



何彩莲, 郑顺林, 周少猛, 等. 基于高光谱植被指数的马铃薯叶片叶绿素含量估测模型[J]. 华南农业大学学报, 2016, 37(5): 45-49.

基于高光谱植被指数的马铃薯 叶片叶绿素含量估测模型

何彩莲¹, 郑顺林¹, 周少猛¹, 张琴¹, 袁继超¹, 胡建军²

(1 四川农业大学 农学院, 四川 成都 611130; 2 四川省农业科学院 作物研究所, 四川 成都 610066)

摘要:【目的】筛选相关性好的植被指数构建马铃薯叶片叶绿素 a、叶绿素 b 估测模型, 为科学、无损地进行马铃薯叶片叶绿素含量估算提供技术支撑。【方法】采用便携式高光谱地物波谱仪, 获取不同施氮水平下不同生育时期的马铃薯植株叶片光谱反射率, 提取植被指数, 测定马铃薯叶片叶绿素 a、叶绿素 b 含量, 并研究叶绿素含量与植被指数的相关性。【结果】12 个植被指数与叶绿素 a、叶绿素 b 含量相关性较好, 其中修正归一化差异指数 (mND₇₀₅)、修正简单比值指数 (mSR₇₀₅)、地面叶绿素指数 (MTCI)、修改叶绿素吸收反射指数 (MCARI) 与叶绿素 a、叶绿素 b 含量相关性最好。基于这 4 个植被指数建立的估测模型中, MTCI 构建的乘幂模型估测叶绿素 a 含量的效果最佳, mND₇₀₅ 构建的指数模型估测叶绿素 b 含量的效果最佳。【结论】MTCI 构建的乘幂模型能较为精确地估测叶绿素 a 含量, mND₇₀₅ 构建的指数模型能较为精确地估测叶绿素 b 含量; 这 2 种模型可用于间接监测马铃薯植株的氮营养亏缺状态。

关键词: 高光谱技术; 光谱反射率; 马铃薯; 植被指数; 叶绿素含量; 反演模型

中图分类号: S532; S127

文献标志码: A

文章编号: 1001-411X(2016)05-0045-05

Estimation models of chlorophyll contents in potato leaves based on hyperspectral vegetation indices

HE Cailian¹, ZHENG Shunlin¹, ZHOU Shaomeng¹, ZHANG Qin, YUAN Jichao¹, HU Jianjun²

(1 College of Agronomy, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China;

2 Crop Research Institute of Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Chengdu 610066, China)

Abstract:【Objective】To build models for estimating chlorophyll a and chlorophyll b contents in potato, *Solanum tuberosum*, leaves by using hyperspectral vegetation indices, and provide a basis for scientific and nondestructive estimation of chlorophyll content in potato leaves. 【Method】Leaf spectral reflectance was measured for potato plants at different growth stages under different nitrogen levels by using a portable spectrometer. The hyperspectral vegetation indices were extracted from leaf spectral reflectance. The contents of chlorophyll a and chlorophyll b in potato leaves were measured, and the relationship between hyperspectral vegetation index and chlorophyll content was analyzed. 【Result】There were 12 vegetation indices with relatively good correlations with chlorophyll content. Modified normalized difference index (mND₇₀₅), modified simple ratio index (mSR₇₀₅), MERIS terrestrial chlorophyll index (MTCI) and modified chlorophyll absorption reflectance index (MCARI) had the highest correlations with chlorophyll contents among the 12 vegetation indices. Estimation models were established based on above-mentioned four indices. The power model based on MTCI offered the best estimation of chlorophyll a content, and the index model based on MCARI offered the best estimation of chlorophyll b content. 【Conclusion】The power

收稿日期: 2016-01-05 优先出版时间: 2016-07-05

优先出版网址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/44.1110.s.20160705.1159.010.html>

作者简介: 何彩莲 (1991—), 女, 硕士研究生, E-mail: hecailian818@163.com; 通信作者: 郑顺林 (1974—), 男, 副教授, 博士, E-mail: zhengshunlin123@163.com

基金项目: 国家现代农业产业技术体系建设专项 (CARS20); 四川省育种攻关及配套项目 (2011NZ0098-15-5)

model based on MTCI and the index model based on mND_{705} can be respectively used to estimate chlorophyll a and chlorophyll b contents in potato leaves with relatively high accuracy, and indirectly monitor nitrogen deficiency in potato plants.

Key words: hyperspectral technology; spectral reflectance; *Solanum tuberosum*; vegetation index; chlorophyll content; inversion model

叶绿素能够进行光合作用,将光能转换为化学能,合成有机化合物,为植物生长提供养料^[1]。植株体内叶绿素含量与其生长发育、光合能力以及氮素状况有较好的相关性,被称为监测植物生长发育和营养状况的指示器^[2-3]。目前叶绿素含量测定通常采用研磨浸提或直接浸提^[4],耗时耗力,而且会对植株造成损害。快速、无损地掌握植株叶绿素含量能减少对植株的损害,在作物生长监测、产量预测、精确诊断与动态调控中具有十分重要的意义^[5]。

高光谱遥感技术能够较准确地估算农作物的叶绿素含量^[6],为快速、大面积监测植被的叶绿素含量的变化提供了可能^[7]。Maderira 等^[8]发现光谱反射率能够作为有效估测叶绿素含量的指标。Gitelson 等^[9]利用大豆、玉米的冠层反射率导数成功地建立了叶片叶绿素含量估测模型。Wu 等^[10]分析了十几种光谱指数估测玉米叶片叶绿素含量的精确度。宋开山等^[5-6]构建了玉米与大豆叶绿素含量的神经网络估测模型,提高了叶绿素反演的精确度。蒋金豹等^[11]利用光谱微分指数成功地构建了小麦叶绿素含量的估测模型。靳彦华等^[12]基于叶片冠层光谱构建了不同地类、不同生育期春小麦叶绿素含量的最佳估测模型。杨峰等^[13]基于 14 种植被指数构建了稻麦叶绿素含量估测的最佳模型。这些研究对于监测水稻、玉米、小麦等粮油作物的生长动态,并进行科学的田间管理起到了积极作用。针对马铃薯 *Solanum tuberosum* 叶片叶绿素含量监测的研究鲜见报道。本文采用高光谱遥感技术,测定了马铃薯植株叶片 12 个光谱植被指数;通过分析 12 个植被指数与叶绿素 a、叶绿素 b 含量的相关性,筛选出与叶绿素 a、叶绿素 b 相关性最好的植被指数,建立估测叶绿素 a 和叶绿素 b 含量的最佳模型,为马铃薯长势及植株氮营养诊断提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 材料

脱毒马铃薯:川芋 117,为四川省农业科学院作物研究所培育和提供的马铃薯新品种。

1.2 盆栽试验

试验在四川农业大学成都校区进行,采用精准 <http://xuebao.scau.edu.cn>

控制条件下的沙培盆栽试验,盆规格为 35 cm × 56 cm,每盆装河沙 20 kg,每盆种植马铃薯 6 株,播深 5 cm。以 SM 营养液为基础、硝酸铵为氮素形式,设置 6 个施氮处理,每处理 4 次重复,施氮量(纯氮)分别为 0、55、110、220、330 和 440 kg · hm⁻¹(以 N0、N1、N2、N3、N4、N5 表示),各施氮处理均在马铃薯整个生育期内分 6 次均匀施入。

1.3 光谱反射率和叶绿素含量的测定

光谱反射率(R)使用荷兰 AvaField-3 便携式高光谱地物波谱仪测定,光谱使用范围为 350 ~ 1 050 nm。马铃薯苗期、块茎形成期、块茎成熟期,选择晴朗无云的天气于 11:00—14:00 进行测定。3 个生育时期,每处理选取代表其生长势的马铃薯植株 3 株,每株取功能叶片(倒 4 叶),立即带回遮光的实验室内,平铺于黑色背景的工作台上,用 AvaField-3 进行光谱反射率测定。测量时,标准探头靠近叶片,每片叶重复测定 10 次,取平均值为该处理的光谱反射率,共获得 54 组光谱反射率有效数据。每个处理测定完成后,及时用标准白板对探头进行校正。

植被指数为自变量,叶绿素 a 和叶绿素 b 的含量为因变量,以 54 组样本为对象建立回归模型:

$$\text{线性函数: } y = a + bx,$$

$$\text{对数函数: } y = a + b \ln x,$$

$$\text{指数函数: } y = ae^{bx},$$

$$\text{二次函数: } y = a + bx + cx^2,$$

$$\text{三次函数: } y = a + bx + cx^2 + dx^3,$$

$$\text{乘幂函数: } y = ax^b,$$

式中, y 代表叶绿素含量; x 代表植被指数; a 、 b 、 c 、 d 分别为常数。

叶绿素含量测定:在光谱测定的同时测定叶绿素含量。用打孔器在样品叶片中间部位叶脉两侧取 2 个小圆片,以千分之一精度电子天平称质量。放入 15 mL 带塞的刻度试管中,在试管中加丙酮、乙醇、水(体积比为 4.5:4.5:1.0)混合溶液 15 mL,盖塞,室温下置黑暗处浸提过夜,其间摇动数次。观察叶组织颜色变白时,取上清液分别于 645 和 663 nm 下测定其吸光值,计算叶绿素含量:

$$\rho(\text{叶绿素 a}) = 12.7D_{663 \text{ nm}} - 2.59D_{645 \text{ nm}},$$

$$\rho(\text{叶绿素 b}) = 22.9D_{645 \text{ nm}} - 4.67D_{663 \text{ nm}} \circ$$

数据分析使用 Excel、Origin、Spss17.0 数据处理

软件进行。

1.4 光谱植被指数的选取

光谱植被指数是某些光谱波段反射值的特定组合。本文选取前人研究与叶绿素含量有关的12个植被指数:简单比值指数(SRI)、归一化植被指数(NDVI)、差值植被指数(DVI)、结构不敏感色素指数(SIPI)、修正归一化差异指数(mND₇₀₅)、修正简单比值指数(mSR₇₀₅)、光化学植被指数(PRI)、植被衰减指数(PSRI)、地面叶绿素指数(MTCI)、修改叶绿素吸收反射指数(MCARI)、优化土壤调节植被指数(OSAVI)和转化叶绿素吸收反射指数(TCARI)^[14-18]。各植被指数的计算公式如下:

$$\begin{aligned} \text{SRI} &= R_{800\text{ nm}} / R_{680\text{ nm}}, \\ \text{NDVI} &= (R_{800\text{ nm}} - R_{680\text{ nm}}) / (R_{800\text{ nm}} + R_{680\text{ nm}}), \\ \text{DVI} &= R_{800\text{ nm}} - R_{680\text{ nm}}, \\ \text{SIPI} &= (R_{800\text{ nm}} - R_{445\text{ nm}}) / (R_{800\text{ nm}} + R_{680\text{ nm}}), \\ \text{mND}_{705} &= (R_{750\text{ nm}} - R_{705\text{ nm}}) / (R_{750\text{ nm}} + R_{705\text{ nm}} - 2R_{445\text{ nm}}), \\ \text{mSR}_{705} &= (R_{750\text{ nm}} - R_{445\text{ nm}}) / (R_{705\text{ nm}} - R_{445\text{ nm}}), \\ \text{PRI} &= (R_{570\text{ nm}} - R_{531\text{ nm}}) / (R_{570\text{ nm}} + R_{531\text{ nm}}), \\ \text{PSRI} &= (R_{680\text{ nm}} - R_{500\text{ nm}}) / R_{750\text{ nm}}, \\ \text{MTCI} &= (R_{750\text{ nm}} - R_{710\text{ nm}}) / (R_{710\text{ nm}} - R_{680\text{ nm}}), \\ \text{MCARI} &= (R_{700\text{ nm}} - R_{670\text{ nm}}) - 0.2(R_{700\text{ nm}} - R_{550\text{ nm}}) \times (R_{700\text{ nm}} / R_{670\text{ nm}}), \end{aligned}$$

$$\text{OSAVI} = (1 + 0.16)(R_{800\text{ nm}} - R_{670\text{ nm}}) / (R_{800\text{ nm}} + R_{670\text{ nm}} + 0.16),$$

$$\text{TCARI} = 3[(R_{700\text{ nm}} - R_{670\text{ nm}}) - 0.2(R_{700\text{ nm}} - R_{550\text{ nm}})] \times (R_{700\text{ nm}} / R_{670\text{ nm}}),$$

式中, R 为光谱反射率。

2 结果与分析

2.1 叶绿素含量与光谱反射率的相关性

将马铃薯叶片叶绿素 a、b 含量与相对应的 54 组叶片光谱反射率进行相关性分析。由图 1 可以看出叶绿素 a、b 含量与原始光谱反射率除在 410 ~ 730 nm 处呈现负相关关系外,其他波段均呈现正相关关系。叶绿素 a 含量与原始光谱反射率分别在 420 ~ 725、738 ~ 1 050 nm 处呈极显著相关($P < 0.01$),在 420 ~ 725 nm 处呈极显著负相关,而在 738 ~ 1 050 nm 处呈极显著正相关。叶绿素 b 含量与原始光谱反射率分别在 422 ~ 724、737 ~ 1 050 nm 处呈极显著相关,在 422 ~ 722 nm 处呈极显著负相关,而在 737 ~ 1 050 nm 处呈极显著正相关。叶绿素 a、b 含量分别在 704、519 nm 处与原始光谱反射率相关程度最高,其值分别为 -0.77、-0.78。分析叶绿素含量与原始光谱反射率的相关性,确定马铃薯叶片叶绿素含量敏感波段为 400 ~ 800 nm。

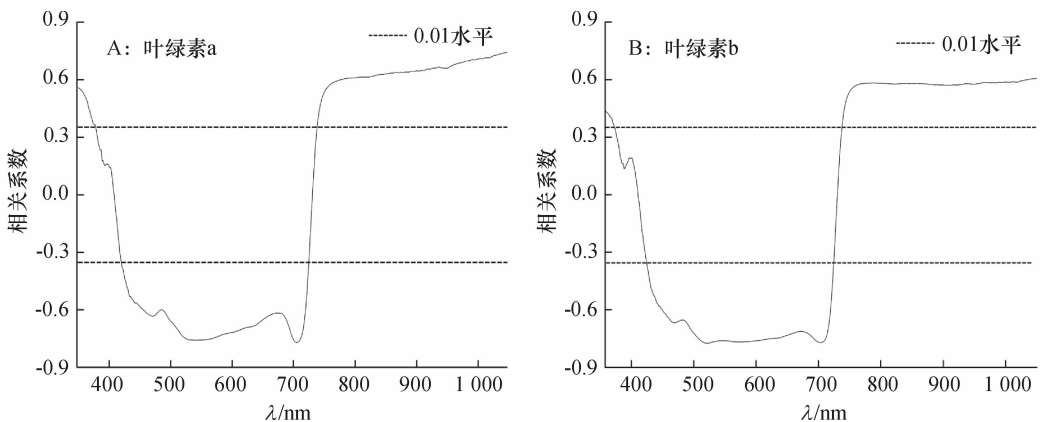


图1 马铃薯叶片原始光谱反射率与叶绿素含量的相关性

Fig.1 Correlation between the original spectral reflectance and chlorophyll content of potato leaves

2.2 叶绿素含量预测模型的构建

2.2.1 植被指数的筛选 将马铃薯叶片叶绿素 a、b 含量分别与所选择的 12 个植被指数进行相关性分析。结果表明, SRI、NDVI、DVI、SIPI、mND₇₀₅、mSR₇₀₅、PRI、PSRI、MTCI、MCARI、OSAVI 和 TCARI 等 12 个植被指数与叶绿素 a 含量的相关系数(R)分别为 0.700**、0.723**、0.695**、0.765**、0.807**、0.791**、0.630**、-0.171、0.816**、-0.769**、0.718** 和 -0.768**, 与叶绿素 b 含量的 R 分别为

0.781**、0.788**、0.695**、0.790**、0.806**、0.799**、0.706**、-0.349*、0.797**、-0.727**、0.785** 和 -0.727**。PSRI 与叶绿素 a、b 含量的 R 均最小,且与叶绿素 a 含量的 R 未达显著相关($P > 0.05$);其他 11 个植被指数与叶绿素 a、b 含量的相关性均达到极显著水平($P < 0.01$),且 mND₇₀₅、mSR₇₀₅、MTCI 和 MCARI 与叶绿素 a、b 含量的相关性最好,因此,选择这 4 个植被指数建立马铃薯叶片叶绿素含量估测模型。

2.2.2 叶绿素含量估测模型的构建 用筛选出的 mND₇₀₅、mSR₇₀₅、MTCI、MCARI 建立预测叶绿素 a 含量的线性、对数、指数、二次、三次、乘幂模型,所建立的模型的决定系数(R^2)均达到极显著水平($P < 0.01$); R^2 较高,表明该模型能较好地估测马铃薯叶片叶绿素 a 含量(表 1)。构建的叶绿素 a 含量估测模型中, R^2 最高的是 MTCI 构建的乘幂模型, R^2 为

0.797;其次是 mND₇₀₅ 构建的指数模型, R^2 为 0.796。

mND₇₀₅、mSR₇₀₅、MTCI、MCARI 所建立的预测叶绿素 b 含量的线性、对数、指数、二次、三次、乘幂模型的 R^2 较高,均达到极显著水平,可以用于马铃薯叶片的叶绿素 b 含量估测(表 1)。mND₇₀₅ 构建的指数模型估测叶绿素 b 含量的 R^2 最高,为 0.727;其次是 mSR₇₀₅ 构建的乘幂模型, R^2 为 0.715。

表 1 马铃薯叶片叶绿素含量估测模型¹⁾

Tab. 1 Estimation models of chlorophyll contents in potato leaves

植被指数	模型类型	叶绿素 a		叶绿素 b	
		估测模型	R^2	估测模型	R^2
mND ₇₀₅	线性	$y = 2.595x - 0.459$	0.651 **	$y = 1.143x - 0.090$	0.649 **
	对数	$y = 1.166\ln x + 1.724$	0.594 **	$y = 0.515\ln x + 0.872$	0.594 **
	指数	$y = 0.158e^{3.116x}$	0.796 **	$y = 0.137e^{2.382x}$	0.727 **
	二次	$y = 2.119x^2 + 0.408x + 0.064$	0.662 **	$y = 1.020x^2 - 0.091x + 0.162$	0.662 **
	三次	$y = -11.613x^3 + 18.998x^2 - 7.233x + 1.105$	0.669 **	$y = -0.594x^3 + 1.883x^2 - 0.300x + 0.215$	0.662 **
	乘幂	$y = 2.237x^{1.451}$	0.779 **	$y = 1.031x^{1.103}$	0.703 **
mSR ₇₀₅	线性	$y = 0.240x - 0.063$	0.626 **	$y = 0.107x + 0.135$	0.638 **
	对数	$y = 0.907\ln x - 0.187$	0.657 **	$y = 0.401\ln x - 0.028$	0.659 **
	指数	$y = 0.273e^{0.317x}$	0.686 **	$y = 0.227e^{0.213x}$	0.656 **
	二次	$y = -0.049x^2 + 0.641x - 0.680$	0.671 **	$y = -0.017x^2 + 0.244x - 0.119$	0.665 **
	三次	$y = -0.028x^3 + 0.29x^2 - 0.626x + 0.755$	0.691 **	$y = -0.008x^3 + 0.082x^2 - 0.124x + 0.298$	0.674 **
	乘幂	$y = 0.226x^{1.069}$	0.772 **	$y = 0.178x^{0.823}$	0.715 **
MTCI	线性	$y = 0.556x + 0.138$	0.666 **	$y = 0.240x + 0.182$	0.635 **
	对数	$y = 0.720\ln x + 0.752$	0.649 **	$y = 0.311\ln x + 0.447$	0.622 **
	指数	$y = 0.344e^{0.635x}$	0.736 **	$y = 0.248e^{0.483x}$	0.666 **
	二次	$y = -0.125x^2 + 0.945x - 0.127$	0.678 **	$y = -0.047x^2 + 0.387x + 0.082$	0.644 **
	三次	$y = -0.231x^3 + 0.923x^2 - 0.485x + 0.422$	0.694 **	$y = -0.062x^3 + 0.233x^2 - 0.004x + 0.229$	0.650 **
	乘幂	$y = 0.678x^{0.867}$	0.797 **	$y = 0.417x^{0.653}$	0.706 **
MCARI	线性	$y = -0.057x + 1.621$	0.591 **	$y = -0.024x + 0.815$	0.528 **
	对数	$y = -0.688\ln x + 2.553$	0.639 **	$y = -0.279\ln x + 1.186$	0.539 **
	指数	$y = 1.953e^{-0.07x}$	0.757 **	$y = 0.913e^{-0.051x}$	0.630 **
	二次	$y = 0.002x^2 - 0.116x + 1.938$	0.641 **	$y = 0.001x^2 - 0.040x + 0.902$	0.5480 **
	三次	$y = -0.025x^3 + 0.004x^2 - 0.142x + 2.04$	0.642 **	$y = 0.013x^3 + x^2 - 0.026x + 0.848$	0.549 **
	乘幂	$y = 5.654x^{-0.806}$	0.743 **	$y = 1.948x^{-0.580}$	0.601 **

1) mND₇₀₅、mSR₇₀₅、MTCI、MCARI 分别为修正归一化差异指数、修正简单比值指数、地面叶绿素指数、修改叶绿素吸收反射指数;估测模型中, y 代表叶绿素含量, x 代表植被指数;** 表示达极显著水平($P < 0.01$)。

3 讨论与结论

叶绿素主要用于植物光合作用,叶绿素含量高低能反映植物生长状况,同时也能表征作物的生长能力,影响作物经济产量^[21]。高光谱技术波段多、光谱分辨率高且连续,可获得地物的连续光谱曲线,能够反映相邻波段间的细微差别,为定量分析叶绿素含量提供了强有力的工具^[22]。杨峰等^[13]利用二次修正土壤调节植被指数分别建立了相应的回归模型,用以预测水稻的叶面积指数和叶绿素密度。宋开山等^[23]利用归一化植被指数、土壤调和植被指数、再归一植被指数、第二修正比值植被指数等建立了大豆

叶绿素 a 反演模型,提高了大豆叶绿素 a 含量估测精度,为便捷、高效地监测作物生长提供了新的思路。潘蓓等^[24]分析苹果春梢停止期 6 种植被指数与叶绿素含量的相关性,提出以 CCI($D_{794\text{ nm}}/D_{763\text{ nm}}$) 指数为自变量建立的估测模型为苹果树冠层的最佳叶绿素含量估测模型。赵佳佳等^[25]认为冬小麦叶绿素含量敏感波段为 500、690、760 与 470、630、723 nm,冬小麦叶绿素含量估测的最佳模型是以导数光谱 FDNDVI (630、723 nm) 构建的模型。

本试验通过对马铃薯叶片叶绿素 a、b 含量与叶片原始光谱反射率的相关性分析,确定了马铃薯叶片叶绿素含量光谱敏感波段为 400 ~ 800 nm,证明了

基于叶片原始光谱反射率相关性提取植被指数进行马铃薯叶片叶绿素 a、b 含量反演的可能性。马铃薯植被指数与叶绿素 a、b 含量相关性较好,除植被衰减指数(PSRI)外,其余 11 个植被指数均与叶绿素 a、b 含量极显著相关。筛选的 4 个植被指数修正归一化差异指数(mND₇₀₅)、修正简单比值指数(mSR₇₀₅)、地面叶绿素指数(MTCI)、修改叶绿素吸收反射指数(MCARI)分别建立叶绿素 a、b 含量的线性、指数、对数等估测回归模型。通过分析对比发现叶绿素 a 含量最佳预测模型为 MTCI 构建的乘幂模型,叶绿素 b 含量最佳预测模型为 mND₇₀₅ 构建的指数模型。叶绿素 a、b 含量估测模型为快速、无损地反映马铃薯叶片叶绿素含量提供了技术支持,间接地为估测马铃薯植株氮营养状况提供了研究方向。本文是在盆栽试验条件下进行的叶片光谱植被指数估测马铃薯叶片叶绿素含量的研究,在更为复杂的大田条件下其应用受到制约,今后的研究要进一步基于大田与作物冠层进行,推动高光谱遥感技术在农业生产上的应用。

参考文献:

- [1] 孙阳阳,汪国平,杨可明,等. 玉米叶绿素含量高光谱反演的线性模型研究[J]. 山东农业科学, 2015, 47(7):117-121.
- [2] 童庆禧,张兵,郑兰芬. 高光谱遥感的多学科应用[M]. 北京:电子工业出版社, 2006:20-80.
- [3] 方慧,宋海燕,曹芳,等. 油菜叶片的光谱特征与叶绿素含量之间的关系研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2007, 27(9):1731-1734.
- [4] 朱凌红,周澎,王忠民,等. 高光谱数据与叶绿素含量及植被指数的相关性研究进展[J]. 内蒙古民族大学学报(自然科学版), 2014, 29(1):41-44.
- [5] 王凯龙,熊黑钢,张芳. 干旱区冬小麦不同生长阶段的光谱特征与叶绿素含量估测研究[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(11):45-49.
- [6] 宋开山,张柏,李方,等. 玉米叶绿素含量的高光谱估算模型研究[J]. 作物学报, 2005, 31(8):1095-1097.
- [7] 宋开山,张柏,王宗明,等. 大豆叶绿素含量高光谱反演模型研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(8):16-21.
- [8] MADERIRA A C, MENDONCA A, FERREIRA M E, et al. Relationship between spectroradiometric and chlorophyll measurements in green beans[J]. Commun Soil Sci Plant Anal, 2000, 31(5/6):631-643.
- [9] GITELSON A A, GRITE Y, MERZLYAJ M N. Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves [J]. J Plant Physiol, 2003, 160(3):271-282.
- [10] WU C Y, NIU Z, TANT Q, et al. Estimating chlorophyll content from hyperspectral vegetation indices: Modeling and validation [J]. Agr Forest Meteorol, 2008, 148(8/9):1230-1241.
- [11] 蒋金豹,陈云浩,黄文江. 用高光谱微分指数估测条锈病胁迫下小麦冠层叶绿素密度[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(8):2243-2247.
- [12] 靳彦华,熊黑钢,张芳,等. 不同地类春小麦叶片叶绿素含量高光谱植被指数估算模型研究[J]. 麦类作物学报, 2013, 33(5):1012-1018.
- [13] 杨峰,范亚民,李建龙,等. 高光谱数据估测稻麦叶面积指数和叶绿素密度[J]. 农业工程学报, 2010, 26(2):237-243.
- [14] 邓书斌. ENVI 遥感图像处理方法[M]. 北京:科学出版社, 2010.
- [15] SIMS D A, GAMON J A. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages [J]. Remote Sens Environ, 2002, 81(2):337-354.
- [16] 黄敬峰,王福民,王秀珍. 水稻高光谱遥感实验研究[M]. 杭州:浙江大学出版社, 2010.
- [17] PENUELAS J, BARET F, FILELLA I. Semiempirical indices to assess carotenoids chlorophyll-a ratio from leaf spectral reflectance [J]. Photosynthetica, 1995, 31(2):221-230.
- [18] MERZLYAK M N, GITELSON A A, CHIVKUNOVA O B, et al. Non-destructive optical detection of pigment changes during leaf senescence and fruit ripening [J]. Physiol Plantarum, 1999, 106(1):135-141.
- [19] DASH J, CURRAN P J. Evaluation of the MERIS terrestrial chlorophyll index (MTCI) [J]. Adv Space Res, 2007, 39(1):100-104.
- [20] HABOUDANE D, MILLER J R, TREMBLA N, et al. Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture [J]. Remote Sens Environ, 2002, 81(2):416-426.
- [21] 张晓华,常庆瑞,章曼,等. 基于高光谱植被指数的西北玉米不同时期叶绿素含量估测[J]. 中国农业大学学报, 2015, 20(4):75-81.
- [22] 浦瑞良,宫鹏. 高光谱遥感及其应用[M]. 北京:高等教育出版社, 2000.
- [23] 宋开山,张柏,王宗明,等. 基于小波分析的大豆叶绿素 a 含量高光谱反演模型[J]. 植物生态学报, 2008, 32(1):152-160.
- [24] 潘蓓,赵庚星,朱西存,等. 利用高光谱植被指数估测苹果树冠层叶绿素含量[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(8):2203-2206.
- [25] 赵佳佳,冯美臣,王超,等. 基于光谱植被指数的冬小麦叶绿素含量反演[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2014, 34(5):391-396.

【责任编辑 庄 延, 周志红】

<http://xuebao.scau.edu.cn>