

文章编号: 0258-7025(2009)Supplement 2-0199-04

# 便携式作物氮素营养无损监测光谱仪的研制

徐志刚 焦学磊 朱 艳 姚 霞 田永超 曹卫星\*

(南京农业大学江苏省信息农业高新技术研究重点实验室, 江苏 南京 210095)

**摘要** 氮素是作物生长发育和产量品质形成所必需的营养元素。实时、快速、无损、准确地监测作物氮素状况,对于诊断作物生长特征、指导合理施氮、提高氮肥利用效率、降低因过量施氮引起的农业面源环境污染等具有重要意义。解析了作物氮素营养无损监测的光谱学和生理生态学机理,研究了作物氮素光谱信息获取的原理和方法,设计并研制出便携式作物氮素无损监测光谱仪,并基于水稻田间试验数据对仪器进行了测试。结果表明,所研制的作物氮素无损监测光谱仪性能良好,能够适应田间的复杂环境和监测要求。

**关键词** 光学器件;光谱仪;氮素;无损测量;传感器;评价

中图分类号 TN247 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL200936s2.0199

## Design of Portable Nitrogen Non-Destructive Monitoring Spectrum Instrument for Crop

Xu Zhigang Jiao Xuelei Zhu Yan Yao Xia Tian Yongchao Cao Weixing

(*Jiangsu Key Laboratory for Information Agriculture, Nanjing Agriculture University,*

*Nanjing, Jiangsu 210095, China*)

**Abstract** Nitrogen is one of the necessary nutrient elements for crop growth and products, and the monitoring of crop nitrogen nutrition by the real-time, rapid, non-destructive and accurate way is of significance in estimating crop growth parameters, enhancing nitrogen use efficiency, reducing farmland contamination from excessive use of fertilizer nitrogen. The mechanisms of non-destructive monitoring of crop nitrogen nutrition are investigated by spectroscopy and eco-physiological bases. The theoretical basis and method the obtaining the crop nitrogen-specific spectra information are shown, and the portable nitrogen non-destructive monitoring spectrum instrument for crop is designed and manufactured. Based on the data from rice in field, the instrument is tested and evaluated. The results show that the instrument worked stably and finely, which is very suitable to the nitrogen non-destructive monitoring for crop in field.

**Key words** optical devices; spectroscope; nitrogen; non-destructive measurement; sensor; evaluation

## 1 引 言

氮素营养是影响作物生长的最主要的限制因子,施用氮素化肥已经成为作物高产栽培的主要农作技术<sup>[1]</sup>。但我国是氮肥消耗量最大、也是过量施氮严重的国家,单位耕地面积上年均用量 184 kg/hm<sup>2</sup> 以上,是世界平均水平的三倍<sup>[2]</sup>,这不仅降低了氮肥利用率和食品安全质量、加剧生产成本和氮肥流失<sup>[3,4]</sup>,还造成水体污染和富营养化,引

起严重的环境问题<sup>[5]</sup>。因而,准确获取作物氮素信息以合理使用氮肥显得尤为重要。与传统的实验室化学分析定量法、目测定性法和叶色卡比对半定量法相比,便携式作物氮素无损监测光谱仪能够实时、快捷、无损、准确地获取作物氮素营养信息,是指导农业生产精量施肥、解决过量施氮的关键装备。近年来,光谱分析理论与技术在农业中的应用研究<sup>[6-8]</sup>受到广泛关注,但用于田间作物氮素监测的

**基金项目:** 国家 863 计划(2006AA10Z202-1,2006AA03A165)、国家自然科学基金(30571092,30972035)和江苏省博士后科研资助计划资助课题。

**作者简介:** 徐志刚(1967—),男,博士,教授,主要从事农业信息工程方面的研究。E-mail: xuzhigang@njau.edu.cn

\* **通信联系人。** E-mail: caow@njau.edu.cn

光谱仪研究少见报道。本文在分析研究作物氮素营养无损监测的光谱学和生理生态学机理以及作物光谱信息获取原理方法的基础上,研制出便携式作物氮素无损监测光谱仪,并基于水稻田间试验数据对仪器进行了测试与评价。

## 2 作物氮素营养无损监测的光谱学与生理学机理

作物体内主要氮素形态所反射的光波段集中在可见光和红外光区域,前者是电子跃迁光谱,后者是分子振动光谱,这些波段的光谱反射率对氮素组分含量的变化异常敏感,称为氮素波段或敏感光谱。作物氮素无损监测主要分为基于作物冠层叶片反射光谱的植株群体监测和基于单个叶片反射光谱的植株个体监测。前者具有监测面积大、信息丰度好和随机误差小、监测精度高等优点,特别适合于大田和野外大区域尺度的定点网络或移动便携监测。太阳光投射进入冠层叶片内部后,在冠层叶片群间经历多次反射、折射、衍射和吸收,再反射到冠层表面产生漫反射光谱,该漫反射光谱负载了叶片群体的氮素信息。作物氮素无损监测正是基于作物氮素营养参与与敏感光谱参量的定量关系模型,从而通过监测光谱特性实现无损定量反演作物的氮素参量。

作物冠层反射光谱的提取易受土壤背景、传感器姿态、大气吸收、冠层结构等因素干扰,导致监测误差过大。构造光谱植被指数是消减干扰、提高监测精度的主要方法,光谱植被指数以其特有的生物学机理和便捷的获取方法成为了无损监测作物生长状况的有效途径和定量指标。作物氮素无损监测光谱仪主要采用比值植被指数(RVI)、归一化植被指数(NDVI)和差值植被指数(DVI)等<sup>[9]</sup>。

## 3 作物氮素营养无损监测光谱仪的光学机理

### 3.1 作物冠层特征反射光谱反射率 $\rho$ 的算法

作物冠层可以视为朗伯面<sup>[10]</sup>(如图1),朗伯余弦定律的数学表示式为

$$\frac{d\phi}{dAd\omega} = B \times \cos\theta, \quad (1)$$

式中 $B$ 为常数,是漫反射面的反射辐射亮度,单位为 $\text{W} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ ;  $\phi$ 为光功率,单位为 $\text{W}$ ;  $A$ 为光所投射的面积,单位为 $\text{cm}^2$ ;  $\omega$ 为立体角,单位为 $\text{sr}$ 。

设 $M$ 为漫反射面的单位面积向上半球空间反

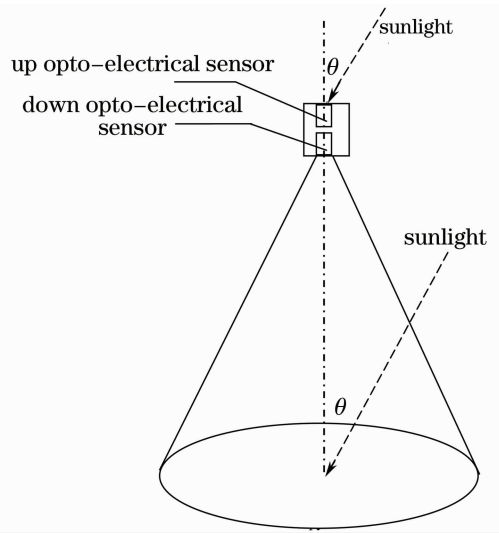


图1 监测仪光学原理图

Fig. 1 Schematic of the optical principle for spectrum instrument

射总光功率,则由(1)式得

$$M = \iint \frac{d\phi}{dA} = \iint B \cos \theta d\omega = B \int_0^{0.5\pi} \cos \theta \sin \theta d\theta \int_0^{2\pi} d\phi = \pi B. \quad (2)$$

设 $E$ 为入射至漫反射面上的辐射照度, $\rho$ 为半球反射率,则有

$$M = \rho E. \quad (3)$$

由(2)式和(3)式,得

$$\rho = \frac{\pi B}{E}. \quad (4)$$

由(4)式可知,漫反射面的亮度 $B$ 和半球反射率 $\rho$ 之间存在着明确的数理关系,要想探测作物冠层漫反射面的反射率,只需探测出入射到冠层的照度和由冠层漫反射面的亮度值,通过(4)求得反射率 $\rho$ 值。

### 3.2 作物冠层特征反射光谱反射率 $\rho$ 的探测方法

如图1所示,采用上、下两只光电传感器分别探测太阳辐射照度 $E$ 和冠层漫反射面的亮度 $B$ 。由于太阳光束可看成是平行光,上光电传感器探测到的辐射照度等同于作物冠层的照度。太阳光以 $\theta$ 角经余弦校正器和滤光片入射到上光电传感器的光敏面上,光电流输出 $I_{\text{SCU}}$ 与辐照度成线性关系<sup>[11]</sup>

$$I_{\text{SCU}} = S \times \beta \times E \times \cos \theta, \quad (5)$$

式中 $S$ 为光电探测器的光照灵敏度, $\beta$ 为余弦校正器和滤光片衰减系数, $E$ 为辐照度,单位为 $\text{W}/\text{cm}^2$ 。

亮度为 $B$ 的小麦冠层漫反射光经平面玻璃、滤光片和透镜投射到下光电传感器的光敏面上,光电流输出 $I_{\text{SCD}}$ 与亮度 $B$ 成线性关系,其对应的数学表

达式为

$$I_{SCD} = S' \times \beta' \times B \times \psi, \quad (6)$$

式中  $S'$  为光电探测器的光照灵敏度,  $\beta'$  为下光管对光的衰减系数,  $B$  为小麦冠层辐射亮度,  $\psi$  为下光电传感器的视场立体角, 单位 sr。

综合(4), (5)和(6)式, 并令  $K = \frac{\pi S \beta}{S' \beta' \psi}$ , 则小麦冠层的反射率可表示为

$$\rho = k \times \frac{I_{SCD}}{I_{SCU}} \times \cos \theta, \quad (7)$$

其中  $K$  与光学系统结构和光学元件的特性有关, 由标准白板校正求得<sup>[12]</sup>。

## 4 作物氮素营养无损监测光谱仪的实现

如图 2 所示, 作物氮素营养无损监测光谱仪主要由支架、光谱信号传感器总成和主机 3 个部分组成。

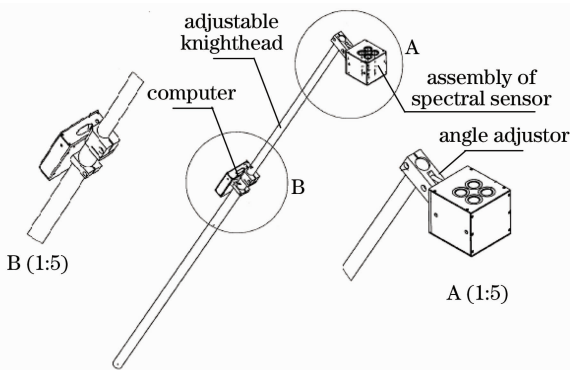


图 2 作物氮素无损监测光谱仪设计图

Fig. 2 Design of the nitrogen non-destructive monitoring spectrum instrument

支架由可调伸缩支撑杆和角度调节器组成(如图 2)。任意调节支撑杆的长度可适应田间作物高度和监测视场的要求。角度调节器用于调节光谱信号传感器总成相对于可调伸缩支撑杆的角度。

光谱信号传感器总成主要由上、下光电传感器、信号变选电路组成(如图 3)。采用窄带干涉滤光片滤波得到 4 个波段的特征光谱信息: 每个波段包含上、下光电传感器, 上光电传感器用于检测背景照度值, 下光电传感器用于检测作物冠层反射亮度值。4 只上光电传感器和 4 只下光电传感器构成了 8 个采集通道, 每个通道的光电探测器的输出电流经光电信号变选电路处理后传至主机。

主机硬件系统由 A/D 转换模块、单片机模块、存储模块、显示模块、键盘模块、通信模块和电源管

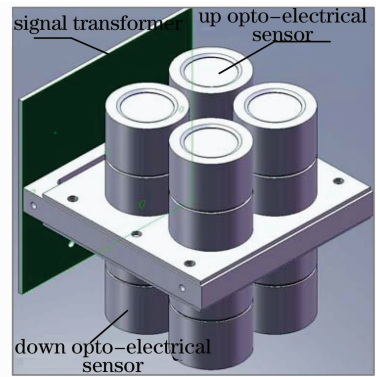


图 3 光谱信号传感器总成

Fig. 3 Schematic of the assembly of spectral sensor

理模块组成。单片机模块接收并按设定程序处理来自 A/D 转换模块的数字量。主机软件系统采用 C51 单片机语言编写, 光谱指数的构建算法、作物氮素营养的光谱监测定量模型和参数调校算法等均编写在软件里, 并写入单片机。

## 5 测 试

### 5.1 田间监测的适应性

仪器对晴朗的天气具有很好的适应性。适宜监测时段的试验表明, 仪器在太阳高度小于  $35^\circ$  监测时, 测得的光谱反射率数据略有增高; 在太阳高度角大于  $35^\circ$  情况下, 测量数据稳定, 因此适宜监测时段为 10:00 至 14:00。适宜监测高度的试验表明, 增加高度能够增大视场, 使冠层更接近于漫反射面, 数据测量的重复性好, 田间监测时, 传感器距离作物冠层的高度应在 1.2 m 以上。

### 5.2 氮素监测检验

在水稻实验区进行田间测试, 监测不同水平的施氮小区, 读取仪器显示的叶片氮素积累量; 同步取样植株带回实验室作化学分析, 获得叶片真实氮积累量数据。对两组测量数据作相关性分析, 如图 4

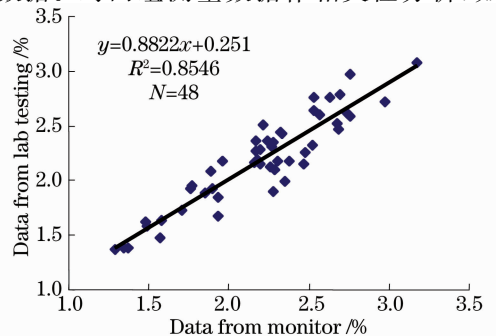


图 4 氮素的仪器监测值与实验室分析值的检验

Fig. 4 Relationship between the data for nitrogen from monitor and the data from lab testing

所示,  $R^2=0.8546$ , 表明仪器性能优良, 可满足田间实时监测的要求。

## 6 结 论

在分析作物氮素营养无损监测的光谱学和生理生态学机理的基础上, 研究了作物氮素光谱信息获取的原理和方法, 设计并研制出便携式作物氮素无损监测光谱仪。开展了田间水稻试验测试, 经过实验室氮素测定数据(真实值)与监测仪氮素数据(读数)的比对分析, 结果表明, 所研制的作物氮素无损监测光谱仪性能良好, 氮素监测仪读数与真实值之间的相关性为 0.8546, 能够适应田间的复杂环境和监测要求。

### 参 考 文 献

- 1 Yang Jianchang, Wang Zhiqin, Zhu Qingsen. Effect of nitrogen nutrition on rice yield and its physiological mechanism under different status of soil moisture [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 1996, **29**(4): 58~66  
杨建昌, 王志琴, 朱庆森. 不同土壤水分下氮素营养对水稻产量的影响及其机理研究[J]. *中国农业科学*, 1996, **29**(4): 58~66
- 2 The Committee of the Agricultural Annual in China. The Agricultural Annual in China[M]. Beijing: Chinese Agricultural Press, 2001  
中国农业年鉴编辑委员会. 中国农业年鉴 [M]. 北京, 中国农业出版社, 2001
- 3 Liu Lijun, Sang Dazhi, Liu Cuilian *et al.*. Effects of real-time and site-specific nitrogen managements on rice yield and nitrogen use efficiency[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2003, **36**(12): 1456~1461  
刘立军, 桑大志, 刘翠莲等. 实时实地氮肥管理对水稻产量和氮素利用率的影响[J]. *中国农业科学*, 2003, **36**(12): 1456~1461
- 4 Jiang Ligeng, Cao Weixing, Gan Xiuqin *et al.*. Nitrogen uptake and utilization under different nitrogen management and influence on grain yield and quality in rice [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, **37**(4): 490~496  
江立庚, 曹卫星, 甘秀芹等. 不同施氮水平对南方早稻氮素吸收利用及其产量和品质的影响[J]. *中国农业科学*, 2004, **37**(4): 490~496
- 5 Cui Yuting, Cheng Xu, Han Chunru *et al.*. The economic and ecological satisfactory amount of nitrogen fertilizer using on rice in TaiLake watershed [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, **20**(4): 659~662  
崔玉亭, 程 序, 韩纯儒等. 苏南太湖流域水稻经济生态适宜施氮量研究[J]. *生态学报*, 2000, **20**(4): 659~662
- 6 Zhang Fang, Su Rongguo, Wang Xiulin *et al.*. Fluorescence characteristics extraction and differentiation of phytoplankton [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(12): 2052~2059  
张 芳, 苏荣国, 王修林等. 浮游植物荧光特征提取及识别测定技术[J]. *中国激光*, 2008, **35**(12): 2052~2059
- 7 Zhao Jiwen, Guo Zhiming, Chen Quansheng *et al.*. Feasibility study on use of near-infrared spectroscopy in quantitative analysis of catechins in green tea [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(12): 2302~2306  
赵杰文, 郭志明, 陈全胜等. 近红外光谱法快速检测绿茶中儿茶素的含量[J]. *光学学报*, 2008, **28**(12): 2302~2306
- 8 Xue Long, Li Jing, Liu Muhua. Detecting pesticide residue on navel orange surface by using hyperspectral imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(12): 2277~2280  
薛 龙, 黎 静, 刘木华. 基于高光谱图像技术的水果表面农药残留检测试验研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(12): 2277~2280
- 9 A. A. Gitelson, Y. J. Kaufman, M. N. Merzlyak. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOSMOD IS [J]. *Remote Sens. Environ.*, 1996, **58**(3): 289~298
- 10 Jin Zhonghui. The application of the reflect spectrum testing principle on agriculture [J]. *Physics*, 1992, **21**(4): 225~231  
金仲辉. 野外地物反射光谱的测试原理及其在农业上的应用 [J]. *物理*, 1992, **21**(4): 225~231
- 11 Pu Zhaobang. The Measurement Technology of Photoelectricity [M]. Beijing: China Mechanics Press, 2005. 63~67  
浦昭邦. 光电测试技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005. 63~67
- 12 Teng Xiujin, Zeng Xiaodong. The application of normal white board on color metrology [J]. *The Metrology Technology*, 1996, (4): 35~37  
腾秀金, 曾晓栋. 色度计量中标准白板的应用 [J]. *计量技术*, 1996, (4): 35~37