

# 基于双波段光谱仪 CGMD-302 的小麦叶面积指数和叶干重监测

周晓楠 黄正来\* 张文静 马尚宇

(安徽农业大学 农学院,合肥 230036)

**摘要** 为探究双波段光谱仪 CGMD-302 在监测小麦长势上的可靠性与精准性,同时使用高光谱仪 UniSpec SC 与双波段光谱仪 CGMD-302 测试各生育时期小麦冠层信息,并定量分析了植被指数 NDVI、RVI、DVI 与叶面积指数和叶片干重之间的线性关系。结果表明,基于相同波段反射率计算出的高光谱仪植被指数和双波段光谱仪植被指数均能较好监测小麦群体长势。在 CGMD-302 监测的叶面积指数模型中,拟合方程的决定系数( $R^2$ )均高于 0.89,用以检验模型的均方根误差(RMSE)和相对误差(RE)分别小于 0.792 和 0.225;叶片干重模型中,决定系数( $R^2$ )均高于 0.85,用以检验模型的均方根误差(RMSE)和相对误差(RE)分别小于 440 kg/hm<sup>2</sup> 和 0.239。通过分析发现,施氮 270 kg/hm<sup>2</sup> 既能保证产量又能兼顾品质,可作为适宜施氮量。适宜施氮量下,拔节期和孕穗期小麦适宜叶面积指数分别为:3.65±0.09 和 5.95±0.32;适宜叶干重分别为:(1 554±168)和(2 231±130) kg/hm<sup>2</sup>。结合 CGMD-302 监测模型可推算出拔节期和孕穗期适宜冠层群体的植被指数区间并应用于冠层群体诊断。

**关键词** 冬小麦;叶面积指数;叶片干重;双波段光谱仪;监测模型

中图分类号 S127

文章编号 1007-4333(2017)01-0102-10

文献标志码 A

## Monitoring leaf area index and leaf dry weight of winter wheat with dual-wavebands spectrometer CGMD-302

ZHOU Xiaonan, HUANG Zhenglai\*, ZHANG Wenjing, MA Shangyu

(School of Agronomy, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

**Abstract** In order to examine the reliability and precision of dual-wavebands spectrometer CGMD-302, this study tested wheat canopy morphology by using hyper-spectrometer UniSpec SC and dual-wavebands spectrometer CGMD-302 simultaneously and analyzed linear relationships between vegetation index NDVI, RVI, DVI, and leaf area index (LAI) and leaf dry weight (LDW) quantitatively. Date analyses showed that both vegetation indices from UniSpec SC and CGMD-302 could monitor the growth condition of winter wheat. A linear relationship model was established between vegetation indices by dual-wavebands spectrometer and growth parameter. In the model of vegetation indices and LAI, the determination coefficients ( $R^2$ ) were not less than 0.891, with root mean square error (RMSE) and relative error (RE) not more than 0.792 and 0.225 respectively. In the model of vegetation indices and LDW, the  $R^2$  was not less than 0.85, with RMSE and RE not more than 440 kg/hm<sup>2</sup> and 0.239 respectively. It was found that the nitrogen fertilizer 270 kg/hm<sup>2</sup> not only guaranteed the yield but also took the quality into account, which can be used as the appropriate amount of nitrogen fertilizer. Under appropriate nitrogen fertilizer, wheat suitable leaf area index at jointing and booting stages were respectively 3.65 ± 0.09 and 5.95 ± 0.32 respectively; And the appropriate leaf dry weight were respectively 1 554 ± 168 kg/hm<sup>2</sup> and 2 231 ± 130 kg/hm<sup>2</sup>. With the CGMD-302 monitoring model, suitable vegetation index interval of canopies could be calculated at jointing and booting stages of winter wheat.

**Keywords** winter wheat (*Triticum aestivum* L.); leaf area index (LAI); leaf dry weight (LDW); dual-wavebands spectrometer; monitoring model

收稿日期: 2016-03-07

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201303109-5); 国家“十二五”科技支撑项目(2011BAD16B06, 2012BAD04B09, 2012BAD14B13)

第一作者: 周晓楠, 硕士研究生, E-mail: 985659191@qq.com

通讯作者: 黄正来, 教授, 主要从事作物栽培生理研究, E-mail: xdneyjs@163.com

自 20 世纪 90 年代至今,应用光谱遥感技术监测农作物长势一直是作物栽培研究领域的重要方向。关于对农作物生物量、叶面积指数等长势指标的光谱反演已有大量报道。唐延林等<sup>[1]</sup>使用 ASD FieldSpec 光谱仪研究发现 NDVI、RVI 等植被指数与叶面积指数和地上部生物量之间具有较好的相关性。陈鹏飞等<sup>[2]</sup>通过高光谱仪研究提出了红边三角植被指数 RTVI,结果发现 RTVI 能在生物量较大时更准确地估测生物量。赵娟等<sup>[3-4]</sup>发现在小麦生长的不同时期采用不同的植被指数来建立冬小麦叶面积指数估算模型可以获得更高的估算精度;对于不同株型的小麦,用两个新型热点指数 MNDHD 和 HDRI 与常规植被指数结合起来进行叶面积指数的反演,可得出紧凑型、披散型的高精度反演模型,决定系数均达到 0.89 以上。冯伟等<sup>[5]</sup>在通过连续 3 年的大田试验中得出,对于不同试验条件下的小麦叶干重和叶面积指数,可以使用统一的光谱指数进行定量反演,尤其是光谱指数 RVI(810,560)、GMI 和 SARVI(MSS)可以对不同条件下小麦叶干重和叶面积指数进行精准可靠的监测。大多数研究成果均是基于高光谱仪得出的,结果精准可靠<sup>[6-10]</sup>。GreenSeeker 是由美国奥克拉荷马州立大学和 N-tech 公司研制生产的便携式主动作物冠层光谱仪,目前关于使用 GreenSeeker 进行光谱监测的研究已经取得了一些的进展<sup>[11-14]</sup>,这些成果进一步推动了光谱遥感技术走向农业生产应用的步伐。而在国内,国家信息农业工程技术中心基于多年的研究成果,筛选出 730 和 815 nm 2 个波段,并基于这 2 个波段研制出便携式光谱仪 CGMD-302<sup>[18-21]</sup>,可以更有针对性地展开对禾本科作物生长状况的监测。但是,高光谱仪等设备费用高昂,大田推广应用成本较高,且需要进行较为复杂的数据提取和分析,实用性明显不足。本研究同时采用国产型双波段光谱仪 CGMD-302 和美国 PP Systems 公司的高光谱仪 UniSpec SC 研究植被指数与作物长势指标之间的定量关系,以期小麦生长光谱监测提供更多的途径并为光谱监测技术的推广应用提供一个案例。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

试验于 2013—2015 年在安徽省淮南市凤台县桂集镇大王村进行,前茬作物是水稻,试验地土壤为砂姜黑土,土地平整,土层深厚,地力中等,土壤

pH 6.5,有机质含量 13.9 g/kg,速效氮 87 mg/kg,速效磷 13 mg/kg,速效钾 72 mg/kg。试验 1 的数据用于分析长势指标与植被指数的变化规律并建立监测模型。试验 2 的数据用于对 CGMD-302 型双波段光谱仪监测模型的检验。

试验 1:试验采用两因素裂区设计,主区为品种济麦 22(C1)、烟农 19(C2)和淮麦 29(C3),均为当地主推品种。副区设 5 个施氮水平:0(N0)、90(N1)、180(N2)、270(N3)和 360 kg/hm<sup>2</sup>(N4),氮素化肥使用尿素,按质量比 70%基施,30%拔节期追施。基本苗  $3.0 \times 10^6$  株/hm<sup>2</sup>,播种时间为 2014 年 10 月 28 日,旋耕人工开沟条播,耕前基施饼肥 750 kg/hm<sup>2</sup>,过磷酸钙 900 kg/hm<sup>2</sup>、氯化钾 112.5 kg/hm<sup>2</sup>。试验共 15 个处理,3 次重复,45 个小区。试验小区长 6.0 m,宽 3.0 m,小区面积 18.0 m<sup>2</sup>。试验田四周各留 5.0 m 宽的保护行,小区之间留 0.4 m 宽的隔离带。其他栽培措施同一般高产大田。

试验 2:与试验 1 的设计相同。小麦播种日期为 2013 年 10 月 25 日。

### 1.2 测定方法

#### 1.2.1 双波段光谱数据测定

使用由中国国家信息农业工程技术中心研究开发的 CGMD-302 型便携式双波段光谱仪测定小麦冠层的光谱数据。双波段光谱仪的两个波段中心分别为 815 和 730 nm,光谱带宽小于 10 nm。730 nm 波段处于小麦冠层反射率的红边中间位置,815 nm 处于近红外波段,对小麦群体较为敏感。于 2013—2015 年小麦生长季的拔节期、孕穗期、抽穗期、灌浆期测量小麦冠层 815 和 730 nm 反射率。选择晴朗无云或少云、无风或微风天气,北京时间 10:00—14:00 测试。测量时把握仪器高度使下行光传感器位于作物冠层上方 1.0~1.2 m 处,控制水平仪,调节支持杆角度,使得传感器与作物冠层保持垂直。测试时身穿深色衣服以减小因衣物反光而产生的测量误差并迎光测试。每个小区在长势均匀且能代表该小区整体趋势处测试 5 个点,取平均值作为该小区的光谱反射率。

#### 1.2.2 高光谱数据测定

高光谱数据测量采用美国 PP Systems 公司生产的 UniSpec SC 光谱仪(光谱波段范围为 310~1130 nm),光谱采样间隔为 3.3 nm。所有小麦冠层高光谱测量与双波段光谱测量同步,于 2014—

2015年麦季的孕穗期、抽穗期和灌浆期,北京时间10:00—14:00测试。测量时,光纤探头垂直距离植株冠层顶部高度为1.5 m。反射光谱测定时使用专用参比白板进行标准化,每个小区重复测定5次,取平均值作为该小区的光谱反射值。各处理测定前后立即进行参比白板校正(以参比白板反射率为1,所得目标物光谱为无量纲的相对反射率)。所测数据用于检测CGMD-302型双波段光谱仪可靠性。

### 1.2.3 叶面积指数及叶干重测定

与光谱测量同步,在每个小区测过光谱的地方均匀选取单茎植株40株带土取样并带回实验室,随机选出其中5个单茎植株将绿色叶片与茎秆分离,使用CID-202型叶面积仪测量绿叶离体面积,然后存放于信封中105℃下杀青30 min,75℃下烘至恒重并称量。余下35株单茎的小麦植株直接将绿色叶片与茎秆分离,在105℃下杀青30 min,75℃下烘至恒重并称量。由于相同氮肥处理的小麦植株叶片干物质重与其面积之间存在一定的比例关系,故采用比叶重法求得所有植株的叶面积,同时结合小麦茎蘖数计算出小麦的叶面积指数(Leaf area index, LAI)和叶片干重(Leaf dry weight, LDW)。小麦茎蘖数采用一米双行法测定,于各取样时期同步数取。

### 1.2.4 产量及品质测定

产量测定:收获前,选择各小区长势均匀有代表性的一米两行调查结实穗数,调查穗数后连续摘去20穗,脱粒后计算每穗平均穗粒数。使用联合收割机全小区收割后称重,测量籽粒水分含量并折算成含水量为13%的籽粒产量。各小区收获的籽粒中使用PME型自动数粒仪随机数取千粒重。

品质测定:使用Perten Instruments DA7200型近红外谷物分析仪测定小麦籽粒的含水量、蛋白质含量、湿面筋含量和沉降值等参数。

### 1.2.5 数据分析

本研究采用Excel-2007进行图形绘制,DPS 14.0分析软件进行差异显著性分析。试验1的数据用来建立植被指数与长势指标之间的线性回归模型,试验2的数据用来对CGMD监测模型进行检验。采用预测精度( $P-R^2$ )、均方根误差(RMSE)和相对误差(RE)等指标来评价模型的准确度。RMSE和RE分别按以下公式进行计算。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (1)$$

$$RE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{y_i - \hat{y}}{y_i} \right)^2} \quad (2)$$

式中: $y_i, \hat{y}, \bar{y}$ 分别代表实测值、估测值和实测值的平均值; $n$ 代表样本数。使用到的归一化植被指数NDVI、比值植被指数RVI、差值植被指数DVI计算公式如下。由于两种光谱仪在带宽上的差异,高光谱仪UniSpec SC在815 nm处的反射率选取的是812.9,816.2和819.5 nm的平均值;730 nm处的反射率选取的是726.9,730.2和733.5 nm的平均值。

$$NDVI = \frac{R_{815} - R_{730}}{R_{815} + R_{730}} \quad (3)$$

$$RVI = \frac{R_{815}}{R_{730}} \quad (4)$$

$$DVI = R_{815} - R_{730} \quad (5)$$

## 2 结果与分析

### 2.1 小麦叶面积指数、叶干重和植被指数的变化

拔节期和孕穗期是小麦栽培管理上的关键时期,通过对苗情地及时把握可以采取相应的增产调控措施。表1是小麦叶面积指数和叶干重随施氮量的变化。结果显示,随施氮量增加,叶面积指数表现为迅速增加的趋势。相对于不施氮肥的N0处理,N4处理的叶面积指数在拔节期和孕穗期分别增长1.285和1.403倍。叶片干重的变化趋势与叶面积指数基本一致。与N0处理相比,N4处理的叶干重在拔节期和孕穗期分别增长1.557和1.720倍。虽然适量施氮能促进小麦叶面积指数和叶干重的增长,但是N3和N4处理间差异不明显。

基于孕穗期两种光谱仪所测得光谱信息计算出的植被指数如图1所示,随施氮量增加,各植被指数呈逐渐增加趋势。其中,高光谱仪UniSpec SC植被指数UniSpec SC-NDVI、UniSpec SC-RVI、UniSpec SC-DVI变化如图1(a)、(b)和(c)所示。从不施氮肥的0.123、1.281和0.051逐渐增加到N4处理的0.351、2.083和0.244,分别增长了185%、63%和378%。双波段光谱仪CGMD-302植被指数CGMD-NDVI、CGMD-RVI和CGMD-DVI变化如图1(d)、(e)和(f)所示。从不施氮肥的0.143、1.335和0.067逐渐增加到N4处理的0.297、1.849和0.201,分别增长了108%、39%和200%。CGMD-302植被指数在N0和N1处理时高于UniSpec SC植被指数,而在N2、N3和N4处理时低于UniSpec SC植被指数。

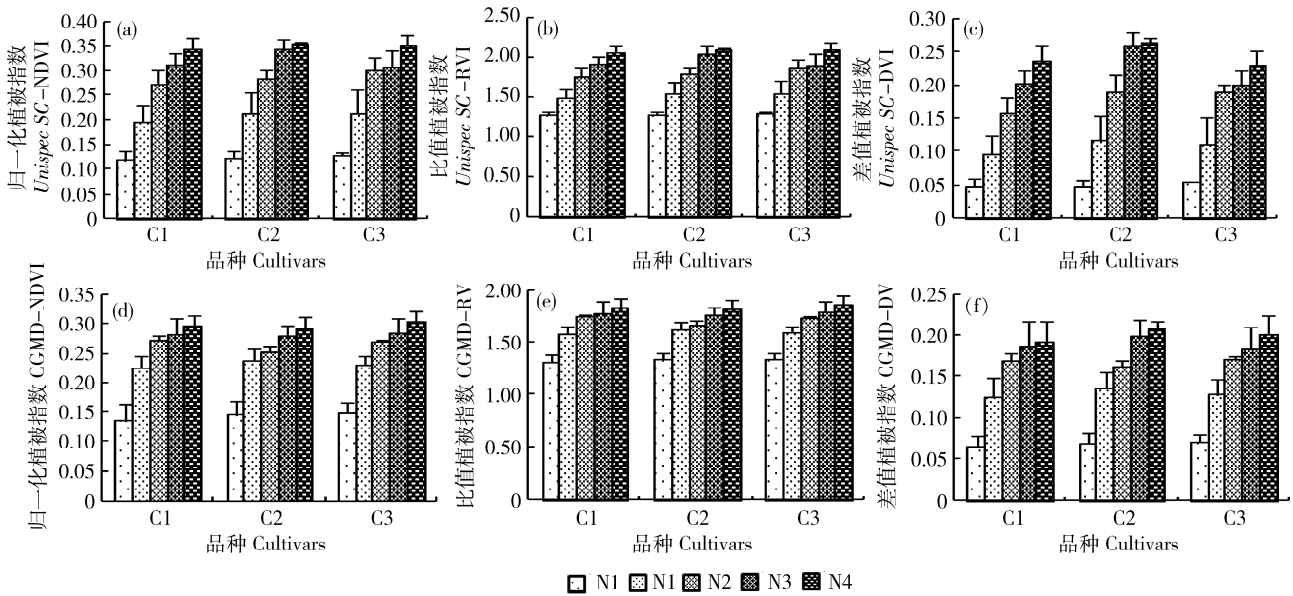
表 1 不同施氮量下小麦长势指标(2014—2015 年)

Table 1 Growth parameters of wheat under different nitrogen rates from 2014 to 2015

品种×施氮量 Cultivar×Nitrogen rate	拔节期 Jointing stage		孕穗期 Booting stage	
	叶面积指数 LAI	叶片干重/(kg/hm <sup>2</sup> ) LDW	叶面积指数 LAI	叶片干重/(kg/hm <sup>2</sup> ) LDW
C1×N0	1.53 c	542 c	2.61 d	698 c
C1×N1	2.59 b	1 014 b	3.80 c	1 468 b
C1×N2	3.36 a	1 278 a	5.08 b	1 992 a
C1×N3	3.57 a	1 378 a	5.79 a	2 171 a
C1×N4	3.67 a	1 435 a	5.97 a	2 214 a
C2×N0	1.64 d	631 c	2.55 d	891 e
C2×N1	2.43 c	1 096 b	4.38 c	1 627 d
C2×N2	3.41 b	1 412a	5.77 b	1 930 c
C2×N3	3.65 ab	1 571 a	6.32 a	2 381 b
C2×N4	4.02 a	1 560 a	6.44 a	2 411 a
C3×N0	1.67 d	679 d	2.54 d	871 c
C3×N1	2.64 c	1 134 c	4.24 c	1 632 b
C3×N2	3.21 b	1 421 b	5.31 b	1 991 a
C3×N3	3.74 a	1 713 a	5.73 ab	2 142 a
C3×N4	3.78 a	1 733 a	6.09 a	2 074 a

注：同列不同小写字母表示同一品种不同施氮量处理在 0.05 水平上显著差异(P<0.05)。下同。

Note: Different lowercase letters in same row indicate difference at P<0.05 level under different nitrogen rate. The same below.



C1, 济麦 22; C2, 烟农 19; C3, 淮麦 29; N0, N1, N2, N3, N4 分别表示施氮量为 0, 90, 180, 270 和 360 kg/hm<sup>2</sup>。

C1, Jimai22; C2, Yannong19; C3, Huaimai29; N0, N1, N2, N3 and N4 represent nitrogen rate of 0, 90, 180, 270 and 360 kg/hm<sup>2</sup>, respectively.

图 1 不同施氮水平下小麦孕穗期植被指数的变化

Fig. 1 Changes of vegetation indices in wheat at booting under different nitrogen rate

### 2.2 UniSpec SC 植被指数与长势指标的相关性

通过提取 UniSpec SC 高光谱仪在 730 和 815 nm 处的光谱反射率计算出 UniSpec SC-NDVI、UniSpec SC-RVI、UniSpec SC-DVI 等 3 种

植被指数，并与所测试小麦的叶面积指数和叶片干重进行线性拟合，结果如图 2 所示。可以看出，高光谱仪所测植被指数能很好地监测小麦长势指标，3 个植被指数与叶面积指数之间的拟合决定系数均

超过了0.83,见图2(a)、(b)和(c);3个植被指数与叶片干重之间的拟合决定系数均超过了0.84,见图2(d)、(e)和(f)。3个植被指数的拟合效果表现为NDVI>RVI>DVI,叶面积指数模型与叶干重模型表现出基本一致。

### 2.3 CGMD 光谱值与 UniSpec SC 光谱值的相关性

通过同步使用高光谱仪 UniSpec SC 和双波段光谱仪 CGMD-302,同时获取2种光谱仪相对应波段的光谱信息。并将2种光谱仪构造出的植被指数进行线性回归分析,结果如图3。2种光谱仪在波

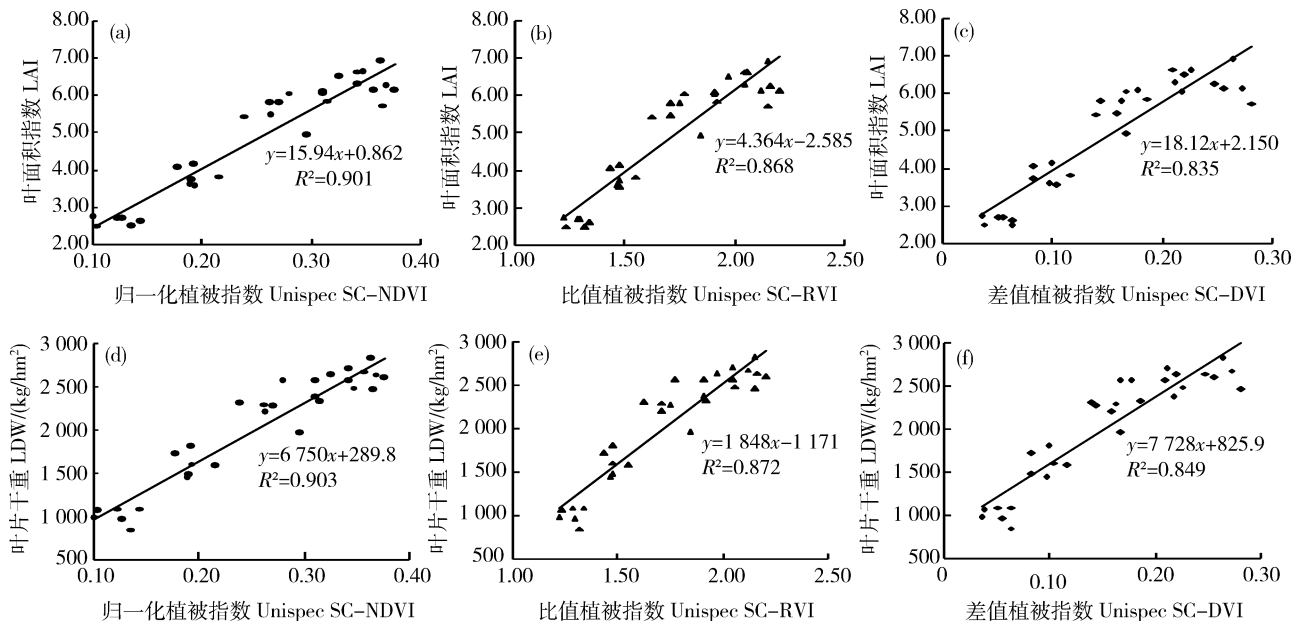


图2 UniSpec SC 植被指数与小麦叶面积指数和叶干重的关系

Fig. 2 Relationships of vegetation indices obtained by UniSpec SC to LAI and LDW in wheat

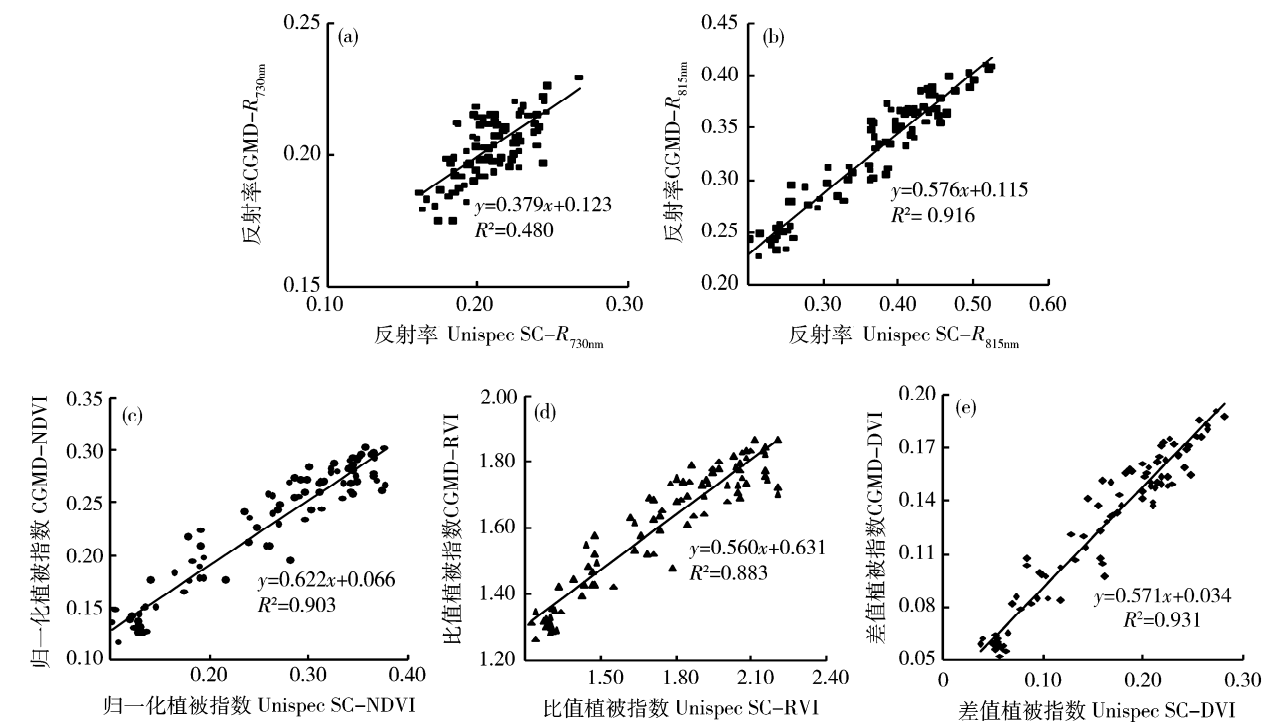


图3 CGMD-302 光谱值与 UniSpec SC 光谱值的关系

Fig. 3 Relationships of vegetation indices in wheat obtained by CGMD-302 and UniSpec SC

段 730 nm 处反射率的相关性较差,线性拟合的决定系数为 0.480,见图 3(a);在 815 nm 处的相关性较好,线性拟合的决定系数为 0.916,见图 3(b)。CGMD-302 测试结果与高光谱仪 UniSpec SC 所测结果具有较高的一致性,拟合方程决定系数均在 0.88 以上,见图 3(c)、(d)和(e)。结合拟合方程还能发现,当 UniSpec SC 植被指数  $NDVI < 0.1769$ 、 $RVI < 1.438$ 、 $DVI < 0.080$  时,CGMD-302 测得的植被指数偏大,当 UniSpec SC 植被指数  $NDVI > 0.1769$ 、 $RVI > 1.438$ 、 $DVI > 0.080$  时,CGMD-302 测得的植被指数偏小,这与 2.1 分析结果相同。从两种光谱仪较好的线性关系也能看出 CGMD-302

的可靠性。总的来说,CGMD-302 双波段光谱仪虽然在设计上比高光谱仪要简易得多,但是所测结果与高光谱仪具有较高的一致性。

### 2.4 CGMD 植被指数与长势指标的相关性

将双波段光谱仪 CGMD-302 的植被指数小麦长势指标进行线性回归分析如图 4 所示。从图 4 可以看出,3 个植被指数 NDVI、RVI、DVI 与长势指标 LAI、LDW 之间的相关性均表现较好,所有拟合方程的决定系数都超过了 0.85。归一化植被指数 NDVI 和比值植被指数 RVI 构建的模型参数较为接近,略小于差值植被指数 DVI。同时,叶面积指数的模型参数要稍微好于叶片干重的模型参数。

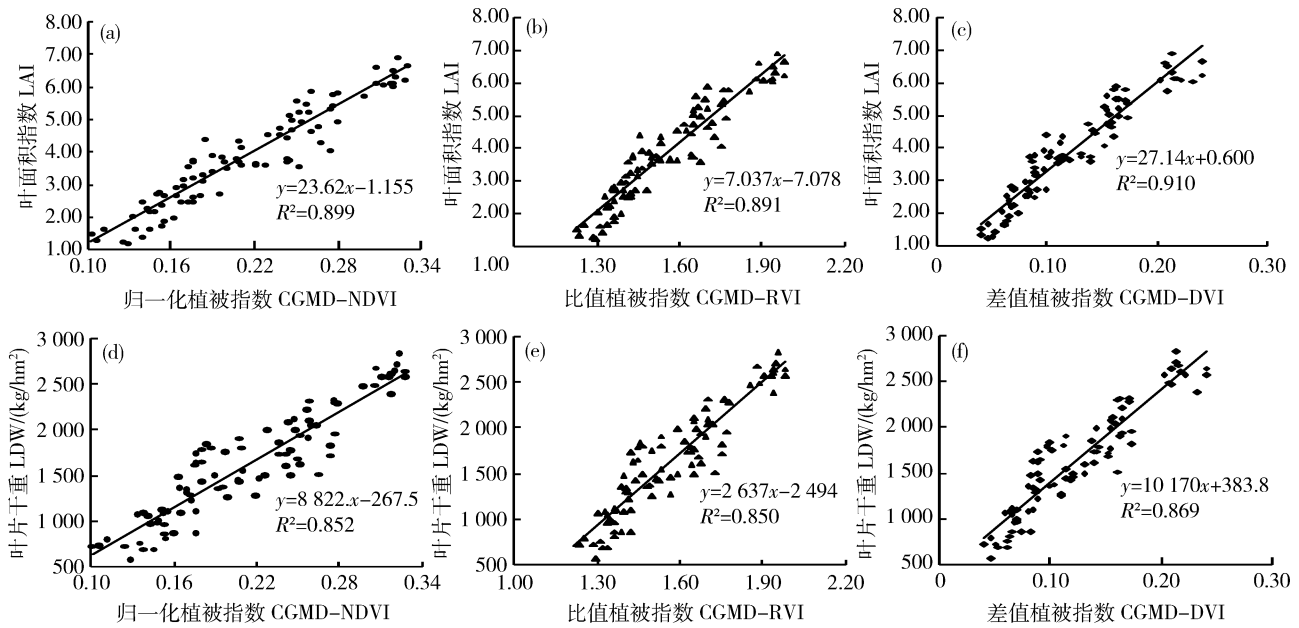


图 4 小麦叶面积指数和叶干重与植被指数的关系

Fig. 4 Relationships of leaf area index and leaf dry weight to the vegetation indices in wheat

### 2.5 CGMD 监测模型的验证

为了检验 CGMD 监测叶面积指数和叶片干重模型的可靠性,利用 2013—2014 年独立试验数据(试验 1 的数据)对上述模型进行测试,采用  $P-R^2$ 、RMSE 和 RE 等指标进行分析(表 2)。结果显示,以 NDVI、RVI、DVI 作为变量的叶面积指数和叶片干重预测模型中,决定系数  $P-R^2$  均能达到 0.75 以上,且 3 个预测模型中表现最好的均是 DVI 模型。2 种预测模型中,又以叶面积指数模型的参数优于叶片干重。从预测模型的回归方程可以看出拟合曲线的斜率比较接近于 1,均能够较好反映出预测模型的可用性。但是,2 个模型的均方根误差 RMSE

和相对误差 RE 数值相对偏大,这可能与用于检验模型的数据量较少有关。这里以 DVI 为典型,画出叶面积指数模型(a)和叶片干重模型(b)的估测值与实测值 1:1 关系图(图 5),直观展现了模型的预测能力。

### 2.6 施氮量对小麦产量和品质指标的影响

如表 3 所示,2013—2014 年麦季产量表明,施氮能显著提高稻茬小麦籽粒产量。在不施氮肥的情况下,小麦产量在 2 500~3 300 kg/hm<sup>2</sup>,不同品种之间略有差异。随着施氮量增加,小麦的产量迅速提高,并表现出先增加后下降的趋势,在 N3 处理时达到最大,分别为:7 031.0、7 023.5 和 6 967.0 kg/hm<sup>2</sup>。

表2 模型预测能力的检验 ( $n=30$ )

Table 2 Performance of the model in predicting leaf area index and leaf dry weight

农学指标 Agronomy parameter	植被指数 Vegetation index	回归方程 Regression equation	模拟 $R^2$ S- $R^2$	预测 $R^2$ P- $R^2$	均方根误差 RMSE	相对误差 RE
叶面积指数 LAI	CGMD-NDVI	$y=0.948x+0.419$	0.899	0.792	0.792	0.225
	CGMD-RVI	$y=1.020x+0.095$	0.891	0.813	0.747	0.188
	CGMD-DVI	$y=1.019x+0.001$	0.910	0.815	0.726	0.173
叶片干重/ ( $\text{kg}/\text{hm}^2$ ) LDW	CGMD-NDVI	$y=1.040x+0.019$	0.852	0.750	440	0.239
	CGMD-RVI	$y=1.115x+0.005$	0.850	0.770	430	0.219
	CGMD-DVI	$y=1.126x+0.001$	0.869	0.788	400	0.195

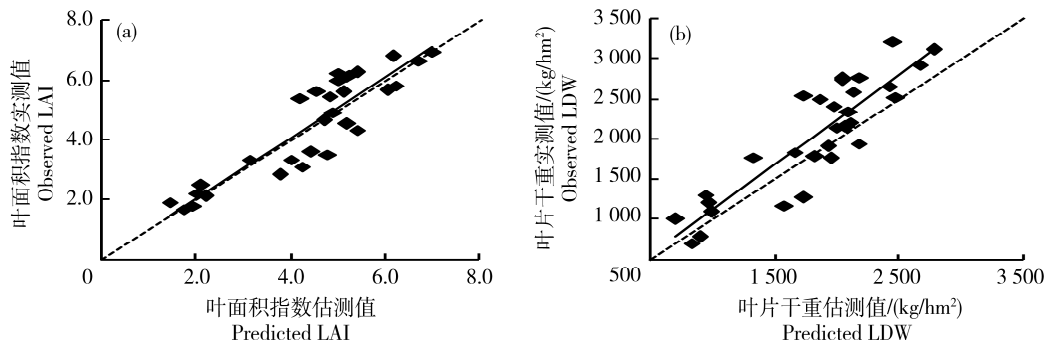


图5 小麦叶面积指数和叶片干重估测值与实测值之间的比较

Fig. 5 Comparison of predicted and observed leaf area index and leaf dry weight in wheat

表3 不同施氮量下小麦籽粒产量及其构成因素比较

Table 3 Grain yield and yield components of wheat under different N rates

品种× 施氮量 Cultivar× Nitrogen rate	2013—2014年				2014—2015年			
	穗数/ ( $\times 10^4/\text{hm}^2$ ) Ear number	穗粒数 Grains per spike	千粒重/g 1 000-grain weight	籽粒产量/ ( $\text{kg}/\text{hm}^2$ ) Grain yield	穗数/ ( $\times 10^4/\text{hm}^2$ ) Ear number	穗粒数 Grains per spike	千粒重/g 1 000-grain weight	籽粒产量/ ( $\text{kg}/\text{hm}^2$ ) Grain yield
C1×N0	295.00 d	17.89 c	49.04 a	2 784.5 c	291.01 c	20.13 c	45.55 c	2 583.5 d
C1×N1	415.65 c	28.22 b	48.13 ab	4 941.0 b	418.35 b	26.73 b	47.51 a	4 552.5 c
C1×N2	480.70 b	33.58 a	47.24 bc	6 444.0 a	474.02 ab	34.40 a	46.55 b	5 584.0 b
C1×N3	538.40 ab	35.87 a	46.72 c	7 031.0 a	503.36 ab	36.00 a	45.99 c	6 309.0 a
C1×N4	554.00 a	36.37 a	44.33 d	6 599.0 a	508.02 a	36.83 a	45.84 c	6 064.0 ab
C2×N0	275.70 d	18.87 b	46.04 ab	2 533.0 c	268.68 d	18.80 d	43.79 b	3 314.5 d
C2×N1	456.70 c	31.43 a	46.69 a	4 933.0 b	394.35 c	26.03 c	46.00 a	4 712.0 c
C2×N2	518.45 b	35.90 a	45.88 abc	6 513.5 a	482.69 ab	30.60 b	44.40 b	6 026.5 b
C2×N3	544.40 ab	35.12 a	45.68 bc	7 023.5 a	446.36 bc	33.43 a	41.58 c	6 724.5 a
C2×N4	571.40 a	36.43 a	44.99 c	6 827.0 a	517.69 a	34.30 a	40.02 d	6 402.5 ab
C3×N0	281.00 b	22.53 b	44.73 bc	2 700.5 c	285.01 c	18.97 c	46.38 c	3 038.0 c
C3×N1	370.70 b	33.52 a	46.45 a	4 621.5 b	357.02 b	25.10 b	48.58 a	4 375.0 b
C3×N2	487.35 a	35.31 a	44.97 b	6 252.5 a	432.69 a	32.07 a	47.82 b	5 998.0 a
C3×N3	489.30 a	38.35 a	44.58 c	6 967.0 a	454.69 a	34.60 a	44.47 d	6 319.0 a
C3×N4	523.00 a	38.59 a	43.84 d	6 569.5 a	458.36 a	34.63 a	44.98 d	6 183.0 a

N2、N3 和 N4 处理间差异较小或没有明显差异。2014—2015 年数据与上一年度变化趋势一致。最大产量分别为: 6 309.0、6 724.5 和 6 319.0 kg/hm<sup>2</sup>, 比上一年度稍低。说明产量在 6 000~7 000 kg/hm<sup>2</sup> 的适宜施氮量区间为 180~270 kg/hm<sup>2</sup>。

如表 4 所示, 随着氮肥投入的递增, 蛋白质含量、湿面筋含量和 Z-沉降值均表现为逐渐升高的趋

势, 在 N0 处理时最低, 在 N4 处理时最高。2013—2014 年数据表明, 各氮肥处理之间的籽粒品质均达到显著性差异。N0 与 N1 处理间差异不显著, 均显著小于 N2、N3 和 N4 处理, 同时各施氮处理间差异显著。2014—2015 年数据表明, N0 和 N1 处理间品质指标差异较小, 均显著小于 N2、N3 和 N4 处理, 同时 N3 和 N4 处理之间的差异减小。

表 4 不同施氮量下小麦籽粒品质指标比较

Table 4 Grain quality traits of wheat under different N rate

品种× 施氮量 Cultivar× Nitrogen rate	2013—2014 年			2014—2015 年		
	蛋白质含量/% Protein content	湿面筋含量/% Wet-gluten content	Z-沉降值/mL Sedimentation	蛋白质含量/% Protein content	湿面筋含量/% Wet-gluten content	Z-沉降值/mL Sedimentation
C1×N0	10.10 c	20.26 d	10.98 d	10.31 c	21.41 bc	16.83 b
C1×N1	10.88 c	20.77 d	10.81 d	10.56 bc	22.13 b	16.95 b
C1×N2	11.84 b	23.25 c	13.16 c	11.48 b	23.14 b	18.76 b
C1×N3	11.97 b	25.66 b	16.69 b	12.81 a	27.50 a	25.72 a
C1×N4	13.08 a	27.42 a	21.11 a	13.42 a	27.76 a	26.96 a
C2×N0	10.88 d	19.86 d	12.69 c	10.24 d	21.38 c	17.91 c
C2×N1	10.02 d	19.95 d	12.16 cd	10.68 cd	22.28 bc	19.38 bc
C2×N2	11.12 c	22.70 c	13.55 c	11.65 bc	23.42 b	20.26 b
C2×N3	12.68 b	26.63 b	17.67 b	12.05 ab	26.21 a	26.14 a
C2×N4	13.68 a	28.58 a	23.98 a	12.79 a	26.67 a	28.65 a
C3×N0	10.18 d	20.58 d	10.31 c	10.50 d	22.04 c	17.22 d
C3×N1	10.51 d	20.74 d	10.88 c	10.91 cd	23.05 b	19.05 cd
C3×N2	11.59 c	24.66 c	16.96 b	11.61 bc	23.62 b	22.61 bc
C3×N3	13.08 b	28.22 b	23.26 a	12.45 ab	26.61 a	24.77 ab
C3×N4	13.74 a	29.28 a	24.62 a	13.40 a	28.42 a	27.42 a

在施氮量 180~270 kg/hm<sup>2</sup> 时, 籽粒品质指标增加的幅度不大, 均未达到中强筋小麦品质要求, 两年试验结果基本一致。3 个品种之间表现基本一致。本试验结果发现, 如果仅考虑中强筋小麦籽粒蛋白质含量改善, 合理的氮肥投入应该在 270~360 kg/hm<sup>2</sup>。综合考虑, 获得较高产量同时品质也能得到较好改善的施氮量是 270 kg/hm<sup>2</sup>。

### 2.7 适宜施氮量下小麦的长势指标和植被指数

通过分析, 本试验条件下, 小麦适宜施氮量在 270 kg/hm<sup>2</sup>, 由表 1 中数据计算得出叶面积指数适宜区间为: 拔节期 3.65±0.09, 孕穗期 5.95±0.32。

叶片干重适宜区间为: 拔节期(1 554±168) kg/hm<sup>2</sup>, 孕穗期(2 231±130) kg/hm<sup>2</sup>。结合图 5 所示的拟合方程可以反推出植被指数的区间, 结果如表 5 所示。通过限定适宜群体的植被指数区间, 可以用来诊断拔节期和孕穗期小麦群体。

### 3 讨论

不同大小的群体在可见光波段和近红外波段冠层反射率的规律性变化与作物长势长相有密切的关系。高光谱仪由于光谱波段多、波段带宽小, 可以非常精细地研究作物生长指标与光谱反射率之间的关



表5 适宜植被指数变化区间

Table 5 The size of appropriate vegetation indices

指标 Index	生育期 Stage	归一化植被指数 NDVI	比值植被指数 RVI	差值植被指数 DVI
叶面积指数 LAI	拔节期 Jointing	0.199 6~0.207 2	1.511 7~1.537 2	0.109 0~0.115 6
	孕穗期 Booting	0.287 2~0.314 3	1.805 8~1.896 8	0.185 3~0.208 8
叶片干重 LDW	拔节期 Jointing	0.186 8~0.225 3	1.469 1~1.598 0	0.097 9~0.131 3
	孕穗期 Booting	0.268 4~0.297 9	1.742 1~1.840 7	0.168 7~0.194 3

系。目前关于高光谱仪监测作物生长的学术研究非常多,由简单到复杂的研究成果将冠层遥感研究带向深入<sup>[1-4]</sup>。但是高光谱仪价格昂贵,应用于生产实践的可行性不强。本研究在对比使用高光谱仪与国内自主研发的双波段光谱仪时发现,基于高光谱仪的植被指数可以有效地监测小麦生长指标,这与前人的研究结果一致<sup>[15-17]</sup>。从监测模型的参数来看,双波段光谱仪测得的3种常见植被指数NDVI、RVI、DVI与长势指标之间的相关性均达到了较高水平,这表明CGMD-302双波段光谱仪同样能够准确地监测小麦的长势状况,所建立的监测模型具有一定的区域应用价值和推广价值。当然,本研究中小麦叶面积指数和叶片干重监测模型的构建和测试均是在沿淮生态点进行的,可为当地的小麦栽培提供服务并形成本地化的技术规范。但小麦冠层反射率因生态点、品种以及栽培密度的不同而产生差异,能否使用统一的模型对不同条件下的小麦冠层信息进行有效监测仍需要进一步探索。因此,今后需要通过更多生态点、更多品种和更多栽培密度试验的监测进行修正,实现监测模型精确性和普适性的有机结合,从而推动光谱技术在生产实践中更有效应用。

## 参考文献 References

[1] 唐延林,王人潮,王秀珍. 对水稻微分光谱和植被指数的探讨[J]. 上海交通大学学报:农业科学版,2003,21(3):199-204  
Tang Y L, Wang R C, Wang X Z. Approach the derivative spectral and vegetation indices of rice[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University :Agricultural Science*, 2003, 21(3): 199-204 (in Chinese)

[2] 陈鹏飞, Tremblay N, 王纪华, Vigneault P, 黄文江, 李保国. 估测作物冠层生物量的新植被指数的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(2): 512-517  
Chen P F, Tremblay N, Wang J H, Vigneault P, Huang W J, Li B G. New index for crop canopy fresh biomass estimation[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(2): 512-517 (in Chinese)

[3] 赵娟, 黄文江, 张耀鸿, 景元书. 冬小麦不同生育时期叶面积指数反演方法[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(9): 2546-2552  
Zhao J, Huang W J, Zhang Y H, Jing Y S. Inversion of leaf area index during different growth stages in winter wheat [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, 33(9): 2546-2552 (in Chinese)

[4] 赵娟, 张耀鸿, 黄文江, 景元书, 彭代亮, 王力, 宋晓宇. 基于热点效应的不同株型小麦 LAI 反演[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(1): 207-211  
Zhao J, Zhang Y H, Huang W J, Jing Y S, Peng D L, Wang L, Song X Y. Inversion of LAI by considering the hotspot effect for different geometrical wheat. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(1): 207-211 (in Chinese)

[5] 冯伟, 朱艳, 姚霞, 田永超, 曹卫星. 基于高光谱遥感的小麦叶干重和叶面积指数监测[J]. 植物生态学报, 2009, 33(1): 34-44  
Feng W, Zhu Y, Yao X, Tian Y C, Cao W X. Monitoring leaf dry weight and leaf area index in wheat with hyperspectral remote sensing[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2009, 33(1): 34-44 (in Chinese)

[6] Delegido J, Verrelst J, Rivera J P, Antonio R V, Moreno J. Brown and green LAI mapping through spectral indices[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2015, 35(2): 350-358

[7] Nguy-Robertson A L, Peng Y, Gitelson A A, Arkebauer T J, Pimstein A, Herrmann I, Karnieli A, Rundquist D C, Bonfiet D J. Estimating green LAI in four crops: Potential of determining optimal spectral bands for a universal algorithm [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2014, 192-193

- (15):140-148
- [8] Tanaka S, Kawamura K, Maki M, Muramoto Y, Yoshida K, Akiyama T. Spectral Index for Quantifying leaf area index of winter wheat by field hyperspectral measurements: A case study in Gifu Prefecture, central Japan[J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(5):5329-5346
- [9] Haboudane D, Miller J R, Pattey E, Zarco-Tejada P J, Strachane I B. Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 90(3):337-352
- [10] Zhu Y, Zhou D Q, Yao X, Tian Y C, Cao W X. Quantitative relationships of leaf nitrogen status to canopy spectral reflectance in rice[J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 2007, 58(11):1077-1085
- [11] 胡昊, 自由路, 杨俐苹, 卢艳丽, 王磊, 王贺, 王志勇. 基于 SPAD-502 与 GreenSeeker 的冬小麦氮营养诊断研究[J]. *中国生态农业学报*, 2010, 18(4):748-752  
Hu H, Bai Y L, Yang L P, Lu Y L, Wang L, Wang H, Wang Z Y. Diagnosis of nitrogen nutrition in winter wheat (*Triticum aestivum*) via SPAD-502 and GreenSeeker[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, July 2010, 18(4):748-752 (in Chinese)
- [12] 陈青春, 吴继贤, 秦彦博, 曾汉超, 耿曼一, 郭诗琪, 刘冠明. 基于 GreenSeeker 的水稻氮素估测[J]. *中国农业大学学报*, 2014, 19(6):49-55  
Chen Q C, Wu J X, Qin Y B, Zeng H C, Geng M Y, Guo S Q, Liu G M. Nitrogen nutrition estimation of rice base on GreenSeeker[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2014, 19(6):49-55 (in Chinese)
- [13] 张宁, 齐波, 赵晋铭, 张小燕, 王素阁, 赵团结, 盖钧镒. 应用主动传感器 GreenSeeker 估测大豆籽粒产量[J]. *作物学报*, 2014, 40(4):657-666  
Zhang N, Qi B, Zhao J M, Zhang X Y, Wang S G, Zhao T J, Gai J Y. Prediction for soybean grain yield using active sensor GreenSeeker[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2014, 40(4):657-666 (in Chinese)
- [14] 温鹏飞, 朱鹏, 张强, 张泽, 田敏, 吕新. 不同水氮耦合条件下棉花冠层 NDVI 分析与产量估算[J]. *中国农业大学学报*, 2016, 21(1):33-38  
Wen P F, Zhu P, Zhang Q, Zhang Z, Tian M, Lv X. Canopy NDVI analysis and yield estimation of cotton under different nitrogen and irrigation combinations [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2016, 21(1):33-38 (in Chinese)
- [15] 田永超, 杨杰, 姚霞, 朱艳, 曹卫星. 高光谱植被指数与水稻叶面积指数的定量关系[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(7):1685-1690  
Tian Y C, Yang J, Yao X, Zhu Y, Cao W X. Quantitative relationships between hyper-spectral vegetation indices and leaf area index of rice[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(7):1685-1690 (in Chinese)
- [16] 夏天, 吴文斌, 周清波, 周勇, 于雷. 基于高光谱的冬小麦叶面积指数估算方法[J]. *中国农业科学*, 2012, 45(10):2085-2092  
Xia T, Wu W B, Zhou Q B, Zhou Y, Yu L. An estimation method of winter wheat leaf area index based on hyperspectral data[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(10):2085-2092 (in Chinese)
- [17] 李映雪, 朱艳, 戴廷波, 田永超, 曹卫星. 小麦叶面积指数与冠层反射光谱的定量关系[J]. *应用生态学报*, 2006, 17(8):1443-1447  
Li Y X, Zhu Y, Dai T B, Tian Y C, Cao W X. Quantitative relationships between leaf area index and canopy reflectance spectra of wheat[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(8):1443-1447 (in Chinese)
- [18] 倪军, 王婷婷, 姚霞, 曹卫星, 朱艳. 作物生长信息获取多光谱传感器设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(5):207-212  
Ni J, Wang T T, Yao X, Cao W X, Zhu Y. Design and experiments of multi-spectral sensor for rice and wheat growth information [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(5):207-212 (in Chinese)
- [19] 倪军, 姚霞, 田永超, 曹卫星, 朱艳. 便携式作物生长监测诊断仪的设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2013(6):150-156  
Ni J, Yao X, Tian Y C, Cao W X, Zhu Y. Design and experiments of portable apparatus for plant growth monitoring and diagnosis [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(6):150-156 (in Chinese)
- [20] 杨建宁, 张井超, 朱艳, 姚霞, 曹卫星, 倪军. 便携式作物生长监测诊断仪性能试验[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(4):208-212  
Yang J N, Zhang J C, Zhu Y, Yao X, Cao W X, Ni J. Experiments on performance of portable plant growth monitoring diagnostic instrument [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(4):208-212 (in Chinese)
- [21] 刘乃森, 倪军, 董继飞, 曹卫星, 姚霞, 田永超, 朱艳. 多光谱作物生长传感器温度特性试验[J]. *农业工程学报*, 2014(21):157-164  
Liu N S, Ni J, Dong J F, Cao W X, Yao X, Tian Y C, Zhu Y. Test on temperature characteristics of multi-spectral sensor for crop growth [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(21):157-164 (in Chinese)

责任编辑: 吕晓梅