



农业资源与环境学报

中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

基于高光谱数据的滴灌甜菜叶绿素含量估算

李宗飞, 苏继霞, 费聪, 李阳阳, 刘宁宁, 樊华, 陈兵

引用本文:

李宗飞, 苏继霞, 费聪, 等. 基于高光谱数据的滴灌甜菜叶绿素含量估算[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(5): 761–769.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0388>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于高光谱数据的北疆绿洲农田灰漠土有机质反演

单海斌, 蒋平安, 颜安, 朱磊, 郭星

农业资源与环境学报. 2018, 35(3): 276–282 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0256>

基于高光谱的小麦旗叶净光合速率的遥感反演模型的比较研究

吕玮, 李玉环, 毛伟兵, 宫雪, 陈士更

农业资源与环境学报. 2017, 34(6): 582–586 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0173>

甜菜幼苗叶片光合性能、渗透调节及活性氧对高硼胁迫的响应

郝学明, 吴贞祯, 王响玲, 宋柏权, 周建朝

农业资源与环境学报. 2020, 37(5): 753–760 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0209>

滨海盐渍区土壤盐分遥感反演及动态监测

张素铭, 赵庚星, 王卓然, 肖杨, 郎坤

农业资源与环境学报. 2018, 35(4): 349–358 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0016>

钾肥对镉污染土壤大白菜品质的效应研究

王小晶, 陈怡, 王菲, 王正银

农业资源与环境学报. 2015(1): 42–49 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2014.0192>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

李宗飞, 苏继霞, 费聪, 等. 基于高光谱数据的滴灌甜菜叶绿素含量估算[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(5): 761–769.

LI Zong-fei, SU Ji-xia, FEI Cong, et al. Estimation of chlorophyll content in sugar beet under drip irrigation based on hyperspectral data[J].

Journal of Agricultural Resources and Environment, 2020, 37(5): 761–769.



开放科学 OSID

基于高光谱数据的滴灌甜菜叶绿素含量估算

李宗飞¹, 苏继霞¹, 费聪¹, 李阳阳¹, 刘宁宁¹, 樊华^{1*}, 陈兵^{2*}

(1. 石河子大学农学院, 新疆 石河子 832003; 2. 新疆农垦科学院棉花研究所, 新疆 石河子 832003)

摘要: 为明确甜菜叶绿素含量与高光谱植被遥感的定量关系, 探索建立干旱区甜菜叶绿素含量估测模型, 即时监测甜菜生长状况, 选取新疆滴灌甜菜(Beta356)为研究对象, 利用ASD野外高光谱仪在甜菜叶丛快速生长期、块根膨大期与糖分积累期采集各处理反射光谱, 并同时测定叶绿素含量, 分析原始光谱反射率和一阶微分光谱反射率与叶绿素含量的相关关系, 并进一步建立光谱特征参数和敏感波段植被指数叶绿素含量估算模型。结果表明: 原始光谱反射率在近红外区(700~1 300 nm)随着氮素水平的增加呈先升高后降低趋势, 红边(680~760 nm)也表现出相同趋势, 原始光谱反射率在近红外区(700~1 300 nm)随着运筹管理的递进呈现升高趋势, 红边(680~760 nm)也表现出相同趋势; 原始光谱反射率和一阶微分反射率与叶绿素含量均具有较好的相关性, 其最大正相关分别位于902 nm($r=0.574$, $P<0.01$)和676 nm($r=0.843$, $P<0.01$)附近, 最大负相关分别位于611 nm($r=-0.664$, $P<0.01$)和1 138 nm($r=-0.727$, $P<0.01$)附近。对所建12个线性模型进行精度检验, 其中差值植被指数 $DR_{676}-DR_{446}$ 和 DR_{676} 估算模型的预测值与实测值的决定系数分别达到0.774和0.781, 以 DR_{676} 所建立的估算模型最优。本研究为快速无损监测甜菜生长状况、制定氮素管理方案、指导甜菜氮肥管理提供支持。

关键词: 叶绿素; 高光谱遥感; 植被指数; 一阶微分; 估算模型

中图分类号: X173

文献标志码: A

文章编号: 2095-6819(2020)05-0761-09

doi: 10.13254/j.jare.2019.0388

Estimation of chlorophyll content in sugar beet under drip irrigation based on hyperspectral data

LI Zong-fei¹, SU Ji-xia¹, FEI Cong¹, LI Yang-yang¹, LIU Ning-ning¹, FAN Hua^{1*}, CHEN Bing^{2*}

(1. Agronomy College, Shihezi University, Shihezi 832003, China; 2. Cotton Institute, Xinjiang Academy of Agricultural and Reclamation Science, Shihezi 832003, China)

Abstract: In this study, a model for estimating the chlorophyll content of sugar beet in arid areas was established to clarify the quantitative relationship between chlorophyll content of sugar beet and remote sensing of hyperspectral vegetation, and to monitor the growth status of sugar beet in real time. We investigated this relationship in Xinjiang drip-irrigated sugar beet (*Beta vulgaris* 'Beta356'). Spectral reflectance of each treatment was collected by ASD field hyperspectral radiometer and chlorophyll content was measured in the period of rapid leaf growth, root expansion period, and sugar accumulation period. The correlations between original spectral reflectance, first-order differential spectral reflectance, and chlorophyll content were analyzed, and a hyperspectral remote sensing model for estimating chlorophyll content, as well as a sensitive band vegetation index, was established. The results showed that the original spectral reflectance in the near-infrared region (700~1 300 nm) first increased, but thereafter decreased with the increase in nitrogen application rate, and the red edge (680~760 nm) showed the same trend. The original spectral reflectance in the near-infrared region increased with the change in nitrogen management mode, and the red edge (680~760 nm) showed the same trend. The original spectral reflectance and the first-order differential reflectance were correlated with chlorophyll content. Maximum positive correlation was observed near 902 nm ($r=0.574$, $P<$

收稿日期: 2019-07-26 录用日期: 2019-10-15

作者简介: 李宗飞(1993—), 男, 新疆库尔勒人, 硕士, 主要从事作物生理生态研究。E-mail: shzulizongfei@163.com

*通信作者: 樊华 E-mail: fanhua@shzu.edu.cn; 陈兵 E-mail: zyrcb@126.com

基金项目: 国家自然科学基金(31660360, 31771720); 石河子大学国际科技合作推进计划(GJHZ201706); 自治区研究生科研创新项目(XJGR12016039)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(31660360, 31771720); International Science and Technology Cooperation Promotion Plan of Shihezi University(GJHZ201706); Research and Innovation Projects of Postgraduates in Autonomous Region(XJGR12016039)

0.01) and 676 nm ($r=0.843$, $P<0.01$), while maximum negative correlation was observed near 611 nm ($r=-0.664$, $P<0.01$) and 1 138 nm ($r=-0.727$, $P<0.01$). While testing the accuracy of 12 established linear models, the determination coefficients of real and predicted vegetation index values of $DR_{676}-DR_{446}$ and DR_{676} reached 0.774 and 0.781, respectively, and the estimation model established using DR_{676} was found to be the best. This study provides information on the rapid and non-destructive monitoring of sugar beet growth and the development and regulation of a nitrogen management program.

Keywords: chlorophyll; hyperspectral remote sensing; vegetation index; first derivative; estimation model

叶绿素含量是决定植物光合效率的重要性状,是决定作物产量的重要因素,既表征作物的生长状态,又表征作物的生产能力,是衡量作物养分状况、植物光合能力与植物长势的指示器^[1]。应用高光谱植被数据,选择适宜的光谱参数与植被指数定量地估算叶绿素含量,是快速、无损监测作物生长状况的关键技术之一,对田间甜菜高产高效管理具有重要意义。国外学者利用高光谱遥感技术进行植被叶绿素含量估算研究较早。Malenovsky 等^[2]发现在波段 550 nm 与 700 nm 附近光谱反射率与叶绿素含量具有很好的相关性。Boochs 等^[3]研究表明 680 nm 附近植被指数的构建可以很好地反演叶绿素含量。针对叶绿素含量的估算,学者们提出了一系列的光谱植被指数,如比值植被指数 RVI 能有效预测不同氮素水平下小麦冠层叶绿素含量^[4],叶绿素吸收反射率指数 CARI 可以减少由于非光合因子引起的光合有效辐射的变化^[5],Daughtry 等^[6]提出用 CARI 修正型植被指数 MCARI 与 TCARI 估测叶绿素含量。Haboudane 等^[7]认为植被指数 TCARI 与优化土壤调节植被指数 OSAVI 之比及修正型三角植被指数 MTVI2 对叶绿素含量较为敏感。国内学者针对叶绿素含量估算也开展了较多研究,梁亮等^[8]通过分析 18 种高光谱指数对叶绿素的估测能力,筛选出最优指数,并用 LS-SVR 法建立了小麦冠层叶绿素含量的预测模型。姚付启等^[9]通过分析红边波段与叶绿素含量相关性,建立了基于红边特征光谱参数的叶绿素估测模型。徐道清等^[10]通过对盐胁迫的棉花叶绿素含量与光谱数据进行分析,认为归一化植被指数 $(DR_{697}-DR_{738})/(DR_{697}+DR_{738})$ 对棉花单叶叶绿素含量估测效果较好。李媛媛等^[11]发现 BP 神经网络模型可以更好地估测玉米乳熟期叶绿素含量。岳学军等^[12]利用支持向量机算法构建果树叶片叶绿素含量预测模型。尼加提·卡斯木等^[13]分析小麦叶绿素含量与红边、黄边等的相关关系,结合偏最小二乘回归法对叶绿素含量进行高光谱建模及验证。叶绿素含量可以有效估算作物营养及生理状态^[14-15],作物营养状况变化与光谱反射率变化密切相关,而大田作

物营养监测一直是精准农业研究的热点问题^[16-18]。光谱反射率及其特征参数随着叶片叶绿素含量的变化呈现出不同的光谱响应,但作物冠层光谱易受不同纬度与不同作物叶片角度等客观条件的限制,遥感监测模型的精度、适应性及稳定性有待提高^[19],而现有研究中鲜有针对干旱区滴灌甜菜进行的高光谱遥感田间监测研究。本文以新疆石河子滴灌甜菜为研究对象,结合高光谱植被遥感,分析不同光谱反射率及其植被指数估算甜菜叶绿素的敏感性,建立干旱区滴灌甜菜的叶绿素估算模型,即时监测甜菜生长状况,指导干旱区滴灌甜菜高产高效栽培管理。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2017 年 4 月至 2017 年 11 月在新疆石河子大学农学院试验站(44°31'N, 88°06'E)进行。试验区耕层土壤为灌溉灰漠土,有机质含量 13.27 g·kg⁻¹, pH 值 7.3,全氮含量 0.76 g·kg⁻¹,速效磷 22.56 mg·kg⁻¹,速效钾 157.97 mg·kg⁻¹。试验共设置 4 个施氮水平: N0(0 kg·hm⁻²)、N75(75 kg·hm⁻²)、N150(150 kg·hm⁻²)、N225(225 kg·hm⁻²)。施氮比例按照 M0(0:0:0)、M1(10:0:0)、M2(7:3:0)、M3(5:3:2)三种运筹模式,即分别在甜菜叶丛快速生长期(6月14日)、块根膨大期(7月24日)与块根糖分积累期(9月4日)按比例施入氮肥。试验采用随机区组设计,重复 3 次,供试甜菜品种为 Beta356,播种日期为 4 月 15 日,试验田内设置 30 个小区,小区面积 12 m²,甜菜播种行距 50 cm,株距 20 cm。基肥为重过磷酸钙 319.5 kg·hm⁻²、硫酸钾 206 kg·hm⁻²,供试氮肥为尿素。其他同大田管理。

1.2 甜菜冠层光谱数据测定

甜菜冠层光谱反射率采用美国 Analytical Spectral Device(ASD)公司生产的 FileSpecPro FR2500 型背挂式野外高光谱辐射仪测定。该光谱仪波段范围为 350~2 500 nm,采样间隔为 1 nm,光谱仪视场角 25°,测量时探头垂直向下,距离冠层垂直高度约 0.5

m,各小区在测量前均进行白板校正。测定选择晴朗无云天气,于北京时间12:00—15:00进行,分别于甜菜各生育期施肥前后进行测定,即叶丛快速生长期施肥前后(6月4日和6月24日)、块根膨大期施肥前后(7月14日和8月4日)、糖分积累期施肥前后(8月24日和9月14日)进行光谱反射率的测定,每个光谱测定点记录5条光谱数据,每小区测定3次,取其平均值作为该小区的光谱反射率。

1.3 叶绿素含量测定

叶绿素含量测定取样时间与冠层高光谱反射率测定时间同步,选取每小区光谱测定区域叶龄相同、大小一致的叶片于黑暗低温条件下迅速带回,在主脉两侧(避开叶脉)相同部位剪取2 mm左右细丝,称取0.2 g叶片细丝置于20 mL丙酮/乙醇(1:1)混合提取液中,振荡使叶片细丝分散并加塞放置于暗处,直至细丝完全变白为止。用分光光度计分别测定浸提液在663、645 nm和440 nm波长处的吸光度,重复三次,取其平均值作为测定的最终结果。根据以下公式计算色素浓度:

$$\text{Chla}=12.7 \text{ OD}_{663}-2.59 \text{ OD}_{645}$$

$$\text{Chlb}=22.88 \text{ OD}_{645}-4.67 \text{ OD}_{663}$$

$$\text{Car}=4.7 \text{ OD}_{440}-0.27 (\text{Chla}+\text{Chlb})$$

$$\text{Chlt}=\text{浓度}(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})\times\text{提取液体积}(\text{mL})/\text{质量}(\text{g})/$$

1 000

式中:Chla、Chlb、Car分别表示提取液中叶绿素a、叶

绿素b和类胡萝卜素的浓度, $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$;Chlt表示单位面积的色素含量, $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$;OD₆₆₃、OD₆₄₅及OD₄₄₀分别表示提取液在663、645 nm及440 nm处的吸光度。

1.4 数据分析

采用ViewSpec Program对光谱原数据进行提取以及预处理,用Excel 2013与SPSS 12.0软件对农学参数数据和光谱数据进行统计分析,并利用Origin 2018软件制图,采用MATLAB软件提取甜菜冠层光谱数据的特征参数,从中提取常用光谱特征“三边”参数;通过选择已有光谱植被指数作对比,结合与本试验中叶绿素含量相关性较好的敏感性波段,构建比值植被指数RVI、差值植被指数DVI、归一化比值植被指数NDVI与红边归一化差异指数NDI(表1)。

通过分析光谱特征参数及植被指数与叶绿素含量相关关系,建立叶绿素估测模型。根据测定样本数量大小,将采集样本随机分为两组,其中建模样本64个,模型检验样本19个。对比各模型的建模决定系数 R^2 、均方根误差RMSE以及相对误差RE筛选出最优模型,用以研究新疆滴灌条件下甜菜叶绿素含量的估算。其中 R^2 用以判断模型拟合优度,RE与RMSE用于检验估测模型的可靠程度。

$$\text{RE}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n\frac{|\hat{y}_i-y_i|}{y_i}\times 100\%$$

$$\text{RMSE}=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n(\hat{y}_i-y_i)^2}$$

表1 高光谱特征参数及植被指数定义
Table 1 Hyperspectral parameters and their definitions

光谱特征参数与植被指数Spectral characteristic parameter and spectral index	定义Definition
Dr	红边振幅(680~760 nm最大一阶微分光谱值)
λ_r	红边位置(680~760 nm最大一阶微分光谱值对应的波长)
SDr	红边面积(680~760 nm一阶微分光谱值的总和)
Dy	黄边振幅(560~640 nm最大一阶微分光谱值)
λ_y	黄边位置(560~640 nm最大一阶微分光谱值对应的波长)
SDy	黄边面积(560~640 nm一阶微分光谱值的总和)
Db	蓝边振幅(490~530 nm最大一阶微分光谱值)
λ_b	蓝边位置(490~530 nm最大一阶微分光谱值对应的波长)
SDb	蓝边面积(490~530 nm一阶微分光谱值的总和)
比值植被指数RVI	$\text{RVI}=R_{\lambda_1}/R_{\lambda_2}$
差值植被指数DVI	$\text{DVI}=R_{\lambda_1}-R_{\lambda_2}$
归一化比值植被指数NDVI	$\text{NDVI}=(R_{\text{NIR}}-R_{\text{red}})/(R_{\text{NIR}}+R_{\text{red}})$
红边归一化差异指数NDI	$\text{NDI}=(\text{DR}_{\lambda_1}-\text{DR}_{\lambda_2})/(\text{DR}_{\lambda_1}+\text{DR}_{\lambda_2})$

注:式中 R_{λ_1} 与 R_{λ_2} 分别为 λ_1 与 λ_2 波长处的光谱反射率, R_{NIR} 为近红外波段(780~2 500 nm)光谱反射率, R_{red} 为可见光红光波段(620~780 nm)光谱反射率, DR_{λ_1} 与 DR_{λ_2} 分别为 λ_1 与 λ_2 波长处的一阶微分光谱反射率。

Note: R_{λ_1} and R_{λ_2} in the equation are the spectral reflectance at wavelengths λ_1 and λ_2 . R_{NIR} is the near-infrared band (780~2 500 nm) spectral reflectance. R_{red} is the visible light band (620~780 nm) spectral reflectance. DR_{λ_1} and DR_{λ_2} are the first derivative spectral reflectance at wavelengths λ_1 and λ_2 respectively.

式中: y_i 为试验测定叶绿素含量真实值; $\hat{y}_i$ 为模型估测叶绿素含量预测值; n 为样本数量。

2 结果与分析

2.1 不同氮素水平下甜菜冠层光谱特征变化

甜菜在不同氮素水平下高光谱反射率波形相似(图1),在波段350~670 nm范围内有明显的吸收谷与反射峰,光谱波形呈现先增高后降低的趋势,在550 nm附近形成较为明显的反射小高峰,且均在670 nm附近形成吸收谷,在670~760 nm波段波形变化较为剧烈,光谱反射率随着波长的增长急剧上升,形成较大陡坡状波形;在近红外波段780~1 300 nm处形成近红外反射平台,且具有明显的波形变化。施氮处理N75、N150、N225在550 nm处较CK分别降低了7.5%、28%、23%;在近红外波段(780~1 300 nm)各施氮处理较CK分别增加了6.14%~12.6%、14.2%~16.4%、6.82%~18%,各处理之间较为容易区分。

由图1不同氮素水平下红边可知,红边与原始冠

层光谱图曲线近红外(780~1 300 nm)波段基本一致,各施氮处理之间有明显差异,且具有“双峰”现象,不同施氮处理除N75红边位置与N0相同,其他施氮处理均出现“红移”现象,施氮处理N150、N225较N0均向长波方向移动5 nm,在施氮处理N150后红边位置趋于平稳。

2.2 原始光谱反射率与叶绿素含量相关关系

对甜菜冠层原始光谱反射率与叶绿素含量进行相关性分析,结果如图2所示。冠层光谱反射率与冠层叶片叶绿素含量在波段350~1 300 nm范围内呈现较为稳定的变化,在可见光(380~780 nm)波段冠层光谱反射率与叶绿素含量呈现极显著正相关的波段主要集中在735~780 nm,且在780 nm处达到最大正相关($r=0.557, P<0.01$);冠层光谱反射率与叶绿素含量呈现极显著负相关的波段主要集中在380~718 nm,且在611 nm处达到最大负相关($r=-0.664, P<0.01$)。在短波近红外波段(780~1 300 nm)冠层光谱反射率与叶绿素含量呈现为极显著的正相关关系,且在902

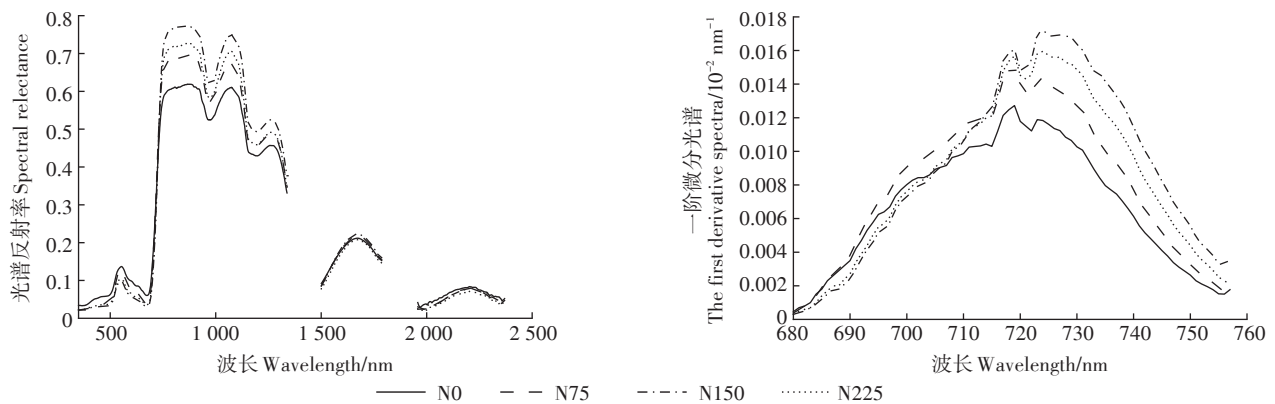


图1 不同氮素水平下高光谱反射率与红边

Figure 1 Canopy hyperspectral reflectance and red edge at different nitrogen levels

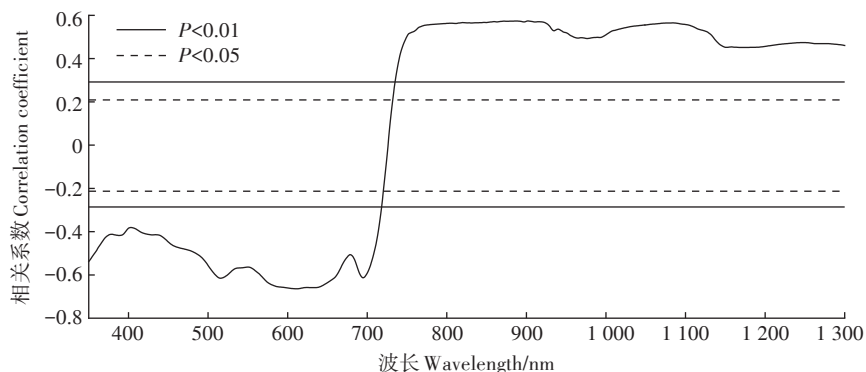


图2 甜菜冠层原始光谱反射率与叶绿素含量相关性

Figure 2 Correlation between the original spectral reflectance and chlorophyll content of sugar beet canopy

nm处达到最大正相关($r=0.574, P<0.01$)。

2.3 一阶微分光谱与叶绿素含量相关关系

对甜菜冠层一阶微分光谱反射率与叶绿素含量进行相关性分析,结果如图3所示,在可见光波段(380~780 nm)冠层一阶微分光谱反射率与叶绿素含量呈现极显著正相关的波段主要集中在593~678 nm与712~780 nm,且在676 nm处达到最大正相关($r=0.843, P<0.01$);两者呈现极显著负相关的波段主要集中在408~560 nm与680~702 nm,且在446 nm处达到最大负相关关系。在短波近红外波段(780~1 300 nm)冠层一阶微分光谱反射率与叶绿素含量呈现极显著正相关的波段主要集中在780~805、995~1 073 nm与1 194~1 250 nm,其中在1 013 nm处达到最大正相关($r=0.774, P<0.01$)。两者呈现极显著负相关的波段主要集中在1 085~1 184 nm,且在1 138 nm处达到最

大负相关($r=-0.727, P<0.01$)。在红边(680~760 nm)范围内;最大正相关位于749 nm处($r=0.801, P<0.01$),最大负相关位于686 nm处($r=-0.67, P<0.01$)。

2.4 光谱特征参数、敏感波段植被指数与叶绿素含量相关关系

通过分析甜菜叶片叶绿素含量与冠层原始光谱反射率的相关性,以及叶绿素含量与一阶微分光谱反射率的相关性,在相应波段内选取相关系数最大的对应波段反射率,构建原始光谱反射率的比值、差值与归一化比值植被指数,构建一阶微分光谱反射率的比值、差值、归一化比值与红边比值、差值、归一化差异指数。研究并分析三边参数及敏感波段植被指数与叶绿素含量的相关关系(表2)。

由表2可知,所选三边参数中只有黄边参数没有达到极显著相关关系,红边参数与蓝边参数均达到极

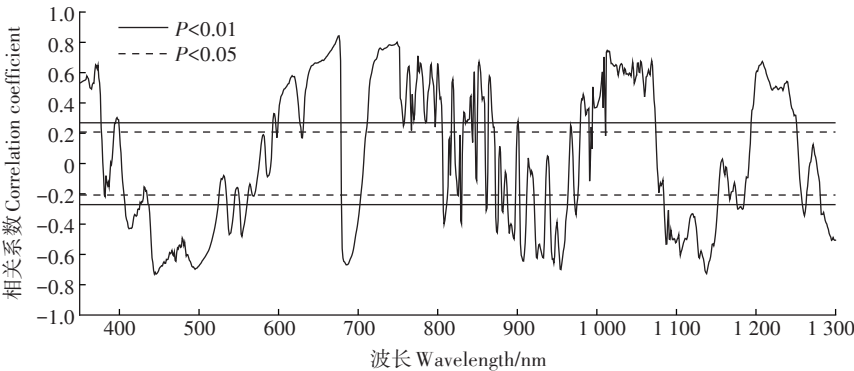


图3 甜菜冠层一阶微分光谱与叶绿素含量相关性

Figure 3 Correlation between first-order differential spectroscopy and chlorophyll content of sugar beet canopy

表2 光谱特征参数及敏感波段植被指数与叶绿素含量相关关系

Table 2 Correlation between spectral characteristic parameters and vegetation index in sensitive bands and leaf chlorophyll content

光谱特征参数 Spectral characteristic parameters	光谱特征参数相关系数 Correlation coefficient(r_1)	植被指数 Vegetation index	植被指数相关系数 Correlation coefficient(r_2)
红边振幅Dr	0.669**	原始光谱比值植被指数 R_{902}/R_{611}	0.757**
红边位置 λ_r	0.639**	原始光谱差值植被指数 $R_{902}-R_{611}$	0.706**
红边面积SDr	0.600**	原始光谱归一化植被指数 $(R_{902}-R_{611})/(R_{902}+R_{611})$	0.807**
黄边振幅Dy	0.185	原始光谱比值植被指数 R_{780}/R_{611}	0.754**
黄边位置 λ_y	-0.157	原始光谱差值植被指数 $R_{780}-R_{611}$	0.690**
黄边面积SDy	0.222*	一阶微分光谱比值植被指数 DR_{1013}/DR_{676}	0.037
蓝边振幅Db	-0.281**	一阶微分光谱差值植被指数 $DR_{1013}-DR_{676}$	0.547**
蓝边位置 λ_b	0.410**	一阶微分归一化植被指数 $(DR_{1013}-DR_{676})/(DR_{1013}+DR_{676})$	-0.820**
蓝边面积SDb	-0.518**	一阶微分光谱比值植被指数 DR_{676}/DR_{446}	0.789**
原始光谱最大负相关 R_{611}	-0.664**	一阶微分光谱差值植被指数 $DR_{676}-DR_{446}$	0.834**
原始光谱最大正相关 R_{780}	0.557**	红边比值植被指数 DR_{749}/DR_{685}	0.711**
一阶微分光谱最大负相关 DR_{446}	-0.731**	红边差值植被指数 $DR_{749}-DR_{685}$	0.804**
一阶微分光谱最大正相关 DR_{676}	0.843**	红边归一化差异指数 $(DR_{749}-DR_{685})/(DR_{749}+DR_{685})$	0.812**

注:**极显著水平($P<0.01$);*显著水平($P<0.05$)。下同。

Note:**means the significance at 0.01 level;* means the significance at 0.05 level. The same below.

显著相关关系,其中红边参数相关系数超过0.6,说明在三边参数中红边参数具有较好估算叶绿素含量的能力。原始光谱反射率与一阶微分光谱反射率的最大正负相关性均达到极显著水平,其中一阶微分光谱反射率的相关系数均超过0.7,且一阶微分光谱反射率 DR_{676} 与叶绿素含量之间达到最大极显著相关($r=0.843, P<0.01$)。所建植被指数与叶绿素含量的相关性除 DR_{1013}/DR_{676} 外均达到极显著水平,其中除 $R_{780}-R_{611}$ 和 $DR_{1013}-DR_{676}$ 外相关系数均超过0.7,且总体高于光谱特征参数。

2.5 已知高光谱植被指数与叶绿素含量相关性

在前人研究的基础上,针对本试验数据对已有植被指数进行优选,分析优选高光谱植被指数与叶绿素含量的相关关系,由表3可知,所选的14个高光谱植被指数均与叶绿素含量呈极显著相关关系,除植被指数MCARI、PSSRa、PRI1、优化一阶微分比值植被指数外,其他10个指数与叶绿素含量的相关系数均超过0.7,其中原始光谱比值指数 R_{705}/R_{750} 与叶绿素含量相关性最大($r=-0.793, P<0.01$)。

2.6 基于高光谱特征参数与敏感植被指数的叶绿素含量的估算与验证

通过分析甜菜叶绿素含量与植被指数的相关关系,选取表2、表3相关系数绝对值大于0.76的高光谱参数用于甜菜叶绿素含量的估算。其中高光谱参数作为自变量 x ,叶绿素含量作为因变量 y ,构建甜菜叶片叶绿素含量估算的一元线性估算模型。

通过对构建模型与模型精度检验分析(表4)可

知,所选光谱特征参数及植被指数与叶绿素含量均具有较好的线性关系,同时具有较高的拟合精度,其决定系数为0.60~0.80,通过比较发现,除原始光谱比值指数 R_{902}/R_{611} 与 R_{780}/R_{611} 、Gater2(R_{695}/R_{760})与红边差异指数 $(DR_{697}-DR_{738})/(DR_{697}+DR_{738})$ 所建线性回归模型的拟合精度没有达到0.70,其他光谱特征参数与植被指数所建模型精度均超过0.70。

利用检验样本对上述变量建立的估算模型预测精度进行检验,各模型检验结果如表4所示。通过对比12个估算模型,分析发现基于光谱特征参数 DR_{676} 建立的线性估算模型的精度检验结果最优,其决定系数最高($R^2=0.791$),验证相对误差RE与验证均方根误差RMSE均最小;在所建立基于植被指数的估算模型中,差值植被指数 $DR_{676}-DR_{446}$ 较其他估算模型具有更好估测叶绿素含量的能力,其决定系数最高($R^2=0.765$),验证相对误差RE与验证均方根误差RMSE均最小。因此光谱特征参数 DR_{676} 与差值植被指数 $DR_{676}-DR_{446}$ 所建立模型可以更好地估测叶绿素含量(图4)。

3 讨论

在甜菜原始冠层光谱反射率中,施氮处理N75、N150、N225在550 nm处较CK分别降低了7.5%、28%、23%,说明各施氮处理相对CK均可提高甜菜植株冠层叶片对红、蓝光的吸收,提高植株的光合效率,且施氮处理N150比N75、N225具有更好的提高植株光合效率的作用;在近红外波段(780~1 300 nm)各施氮处理较CK均有明显增加。在甜菜冠层不同氮素水

表3 已知高光谱植被指数与叶绿素含量的相关性

Table 3 Correlation between known hyperspectral vegetation index and chlorophyll content

植被指数 Vegetation index	计算公式 Calculation formula	相关系数 Correlation coefficient (r)	文献来源 Source of literature
MCARI	$[(R_{700}-R_{670})-0.2\times(R_{700}-R_{550})]\times(R_{700}/R_{670})$	-0.356**	[20]
PSSRa	R_{800}/R_{675}	0.685**	[21]
PSSRb	R_{800}/R_{650}	0.743**	[22]
Vog1	$(R_{734}-R_{747})/(R_{715}-R_{720})$	0.716**	[23]
Vog2	$(R_{734}-R_{747})/(R_{715}-R_{726})$	0.726**	[23]
Vog3	R_{740}/R_{720}	0.752**	[23]
GM	R_{750}/R_{700}	0.755**	[24]
Gater2	R_{695}/R_{760}	-0.781**	[25]
PRI1	$(R_{531}-R_{570})/(R_{531}+R_{570})$	0.598**	[26]
CI _{red-edge}	$R_{780}/R_{710}-1$	0.751**	[27]
原始光谱比值指数	R_{705}/R_{750}	-0.793**	[28]
优化一阶微分差值指数	$DR_{697}-DR_{738}$	-0.760**	[10]
优化一阶微分归一化指数	$(DR_{697}-DR_{738})/(DR_{697}+DR_{738})$	-0.774**	[10]
优化一阶微分比值植被指数	DR_{697}/DR_{572}	0.656**	[10]

表4 不同光谱特征参数及植被指数与叶绿素含量回归关系模型拟合及验证

Table 4 Fitting and verifying the regression relation model between different spectral characteristic parameters and vegetation index and chlorophyll content

光谱特征参数/植被指数 Parameters/Vegetation index	拟合模型 Fitting model		验证模型 Performance model	
	拟合方程 Equation	R^2	RE/%	RMSE
DR_{676}	$y=52.340x+14.090$	0.791	18.640	2.706
R_{902}/R_{611}	$y=1.623x+2.421$	0.661	24.576	3.946
$(R_{902}-R_{611})/(R_{902}+R_{611})$	$y=57.16x-28.10$	0.729	21.586	3.514
R_{780}/R_{611}	$y=1.632x+2.582$	0.652	24.863	3.980
$(DR_{1013}-DR_{676})/(DR_{1013}+DR_{676})$	$y=-24.47x+39.39$	0.728	21.353	3.081
DR_{676}/DR_{446}	$y=9.277x+13.06$	0.753	23.180	3.329
$DR_{676}-DR_{446}$	$y=28.480x+19.860$	0.765	19.550	2.842
$DR_{749}-DR_{685}$	$y=2.727x+10.78$	0.716	20.103	3.441
$(DR_{749}-DR_{685})/(DR_{749}+DR_{685})$	$y=14.0x+10.9$	0.714	20.510	3.341
Gater2	$y=-77.73x+28.00$	0.673	22.810	3.734
R_{705}/R_{750}	$y=-54.45x+32.03$	0.701	22.950	3.651
$(DR_{697}-DR_{738})/(DR_{697}+DR_{738})$	$y=-17.15x+14.96$	0.690	68.500	8.669

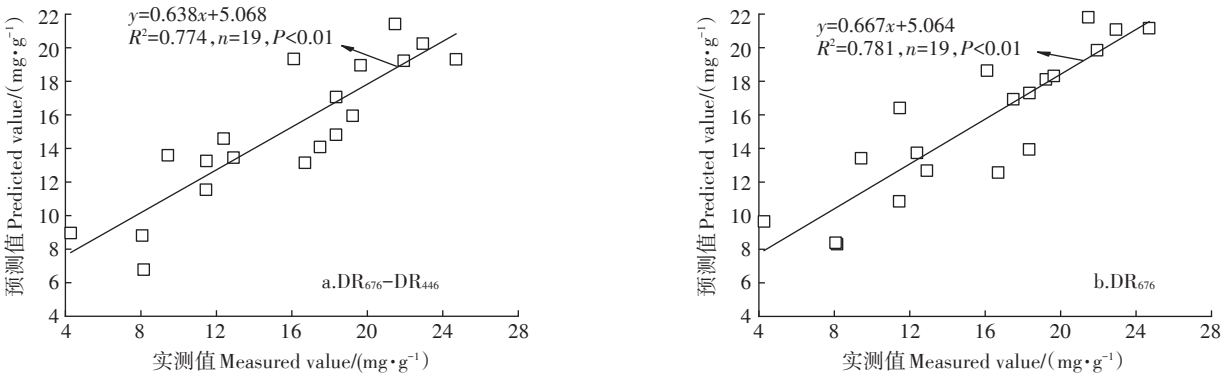


图4 滴灌甜菜叶绿素含量估测模型验证

Figure 4 Verification of chlorophyll content estimation model for drip irrigation

平下红边中,各氮素水平间有明显差异,且具有“双峰”现象,说明不同施氮处理对甜菜植株有较大影响,不同施氮处理除 N75 红边位置与 N0 相同,其他氮素水平均出现“红移”现象,施氮处理 N150、N225 较 N0 均向长波方向移动 5 nm,说明随着施氮量的增加,甜菜植株冠层单位光合效率有所提高,但在施氮处理 N150 后红边位置趋于平稳。

基于原始光谱和一阶微分光谱与叶绿素含量的相关性分析并构建光谱特征参数与植被指数,在相关性分析中,“三边”参数中红边参数具有较好估算叶绿素含量的能力,原始光谱反射率和一阶微分光谱反射率的最大正负相关性均达到极显著水平,其中一阶微分光谱反射率 DR_{676} 与叶绿素含量之间达到最大极显著相关 ($r=0.843, P<0.01$),所建植被指数与叶绿素含量的相关性除 DR_{1013}/DR_{676} 外均达到极显著水平,其中除 $R_{780}-R_{611}$ 与 $DR_{1013}-DR_{676}$ 相关系数外均超过 0.7,且总

体高于光谱特征参数。其中组合波段相对单波段相关性均有所提高,这与人研究基本一致^[29]。

通过对植被指数的筛选与分析建立叶绿素含量的一元线性估算模型,研究发现所建立估算模型差值植被指数 $DR_{676}-DR_{446}$ 以及 DR_{676} 决定系数均超过 0.75,其中植被指数 DR_{676} 所建立估算模型相对其他估算模型具有更大优势。

本研究光谱数据测定主要在甜菜叶丛快速生长期至糖分积累期,此阶段甜菜冠层基本达到土壤背景全覆盖,研究建立植被指数与叶绿素含量均具有较好相关性,通过对比前人所建植被指数发现,不同维度地区、不同作物与所建植被指数均可进行叶绿素含量的估算,但同一作物在不同维度地区之间以及不同作物间可能会存在作物冠层结构、叶片表面及内部特征、化学特性、光学特性、土壤背景值等一系列差异。Knyazikhin 等^[30]研究认为冠层结构及其光学特性是决

定光谱反射率的主要因素,冠层结构组织具有复杂性,光子在此结构中会产生碰撞、吸收、散射以及反射现象,只有小部分会被截获。虽然可以确定冠层光谱反射率的物理驱动因素是必要的,但叶片、冠层以及生态系统之间的复杂联系可能会导致生化指标与叶片反射率之间的重复相关性,模拟冠层中作物生化指标可以起到较好作用,然而这些物理机制在冠层、叶片内部及外部结构和生态系统之间的一系列生态驱动是联动运作^[31-32],这也说明作物生化指标与冠层结构之间、作物生化指标与不同生态系统之间具有联动关系,因此同一作物在不同维度地区生态系统间、不同作物之间、所建立植被指数与叶绿素含量之间的吻合度可能会存在一定的差异。同样在病虫害、干旱、涝害等不同环境下,作物生化指标对估算模型均表现出不同程度的影响^[10,33-35]。为更好地估测作物生化指标,理解作物生物学特性和物理学特性以及光谱处理方法和工作原理,需要在更多的波长范围内进行更加广泛的模拟。本研究结果主要基于石河子滴灌甜菜叶片叶绿素含量估算得到,在实际工作中利用高光谱遥感数据对甜菜叶片叶绿素含量进行估算时,所得结果还需要进一步验证。

4 结论

(1)原始光谱反射率和一阶微分光谱反射率均与叶绿素含量具有较好的相关性,原始光谱反射率和一阶微分光谱反射率最大正相关分别位于902 nm($r=0.574$, $P<0.01$)和676 nm($r=0.843$, $P<0.01$)附近,最大负相关分别位于611 nm($r=-0.664$, $P<0.01$)和1 138 nm($r=-0.727$, $P<0.01$)附近。

(2)通过光谱特征参数与植被指数筛选建立一元线性估算模型,决定系数均超过0.6,对所建12个线性模型进行精度检验,其中差值植被指数 $DR_{676}-DR_{446}$ 和 DR_{676} 决定系数均超过0.75,且植被指数 DR_{676} 所建立估算模型的决定系数达到0.791,验证相对误差RE为18.640%,验证均方根误差RMSE为2.706,相对其他估算模型有较好的估算能力。

参考文献:

- [1] 史典义, 刘忠香, 金危危. 植物叶绿素合成、分解代谢及信号调控[J]. 遗传, 2009, 31(7): 698-704.
SHI Dian-yi, LIU Zhong-xiang, JIN Wei-wei. Biosynthesis catabolism and related signal regulations of plant chlorophyll[J]. *Hereditas*, 2009, 31(7): 698-704.
- [2] Malenovsky Z, Ufer C, Lhotáková Z, et al. A new hyperspectral index for chlorophyll estimation of a forest canopy: Area under curve normalised to maximal band depth between 650-725 nm[J]. *EARSeL eProceedings*, 2006, 5(2): 161-172.
- [3] Boochs F, Kupfer G, Dockter K, et al. Shape of the red edge as vitality indicator for plants[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1990, 11(10): 1741-1753.
- [4] Broge H N, Mortensen V J. Deriving green crop area index and canopy chlorophyll density of winter wheat from spectral reflectance data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 81(1): 41-57.
- [5] Kim J, Eichacker L A, Rudiger W, et al. Chlorophyll regulates accumulation of the plastid-encoded chlorophyll proteins P700 and D1 by increasing apoprotein stability[J]. *Plant Physiology*, 1994, 104(3): 907-916.
- [6] Daughtry C S T, Walthall L C, Kim M, et al. Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2000, 74(2): 229-239.
- [7] Haboudane D, Tremblay N, Miller J, et al. Remote estimation of crop chlorophyll content using spectral indices derived from hyperspectral data[J]. *Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(2): 423-437.
- [8] 梁亮, 杨敏华, 张连蓬, 等. 基于SVR算法的小麦冠层叶绿素含量高光谱反演[J]. 农业工程学报, 2012, 28(20): 162-171.
LIANG Liang, YANG Min-hua, ZHANG Lian-peng, et al. Chlorophyll content inversion with hyperspectral technology for wheat canopy based on support vector regression algorithm[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(20): 162-171.
- [9] 姚付启, 张振华, 杨润亚, 等. 基于红边参数的植被叶绿素含量高光谱估算模型[J]. 农业工程学报, 2009, 25(增刊2): 123-129.
YAO Fu-qi, ZHANG Zhen-hua, YANG Run-ya, et al. Hyperspectral models for estimating vegetation chlorophyll content based on red edge parameter[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(Suppl 2): 123-129.
- [10] 徐道清, 刘小玲, 王维, 等. 淹水胁迫下棉花叶片高光谱特征及叶绿素含量估算模型[J]. 应用生态学报, 2017, 28(10): 3290-3296.
XU Dao-qing, LIU Xiao-ling, WANG Wei, et al. Hyper-spectral characteristics and estimation model of leaf chlorophyll content in cotton under waterlogging stress[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(10): 3290-3296.
- [11] 李媛媛, 常庆瑞, 刘秀英, 等. 基于高光谱和BP神经网络的玉米叶片SPAD值遥感估算[J]. 农业工程学报, 2016, 32(16): 135-142.
LI Yuan-yuan, CHANG Qing-rui, LIU Xiu-ying, et al. Estimation of maize leaf SPAD value based on hyperspectrum and BP neural network[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(16): 135-142.
- [12] 岳学军, 全东平, 洪添胜, 等. 柑橘叶片叶绿素含量高光谱无损检测模型[J]. 农业工程学报, 2015, 31(1): 294-302.
YUE Xue-jun, QUAN Dong-ping, HONG Tian-sheng, et al. Non-destructive hyperspectral measurement model of chlorophyll content for citrus leaves[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(1): 294-302.
- [13] 尼加提·卡斯木, 师庆东, 王敬哲, 等. 基于高光谱特征和偏最小二乘法的春小麦叶绿素含量估算[J]. 农业工程学报, 2017, 33(22): 208-216.
NIJAT K, SHI Qing-dong, WANG Jing-zhe, et al. Estimation of

- spring wheat chlorophyll content based on hyperspectral features and PLSR model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(22):208-216.
- [14] 史典义, 刘忠香, 金危危. 植物叶绿素合成、分解代谢及信号调控[J]. *遗传*, 2009, 31(7):698-704.
- SHI Dian-yi, LIU Zhong-xiang, JIN Wei-wei. Biosynthesis, catabolism and related signal regulations of plant chlorophyll[J]. *Hereditas*, 2009, 31(7):698-704.
- [15] 周冬琴, 朱艳, 杨杰, 等. 基于冠层高光谱参数的水稻叶片碳氮比监测[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(3):135-141.
- ZHOU Dong-qin, ZHU Yan, YANG Jie, et al. C/N content ratio of rice leaf monitoring based on canopy hyperspectral parameters[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(3):135-141.
- [16] 张潇元, 张立福, 张霞, 等. 不同光谱植被指数反演冬小麦叶氮含量的敏感性研究[J]. *中国农业科学*, 2017, 50(3):474-485.
- ZHANG Xiao-yuan, ZHANG Li-fu, ZHANG Xia, et al. Sensitivity of different spectral vegetation index for estimating winter wheat leaf nitrogen[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(3):474-485.
- [17] 李岚涛, 任涛, 汪善勤, 等. 基于角果期高光谱的冬油菜产量预测模型研究[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(3):221-229.
- LI Lan-tao, REN Tao, WANG Shan-qin, et al. Prediction models of winter oilseed rape yield based on hyperspectral data at pod-filling stage[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(3):221-229.
- [18] 陈兵, 王克如, 李少昆, 等. 蚜虫胁迫下棉叶光谱特征及其遥感估测[J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30(11):3093-3097.
- CHEN Bing, WANG Ke-ru, LI Shao-kun, et al. Study on spectrum characteristics of cotton leaf and its estimating with remote sensing under aphid stress[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(11):3093-3097.
- [19] 夏天, 吴文斌, 周清波, 等. 不同地域冬小麦叶片SPAD高光谱估算研究[J]. *中国农业资源与区划*, 2014, 35(4):49-57.
- XIA Tian, WU Wen-bin, ZHOU Qing-bo, et al. Hyperspectral-based estimation of winter wheat SPAD in two different regions[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2014, 35(4):49-57.
- [20] Zarco-Tejada P J, Miller J R, Mohammed G H, et al. Canopy optical indices from infinite reflectance and canopy reflectance models for forest condition monitoring: Application to hyperspectral CASI data[C]. Hamburg: IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1999:1878-1881.
- [21] 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 Sensing of Environment*, 2002, 81(2/3):337-354.
- [22] Blackburn G A. Relationships between spectral reflectance and pigment concentrations in stacks of deciduous broad leaves[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1999, 70(2):224-237.
- [23] Vogelmann J E, Rock B N, Moss D M. Red edge spectral measurements from sugar maple leaves[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1993, 14(8):1563-1575.
- [24] Gitelson A A, Merzlyak M N. Remote estimation of chlorophyll content in higher plant leaves[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1997, 18(12):2691-2697.
- [25] Carter G A. Ratios of leaf reflectances in narrow wavebands as indicators of plant stress[J]. *International Journal Remote Sensing*, 1994, 15(3):697-703.
- [26] Gamon J A, Serrano L, Surfus J S. The photochemical reflectance index: An optical indicator of photosynthetic radiation use efficiency across species, functional types, and nutrient levels[J]. *Oecologia*, 1997, 112(4):492-501.
- [27] Sims D A, Luo H Y, Hastings S, et al. Parallel adjustments in vegetation greenness and ecosystem CO₂ exchange in response to drought in a southern California chaparral ecosystem[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 103(3):289-303.
- [28] 谢小红, 魏虹, 李昌晓, 等. 水淹胁迫下枫杨幼苗叶片高光谱特征的研究[J]. *西南大学学报*, 2011, 33(4):93-98.
- XIE Xiao-hong, WEI Hong, LI Chang-xiao, et al. Hyperspectral characteristics of Chinese wingnut (*Pterocarya stenoptera* C. D. C.) leaves under flooding stress[J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2011, 33(4):93-98.
- [29] 马文勇, 王训明. 基于高光谱分析的草地叶绿素含量估算研究进展[J]. *地理科学进展*, 2016, 35(1):25-34.
- MA Wen-yong, WANG Xun-ming. Progress on grassland chlorophyll content estimation by hyperspectral analysis[J]. *Progress in Geography*, 2016, 35(1):25-34.
- [30] Knyazikhin Y, Mitchell A, Schull, et al. Hyperspectral remote sensing of foliar nitrogen content[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2013, 110(3):e185-192.
- [31] Townsen P A, Serbin S P, Kruger E L, et al. Disentangling the contribution of biological and physical properties of leaves and canopies in imaging spectroscopy data[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2013, 110(12):e1704.
- [32] Ustin S L. Remote sensing of canopy chemistry[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2013, 110(3):e804-805.
- [33] 陈兵, 韩焕勇, 王方永, 等. 利用光谱红边参数监测黄萎病棉叶叶绿素和氮素含量[J]. *作物学报*, 2013, 39(2):319-329.
- CHEN Bing, HAN Huan-yong, WANG Fang-yong, et al. Monitoring chlorophyll and nitrogen contents in cotton leaf infected by verticillium wilt with spectra red edge parameters[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2013, 39(2):319-329.
- [34] 谷艳芳, 丁圣彦, 陈海生, 等. 干旱胁迫下冬小麦高光谱特征和生理生态响应[J]. *生态学报*, 2008, 28(6):2690-2697.
- GU Yan-fang, DING Sheng-yan, CHEN Hai-sheng, et al. Ecophysiological responses and hyperspectral characteristics of winter wheat (*Triticum aestivum*) under drought stress[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(6):2690-2697.
- [35] 张雪茹, 冯美臣, 杨武德, 等. 基于光谱变换的低温胁迫下冬小麦叶绿素含量估测研究[J]. *中国生态学报*, 2017, 25(9):1351-1359.
- ZHANG Xue-ru, FENG Mei-chen, YANG Wu-de, et al. Using spectral transformation processes to estimate chlorophyll content of winter wheat under low temperature stress[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(9):1351-1359.