

## 基于棉花冠层光谱的土壤氮素监测研究

潘文超<sup>1,2</sup>,李少昆<sup>1,2\*</sup>,王克如<sup>1,2</sup>,肖 华<sup>1</sup>,陈 兵<sup>1</sup>,王方永<sup>1</sup>,  
苏 毅<sup>2</sup>,陈江鲁<sup>2</sup>,赖军臣<sup>1,2</sup>,黄芳德<sup>1</sup>

(1. 新疆兵团绿洲生态农业重点开放实验室 / 新疆作物高产研究中心, 新疆 石河子 832003;

2. 中国农业科学院作物科学研究所 / 国家农作物基因资源与基因改良重大科学工程, 北京 100081)

**摘要:**通过连续2年小区氮肥试验,在棉花不同生育期采集冠层高光谱数据并同步测定土壤氮含量,分析棉花冠层高光谱参数与土壤氮含量间的关系,建立基于植株冠层光谱的土壤氮含量估算模型。结果表明:土壤全氮含量随着施氮水平的增加而增加,且差异显著;基于棉花不同时期冠层光谱构建的14种光谱参量与土壤氮含量间的相关性有显著差异。其中,利用冠层光谱参数 P\_Area 1100、Depth 980、Area 672、PPR(550,540)建立的土壤氮含量监测模型分别在蕾期、花期、铃期、吐絮期4个关键生育期对土壤氮含量的预测均达到了较高的精度,能够很好地反映棉花土壤氮素营养状况。利用植株冠层光谱参数可以很好地监测土壤氮素营养,说明利用植株冠层光谱方法监测土壤氮含量是可行的。

**关键词:**棉花;冠层光谱;土壤含氮量;高光谱参数

**中图分类号:**S562 **文献标识码:**A

**文章编号:**1002-7807(2010)01-0070-07

## Monitoring Soil Nitrogen and Plant Nitrogen Based on Hyperspectral of Cotton Canopy

PAN Wen-Chao<sup>1,2</sup>, LI Shao-kun<sup>1,2\*</sup>, WANG Ke-ru<sup>1,2</sup>, XIAO Hua<sup>1</sup>, CHEN Bing<sup>1</sup>, WANG Fang-yong<sup>1</sup>, SU Yi<sup>2</sup>,  
CHEN Jiang-lu<sup>2</sup>, LAI Jun-chen<sup>1,2</sup>, HUANG Fang-de<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Oasis Ecology Agriculture of Xinjiang Construction Crop/The Center of Crop High-yield Research, Shihezi, Xinjiang 832003, China; 2. Institute of Crop Science, Chinese Academy of Agricultural Sciences/The National Key Facilities for Crop Genetic Resources and Improvement, NFCRI, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Through a 2-year community trial of nitrogen fertilizer in cotton, canopy hyperspectral data and synchronous determination of soil nitrogen content at different growth stages were obtained and the relationship between cotton canopy hyperspectral parameters and the soil nitrogen content was analyzed, soil nitrogen content estimation model based on hyperspectral parameter was established. The results showed that the nitrogen content increased with nitrogen level. The correlation between 14 kinds of selected parameters based on hyperspectral data of diffeled periods and plant nitrogen content was significantly different. The use of the soil nitrogen content model that established with spectral parameters P\_Area 1100、Depth 980、Area 672、PPR (550,540) in four key developmental stages showed a higher prediction accuracy. It can be concluded that using spectra spectroscopic methods to monitor soil nitrogen content are feasible.

**Key words:** cotton; canopy spectra; soil nitrogen content; hyperspectral parameters

新疆棉花生产最突出的问题是化肥施用结构不合理、利用率低。化肥用量尤其是氮肥用量普遍偏高,造成养分比例失调,盲目增加肥料用量是生产成本过高、肥料利用率较低的主要原因

之一。合理施用氮肥需借助于对土壤氮素及植株营养状况的监测。传统的土壤及作物营养监测是取样进行室内化学分析,其结果虽然较为准确,但存在费时、费工,属破坏性取样且检测成本较

收稿日期:2009-05-30

作者简介:潘文超(1982-),男,硕士研究生,panwendiyi@163.com;\* 通讯作者, Lishk@mail.caas.net.cn

基金项目:国家“863”计划(2006AA10A302、2006AA10Z207),国家科技支撑计划(2007BAH12B02)和国家自然科学基金(30860139)

高、有滞后性等缺陷,不能满足生产需要。因此,探索新的方法来快速监测土壤及植株养分,对合理施用氮肥、提高我国化肥利用效率具有十分重要的意义。

高光谱遥感技术是一种无损测试技术,可在不破坏植物组织结构的前提下,进行作物长势与营养状况的监测<sup>[1]</sup>。利用高光谱遥感监测土壤养分的主要方法是测量裸土的光谱并测定土壤养分,建立土壤光谱反演土壤养分的模型。Krishnan 等利用实验室测定的土壤光谱,对反射光谱倒数之对数进行一阶和二阶微分运算,通过逐步回归分析发现,可见光波段(623 nm 和 564 nm)的光谱对于有机质的估算精度要高于近红外波段<sup>[2]</sup>; Ben - Dor 通过对土壤近红外波段光谱的分析,估算了粘土含量、表面积、阳离子交换量、湿度、有机质以及碳酸盐 6 种土壤重要属性<sup>[3]</sup>; Kooistra 等利用偏最小二乘回归法估算土壤中有有机质和粘土矿物的含量以及与有机质、粘土矿物相关性很强的金属元素 (Cd、Zn) 的含量,发现 700 nm、1050 nm、1400 nm、1850 nm、2150 nm、2280 nm、2400 nm 和 2470 nm 附近的光谱与这几种土壤组分的含量有密切关系<sup>[4]</sup>; 徐永明等对土壤总氮含量与土壤反射率光谱特征进行了研究,在试验的几种光谱指标中,土壤反射率一阶导数(FDR)与倒数的对数( $\log(1/R)$ )以及土壤总氮含量的回归精度较高,且验证精度很高<sup>[5]</sup>。LIU Wei-dong 等应用高光谱遥感数据估算土壤表层水分的研究<sup>[6]</sup>。国内外研究表明,利用土壤光谱特征能够实现土壤养分状况的直接监测。但当其上生长有作物时,特别是当作物覆盖达到一定程度后,测量土壤的光谱并不容易<sup>[7-9]</sup>。因此,其应用受到较大限

制。在水分及环境条件基本一致时,作物的生长状况是土壤养分状况的具体体现。不同养分状况土壤上的作物,其生长差异明显,表现在冠层光谱上也有明显差异。因此,可利用对作物冠层光谱的监测来监测土壤的养分状况。本文通过设置不同施氮处理,研究棉花冠层光谱与其土壤氮含量间的相关关系,建立基于棉花冠层光谱的土壤氮含量估测模型,以期探索土壤氮素快速监测方法、指导棉花精准施肥提供理论依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验设计

试验于 2007—2008 年在新疆石河子大学农学院试验站(44°32'N, 88°65'E)进行。供试土壤类型为灰漠土,土壤质地为中壤土。土壤有机质 1.86%、全氮 0.115%、全磷 0.211%、碱解氮 78.0 mg·kg<sup>-1</sup>、速效磷 91.5 mg·kg<sup>-1</sup>、速效钾 315 mg·kg<sup>-1</sup>。

试验为氮肥的单因子试验。小区面积 78 m<sup>2</sup>。重复 3 次。15 cm+50 cm 宽窄行配置,种植密度 24.0 万株·hm<sup>-2</sup>。棉花品种 2007 年为 297-5,2008 年为标杂 A<sub>1</sub>。氮肥处理设置 5 个水平,分别为: N0(不施氮)、N1(205 kg·hm<sup>-2</sup> 纯氮)、N2(375 kg·hm<sup>-2</sup> 纯氮)、N3(525 kg·hm<sup>-2</sup> 纯氮)、N4(675 kg·hm<sup>-2</sup> 纯氮)。灌溉采用滴灌方式,全生育期灌溉 10 次,总灌水量为 4050 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>。磷、钾肥作为基肥在播种前一次施入,施入量分别为三料过磷酸钙(重过磷酸钙)235.5 kg·hm<sup>-2</sup>、硫酸钾 228 kg·hm<sup>-2</sup>。追肥根据棉花各生育期需水、需肥特性,于每次灌水时按比例分次施入(表 1)。其它按当地高产田栽培模式管理。

表 1 2007-2008 年各处理的施肥时间和施肥量

Table 1 The fertilization times and quantity at different nitrogen treatments in 2007-2008		kg·hm <sup>2</sup>				
施肥日期	氮肥处理					
	N0	N1	N2	N3	N4	
04-26	0.00	41.00	75.00	105.00	135.00	
05-15	0.00	16.40	30.00	42.00	54.00	
05-28	0.00	16.40	30.00	42.00	54.00	
06-10	0.00	16.40	30.00	42.00	54.00	
06-19	0.00	18.45	33.75	47.25	60.75	
06-27	0.00	18.45	33.75	47.25	60.75	
07-10	0.00	18.45	33.75	47.25	60.75	
07-21	0.00	20.50	37.50	52.50	67.50	
07-30	0.00	20.50	37.50	52.50	67.50	
08-09	0.00	20.50	37.50	52.50	67.50	
08-19	0.00	10.25	18.75	26.25	33.75	
08-29	0.00	8.20	15.00	21.00	27.00	

## 1.2 测定方法

**1.2.1 光谱数据测定。**采用美国 ASD 公司生产的 Field Spec Pro FR 2500 型背挂式野外高光谱辐射仪,于每年棉花蕾期(6月29日)、花期(7月21日)、铃期(8月15日)和吐絮期(9月3日)进行冠层光谱测定。该仪器光谱波段范围为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云、风速不超过3 m·s<sup>-1</sup> 时进行,时间范围为北京时间11:30-14:00。测定时传感器探头垂直向下,距冠层顶部垂直高度约1.0 m,光谱仪传感器探头视场角为25°,地面视场范围直径为0.33 m。以10条光谱为一采样光谱,每个小区每次记录20个采样光谱,以其平均值作为该小区的光谱反射值。对每组目标的光

谱测量前后均以参考板标定。

**1.2.2 样本获取和土壤全氮含量测定。**与光谱测量同步,取测定位点0~20 cm 土壤样品在室温下风干,粉碎过筛后,用瑞士 B-339 凯氏定氮仪测定全氮含量(%)。

## 1.3 数据分析方法

光谱反射率数据处理采用 Field Spec FR Pro 随机软件进行处理。此外,本研究综合了已有大量光谱分析技术,如光谱位置变量技术、微分光谱技术和原始光谱反射率多波段组合等,并在 MATLAB 语言环境下编程实现。所用反射和吸收参数<sup>[10-12]</sup>及植被指数<sup>[13-15]</sup>的计算方法见表2。

数据分析利用 Excel 2003 和 SAS 软件进行,首先建立基于棉花冠层光谱的土壤全氮含量分时期监测模型,再利用独立试验资料对监测模型进行精度检验。

表2 高光谱参数及计算方法

Table 2 The hyperspectral parameters and algorithm

名称	简写	公式	参考文献
吸收谷(反射峰)深(高)度	Depthi	$Depthi = 1 - \frac{R_{Ci}}{R_{Si} + (R_{Ei} - R_{Si}) \times (\lambda_{Ci} - \lambda_{Si}) / (\lambda_{Ei} - \lambda_{Si})}$	(1) [10-12]
吸收谷(反射峰)面积	Areai	$Areai = \int_{\lambda_{Si}}^{\lambda_{Ei}} (R_{obs}(\lambda) - R(\lambda)) d\lambda$ $= \int_{\lambda_{Si}}^{\lambda_{Ei}} \left\{ \left[ R_{Si} + \frac{R_{Ei} - R_{Si}}{\lambda_{Ei} - \lambda_{Si}} \times (\lambda - \lambda_{Si}) \right] - R(\lambda) \right\} d\lambda$	(2) [10-12]
归一化吸收谷(反射峰)深(高)度	NDi	$NDi = \frac{Depthi}{Areai}$	(3) [10-12]
最优土壤调节植被指数	OSAVI	$OSAVI = 1.16(R_{800} - R_{670}) / (R_{800} + R_{670} + 0.16)$	(4) [13]
土壤亮度指数	MSBI	$MSBI = (0.406MSS4 + 0.60MSS5 + 0.645MSS6 + 0.213MSS7)$	(5) [14]
生理反射植被指数	PRI	$PRI = (R_{red} - R_{531}) / (R_{red} + R_{531})$	(6) [15]

注:R<sub>Ci</sub>、R<sub>Si</sub>、R<sub>Ei</sub> 分别为反射特征中心点、起点和结束点处的光谱反射率,λ<sub>Ci</sub>、λ<sub>Si</sub>、λ<sub>Ei</sub> 分别为反射特征中心点、起点和结束点处的波长;i 表示光谱特征所处的波段;光谱曲线吸收谷深度、面积和归一化深度分别用 Depthi, Areai, NDi 表示,i 取值 672 nm、980 nm、1190 nm 和 1450 nm;光谱曲线反射峰高度、面积和归一化反射峰高度分别用 P\_Depthi, P\_Areai, P\_NDi 表示,i 取值 560 nm、920 nm、1100 nm、1280 nm、1690 nm 和 2230 nm。

**1.3.1 决定系数检验。**本文用预测模型的决定系数来评价光谱数据和生理参数的相关性。在光谱数据和生理参数的相关及回归分析中可用相关系数(r)的平方值(确定系数 R<sup>2</sup>)来评价两类数据的相关性和预测结果之优劣。一般说来,相关系数平方值在 0~1 之间,值越大模型预测精度水平

越高<sup>[7]</sup>。

**1.3.2 均方根差(RMSE)。**

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

本文用均方根差来评价模型预测精度。式

中:  $y_i$  和  $\hat{y}_i$  分别为实测值和由模型计算出的理论值,  $n$  为样本数 (包括训练样本和检验样本)。RMSE 值相对越小, 则模型的预测精度水平越高<sup>[8]</sup>。

### 1.3.3 相对误差(RE)。

$$\text{相对误差(\%)} = (y_i - \hat{y}_i) / y_i * 100,$$

式中:  $y_i$  和  $\hat{y}_i$  分别代表实测值和理论值, 取相对误差绝对值的平均值作为模型精度检验指标, 值

越小则模型预测精度越高<sup>[9]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同施氮处理土壤全氮含量差异分析

对不同时期各处理土壤全氮含量方差分析结果表明(表 3), 土壤含氮量均随施氮量的增加而增加, 且不同处理间的土壤含氮量的差异均达显著水平。整个生育期, 除蕾期 N2、N3 处理未达到极显著差异外, 其余均达到了极显著差异。

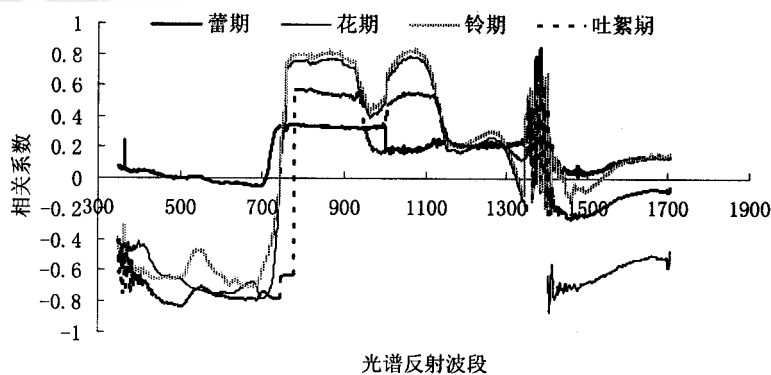
表 3 两年各处理土壤氮均值及方差分析

处理	蕾期含氮量	花期含氮量	铃期含氮量	吐絮期含氮量
N0	0.3966 aA	0.4783 aA	0.5536 aA	0.4015 aA
N1	0.4931 bB	0.8057 bB	0.7773 bB	0.6007 bB
N2	0.6635 cC	0.8636 cC	0.9255 cC	0.7766 cC
N3	0.7248 dC	0.9686 dD	0.9922 dD	0.8828 dD
N4	0.9453 eD	1.1071 eE	1.1092 eE	1.0043 eE

### 2.2 不同生育时期不同处理的棉花冠层高光谱参量与土壤含氮量的相关关系

**2.2.1 不同生育时期不同处理棉花冠层反射光谱与土壤氮含量的相关性。**土壤含氮量与冠层光谱反射率的相关分析表明(图 1), 不同时期土壤含氮量与冠层光谱反射率的相关性有较大差异。在可见光波段(400~700 nm), 土壤含氮量与冠层光谱反射率呈负相关。其中, 花期和吐絮期达极显著相关, 而铃期达显著相关。在近红外波段(700~1300 nm), 土壤含氮量与冠层光谱反射率呈正相关。其中, 花期和铃期两者相关性达显著水平, 而蕾期和吐絮期两者相关均不显著。在短波红外波段(1300~1800 nm), 受外界因素影响比较大, 土壤含氮量与冠层光谱反射率相关性均不显著。

**2.2.2 棉花冠层光谱参量与土壤全氮含量的相关关系。**对棉花关键生育期的冠层光谱特征参量与土壤全氮含量相关分析表明(表 4), 不同时期所选的 9 个冠层光谱的吸收、反射特征参量和 3 个植被指数与土壤全氮含量间的相关性有较大差异。其中, 与土壤全氮含量显著相关的高光谱参数所包含的光谱波段主要集中在 500~1690 nm 范围内, 这与从植株全氮含量和高光谱反射率相关分析中得出的氮素敏感波段基本吻合。在整个生育期, 除了吐絮期的最优土壤调节植被指数 OSAVI 与土壤氮含量达到显著相关水平外, 其余冠层光谱特征参量与土壤含氮量间均达到 1% 极显著相关水平。其中, P\_ND1100 在四个关键生育时期与土壤氮素含量的相关系数均超过 0.9, 并且在铃期二者之间相关性最佳( $R^2=0.9296$ )。



注:  $n=10$ ,  $r_{0.05}(9) = 0.602$ ,  $r_{0.01}(9) = 0.735$ .

图 1 棉花冠层反射光谱与土壤含氮量的相关性分析

Fig.1 Correlation analysis between the reflectance spectral and plant nitrogen concentration of cotton

表4 不同生育时期棉花土壤全氮含量与光谱特征参数相关系数表

Table 4 Correlation coefficients between soil nitrogen content and characteristic variables of hyperspectral in different growth stages

光谱参数	蕾期	花期	铃期	吐絮期
PRI(570,531)	0.9147**	0.8468**	0.7211*	0.8370**
OSAVI	0.8845**	0.8324**	0.8975**	0.8820*
MSBI	0.7932**	0.8210**	0.8881**	0.7752**
Area672	0.8573**	0.7847**	0.9373**	0.7958**
ND672	-0.8321**	-0.8048**	-0.8783**	-0.8008**
Depth980	0.7877**	0.9173**	0.8370**	0.7169*
Area980	0.7740**	0.8164**	0.8454**	0.7892**
P_ND920	0.8621**	0.8667**	0.7385**	0.7518**
P_Depth1100	0.8819**	-0.8446**	0.7758**	0.7458**
P_ND1100	0.9099**	0.9153**	0.9296**	0.9096**
P_Area1100	0.9181**	0.9164**	0.7453**	0.8638**
P_Depth1690	-0.8546**	-0.8030**	-0.8267**	-0.7955**

注: n=10, r<sub>0.05</sub>(9)=0.602, r<sub>0.01</sub>(9)=0.735.

选择不同时期与土壤全氮含量相关性最佳的光谱参量,即 P\_Area 1100、Depth 980、Area 672、OSAVI 构建棉花蕾期、花期、铃期、吐絮期的土壤全氮含量估测模型(图 2、3、4、5),并对模型进行了检验。

### 2.3 棉花冠层高光谱参量与土壤全氮含量的回归模型

通过对棉花冠层光谱特征参量与土壤全氮含量的回归分析,建立了利用冠层光谱参量反演土壤全氮含量的估算模型(表 5)。对所建反演模

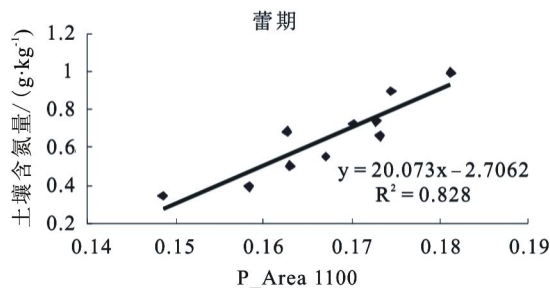


图2 土壤含氮量与 P\_Area1100 的关系

Fig.2 Relationships of soil nitrogen content and P\_Area1100

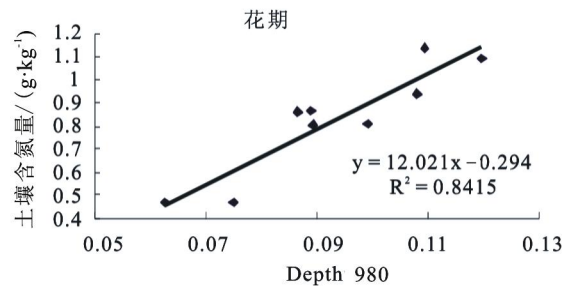


图3 土壤含氮量与 Depth980 的关系

Fig.3 Relationships of soil nitrogen content and Depth980

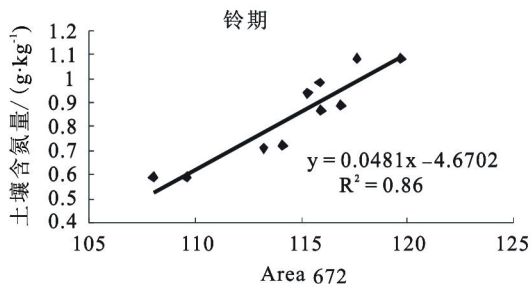


图4 土壤含氮量与 Area672 的关系

Fig.4 Relationships of soil nitrogen content and Area980

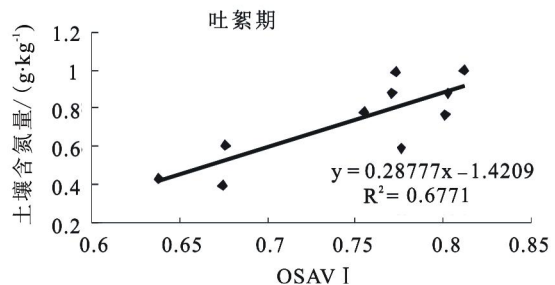


图5 土壤含氮量与 OSAVI 的关系

Fig.5 Relationships of leaf nitrogen content and OSAVI

表 5 不同生育时期土壤全氮含量(y)与冠层高光谱参数(x)的定量关系

Table 5 Quantitative relationships of soil nitrogen concentration (y) to main hyperspectral parameter (x) in different growth stages

时期	光谱参数	回归方程	$R^2$	RMSE	RE
蕾期	P_ND1100	$y = 20.073x - 2.7062$	0.8280	0.0816	0.1270
花期	P_ND1100	$y = 29.3x - 3.084$	0.8835	0.0239	0.2001
铃期	P_ND1100	$y = 42.3x - 8.847$	0.8566	0.0219	0.1119
吐絮期	P_ND1100	$y = 35.095x - 6.664$	0.7801	0.1129	0.1534

型 RMSE、RE 的分析结果表明,在四个关键生育时期精度均较高的冠层光谱参量是归一化反射高度 P\_ND 1100。用 P\_ND 1100 建立的回归模型在棉花的四关键生育时期估测土壤全氮含量具有通用性,且四个时期的拟合方程均呈线性(表 5),其中花期估测精度最高( $R^2=0.8835$ ,  $RMSE=0.0239$ )。四个时期建立的回归模型中吐絮期的决定系数最低,这可能是因为生育后期植株衰老、叶片发黄、冠层光谱误差较大所致。

### 3 结论

本文以棉花冠层光谱及棉田土壤氮素营养为研究对象,主要探讨了利用棉花冠层光谱监测土壤氮素营养状况的方法。通过分析蕾期、花期、铃期和吐絮期冠层反射光谱特征与土壤氮素含量间的关系,利用多元统计和逐步回归分析方法建立土壤全氮含量与冠层反射光谱参量间的定量估测模型,初步建立了不同生育时期土壤氮素状况的监测模型,结论如下:

**3.1** 棉花不同生育时期的土壤全氮含量与冠层光谱反射率的相关性有较大差异。在可见光波段 400~700 nm,土壤全氮含量与其光谱反射率在整个生育期均呈现负相关;在近红外波段的 700~1300 nm 范围,两者呈正相关,这与从植株全氮含量和高光谱反射率相关分析中得出的氮素敏感波段基本吻合。但是在 1300~1800 nm 波段范围内,不同时期的土壤含氮量与冠层光谱反射率相关性较为凌乱。

**3.2** 棉花关键生育期的冠层光谱特征参量与土壤全氮含量相关分析表明,除了吐絮期的最优土壤调节植被指数(OSAVI)与土壤氮含量达到显著相关水平外,其余冠层光谱特征参量与土壤含氮量间均达到极显著相关水平。其中,P\_ND 1100

在四个关键生育时期与土壤氮素含量的相关系数均达到 0.9 以上,并且在铃期二者之间相关性最佳( $R=0.9296$ )。

**3.3** 用归一化吸收深度 P\_ND 1100 建立的土壤全氮含量估测的回归模型在棉花的各个关键生育时期具有通用性,并且四个时期的拟合方程均呈线性。其中,在花期估测精度最高,与土壤全氮含量呈极显著的一次函数关系( $R^2=0.8835$ ,  $RMSE=0.0239$ ),能够较好地估测棉田土壤氮素营养状况。

#### 参考文献:

- [1] 徐永明, 蔺启忠, 黄秀华, 等. 利用可见光/近红外反射光谱估算土壤总氮含量的实验研究[J]. 地理与地理信息科学, 2005, 21(1): 19-22.  
XU Yong-ming, Lin Qi-zhong, Huang Xiu-hua, et al. Experimental study on total nitrogen concentration in soil by VNIR reflectance spectrum[J]. Geography and Geo-Information Science, 2005, 21(1): 19-22.
- [2] KIMES D S, Idso S B, Pinter P J, et al. View angle effects in the radiometric measurement of plant canopy temperatures [J]. Remote Sensing of Environment, 1980, 10: 273-284.
- [3] KRISHNAN P, John D, Alexander, et al. Reflectance technique for predicting soil organic matter [J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44: 1282-1285.
- [4] BEN-DOR E, Banin A. Near - infrared analysis as a rapid method to simultaneously evaluate several soil properties [J]. Soil Science Society of America Journal, 1995, 59: 364-372.
- [5] KOOISTRA L, Wehrens L, Leuven RSEW, et al. Possibilities of visible - near - infrared spectroscopy for the assessment of soil contamination in river floodplains [J]. Analytica Chimica Acta, 2001, 446: 97-105.
- [6] LIU Wei-dong, Baret F, Gu Xing-fa, et al. Using hyperspectral data to estimate soil surface moisture under experimental conditions [J]. Journal of Remote Sensing, 2004(5): 434-442.
- [7] 王 渊, 王福民, 黄敬峰. 油菜不同组分生物量光谱遥感估算

- 模型[J]. 浙江农业大学学报, 2004, 16 (2):79-83.
- WANG Yuan , Wang Fu-min, Huang Jing-feng. The models for estimation of dry biomass from different components of rapeseed using canopy spectral data [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2004, 16(2): 79-83.
- [8] 王人潮,黄敬峰. 水稻遥感估产[M]. 北京:农业出版社, 2001.
- WANG Ren-chao,Huang Jing-feng. Rice estimation by remote sensing[M]. Beijing: Agriculture Press, 2001.
- [9] 王 珂, 蒋亨显, 王人潮. 建立大田早稻农学光谱估产模式研究初报[J].浙江农业大学学报, 1993, 19(增刊): 66-72.
- WANG Ke, Jiang Heng-xian, Wang Ren-chao. Study on the establishment of agronomic spectral yield estimation model for early rice in the field[J]. Journal of Zhejiang University, 1993, 19 (S): 66-72.
- [10] BARET F, Guyot G, Major D J. TSAVI: a vegetation index which minimizes soil brightness effects on LAI and APAR estimation[C]// 12th Canadian Symposium on Remote Sensing and IGARRS,89. Vancouver, Canada: IGARSS, 1989: 1355-1358.
- [11] 王登伟,黄春燕,张 伟, 等. 高光谱数据与棉花叶绿素含量和叶绿素密度的相关分析[J].棉花学报,2008,20(5):368-371.
- WANG Deng-wei, Huang Chun-yan, Zhang Wei, et al. Relationship analysis between cotton chlorophyll content, chlorophyll density and hyperspectral data[J]. Cotton Science, 2008, 20(5): 368-371.
- [12] 李章成,周清波,江道辉,等. 棉花苗期冻害高光谱特征研究[J].棉花学报,2008, 20(4):306-311.
- LI Zhang-cheng, Zhou Qing-bo, Jiang Dao-hui, et al. Study on hyperspectral features of the frostbite cotton at seedling stage [J]. Cotton Science, 2008, 20(4): 306-311.
- [13] RICHARDSON A J, Wiegand C L. Distinguishing vegetation from soil background information[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1977, 43(12): 1541-1552.
- [14] HUETE A R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI)[J]. Remote Sensing of Environment, 1988, 25: 295-309.
- [15] GAMON J A. A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency[J]. Remote Sensing of Environment, 1992, 41: 35-44. ●

