

小麦氮素无损监测仪敏感波长的最佳波段宽度研究^{*}

姚霞 刘小军 王薇 倪军 曹卫星 朱艳

(南京农业大学江苏省信息农业高新技术研究重点实验室,南京 210095)

【摘要】 为研究不同核心波长时波段宽度对小麦冠层叶片氮素营养监测精度的影响,以作物氮素营养无损监测仪的最佳光谱指数 $\text{NDSI}(R_{860}, R_{720})$ 和 $\text{RSI}(R_{990}, R_{720})$ 为例,分析核心波长的反射率、光谱指数及基于光谱指数的冠层叶片氮积累量监测模型随波段宽度的变化规律。结果显示,随波段宽度的增加,核心波长为 720 nm 时反射率快速上升,核心波长为 860 nm 时反射率非常缓慢下降,核心波长为 990 nm 时反射率缓慢上升;光谱指数 $\text{NDSI}(R_{860}, R_{720})$ 和 $\text{RSI}(R_{990}, R_{720})$ 逐渐减小;监测模型的建模精度和预测精度均逐渐减小,误差逐渐增大。860 nm 和 720 nm 两个核心波长的适宜宽度分别小于 96 nm 和 28 nm 时,基于 $\text{NDSI}(R_{860}, R_{720})$ 的监测模型的表现保持稳定;990 nm 和 720 nm 两个核心波长的适宜宽度分别小于 3 nm 和 13 nm 时,基于 $\text{RSI}(R_{990}, R_{720})$ 的监测模型的表现持续保持稳定。

关键词: 小麦 氮积累量 无损监测 敏感波长 波段宽度
中图分类号: S237 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)02-0162-06

Optimal Bandwidths of Sensitive Bands for Portable Nitrogen Monitoring Instrument in Wheat

Yao Xia Liu Xiaojun Wang Wei Ni Jun Cao Weixing Zhu Yan

(Jiangsu Key Laboratory for Information Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract

The responses of canopy spectral reflectance, optimum spectral indices and monitoring models for leaf nitrogen accumulation (LNA) in wheat to the changes in bandwidths were analyzed on the basis of the sensitive bands of 720 nm, 860 nm and 990 nm. The results showed that with increasing bandwidth, the reflectance increased sharply at 720 nm and slowly at 990 nm, but decreased at 860 nm. The values of $\text{NDSI}(R_{860}, R_{720})$ and $\text{RSI}(R_{990}, R_{720})$ decreased gradually, along with reduced accuracy of calibration and validation for monitoring models. The monitoring models based on $\text{NDSI}(R_{860}, R_{720})$ displayed stable performance with the bandwidths of the key bands less than 96 nm and 28 nm, respectively, while those of $\text{RSI}(R_{990}, R_{720})$ less than 3 nm and 13 nm, respectively. These results helped to provide theoretical basis and technical approach for manufacturing economical portable nitrogen monitoring instrument.

Key words Winter wheat, Leaf nitrogen accumulation, Non-destructive monitoring, Sensitive bands, Bandwidth

引言

快速、无损监测作物叶片氮素营养对作物生长

状态的精确诊断、实时调控具有重要意义。在作物氮素营养的遥感监测中,选择适宜的敏感波段和光谱参数定量反演氮素浓度(密度)是其关键技术之

收稿日期: 2010-05-04 修回日期: 2010-09-08
^{*} 国家自然科学基金资助项目(30871448)、国家高新技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2010AA10A301)、江苏省创新学者攀登计划资助项目(BK2008037)、江苏省自然科学基金资助项目(BK2008330、BK2010453)和校青年创新基金资助项目(KJ08004)
作者简介: 姚霞,副教授,主要从事作物生长监测研究,E-mail: yaox@njau.edu.cn
通讯作者: 朱艳,教授,博士生导师,主要从事农业信息技术研究,E-mail: yanzhu@njau.edu.cn

一。前人对此作了广泛而深入的研究^[1-7]。但已有研究大多基于如 CROPSCAN、ASD、Hyperion、OMIS、TM 和 CASI 等不同的传感器,其光谱波段不尽相同,从几纳米到上百纳米不等,且这些研究结果均没有对波段宽度作进一步的分析。关于波段宽度的研究,国内王福民等^[8]指出,估算水稻 LAI 的 NDVI 最佳波段宽度为 15 nm。焦红波等^[9]研究发现,监测水体叶绿素 a 含量的核心波段带宽范围为 31.6 nm 时,最大正相关和最大负相关都保持相对稳定,但对于小麦叶片氮素营养的最佳波段宽度却鲜有报道。

本文以自行研制的作物氮素营养无损监测仪的最佳氮积累量光谱指数 $NDSI(R_{860}, R_{720})$ ^[10] 和 $RSI(R_{990}, R_{720})$ ^[11] 为例,通过逐步扩展核心波长(860、720 和 990 nm)的波段宽度,分析核心波长、敏感光谱指数及监测模型随波段宽度的响应规律,比较不同波段宽度条件下,光谱监测模型的表现效果,以确定最佳波段宽度,从而建立解释性和精确性兼备的小麦氮素营养指标监测模型。

1 材料与方法

1.1 试验设计

为了获得试验所需的光谱和氮素数据,共进行了 3 个小麦田间试验,涉及到不同年份、不同品种类型和不同施氮水平^[10]。

1.2 高光谱信息获取

小麦冠层高光谱测量采用美国 Analytical Spectral Device (ASD) 公司生产的 FieldSpec Pro FR2500 型背挂式野外高光谱辐射仪 (Analytical Spectral Devices)。仪器的参数和光谱采样方法参照文献^[10]。

1.3 氮积累量测定

将所获取的植株上部 4 张绿色叶片样品分别干燥和粉碎后,用半微量凯氏定氮法测定叶片氮含量,以占单位叶片干质量的百分数表示。叶片氮积累量计算公式为

$$L_{NA} = L_{NC} L_{DW}$$

式中 L_{NA} ——叶片氮积累量, g/m^2

L_{NC} ——叶片氮含量, %

L_{DW} ——叶片干物质量, g/m^2

通过不同叶位叶片质量加权求得所有绿色叶片中的氮素含量,进而计算出单位土地面积叶片氮积累量。

1.4 不同带宽的光谱反射率的计算

3 个核心波长 720、860 和 990 nm 的波段宽度扩展方法均为以 3 nm 为宽度,以 1 nm 为步长,逐步扩展,至 100 nm 的宽度。3 个核心波长 720、860 和 990 nm 在不同带宽下的光谱反射率采用基于高斯

方程模拟的光谱响应函数计算^[12],具体公式为

$$f(\lambda, \sigma) = \exp \left(- \left(-\lambda - \lambda_c \right)^2 / (2\sigma^2) \right) \quad (1)$$

其中

$$\sigma = \frac{F}{2\sqrt{2\ln 2}} \quad (2)$$

式中 $f(\lambda, \sigma)$ ——光谱响应函数 λ ——波长
 λ_c ——中心波长高斯函数
 F ——半高宽 (full width half maximum, 简称 FWHM), 又称带宽

$$R_i = \sum_{\lambda_s}^{\lambda_e} r(\lambda) f(\lambda, \sigma) / \sum_{\lambda_s}^{\lambda_e} f(\lambda, \sigma) \quad (3)$$

式中 R_i ——光谱响应函数计算得波段 i 在带宽 F 下的光谱反射率

$r(\lambda)$ ——波长 λ 下的反射率

λ_s, λ_e ——所需计算的带宽范围起始波长和终止波长

图 1 为光谱响应函数示意图。

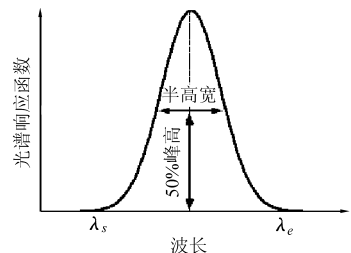


图 1 光谱响应函数示意图

Fig.1 Schematic diagram of spectral response function

1.5 关于最佳波段宽度的确定方法

最佳波段宽度是由不同宽度核心波长构成的植被指数所构建的氮素营养模型的表现来确定的,衡量检验的统计指标为 $R^2_{calibration}$ (建立模型)、 $R^2_{validation}$ 和 R_{RMSE} (检验模型)。当 $R^2_{calibration} + R^2_{validation}$ 较大, R_{RMSE} 较小时模型对应的波段宽度为最佳宽度。

2 结果与分析

2.1 光谱反射率随波段宽度的变化模式

以 2004~2005 年宁麦 9 号拔节期和孕穗期的冠层光谱反射率为例,阐述 720、860 和 990 nm 3 个核心波段的光谱反射率随波段宽度的变化规律(如图 2~4 所示,图中 N0~N3 分别表示由低到高不同施氮水平,线条由细到粗分别表示 N0、N1、N2 和 N3)。由图 2 可以看出,在拔节期和孕穗期,核心波长为 720 nm 时波段的光谱反射率均随着波段宽度的增加而升高;随着施氮水平的升高,光谱反射率先降低后升高的趋势。孕穗期的光谱反射率相对于拔节期而言,在低宽度下降低,在高宽度下升高。由图 3 可以看出,核心波长为 860 nm 时波段的光谱反射率随着宽度的增加而缓慢降低,但差异不显著;随着施氮水平的升高,光谱反射率升高;孕穗期的光谱

反射率高于拔节期。由图 4 可以看出,核心波长段为 990 nm 波段时光谱反射率随着宽度的增加而缓慢上升,但差异不显著;随着施氮水平的升高,光谱反射率也呈现升高趋势;孕穗期的光谱反射率相对于拔节期而言,低氮条件下降低,高氮条件下升高。

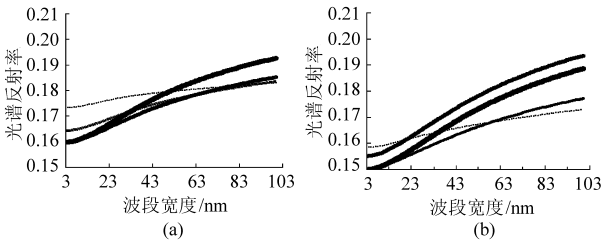


图 2 不同施氮水平下 720 nm 的光谱反射率随波段宽度的变化规律
Fig. 2 Changes of canopy spectral reflectance at 720 nm with different bandwidths under varied nitrogen rates
(a) 拔节期 (b) 孕穗期

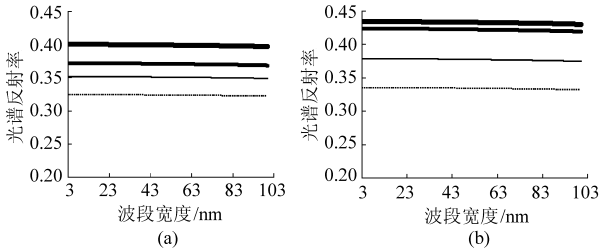


图 3 不同施氮水平下 860 nm 的光谱反射率随波段宽度的变化规律
Fig. 3 Changes of canopy spectral reflectance at 860 nm with different bandwidths under varied nitrogen rates
(a) 拔节期 (b) 孕穗期

2.2 最佳光谱指数 $NDSI(R_{860}, R_{720})$ 和 $RSI(R_{990}, R_{720})$ 随波段宽度的变化规律

文献 [10 ~ 11] 表明, $NDSI(R_{860}, R_{720})$ 和 $RSI(R_{990}, R_{720})$ 为小麦冠层叶片氮积累量的最佳光谱指数,因此本文以 $NDSI(R_{860}, R_{720})$ 和 $RSI(R_{990}, R_{720})$ 为例研究植被指数随波段宽度的变化规律。

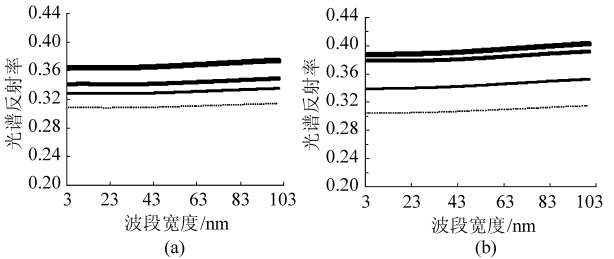
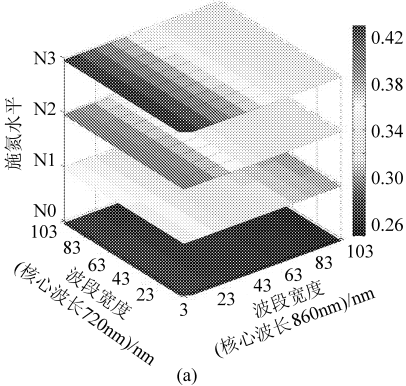


图 4 不同施氮水平下 990 nm 的光谱反射率随波段宽度的变化规律
Fig. 4 Changes of canopy spectral reflectance at 990 nm with different bandwidths under varied nitrogen rates
(a) 拔节期 (b) 孕穗期

2.2.1 $NDSI(R_{860}, R_{720})$

由图 5 可看出,随施氮水平的升高, $NDSI(R_{860}, R_{720})$ 数值上升,上升幅度随波段宽度的扩展而降低,且 720 nm 方向上升较快;随波段宽度的扩展, $NDSI(R_{860}, R_{720})$ 在 860 nm 方向迅速下降,高氮水平下 (N3) 降低的幅度大于低氮水平 (N0),而在 720 nm 方向变化较慢,没有明显差异;随生育期的推移, $NDSI(R_{860}, R_{720})$ 上升,高氮水平间的差异较小,低氮水平间的差异明显增大。同时发现,当 860、720 nm 波段分别在 21 nm 和 61 nm 波段宽度分辨率内, $NDSI(R_{860}, R_{720})$ 在 1% 水平上,差异不显著,表现相对稳定。

2.2.2 $RSI(R_{990}, R_{720})$

由图 6 可看出,随着施氮水平的升高, $RSI(R_{990}, R_{720})$ 在 720 nm 方向迅速上升;随着波段宽度的扩展, $RSI(R_{990}, R_{720})$ 逐渐减小,720 nm 方向在波段宽度小于 63 nm 时变化速率较小,990 nm 方向在波段宽度大于 21 nm 时,变化速率较大。随着生育期的推移, $RSI(R_{990}, R_{720})$ 上升,高氮水平增长的幅度小于低氮水平。

总体上,近红外波段与红边波段组成的光谱指数值随带宽的增长而呈下降趋势,随施氮水平的升

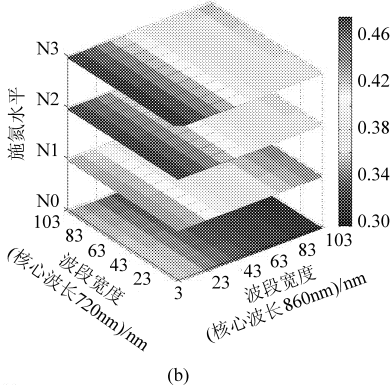


图 5 光谱指数 $NDSI(R_{860}, R_{720})$ 随波段宽度的变化规律

Fig. 5 Change patterns of $NDSI(R_{860}, R_{720})$ with different bandwidths under varied nitrogen rates
(a) 拔节期 (b) 孕穗期

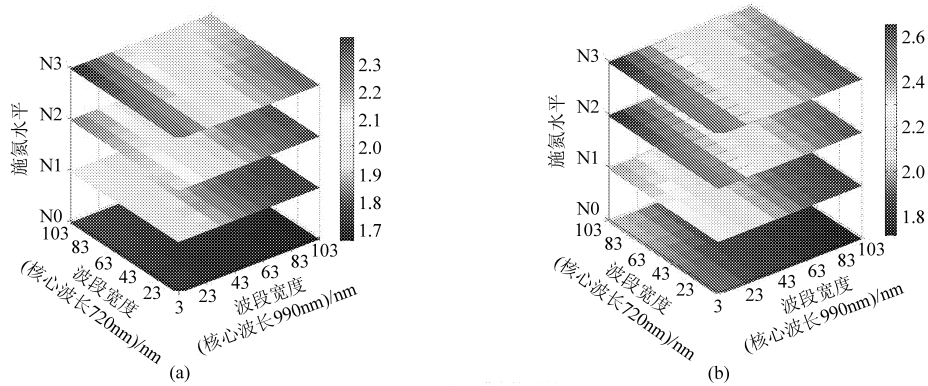


图 6 光谱指数 $RSI(R_{990}, R_{720})$ 随波段宽度的变化规律

Fig. 6 Change patterns of $RSI(R_{990}, R_{720})$ with different bandwidths under varied nitrogen rates
(a) 拔节期 (b) 孕穗期

高而增加。

2.3 氮积累量与不同波段宽度下 NDSI 和 RSI 的定量关系

2.3.1 $NDSI(R_{860}, R_{720})$

以归一化光谱指数 $NDSI(R_{860}, R_{720})$ 为研究对象,不断扩展波段宽度(步长为 1 nm),拟合基于不同波段宽度的 $NDSI(R_{860}, R_{720})$ 与氮积累量之间的方程,考察拟合方程的决定系数 $R^2_{calibration}$ 。由图 7a 可看出,随着波段宽度的增加,基于 $NDSI(R_{860}, R_{720})$ 的监测模型的决定系数 $R^2_{calibration}$ 在 720 nm 方向先保持基本不变,至 24 nm 以后略有上升,至 69 nm 又开始逐渐下降;而在 860 nm 带宽方向监测模型的决定系数 $R^2_{calibration}$ 变化不明显。

利用独立年份的试验资料对不同波段宽度条件下的氮积累量监测模型进行检验(图 7b),显示监测模型的误差 R_{RMSE} 在核心波长 720 nm、波段小于 68 nm 的宽度范围内, R_{RMSE} 较小(均小于 0.23),而在 860 nm 方向的变化趋势不太明显,在有些区间的 41 nm 出现小拐点。根据建立模型的 $R^2_{calibration}$ 最大,检验模型的 R_{RMSE} 较小的原则,筛选出核心波长 860 nm 和 720 nm 的波段宽度分别为 96 nm 和 28 nm

时,监测模型的表现最好,且核心波长 860 nm 的波段宽度小于 96 nm,720 nm 的波段宽度小于 39 nm 范围内,模型在 1% 水平上,各统计参数无显著变化,均较稳定(图 7c)。

2.3.2 $RSI(R_{990}, R_{720})$

以比值光谱指数 $RSI(R_{990}, R_{720})$ 为研究对象,不断扩展波段范围(步长为 1 nm),拟合基于不同波段宽度对应的比值光谱指数与氮积累量之间的关系方程,考察拟合方程的 $R^2_{calibration}$,然后利用独立年份的试验数据对模型进行检验,并用 R_{RMSE} 考察模型的预测表现。

由图 8a 可看出,随着波段宽度的增加,基于 $RSI(R_{990}, R_{720})$ 的监测模型的 $R^2_{calibration}$ 在 990 nm 方向呈非常缓慢的减小,从 17 nm 到 96 nm,决定系数仅仅降低了 0.01,而在 720 nm 方向呈逐渐降低的趋势,每隔大约 25 nm,决定系数降低 0.01。由图 8b 可看出,监测模型的 R_{RMSE} 在 990 nm 方向缓慢增加,变化趋势很不明显,而在 720 nm 波段方向逐渐增加,大约每隔 10nm 宽度左右,增加 0.01。根据建立模型的 $R^2_{calibration}$ 最大,检验模型的 R_{RMSE} 较小的原则,确定核心波长 990 nm 和核心波长 720 nm 的适宜波

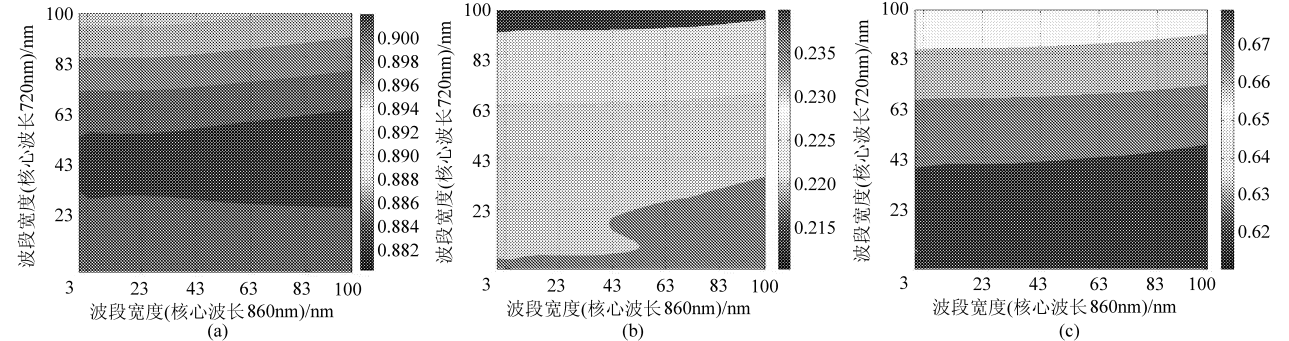


图 7 氮积累量与 $NDSI(R_{860}, R_{720})$ 关系的建模与验证的预测表现

Fig. 7 Performance of calibration and validation for the LNA monitoring models based on $NDSI(R_{860}, R_{720})$
under varied bandwidths in wheat

(a) $R^2_{calibration}$ (b) R_{RMSE} (c) $R^2_{calibration}$ 与 R_{RMSE} 差值

段宽度分别为 3 nm 和 13 nm 时,监测模型的表现最好,且当 990 nm 和 720 nm 的波段宽度均小于 23 和 30 nm 时模型的表现都较好,在 1% 差异显著水平上,各统计参数无显著变化,均较稳定(图 8c)。

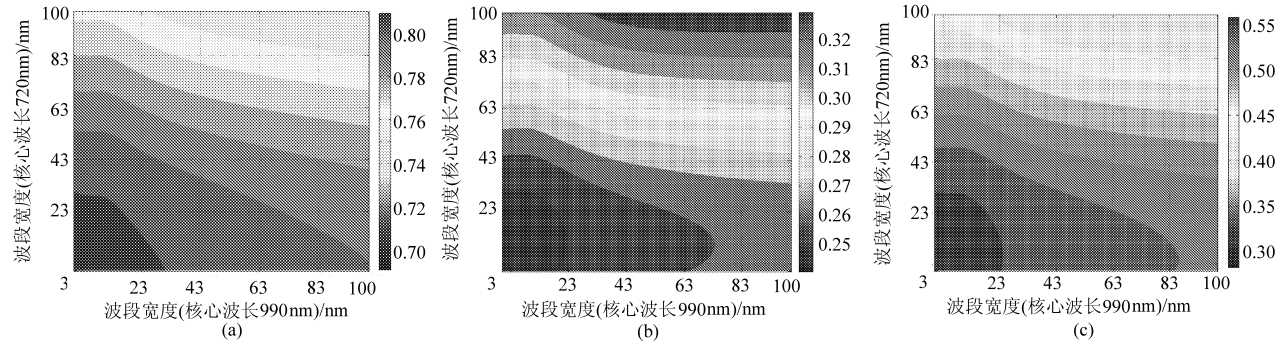


图 8 氮积累量与 RSI(R_{990} , R_{720}) 的关系建模与验证的预测表现

Fig. 8 Performance of calibration and validation for the LNA monitoring models based on RSI(R_{990} , R_{720}) under varied bandwidths in wheat
(a) $R^2_{\text{calibration}}$ (b) R_{RMSE} (c) $R^2_{\text{calibration}}$ 与 R_{RMSE} 差值

2.4 基于适宜波段宽度的监测模型

基于独立试验资料检验本文所建适宜波段宽度监测模型的。结果显示,构建的基于适宜波段宽度的监测模型,总体表现较好,其精确性和稳定性与已

报道的监测模型无显著差异(表 1),因此,基于本文试制氮素营养监测仪器可以一定程度上降低成本而不降低精度和准确性。

表 1 所建基于适宜波段宽度的监测模型与前人所建模型的比较

Tab.1 Performance comparisons of present models with previously published models in wheat

氮指标	光谱参数	建立模型		模型验证		引文
		方程	$R^2_{\text{calibration}}$	$R^2_{\text{validation}}$	R_{RMSE}	
氮积累量/ $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$	NDVI(R_{759} , R_{730})	$Y = 0.49e^{0.84X}$	0.477	0.807	0.304	文献[13]
	RVI(R_{1220} , R_{610})	$Y = 1.55e^{0.1153X}$	0.552	0.841	0.686	文献[14]
	RVI(R_{1100} , R_{660})	$Y = 0.40X^{0.9925}$	0.566	0.735	0.378	文献[15]
	RVI(R_{870} , R_{660})	$Y = 0.44X^{0.9362}$	0.569	0.745	0.331	文献[15]
	RVI*	$Y = 0.39X + 0.23$	0.380	0.566	1.103	文献[16]
	SD_R/SD_B	$Y = 0.10X^{1.5223}$	0.836	0.810	0.249	文献[3]
	NDSI(R_{860} , R_{720})	$Y = 26.34X^{1.887}$	0.900	0.836	0.251	文献[11]
	RSI(R_{990} , R_{720})	$Y = 5.095X - 6.04$	0.814	0.847	0.247	文献[10]
	NDSI(R_{860} , R_{720}) _(96,28)	$Y = 32.90X^{2.02}$	0.902	0.836	0.219	本文
	RSI(R_{990} , R_{720}) _(3,13)	$Y = -6.396X - 5.323$	0.813	0.858	0.246	本文

* RVI 由 RVI(average (760, 810, 870, 950, 1100), 660) 计算

3 结论

(1)分析了核心波长 720、860 和 990 nm 的原始光谱反射率、光谱指数 NDSI(R_{860} , R_{720}) 和 RSI(R_{990} , R_{720}) 以及监测模型随波段宽度逐步扩展的响应规律,初步确定了氮素营养监测仪核心波长的最佳波段宽度。结果显示,随波段宽度的逐步增加,核心波长 720 nm 时光谱反射率快速上升,核心波长 860 nm 时光谱反射率缓慢下降,核心波长

990 nm 时缓慢上升;光谱指数 NDSI(R_{860} , R_{720}) 和 RSI(R_{990} , R_{720}) 的数值逐渐减小;监测模型的建模精度和预测精度均逐渐减小,误差逐渐增大。

(2)确定了 NDSI(R_{860} , R_{720}) 和 RSI(R_{990} , R_{720}) 的 4 个核心波段的适宜波段宽度分别小于 96 nm、小于 39 nm、小于 23 nm 和小于 30 nm,在此范围内构建的小麦氮积累量监测模型的表现均比较稳定,该结论为便携式氮素营养监测仪的开发提供了核心波长的最佳波段宽度选择。

参 考 文 献

1 Shibayama M, Akiyama T. A spectroradiometer for field use. VII. Radiometric estimation of nitrogen levels in field rice canopies [J]. Japanese Journal of Crop Science, 1986, 55(4): 439 ~ 445.

- 2 李映雪,朱艳,田永超,等. 小麦叶片氮含量与冠层反射光谱指数的定量关系[J]. 作物学报,2006, 32(3): 358 ~ 362.
Li Yingxue, Zhu Yan, Tian Yongchao, et al. Quantitative relationship between leaf nitrogen concentration and canopy reflectance spectra [J]. Acta Agronomica Sinica, 2006, 32(3): 358 ~ 362. (in Chinese)
- 3 Feng W, Yao X, Zhu Y, et al. Monitoring leaf nitrogen status with hyperspectral reflectance in wheat [J]. European Journal of Agronomy, 2008, 28(3): 394 ~ 404.
- 4 袁金国,牛铮. 基于 Hyperion 高光谱图像的氮和叶绿素制图[J]. 农业工程学报,2007,23(4): 172 ~ 178.
Yuan Jinguo, Niu Zheng. Nitrogen and chlorophyll mapping based on Hyperion hyperspectral image [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(4): 172 ~ 178. (in Chinese)
- 5 蒲瑞良,宫鹏. 森林生物化学与 CASI 高光谱分辨率遥感数据的相关分析[J]. 遥感学报,1997,1(2): 115 ~ 123.
Pu Ruiliang, Gong Peng. Relationship between forest biochemical concentrations and CASI data along the oregon transect [J]. Journal of Remote Sensing, 1997, 1(2): 115 ~ 123. (in Chinese)
- 6 Boegh E, Soegaard H, Broge N, et al. Airborne multispectral data for quantifying leaf area index, nitrogen concentration, and photosynthetic efficiency in agriculture[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 81(2 ~ 3): 179 ~ 193.
- 7 李卫国,王纪华,赵春江,等. 基于 TM 影像的冬小麦苗期长势与植株氮素遥感监测研究[J]. 遥感信息,2007(2): 12 ~ 15.
Li Weiguo, Wang Jihua, Zhao Chunjiang, et al. Study on monitoring the nitrogen based on winter wheat growth and landsat TM image [J]. Remote Sensing Information, 2007(2): 12 ~ 15. (in Chinese)
- 8 王福民,黄敬峰,唐延林,等. 采用不同光谱波段宽度的归一化植被指数估算水稻叶面积指数[J]. 应用生态学报, 2007,18(11): 2 444 ~ 2 450.
Wang Fumin, Huang Jingfeng, Tang Yanling, et al. Estimation of rice LAI by using NDVI at different spectral bandwidths [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(11): 2 444 ~ 2 450. (in Chinese)
- 9 焦红波,金继业,刘振民,等. 波段宽度湖泊水体叶绿素 a 含量估算的波段宽度变化影响分析——以太湖为例[J]. 地球信息科学,2008,10(6): 787 ~ 791.
Jiao Hongbo, Jin Jiye, Liu Zhenmin, et al. The influence of bandwidth's variety on estimating chlorophyll—a concentration of lake waters:taking Taihu Lake as an example [J]. Geo-information Science, 2008, 10(6): 787 ~ 791. (in Chinese)
- 10 姚霞,朱艳,冯伟,等. 监测小麦叶片氮积累量的新高光谱特征波段及比值植被指数[J]. 光谱学与光谱分析,2009, 29(8): 2 191 ~ 2 195.
Yao Xia, Zhu Yan, Feng Wei, et al. Exploring novel hyperspectral band and key index for leaf nitrogen accumulation in wheat [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2009, 29(8): 2 191 ~ 2 195. (in Chinese)
- 11 姚霞,冯伟,田永超,等. 基于减量精细采样法探究估算小麦叶片氮积累量的最佳归一化光谱指数[J]. 应用生态学报,2010,21(12): 3 175 ~ 3 182.
Yao Xia, Feng Wei, Tian Yongchao, et al. Exploring optimum normalized difference spectral index for leaf nitrogen accumulation in wheat with reduced precise sampling method [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010,21(12): 3 175 ~ 3 182. (in Chinese)
- 12 赵祥,梁顺林,刘素红,等. 高光谱遥感数据的改正暗目标大气校正方法研究[J]. 中国科学: D 辑. 2007, 37(12): 1 653 ~ 1 659.
Zhao Xiang, Liang Shunling, Liu Suhong, et al. The research on atmospheric correction of dark objective in hyperspectral remote sensing data[J]. Science in China Series D, 2007, 37(12): 1 653 ~ 1 659. (in Chinese)
- 13 Hansen P M, Schjoerring J K. Reflectance measurement of canopy biomass and nitrogen status in wheat crops using normalized difference vegetation indices and partial least squares regression [J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 86(4): 542 ~ 553.
- 14 薛利红,曹卫星,罗卫红,等. 小麦叶片氮素状况与光谱特性的相关性研究[J]. 植物生态学报, 2004, 28(2): 172 ~ 177.
Xue Lihong, Cao Weixing, Luo Weihong, et al. Correlation between leaf nitrogen status and canopy spectral characteristics in wheat [J]. Acta Phytocologica Sinica, 2004, 28(2): 172 ~ 177. (in Chinese)
- 15 Zhu Y, Li Y, Feng W, et al. Monitoring leaf nitrogen in wheat using canopy reflectance spectra [J]. Canadian Journal of Plant Science, 2006, 86(4): 1037 ~ 1046.
- 16 李映雪,朱艳,田永超,等. 小麦叶片氮积累量与冠层反射光谱指数的定量关系[J]. 作物学报, 2006, 32(2): 203 ~ 209.
Li Yingxue, Zhu Yan, Tian Yongchao, et al. Quantitative relationship between leaf nitrogen accumulation and canopy reflectance spectra in wheat[J]. Acta Agronomica Sinica, 2006, 32(2): 203 ~ 209. (in Chinese)