

网络出版时间:2016-04-07 09:00 DOI:10.13207/j.cnki.jnwfufu.2016.05.006
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20160407.0900.012.html>

关中地区小麦冠层光谱与氮素的定量关系

尚 艳¹,常庆瑞¹,刘秀英^{1,2},王晓星¹,田明璐¹

(1 西北农林科技大学 资源环境学院,陕西 杨凌 712100;2 河南科技大学 农学院,河南 洛阳 471003)

[摘 要] **【目的】**分析不同生育期及整个生育期小麦叶片氮含量(LNC)与冠层光谱反射特征的关系,以实现田间小麦活体氮素营养状况的监测,为小麦叶片氮素状况的精确诊断提供依据。**【方法】**以位于陕西关中地区杨凌揉谷镇、扶风马席村和巨良农场的 3 个小麦试验田为研究对象,测定不同长势及生育期小麦 LNC 及冠层光谱反射率,分析不同长势下小麦 LNC 和反射率的变化,并研究氮含量与冠层光谱反射率的相关性,以及小麦 LNC 与比值植被指数(RVI)、归一化植被指数(NDVI)的相关性,建立小麦 LNC 的敏感波段及光谱监测模型。**【结果】**在同一生育期,长势差的小麦叶片氮含量较低,长势较好的叶片氮含量高。与单波段相比,组合波段构成的植被指数 RVI、NDVI 与 LNC 的相关性明显提高,近红外波段(730~1 075 nm)和红波段 630,660,690 nm 组成组合波段的 RVI、NDVI 与 LNC 呈极显著正相关,其中 LNC 与 RVI 的相关性较高。利用独立的小麦田间试验数据,采用通用的均方根差(RMSE)、决定系数(R^2)、准确度(斜率)3 个指标对所建立的模型进行检验,最终选取 RVI(970,690)为监测小麦 LNC 的最佳光谱参数,构建的最佳模型为 $LNC=0.1763\times RVI(970,690)^{0.7756}$, R^2 为 0.863, RMSE 为 0.137, 准确度为 0.979, 接近于 1。**【结论】**利用小麦冠层光谱反射率构建了预测小麦 LNC 的最佳模型,该模型具有较好的准确度和普适性,适用于整个生育期小麦叶片氮含量的监测。

[关键词] 小麦;叶片氮含量;冠层高光谱反射率;比值植被指数;定量分析;监测模型

[中图分类号] S127

[文献标志码] A

[文章编号] 1671-9387(2016)05-0038-07

Quantitative relationship between wheat canopy spectrum and nitrogen in Guanzhong area

SHANG Yan¹,CHANG Qing-rui¹,LIU Xiu-ying^{1,2},
WANG Xiao-xing¹,TIAN Ming-lu¹

(1 College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;
2 Agronomy College, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471003, China)

Abstract: **【Objective】** Relationship between wheat leaf nitrogen content (LNC) and canopy spectral reflection characteristics during different growth periods and the whole growth period was analyzed to realize the monitoring of living nitrogen nutrition in field and provide basis for accurate diagnosis of wheat leaf nitrogen status. **【Method】** In this paper, experiments were conducted in three wheat fields located in Shaanxi Guanzhong region including Yangling Rougu, Fufeng Maxi village, and Juliang farm. Leaf nitrogen content (LNC) and canopy spectral reflectance of wheat at different growth periods and the whole growth period were measured and the changes in LNC and reflectance and correlation between them were analyzed. Ratio vegetation index (RVI) and normalized difference vegetation index (NDVI) were also investigated to

[收稿日期] 2014-10-15
[基金项目] 国家“863”高技术研究发展计划项目(2013AA102401);“十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAH29B04);河南省科技攻关计划项目(132102110210)
[作者简介] 尚 艳(1988—),女,陕西榆林人,在读硕士,主要从事遥感模型与信息处理研究。E-mail: shangyan1114@126.com
[通信作者] 常庆瑞(1959—),男,陕西榆林人,教授,博士生导师,主要从事地物波谱特性测试与遥感模型反演研究。
E-mail: changqr@nwsuaf.edu.cn

establish a monitoring model for LNC sensitive wave bands and spectrum.【Result】In same stage and different growing conditions, poor wheat leaves had lower LNC than well growing leaves. LNC had higher correlations with vegetation indexes of combined bands than with vegetation indexes of single band. RVI and NDVI of combined near infrared bands (730—1 075 nm) and red bands (630, 660 and 690 nm) showed significantly positive correlations with LNC, and RVI showed the best relationship. Based on independent wheat field experimental data, root mean square difference (*RMSE*), determination coefficient (R^2), and accuracy (slope) were used to test the established model and RVI of R970 and R690 was selected as the best parameter for predicting LNC. The quantitative equation was $LNC=0.176\ 3\times RVI(970,690)^{0.775\ 6}$ with R^2 of 0.863, *RMSE* of 0.137 and slope of 0.979.【Conclusion】The established optimal model for forecasting wheat leaf nitrogen content (LNC) using wheat canopy spectral reflectance had good accuracy and universality and was suitable for monitoring LNC at the whole growth period.

Key words: wheat; leaf nitrogen content; crown height spectral reflectance; RVI; quantitative analysis; monitoring model

氮素是植物生长必不可少的营养元素,占植物体干质量的0.3%~0.5%^[1]。氮素是植物体内许多重要有机化合物的组分,也是遗传物质的基础,对植物生命活动以及作物产量和品质均有极其重要的作用。植株全氮含量可以很好地反映作物氮素营养状况,与作物产量也有很好的相关性^[2];氮也是作物蛋白质、核酸、叶绿素、辅酶等的重要组成成分,对作物的生长、产量和品质影响最为显著,为作物的光合作用、生态系统生产提供着重要支持^[3]。因此,快速无损地实时监测作物长势、营养状况及产量形成等是精确农作管理的主要内容之一^[4]。

传统的氮素营养监测是以实验室分析为基础,时效性差。有研究表明,在波长为550~675 nm时甜椒叶片氮含量与叶片反射系数具有高度相关性,所预测的氮含量与实际测量的误差小于7%,说明植物的光谱分析法有可能较为简便、精确、快速,可非破坏性地监测植物氮素营养^[5]。近年来,随着高光谱遥感的兴起,许多学者通过各种统计方法来寻求氮含量与光谱反射率或其衍生量的关系,并建立模型来估算作物的氮素含量。国内外许多学者在大豆^[6]、水稻^[7-8]、玉米^[9]、小麦^[10-13]等作物上研究了氮素敏感光谱波段与植被指数的关系。前人对杂草和花卉植物的研究发现,500~750 nm光谱反射率与植物叶片氮含量具有很高的相关性,提出550~600与800~900 nm光谱反射率的比值可以用于监测植株氮素状况^[3]。宋英博^[14]在研究以不同施氮水平下大豆反射光谱预测叶片氮含量的模型中发现,在530,550,890,930 nm 4个波段的光谱反射率与大豆叶片氮含量的相关性达显著或极显著水平。周冬琴等^[15]在研究水稻叶片全氮浓度与冠层反射光谱

的定量关系中发现,归一化植被指数NDVI[1 220, 710]为反演群体叶片全氮浓度的最佳光谱参数。李映雪等^[4]初步研究表明,叶片氮含量与冠层反射光谱的NDVI[1 220, 710]和红边位置均有密切的定量关系。薛利红等^[5]的研究表明,由660和460 nm两波段反射率组成的冠层植被指数可以较好地反映小麦叶片氮含量。吴华兵等^[16]、朱艳等^[17]建立了棉花叶片氮含量的敏感波段及预测模型。

但是冠层光谱反映的是植被群体信息,包括茎、叶、穗及土壤背景光谱,且其又受大气吸收散射的影响,不同条件下这些影响因子是不同的,所建立的氮素光谱诊断模型也不能用于其他时空条件^[5]。综合前人研究结果,叶片氮含量的适宜特征光谱随作物、试验条件的不同而有所差异,其中在小麦上的研究结果则由于受到试验年份、氮素处理和小麦品种类型的限制,而需要进一步的探索和明确^[4]。为此,本研究在关中地区选用3个不同试验田的一些代表性小麦,通过对测量数据进行一阶微分、植被指数转换等处理,系统分析了不同生育期以及整个生育期小麦叶片氮含量与冠层光谱反射特征的关系,以期建立一个不受生育时期影响的通用小麦叶片氮素诊断模型,实现对田间小麦活体氮素营养状况的监测,为小麦叶片氮素状况的精确诊断提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

本研究选择了3个不同的小麦田间试验区,分别在陕西省杨凌区揉谷镇石家村、宝鸡市扶风县杏林镇马席村和巨良农场。综合分析小麦群体密度及株高,将小麦长势划分为7个梯度,分别用S1、S2、

S3、S4、S5、S6、S7 表示,其中 S1 为长势稀疏、株高最低的小麦,S7 为长势稠密、株高最高的小麦。在各试验区选择不同长势的小麦地块,形成一个天然的叶片氮含量梯度。其中,揉谷试验区(RG)选取了 5 个长势梯度,马席试验区(MX)选取了 5 个长势梯度,巨良农场试验区(JL)选取了 7 个长势梯度,共计 17 个地块进行野外田间观测和样品采集。

1.2 研究方法

1.2.1 光谱数据的采集 小麦冠层光谱数据的采集使用美国 ASD Fieldspec HH 型野外光谱辐射谱仪,光谱波长 325~1 075 nm,光谱分辨率 5 nm。在小麦的返青期(2013-03-30)、拔节期(2013-04-14)、抽穗期(2013-05-02)、灌浆期(2013-05-19)测定其冠层光谱反射率。测量选择在晴朗无云的天气进行,测量时间为当天 10:30—14:00。测量前均用白板进行标定,25°视场角,传感器探头垂直向下,距离冠层顶部高度约 0.8 m。每个地块选择 3 个样点,每个样点测量 10 条光谱曲线,取平均值作为该样点的光谱测量值。每期共测得 51 个样点在 325~1 075 nm 的光谱反射率。

1.2.2 叶片全氮含量的测定 与光谱测量同步,在每个试验区的 3 个样点分别取适量小麦植株样品,带回实验室在 105 ℃下杀青 30 min,80 ℃下烘干至恒质量,然后粉碎装袋供化学分析。小麦植株氮素含量(质量分数)采用凯氏定氮法^[5]进行测定。

1.3 数据分析与应用

本研究以揉谷(RG)和马席(MX)试验田的试验数据为基础,首先对小麦冠层反射光谱与各生育期及全生育期的叶片氮含量进行相关分析,在此基础上筛选出与叶片氮含量显著相关的敏感波段;其次利用敏感波段与近红外波段构造比值植被指数

(RVI)及归一化植被指数(NDVI),并进行相关性分析,从而筛选出表现较好的光谱波段及植被指数;最后通过回归分析,建立小麦叶片氮含量与光谱反射率之间的定量关系模型。利用巨良农场试验田的样点数据进行验证,验证结果用均方根误差(RMSE)、决定系数(R^2)、准确度(斜率)等指标值判定。

植被指数的计算公式为:比值植被指数 $(RVI) = Nir/Red$,归一化植被指数 $NDVI = (Nir - Red)/(Nir + Red)$;其中 Nir 表示近红外波段的反射率, Red 表示红波段的反射率。均方根误差的计算公式为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - Q_i)^2}。$$

式中: n 为样本数, P_i 和 Q_i 分别为第 i 个样本的预测值和观测值。

2 结果与分析

2.1 不同长势水平下各生育期小麦叶片的氮含量

叶片氮含量是表征作物叶片氮素状况的主要指标。由表 1 可以看出,在同一生育时期,长势较差的叶片氮含量较低,长势较好的叶片氮含量较高;且长势较好的小麦叶片平均氮素含量是长势较差小麦叶片的 2.13 倍。在不同生育期同一长势下,随着生育期延长,小麦叶片氮素含量总体呈下降趋势,其中返青期小麦叶片氮含量基本最高,之后随着时间推移,氮素转移到植株和籽粒中,氮含量降低。

如表 1 所示,在揉谷、马席试验田各生育期内,叶片氮含量的差异较为明显。但是各生育期内随着长势越来越好,叶片氮含量变化趋势偶尔会出现波动,这可能是由于在实验室将样品粉碎时混入了其他杂质,如土粒等,从而影响了叶片氮含量的检测结果。

表 1 陕西关中地区不同长势水平下各生育期的小麦叶片氮含量

Table 1 Wheat leaf nitrogen contents with different growing conditions at different growth periods in Guanzhong, Shaanxi

试验田 Plot	生育期 Growth period	S1	S2	S3	S4	S5
揉谷 Rougu	返青期 Green period	1.039	1.731	2.128	2.093	2.351
	拔节期 Jointing stage	1.050	1.049	1.227	1.588	1.780
	抽穗期 Heading stage	1.053	1.164	1.303	1.118	1.531
	灌浆期 Filling stage	0.442	0.663	0.765	0.843	1.219
马席 Maxi	返青期 Green period	1.032	1.071	2.111	2.156	2.349
	拔节期 Jointing stage	1.219	1.332	1.674	1.621	2.068
	抽穗期 Heading stage	0.949	0.929	1.039	1.599	1.489
	灌浆期 Filling stage	0.309	0.692	0.759	1.081	1.032

2.2 小麦冠层原始光谱变化规律

各种农作物的光谱曲线一方面反映了其对太阳

光从可见光到近红外区间各波段的反射强度,另一方面也反映出各种作物由于内部组织结构、冠层结

构的不同在各波段反射光谱结构的差异性。小麦的反射光谱特征在整个生育期差异很大,在不同的生

长阶段,对太阳光的反射明显不同。

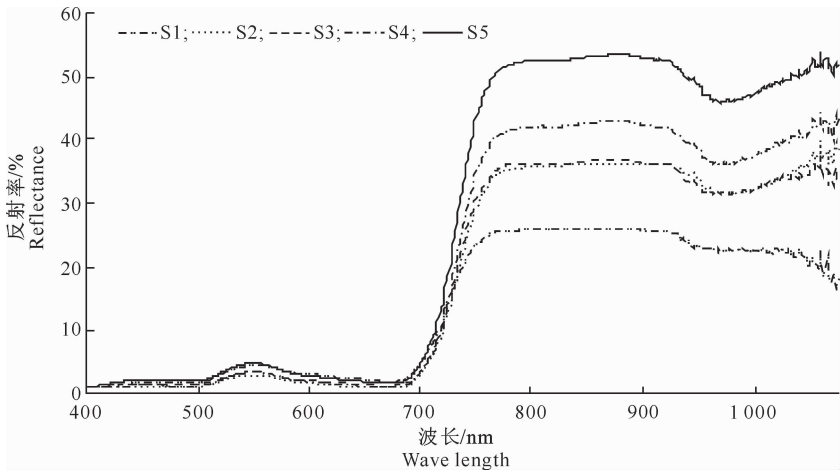


图 1 陕西关中地区不同长势水平下小麦冠层的光谱反射率(返青期)

Fig. 1 Wheat canopy spectral reflectance with different growing conditions in Guanzhong, Shaanxi (Green period)

如图 1 所示,不同长势水平下小麦冠层光谱反射率变化趋势基本一致。由于长势不同,小麦叶片氮含量呈现出较明显的差异。随着长势越来越好,氮含量不断增加,在可见光区(400~710 nm),冠层光谱反射率在 550 nm 附近有较大差异。由图 1 可知,S1 有较好的反射率,之后随着长势渐好,反射率

逐渐降低,到 S5 时反射率又有所回升;在近红外波段(760~1 075 nm),S1 的反射率最低,之后逐渐升高,且不同长势之间反射率差异比较明显。在近红外区域,氮含量最低的 S1 光谱反射率最小,氮含量最高的 S5 光谱反射率最高。

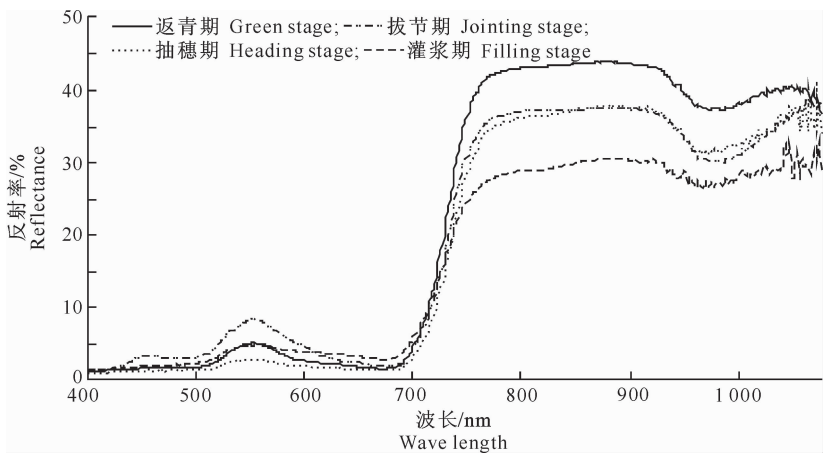


图 2 陕西关中地区不同生育期小麦冠层的光谱反射率

Fig. 2 Wheat canopy spectral reflectance under different growing periods in Guanzhong, Shaanxi

由图 2 可知,不同生育期小麦冠层光谱反射率有较大差异。由于绿色植物叶片的叶绿素对可见光(尤其是红光波段)有较强烈的吸收作用,因此植物叶片的反射和透射都很低。在可见光(400~710 nm)区域,由于色素的强烈吸收,冠层光谱反射率存在 2 个吸收谷和 1 个反射峰,即 450~550 nm 的蓝谷、650~700 nm 的红谷,以及 550 nm 附近的绿峰;随着生育期的推进,小麦冠层光谱在返青期与拔节期有较高的反射率,到抽穗期有所下降,到灌浆期又

有所回升,这可能是受叶绿素的影响较大所致。在近红外区域,冠层光谱反射率的变化情况与可见光区域不同,随着生育期的推进,冠层光谱反射率逐渐下降。由于受到叶片结构的影响,在 750~1 075 nm 波段出现一个较高的反射平台,反射率在 35% 左右,这可能是叶片内部组织结构复杂,细胞层多次反射的结果^[14]。

2.3 单波段反射率与小麦叶片氮含量的相关性

对揉谷、马席全生育期所有数据的相关分析表

明,叶片氮含量与可见光波段(400~720 nm)反射率呈负相关,其中在 583~704 nm 波段达到极显著水平,相关系数为-0.408~-0.559。叶片氮含量与近红外波段(730~1 075 nm)反射率呈极显著正相关,相关系数为 0.433~0.815,同时形成一个反射平台,主要是由于氮含量的不同,导致叶绿素含量、叶面积指数和生物量不同。从图 3 可以看出,小

麦叶片氮含量与单波段反射率的相关性从负相关转到正相关,其中可见光波段的相关系数低于近红外波段。同时,通过相关性分析发现,红波段 630,660,690 nm 以及近红外波段 780,970 nm 等波段处反射率的相关性较好,因此可以利用小麦冠层在 630,660,690,780,970 nm 等波段处的反射率差异显著性来区分氮含量的高低。

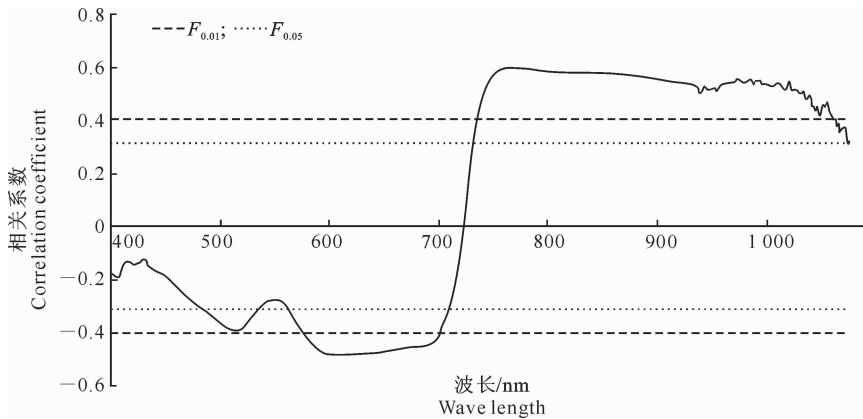


图 3 陕西关中地区小麦冠层反射率与叶片氮含量的相关关系

Fig. 3 Correlation between wheat canopy spectral reflectance and leaf nitrogen content in Guanzhong, Shaanxi

同时对揉谷、马席试验田各个生育期小麦叶片氮含量与冠层光谱反射率进行相关性分析,发现二者相关系数并未高于全生育期的相关系数,因此本研究重点在于建立一个适用于全生育期的小麦氮素监测模型。

2.4 比值植被指数(RVI)和归一化植被指数(NDVI)与小麦叶片氮含量的关系

冠层光谱反映的是植被群体信息,包括茎、叶、穗及土壤背景光谱,同时又受大气吸收散射的影响,进而影响了敏感波段的差异显著性,但若用两个波段的组合则可以扩展地物特别是植被间的光谱差异,提高光谱诊断的精度^[14]。本研究利用红波段

630,660,690 nm 和所有近红外波段构造两波段的比值植被指数(RVI)及归一化植被指数(NDVI)(相关数据省略)。研究发现,红波段 630,660,690 nm 与近红外波段 780,970 nm 组合而成的植被指数与叶片氮含量的相关性较高。与单波段相比,组合波段构成的植被指数与叶片氮含量的相关性明显提高,在整个生育期内二者呈极显著正相关。因此,本研究选择红波段 630,660,690 nm 和近红外 780,970 nm 组合成的 RVI 及 NDVI 来估算小麦叶片氮含量,建立小麦叶片氮含量的高光谱估算模型,从中筛选出与叶片氮含量决定系数 R^2 最大的拟合方程作为最佳模型,拟合结果见表 2。

表 2 不同组合波段下 RVI、NDVI(X)与叶片氮含量(Y)的回归方程

Table 2 Regression equations of RVI,NDVI (X) and leaf nitrogen content (Y) under different band combinations

植被指数 Vegetation index	波段组合 Combined waveband	回归方程 Regression equation	决定系数 R^2
RVI	RVI(780,630)	$Y=0.178\ 1X^{0.724}$	0.658 4
	RVI(970,630)	$Y=0.164\ 3X^{0.783\ 9}$	0.657 7
	RVI(780,660)	$Y=0.172\ 3X^{0.634\ 7}$	0.653 3
	RVI(970,660)	$Y=0.157\ 8X^{0.741\ 3}$	0.655 1
	RVI(780,690)	$Y=0.193\ 6X^{0.709\ 6}$	0.637 4
	RVI(970,690)	$Y=0.176\ 3X^{0.775\ 6}$	0.642 0
NDVI	NDVI[780,630]	$Y=0.028\ 8e^{4.380\ 1X}$	0.627 3
	NDVI[970,630]	$Y=0.026\ 1e^{4.555\ 6X}$	0.636 0
	NDVI[780,660]	$Y=0.184e^{4.776\ 2X}$	0.616 1
	NDVI[970,660]	$Y=0.016\ 3e^{4.964X}$	0.626 9
	NDVI[780,690]	$Y=0.041e^{4.004\ 3X}$	0.609 9
	NDVI[970,690]	$Y=0.037\ 4e^{4.173\ 2X}$	0.619 0

由表 2 可知,通过对组合波段光谱反射率与叶片氮含量的线性、指数、对数、乘幂和多项式的相关分析,发现叶片氮含量与比值植被指数(RVI)呈显著的幂函数关系,与归一化植被指数(NDVI)呈显

著的指数函数关系,且在相同波段组合中,比值植被指数与氮含量的决定系数 R^2 大于归一化植被指数。图 4 为基于 NDVI[780,630]、RVI(780,630)建立的小麦叶片氮含量估算模型拟合效果。

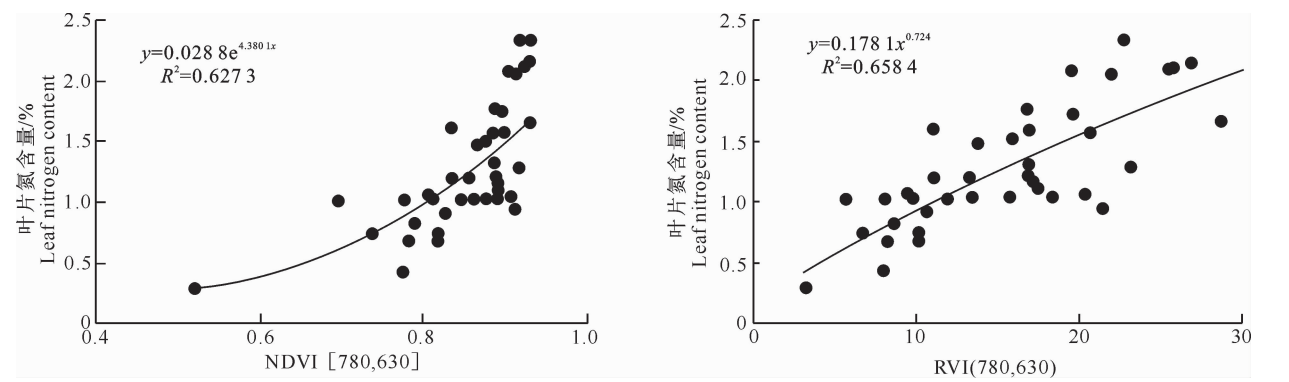


图 4 NDVI[780,630]、RVI(780,630)与小麦叶片氮含量的关系

Fig. 4 Relationship of wheat leaf nitrogen content with NDVI [780,630] and RVI (780,630)

2.5 模型验证

为了检验监测模型的可靠性与普适性,本研究从巨良农场试验区中筛选出部分数据对上述回归方

程分别进行验证。采用通用的均方根误差(RMSE)、决定系数 R^2 、准确度(斜率)3 个指标进行检验,模型的预测精度如表 3 所示。

表 3 构建的 RVI、NDVI 与叶片氮含量模型预测精度的检验

Table 3 Accuracy of established RVI,NDVI and leaf nitrogen content model

植被指数 Vegetation index	波段组合 Combined waveband	均方根误差 RMSE	决定系数 R^2	准确度(斜率) Slope
RVI	RVI(780,630)	0.142	0.812	0.924
	RVI(970,630)	0.151	0.783	0.920
	RVI(780,660)	0.159	0.761	0.761
	RVI(970,660)	0.151	0.795	0.942
	RVI(780,690)	0.141	0.876	0.970
	RVI(970,690)	0.137	0.863	0.979
NDVI	NDVI[780,630]	0.151	0.815 4	0.826
	NDVI[970,630]	0.154	0.797 2	0.836
	NDVI[780,660]	0.154	0.830 4	0.815
	NDVI[970,660]	0.154	0.816 0	0.829
	NDVI[780,690]	0.157	0.853 6	0.831
	NDVI[970,690]	0.151	0.856 5	0.847

由表 3 可知,所选取的小麦叶片氮含量估算模型均具有良好的检验结果,其中以 RVI(970,690)最佳。

通过综合分析建模过程及模型检验结果,本着拟合 R^2 和预测 R^2 相对较高而 RMSE 较小、斜率接近于 1 的原则,本研究选择 RVI(970,690)建立小麦叶片氮含量的估算模型,建立的估算模型为 $Y=0.1763X^{0.7756}$ 。图 5 为根据该模型计算的小麦叶片氮含量预测值与实测值的比较,其预测决定系数 R^2 为 0.863, RMSE 为 0.137,准确度(斜率)为 0.979,接近于 1,说明在关中地区该模型对小麦叶片氮含量的预测具有较好的准确度和普适性。

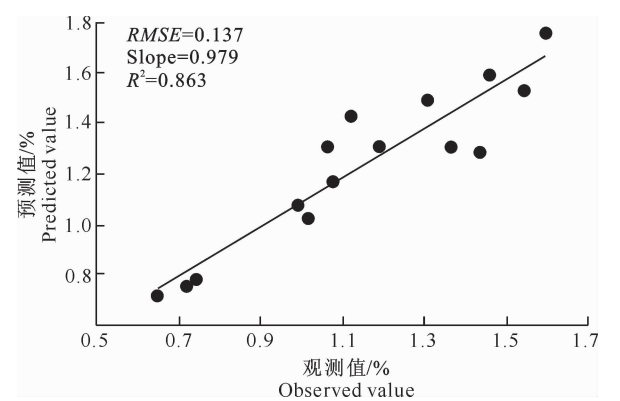


图 5 小麦叶片氮含量预测值与观测值的比较
Fig. 5 Comparison of predicted and observed wheat leaf nitrogen contents

3 结 论

本研究通过分析陕西关中地区揉谷镇、扶风马席村和巨良农场 3 块不同小麦田的试验数据,探讨不同长势下小麦冠层光谱与叶片氮含量的定量关系。研究表明,冠层单波段反射率中,叶片氮含量与可见光波段(400~720 nm)反射率呈负相关,与近红外波段(730~1 075 nm)反射率呈极显著正相关;各个生育期小麦叶片氮含量与冠层光谱反射率相关分析的相关系数低于全生育期的相关系数,因此本研究建立了一个适用于全生育期的小麦氮素监测模型。

本研究发现,红波段 630,660,690 nm 处的冠层光谱反射率与叶片氮含量的相关系数较高;与 NDVI 相比,波段组合构成的 RVI 表现较好。利用 RVI 与 NDVI 检测小麦叶片氮含量时发现,叶片含氮量与 RVI 呈显著的幂函数关系,与 NDVI 呈显著的指数函数关系,且决定系数 R^2 均在 0.6 以上,其中 RVI 的检测效果较好。利用 RVI(970,690)与小麦叶片氮含量进行回归分析,方程拟合效果较好($R^2=0.642$)。通过不同的独立数据(巨良农场试验田)对模型进行验证,该模型的精度最高($RMSE=0.137, R^2=0.863$),表明在关中地区该模型在不同的试验条件下具有较好的普适性。

本研究建立的小麦叶片氮素诊断模型适用于全生育期,但监测模型是在同一年不同大田实验资料上构建的,若今后能通过长期检验并不断完善,将对大田小麦氮素监测与诊断具有更大的应用价值。本研究运用冠层光谱特征特别是比值植被指数可以较好地监测和诊断小麦叶片氮素状况,此结论与薛利红等^[5]的研究结果较为接近。

[参考文献]

- [1] 冯 伟,王永华,谢迎新,等.作物氮素诊断技术的研究综述[J].中国农学通报,2008,24(11):179-185.
Feng W, Wang Y H, Xie Y X, et al. Review of study on technique of crop nitrogen diagnosis [J]. China's Agriculture Notified, 2008, 24(11): 179-185. (in Chinese)
- [2] Leight R A, Johnson A E. Nitrogen concentration in field grownspring barely: an experiment of the usefulness of expecting concentration on the basis of tissue water [J]. Journal of Agriculture Science Cambridge, 1985, 105: 397-406.
- [3] 吕小娜.不同供氮水平烤烟冠层光谱特性及其农学参数估测[D].四川雅安:四川农业大学,2012.
Lü X N. Analysis of hyperspectral on flue-cured tobacco and its agricultural parameter estimation under different nitrogen lev-

els [D]. Ya'an, Sichuan: Sichuan Agricultural University, 2012. (in Chinese)

- [4] 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 Y X, Zhu Y, Tian Y C, et al. Quantitative relationship between leaf nitrogen concentration and canopy reflectance spectra [J]. Acta Agronomica Sinica, 2006, 32(3): 358-362. (in Chinese)
- [5] 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 L H, Cao W X, Luo W H, et al. Correlation between leaf nitrogen status and canopy spectral characteristics in wheat [J]. Acta Phytocologica Sinica, 2004, 28(2): 172-177. (in Chinese)
- [6] 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.
Song K S, Zhang B, Wang Z M, et al. Inverse model for estimating soybean chlorophyll concentration using in-situ collected canopy hyperspectral data [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(8): 16-21. (in Chinese)
- [7] 薛利红,曹卫星,罗卫红,等.基于冠层反射光谱的水稻群体叶片氮素状况监测[J].中国农业科学,2003,36(7):807-812.
Xue L H, Cao W X, Luo W H, et al. Diagnosis of nitrogen status in rice leaves with the canopy spectral reflectance [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2003, 36(7): 807-812. (in Chinese)
- [8] 朱 艳,李映雪,周冬琴,等.稻麦叶片氮含量与冠层反射光谱的定量关系[J].生态学报,2006,26(10):3463-3469.
Zhu Y, Li Y X, Zhou D Q, et al. Quantitative relationship between leaf nitrogen concentration and canopy reflectance spectra in rice and wheat [J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(10): 3463-3469. (in Chinese)
- [9] 张俊华,张佳宝,贾科利.不同施肥条件下夏玉米光谱特征与叶绿素含量和 LAI 的相关性[J].西北植物学报,2008,28(7):1461-1467.
Zhang J H, Zhang J B, Jia K L. Correlation between summer maize spectral reflectance and leaf chlorophyll, LAI under different fertilizations [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2008, 28(7): 1461-1467. (in Chinese)
- [10] 冯 伟,姚 霞,田永超,等.小麦籽粒蛋白质含量高光谱预测模型研究[J].作物学报,2007,33(12):1935-1942.
Feng W, Yao X, Tian Y C, et al. Predicting grain protein content with canopy hyperspectral remote sensing in wheat [J]. Acta Agronomica Sinica, 2007, 33(12): 1935-1942. (in Chinese)
- [11] 姚 霞,朱 艳,田永超,等.小麦叶层氮含量估测的最佳高光谱参数研究[J].中国农业科学,2009,42(8):2716-2725.
Yao X, Zhu Y, Tian Y C, et al. Research of the optimum hyperspectral vegetation indices on monitoring the nitrogen content in wheat leaves [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(8): 2716-2725. (in Chinese)

- of flue-cured tobacco [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2006, 24(5): 93-98. (in Chinese)
- [28] 梁宗锁, 康绍忠, 高俊凤, 等. 根交替渗透胁迫与脱落酸对玉米根系生长和蒸腾速率的影响 [J]. *作物学报*, 2000, 26(3): 250-255.
- Liang Z S, Kang S Z, Gao J F, et al. Effect of abscisic acid (ABA) and alternative split root osmotic stress on root growth and transpiration efficiency in maize [J]. *Acta Agonomica Sinica*, 2000, 26(3): 250-255. (in Chinese)
- [29] 李建明, 潘铜华, 王玲慧, 等. 水肥耦合对番茄光合、产量及水分利用效率的影响 [J]. *农业工程学报*, 2014, 30(10): 82-90.
- Li J M, Pan T H, Wang L H, et al. Effects of water-fertilizer coupling on tomato photosynthesis, yield and water use efficiency [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(10): 82-90. (in Chinese)
- [30] 于亚军, 李 军, 贾志宽, 等. 不同水肥条件对宁南旱地谷子产量、WUE 及光合特性的影响 [J]. *水土保持研究*, 2006, 13(2): 87-90.
- Yu Y J, Li J, Jia Z K, et al. Effect of different water and fertilizer on yield WUE and photosynthetic characteristics of millet in southern Ningnan semi-arid area [J]. *Research of Water and Soil Conservation*, 2006, 13(2): 87-90. (in Chinese)
- [31] 吴海卿, 杨传福, 孟兆江, 等. 以肥调水提高水分利用效率的生物学机制研究 [J]. *灌溉排水学报*, 1998, 17(4): 7-11.
- Wu H Q, Yang C F, Meng Z J, et al. A study on biological mechanism of raising water use efficiency by suitable application of fertilizers [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 1998, 17(4): 7-11. (in Chinese)
- [32] 王利超, 王 涵, 朴世领, 等. 铵硝氮配比对烤烟生长生理及产量和品质的影响 [J]. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2012, 40(12): 136-144.
- Wang L C, Wang H, Piao S L, et al. Effects of different nitrogen forms on the growth, photosynthesis, yield and quality of tobacco [J]. *Journal of Northwest A&F University: Nat Sci Ed*, 2012, 40(12): 136-144. (in Chinese)
- [33] Bigloui M H, Assimi M H, Akbarzadeh A. Effect of water stress at different growth stages on quantity and quality traits of Virginia (flue-cured) tobacco type [J]. *Plant Soil Environ*, 2010, 56(2): 67-75.
- [34] Caldwell E F, Leib B G, Buchanan J R. Tobacco irrigation: Supplemental watering of a high value, drought tolerant crop in a humid region [J]. *Appl Eng Agric*, 2010, 26(1): 39-46.
- [35] Olejniczak P. Over compensation in response to simulated herbivory in the perennial herb *sedum maximum* [J]. *Plant Ecology*, 2011, 212(11): 1927-1935.

(上接第 44 页)

- [12] 冯 伟, 朱 艳, 田永超, 等. 基于高光谱遥感的小麦叶片氮积累量 [J]. *生态学报*, 2008, 28(1): 23-32.
- Feng W, Zhu Y, Tian Y C, et al. Monitoring leaf nitrogen accumulation with hyper-spectral remote sensing in wheat [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(1): 23-32. (in Chinese)
- [13] 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 Y X, Zhu Y, Tian Y C, et al. Quantitative relationship between leaf nitrogen concentration and canopy reflectance spectra [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2006, 32(3): 358-362. (in Chinese)
- [14] 宋英博. 不同施氮水平下大豆反射光谱预测叶片氮含量模型 [J]. *大豆科学*, 2010, 29(4): 641-644.
- Song Y B. Predicting model of soybean leaf nitrogen content by leaf reflectance spectra under different nitrogen supply levels [J]. *Soybean Science*, 2010, 29(4): 641-644. (in Chinese)
- [15] 周冬琴, 田永超, 姚 霞, 等. 水稻叶片全氮浓度与冠层反射光谱的定量关系 [J]. *应用生态学报*, 2008, 19(2): 337-344.
- Zhou D Q, Tian Y C, Yao X, et al. Quantitative relationships between leaf total nitrogen concentration and canopy reflectance spectra of rice [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(2): 337-344. (in Chinese)
- [16] 吴华兵, 朱 艳, 田永超, 等. 棉花冠层高光谱指数与叶片氮积累量的定量关系 [J]. *作物学报*, 2007, 33(3): 518-522.
- Wu B H, Zhu Y, Tian Y C, et al. Relationship between canopy hyperspectral index and leaf nitrogen accumulation in cotton [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2007, 33(3): 518-522. (in Chinese)
- [17] 朱 艳, 吴华兵, 田永超, 等. 基于冠层反射光谱的棉花叶片氮含量估测 [J]. *应用生态学报*, 2007, 18(10): 2263-2268.
- Zhu Y, Wu H B, Tian Y C, et al. Estimation of nitrogen concentration in cotton leaf based on canopy reflectance spectra [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(10): 2263-2268. (in Chinese)