

## 不同施氮水平下大豆反射光谱预测叶片氮含量模型

宋英博

(黑龙江省农业科学院 佳木斯分院, 黑龙江 佳木斯 154007)

**摘 要:**通过分析不同施氮水平下大豆叶片氮含量与叶片光谱反射率之间的关系,确立了大豆叶片氮含量的敏感波段及预测方程。结果表明:在 530、550、890 和 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。通过 4 种植被指数的比较,NDVI 的  $R^2$  最大, RMSE 最小。筛选得到回归方程:  $Y = -323.214 \times NDVI^2(890, 530) + 469.9307 \times NDVI(890, 530) - 165.021$ , 该模型适用于不同生育期大豆叶片氮含量的预测。

**关键词:**叶片氮含量; 叶片光谱反射率; 估测模型

中图分类号: S565.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-9841(2010)04-0641-04

## Predicting Model of Soybean Leaf Nitrogen Content by Leaf Reflectance Spectra under Different Nitrogen Supply Levels

SONG Ying-bo

(Jiamusi Branch of Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Jiamusi 154007, Heilongjiang, China)

**Abstract:** Through analyzing the relationships of nitrogen concentration in soybean leaf under different nitrogen supply levels with spectral reflectance, the sensitive wave bands and prediction functions of soybean leaf nitrogen concentration were worked out. The results showed that there existed higher significant correlations between spectra reflectance of four sensitive wave bands (530, 550, 890, and 930 nm) and the leaf nitrogen content of soybean. After compared with those four vegetation indices,  $R^2$  of the NDVI was the best and RMSE was the smallest. The corresponding prediction model established by vegetation indices of NDVI was  $Y = -323.214 \times NDVI^2(890, 530) + 469.9307 \times NDVI(890, 530) - 165.021$ , the model was suitable for estimation of leaf nitrogen concentration at different growth stages of soybean.

**Key words:** Leaf nitrogen concentration; Leaf spectrum reflectance; Estimation model

目前,对大豆叶片氮素检测室内常规分析方法虽然较为准确,但费时、费工、分析成本高,难以快速和简单应用。因此,迫切需要能随时进行大面积快速无损检测叶片氮素的新方法。大豆缺肥会引起叶片颜色、厚度、水分含量及形态结构等发生一系列变化,从而引起光谱反射特性的变化,许多学者通过各种统计方法来寻求含氮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。国内外在玉米<sup>[1-2]</sup>、水稻<sup>[3-4]</sup>、小麦<sup>[5-6]</sup>、大豆<sup>[7-8]</sup>等作物上已有相关研究报道。吴华兵等建立了棉花叶片氮含量的敏感波段及预测模型<sup>[9]</sup>,薛利红等建立了小麦叶片氮素诊断模型<sup>[10]</sup>,并且通过光谱测定和变量运算就可以估测与氮素有关的生化参数。该文研究了不同施肥水平下大豆在生育进程中叶片氮素含量变化与其光谱反射率的关系,建立了大豆叶片氮素营养无损快速诊断方法。

### 1 材料与方法

#### 1.1 试验设计

试验于 2008 年在黑龙江省农业科学院佳木斯分院试验地进行,前茬作物大豆,土壤碱解氮 146.29 mg · kg<sup>-1</sup>,有效磷 145.96 mg · kg<sup>-1</sup>,速效钾 236.78 mg · kg<sup>-1</sup>,pH 值 6.5,有机质含量 4.7%,全氮 0.22%,全磷 0.21%,全钾 3.63%。供试大豆品种为垦丰 16,5 月 11 日播种,10 月 13 日收获。

试验设 N0(不施氮)、N1(45 kg · hm<sup>-2</sup>)、N2(90 kg · hm<sup>-2</sup>,纯氮)和 N3(200 kg · hm<sup>-2</sup>,纯氮)4 个 N 肥试验水平,3 次重复,完全随机排列。建立试验区 0.2 hm<sup>2</sup>。氮肥品种为尿素,基肥在播种前施入,生育期内灌水 3 次,中耕除草 2 次,其它管理同大田。

收稿日期: 2010-04-06

基金项目: 黑龙江省国际合作资助项目(WB08C07)。

作者简介: 宋英博(1979-),男,硕士,研究方向为植物营养。E-mail: hjsyb@tom.com。

## 1.2 测定项目与方法

光谱测试采用植物光谱仪(仪器型号:UniSpec-SC),光谱分辨率 10 nm,可在 310 ~ 1130 nm 波段范围内进行连续测量,在大豆的 V4、V5、R1、R2、R3、R4、R5、R6、R7 和 R8 进行测定。每次测定时,选定有代表性的大豆 5 株,并在小区标定 10 株长势相同的植株,备下回取样,每次测量植株倒 4 叶的中间小叶,并选择叶片中间位置测定光谱值。将取回的植株叶片在 105℃ 下杀青 20 min,80℃ 下烘干。用凯氏定氮法测定叶片全氮含量。

## 1.3 模型的构建

光谱数据由光谱仪采集后传入计算机,并转换为反射率数据,采用 Excel 进行基础数据分析,为了获取实际应用的大豆叶片氮含量的光谱估测模型,首先对全生育期的叶片氮含量与对应光谱值进行相关性分析,在此基础上筛选出一批表现较好的光谱波段并进行植被指数的计算,然后确定最佳估测模型。

植被指数的计算公式:比值植被指数 RVI( $RVI = Nir/Red$ );归一化植被指数 NDVI( $NDVI = (Nir - Red)/(Nir + Red)$ );差值植被指数 DVI( $DVI = Nir - Red$ )和再归一植被指数 RDVI( $RDVI = (NDVI \times DVI)^{1/2}$ ),其中,Nir 表示近红外波段的反射率;Red 表示红波段的反射率。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同施氮水平下的大豆叶片氮含量

对不同时期大豆叶片氮素含量进行  $F$  测验,结果显示差异不显著。由图 1 可知,在不同时期对于不同施氮水平,氮素含量变化趋势基本一致。氮含量由 V4 到 R2 为逐渐积累阶段,到 R4 达最高值,R4 以后开始下降。后期由营养生长转为生殖生长,叶片氮素向外转移,氮素重新分配到植株荚和籽粒中。从图中还可以看出,从 N0 到 N2 随着氮肥施用量增加叶片含氮量明显提高,施氮过高(即 N3)会对叶片氮素积累产生抑制作用,加速群体衰老。不同施氮水平下大豆叶片氮含量变化为  $N2 > N1 > N3 > N0$ 。

### 2.2 各时期光谱反射比率动态变化

以 N2 施肥处理为例,选取 V5、R2、R4 和 R6 共 4 个有代表性的时期,研究不同波段光谱反射率的变化动态(图 2)。结果表明 400 ~ 700 nm 光波段的反射率较低,这可能是由叶绿素、叶黄素、胡萝卜素、花青素等色素吸收引起的;大约在 553 nm 黄绿

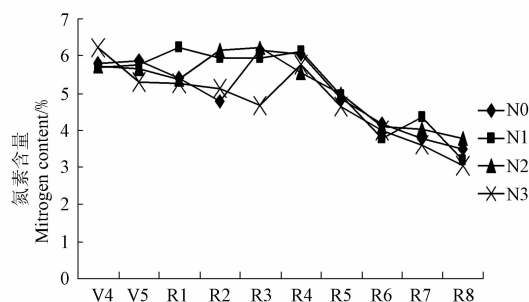


图 1 不同施氮水平下大豆叶片氮含量动态变化

Fig. 1 Dynamic change of leaf nitrogen concentration under different nitrogen levels

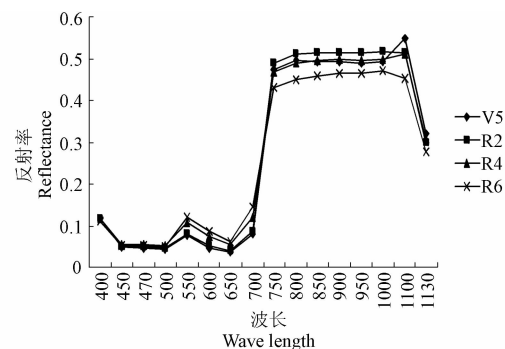


图 2 不同时期光谱反射比率动态变化

Fig. 2 Dynamic change of reflectance spectra soybean at different times

波段处有一反射峰——“绿峰”,在 600 ~ 680 nm 之间,有一红光吸收谷——“红谷”。在近红外区(700 ~ 1130 nm)反射率较高,一般在 50% 左右,可能是叶片内部组织结构复杂,细胞层多次反射的结果。各时期大豆各波段总体反射比率变化趋势基本一致。

通过大豆叶片氮含量与不同波段光谱反射率的相关性分析,筛选出具有代表性的 4 个波段,在可见光波段范围内,530 nm ( $r = -0.687$ ) 和 550 nm ( $r = -0.634$ ) 2 个波段的光谱反射率与大豆叶片氮含量的相关性达到了显著水平;在近红外波段,890 nm ( $r = 0.822$ ) 和 930 nm ( $r = 0.836$ ) 2 个波段的光谱反射率与大豆叶片氮含量的相关性达到极显著水平。进一步对 2 个波长组合构成的比值植被指数、差值植被指数、归一化植被指数和再归一化植被指数与叶片氮含量进行相关性分析,结果表明,与单波段相比植被指数与叶片氮含量相关性明显提高。

### 2.3 大豆叶片氮含量与植被指数的回归分析

通过对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性分析,发现在所选的 4 个波段中,多项式的确定系数最好,表 1 显示的是多项式的回归方程、确定系数及均方根。

表 1 不同波长反射率与叶片氮含量的回归方程、决定系数及均方根

Table 1 Regression equation, determination coefficient and RMSE of reflectance in different wavelength and leaf nitrogen concentration

植被指数 Vegetation index	波段 Wave	多项式回归方程 Polynomial regression equation	决定系数 Determination coefficient	均方根 RMSE
RVI	R530/R890	$y = -0.725x^2 + 9.3674x - 24.293$	$R^2 = 0.8922$	0.359
	R530/R930	$y = -0.7122x^2 + 9.2278x - 23.942$	$R^2 = 0.894$	0.356
	R550/R890	$y = -0.8656x^2 + 9.5098x - 20.122$	$R^2 = 0.8055$	0.482
	R550/R930	$y = -0.8657x^2 + 9.5264x - 20.216$	$R^2 = 0.8143$	0.471
DVI	R530/R890	$y = -294.45x^2 + 257.44x - 50.655$	$R^2 = 0.8142$	0.471
	R530/R930	$y = -251.37x^2 + 223.77x - 44.161$	$R^2 = 0.816$	0.469
	R550/R890	$y = -291.68x^2 + 243.18x - 45.071$	$R^2 = 0.7882$	0.503
	R550/R930	$y = -255.47x^2 + 216.19x - 40.13$	$R^2 = 0.7925$	0.498
NDVI	R530/R890	$y = -323.21x^2 + 469.93x - 165.02$	$R^2 = 0.8985$	0.348
	R530/R930	$y = -309.58x^2 + 451.05x - 158.53$	$R^2 = 0.8952$	0.354
	R550/R890	$y = -231.28x^2 + 316.33x - 102.32$	$R^2 = 0.8148$	0.470
	R550/R930	$y = -227.83x^2 + 312.08x - 101.04$	$R^2 = 0.8225$	0.461
RDVI	R530/R890	$y = -303.13x^2 + 339.36x - 89.346$	$R^2 = 0.8392$	0.438
	R530/R930	$y = -267.56x^2 + 302.39x - 79.822$	$R^2 = 0.8358$	0.446
	R550/R890	$y = -274.55x^2 + 290.6x - 71.21$	$R^2 = 0.7988$	0.490
	R550/R930	$y = -252.61x^2 + 269.21x - 66.067$	$R^2 = 0.8014$	0.487

通过 4 种植被指数的比较,NDVI 的  $R^2$  最大,  $x$  为近红外波段在 890 nm 和红波段在 530 nm  
RMSE 最小。筛选得到回归方程: 的归一化植被指数 NDVI(890,530); $y$  为估测叶片  
 $y = -323.214x^2 + 469.9307x - 165.021$  氮含量。

表 2 NDVI 与叶片氮含量多元回归关系的方差分析

Table 2 Variance analysis of multiple regression relationship in NDVI and leaf nitrogen concentration

变异来源	Source of variation	DF	SS	MS	F	$F_{0.05}$	$F_{0.01}$
因 x 回归	Regression by x	1	7.4738	7.4738	43.141 **	5.99	13.74
因 $x^2$ 回归	Regression by $x^2$	1	3.2605	3.2605	18.821 **		
离回归	Deviation from regression	6	1.2127	0.1732			

对  $y = -323.214x^2 + 469.9307x - 165.021$  回  
归方程进一步做显著性测验, $F$  测验的结果(表 2)  
表明,二次项与一次项回归均呈极显著,所以此方  
程能较好的描述  $y$  和  $x$  的回归关系。

3 结论与讨论

通过不同施氮水平下大豆叶片氮含量与叶片  
光谱反射率之间的相关关系,建立了大豆叶片氮含  
量的敏感波段及预测模型。筛选出具有代表性的 4  
个波段,在可见光波段范围内,530 nm 和 550 nm 2  
个波长的光谱反射率与大豆叶片氮含量的相关性  
呈显著;在近红外波段,890 nm 和 930 nm 2 个波段  
的光谱反射率与大豆叶片氮含量的相关性呈极显  
著。进一步对两波段组合构成的比值植被指数、差

值植被指数、归一化植被指数和再归一化植被指数  
与叶片氮含量进行相关性分析,其中 890 nm 和 530  
nm 组合的归一化植被指数预测叶片氮含量的效果  
最好,与大豆叶片氮含量之间存在较为理想的多项  
式函数关系,准确性较高,将 NDVI 代入回归方程  
得到如下模型:

$$\text{Concentration(N)} = -323.214 \times NDVI^2(890, 530) + 469.9307 \times NDVI(890, 530) - 165.021$$

此模型能较好的描述大豆光谱反射率与叶片  
氮含量的关系,且简单易行,结果较为准确地速测  
叶片氮含量,也为早期调控氮素估测产量提供依  
据。该研究建立的大豆叶片氮素诊断模型,波段范  
围仅在 310 nm ~ 1130 nm 内,因此还有待于进一步的  
验证。总体上看,叶片光谱特征可以较好地监测  
和诊断大豆叶片氮素状况。今后需利用不同生态

区和不同年份的试验资料对研究结果做进一步的证实,以提高监测模型的可靠性。

## 参考文献

- [1] Blackmer T M, Schepers J S. Techniques for monitoring crop nitrogen status in corn [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1994, 25: 1791-1800.
  - [2] Blackmer T M, Schepers J S, Varvel G E, et al. Nitrogen deficiency detection using reflected shortwave radiation from irrigated corn canopies[J]. *Agronomy Journal*, 1996, 88: 1-5.
  - [3] 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.)
  - [4] 刘占宇, 黄敬峰, 王福民, 等. 估算水稻叶面积指数的调节型归一化植被指数[J]. *中国农业科学*, 2008, 41(10): 3350-3356. (Liu Z J, Huang J F, Wang F M, et al. Adjusted-normalized difference vegetation index for estimating leaf area index of rice [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(10): 3350-3356.)
  - [5] 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.)
  - [6] 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.)
  - [7] 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.)
  - [8] 宋开山, 张柏, 王宗明, 等. 基于人工神经网络的大豆叶面积高光谱反演研究[J]. *中国农业科学*, 2006, 39(6): 1138-1145. (Song K S, Zhang B, Wang Z M, et al. Soybean LAI estimation with in-situ collected hyperspectral data based on BP neural networks [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(6): 1138-1145.)
  - [9] 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 H B, 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.)
  - [10] 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.)
- 
- (上接第 640 页)
- [5] Ones P, Allen L A, Jones J W, et al. Soybean canopy growth photosynthesis and transpiration responses to whole-season carbon dioxide enrichment[J]. *Agronomy Journal*, 1984, 76: 633-637.
  - [6] 刘昌明, 王会肖. 土壤-作物-大气界面水分过程和节水调控[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 60-91. (Liu C M, Wang H X. Soil-crop-water interface of atmospheric processes and water-saving regulation and control [M]. Beijing: Science Press, 1999: 60-91.)
  - [7] 潘瑞炽, 董愚得. 植物生理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1979: 13-20. (Pan Z R, Dong Y D. Plant physiology [M]. Beijing: Higher Education Press, 1979: 13-20.)
  - [8] Dornhoff G M, Shibles R M. Varietal differences in net photosynthesis of soybean leaves [J]. *Crop Science*, 1970, 10: 42-45.
  - [9] 梁宗锁. 节水灌溉条件下夏玉米气孔导度与光合速度的关系[J]. *干旱地区农业研究*, 1996, 14(1): 101-105. (Liang Z X. Relationship between stomatal conductance and photosynthetic rate of summer maize under water saving irrigation [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 1996, 14(1): 101-105.)
  - [10] 孙广玉. 大豆光合速率和气孔导度对水分胁迫的响应[J]. *植物学报*, 1991, 33(1): 43-49. (Sun G Y. Soybean photosynthetic rate and stomatal conductance responses to water stress [J]. *Bulletin of Botany*, 1991, 33(1): 43-49.)
  - [11] 邹冬生. 几种作物叶片主要生理特性的比较研究[J]. *作物研究*, 1991, 5(1): 20-22. (Zhou D S. Comparative study of the main physiological characteristics on several crops of leaves [J]. *Crop Research*, 1991, 5(1): 20-22.)
  - [12] 潘瑞炽, 董愚得. 植物生理学(二版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 1983: 17-24. (Pan Z R, Dong Y D. Plant Physiology (Second Edition) [M]. Beijing: Higher Education Press, 1983: 17-24.)
  - [13] 姜彦秋, 黄峻, 苗以农. 大豆叶片表面结构与蒸腾的关系[J]. *作物学报*, 1991, 17(1): 43-46. (Jiang Y Q, Huang J, Miao Y N. The relationship between transpiration and soybean leaf surface structure [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 1991, 17(1): 43-46.)
  - [14] 许大全. 光合作用气孔限制分析中的一些问题[J]. *植物生理学通讯*, 1997, 33(4): 241-244. (Xu D Q. Some problems in stomatal limitation analysis of photosynthesis [J]. *Plant Physiology Communications*, 1997, 33(4): 241-244.)
  - [15] 高辉远, 邹琦, 陈敬锋. 大豆光合午休原因的分析[J]. *作物学报*, 1994, 20(5): 357-361. (Gao H Y, Zhou Q, Chen J F. Analysis of cause of midday depression of photosynthesis in soybean leaves [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 1994, 20(5): 357-361.)