik C J, Norman J M. Direct and indirect estimation of leaf area index, f_{APAR} and net primary production of terrestrial ecosystems. *Remote Sensing of Environment*, 1999, 70(1): 29-51.
- [14] Jonckheere I, Fleck S, Nackaerts K, Muys B, Coppin P, Weiss M, Baret F. Review of methods for in situ leaf area index determination: Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 121(1/2): 19-35.
- [15] Asrar G, Fuchs M, Kanemasu E T, Hatfield J L. Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat. *Agronomy Journal*, 1984, 76(2): 300-306.
- [16] Broge N H, Mortensen J V. Deriving green crop area index and canopy chlorophyll density of winter wheat from spectral reflectance data. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 81(1): 45-57.
- [17] LI Y X, Zhu Y, Dai T B, Tian Y C, Cao W X. Quantitative relationships between leaf area index and canopy reflectance spectra of wheat. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(8): 1443-1447.
- [18] Feng W, Zhu Y, Yao X, Tian Y C, Cao W X. Monitoring leaf dry weight and leaf area index in wheat with hyperspectral remote sensing. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2009, 33(1): 34-44.
- [19] Thenkabail P S, Smith R B, De Pauw E. Hyperspectral vegetation indices and their relationships with agricultural crop characteristics. *Remote Sensing of Environment*, 2000, 71(2): 158-182.
- [20] Tan C W, Huang Y D, Huang W J, Wang J H, Zhao C J, Liu L Y. Study on colony leaf area index of summer maize by remote sensing vegetation indexes method. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2004, 31(4): 392-397.
- [21] Houborg R, Anderson M, Daughtry C. Utility of an image-based canopy reflectance modeling tool for remote estimation of LAI and leaf chlorophyll content at the field scale. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(1): 259-274.
- [22] Xue L H, Cao W X, Luo W H, Wang S H. Relationship between spectral vegetation indices and LAI in rice. *Acta Phytocologica Sinica*, 2004, 28(1): 47-52.
- [23] Liu Z Y, Huang J F, Wang F M, Wang Y. Adjusted-normalized difference vegetation index for estimating leaf area index of rice. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(10): 3350-3356.
- [24] Tian Y C, Yang J, Yao X, Zhu Y, Cao W X. Quantitative relationships between hyper-spectral vegetation indices and leaf area index of rice. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(7): 1685-1690.

- [25] Zhao D H, Huang L M, Li J L, Qi J G. A comparative analysis of broadband and narrowband derived vegetation indices in predicting LAI and CCD of a cotton canopy. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2007, 62(1): 25-33.
- [26] Liu J D, Cao W B, Ma R. Study on remote sensing estimation models about LAI of cotton. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(12): 4301-4306.
- [27] Yang F, Zhang B, Song K S, Wang Z M, Liu D W, Liu H J, Li F, Li F X, Guo Z X, Jin H A. Comparison of methods for estimating soybean leaf area index. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2008, 18(12): 2951-2955.
- [28] White M A, Asner G P, Nemani R R, Privette J L, Running S W. Measuring fractional cover and leaf area index in arid ecosystems: digital camera, radiation transmittance, and laser altimetry methods. *Remote Sensing of Environment*, 2000, 74(1): 45-57.
- [29] Garrigues S, Shabanov N V, Swanson K, Morisette J T, Baret F, Myneni R B. Intercomparison and sensitivity analysis of leaf area index retrievals from LAI-2000, AccuPAR, and digital hemispherical photography over croplands. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148(8/9): 1193-1209.
- [30] Li C J, Wang J H, Liu L Y, Wang R C. Automated digital image analyses for estimating percent ground cover of winter wheat based on object features. *Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Science)*, 2004, 30(6): 650-656.
- [31] Li S K, Suo X M, Bai Z Y, Qi Z L, Liu X H, Gao S J, Zhao S N. The machine recognition for population feature of wheat images based on BP neural network. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(6): 616-620.
- [32] Wang G Q, Zheng L M, Zhu H, Liang Z X, Liao S H. Application of image processing technology in wheat canopy leaf area index measuring. *Journal of Triticeae Crops*, 2004, 24(4): 108-112.
- [33] Li M, Zhang C L, Fang J L. Extraction of leaf area index of wheat based on image processing technique. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(1): 205-209.
- [34] Hall F G, Shimabukuro Y E, Huemmrich K F. Remote sensing of forest biophysical structure using mixture decomposition and geometric reflectance models. *Ecological Applications*, 1995, 5(4): 993-1013.
- [35] Law B E. Estimation of leaf area index and light intercepted by shrubs from digital videography. *Remote Sensing of Environment*, 1995, 51(2): 276-280.
- [36] Peddle D R, Hall F G, LeDrew E F. Spectral mixture analysis and geometric-optical reflectance modeling of boreal forest biophysical structure. *Remote Sensing of Environment*, 1999, 67(3): 288-297.
- [37] Casa R, Jones H G. LAI retrieval from multiangular image classification and inversion of a ray tracing model. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 98(4): 414-428.
- [38] Wang Q, Chen J L, Sun Z Q. The utility of LAI-2000 canopy analyzer studying the sunlight distribution characteristics in different plant colonies. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(5): 922-927.
- [39] Bai J H, Wang K R, Chu Z D, Chen B, Li S K. Comparative study on the measure methods of the leaf area. *Journal of Shihezi University(Natural Science)*, 2005, 23(2): 216-218.
- [40] Monsi M, Saeki T. On the factor light in plant communities and its importance for matter production. *Annals of Botany*, 2005, 95(3): 549-567.
- [41] Li X W, Strahler A H. Geometric-optical modeling of a conifer forest canopy. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1985, GE-23(5): 705-721.
- [42] Welles J M, Cohen S. Canopy structure measurement by gap fraction analysis using commercial instrumentation. *Journal of Experimental Botany*, 1996, 47(302): 1335-1342.
- [43] Adams J E, and Arkin G F. A light interception method for measuring row crop ground cover. *Soil Science Society of America Journal*, 1977, 41(4): 789-792.
- [44] Purcell L C. Soybean canopy coverage and light interception measurements using digital imagery. *Crop Science*, 2000, 40(4): 834-837.
- [45] de Jesus W C Jr, do Vale F X R, Coelho R R, Costa L C. Comparison of two methods for estimating leaf area index on common bean. *Agronomy Journal*, 2001, 93(5): 989-991.
- [46] Rich P M. Characterizing plant canopies with hemispherical photographs. *Remote Sensing Reviews*, 1990, 5: 13-29.
- [47] Kirk K, Andersen H J, Thomsen A G, Jørgensen J R, Jørgensen R N. Estimation of leaf area index in cereal crops using red-green images. *Biosystems Engineering*, 2009, 104(3): 308-317.

参考文献:

- [17] 李映雪, 朱艳, 戴廷波, 田永超, 曹卫星. 小麦叶面积指数与冠层反射光谱的定量关系. *应用生态学报*, 2006, 17(8): 1443-1447.
- [18] 冯伟, 朱艳, 姚霞, 田永超, 曹卫星. 基于高光谱遥感的小麦叶干重和叶面积指数监测. *植物生态学报*, 2009, 33(1): 34-44.
- [20] 谭昌伟, 黄义德, 黄文江, 王纪华, 赵春江, 刘良云. 夏玉米叶面积指数的高光谱遥感植被指数法研究. *安徽农业大学学报*, 2004, 31(4): 392-397.
- [22] 薛利红, 曹卫星, 罗卫红, 王绍华. 光谱植被指数与水稻叶面积指数相关性的研究. *植物生态学报*, 2004, 28(1): 47-52.
- [23] 刘占宇, 黄敬峰, 王福民, 王渊. 估算水稻叶面积指数的调节型归一化植被指数. *中国农业科学*, 2008, 41(10): 3350-3356.
- [24] 田永超, 杨杰, 姚霞, 朱艳, 曹卫星. 高光谱植被指数与水稻叶面积指数的定量关系. *应用生态学报*, 2009, 20(7): 1685-1690.
- [26] 刘姣娣, 曹卫彬, 马蓉. 棉花叶面积指数的遥感估算模型研究. *中国农业科学*, 2008, 41(12): 4301-4306.
- [27] 杨飞, 张柏, 宋开山, 王宗明, 刘殿伟, 刘焕军, 李方, 李凤秀, 国志兴, 靳华安. 大豆叶面积指数的高光谱估算方法比较. *光谱学与光谱分析*, 2008, 18(12): 2951-2955.
- [30] 李存军, 王纪华, 刘良云, 王人潮. 基于数字照片特征的小麦覆盖度自动提取研究. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2004, 30(6): 650-656.
- [31] 李少昆, 索兴梅, 白中英, 祁之力, 刘晓鸿, 高世菊, 赵双宁. 基于 BP 神经网络的小麦群体图像特征识别. *中国农业科学*, 2002, 35(6): 616-620.
- [32] 王桂琴, 郑丽敏, 朱虹, 梁振兴, 廖树华. 图像处理技术在冬小麦叶面积指数测定中的应用. *麦类作物学报*, 2004, 24(4): 108-112.
- [33] 李明, 张长利, 房俊龙. 基于图像处理技术的小麦叶面积指数的提取. *农业工程学报*, 2010, 26(1): 205-209, 10007-10007.
- [38] 王谦, 陈景玲, 孙治强. 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*, 2006, 39(5): 922-927.
- [39] 柏军华, 王克如, 初振东, 陈兵, 李少昆. 叶面积测定方法的比较研究. *石河子大学学报(自然科学版)*, 2005, 23(2): 216-218.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 31, No. 11 June, 2011 (Semimonthly)

CONTENTS

Responses of microbes-mediated carbon and nitrogen cycles to global climate change	SHEN Jupei, HE Jizheng (2957)
Formation of cyanobacterial blooms in Lake Chaohu and the photosynthesis of dominant species hypothesis	JIA Xiaohui, SHI Dingji, SHI Mianhong, et al (2968)
Unbalanced cyclical fluctuation pattern of intermittent outbreaks of beet armyworm <i>Spodoptera exigua</i> (Hübner) in China	WEN Lizhang, ZHANG Youjun, ZHU Liang, et al (2978)
Self-organizing feature map classification and ordination of <i>Larix principis-rupprechtii</i> forest in Pangquangou Nature Reserve	ZHANG Qindi, ZHANG Jintun, Suriguga, et al (2990)
Ecological effects of lakeside wetlands restoration in Dalian Lake, Shanghai	WU Di, YUE Feng, LUO Zukui, et al (2999)
Soil organic carbon storage and profile inventory in the different vegetation types of Luya Mountain	WU Xiaogang, GUO Jinping, YANG Xiuyun, et al (3009)
Response of soil microbial community structure to the leaf litter decomposition of three typical broadleaf species in mid-subtropical area, southern China	ZHANG Shengxi, CHEN Falin, ZHENG Hua (3020)
The decomposition of coniferous and broadleaf mixed litters significantly changes the carbon metabolism diversity of soil microbial communities in subtropical area, southern China	CHEN Falin, ZHENG Hua, YANG Bosu, et al (3027)
Spatiotemporal heterogeneity of topsoil nutrients in Karst Peak-Cluster depression area of Northwest Guangxi, China	LIU Shujuan, ZHANG Wei, WANG Kelin, et al (3036)
Effects of cadmium stress on the activities of antioxidant enzymes, digestive enzymes and the membrane lipid peroxidation of the mangrove mud clam <i>Geloina coaxans</i> (Gmelin)	LAI Tinghe, HE Binyuan, FAN Hangqing, et al (3044)
The edge effects on tree-liana relationship in a secondary natural forest in Bawangling Nature Reserve, Hainan Island, China	WU Yuna, TAO Jianping, XI Weimin, et al (3054)
Soilwater deficit under different artificial vegetation restoration in the semi-arid hilly region of the Loess Plateau	YANG Lei, WEI Wei, MO Baoru, et al (3060)
The diurnal trends of sensible and latent heat fluxes of a subtropical evergreen coniferous plantation subjected to seasonal drought	HE Youwei, WANG Qiubing, WEN Xuefa, et al (3069)
Ecological adaptability of photosynthesis and water use for <i>Tamarix ramosissima</i> in the southern periphery of Gurbantungut Desert, Xinjiang	WANG Shanshan, CHEN Xi, WANG Quan, et al (3082)
Estimation of leaf area index of cotton using digital Imaging	WANG Fangyong, WANG Keru, LI Shaokun, et al (3090)
Different response of photosynthetic apparatus between wild soybean (<i>Glycine soja</i>) and cultivated soybean (<i>Glycine max</i>) to NaCl stress	XUE Zhongcai, GAO Huiyuan, LIU Jie (3101)
Effects of water and phosphorus supply on morphology and structure of special root hairs on nodal roots of wheat (<i>Triticum aestivum</i> L.)	ZHANG Jun, HE Dexian, DUAN Zengqiang (3110)
Applications of species indicator for analyzing plant community types and their biodiversity at Kunyushan National Forest Reserve	SUN Zhiqiang, ZHANG Xingyao, ZHU Yanpeng, et al (3120)
Societal metabolism for chinese provinces based on multi-scale integrated analysis of societal metabolism (MSIASM)	LIU Ye, GENG Yong, ZHAO Hengxin (3133)
Comparative gene expression analysis for leaf trichomes of tobacco grown in two different regions in China	CUI Hong, JI Hao, YANG Huijuan, et al (3143)
Performance evaluation of B biotype whitefly, <i>Bemisia tabaci</i> on 23 host plants	AN Xincheng, GUO Qiang, HU Qiongbo (3150)
Studies of hemocytes DNA damage by two pesticides acetamiprid and chlorpyrifos in predaceous spiders of <i>Pardosa astrigera</i> Koch	LI Rui, LI Shengcai, LIU Jia, (3156)
Effects of the fungicide prochloraz on the rotifer <i>Brachionus calyciflorus</i>	LI Daming, LU Zhenghe, FENG Qi, et al (3163)
Effects of long- and short-term successive parthenogenesis on life history and genetics characteristics of <i>Brachionus calyciflorus</i>	GE Yali, XI Yilong (3170)
Review and Monograph	
Review of the relationship between regional landscape pattern and surface water quality	ZHAO Jun, YANG Kai, TAI Jun, et al (3180)
Review of dew action effect on plants	YE Youhua, PENG Shaolin (3190)
Advances in Botryosphaeriaceae: identification, phylogeny and molecular ecology	CHENG Yanlin, LIANG Jun, LÜ Quan, et al (3197)
Advances in research on the mechanisms of age-related productivity decline of planted forests	MAO Peili, CAO Banghua, TIAN Wenxia, et al (3208)
The application of tree-ring on forest disturbance history reconstruction	FENG Xiaohui, CHENG Ruimei, XIAO Wenfa, et al (3215)
Research advances on stress responsive WRKY transcription factors in plants	LI Ran, LOU Yonggen (3223)
Scientific Note	
The soil microbial activities and microbial biomass in Sanjiangyuan Alpine grassland	REN Zuohua, ZHANG Yuguang, LI Diqiang, et al (3232)
The differences of water use efficiency (WUE) among three <i>Populus deltoids</i> clones, and the cloning and characterization of related gene, <i>PdERECTA</i>	GUO Peng, XIA Xinli, YIN Weilun (3239)
Arthropod community reestablishment and niche of the main groups in kiwifruit orchards	DU Chao, ZHAO Huiyan, GAO Huanhuan, et al (3246)

2009 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊★

(源于 2010 年版 CSTPCD 数据库)

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响因子 Impact factor
1	生态学报	11764	1	生态学报	1.812
2	应用生态学报	9430	2	植物生态学报	1.771
3	植物生态学报	4384	3	应用生态学报	1.733
4	西北植物学报	4177	4	生物多样性	1.553
5	生态学杂志	4048	5	生态学杂志	1.396
6	植物生理学通讯	3362	6	西北植物学报	0.986
7	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3327	7	兽类学报	0.894
8	MOLECULAR PLANT	1788	8	CELL RESEARCH	0.873
9	水生生物学报	1773	9	植物学报	0.841
10	遗传学报	1667	10	植物研究	0.809

★《生态学报》2009 年在核心版的 1964 种科技期刊排序中总被引频次 11764 次,全国排名第 1;影响因子 1.812,全国排名第 14;第 1—9 届连续 9 年入围中国百种杰出学术期刊;中国精品科技期刊

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报
(SHENGTAI XUEBAO)
(半月刊 1981 年 3 月创刊)
第 31 卷 第 11 期 (2011 年 6 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 31 No. 11 2011

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元