

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.S0.039

基于图像颜色特征的密植冬小麦覆盖指数反演^{*}

孙红¹ 文瑶¹ 赵毅² 李民赞^{1,2} 陈军³ 杨玮¹

(1. 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;

2. 农业部农业信息获取技术重点实验室, 北京 100083;

3. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 为了快速获取大田冬小麦作物生长信息, 对田间植被覆盖度(VCI)进行检测。采用开发的多光谱图像采集系统, 在拔节期-扬花期获取冬小麦冠层可见光($B, G, R, 400 \sim 700 \text{ nm}$)和近红外(NIR, $760 \sim 1\,000 \text{ nm}$)图像。图像经自适应平滑滤波处理后, 针对RGB图像, 采用HSI色彩空间模型, 设定 H 分量阈值 $[\pi/4, 6\pi/5]$ 进行分割, 对NIR图像采用自动阈值分割法分割, 进而提出了基于“ $H + \text{NIR}$ ”组合的冬小麦冠层多光谱图像分割方法, 并计算VCI值。对未经分割的原始图像提取了9个图像检测参数, 包括各通道图像灰度均值($A_R, A_G, A_B, A_{\text{NIR}}$)、归一化植被指数(NDVI)、归一化差异绿度指数(NDGI)、比值植被指数(RVI)、差值植被指数(DVI)和冠层 H 分量均值 A_H 。图像检测参数与VCI相关性分析结果表明, 各植被指数与VCI的相关系数绝对值均大于0.90。应用NDVI、NDGI、RVI和DVI建立了多元线性回归模型, 其 $R_c^2 = 0.948$, $R_v^2 = 0.884$, 可以用于快速反演VCI, 为田间作物生长评价和管理提供支持。

关键词: 多光谱图像 植被覆盖度 颜色特征 植被指数

中图分类号: O657.3; S126 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)S0-0240-06

Retrieving Vegetation Coverage Index of Winter Wheat Based on Image Colour Characteristic

Sun Hong¹ Wen Yao¹ Zhao Yi² Li Minzan^{1,2} Chen Jun³ Yang Wei¹

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

2. Key Laboratory of Agricultural Information Acquisition Technology, Ministry of Agriculture, Beijing 100083, China

3. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to rapidly acquire winter wheat growing information in the field, the retrieval method of vegetation coverage index(VCI) was researched based on multi-spectral imaging technique and imaging processing technology. Firstly, a 2-CCD multi-spectral image monitoring system was used to acquire the canopy images. The system was based on a dichroic prism, allowing precise separation of the visible (RGB) and near-infrared (NIR) band. Secondly, after the image smoothing using adaptive smooth filtering algorithm, the canopy image of winter wheat was segmented. HSI color model and automated threshold method were used to segment the RGB and NIR image respectively. The hue threshold was $[\pi/4, 6\pi/5]$. The segmented results of RGB and NIR were combined to improve the segmentation accuracy and the VCI was calculated. Thirdly, the image parameters were abstracted based on the original visible and NIR images including the average gray value of each channel(A_R, A_G, A_B) and near-infrared (A_{NIR}), the vegetation indices (NDVI, NDGI, RVI, DVI) which were widely used in remote

收稿日期: 2015-10-28 修回日期: 2015-11-09

^{*} 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2013AA102303)、公益性行业(农业)科研专项经费资助项目(201303109)和中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2015XD001)

作者简介: 孙红, 副教授, 博士, 主要从事农业信息化技术研究, E-mail: sunhong@cau.edu.cn

通讯作者: 李民赞, 教授, 博士生导师, 主要从事精细农业系统研究, E-mail: limz@cau.edu.cn

sensing, and the H average value of canopy. The correlation analysis results showed that the correlation coefficients between vegetation indices and VCI were above 0.90. As a result, the retrieving multiple linear regressions (MLR) model was built by using NDVI, NDGI, RVI and DVI with $R_c^2 = 0.948$ and $R_v^2 = 0.884$. It was feasible to diagnose vegetation coverage in the field and indicate the growth status.

Key words: Multi-spectral image Vegetation coverage Colour characteristic Vegetation index

引言

快速获取并监测农田作物生长参数,可为农田变量施肥、灌溉等精细管理决策提供数据支持^[1]。学者们应用光谱学和数字图像处理技术,针对作物冠层或植株,提出了归一化植被指数(Normalized difference vegetation index, NDVI)、比值植被指数(Ratio vegetation index, RVI)等多种植被指数和特征参数,开展了如植被覆盖度、植株高度、叶面积指数(Leaf area index, LAI)、叶绿素、氮素含量等反映作物生长指标的检测研究^[2-4]。

在众多作物生长参数指标中,覆盖度指被植被冠层覆盖的地面百分比,是反映植被对光的截获能力和生物生产力的重要参数^[5]。一方面,它随作物生长而变化,与叶面积指数、株高等参数间存在显著相关关系^[6-7]。另一方面,在作物光谱学监测中, Stanhill 等发现田间作物光谱吸收的差异主要是由于生物量和覆盖度的不同所引起^[8]; Wanjura 等提出植被指数受覆盖度的影响大于生物量或 LAI 等参数^[9]。因此,检测农作物的覆盖度在作物生长监测中具有重要意义。

在遥感领域, Gu 等^[10]利用 NDVI 等 4 种作物植被指数和均值等 6 种纹理参数对植被覆盖度进行了反演($R^2 = 0.706$)。Moffiet 等将一种绿色植被指数用于检测地面覆盖度^[11]。李凤涛等^[12]提出 NDVI-LAI 最佳估算模型为指数形式($R^2 = 0.962$)。李冰等^[13]应用低空无人机采集图像监测冬小麦覆盖度的变化情况后发现,除时序变化影响外,空间尺度不同对提取植被覆盖度影响显著。近地获取并分析地面覆盖度具有图像质量高和受采集时空影响小的优点。Lukina 等^[14]采用红色(波长 (671 ± 6) nm)和近红外(波长 (780 ± 6) nm)图像计算 NDVI 估算覆盖度参数。李存军等认为基于波长 1 450 nm 和 1 690 nm 构建的 RVI、NDVI 可用于预测大田冬小麦覆盖度^[15-16]。刘飞等^[17]通过绿、红和近红外 3 个通道的图像反演反射率,并基于 NDVI 等植被指数建立了最小二乘支持向量机叶面积指数拟合模型($R = 0.8553$)。

然而,薛利红等^[18]研究发现光谱植被指数对叶面积指数的预测力在水稻营养生长旺盛期最

强,随后降低。杨嘉等研究也指出当作物生长到一定时期,覆盖度变化时,NDVI 变化不大,存在饱和现象^[19]。由此可见,针对作物覆盖度仍需要继续对不同作物的生长期及各类图像参数的选取和适用性等方面进行研究,以形成高效稳定的诊断方法。

本研究以北方密植作物冬小麦为对象,研究其覆盖度反演参数和方法。在冬小麦生理生长旺盛期获取冠层多光谱图像,提取冠层多光谱图像特征参数,分析各参数与覆盖度相关关系,最终建立大田冬小麦覆盖度反演模型,以为田间作物生长评价和管理提供支持。

1 材料与方 法

1.1 多光谱图像采集装置

试验采用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开发的多光谱图像采集系统^[20]。该系统包括图像感知器和采集控制器两部分(图 1)。图像感知器采用 2-CCD 棱镜分光技术,可以同步拍摄以 470、550、620、800 nm 为中心波长的可见光(B、G、R)和近红外(NIR)图像信号。外设 12 mm 镜头,视场角 26.2°。采集图像以 GigE Vision 2.0 协议的千兆以太网数字图像信号输出。经千兆网线传输到图像采集控制器,最高输出带宽达 960 Mb/s。图像采集控制器选用工业平板计算机,安装和运行作物冠层多光谱图像采集软件系统,实现设备连接、采集参数设置、图像显示、图像存储和图像处理等功能。通过设定调整曝光时间、图像增益与白平衡等采集参数,可获得清晰的作物冠层图像。

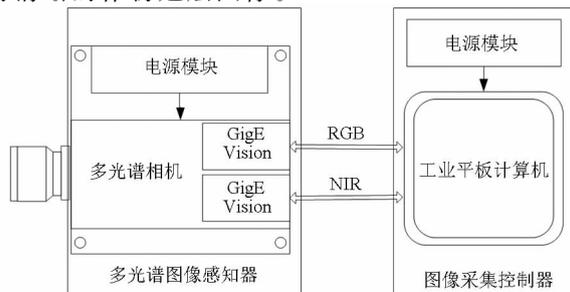


图 1 多光谱图像采集系统

1.2 田间试验

试验在陕西省杨凌区揉谷镇粮食基地开展,种植冬小麦品种为小偃 22,密植株间距约为 15 cm。2013 年 3—4 月,在冬小麦生理生长旺盛的拔节期和扬花期,选择晴好的天气,于当天 10:00—14:00 采集数据。将 1 000 m × 600 m 种植范围划分为 30 个采样区,每个采样区设置 5 个采样点定点拍摄。多光谱图像采集系统固定在垂直支架上,高 1.3 m。为了防止由于拍摄抖动或被拍摄物晃动造成的误差,每个采样点拍摄 2 组多光谱图像,以便从中选取质量好的 1 组进行分析。对采样点同步进行 GPS 记录,保证每次试验采样点位置一致。

1.3 多光谱图像处理流程

采用 Matlab 2009 图像处理工具箱函数编程开发了作物营养检测系统^[21],对拍摄的多光谱图像进行处理提取作物覆盖度指标。总体流程如图 2 所示,包括:多光谱图像通道分离、图像滤波、图像分割和参数提取。

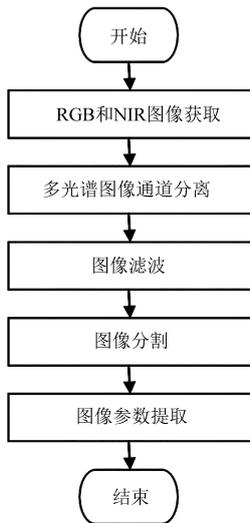


图 2 多光谱图像处理流程

Fig. 2 Flow chart of image processing

其中,由于近地采集图像清晰,因此图像滤波是对分离后的各通道图像(B 、 G 、 R 、 NIR)分别采用 3×3 的窗口进行自适应平滑滤波,用于去除图像局部噪声点。图像分割算法,首先针对 RGB 图像采用 HSI 色彩空间模型,在 H 分量 $[0, 2\pi]$ 范围内,通过分析小麦冠层与土壤背景颜色分布情况来确定分割阈值,以初步提取冠层图像。进而针对 NIR 图像采用自动阈值分割法进行分割,通过对 RGB 和 NIR 图像分割结果的组合修正分割结果,提高图像分割准确度。

分割后作物部分保留各通道内原像素灰度,将土壤部分各像素值设为零。计算每一幅分割后小麦冠层图像作物像素的和与图像总像素比值即可得到

单幅图像内的植被覆盖度 (Vegetation coverage index, VCI)。

在不进行图像分割的条件下,基于冬小麦冠层原始图像,以各通道灰度均值计算 4 种常见植被指数:归一化植被指数 (NDVI),归一化差异绿度指数 (Normalized difference green index, NDGI),比值植被指数 (RVI),差值植被指数 (Difference vegetation index, DVI)。计算彩色图像 H 分量均值,作为检测参数寻找适于快速反演田间覆盖度的指标。

2 结果分析

2.1 冬小麦冠层多光谱图像处理

对采集到的冬小麦冠层多光谱图像进行滤波预处理。首先分离各通道图像(B 、 G 、 R 、 NIR),分别采用 3×3 的窗口自适应平滑滤波,然后重新组合得到 RGB 和 NIR 图像如图 3 所示。

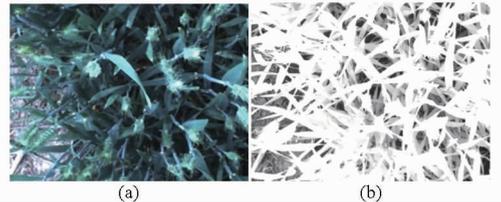


图 3 滤波后冬小麦冠层多光谱图像

Fig. 3 Filtered multi-spectral image of winter wheat

(a) RGB 图像 (b) NIR 图像

针对 RGB 图像,分析 R 、 G 、 B 各通道图像灰度直方图发现,尽管冬小麦冠层为绿色,但 G 通道图像中无明显双峰特征(图 4),不利于进行图像分割。因此,利用冬小麦冠层叶片颜色与土壤和底部阴影之间色调存在差异的特征,采用 HSI 颜色空间的 H 分量进行冠层图像分割。

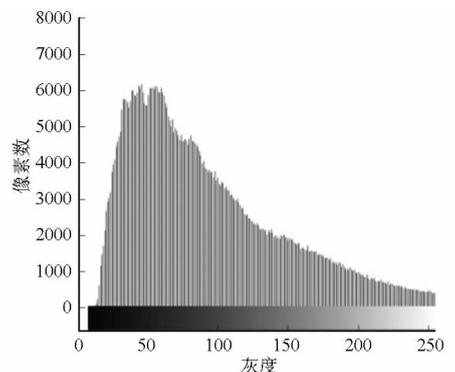


图 4 冬小麦冠层 G 分量直方图

Fig. 4 Histogram of G image

由于作物冠层呈浅绿至深绿色,而土壤和底部背景偏棕色,在 H 分量 $[0, 2\pi]$ 范围内进行绿色分量阈值选取。经过对 50 组拔节期与扬花期冬小麦冠层 H 分量的分析,确定了绿色区域分割的阈值范

围为 $[\pi/4, 6\pi/5]$ 。对落在该范围内的 R 、 G 、 B 通道灰度分别设为 $[0, 255, 0]$, 范围外各通道灰度设为 $[255, 255, 255]$, 得到 H 分量分割模板如图 5a 所示。利用该模板分别对 RGB 和 NIR 图像进行分割, 结果如图 5b、5c 所示。观察图像分割结果可知, 冬小麦冠层叶片与土壤、干枯残留麦秆、底部背景被分离开来, 而且对小麦麦芒顶部的高反光点有一定的抑制, 得到了比较完整的作物冠层图像。基于该分割结果可计算 VCI, 图 5 中 VCI 为 90.32%。

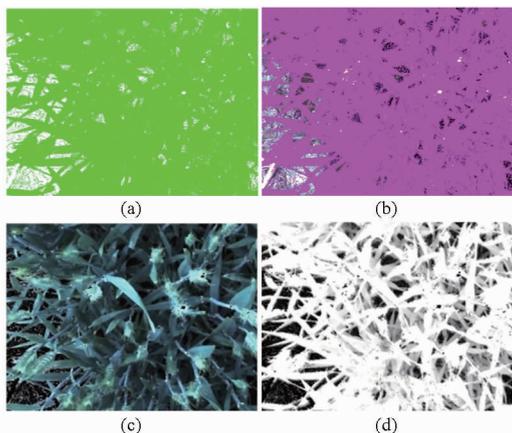


图 5 冬小麦冠层多光谱图像分割结果

Fig. 5 Image segmentation result

(a) H 分量分割模板 (b) NIR 分割模板
(c) 分割后 NIR 图像 (d) 分割后 RGB 图像

针对 NIR 图像, 依据作物和土壤光谱反射率特征, 二者在近红外区域反射率差异较大^[22], 使得 NIR 图像中冠层边缘与土壤背景边界处邻近的像素值发生显著改变, 利于二值化分割。因此, 采用自动阈值分割法进行分割, 将分割冠层像素设为 $[255, 0, 255]$, 颜色为品红色, 形成 NIR 图像分割模板如图 5b 所示。

综合应用 RGB 图像和 NIR 图像分割结果, 逐点计算小麦冠层图像, 保留落入 $[0, 255, 0]$ 或 $[255, 0, 255]$ 的像素点的灰度, 其他像素点设为零, 所得图像为最终分割结果, 如图 5c 和 5d 所示。逐点计算基于“ $H + NIR$ ”组合分割结果与仅基于 H 分量分割结果可知, 组合分割后较仅利用 H 分量分割像素数增加了 1.12%, 因此采用“ $H + NIR$ ”组合分割方法对拔节期和扬花期冬小麦冠层图像进行分割, 并提取植被覆盖度 VCI, 数据统计结果显示 VCI 数值区间为 $[44.12\%, 96.78\%]$, 均值为 83.69%。

2.2 冬小麦冠层图像特征参数提取

利用上述图像分割结果虽然可以计算每组多光谱图像的 VCI 值, 但对大田数据采集而言, 采集样本数量极大, 预处理和分割过程耗时较长, 不利于快速监测作物生长覆盖度情况。因此考虑对原始图像在不进行图像分割的情况下, 直接计算图像植被指数, 选取适于快速反演 VCI 的参数, 构建密植冬小麦 VCI 反演模型。

对小麦冠层原始多光谱图像, 直接提取 4 个通道图像平均灰度 (A_R 、 A_G 、 A_B 、 A_{NIR}), 计算提取图像检测参数包括: 4 种常见植被指数 (NDVI、NDGI、RVI、DVI) 和冠层 H 分量均值 A_H 。计算公式如表 1 所示。

表 1 图像检测参数计算公式

Tab. 1 Image detecting parameters

参数	公式
M 波段平均灰度	$A_M = M/P$
归一化植被指数	$R_{NDVI} = (A_{NIR} - A_R) / (A_{NIR} + A_R)$
归一化差异绿度指数	$R_{NDGI} = (A_G - A_R) / (A_G + A_R)$
比值植被指数	$R_{RVI} = A_{NIR} / A_R$
差值植被指数	$R_{DVI} = A_{NIR} - A_R$
色调均值	$A_H = H/P$

注: M 指 NIR、 R 、 G 、 B , 分别为近红外、红光、绿光和蓝光波段的平均灰度, P 为图像总像素数, H 为 HSI 模型中 H 分量灰度。

2.3 图像特征参数与覆盖度指标相关性分析

基于提取的 A_R 、 A_G 、 A_B 、 A_{NIR} 、NDVI、NDGI、RVI、DVI 和 A_H 图像特征参数, 分析 9 个图像参数与 VCI 之间的相关关系, 结果如表 2 所示。可知, 除 A_{NIR} 和 A_H 外, 各参数与 VCI 的相关系数绝对值均在 0.70 以上, 且各植被指数与 VCI 的相关系数绝对值均大于 0.90。分析可知, VCI 反映的是图像中作物冠层绿色面积的大小, 当图像中植被覆盖面积较大时, 植物生长繁茂, 反映作物生长活力的植被指数参数也随之增加, 当图像中绿色区域面积较小时, 植被指数也会降低。因而植被指数和 VCI 本质含义在植物生长情况方面非常吻合。因此可以利用图像植被指数对 VCI 进行反演。

同时, 对各参数间进行相关分析发现, A_R 、 A_G 、 A_B 之间存在显著相关关系 ($R > 0.98$), 而实际上在各植被指数中已经包含了各通道分量参数, 因此为避免多重共线性干扰, 后续分析选择 NDVI、NDGI、RVI 和 DVI 展开。

表 2 图像特征参数与 VCI 相关系数

Tab. 2 Correlation indexes between image feature parameters and VCI

参数	A_R	A_G	A_B	A_{NIR}	NDVI	NDGI	RVI	DVI	A_H
相关系数	-0.80	-0.72	-0.71	0.59	0.90	0.94	-0.91	0.94	0.45

2.4 基于图像植被指数的 VCI 反演模型

针对 150 组多光谱图像,分别建立基于 NDVI、NDGI、RVI 和 DVI 的一元线性回归模型用于反演 VCI,随机选择其中 120 组用于模型建立,30 组用于模型验证。结果表明,NDVI、NDGI、RVI 和 DVI 对 VCI 均具有较好的反演能力,建模和验证决定系数均高于 0.6,且均通过了 F 检验和 T 检验。其中,NDGI 建模和验证精度最高,结果如图 6a 所示 ($R_c^2=0.885, R_v^2=0.888$)。进而,建立基于 NDVI、NDGI、RVI 和 DVI 的 VCI 多元线性回归模型,即

$$y = 0.253 - 0.066x_{\text{NDVI}} + 2.197x_{\text{NDGI}} + 0.159x_{\text{RVI}} + 0.002x_{\text{DVI}} \quad (1)$$

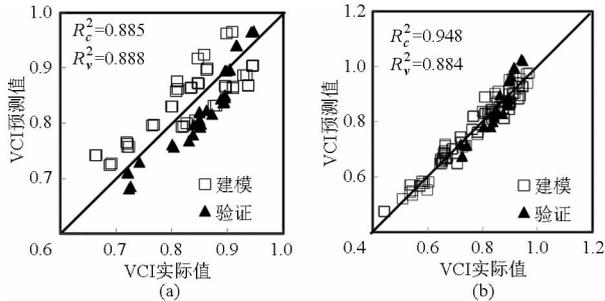


图 6 冬小麥冠層 VCI 反演模型結果

Fig. 6 Retrieving result of VCI using image parameters

(a) NDGI 反演 VCI 結果 (b) VCI 反演多元回歸模型結果

式中 y ——冬小麥冠層 VCI 指數

模型結果如圖 6b 所示, $R_c^2=0.948, R_v^2=0.884$,其精度較一元線性模型有所提高。結果表明,基於密植冬小麥冠層多光譜圖像提取 NDVI、NDGI、RVI 和 DVI,建立的多元回歸模型可對冬小麥植被覆蓋度提供高精度反演模型,為田間作物生長評價和管理提供支持。

3 結論

(1) 針對 RGB 圖像,採用 HSI 色彩空間模型,設定 H 分量閾值 $[\pi/4, 6\pi/5]$ 進行分割,對 NIR 圖像採用自動閾值分割法分割,進而提出了基於“ $H + \text{NIR}$ ”組合的多光譜圖像分割方法,可有效分割小麥冠層圖像。

(2) 對採集原始圖像提取特徵監測參數 ($A_R, A_G, A_B, A_{\text{NIR}}, \text{NDVI}, \text{NDGI}, \text{RVI}, \text{DVI}, A_H$),各植被指數與 VCI 的相關係數絕對值均大於 0.90。

(3) 應用 NDVI、NDGI、RVI 和 DVI 建立了多元線性回歸模型,其 $R_c^2=0.948, R_v^2=0.884$,可以用於快速反演 VCI,為田間作物生長評價和管理提供支持。

參考文獻

- 汪懋華,李民贊. 現代精細農業理論與實踐[M]. 北京:中國農業大學出版社,2012.
- Li L, Zhang Q, Huang D. A review of imaging techniques for plant phenotyping[J]. Sensors, 2014, 14(11):20078-20111.
- Lee W S, Alchanatis V, Yang C, et al. Sensing technologies for precision specialty crop production[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2010, 74(1):2-33.
- 蔣煥煜, 應義斌, 謝麗娟. 光譜分析技術在作物生長信息檢測中的應用研究進展[J]. 光譜學與光譜分析, 2008, 28(6):1300-1304.
- Jiang Huanyu, Ying Yibin, Xie Lijuan. Application of spectroscopy technique to obtain plant growth information[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2008, 28(6):1300-1304. (in Chinese)
- Steven M D, Biscoe P V, Jaggard K W, et al. Foliage cover and radiation interception[J]. Field Crops Research, 1986, 13:75-87.
- 林超文, 陳一兵, 黃晶晶, 等. 四川間作地區作物高度、覆蓋度和葉面積指數的動態變化[J]. 生態學雜誌, 2007, 26(7):989-994.
- Lin Chaowen, Chen Yibing, Huang Jingjing, et al. Temporal variation of plant height, plant cover and leaf area index in intercropped area of Sichuan, China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2007, 26(7):989-994. (in Chinese)
- 李榮春, 陶洪斌, 張竹琴, 等. 基於圖像處理技術的夏玉米葉面積指數估算方法研究[J]. 安徽農業科學, 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 Agricultural Sciences, 2009, 37(26):12871-12872. (in Chinese)
- Stanhill G, Kafkafi U, Fuchs M, et al. Effect of fertilizer application on solar reflectance from a wheat crop[J]. Israel Journal of Agricultural Research, 1972, 22(2):109-118.
- Wanjura Hatfield. Sensitivity of spectral vegetative indices to crop biomass[J]. Transactions of the ASAE, 1987, 30(3):810-816.
- Gu Z, Ju W, Li L, et al. Using vegetation indices and texture measures to estimate vegetation fractional coverage (VFC) of planted and natural forests in Nanjing City, China[J]. Advances in Space Research, 2013, 51(7):1186-1194.
- Moffiet T, Armston J D, Mengersen K M. Development and validation of a new spectral greenness index: a spectral dimension related to foliage projective cover[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2010, 65(1):26-41.
- 李鳳濤, 魯欣欣, 王珍珍, 等. 基於多光譜特徵的玉米生物參量估算模型[J]. 青島農業大學學報:自然科學版, 2014, 31(3):196-198, 204.

- Li Fengtao, Lu Xinxin, Wang Zhenzhen, et al. Biological parameters estimation model based on spectral feature on corn[J]. Journal of Qingdao Agricultural University, 2014, 31(3):196-198, 204. (in Chinese)
- 13 李冰, 刘榕源, 刘素红, 等. 基于低空无人机遥感的冬小麦覆盖度变化监测[J]. 农业工程学报, 2012, 28(13):160-165.
Li Bing, Liu Rongyuan, Liu Suhong, et al. Monitoring vegetation coverage variation of winter wheat by low-altitude UAV remote sensing system[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(13):160-165. (in Chinese)
- 14 Lukina E V, Stone M L, Raun W R. Estimating vegetation coverage in wheat using digital images[J]. Journal of Plant Nutrition, 1999, 22(2):341-350.
- 15 李存军, 王纪华, 刘良云, 等. 基于数字照片特征的小麦覆盖度自动提取研究[J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2004, 30(6):650-656.
Li Cunjun, Wang Jihua, Liu Liangyun, et al. Automated digital image analyses for estimating percent ground cover of winter wheat based on object features[J]. Journal of Zhejiang University, Agriculture & Life Sciences, 2004, 30(6):650-656. (in Chinese)
- 16 李存军, 赵春江, 刘良云, 等. 红外光谱指数反演大田冬小麦覆盖度及敏感性分析[J]. 农业工程学报, 2004, 20(5):159-164.
Li Cunjun, Zhao Chunjiang, Liu Liangyun, et al. Retrieval winter wheat ground cover by short-wave infrared spectral indices in field and sensitivity analysis[J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(5):159-164.
- 17 刘飞, 王莉, 何勇. 应用多光谱图像技术获取黄瓜叶片含氮量及叶面积指数[J]. 光学学报, 2009, 29(6):1616-1620.
Liu Fei, Wang Li, He Yong. Application of multi-spectral imaging technique for acquisition of cucumber growing information[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(6):1616-1620.
- 18 薛利红, 曹卫星, 罗卫红, 等. 光谱植被指数与水稻叶面积指数相关性的研究[J]. 植物生态学报, 2004, 28(1):47-52.
Xue Lihong, Cao Weixing, Luo Weihong, et al. Relationship between spectral vegetation indices and LAI in rice[J]. Acta Phytoecologica Sinica, 2004, 28(1):47-52. (in Chinese)
- 19 杨嘉, 郭妮, 贾建华. 西北地区 MODIS/NDVI 与 MODIS/EVI 对比分析[J]. 干旱气象, 2007, 25(1):38-43.
Yang Jia, Guo Ni, Jia Jianhua. Comparison between MODIS/NDVI and MODIS/EVI in northwest China[J]. Arid Meteorology, 2007, 25(1):38-43. (in Chinese)
- 20 Wu Q, Sun H, Li M, et al. Development of 2-charge-coupled device multi-spectral imagery system for winter wheat chlorophyll Content Monitoring[J]. Sensor Letters, 2014, 12(12):818-823.
- 21 Wu Q, Sun H, Li M, et al. Development of crop monitoring system based on multispectral image technology[C]//Proceedings of the 5th Asian Conference on Precision Agriculture (ACPA), 2013:77.
- 22 吴倩, 孙红, 李民赞, 等. 玉米作物多光谱图像精准分割与叶绿素诊断方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2015, 35(1):178-183.
Wu Qian, Sun Hong, Li Minzan, et al. Research on maize multispectral image accurate segmentation and chlorophyll index estimation[J]. Spectroscopy & Spectral Analysis, 2015, 35(1):178-183. (in Chinese)

(上接第 233 页)

- 10 郭志顶, 李志洪, 李辛, 等. 施氮水平及方式对玉米冠层 NDVI、氮含量、叶绿素和产量的影响[J]. 玉米科学, 2013, 21(6):111-116, 121.
Guo Zhiding, Li Zhihong, Li Xin, et al. Effects of nitrogen levels and the methods on the canopy NDVI, nitrogen content, chlorophyll and yield of maize[J]. Journal of Maize Science, 2013, 21(6):111-116, 121. (in Chinese)
- 11 徐新刚, 赵春江, 王纪华, 等. 基于可见光-近红外新光谱特征和最有组合原理的大麦叶片氮含量监测[J]. 红外与毫米波学报, 2013, 32(4):351-358, 365.
Xu Xin'gang, Zhao Chunjiang, Wang Jihua, et al. Associating new spectral features from visible and near infrared regions with optimal combination principle to monitor leaf nitrogen concentration in barley[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2013, 32(4):351-358, 365. (in Chinese)
- 12 张喜杰, 李民赞, 崔笛, 等. 温室作物长势的光谱学诊断方法研究与仪器开发[J]. 光谱学与光谱分析, 2006, 26(5):887-890.
Zhang Xijie, Li Minzan, Cui Di, et al. New method and instrument to diagnose crop growth status in greenhouse based on spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2006, 26(5):887-890. (in Chinese)
- 13 李修华, 李民赞, 崔笛. 基于光谱学原理的无损式作物冠层分析仪[J]. 农业机械学报, 2009, 40(增刊):252-255, 227.
Li Xiuhua, Li Minzan, Cui Di. Non-destructive crop canopy analyzer based on spectral principle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(Supp.):252-255, 227. (in Chinese)
- 14 李修华, 张锋, 李民赞, 等. 四波段作物冠层分析仪的开发[J]. 农业机械学报, 2011, 42(11):169-173.
Li Xiuhua, Zhang Feng, Li Minzan, et al. Design of a four-waveband crop canopy analyzer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(11):169-173. (in Chinese)
- 15 钟振江, 李民赞, 孙红, 等. 作物营养智能检测仪设计与试验[J]. 农业机械学报, 2013, 44(增刊 2):215-219.
Zhong Zhenjiang, Li Minzan, Sun Hong, et al. Development and application of a smart apparatus for detecting crop nutrition[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp. 2):215-219. (in Chinese)