

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.S0.020

基于 Android 手机平台的冬小麦叶面积指数快速测量系统

陈玉青 杨 玮 李民赞 孙 红

(中国农业大学现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室, 北京 100083)

摘要: 叶面积指数(Leaf area index, LAI)是衡量作物生长状况的重要参数,也是科学确定无人机喷药量的主要指标。为了建立一套作物叶面积指数实时测量方法,基于 Android 手机平台开发了一种冬小麦叶面积指数快速测量系统。在大田条件下选取长势均匀的 10 个试验区域,在不同生长期采用 Android 手机平台和 ADC 多光谱相机分别获取小麦冠层图像,同时手工测量小麦实际叶面积,根据不同测量结果计算 3 种叶面积指数:将 Android 手机图像由 RGB 空间转换到 HSV 空间,在 $H-V$ 双通道组合图像上进行图像分割后计算绿色叶片的面积 I_{Area} ;由 ADC 多光谱相机自带软件获取的归一化植被指数(NDVI)和调节土壤植被指数(SAVI)数据反演的叶面积指数 ALAI;实际手工测量的叶面积指数 LAI。对以上 3 种叶面积指数的相关分析和建模分析结果表明,随着小麦不同生长期的变化,Android 手机平台获取 I_{Area} 与实际测量叶面积指数 LAI 的 R^2 大于 0.84 (P 小于 0.01),ADC 获取的叶面积指数 ALAI 与实际测量叶面积指数 LAI 的 R^2 大于 0.83。

关键词: Android; 冬小麦; 叶面积指数; 图像处理; ADC

中图分类号: S126; TP751 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)S0-0123-06

Measurement System of Winter Wheat LAI Based on Android Mobile Platform

CHEN Yuqing YANG Wei LI Minzan SUN Hong

(Key Laboratory of Modern Precision Agriculture System Integration Research, Ministry of Education, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Leaf area index (LAI) is an important parameter for evaluating crop growth. It is also the main index to determine the spraying dosage of UAV. In order to establish a real-time measurement method of crop leaf area index (LAI), a rapid measurement system of winter wheat leaf area index was developed based on Android mobile platform. Under the condition of field, 10 evenly growing experimental areas were selected, and the canopy images of wheat were obtained by using the Android mobile platform and the ADC multi-spectral camera at different growth stages. Meanwhile, the actual leaves' areas of wheat were artificially measured. According to the different measurement results, three kinds of leaf area index were calculated: (1) Converting Android mobile phone images from RGB to HSV, then calculating the green leaf area (I_{Area}) after image segmentation on $H-V$ dual channel combination image. (2) The leaf area index ALAI retrieved by the normalized vegetation index (NDVI) and the adjusted soil vegetation index (SAVI) data obtained by the ADC multi-spectral camera software. (3) The leaf area index (LAI) of actual manual measurement. With the different growth stages of wheat, the correlation analysis and modeling analysis of the above three leaf area indices showed that the R^2 between the I_{Area} obtained by the Android mobile platform and the actual measured leaf area index LAI was $R^2 > 0.84$ ($P < 0.01$). And the R^2 between the leaf area index ALAI obtained by the ADC and the actual measured leaf area index LAI was more than 0.83.

Key words: Android; winter wheat; leaf area index; image processing; ADC

收稿日期: 2017-07-16 修回日期: 2017-11-21

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD020070-2016YFD0200703)、青年教师科研项目(2015QC021)和基金科研业务费专项资金项目(2017XD002)

作者简介: 陈玉青(1989—),女,硕士生,主要从事电子技术在农业中的应用研究,E-mail: chenyuqing0802@cau.edu.cn

通信作者: 杨玮(1981—),女,副教授,主要从事农业信息化研究,E-mail: cauyw@cau.edu.cn

引言

我国是一个农业大国,小麦作为我国主要的粮食作物之一,研究其表型信息和生理过程对指导农业生产和粮食产量具有重要意义。目前关于小麦的研究有很多,其中小麦叶面积指数是很多研究的重要参数。叶面积指数(Leaf area index, LAI)是指植物叶片总面积与土地面积的比值。叶面积指数不仅与植物蒸腾作用、光合有效辐射密切相关,且常常被作为评价作物长势和预测产量的重要依据和科学确定无人机喷药量的主要指标^[1-2]。

测量叶面积指数的方法多种多样,传统的测量方法如格点法、干重法、仪器测量法等^[3-5]。这些方法测量精准,但工作量大、费用高,对作物的破坏性大,难以应用于大范围的 LAI 监测和生长过程的检测。通过冠层辐射的透过率利用辐射传输方程计算 LAI, 这种方法是基于叶子在冠层内分布的统计与概率的理论来实现的。这种方法的优点是具有非破坏性、工作量小且可以长期检测作物生长,缺点是仪器的设计原理都有一定的使用条件以及仪器设计时的假定都会带来一定的测量误差,而且不同作物不同生长时期设定参数不同。不同仪器适用于不同的植物,而且和传统测量方法相比还有一定的误差^[6-11]。随着计算机图像处理技术的兴起和不断发展,图像处理技术被应用到各个领域,在农业的多个学科中也备受关注。文献[12-13]利用数字图像处理技术来分析几种作物的叶面积、茎秆直径等特征,利用图像处理技术设计了一种估测蔬菜总叶面积的算法。文献[14-15]利用图像处理技术测量叶面积指数。图像处理方法的优点是非破坏性,操作简单,成本低效率高。缺点是图像采集完成后需要将图像导出到专门的处理软件上进行分析处理,不够智能化。随着高科技的不断发展,智能手机成为众多领域的新兴技术。Android 系统是一款基于 Linux 内核的开源手机操作系统。韩雪峰等^[16]将 Android 系统图像处理方法用于作物病害检测,实现了基于智能手机的农作物病害图像的自动识别。文献[17-18]基于 Android 系统分析了多种植物叶片的面积。以上研究只是针对单片叶子进行图像分割处理,需要手动将叶子分开,破坏了作物的生长形态,对于生长密集的作物有一定的局限性。

本文基于 Android 手机平台,利用 OpenCV 图像处理方法和 SQLite 小型数据库读写数据的方式,快速、无损、实时地估测冬小麦叶面积指数。系统通过 Android 手机拍照,直接利用该系统进行图像处理分析并计算图像中绿色叶片的面积来估测叶面积

指数。

1 系统总体设计

1.1 系统平台

本系统由硬件和软件组成,其中,硬件部分采用三星 Galaxy C5 型智能手机,手机内置 Android6.0 操作系统,摄像头 1 600 万像素,运行内存 4 GB。软件部分是在 Windows 7 操作系统下采用 Android SDK (Software development kit) + Java JDK6 (Java development kit) + Eclipse 4.2 + ADT (Android development tools) + CDT (C/C++ development tools) + OpenCV 3.0 + NDK (Native development kit) 搭建集成环境下的冬小麦叶面积指数测量系统。

1.2 系统基本架构

系统软件的主要功能是:图像采集(选择本地相册和拍照)、图像处理(图像预处理、阈值分割和叶面积计算)和结果查询(作物名称查询、作物编号查询、图像采集日期查询和地理位置信息)。设计的叶面积指数测量系统功能结构如图 1 所示。

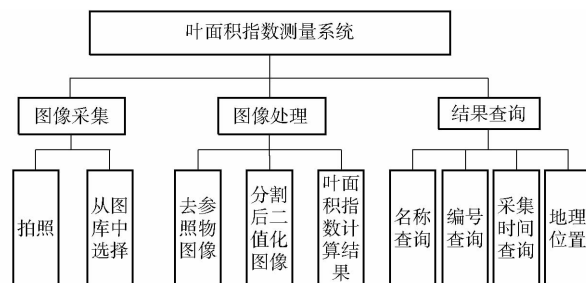


图 1 Android 叶面积指数测量系统功能结构

Fig. 1 Function structure of leaf area index measurement system based on Android

2 试验材料与方法

2.1 图像采集

试验于 2017 年在中国农业大学上庄实验站的小麦实验田内进行。采集范围为 116.177 162° ~ 116.177 471°E, 40.136 847° ~ 40.137 219°N。选择冬小麦返青期(3月16日)、起身期(3月27日)、拔节期(4月6日)、孕穗期(4月14日)、抽穗期(4月26日)等关键生长期进行测量。在晴朗无风或微风天气条件下,图像采集时间为 08:00—14:00。选择长势均匀的 10 个区域(图 2),采用 50 cm × 50 cm 的取景框固定小麦区域,拍摄图像时采用 5 cm × 5 cm 的白板作为参照物置于小麦冠层同一平面。Android 手机平台垂直于小麦冠层拍摄取景框内图像,拍摄前在系统软件上设置好作物名称和拍摄区域编号。采用参照物的方法不要求摄像头与作物之间距离固定。



图2 采集区域分布图

Fig. 2 Collection area distribution map

同时采用美国 Tetracam 公司生产的 Tetracam ADC 第 3 代多光谱相机拍摄同一区域的小麦图像, ADC 拍摄距离为 106 cm, 镜头焦距为 12 mm, 视场角约为 26.2° 。ADC 拍摄波段为绿、红和近红外 (TM2、TM3 和 TM4), 拍摄前将白色特氟龙板放置在小麦冠层进行颜色校正, 每隔半小时校正一次。

2.2 实际叶面积指数获取

在小麦的不同生长期进行测量, 为了方便比较测试结果, 同时采用无损测量方式获取实际叶面积指数。手工测量获取叶面积指数选择了长宽校正法的测量方式^[19]。取景框区域面积 S 为 $50\text{ cm} \times 50\text{ cm}$; 然后计算取景框区域内的株数 M ; 在取景框区域内随机选取 5 株小麦样本, 测量样本中每片叶子的长 L 、宽 W , 则有小麦样本单株叶面积 (校正系数 K 为 0.83 ^[20]) 为

$$D = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^m L_i W_i K \quad (1)$$

式中 m ——小麦样本的总叶数

实际测量的叶面积指数为

$$L_{real} = \frac{DM}{S} \quad (2)$$

3 试验结果分析

3.1 叶面积指数获取

3.1.1 去除参照物

Android 手机拍摄图像时采用冠层放参照物的方式是为了不受拍摄高度和焦距的影响。而图像绿色叶片的叶面积 (不包括参照物) 是根据参照物面积来计算的, 因此在图像分割之前要先计算参照物像素数并去除参照物。以返青期为例, 图 3 为原彩色图像。首先选取 250 为阈值进行阈值分割, 将参照物和其他背景分割。然后将分割后的图像用最大连通区域法去除图像的小区域噪声点, 得到的图像即是参照物的二值图像。最后计算二值图像中参照物的总像素数

为 N_{refer} 。计算完成后需要将参照物去除使图像中只包含小麦和土壤。去除参照物时, 首先将原始图像与参照物二值图像作乘法, 然后用原始图像作减法, 最终获取去除参照物的 RGB 彩色图像。



图3 原彩色图像

Fig. 3 Original color image

3.1.2 图像分割并计算叶面积指数

RGB 颜色空间模型是通过红 (R)、绿 (G)、蓝 (B) 3 个颜色通道的变化以及它们之间相互叠加来得到各种颜色。HSV 颜色空间模型是根据颜色的直观特性绘制的一种六角锥体模型, 包括色调 (Hue)、饱和度 (Saturation) 和亮度 (Value), 色调 (H) 表示不同的颜色, 饱和度 (S) 表示颜色的深浅, 亮度 (V) 表示颜色的明暗程度。HSV 模型具有对不均匀光照和阴影不敏感性^[21]。本文针对 Android 系统获取的小麦冠层图像, 选择简单且应用广泛的极大类间方差法 (Otsu) 来进行图像阈值分割, 提出了基于 RGB 和 HSV 颜色空间模型上的单通道和多通道图像处理办法。首先选择 RGB 中的 G 分量进行阈值分割, 如图 4b 所示, 发现图像分割效果很不理想, 这是因为图像采集时间较长, 在大田条件下受光照强度影响较大, 进而将 RGB 采集图像转换成 HSV 图像, 并在 H 分量上进行阈值分割, 分割效果如图 4d 所示。这时的分割效果明显比 G 分量图像好很多, 但是二值图像中存在一定的噪声点, 分割效果也不是很理想。这是因为图像采集间隔长, 光照强度变化大, 且在小麦的生长后期小麦覆盖度较大, 小麦和土壤的灰度差异较小, 所以选择增强色调 H 同时减小亮度 V 的方式来进行图像分割。采用 H 和 V 双通道的组合图像 $H-V$ 来进行阈值分割, $H-V$ 可表示为

$$HV = 2H + 0.1V \quad (3)$$

得到 $H-V$ 图像, 如图 4e 所示。消除了光线不均匀和局部阴影的现象。再在 $H-V$ 图像上采用 Otsu 阈值分割算法进行图像分割, 分割后的最终二值图像如图 4f 所示。其中, 白色区域为小麦绿色叶片, 黑色区域为土壤和参照物, 可以看出该方法的分割效果较好。

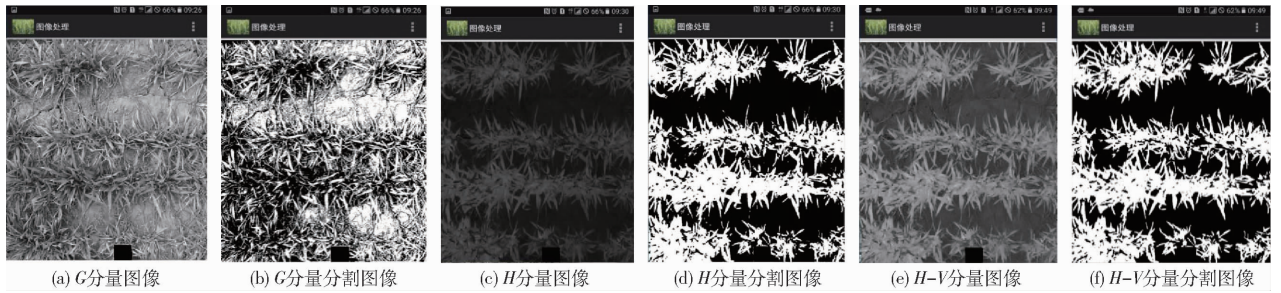


图4 Otsu在不同分量上的图像

Fig. 4 Images of Otsu method on different components

图像分割完成后,得到小麦和背景分割后的二值图像。利用 OpenCV 图像处理技术分别统计出图像中小麦绿色叶片的像素数 N_{leaf} , 结合参照物的像素数 N_{refer} 和已知参照物的真实面积为 25 cm^2 , 可得它们之间的像素数和真实面积之间的关系为

$$\frac{N_{refer}}{25} = \frac{N_{leaf}}{N_{real_leaf}} \quad (4)$$

式中 N_{real_leaf} ——小麦图像绿色叶片的面积, cm^2

将单位换算成 m^2 , 得 Android 系统计算的小麦图像绿色叶片的面积 I_{Area} , 其计算式为

$$I_{Area} = \frac{N_{real_leaf}}{10\ 000} \quad (5)$$

3.2 ADC 多光谱相机叶面积指数数据获取

根据冬小麦敏感波段计算可得到很多种植被指数, 其中 NDVI(归一化植被指数)、SAVI(调节土壤背景植被指数)与冬小麦的 LAI 具有较高的相关性^[22]。

ADC 多光谱相机利用自带的商业处理软件 PixelWrench2 通过红、绿和近红外 3 个波段分别计算 NDVI 和 SAVI 指数数据, 计算公式为^[23]

$$NDVI = \frac{N - R}{N + R} \quad (6)$$

$$SAVI = \frac{N - R}{N + R + L} (1 + L) \quad (7)$$

其中

$$L = 0.5$$

式中 R 、 N ——红和近红外波段的反射率

L ——植被密度变化参数

再利用多元回归分析法由 DNVI 和 SAVI 数据反演估测叶面积指数。

3.3 数据结果分析

对相同生长期的 10 个不同采集区域数据, 利用 Excel 2010 将 Android 图像计算获取的叶面积 I_{Area} 与实际测量得到的叶面积指数进行拟合, 建立线性拟合模型, 同时, 将 ADC 估测的叶面积指数 ALAI 与实际测量的叶面积指数 LAI 建立线性拟合模型, 获取拟合精度评估参数 R^2 , 来评估 Android 系统获取的叶面积、ADC 获取的叶面积指数与实测叶面积指数的相关性。本文选取了同一小麦品种, 5 个不同生长期分别建立了 Android 手机平台叶面积和实际叶面积指数模型, 如图 5~9(图中 ALAI 为 ADC 图像植被指数反演出的叶

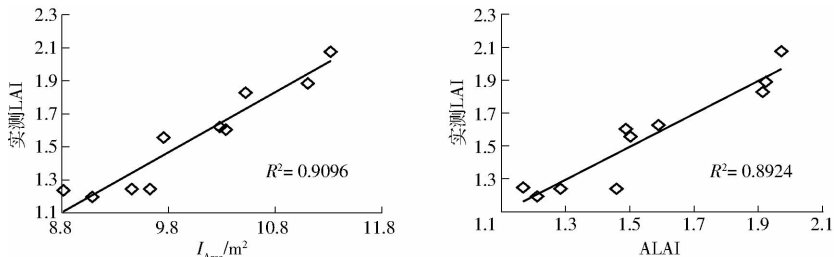


图5 返青期各数据模型

Fig. 5 Data model of greening period

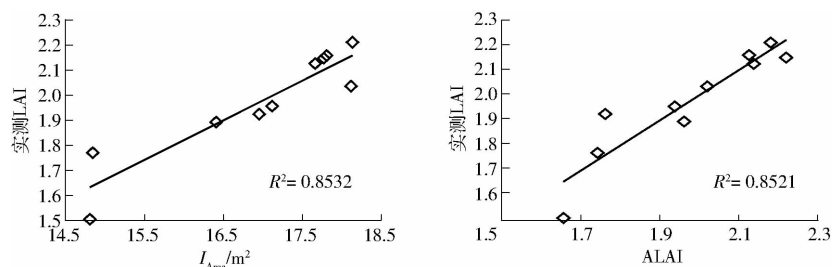


图6 起身期各数据查模型

Fig. 6 Data model of rising period

面积指数)所示。图 5~9 各模型的决定系数 R^2 均达到了 0.83 以上。其中,Android 系统的 I_{Area} 与实测 LAI 模型决定系数 R^2 达到了 0.84 以上,各模型的相关性显著。Android 手机平台图像 I_{Area} 与实测

值 LAI 模型的相关性较高,线性回归后的预测值与实测值的标准误差在 0.087~0.5196 之间, P 均小于 0.01,说明 Android 系统与实际 LAI 的数据模型拟合较好,Android 系统估测 LAI 数据精度较高。

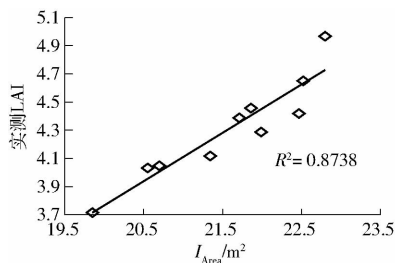


图 7 拔节期各数据

Fig. 7 Data model of jointing period

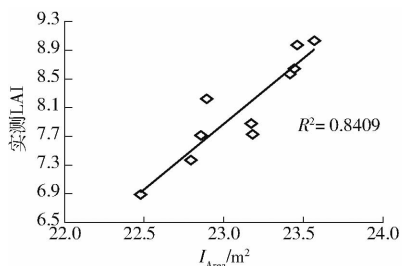
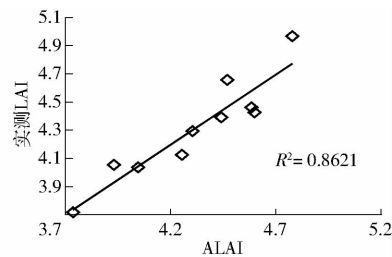


图 8 孕穗期各数据模型

Fig. 8 Data model of booting period

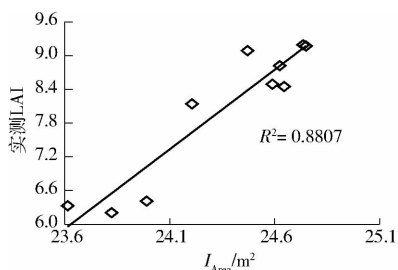
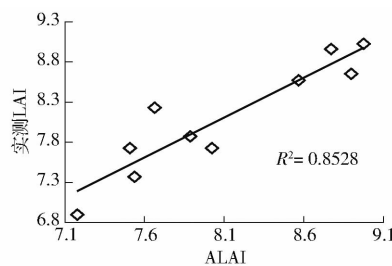
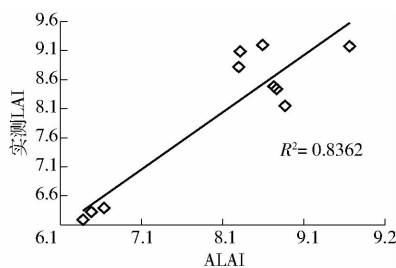


图 9 抽穗期各数据模型

Fig. 9 Data model of heading period



4 结论

(1) 针对图像处理,提出了使用 HSV 颜色空间上的 H 和 V 分量的双通道图像提取分割,获得了分割效果较好的图像。并通过统计图像分割后的像素数来计算图像绿色叶片面积。

(2) 通过数据建模和线性回归预测,得出了 Android 手机平台图像小麦叶面积与实际测量叶面

积指数的模型决定系数 R^2 达到了 0.84 以上, P 均小于 0.01,与 ADC 多光谱相机相比,该系统与实测 LAI 的数据模型决定系数 R^2 相对较高,说明本研究测量精度较高,估测小麦叶面积指数可靠。

(3) 将 Android 手机平台与图像处理技术相结合,研究开发了小麦叶面积指数测量系统,测量精度高,能够高精度的估测小麦叶面积指数。可以为无人机喷药量提供数据参照,为农业智能化提供技术支持。

参 考 文 献

- 祁漫宇,朱维斌. 叶面积指数主要测定方法和设备[J]. 安徽农业科学,2012,40(31):15097-15099.
QI Manyu, ZHU Weibin. Review on the main determination methods and equipments of leaf area index [J]. Journal of Anhui Agri. Sci, 2012, 40(31): 15097-15099. (in Chinese)
- 高林,杨贵军,李红军,等. 基于无人机数码影像的冬小麦叶面积指数探测研究[J]. 中国生态农业学报,2016,24(9):1254-1264.
GAO Lin, YANG Guijun, LI Hongjun, et al. Winter wheat LAI estimation using unmanned aerial vehicle RGB-imaging [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(9):1254-1264. (in Chinese)
- 谭一波,赵仲辉. 叶面积指数的主要测定方法[J]. 林业调查规划,2008,33(3):45-48.

- TAN Yibo, ZHAO Zhonghui. The main method for determining leaf area index [J]. *Forest Inventory and Planning*, 2008, 33(3): 45-48. (in Chinese)
- 4 李荣春,陶洪斌,张竹琴,等. 基于图像处理技术的夏玉米叶面积指数估算方法研究[J]. *安徽农业科学*, 2009, 37(26): 12871-12872.
- LI Rongchun, TAO Hongbin, ZHANG Zhuqin, et al. Study on measuring leaf area index of summer maize based on image processing technique [J]. *Journal of Anhui Agri Sci*, 2009, 37(26): 12871-12872. (in Chinese)
- 5 韩焕豪,崔远来,时元智,等. SunScan 冠层分析仪在水稻叶面积指数测量中的应用[J]. *灌溉排水学报*, 2015, 34(8): 44-48.
- HAN Huanhao, CUI Yuanlai, SHI Yuanzhi, et al. Application of SunScan canopy analysis system to measure leaf area index of rice [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2015, 34(8): 44-48. (in Chinese)
- 6 ROSS J. The radiation regime and architecture of plant stands [M]. The Hague, the Netherlands: Dr Junk W, 1981.
- 7 JONES H G. *Plant and Microclimate* [M] 2nd edn. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1992.
- 8 任海,彭少麟,张祝平,等. 鼎湖山季风常绿阔叶林冠层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, Guangdong [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1996, 16(2): 174-179. (in Chinese)
- 9 刘刚,谢云,高晓飞,等. SunScan 冠层分析仪在测量大豆叶面积指数中的应用[J]. *生态学杂志*, 2008, 27(5): 862-866.
- LIU Gang, XIE Yun, GAO Xiaofei, et al. Application of SunScan canopy analysis system in measuring leaf area index of soybean [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(5): 862-866. (in Chinese)
- 10 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.
- 11 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-revue Canadienne de Recherche Forestiere*, 1993, 23(9): 1940-1943.
- 12 MEYER G E, DAVISON D A. An electronic-image plant-growth measurement system [J]. *Transactions of the ASAE*, 1987, 30(1): 242-248.
- 13 CHIEN C F, LIN T T. Non-destructive growth measurement of selected vegetable seedlings using orthogonal images [J]. *Transactions of the ASAE*, 2005, 48(5): 1953-1961.
- 14 支克广,涂钢,王琪,等. 使用图像分析法测量叶面积指数和植被覆盖率[J]. *气象水文海洋仪器*, 2007, 1(1): 5-8.
- ZHI Keguang, TU Gang, WANG Qi, et al. Measurement of leaf area index and the percentage of vegetation by using image analysis [J]. *Meteorological, Hydrological and Marine Instruments*, 2007, 1(1): 5-8. (in Chinese)
- 15 王桂琴,郑丽敏,朱虹,等. 图像处理技术在冬小麦叶面积指数测定中的应用[J]. *麦类作物学报*, 2004, 24(4): 108-112.
- WANG Guiqin, ZHENG Limin, ZHU Hong, et al. Application of image processing technology in wheat canopy leaf area index measuring [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2004, 24(4): 108-112. (in Chinese)
- 16 韩雪峰,陈国斌,郭鹏,等. 基于安卓平台的作物病害图像自动分割算法实现[J]. *电脑知识与技术*, 2015, 11(22): 112-114.
- HAN Xuefeng, CHEN Guobin, GUO Peng, et al. Implementation of automatic segmentation of plants disease image based on android platform [J]. *Computer Knowledge and Technology*, 2015, 11(22): 112-114. (in Chinese)
- 17 龚爱平,吴武豪,裴正军,等. 基于 Android 系统手机的叶面积测量方法 [J/OL]. *农业机械学报*, 2013, 44(9): 203-208. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130936&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.09.036.
- GONG Aiping, WU Wuhao, QIU Zhengjun, et al. Leaf area measurement using android OS mobile phone [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(9): 203-208. (in Chinese)
- 18 郭文川,周超超,韩文霆. 基于 Android 手机的植物叶片面积快速无损测量系统 [J/OL]. *农业机械学报*, 2014, 45(1): 275-280. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140142&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.01.042.
- GUO Wenchuan, ZHOU Chaochao, HAN Wenting. Rapid and non-destructive measurement system for plant leaf area based on android mobile phone [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(1): 275-280. (in Chinese)
- 19 陶洪斌,林杉. 打孔称重法与复印称重法和长宽校正法测定水稻叶面积的方法比较 [J]. *植物生理学通讯*, 2006, 42(3): 496-498.
- TAO Hongbin, LIN Shan. Comparison on disc method with copy method and length-width method for measuring leaf area of rice [J]. *Plant Physiology Communications*, 2006, 42(3): 496-498. (in Chinese)
- 20 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 [J]. *农业工程学报*, 2010, 26(1): 205-209.
- LI Ming, ZHANG Changli, FANG Junlong. Extraction of leaf area index of wheat based on image processing technique [J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(1): 205-209. (in Chinese)
- 21 郭英华. 基于 HSV 色彩空间的图像分割 [J]. *黑龙江冶金*, 2011, 31(2): 35-37.
- GUO Yinghua. Image segmentation based on HSV color space [J]. *Heilongjiang Metallurgy*, 2011, 31(2): 35-37. (in Chinese)
- 22 杨鹏万,付刚,李云龙,等. 多光谱相机估算藏北高寒草甸地上生物量 [J]. *草业科学*, 2014, 31(7): 1211-1217.
- YANG Pengwan, FU Gang, LI Yunlong, et al. Aboveground biomass assessment in the Northern Tibet Plateau using ground-level remotely-sensed data [J]. *Pratacultural Science*, 2014, 31(7): 1211-1217. (in Chinese)