

DOI: 10.5846/stxb201211231660

孙涛, 刘振波, 葛云健, 顾祝军. 基于数码相片 Gamma 校正的水稻叶面积指数估算. 生态学报, 2014, 34(13): 3548-3557.
Sun T, Liu Z B, Ge Y J, Gu Z J. Estimation of paddy rice leaf area index based on photo gamma correction. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(13): 3548-3557.

基于数码相片 Gamma 校正的水稻叶面积指数估算

孙 涛^{1,2}, 刘振波^{1,2,*}, 葛云健^{1,2}, 顾祝军³

(1. 南京信息工程大学, 气象灾害省部共建教育部重点实验室, 南京 210044;

2. 南京信息工程大学, 遥感学院, 南京 210044; 3. 南京晓庄学院, 生物化工与环境工程学院, 南京 211171)

摘要:随着数码相机的日益普及,利用数码相机进行作物叶面积指数(LAI)测量不断得以应用。由于数码相机成像时会对入射光辐射强度进行Gamma编码变换,输出的相片DN(Digital Number)值与入射光辐射强度呈非线性关系,会造成在确定相片中植被叶片与背景的分割阈值时出现误差,并最终导致LAI估算存在较大不确定性。以水稻为研究对象,获取不同生长期水稻冠层相片并结合同步LAI 2000测量的LAI数据,基于相片Gamma校正原理,对水稻不同生长期冠层相片进行Gamma校正,在此基础上利用冠层孔隙率方法,估算不同生长期水稻LAI。结果表明,经过Gamma校正相片估算的水稻LAI总体精度有显著提高,相片估算的IMAGE LAI与LAI-2000测量值比较的决定系数达到0.71($P<0.05$)。在整个观测期内,两种方法观测的LAI值在时间变化趋势上表现一致,但在不同生长期存在差别,在水稻分蘖期和拔节期相片估算的IMAGE LAI要高于LAI-2000测量值,孕穗期到抽穗期期间IMAGE LAI低于LAI-2000测量值,乳熟期到成熟期IMAGE LAI又高于LAI-2000的观测结果。

关键词:数码相片; Gamma 校正; 叶面积指数

Estimation of paddy rice leaf area index based on photo gamma correction

SUN Tao^{1,2}, LIU Zhenbo^{1,2,*}, GE Yunjian^{1,2}, GU Zhujun³

1 Nanjing University of Information Science & Technology, Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, Nanjing 210044, China

2 Nanjing University of Information Science & Technology, School of Remote Sensing, Nanjing 210044, China

3 Nanjing Xiaozhuang University, School of Bio-Chemical and Environmental Engineering, Nanjing 211171, China

Abstract: The automatic compensation effect in a digital camera can cause a bias of the digital number (DN) of the acquired images. This study carried out DN correction using gamma transformation theory combined with a look-up table method. The DN of the acquired image generally bears a nonlinear relationship with the intensity of incident light, which is an inherent characteristic in common commercial digital cameras. The gamma method is a nonlinear operation used to code and decode luminance or tri-stimulus values in video or still image systems. It has been widely used in photography and video productions, but is rarely used in image processing and applications to vegetation parameter determination. The gamma transformation is mainly used to compensate for the properties of human vision by maximizing the use of the bits or bandwidth relative to the perception of light and color. If images are not gamma encoded, they allocate too many bits or too much bandwidth to the darker areas that humans cannot differentiate and too few bits to the brighter areas that humans are sensitive to, and would thus require more bits to maintain the same visual quality. Although the visual quality of RAW image is generally not very appropriate in commercial use, the RAW image is precisely required in the retrieval of vegetation parameters to obtain a better fit with field measurements. Apart from the gamma correction, for the various annual paddy rice conditions we used the vertical gap fraction to obtain the leaf area index (LAI), which we named image LAI, and compared

基金项目:国家重点基础研究发展计划(2010CB950701); 国家自然科学基金(41071281); 江苏省高校优势学科建设工程资助项目

收稿日期:2012-11-23; **修订日期:**2014-03-19

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liuzhenbo@yeah.net

with the field LAI from LAI-2000. The results indicated that the correlation coefficients after the correction procedure were remarkably similar with an R^2 of 0.71 ($P<0.05$) , better than for the uncorrected retrieved figures. In the tilling and jointing stages , there was a close approximation between the vertical gap fraction derived LAI and field LAI, but in the booting and heading stages the differences become obvious , reaching a maximum of 0.38. However, in the milk-ripened and maturation stages , the reverse occurred ; the field LAI was higher than the vertical gap fraction derived-LAI mainly because the foliage of the rice paddy went yellow. In general , there was a good fit between the retrieved LAI and field LAI, but the estimation accuracy varied depending on the phenology of paddy rice. A better fit between image LAI and LAI 2000 was observed in the tilling and jointing stages , when a larger bias between image LAI and field LAI was observed in the booting and heading stages , while an overestimation in image LAI was observed in the milk-ripened and maturation stages. The commercial digital camera can carry out easy and low cost research given its characteristic properties (ease of use, less costly, and lack of atmospheric effects). These features enable anyone to carry out good estimation work related to vegetation. These factors and many related articles make the digital camera a useful alternative method for assessing vegetation parameters such as vegetation fraction, leaf color, plant type and leaf area index.

Key Words: digital images; gamma correction; leaf area index

叶面积指数(LAI)是表征植被冠层结构的基本参量^[1],它不仅是陆面过程中重要的结构参数,也是表征作物生理状态和物候期的重要参数之一,可以估算植被的光截获、水分截获和地表生态系统的二氧化碳交换等^[2-3]。LAI的测量方法主要分为两类,一是实地采摘叶片,然后手工测量叶片面积,这种方法为破坏性测量。二是通过非接触式测量进行LAI估算,主要包括卫星和雷达遥感、器械观测(如LAI-2000)、热成像、激光扫描和多光谱扫描等方式^[4]。手工采摘的方法较其他方法准确^[5],但该方法耗时耗力,步骤繁琐,且手工采摘可能造成测量区域LAI值误差的外推^[6-7]。已有研究证明,在一个时段内连续对同一地区植被进行破坏性测量会导致LAI值的误差^[8-10]。如果研究区植被类型丰富,季节性明显,手工测量更难以及时反映较大尺度上的植被长势或变化。出于准确性和测量便捷性的考虑,许多研究者使用遥感或其他无损方法来估测LAI。

近年来,数码相机日益普及,相比LAI专业测量设备,数码相机具有低廉的价格和良好的便携性,几乎不受大气影响^[2,5,11],因此利用数码相机进行LAI测量近年来不断得以应用^[12-18]。White MA^[19]使用数码相片对干旱区生态系统进行了地表覆盖度和叶面积指数的研究。Hirafuji^[20]提出了Field Monitor Server(FMS)系统,利用数码相机建立监测网,对研究区植被参数进行定位观测。Shibayama^[21]使用近红外数码相机进行定点拍摄,基于回归方法对水稻

LAI进行了估测。Sakamoto^[22]提出了Crop Phenology Recording System(CPRS)昼夜连续监测水稻长势。

在数码相机的选取上,中高档单反数码相机成像质量较高,输出格式较为丰富,可以直接输出无损格式(RAW Image Format)的数码相片。但单反相机价格相对较高,并且目前主流厂商对RAW格式均进行了二次封装,形成了多种数据格式,这些因素制约了单反数码相机的普遍应用。相对于中高档相机,输出格式统一、易用性强、便携性好并且价格较低的普通卡片相机在成本和通用性上较为理想,便于构建定位观测网络,因此已有研究在相片估算LAI时较多采用普通卡片数码相机^[2,23-24]作为数据源。卡片数码相机一般仅能输出JPEG格式的图像,为了成像结果在色彩和白平衡上更加符合人眼视觉,相机一般会对进入传感器的光信号进行非线性变换(Gamma编码),导致了相片像元值(Digital Number, DN)值相对于入射光辐射量的偏移^[25]。当这种偏移(由相机补偿)足够大,就会导致相片本身的亮度和色彩水平发生明显变化,即相片直方图与实际像元直方图之间相差较大,在利用孔隙率算法提取植被叶片与背景的分割阈值时会出现偏差^[2,23,26],相片直方图并不稳定时,阈值选取往往很困难,产生偏差的几率大大提高^[3,20,24],导致估算结果存在较大不确定性。

本研究于野外田间布设试验小区,在水稻不同生长期利用卡片数码相机拍摄水稻冠层相片并同

步使用 LAI-2000 仪器测量 LAI, 基于 Gamma 校正原理对冠层数码相片进行校正处理, 将原本不稳定的相片直方图统一到较为一致的水平, 利用冠层孔隙率方法估算不同时期的作物 LAI。最后结合 LAI-2000 观测数据对相片估算的 LAI 进行精度及适用性分析。

1 材料和方法

1.1 试验区概况

本研究试验区位于安徽省池州市 ($N30.54^{\circ}$, $E117.30^{\circ}$), 研究区地处安徽省西南部, 属于暖湿性亚热带季风气候, 地势较为平坦, 为中国典型双季稻产区, 每年分别于 5 月上旬和 8 月中旬进行早、晚稻插秧。试验区设定在具有代表性的较大片农田之中, 总面积约 $0.5 \text{ km} \times 0.5 \text{ km}$, 在试验区内均匀布设

12 个 $50 \text{ m} \times 50 \text{ m}$ 的测量小区进行试验数据测量。

1.2 研究数据

1.2.1 水稻冠层相片

水稻冠层相片的获取日期为 2011 年 6 月 7 日—2011 年 7 月 23 日, 间隔 10 d 左右拍摄 1 次共获取 6 个时期的相片数据, 覆盖早稻生长的拔节期、孕穗期、抽穗期、乳熟期和成熟期。基于研究对象(水稻)和周围环境状况, 数码相机拍摄参数设置参考了已有相关研究^[5,23,26-27], 使用 SONY (TX5) 数码相机于离地 1.5 m 处垂直向下拍摄, 闪光灯处于关闭状态(表 1), 相片分辨率 4000×3000 , 以 JPEG 格式存储并传输至计算机, 相片 R-G-B 三个通道的 DN 值均为 8bit, 即值域在 0—255 之间, 共获取满足实验要求的共 72 幅测点水稻冠层相片。

表 1 数码相机拍摄参数

Table 1 Digital Camera Parameters

| 相机参数 DC Parameters | | 相机参数 DC Parameters | |
|--------------------|----------|--------------------|------|
| 相机型号 Camera Model | SONY-TX5 | 曝光时间 Exposure Time | 自动 |
| 相片制式 Photo Format | 8bit RGB | ISO 速度 ISO Speed | 自动 |
| 光圈值 F-Stop | 2.7/3.5 | 焦距 Focal Length | 自动 |
| 测光模式 Metering | 图案 | 白平衡 White Balance | 自动 |
| 闪光灯 Flash | 关闭 | 成像格式 Image Format | JPEG |

1.2.2 LAI-2000 实测叶面积指数

使用 LAI-2000 植物冠层分析仪 (LI-COR, USA) 观测小区的 LAI 作为评价图像估算的

LAI 的评价标准。LAI-2000 利用“鱼眼”光学传感器(垂直视野范围 148° , 水平视野范围 360°)测量植被冠层上、下的辐射, 利用冠层辐射传输模型计算孔隙率和 LAI。测量时操作员背对阳光, 并用 270° 视角盖遮盖镜头以遮挡阳光与操作员。测量次序为先在水稻冠层上方测量 1 个 A 值, 再在冠层下方测量 4 个 B 值。在每个随机选 3 个点重复测量, 最后取平均值作为该小区的 LAI 测量值。

1.3 相片 Gamma 校正原理

数码相机成像时, 由 CCD 传感器记录所接收到的光辐射, 生成原始的线性 RAW 数据 (RAW IMAGE FORMAT)。RAW 数据容量较大, 完整存储了像元接受的真实辐射值, 但是线性 RAW 数据色调灰暗, 而人眼视觉系统对 RGB 信号的反应呈非线性(对数)关系, 因此 RAW 数据并不适合用作为相片输

出^[25]。所以一般卡片相机会在内部进行变换, 将 RAW 数据转换为 JPEG 或其他通用格式。这样既符合人眼视觉又能达到压缩存储的目的。相机内部的这种变换一般称作 Gamma 编码(图 1)。因此虽然数码相机输出的相片更符合人眼视觉感受, 但是由于在转换格式时引入了非线性变换, 相片 DN 值与实际接受的光辐射强度并非线性对应, 而在植被变化研究时, 则要求尽量取得真实 DN 值以期更准确地估算相关参数, 因此需要引入另一个变换来校正 Gamma 编码结果, 尽量恢复原始 DN 信号, 这个逆变换的过程就称为 Gamma 校正^[28-29](图 1)。

2 数据处理流程

2.1 相片数据预处理

数码相机为中心投影成像, 相片以像主点(投影中心)为中心呈辐射状, 越往边缘变形越大^[30-31], 因此相片除镜头中心区域外, 其外围像元均有不同程度的几何畸变(图 2)。为减小相片几何畸变造成的

影响,本研究将相片利用 3×3 格网平均分为 9 部分,取相片中心区域作为有效像元进行研究。

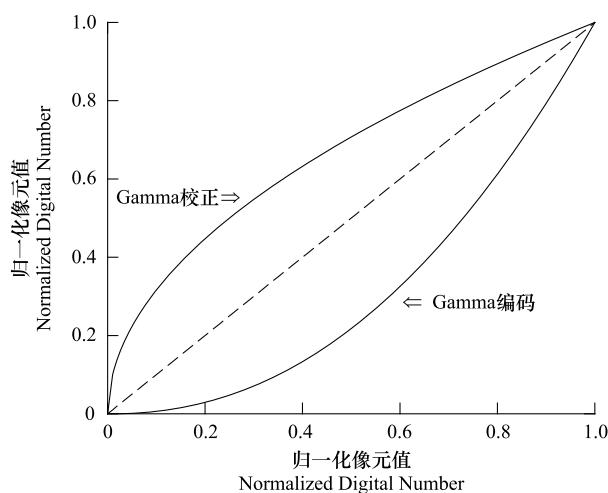


图 1 Gamma 校正示意图

Fig.1 Gamma correction sample figure

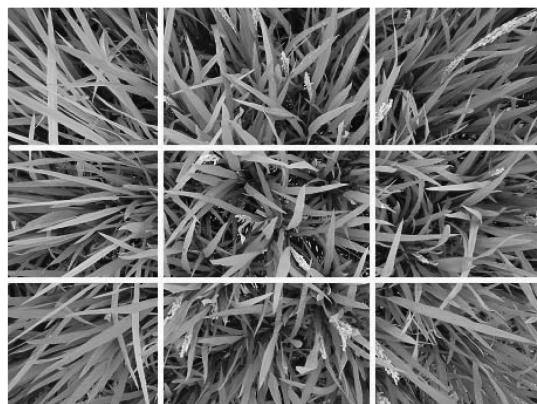


图 2 数码相片取景范围

Fig.2 Research area of digital camera

2.2 相片通道 DN 值标准化

根据 Gamma 编码理论^[3,23], 数码相机将初始 RAW 相片转换为 JPEG 相片时, 入射光强 LI (Light Intensity) 与像元 DN 值的关系可以表述为: $DN = LI^{\gamma}$. 由于数码相机内部的 Gamma 变换参数一般由厂商保密, 因此需要通过其他途径来获取影像像元 DN 值与入射光强 LI 的关系。

原始相片数据包括 R-G-B 3 个通道, 首先需得到成像时刻相片上 R-G-B 三通道值相等的区域, 并以此为基准将 3 个通道值的动态变化校正到一致的水平上, 以实现相片 R-G-B 3 个通道 DN 值的统一校正。已有研究^[3]利用采集相片时于相机视野内放置参考板同步成像, 再找到参考板上的黑色部分(R-G-B 通道值相等)作为基准值进行统一校正。

本研究采用参考板方法, 通过后期处理获得三通道基准值(图 3)。使用同型号的数码相机和相同设置参数(表 1), 利用 $20\text{ cm} \times 20\text{ cm}$ 的参考黑板(吸收率近似为 1.0)放置于相机镜头中心范围(防止畸变), 在不同的天气条件和光照条件下, 获取包括黑板在内的系列参考相片, 然后根据参考相片与水稻相片成像时的光照条件及天气, 并结合两者的 DN 值波段计算进行匹配, 得到水稻相片与参考相片的最佳匹配像对。最后利用遥感处理软件 ENVI 提取筛选出的参考相片黑板区域 R-G-B 3 个通道的平均值, 并与相片中绿色作物部分的 R-G-B 均值建立查找表, 模拟得到水稻数据采集时与 R-G-B 通道 DN 值为同一基准值对应的像元灰度 DN_G , 再与相对入射光强一起计算得到校正值 cDN 。

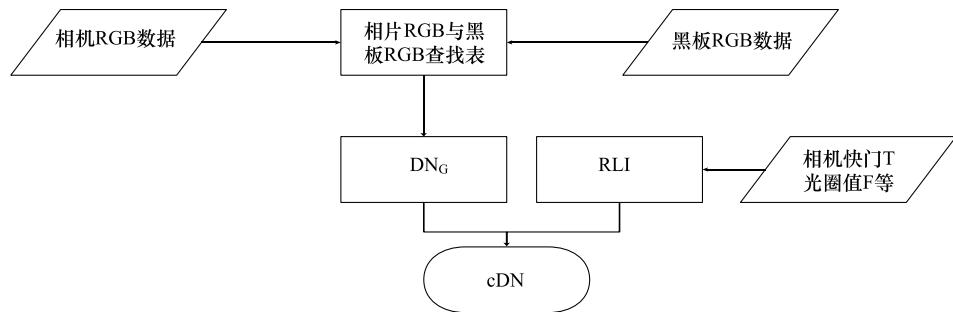


图 3 Gamma 校正流程图

Fig.3 Flowchart of Gamma correction

2.3 相片入射光强计算

相片的相对入射光强 RLI 可以通过数码相机成像时的快门速度 T 和光圈值 F 计算得到^[22], 计算公

式如下:

$$RLI = 2^{-EV} \quad (1)$$

$$EV = EV_T + EV_F \quad (2)$$

$$EV_F = 2 \times \log_2(F) \quad (3)$$

$$EV_T = -1 \times \log_2(T) \quad (4)$$

式中, EV 为曝光量, RLI 为相片相对入射光强, F 、 T 分别为相机成像时的光圈值和快门速度。

2.4 相片 DN 值校正

由相对入射光强 RLI 与标准化后的相片灰度 DN_G 值构建两者之间的散点图(图 4), 并拟合得到两者之 Gamma 校正曲线及幂函数拟合方程, 拟合方程如下:

$$RLI = 3 \times 10^{14} \times DN_G^{5.1434}, R^2 = 0.9023 \quad (5)$$

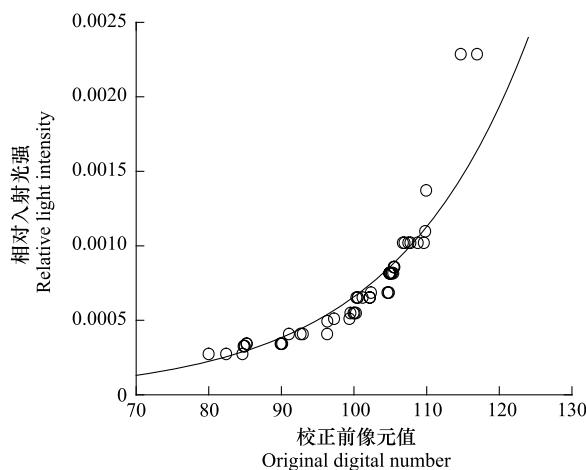


图 4 数码相片 DN_G 值与 RLI

Fig.4 Uncorrected relationship between DN and RLI

基于该拟合函数, 建立 RLI 与校正后像元值 cDN(Calibrated DN) 的线性关系:

$$cDN = aRLI \quad (6)$$

由于相片 DN 值的量化区间为(0, 255), 因此在进行线性拟合时, DN 值对应的 RLI 映射区间设定为(0, 0.072), 0.072 为相片上最高亮度值所对应的光照强度。据此得到相对入射光强与校正后像元值 cDN 的散点图(图 5), 并构建得到两者之间的线性拟合方程(公式 7), 最后根据该线性校正方程分别对 R-G-B 三通道 DN 值做校正, 分别得到校正后 R-G-B 三通道值: cDN_r , cDN_g , cDN_b 。图 6 分别为水稻冠层未校正 JPEG 相片及校正后相片, 可见经过校正后的相片整体色调偏暗, 背景值明显被压缩, 符合线性 RAW 图像特征^[29]。

$$cDN = 3541.67 RLI \quad (7)$$

2.5 叶面积指数计算

2.5.1 植被叶片提取

本研究利用绿度植被指数相片 2G-R-B^[32] 来提

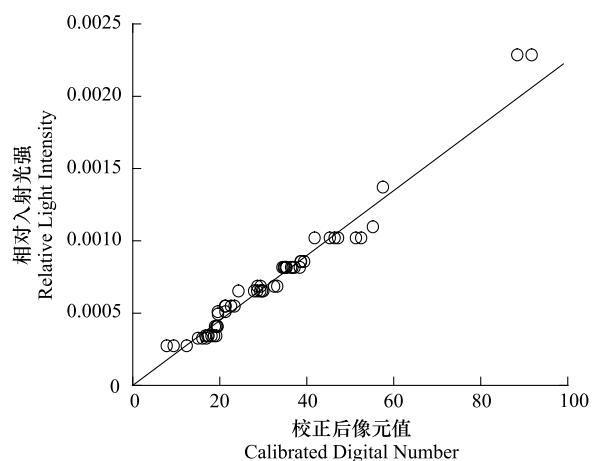
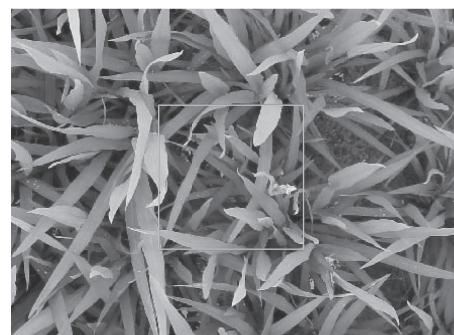
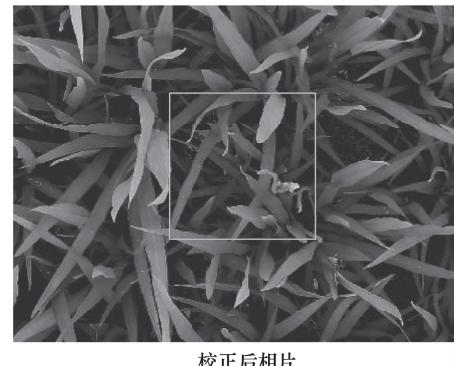


图 5 校正后像元值与相对入射光强散点图

Fig.5 Corrected relationship between cDN and RLI



校正前相片



校正后相片

图 6 校正前后相片对比

Fig.6 Comparison of Corrected & Uncorrected Images

取叶片像元, 叶片与背景分割的阈值根据绿度指数相片直方图确定^[2, 12, 19, 33], 叶片绿度植被指数的公式如下:

$$2G-R-B = 2 \times cDN_g - cDN_r - cDN_b \quad (8)$$

式中, cDN_g , cDN_r , cDN_b 分别表示相片 R-G-B 值经过 Gamma 校正后的像元值。

2.5.2 LAI 计算

本研究利用冠层孔隙率估算水稻 LAI, 利用冠层

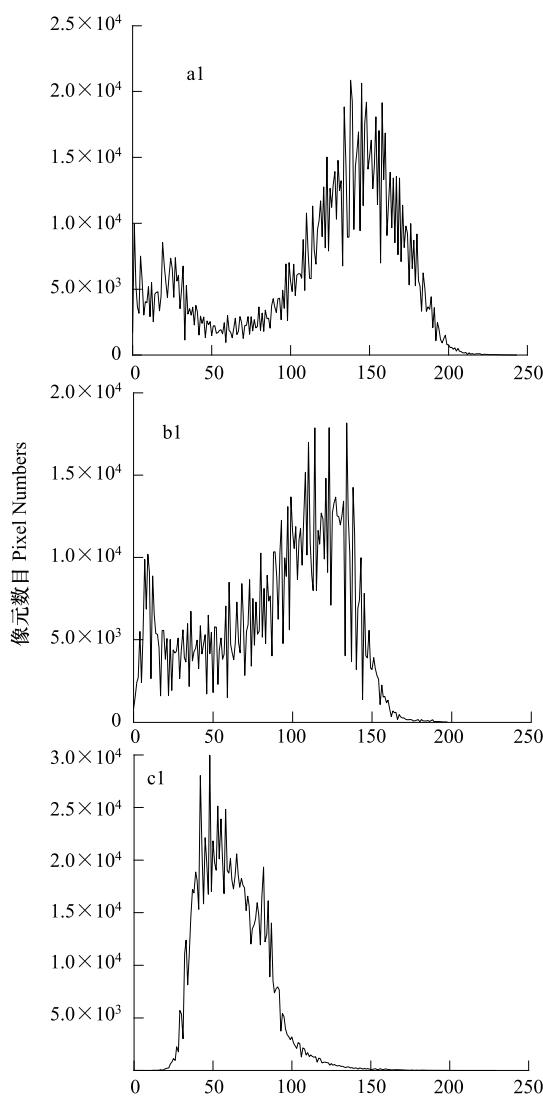
孔隙率计算 LAI 是一种经典的估算方法^[34-35], 假设作物叶片分布满足各向同性的条件, LAI 与冠层孔隙率有如下关系。

$$\text{LAI} = \frac{-\cos(\theta) \ln P_0(\theta)}{G(\theta)} = \frac{-\ln P_0(\theta)}{k(\theta)} \quad (9)$$

式中, $P_0(\theta)$ 为从太阳天顶角 θ 观察得到的孔隙率, $G(\theta)$ 为与 θ 方向垂直的叶片投影系数, $K(\theta)$ 为冠层消光系数。

本文的数码相片是自顶向下, 镜头垂直于地面方向采集(天顶角为 0°), 垂直方向上的孔隙率可以用背景像元数与相片总像元数的比值来计算^[5], 消光系数 $K(\theta)$ 取 0.5^[2]。因此 LAI 的计算公式可以简化为:

$$\text{LAI} = -2 \ln P_0(\theta) \quad (10)$$



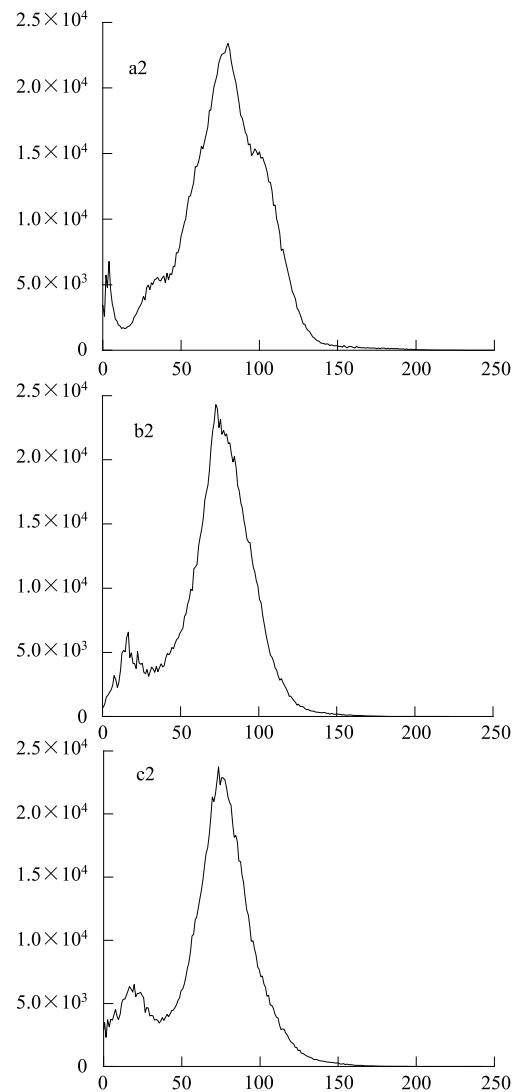
$$P_0(\theta) = \frac{N_{\text{bg}}}{N_{\text{total}}} \quad (11)$$

式中, $P_0(\theta)$ 为冠层垂直孔隙率, N_{bg} 、 N_{total} 分别为相片背景像元数与总像元数。

3 结果与讨论

3.1 相片 Gamma 校正对分割阈值确定的影响

植被叶片与背景的分割阈值是 LAI 估算的关键, 阈值的确定通过相片直方图选取。由于相机本身的补偿机制及冠层结构、分布等因素影响, 部分相片直方图阈值分割位置较难界定。例如图 7 (a1)、(b1)、(c1)、(d1) 为相同测点上不同时期水稻冠层相片的原始直方图, DN 值较高部分的波峰为绿色叶片像元。4 幅图中, 除 (a1) 植被叶片与背景较为清晰之外, (b1)、(c1)、(d1) 3 图植被叶片与背景区分



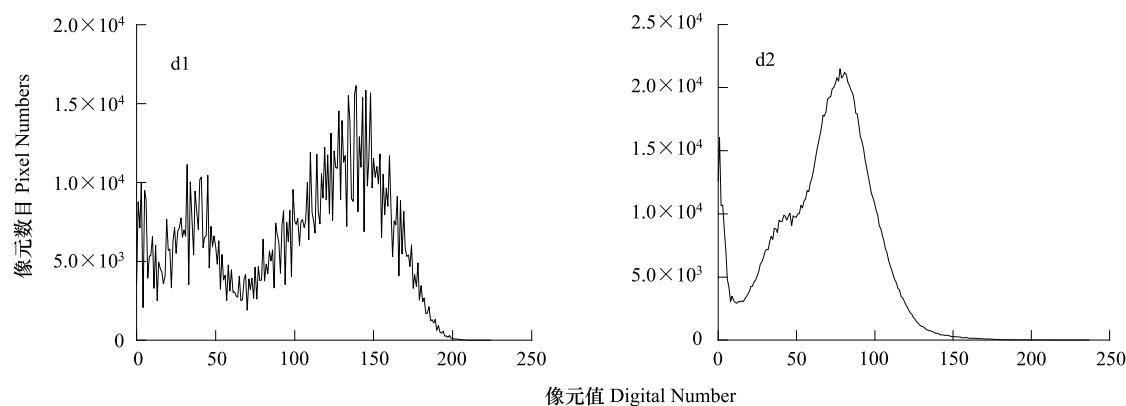


图 7 原始相片直方图和经 Gamma 校正后直方图

Fig.7 Original photo histograms and corresponding Gamma photo histograms

均较不明显,阈值的确定存在不同程度的不确定性。图 7 (a2)、(b2)、(c2)、(d2) 是对应相片 Gamma 变换后直方图,可以发现,Gamma 变换后像元整体值域压缩,相片直方图背景和叶片区分度明显增强,并且由于背景和叶片的像元值域分布更加集中,代表植物叶片与背景分割阈值的直方图波谷更为狭窄,分割阈值的确定较未校正相片更为明晰。

3.2 相片估算 LAI 与 LAI-2000 测量数据对比

表 2 和图 8 为各测点不同时段数码相片估算的 IMAGE LAI 与 LAI-2000 测量值对比分析。由图 8

和图 10 可见,利用相片计算得到的水稻 LAI 与实测值总体趋势基本一致,两者的散点图呈较好的线性相关($R^2 = 0.7107, P < 0.05$),与未做 Gamma 校正的结果相比,有了较大提升(图 9, $R^2 = 0.5649, P < 0.05$)。表 2 显示 IMAGE LAI 各统计参数均略低于测量值,因为校正后的相片对比度略有下降,但总均值差异不明显,估算值只比测量值低 0.04,误差仅为 1.07%,从两类数据的方差统计值看,在测量时段内,相片估测值总体变动相对较小。

表 2 数码相机图像估算的 LAI 与 LAI-2000 观测数据统计结果比较

Table 2 Statistic parameters of DC LAI and LAI 2000

| | 最小值 Min | 最大值 Max | 均值 Mean | 方差 Variance | RMSE |
|-----------------------------------|---------|---------|---------|-------------|-------|
| LAI-2000 测量值 LAI-2000 Measurement | 2.27 | 4.88 | 3.75 | 0.33 | — |
| 相片估测值 Image Results* | 2.03 | 4.57 | 3.71 | 0.24 | 0.346 |

* $P = 0.0374 < 0.05$

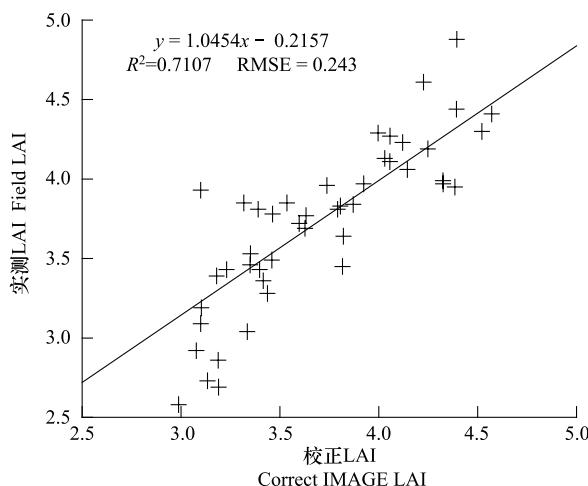


图 8 校正相片 LAI 估算值与 LAI2000 测量值比较

Fig.8 Comparison of IMAGE LAI with LAI measured using LAI 2000

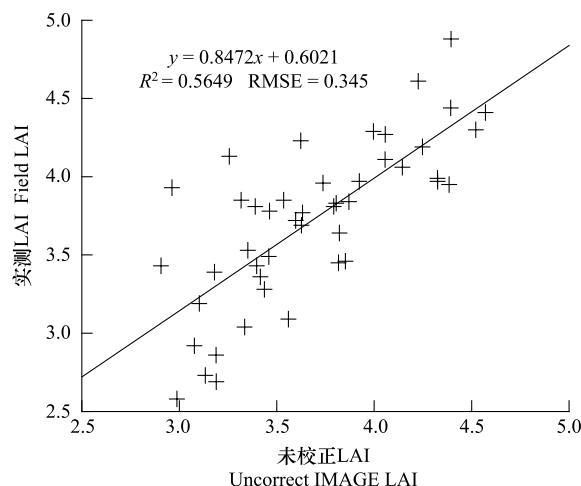


图 9 未校正相片 LAI 估算值与 LAI2000 测量值比较

Fig.9 Comparison of uncorrected IMAGE LAI with LAI measured using LAI 2000

3.3 不同时段 LAI 估测精度

分别计算同一日期内 12 个水稻样地 LAI 的相片估测值与实测值的平均值(图 10,表 3)。在整个观测期内,两种方法测值从整体上看吻合较好,整体上数码相片估算结果的变化范围要略小于 LAI 2000 测值。从不同时段两种方法测量结果看,在水稻分蘖期和拔节期(6月 7 日—6月 29 日)由相片提取的 IMAGE LAI 稍高于 LAI 2000,孕穗期到抽穗期期间(6月 29 日—7月 8 日)IMAGE LAI 值低于 LAI 2000

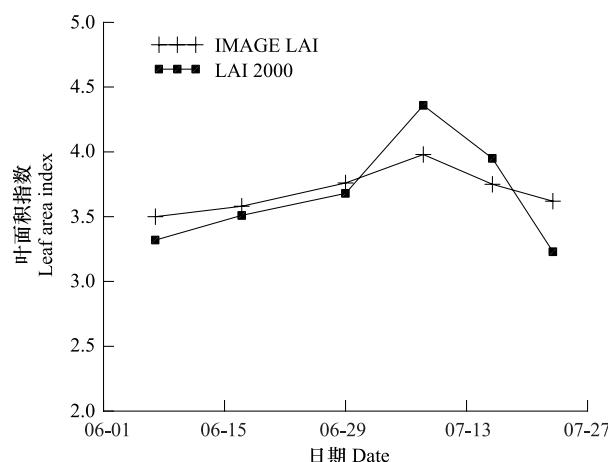


图 10 同时段 LAI 估测值与 LAI 2000 测量值均值的比较

Fig. 10 Comparison of average IMAGE LAI with average LAI measured using LAI 2000 in different seasons

测量值,最大相差值 0.38,在乳熟期到成熟期(7月 16 日—7月 23 日)LAII2000 测量值变化相对 IMAGE LAI 更为明显,呈显著降低趋势,在近收获期相片提取的 IMAGE LAI 要显著高于 LAI 2000 测量值。

根据 LAI-2000 仪器测量与冠层相片提取原理分析,LAI-2000 仪器根据镜头 5 个角度的观测环(0° — 75°)综合观测的孔隙率计算,冠层相片则依据冠层垂直方向的孔隙率计算得到,在水稻植株相对稀疏的生长期,由于对散射光较敏感的 LAI-2000 镜头第四环观测到的叶片并不充分,导致叶面积指数的观测值出现偏低的现象,因此在此时段由相片估测的 IMAGE LAI 会更接近 LAI 实际值,已有研究成果也证实了这一现象^[36-37]。在作物生长的茂盛期,LAI 测量值主要受观测的冠层孔隙率决定,LAI-2000 仪器 5 个角度综合观测的孔隙率一般要高于仅从天顶角观测的垂直孔隙率^[38],此外,LAI-2000 观测方向为自底向上,作物根部附近杂草叶片也会提高 LAI 观测结果,而在此时段冠层相片仅能观测冠层顶部的叶片,因此,在水稻植株茂盛的孕穗期到抽穗期时段内,由相片估算的 IMAGE LAI 精度要低于 LAI-2000 测量结果。在水稻成熟期叶片逐渐由绿变黄,数码相片上的水稻叶片与土壤背景对比度逐渐减小,Gamma 校正后提取叶片时选取阈值的不确定性也会增加,导致垂直孔隙率估算结果偏高的现象。

表 3 不同时段 LAI 估测值与 LAI 2000 实测值均值

Table 3 Average values of LAI-2000 and IMAGE LAI in different seasons

| 平均值 Mean | 6月 7 日 | 6月 17 日 | 6月 29 日 | 7月 8 日 | 7月 16 日 | 7月 23 日 |
|-----------|--------|---------|---------|--------|---------|---------|
| LAI-2000 | 3.32 | 3.51 | 3.68 | 4.36 | 3.95 | 3.23 |
| IMAGE LAI | 3.50 | 3.59 | 3.77 | 3.98 | 3.75 | 3.62 |

4 结论

本文使用卡片数码相机采集不同生长期水稻冠层相片数据,针对数码相机输出 JPEG 格式时造成 DN 值与实际接受辐射的偏差,基于相机本身参数和 Gamma 校正理论,使用后期生成查找表的方法,对相片进行了 DN 值纠正。在此基础上,利用相片 2G-R-B 植被指数提取作物叶片信息,使用垂直孔隙率进行了 LAI 提取,研究结果表明:(1)利用查找表方法,进行相片 Gamma 校正后的水稻冠层数码相片能够有效估算水稻 LAI;(2)在不同生长期,数码相机

相片估算水稻叶面积指数精度略有差异,在抽穗期之前能够保证较高的估算精度;在水稻生长茂盛期会出现估算精度偏低现象,而在成熟枯黄期会出现估算值偏高现象。

相比专业 LAI 测量仪器,卡片数码相机具有操作简便、数据获取成本低、几乎不受大气影响、精度高等优势,这些因素使得数码相机提取作物 LAI 具有较强的可行性,本文的研究可以为卡片式数码相机单机观测提供参考,也为低成本、多设备高精度组网连续监测植被提供了可行性依据。

References:

- [1] Weiss M, Troufleau D, Baret F, Chauki H, Prevot L, Olioso A, Bruguier N, Brisson N. Coupling canopy functioning and radiative transfer models for remote sensing data assimilation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 108(2) : 113-128.
- [2] Campillo C, Prieto M, Daza C, Moñino M, García M. Using digital images to characterize canopy coverage and light interception in a processing tomato crop. *Hortscience*, 2008, 43 (6) : 1780-1786.
- [3] Sakamoto T, Shibayama M, Takada E, Inoue A, Morita K, Takahashi W. Detecting seasonal changes in crop community structure using day and night digital images. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2010, 76(6) : 713-726.
- [4] Bumgarner N R, Miller W S, Kleinhenz M D. Digital image analysis to supplement direct measures of lettuce biomass. *HortTechnology*, 2012, 22(4) : 547-555.
- [5] Liu J G, Pattey E. Retrieval of leaf area index from top-of-canopy digital photography over agricultural crops. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010, 150(11) : 1485-1490.
- [6] Catchpole W, Wheeler C. Estimating plant biomass: a review of techniques. *Australian Journal of Ecology*, 1992, 17(2) : 121-31.
- [7] Im J, Jensen J R. Hyperspectral remote sensing of vegetation. *Geography Compass*, 2008, 2(6) : 1943-1961.
- [8] Tucker C J. A critical review of remote sensing and other methods for non-destructive estimation of standing crop biomass. *Grass and Forage Science*, 1980, 35(3) : 177-182.
- [9] Baker B, Olszyk D M, Tingey D. Digital image analysis to estimate leaf area. *Journal of Plant Physiology*, 1996, 148(5) : 530-535.
- [10] Casadesús J, Kaya Y, Bort J, Nachit M, Araus J, Amor S, Ferrazzano G, Maalouf F, Maccaferri M, Martos V, Ouabbou H, Villegas D. Using vegetation indices derived from conventional digital cameras as selection criteria for wheat breeding in water-limited environments. *Annals of Applied Biology*, 2007, 150(2) : 227-236.
- [11] Sakamoto T, Gitelson A A, Nguy-Robertson A L, Arkebauer T J, Wardlow B D, Suyker A E, Verma S B, Shibayama M. An alternative method using digital cameras for continuous monitoring of crop status. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2012, 154 : 113-126.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] Lu X M, Huang Q, Sun X C, Zhang T M, Liu H Z, Zhong X H, Li H F, Huang N R, Tian K. Application of image processing technology in rice canopy leaf area index. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(3) : 65-68.
- [16] Ma Z Q, Liu Q L, Zeng H Q, Li X R, Chen Y R, Lin Y M, Zhang S H, Yang F T, Wang H W. Estimation of leaf area index of planted forests in subtropical China by photogrammetry. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(5) : 1971-1980.
- [17] Wang F Y, Wang K R, Li S K, Xiao C H, Wang Q, Chen J L, Jin X L, Lü Y L. Estimation of leaf area index of cotton using digital Imaging. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31 (11) : 3090-3100.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] Hirafuji, Masayuki, Tokihiro Fukatsu, Haoming Hu, Takuji Kiura, Matthew Laurenson, Dongxian He, Atsushi Yamakawa, Akifumi Imada, and Seishi Ninomiya. "Advanced sensor-network with field monitoring servers and metbroker." In *CIGR International Conference*. 2004.
- [21] Shibayama M, Sakamoto T, Takada E, Inoue A, Morita K, Yamaguchi T, Takahashi W, Kimura A. Regression-based models to predict rice leaf area index using biennial fixed point continuous observations of near infrared digital Images. *Plant Production Science*, 2011, 14(4) : 365-376.
- [22] Sakamoto T, Shibayama M, Kimura A, Takada E. Assessment of digital camera-derived vegetation indices in quantitative monitoring of seasonal rice growth. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2011, 66(6) : 872-882.
- [23] Matsuda M, Ozawa S, Hosaka Y, Kaneda K, Yamashita H. Estimation of plant growth in paddy field based on proximal remote sensing-Measurement of leaf nitrogen contents by using digital camera. *Journal of the Remote Sensing Society of Japan*, 2003, 23 (5) : 506-515.
- [24] Miguel E L. Commercial digital camera to estimate postharvest leaf area index in *Vitis vinifera* L. cv. cabernet sauvignon on a vertical trellis. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 2010, 70(2) : 315-322.

- [25] Raw Capture, Linear Gamma, and Exposure. Adobe Official site. [2013-01-20]. http://wwwimages.adobe.com/www.adobe.com/content/dam/Adobe/en/products/photoshop/pdfs/linear_gamma.pdf.
- [26] Lukina E V, Stone M L, Raun W R. Estimating vegetation coverage in wheat using digital images. *Journal of Plant Nutrition*, 1999, 22(2) : 341-350.
- [27] Sakamoto T, Gitelson A A, Wardlow B D, Arkebauer T J, Verma S B, Suyker A E, Shibayama M. Application of day and night digital photographs for estimating maize biophysical characteristics. *Precision Agriculture*, 2011, 13(3) : 285-301.
- [28] Gamma Correction. Wikipedia English site. [2012-04-20]. http://en.wikipedia.org/wiki/Gamma_correction.
- [29] Peng G F, Lin Z H. A Study on Gamma Correction and Its Implementation in Image Processing. *Electronic Engineer*, 2006, 32(2) : 30-32.
- [30] Zhao Y S. The Principle and Method of Analysis of Remote Sensing Application. Beijing: Science Press, 2003: 68-72.
- [31] Sun J B. Remote Sensing Principles and Applications. Wuhan: Wuhan University Press, 2008: 113-122.
- [32] Woebbecke D M, Meyer G E, Von Bargen K, Mortensen D A. Color indices for weed identification under various soil, residual, and lighting conditions. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 1995, 38(1) : 259-269.
- [33] Nilson T. A theoretical analysis of the frequency of gaps in plant stands. *Agricultural Meteorology*, 1971, 8: 25-38.
- [34] Chen J M, Cihlar J. Plant canopy gap-size analysis theory for improving optical measurements of leaf-area index. *Applied Optics*, 1995, 34(27) : 6211-6222.
- [35] 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.
- [36] Garrigues S, Shabanov N V, Swanson K, Morissette 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.
- [37] Demarez V, Duthoit S, Baret F, Weiss M, Dedieu G. Estimation of leaf area and clumping indexes of crops with hemispherical photographs. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148(4) : 644-655.
- [38] Campillo C. Study of a non-destructive method for estimating the leaf area index in vegetable crops using digital images. *Hortscience*, 2010, 45(10) : 1459-1463.

参考文献:

- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 陆秀明, 黄庆, 孙雪晨, 张铁民, 刘怀珍, 钟旭华, 李惠芬, 黄农荣, 田卡. 图像处理技术估测水稻叶面积指数的研究. *中国农学通报*, 2011, 27(3) : 65-68.
- [16] 马泽清, 刘琪碌, 曾慧卿, 李轩然, 陈永瑞, 林耀明, 张时煌, 杨风亭, 汪宏清. 南方人工林叶面积指数的摄影测量. *生态学报*, 2008, 28(5) : 1971-1980.
- [17] 王方永, 王克如, 李少昆, 肖春华, 王琼, 陈江鲁, 金秀良, 吕银亮. 利用数字图像估测棉花叶面积指数. *生态学报*, 2011, 31(11) : 3090-3100.
- [18] 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.
- [19] 彭国福, 林正浩. 图像处理中 Gamma 校正的研究和实现. *电子工程师*, 2006, 32(2) : 30-32.
- [20] 赵英时. 遥感应用分析原理与方法. 北京: 科学出版社, 2003: 68-72.
- [21] 孙家炳. 遥感原理与应用. 武汉: 武汉大学出版社, 2008: 113-122.