

基于高光谱遥感的小麦叶片氮积累量

冯 伟, 朱 艳*, 田永超, 曹卫星, 姚 霞, 李映雪

(南京农业大学江苏省信息农业高技术研究重点实验室, 农业部作物生长调控重点开放实验室, 南京 210095)

摘要:作物氮素状况是评价长势、提高产量和改善品质的重要指标,因此叶片氮积累量的实时无损估测对作物生产的氮素管理具有重要意义。以多个小麦品种在不同施氮水平下的连续 3a 大田试验为基础,研究了小麦叶片氮积累量与冠层高光谱参数的定量关系。结果表明,冠层叶片氮积累量随着施氮水平的提高而增加,光谱反射率在不同叶片氮积累量水平下发生相应的变化。叶片氮积累量的敏感波段主要存在于近红外平台和可见光区,其中,“红边”区域表现最为显著。通过微分等技术构造多种植被指数,对高光谱参数和叶片氮积累量间进行相关回归分析,SDr/SDb、FD742 和 AVHRR-GVI 3 个参数与叶片氮积累量关系最密切,方程拟合决定系数 R^2 分别为 0.9163、0.9097 和 0.9142,估计标准误差 SE 分别为 1.165、1.079 和 1.077。经不同年际独立数据的检验表明,利用光谱参数 FD742 建立的模型对叶片氮积累量的估测精度为 0.8449,预测的 RMSE 为 0.984;红边位置 REP_{ic} 对叶片氮积累量的估测精度和预测的 RMSE 分别为 0.8394 和 1.014,表明预测值与观察值之间符合精度高,比较而言,FD742 为自变量建立的模型可以更好地评估不同条件下叶片氮素积累状况。

关键词:小麦;高光谱遥感;叶片氮积累量;监测模型

文章编号:1000-0933(2008)01-0023-10 中图分类号:Q14,Q948,S181,S512 文献标识码:A

Monitoring leaf nitrogen accumulation with hyper-spectral remote sensing in wheat

FENG Wei, ZHU Yan*, TIAN Yong-Chao, CAO Wei-Xing, YAO Xia, LI Ying-Xue

Hi-Tech Key Laboratory of Information Agriculture of Jiangsu Province, Key Laboratory of Crop Growth Regulation of Ministry of Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(1): 0023 ~ 0032.

Abstract: Crop nitrogen status is a key indicator for evaluating crop growth, increasing yield and improving grain quality. Non-destructive and rapid assessment of leaf nitrogen is required for improving nitrogen management in wheat production. This study aims at identification of the quantitative relationship between leaf nitrogen accumulation and canopy reflectance spectra in winter wheat (*Triticum aestivum* L.) using three field experiments with different wheat varieties and nitrogen levels. Results showed that leaf nitrogen accumulation in wheat increased with increasing nitrogen rates. Canopy reflectance changed with increasing leaf nitrogen accumulation. Sensitivity bands occurred mainly during visible light and near infrared, and strong correlation existed between red light and leaf nitrogen accumulation. The relationships of eight vegetation indicators and leaf nitrogen accumulation were analyzed using statistical models. Hyper-spectral variables were significantly correlated with leaf nitrogen accumulation, and the relationships of leaf nitrogen accumulation to SDr/SDb, FD742 and

基金项目:国家自然科学基金资助项目(30671215,30400278);江苏省自然科学基金资助项目(BK2005212,BK2003079)

收稿日期:2006-11-01; **修订日期:**2007-01-19

作者简介:冯伟(1976~),男,河南人,博士,主要从事信息生态学和作物遥感监测研究。E-mail:Fengwei78@126.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail:Yanzhu@njau.edu.cn

Foundation item: The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 30671215,30400278) and Jiangsu Province National Natural Science Foundation (No. BK2005212,BK2003079)

Received date:2006-11-01; **Accepted date:**2007-01-19

Biography: FENG Wei, Ph. D., mainly engaged in information ecology and growth of crops. E-mail:Fengwei78@126.com

AVHRR-GVI were all highly significant with determination of coefficients (R^2) as 0.9163, 0.9097 and 0.9142, respectively, and standard errors (SE) as 1.165, 1.079 and 1.077, respectively. Tests with another independent dataset showed that FD742 and REPIG could well predict leaf nitrogen accumulation in wheat with an R^2 of 0.8449 and 0.8394, and root mean square error (RMSE) of 0.984 and 1.014, respectively. This suggests that FD742 and REPIG can be used to estimate leaf nitrogen accumulation, of which FD742 performed best in modeling and testing.

Key Words: winter wheat; hyper-spectral remote sensing; leaf nitrogen accumulation; monitoring model

水氮运筹是作物生产中最重要管理措施,适时适量的氮素供给是作物高产优质的根本保障。因此,生产上需要基于适时掌握作物长势和氮素状况,进行及时合理地氮素诊断与施肥调控。然而已有的作物氮素监测方法在时间或空间上难以满足实时、快速、无损、准确诊断的要求。随着高光谱遥感技术的发展,使得遥感能在光谱维上展开,可以直接对地物进行微弱光谱差异的定量分析,在植物遥感与应用中表现出强大优势^[1],并在农业生产中得到长足发展。高光谱遥感数据具有波段窄和连续的特点,可以构造许多对生物理化参数相对敏感的光谱指数,能够精细表达植被叶绿素、水、氮等生化组分吸收及细胞结构多次散射的波形,有助于提高高光谱数据用于提取作物生长信息的水平。冠层光谱是一种综合信息,是众多地物的混合光谱,为了准确提取目标物的特征信息,可以通过构造植被指数和使用微分光谱技术,以消除大气和背景的影响^[2],因此,通过对冠层高光谱信息的提取和分析,可以对作物长势进行有效监测与营养诊断。高光谱指数与多光谱指数相比,能够显著提高许多植被参数的估测精度^[3],但有时候会暴露出过于敏感的特点^[4]。在遥感定量分析中,有必要采用不同的光谱数据处理技术,用于压缩背景噪声,提高分析的精度;同时加大训练样本的数量和复杂度,增强分析结果的真实性和适用性。

叶片氮积累量是叶片氮含量与叶重的乘积,它既反映植株个体叶片氮含量的信息,又包含植被群体盖度特征。改善作物氮素营养,提高叶片氮含量,增加群体盖度,在叶片氮积累量水平上会反映得更为明显,反之亦然。因此,叶片氮积累量对作物群体长势及氮素诊断具有重要的理论意义。田间地力水平及管理措施的差异导致作物个体与群体的异质性,但小麦叶片氮积累量却与产量密切相关^[5]。小麦叶片氮素在开花~乳熟前高积累,灌浆开始叶片氮素稳定输出再分配,可以同时提高小麦产量和籽粒蛋白质含量^[6],因此,了解叶片氮积累量的水平及动态变化,对评价作物生产能力及预测产量和品质均有重要意义。植被冠层光谱反映群体特征综合信息,研究叶片氮积累量与冠层光谱之间的量化关系,在小麦氮素诊断中具有重要的应用价值。

本研究目的是以不同年份、品种、施氮水平的田间试验为基础,综合分析小麦叶片氮素积累量与冠层高光谱参数的关系,以期确立氮素营养指标的定量监测模型,为遥感技术在小麦氮素营养诊断的实际应用提供理论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验设计

本研究进行了3个田间试验,涉及到不同年份、不同类型品种及不同施氮水平。田间试验基本情况列于表1。

试验1:于2003~2004年在江苏省农业科学院(南京市,118°78' E, 32°04' N)进行。前茬水稻田,供试土壤为黄黏土,有机质0.96%,全氮0.10%,速效磷40.29 mg·kg⁻¹,速效钾102.78 mg·kg⁻¹。供试小麦品种为宁麦9号(低蛋白质含量,约10%)、淮麦20(中蛋白质含量,约12%)、徐州26(高蛋白质含量,约15%)和扬麦10(中蛋白质含量,约13%)。设5个施氮水平,分别为0、75、150、225和300 kg·hm⁻²纯氮,基追比6:4,60%作基肥,拔节肥和孕穗肥各占20%,配施P₂O₅ 150 kg·hm⁻²和K₂O 112.5 kg·hm⁻²,全部用作基肥。小区面积为16 m²,基本苗为1.8×10⁶株/hm²,行距25 cm。两因素随机区组排列,3次重复。其他管理措施同高产大田栽培。该试验资料用于监测模型的检验。

试验 2:2004 ~ 2005 年在江苏省农科院进行,供试品种为宁麦 9 号(低蛋白含量,约 10%),扬麦 12 号(中蛋白含量,约 12.7%),豫麦 34(高蛋白含量,约 15%),土壤质地为重粘土,有机质 2.09%,全氮 0.18%,速效氮 $150.20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效磷 $140.03 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾 $113.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。前茬为水稻,试验设 4 个施氮水平:纯氮 $0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N0),纯氮 $75 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N1),纯氮 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N2),纯氮 $225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N3),配施 $80 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ P_2O_5 和 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ K_2O ,磷钾肥全部用作基肥,以上各处理的氮肥 50% 用作基肥,50% 为拔节期追肥。试验随机排列,3 次重复,小区面积 $4 \times 4.5 = 18 \text{ m}^2$,基本苗 1.5×10^6 株/ hm^2 ,行距 25 cm。其他栽培管理措施同一般高产麦田。该试验资料用于建立监测模型。

试验 3:2005 ~ 2006 年在江苏省南京市农林局科学试验田(江宁区淳化镇,118°83' E, 31°95' N)进行,供试品种为宁麦 9 号(低蛋白含量,约 10%),豫麦 34(高蛋白含量,约 15%),土壤质地为黄棕壤,有机质 1.43%,全氮 0.11%,速效氮 $62.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效磷 $10.36 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾 $82.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。前茬为水稻,试验设 4 个施氮水平:纯氮 $0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N0),纯氮 $90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N1),纯氮 $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N2),纯氮 $270 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N3),配施 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ P_2O_5 和 $210 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ K_2O ,磷钾肥全部用作基肥,以上各处理的氮肥 50% 用作基肥,50% 为拔节期追肥。试验随机排列,3 次重复,小区面积 $5 \times 5.5 = 27.5 \text{ m}^2$,基本苗 1.8×10^6 株/ hm^2 ,行距 25 cm。其他栽培管理措施同一般高产麦田。该试验资料用于建立监测模型。

表 1 田间试验基本情况及采样时期

Table1 Seasons, cultivars, nitrogen rates and sampling stages in three field experiments

生长季 Season	品种 Cultivar	施氮水平 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) Nitrogen rate	采样时期 Sampling date	样本类型 Sample type
Exp. 1 2003 ~ 2004	宁麦 9 号 Ningmai 9 淮麦 20 Huaimai 20 徐州 26 Xuzhou 26 扬麦 10 号 Yangmai 10	0/75/150/225/300	孕穗/开花/灌浆中期/灌浆后期 Booting/ Anthesis/Mid-filling/Late-filling	测试样本 Testing sample ($n = 134$)
Exp. 2 2004 ~ 2005	宁麦 9 号 Ningmai 9 扬麦 12 号 Yangmai 12 豫麦 34 Yumai 34	0/75/150/225	拔节/孕穗/开花/灌浆前期/灌浆中期/灌浆 后期 Jointing/Booting/ Anthesis/Initial - filling/Mid - filling/Late-filling	训练样本 Training sample ($n = 234$)
Exp. 3 2005 ~ 2006	宁麦 9 号 Ningmai 9 豫麦 34 Yumai 34	0/90/180/270	拔节/孕穗/抽穗/开花/灌浆前期/灌浆中 期/灌浆后期 Jointing/Booting/Heading/ Anthesis/Initial-filling/Mid-filling/Late-filling	训练样本 Training sample ($n = 168$)

1.2 测定方法

1.2.1 光谱数据测定

小麦冠层光谱测量采用美国 Analytical Spectral Device(ASD)公司生产的 FieldSpec Pro FR2500 型背挂式野外高光谱辐射计,波段值为 350 ~ 2500 nm,其中,350 ~ 1000 nm 光谱采样间隔为 1.4 nm,光谱分辨率为 3 nm;1000 ~ 2500 nm 光谱采样间隔为 2 nm,光谱分辨率为 10 nm。冠层光谱测定选择在天气晴朗、无风或风速很小时进行,时间范围为 10:00 ~ 14:00,传感器探头垂直向下,光谱仪视场角为 25°,距冠层顶垂直高度约 1.0 m,地面视场范围直径为 0.44 m。每个小区记录 10 个采样光谱,以其平均值作为该小区的光谱反射值。测量过程中及时进行标准白板校正(标准白板反射率为 1,这样所得的目标物光谱是无量纲的相对反射率),对每组目标的观测前后均以参考板标定。

1.2.2 农学参数测定

与光谱测量同步每小区取小麦 20 株按器官分离,各器官烘干、称重(将籽粒与颖壳剥离),粉碎后测定全氮含量。全氮含量采用凯氏定氮法测定,叶片氮素积累量 $\text{LNA} (\text{g N} \cdot \text{m}^{-2}) = \text{叶片氮含量 LNC} (\%) \times \text{叶片干物重 LDW} (\text{g DW} \cdot \text{m}^{-2})$ 。

1.3 数据分析与利用

本研究综合了已有光谱参数的算法,并在 MATLAB 语言环境下编程实现。以试验 2 和试验 3 资料为基

础,对小麦冠层多个光谱参数与叶片氮积累量进行相关分析,选择与叶片氮积累量显著相关的敏感波段及植被指数,通过回归分析建立小麦叶片氮积累量监测模型,利用估计标准误差(SE)和拟合决定系数(R^2)优化方程。利用试验1资料对所筛选建立的模型进行测试和检验,采用通用的均方根差(RMSE)、平均相对误差(RE)、精度(R^2)和准确度(斜率)4个指标进行综合评定,并绘制观察值与预测值之间1:1关系图。本文所选取高光谱参数及定义见表2。

表2 本文采用的高光谱参数列表

Table 2 Summary of different hyperspectral parameters used in this study

光谱参数 Spectra parameter	计算公式或定义 Algorithm formula and definition
DVI (λ_1, λ_2)	$R_{\lambda_1} - R_{\lambda_2}$ [7]
MSS-DVI	$\text{Band4} - a \times \text{Band2}$, $a = 0.96916$ [8]
GREEN-NDVI	$(R_{750} - R_{550}) / (R_{750} + R_{550})$ [9]
MSS-PVI	$(\text{Band4} - a \times \text{Band2} - b) / \text{sqrt}(1 + a^2)$, $a = 0.96916, b = 0.084726$ [8]
MSS-SARVI	$\text{Band4} / (\text{Band2} + b/a)$ [8]
AVHRR -GVI	$1.6225 \times \text{CH2} - 2.2978 \times \text{CH1} + 11.0656$ [10]
REP _{IG}	倒高斯模型求得的红边位置 Obtained from Inverted Gaussian fitting technique [11]
SDr-SDb	红边内一阶微分总和与蓝边内一阶微分总和的差值 Differential of the red-edge integral areas to the blue-edge integral areas
SDr/SDb	红边内一阶微分总和与蓝边内一阶微分总和的比值 Ratio of the red-edge integral areas to the blue-edge integral areas
RES	红边斜率即红边内一阶微分光谱中的最大值 Maximum first derivate in the red edge
FD742	742nm 处一阶微分光谱值 The first derivative value at 742nm

2 结果与分析

2.1 不同施氮水平下小麦叶片氮素积累状况

叶片氮含量和氮积累量是表征小麦氮素状况的主要指标。以试验3结果为例(表3),可以看出,两小麦品种在各生育时期的叶片氮积累量均随施氮量增加而提高,不同处理间的差异随生育时期而表现不同,抽穗~开花植株生长旺盛,此时植株对氮的需求急剧增加,叶片氮积累量在处理间均达显著水平。品种间比较,叶片氮积累量在整个生育期均表现为宁麦9号高于豫麦34。叶片氮积累量随生育时期推进呈现先升后降的趋势,且在孕穗~抽穗达到高峰,两品种表现相同。增加施氮量提高叶片氮积累量的幅度因生育时期的差异而表现不同,宁麦9号在抽穗期最大,提高了7.15倍,豫麦34在孕穗期最大,提高了4.35倍,整个生育期均表现宁麦9号高于豫麦34,这表明宁麦9号较豫麦34对氮素的反应更为敏感。

表3 不同施氮水平下小麦品种叶片氮积累量的变化($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)

Table 3 Dynamic changes in leaf nitrogen accumulation of different wheat varieties under different N levels (Exp. 3)

品种 Cultivar	施氮水平 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) Nitrogen rate	拔节期 Jointing	孕穗期 Booting	抽穗期 Heading	开花期 Anthesis	灌浆前期 Initial-filling	灌浆中期 Mid-filling	灌浆后期 Late-filling
宁麦9号 Ningmai 9	0(N0)	1.09bC	1.28cB	1.15dC	0.83dC	0.76cC	0.43cB	0.20bA
	90(N1)	1.70bBC	4.23bAB	3.92cBC	3.54cBC	1.87cBC	0.78bcB	0.47bA
	180(N2)	2.95aAB	7.01aA	6.48bAB	5.68bAB	3.39bAB	2.14bAB	1.14abA
	270(N3)	3.53aAB	7.09aA	9.30aA	7.86aA	5.28aA	3.71aA	2.49aA
豫麦34 Yumai 34	0(N0)	1.46bB	1.18cB	0.94cC	0.90dB	0.72cC	0.32cB	0.18bA
	90(N1)	1.56bB	2.86bB	3.08bBC	2.32cB	1.39cC	0.59cB	0.36bAB
	180(N2)	3.05aAB	5.12aA	5.11aAB	4.41bA	2.89bB	1.45bAB	0.77abAB
	270(N3)	3.61aA	6.53aA	6.13aA	5.78aA	4.48aA	2.63aA	1.37aA

小写字母者表示差异显著($P < 0.05$),大写字母者表示差异极显著($P < 0.01$) Values within a column followed by a different letter are significantly different at $P < 0.05$ (small letter) and $P < 0.01$ (capital letter), respectively

2.2 不同叶片氮素积累量水平下小麦冠层光谱变化

利用试验3中宁麦9号孕穗期冠层高光谱反射率为例,说明不同叶片氮积累量水平下小麦冠层高光谱反射率的响应模式(图1A),并对宁麦9号N2处理(纯氮 $180\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)拔节至灌浆后期冠层光谱反射率作图,表达冠层光谱随生育时期的动态变化(图1B)。图1A显示,冠层叶片氮积累量的差异显著影响冠层光谱反射特征,在不同波段区域光谱响应不同。冠层光谱反射率在 $350\sim 710\text{ nm}$ 和 $1400\sim 2500\text{ nm}$ 波段随叶片氮积累量水平的增加而降低,相反,在 $740\sim 1100\text{ nm}$ 波段范围内提高,但在 $1100\sim 1400\text{ nm}$ 波段内未表现出明显规律。图1B对不同生育时期冠层光谱的分析表明,生育期差异对光谱的影响与叶片氮积累量类似,具有明显规律性变化的波段区域主要存在于紫外可见光波段($350\sim 710\text{ nm}$)和近红外反射平台($740\sim 1100\text{ nm}$)区域,这是由于不同生育阶段的冠层结构和植株生化组分均发生剧烈变化,必然对光谱特征产生重要影响。从拔节到孕穗期,植株生长旺盛,吸氮量和冠层盖度急剧增加,并在抽穗~开花期维持较高水平,灌浆前期开始,随着籽粒灌浆进程的推进,碳水化合物及氮素开始向籽粒转移并积累,绿叶减少,枯黄叶增加。因此,不同生育期的植株长势及生理变化对冠层光谱必然产生重要影响,拔节至孕穗、开花期,可见光区的光谱反射率逐渐降低,在近红外区逐渐升高,而在开花和灌浆前期至灌浆后期,冠层光谱的变化与生育前期却相反。

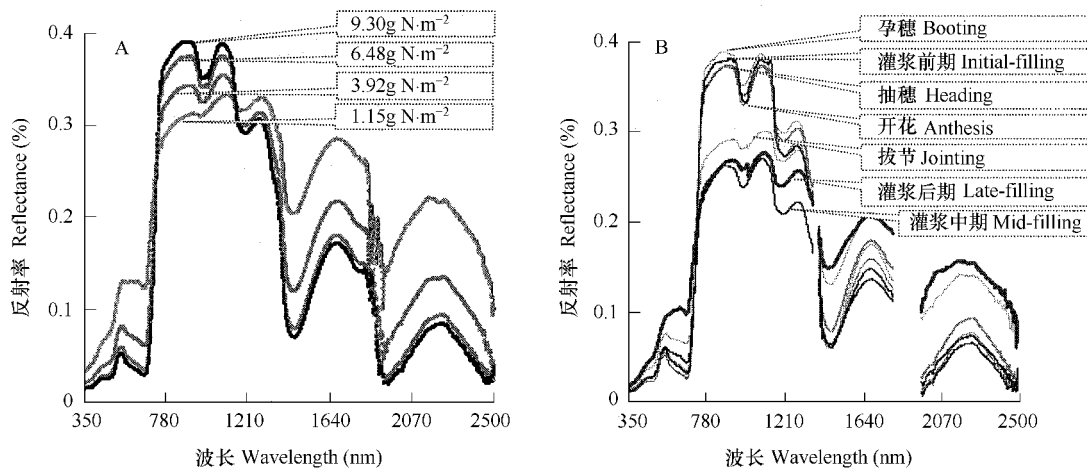


图1 小麦冠层光谱随叶片氮积累量(A)及生育期(B)的变化

Fig. 1 Changes in canopy spectral reflectance with varied leaf nitrogen accumulation levels(A) and different development stages(B) of wheat

2.3 小麦叶片氮素积累量与原始光谱及一阶导数间的相关性

将试验2和试验3所有生育时期的叶片氮积累量与对应的冠层光谱反射率及其一阶微分光谱数据($n=402$)进行总体统计相关分析(图2A)。由图2A可知,波长小于 727 nm 和大于 1350 nm ,光谱反射率与叶片氮积累量呈负相关,其中在 $560\sim 710\text{ nm}$ 间相关系数存在一个较低的波谷($r < -0.73$),在 $745\sim 1100\text{ nm}$ 间相关系数存在一个较高的平台($r > 0.81$),而在 726 nm 附近,相关系数迅速下降,且波动较大。叶片氮积累量与一阶微分光谱之间的相关系数图(图2B)表明,在 $480\sim 510\text{ nm}$ 为负相关且达较高水平,最高为 -0.84 ,此区域位于蓝边范围内;在 $710\sim 755\text{ nm}$ 间表现正相关,最大相关系数波长位于 742 nm 附近($r=0.92$),达极显著水平,该位置的光谱急剧变化,处于红边范围,与生物量及LAI关系密切。在短波红外的 $1280\sim 1340\text{ nm}$ 和 $1500\sim 1580\text{ nm}$ 相关性均达较高水平。

2.4 小麦叶片氮素积累量与高光谱参数的关系

冠层光谱反映植被群体信息,包括茎、叶、穗及土壤背景光谱,又受大气吸收散射的影响,通过对冠层光谱数据求微分,可以减小背景噪音的影响,同时有效分解混合光谱。利用微分光谱技术衍生了许多与之相关的光谱参数,通过叶片氮积累量与光谱参数间相关分析,筛选出5个表现较好的参数(表4),其中,利用红蓝边面积比和 742 nm 处一阶导数作因变量,方程拟合效果较好,决定系数在0.9以上,此幂函数可以很好地表达

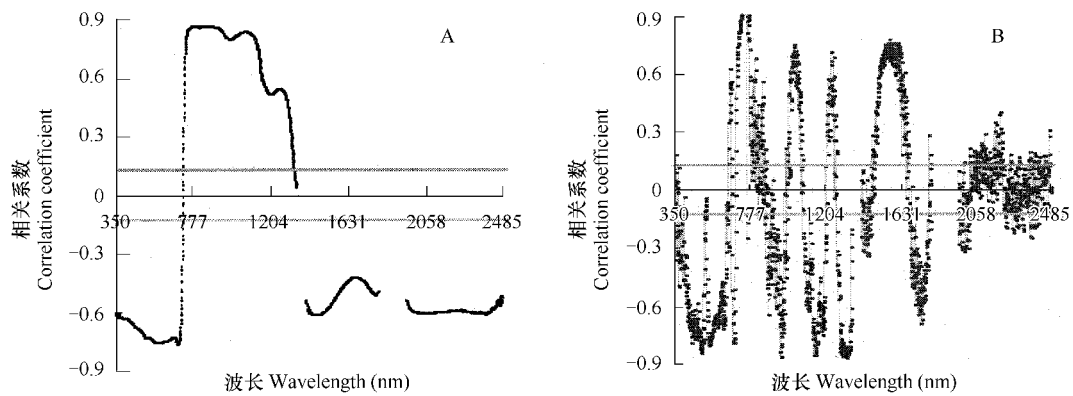


图2 小麦叶片氮积累量与冠层光谱反射率(A)及其一阶微分光谱数据(B)的相关性($n=402$)

Fig. 2 The correlation analysis of leaf nitrogen accumulation to canopy spectral reflectance(A) and its first derivative spectra(B) in wheat

叶片氮积累量与光谱参数的关系(图3A、B)。单波段包含的信息简单且易受背景噪声的影响,与群体长势关系不稳定,因此,构造了多种植被指数。对叶片氮积累量与不同植被指数进行相关分析并建回归方程,优选出8个光谱参数用以表达与叶片氮积累量的关系(表4)。所选用的植被指数主要为差值或归一化指数,入选的波段为窄波段与宽波段并用,回归方程多表现为幂函数关系。而 GREEN-NDVI 与叶片氮积累量的关系为指数函数($R^2=0.8996$),当叶片氮积累量达到 $6\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 水平时就出现严重饱和,影响该函数的预测效果。其中,利用 AVHRR-GVI 参数,所建立的回归估算方程具有较高的决定系数,拟合效果最好(图3D)。

表4 小麦叶片氮积累量(y)与不同光谱参数(x)的定量关系($n=402$)

Table 4 Quantitative relationships of leaf nitrogen accumulation (y) to individual spectral index (x) in wheat

参数类型 Type of parameter	光谱参数 Spectral parameter	回归方程 Regression equation	R^2	SE
微分及衍生参数 The first derivatives and derivatives	SDr/SDb	$y = 0.101x^{1.5223}$	0.9163	1.165
	SDr-SDb	$y = 0.0365x^{1.4614}$	0.8812	1.241
	REPIG	$y = 2 \times 10^{-48} \times e^{0.1551x}$	0.8359	1.547
	RES	$y = 8.8571x^{1.7298}$	0.8558	1.331
	FD742	$y = 10.396x^{1.0375}$	0.9097	1.079
	DVI(NIR,RED)	$y = 0.0056x^{1.9257}$	0.8976	1.137
	DVI(810,560)	$y = 0.0037x^{2.0922}$	0.8870	1.158
	DVI(1100,560)	$y = 0.0007x^{2.5719}$	0.8790	1.309
植被指数 Vegetation indices	MSS-DVI	$y = 0.0026x^{2.1606}$	0.8915	1.177
	GREEN-NDVI	$y = 0.0745e^{0.1349x}$	0.8996	1.178
	MSS-PVI	$y = 0.0054x^{2.1503}$	0.8968	1.129
	MSS-SARVI	$y = 0.2957x^{1.2362}$	0.8739	1.076
	AVHRR-GVI	$y = 0.0006x^{2.1972}$	0.9142	1.077

2.5 模型的测试与检验

为了考察模型的可靠性和普适性,利用 2003 ~ 2004 年度独立数据(Exp. 1)对上述建立的方程分别进行验证,采用通用的均方根差(RMSE)、相对误差(RE)、精度(R^2)、准确度(斜率)4个指标进行检验,模型的预测能力如表5所示。结果表明,综合4个指标,对叶片氮积累量的预测以FD742和红边位置两个光谱参数表现最优,预测的精度分别为0.8449和0.8394,RMSE分别为0.984和1.014,预测的相对误差为15.65%和15.38%,准确度均十分接近于1,说明该模型对叶片氮积累量的预测具有较好的准确度和普适性(表5、图4)。考虑所采用2004 ~ 2005和2005 ~ 2006连续2a试验资料的建模过程,FD742与叶片氮积累量的关系密切($R^2=0.9097$),而红边位置(REP_{IC})与叶片氮积累量的关系稍差($R^2=0.8359$),且利用FD742参数建立的方程不易饱和,可以适用于较高的叶片氮积累量水平。因此,利用FD742预测叶片氮积累量,方程拟合符合

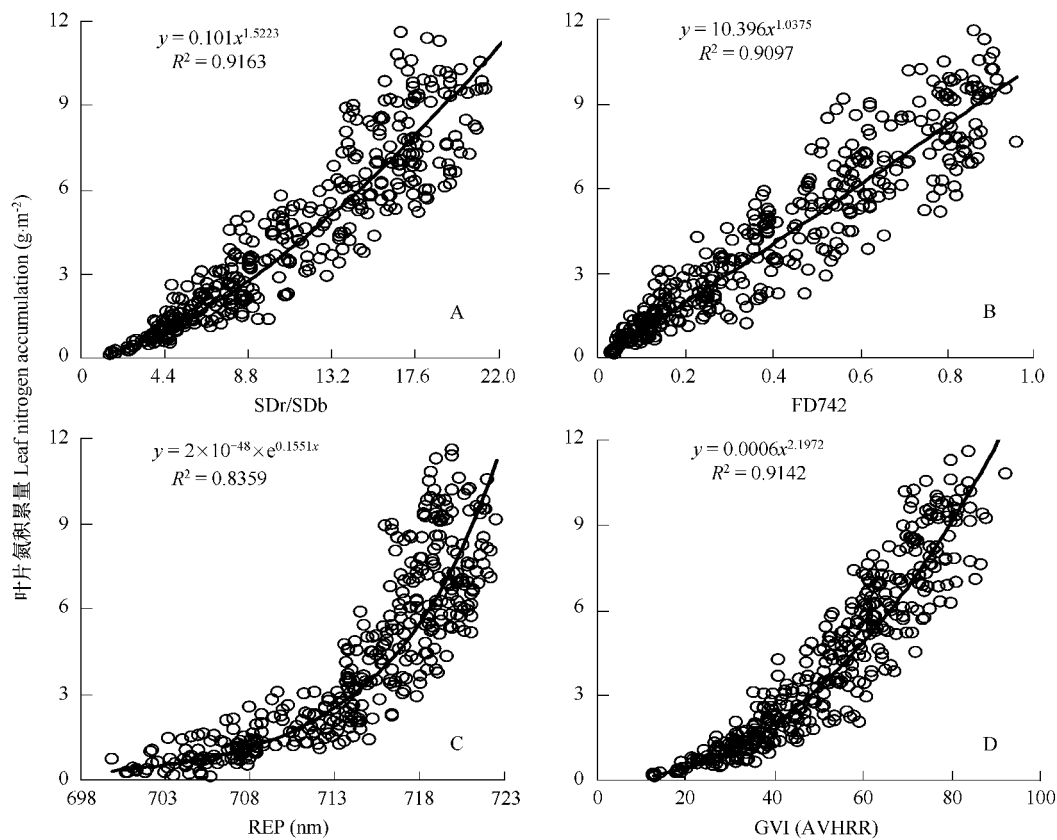


图3 小麦叶片氮积累量与光谱参数 SDr/SDb(A)、FD742(B)、REPIG(C)和 AVHRR-GVI(D)的关系

Fig. 3 Relationship of leaf nitrogen accumulation to SDr/SDb(A)、FD742(B)、REPIG(C)and AVHRR-GVI(D) in wheat

度和模型预测精度均较高。利用 SDr/SDb 和 AVHRR-GVI 两个光谱参数对叶片氮积累量进行预测,测试检验的结果稍差,但其预测能力也达较高水平,且该参数在两年试验资料的建模过程中表现比较突出。因此,在预测叶片氮积累量时 SDr/SDb 和 AVHRR-GVI 也是比较有潜力的指标,这还有待于在不同时空条件下进一步测试和评价。

表 5 模型预测能力的检验 (n = 134)

Table 5 Performance of the model for predicting leaf nitrogen accumulation (n = 134)

参数类型 Type of parameter	光谱参数(X) Spectral parameter	RMSE	RE(%)	R ²	Slope
微分及衍生参数 The first derivatives and derivatives	SDr/SDb	1.199	16.64	0.7867	0.9918
	SDr-SDb	1.127	17.79	0.7804	0.8982
	REPIG	1.014	15.38	0.8394	1.0094
	RES	1.168	19.54	0.7740	0.9299
	FD742	0.984	15.65	0.8449	1.0053
	DVI(NIR,RED)	1.155	18.09	0.7774	0.9239
	DVI(810,560)	1.236	19.05	0.7761	0.9342
	DVI(1100,560)	1.543	24.17	0.7291	1.0097
植被指数 Vegetation indices	MSS-DVI	1.228	19.23	0.7643	0.9553
	GREEN-NDVI	1.462	24.78	0.7489	1.0910
	MSS-PVI	1.221	19.06	0.7645	0.9334
	MSS-SARVI	1.885	27.74	0.7465	1.2040
	AVHRR-GVI	1.138	17.86	0.7779	0.9425

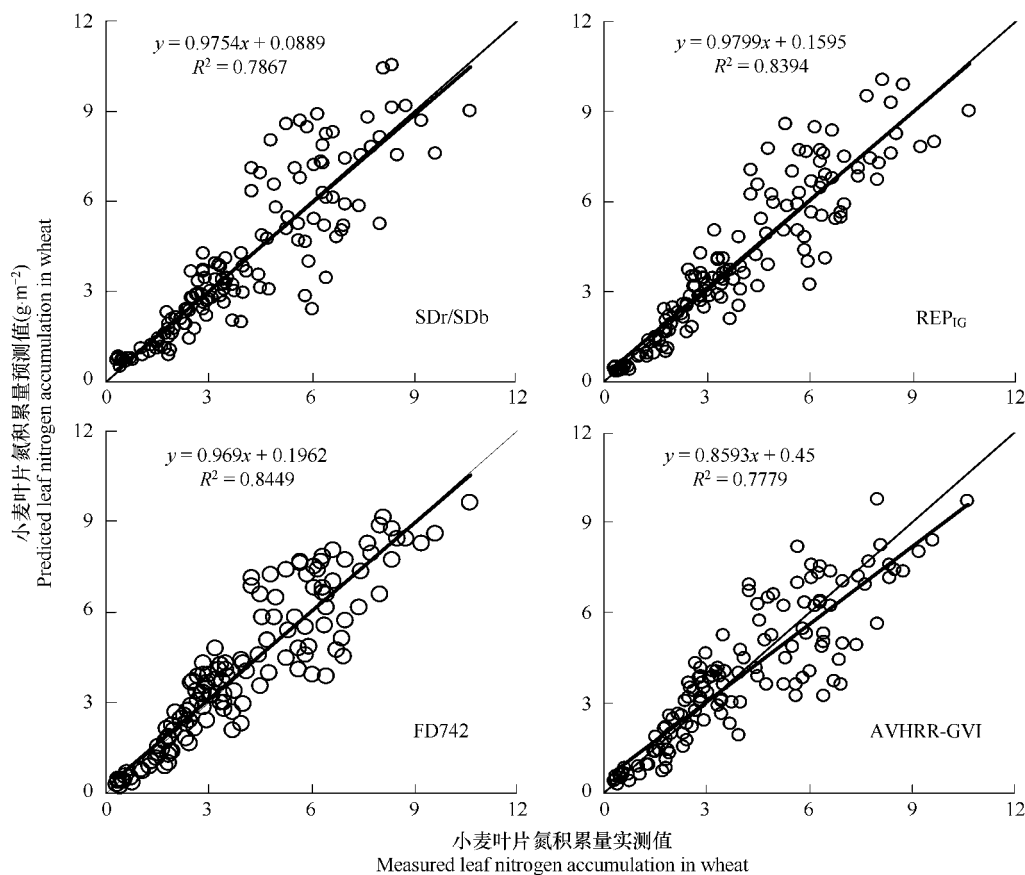


图4 小麦叶片氮积累量预测值与实测值的比较

Fig. 4 Comparison of estimated with measured leaf nitrogen accumulation in wheat

3 结语与讨论

叶片氮积累量包括叶片氮含量和叶片重量双重信息,能够更有效地反映小麦群体状态,用来表征冠层营养状况,指示小麦生产潜力。利用冠层光谱对氮含量和地上生物量或 LAI 进行估测已有不少研究,但对冠层叶片氮积累量进行光谱定量分析是有重要意义和应用价值,本实验室对此已开展不少工作^[12,13]。薛利红^[12]等研究表明,1220 nm 与 660 nm 波段组合可以较好反映小麦叶片氮积累量,李映雪^[13]等在此基础上将 1220 nm 调整为近红外平台超宽波段平均反射率,与 660 nm 波段组合,可以有效改善模型对叶片氮积累量的估算效果。本文利用连续 3 年大田试验资料,包括不同品种和施氮水平,不同年际和试验地点,资料内涵丰富,综合分析了多种高光谱参数与叶片氮积累量的关系,建立了拟合度和检验精度均很好的监测模型。本研究采用的光谱参数构造形式多样,主要有多波段组合、模拟宽光谱波段的组合及微分光谱参数,比较分析了不同形式光谱参数的预测效果,其中,模拟宽光谱波段的组合可以为高空大面积遥感监测小麦氮素营养状况提供理论依据和技术支撑,利用微分光谱参数监测叶片氮积累量为高光谱遥感精细探测冠层生化组分提供了技术途径。

叶绿素的敏感波段主要在可见光区,生物量和盖度等对光谱的反应主要发生在近红外波段,而蛋白质的特征吸收光谱在中红外光区(2054 nm 和 2172 nm),利用蛋白质特征光谱估测氮含量适用于干样品,由于水分的干扰,难以应用推广到活体群体水平。由于氮素是叶绿素最重要的组成部分,叶绿素与氮素存在良好的线性相关,因此对叶绿素的光谱研究同样适用于氮素状况的光谱估测。Bonham-Carter^[14]等定义了“红边”位置,并开始了“红边”位置与色素关系的研究。Rock^[15]、Curran^[16]和 Pinar^[17]等认为,作物群体植被光谱的“红边”位置能够很好地反映叶绿素密度信息。Gitelson^[9,18]等研究认为“红边”位置更能反映 LAI,很好地估测生

物量。Moses^[19]等开展了对不同算法下“红边”位置的氮素估算效果进行评价。唐延林^[20]等研究表明,冠层光谱“红边”位置在孕穗前“红移”,抽穗后“蓝移”;赵春江^[21]等研究认为,“红边”随着施氮量的增加而“红移”,相反,发生“蓝移”。本研究资料也显示,叶片氮积累量在孕穗前不断增加,发生“红移”,于孕穗~抽穗期达到高峰,“红移”程度与叶片氮积累量高度正相关;之后,籽粒开始灌浆,叶片氮素转移,叶片氮积累量逐渐下降,开始“蓝移”。因此,利用“红边”位置可以有效表达叶片氮积累量,这正是光谱监测的农学机理所在,本文基于此建立了利用“红边”位置为变量的叶片氮积累量监测模型,在模型测试中表现突出。

叶绿素吸收光谱区约 550~750nm,其中在绿峰(约 550 nm)和红谷(约 680 nm)附近光谱反射率随氮素状况呈规律性变化,生长旺盛时红光吸收加深加宽,导致变形点红移,表现衰老时,叶结构开始破坏和叶绿素减少,导致红光反射增加,变形点蓝移。因此,营养生长旺盛时,叶片氮积累量水平高,红移发生且红谷愈深,红边面积 SD_r 增加,反之,发生蓝移且红谷变浅甚至消失,红边面积减小。由于绿峰反射率与氮素水平呈显著负相关,黄边面积 SD_y 的变化规律与红边面积相似,而蓝边面积 SD_b 的变化却与红边面积相反。唐延林^[20]、王秀珍^[22]等研究表明,红蓝面积比可以很好地估计 LAI 和地上部生物量。Hansen^[23]等利用 692 nm 和 447 nm 两个波段的归一化指数预测小麦叶片氮含量,Penuelas^[24,25]等采用 680 nm 和 430nm 两个波段定义色素简单比值指数 SRPI 和归一化色素指数 NPCI 预测氮素状况。以上研究揭示,红光波段与蓝光波段在评价植被长势和氮素状况均十分有用。因此,构造红边面积与蓝边面积的比值或差值作为参数,它有助于改善与叶片氮积累量的相关性。本文以红蓝面积比为变量,与叶片氮积累量作回归分析,方程拟合性好,预测精度也较高。

红边(680~780 nm)内最大的一阶微分值为红边斜率,与叶片氮积累量的关系显著相关,红边斜率所在波长位置即红边位置,其与叶片氮积累量的关系表现并不突出,而利用 Miller^[11]等求得的红边位置 REP_{1c} (倒高斯模型)可用来预测叶片氮积累量($R^2 = 0.8394$, $RMSE = 1.014$, $n = 134$)。红边内与叶片氮积累量关系最密切的一阶微分值不在红边位置,而在 742 nm 附近,此波长是光谱变化最剧烈的位置,叶片氮积累量水平越高,此处的冠层光谱变化就愈剧烈。有研究发现,水稻 LAI 和生物量与一阶微分光谱之间最大相关系数的波长位置亦发生在 743 nm 附近,且显著正相关^[22]。因此,利用 FD742 与叶片氮积累量作回归分析,方程拟合效果好($R^2 = 0.9097$, $SE = 1.079$, $n = 402$),通过另一年的独立数据对模型进行检验,该模型预测精度高($R^2 = 0.8449$, $RMSE = 0.984$, $n = 134$),表明本模型在不同条件下具有较好的普适性。然而本文中的监测模型是在一个生态区多年大田试验资料上构建的,若今后能通过不同生态点的广泛检验并不断完善,将在小麦氮素监测与诊断中具有更大的应用价值。

References:

- [1] Vane G. Terrestrial imaging spectrometry: current status, future trends. *Remote Sensing of Environment*, 1993, 44(2): 109—127.
- [2] Demetriades-Shah T H, Steven M D, Clark J A. High resolution derivative spectra in remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 1990, 33(1): 55—64.
- [3] Thenkabail P S, Smith R B, Pauw E D. Hyperspectral vegetation indices and their relationships with agricultural crop characteristics. *Remote Sensing of Environment*, 2000, 71: 158—182.
- [4] Broge N H, Leblanc E. Comparing prediction power and stability of broadband and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density. *Remote Sensing of Environment*, 2001, 76: 156—172.
- [5] Guo S L, Dang T H, Hao M D. Effects of fertilization on wheat yield, NO_3^- -N accumulation and soil water content in semi-arid area of China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(4): 754—760.
- [6] Zhang Q J, Zhang L Y, Bi H W. Accumulation and distribution of carbohydrate and nitrogen and their relationships to grain protein content in wheat. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 1996, 11(3): 57—62.
- [7] Richardson A J, Wiegand C L. Distinguishing vegetation from soil background information. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1977, 43(12): 1541—1552.
- [8] Lyon J G, Yuan D, Lunetta R S. A change detection experiment using vegetation indices. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1998,

64(2): 143—150.

- [9] Gitelson A A, Merzlyak M N. Signature analysis of leaf reflectance spectra: algorithm development for remote sensing of chlorophyll. *Journal of Plant Physiology*, 1996, 148: 494—500.
- [10] Huang Q. Application of NOAA image in macro vegetation seasonal dynamics remote sensing. *Remote Sensing Information*, 1986, 4: 32—34.
- [11] Miller J R, Hare E W, Wu J. Quantitative characterization of the vegetation red edge reflectance model. *International Journal of Remote Sensing*, 1990, 11(10): 1755—1773.
- [12] Xue L H, Cao W X, Luo W H, *et al.* Correlation between leaf nitrogen status and canopy spectral characteristics in wheat. *Acta Phytocologica Sinica*, 2004, 28(2): 172—177.
- [13] Li Y X, Zhu Y, Tian Y C, *et al.* Quantitative relationship between leaf nitrogen accumulation and canopy reflectance spectral. *Acta Agronomica Sinica*, 2006, 32(2): 203—209.
- [14] Bonham-Carter G F. Numerical procedures and computer program for fitting an inverted Gaussian model to vegetation reflectance data. *Computers & Geosciences*, 1988, 14(3): 339—356.
- [15] Rock B N, Hoshizaki T, Miller J R. Comparison of in situ and airborne spectral measurements of the blue shift associated with forest decline. *Remote Sensing of Environment*, 1988, 24: 109—127.
- [16] Curran P J, Dungan J L, Peterson D L. Estimating the foliar biochemical concentration of leaves with reflectance spectrometry: testing the Kokaly and Clark methodologies. *Remote Sensing of Environment*, 2001, 76(3): 349—359.
- [17] Pinar A. Grass chlorophyll and the reflectance red edge. *International Journal of Remote Sensing*, 1996, 17(2): 351—357.
- [18] Gitelson A A, Kaufman Y J, Stark R, *et al.* Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 80: 76—87.
- [19] Moses A C, Andrew K, Skidmore. A new technique for extracting the red edge position from hyperspectral data: The linear extrapolation method. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 101(2): 181—193.
- [20] Tang Y L, Wang R C, Huang J F, *et al.* Hyperspectral data and their relationships correlative to the pigment contents for rice under different nitrogen support level. *Journal of Remote Sensing*, 2004, 8(2): 185—192.
- [21] Zhao C J, Huang W J, Wang J H, *et al.* Studies on the red edge parameters of spectrum in winter wheat under different varieties, fertilizer and water treatments. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(8): 980—987.
- [22] Wang X Z, Huang J F, Li Y M, *et al.* Study on hyperspectral remote sensing estimation models for the ground fresh biomass of rice. *Acta Agronomica Sinica*, 2003, 29(6): 815—821.
- [23] 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. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 86: 542—553.
- [24] Penuelas J, Gamon J A, Fredeen A L, *et al.* Reflectance indices associated with physiological changes in nitrogen and water-limited sunflower leaves. *Remote Sensing of Environment*, 1994, 48: 135—146.
- [25] Penuelas J, Gamon J A, Griffin K L, Field C B. Assessing community type, plant biomass, pigment composition and photosynthetic efficiency of aquatic vegetation from spectral reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 1993, 46: 110—118.

参考文献:

- [5] 郭胜利, 党廷辉, 郝明德. 施肥对半干旱地区小麦产量、 NO_3^- -N 累积和水分平衡的影响. *中国农业科学*, 2005, 38(4): 754—760.
- [6] 张庆江, 张立言, 毕恒武. 普通小麦碳氮物质积累分配特征及与籽粒蛋白质的关系. *华北农学报*, 1996, 11(3): 57—62.
- [10] 黄签. NOAA 影像在宏观植被季相动态遥感中的应用. *遥感信息*, 1986, 4: 32—34.
- [12] 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. *植物生态学报*, 2004, 28(2): 172—177.
- [13] 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. *作物学报*, 2006, 32(2): 203—209.
- [20] 唐延林, 王人潮, 黄敬峰, 等. 不同供氮水平下水稻高光谱及其红边特性研究. *遥感学报*, 2004, 8(2): 185—192.
- [21] 赵春江, 黄文江, 王纪华, 等. 不同品种、肥水条件下冬小麦光谱红边参数研究. *中国农业科学*, 2002, 35(8): 980—987.
- [22] 王秀珍, 黄敬峰, 李云梅, 等. 水稻地上鲜生物量的高光谱遥感估算模型研究. *作物学报*, 2003, 29(6): 815—821.