

# 不同水氮条件下水稻冠层反射光谱与植株含水率的定量关系

田永超 曹卫星\* 姜东 朱艳 薛利红

(南京农业大学江苏省信息农业高新技术研究重点实验室, 南京 210095)

**摘要** 研究了不同土壤水氮条件下水稻 (*Oryza sativa*) 冠层光谱反射特征和植株水分状况的量化关系。结果表明, 水稻冠层近红外光谱反射率随土壤含水量的降低而降低, 短波红外光谱反射率随土壤含水量的降低而升高。相同土壤水分条件下, 高氮水稻的冠层含水率高于低氮水稻的冠层含水率; 同一水分条件下, 高氮处理的可见光区和短波红外波段光谱反射率低于低氮处理, 近红外波段光谱反射率高于低氮处理。发现拔节后比值植被指数 ( $R_{810}/R_{460}$ ) 与水稻叶片含水率和植株含水率呈极显著的线性相关, 模型的检验误差 (Root mean square Error, RMSE) 分别为 0.93 和 1.50。表明比值植被指数  $R_{810}/R_{460}$  可以较好地监测不同生育期水稻叶片和植株含水率。

**关键词** 水稻 土壤水分 植株含水率 反射光谱 比值植被指数 监测模型

## RELATIONSHIP BETWEEN CANOPY REFLECTANCE AND PLANT WATER CONTENT IN RICE UNDER DIFFERENT SOIL WATER AND NITROGEN CONDITIONS

TIAN Yong-Chao CAO Wei-Xing\* JIANG Dong ZHU Yan and XUE Li-Hong

(Hi-Tech Key Laboratory of Information Agriculture, Jiangsu Province, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

**Abstract** The ability to non-destructively monitor crop water status by remote sensing is of significant importance for optimizing of crop irrigation systems and precision farming. In order to develop quantitative models for monitoring rice water status by canopy reflectance spectra, an investigation was conducted to study the relationship between canopy reflectance characteristics and plant water status under different water and nitrogen levels with different pot and pool experiments.

The results showed that the crop spectral reflectance decreased in the visible wavelength regions and short-wave infrared (SWIR) (1 400 – 1 700 nm) regions with increasing water supply, because absorption of visible light (450 – 700 nm) by leaf chlorophyll was aggravated whereas the spectral reflectance in the near infrared (NIR) (750 – 950 nm) wavelength regions increased. A high reflectance spectra flat roof formed which remained throughout the entire growth period. Under different water regimes, canopy reflectance showed similar patterns of change. Under the same water supply, the canopy spectral reflectance in the visible wavelength and SWIR regions was lower under high nitrogen supply than under low nitrogen supply rates but showed an opposite pattern in the NIR wavelength regions.

Canopy reflectance in single bands is often subject to interference by biomass, background and so on, but the ratio of two bands can alleviate interference due to topography and enlarge the difference of spectral reflectance between vegetation types thus improving the precision of estimates by spectral reflectance. Consequently, in order to eliminate some of the interferences for distinguishing leaf and canopy structure and establish the best predictive model for assessing leaf water content, all regressions between ratio indices, normalized difference indices and leaf and plant water content were conducted. The results indicated that there was a linear relationship between the vegetation index ratio ( $R_{810}/R_{460}$ ) and canopy leaf water content and plant water content after jointing stage regardless of leaf nitrogen levels, with an RMSE of 0.93 and 1.50, respectively, for model testing. It is concluded that the vegetation index ratio of  $R_{810}/R_{460}$  can be used to monitor leaf water content and plant water content at different growth stages of rice.

**Key words** Rice, Soil water, Plant water content, Spectral reflectance, Ratio vegetation index, Monitoring model

水分是影响作物生长发育的主要环境因子之一。干旱不仅造成作物大幅减产,同时也影响作物产品的品质。随着水资源的日益减少,如何根据作物水分关系来监测和诊断植株水分状况,对于科学精确地指导作物灌溉和节水生产具有极其重要的意义。

有关航空和卫星遥感对农田土壤及作物水分状况的监测,国内外已有大量研究(申广荣和田国良, 2000; 陈怀亮等, 1999; Tian *et al.*, 2001; Ceccato *et al.*, 2001),但这些方法受大气效应、图像分辨率、图像解译的精确度、仪器精度以及模型参数等因素的影响,至今难以准确监测土壤及作物的水分状况。近年来地面遥感监测技术的迅速发展,使作物水分状况信息的准确获取成为可能。许多学者围绕干旱对作物光谱特性的影响、光谱对叶片水分亏缺的响应等方面进行了探索和研究(Penuelas *et al.*, 1993; 1994; 1996; 1997; Tucker, 1980)。研究发现在 970、1 450 和 1 900 nm 附近的小麦(*Triticum aestivum*)、大丁草(*Gerbera jamesonii*)及大豆(*Glycine mas*)等植物的光谱反射率高峰能较好地反映叶片的水分状况(Fernandez *et al.*, 1994; Penuelas *et al.*, 1996),提出水分指数( $R_{900}/R_{970}$ )可用于植株水分监测(Penuelas *et al.*, 1997)。最近,以小麦抽穗期、挑旗期离体叶片为材料的研究表明,1 450 nm 附近的光谱反射率可用于地面遥感探测小麦叶片水分状况,并进一步提出利用 1 450 nm 和 1 650 ~ 1 850 nm 波段范围光谱的吸收特征诊断叶片含水率的方程(田庆久等, 2000; Tian *et al.*, 2001; 王纪华等, 2001)。上述研究虽然找出了叶片水分状况与光谱反射率之间的特定关系,给出了一些敏感波段范围及植被指数(Penuelas *et al.*, 1993; Tucker, 1980),但基于个体和离体叶片的光谱特征能否可靠地定量诊断田间作物的水分状况尚有待于证实。而利用作物冠层水平的光谱反射特征来量化植株的水分状况,从而进行水分亏缺诊断的研究还需进一步深入。

本文的目的是探讨不同水氮条件下水稻冠层反射光谱及叶片含水率和植株含水率的动态变化特征,建立冠层反射光谱特征与植物组织水分状况的量化关系,从而为水稻植株水分的非破坏性实时监测和诊断及其在精准农业中的应用提供技术支持。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验设计

分别于 2001 年和 2002 年在南京农业大学校内试验站进行了 3 个涉及不同水分处理的试验。于 2001 年进行了温室盆栽试验。试验用周转箱大小为 0.25 m<sup>2</sup>,箱沿宽 1 cm,深 35 cm。供试土壤为黄棕壤土,田间持水量为 22.8%,供试水稻品种为‘武香粳 9 号’。试验设 W<sub>1</sub>、W<sub>2</sub>、W<sub>3</sub>、W<sub>4</sub> 和 W<sub>5</sub> 等 5 个土壤水分处理(分别相当于田间持水量的 70%、80%、90%、100% 和水层管理),5 次重复,随机区组排列。氮肥用量为 200 kg·hm<sup>-1</sup>,氮磷钾配比为 2:1:2,基肥:蘖肥:促花肥:保花肥为 5:1:2:2,磷钾肥做基肥一次施用。其它管理措施同大田高产栽培。

分别于 2001 年和 2002 年进行了池栽试验。水池面积为 1 m<sup>2</sup>,深 80 cm。供试土壤及水稻品种同盆栽试验。2001 年试验设 4 个水分处理(地膜覆盖旱栽法、湿润栽培法、间歇灌溉法、水层灌溉法)和 N<sub>1</sub>、N<sub>2</sub> 两个施氮水平(150 kg·hm<sup>-1</sup>和 300 kg·hm<sup>-1</sup>)。2002 年设 W<sub>1</sub>、W<sub>2</sub>、W<sub>3</sub> 和 W<sub>5</sub> 等 4 个土壤水分处理(分别为田间持水量的 70%、80%、90% 和水层灌溉)和 2 个氮肥处理(同 2001 年)。肥料施用方法同 2001 年盆栽试验。试验为随机区组设计,重复 3 次。

在盆栽试验中,称相同重量的土壤装入各周转箱,用水完全浸泡形成土层结构后,用环刀取样测定田间持水量,然后采用每天称重法(定期去除植株重量)控制各处理到达设定土壤含水量,形成土壤水分梯度。在水池试验中,各水池装入等量土壤,每 2 ~ 3 d 定期采取耕层 20 cm 土壤,测定土壤含水量,按处理要求灌溉和控制土壤含水量。各水分处理始于有效分蘖临界叶龄期,持续到成熟期结束。

### 1.2 测定项目及方法

#### 1.2.1 测定和取样时期

2001 年盆栽试验中测定及取样时期为水稻拔节期、孕穗期、抽穗期、抽穗后 20 d 及成熟期。2001 年池栽试验中测定及取样时期为有效分蘖临界叶龄期、拔节期和抽穗期。2002 年池栽试验为拔节前 7 d,拔节期,倒 3 叶、倒 2 叶、倒 1 叶抽出期,齐穗期,齐穗后 10、20、30 d 和成熟期。

#### 1.2.2 冠层光谱

采用美国 Cropscan 公司生产的 MSR-16 型便携式多光谱辐射仪,仪器视场角为 31.1°,该仪器具有 16 个波段,光谱范围为 460 ~ 1 650 nm(Xue *et al.*, 2003)。测量选择在晴朗无云或少云的天气进行,测量时间为 10:00 ~ 14:00,测定时将盆栽试验中 4 个周转箱紧凑拼接,水稻植株向四周延伸形成一个 1.5

m<sup>2</sup> 大小的水稻植株冠层,探头垂直向下,离植株冠层顶 1.0 m,分平行水稻行向和垂直水稻行向测量,每测量点重复测量 5 次,共 10 次,取平均值作为该处理光谱反射率的值。MSR16 每生育季节校正一次即可(CROPSCAN Inc, 2000),故我们在拔节期、抽穗期光谱测量前用白板进行了校正。按类似的方法,测定池栽水稻冠层的反射光谱。

1.2.3 叶片和植株含水率

光谱测量后,每小区选均匀一致植株 2 株,迅速摘取茎秆上所有叶片,分叶片、茎鞘和穗(抽穗后)分别装入自封塑料袋,带回实验室称取鲜重,再放入烘箱烘至恒重,称取各部位干重。植株鲜、干重为各部位鲜、干重之和。叶片及植株含水率计算公式为:

$$\text{叶片(植株)含水率(\%)} = \frac{\text{叶片(植株)鲜重} - \text{叶片(植株)干重}}{\text{叶片(植株)鲜重}} \times 100$$

1.3 数据分析及利用

采用 EXCEL97 软件,对 2002 年池栽试验 10 个生育时期不同水氮条件下的叶片含水率和植株含水率数据及对应的 120 个冠层光谱反射率比值进行统计分析,建立监测模型。利用 2001 年盆栽试验 5 个生育时期数据和 2001 年池栽试验的 3 个生育期数据进行叶片含水率和植株含水率监测模型的检验。检验方法采用国际上通用的统计方法 RMSE(Root mean square error)和相对误差(RE)方法(Cao & Moss, 1997)。

2 结果与分析

2.1 不同水氮处理下水稻冠层的反射光谱特征

不同水氮水平显著影响水稻植株的生长,冠层

光谱反射率也发生了相应的变化。随土壤水分含量的增加,可见光区(460 ~ 710 nm)的反射率逐渐降低;近红外波段(750 ~ 950 nm)光线被水稻叶片细胞多次折射和反射,形成近红外反射光谱平台,反射率逐渐增加;而短波红外波段(1 400 ~ 1 700 nm)的光量子与叶片水分中的 H-O 键发生作用,导致被强烈吸收,冠层反射率逐渐减小(图 1)。不同水分和氮素组合条件下,冠层光谱随土壤水分变化趋势一致(图 2)。同一水分处理下,高氮处理的水稻冠层光谱反射率在可见光区和短波红外波段低于低氮处理,在近红外波段高于低氮处理。各个生育期的冠层光谱变化模式基本一致。图 1 和图 2 均选取 460、810 和 1 500 nm 示例。

2.2 水稻冠层反射光谱与水分状况的定量关系

近红外波段中 760、810、870 nm 与可见光波段中 460 nm 的反射率比值与叶片含水率均呈显著的正相关关系;近红外波段中 760、810、870、950、1 100、1 220 nm 与 460 nm 的反射率比值与水稻植株含水率呈显著的正相关关系。其中 810 nm 波段与 460 nm 波段的光谱反射率比值( $R_{810}/R_{460}$ )与叶片含水率和植株含水率均呈极显著相关(图 3,图 4), $R_{810}/R_{460}$ 与植株含水率的相关性更好。据此建立叶片含水率与植株含水率预测方程如下:

$$\text{叶片含水率(\%)} = 1.038 \times \frac{R_{810}}{R_{460}} + 59.084$$

( $R = 0.688 \ 0^{**}$ ,  $n = 238$ )

$$\text{植株含水率(\%)} = 2.910 \ 4 \times \frac{R_{810}}{R_{460}} + 44.163$$

( $R = 0.802 \ 1^{**}$ ,  $n = 216$ )

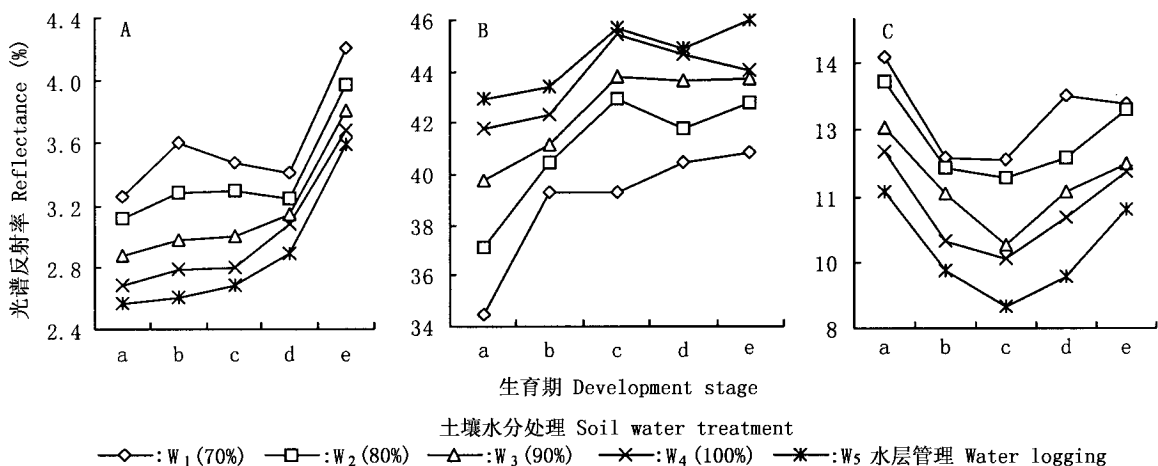


图 1 不同土壤水分下 460 (A)、810 (B) 和 1 500 nm (C) 波段反射率随水稻生育期的变化

Fig. 1 The reflectance at 460 (A), 810 (B) and 1 500 nm (C) over the whole growth period of rice under five different water levels a: 拔节期 Jointing b: 孕穗期 Booting c: 抽穗期 Heading d: 乳熟期 Milking e: 成熟期 Maturity

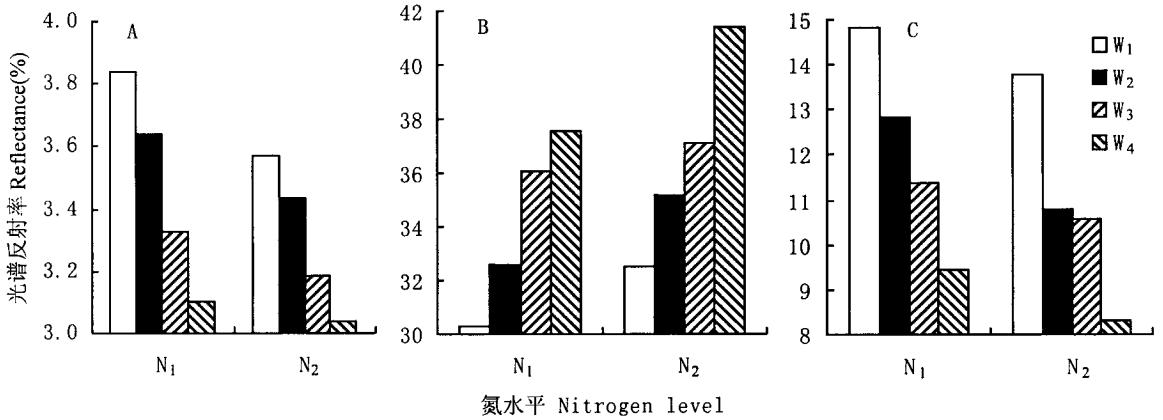


图2 不同水氮处理下拔节期水稻冠层 460 (A)、810 (B)和 1 500 nm (C)波段的光谱反射率

Fig.2 The reflectance at 460 (A), 810 (B) and 1 500 nm (C) at jointing stage of rice under different water and nitrogen treatments  
 $N_1$ :  $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-1}$   $N_2$ :  $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-1}$  W1, W2, W3, W4, W5: 同图1 See Fig.1

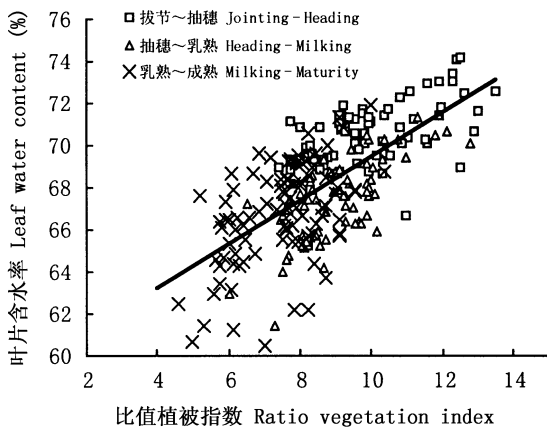


图3 水稻叶片含水率与比值植被指数 ( $R_{810}/R_{460}$ ) 的关系

Fig.3 Relationship between leaf water content and ratio vegetation index ( $R_{810}/R_{460}$ ) in rice

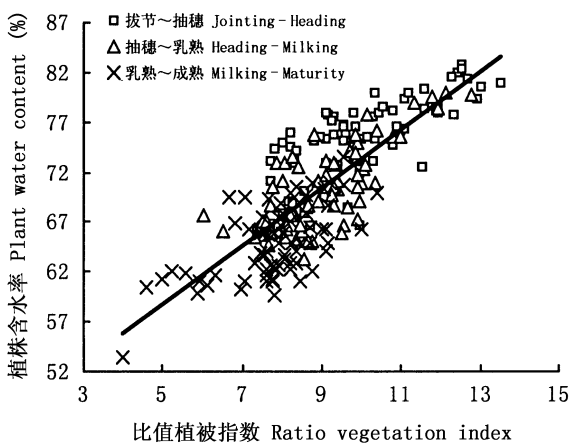


图4 水稻植株含水率与比值植被指数 ( $R_{810}/R_{460}$ ) 的关系

Fig.4 Relationship between plant water content and ratio vegetation index ( $R_{810}/R_{460}$ ) in rice

利用 2001 年盆栽 5 个生育时期试验数据和 2001 年池栽试验的拔节、抽穗和成熟期试验数据, 对叶片含水率诊断模型和植株含水率反演模型进行了检验。结果表明, 叶片含水率实测值与预测值之间的相关系数  $R^2$  为 0.94 ( $n = 41$ ), 均方差的根值 RMSE 为 0.93, 平均相对误差为  $-0.0016$  (图 5A); 植株含水率的实测值与预测值之间的  $R^2$  为 0.97 ( $n = 88$ ), RMSE 为 1.50, 平均相对误差为  $-0.0024$  (图 5B)。说明叶片和植株含水率的预测模型均具有较高的符合度和预测性。

### 3 结论与讨论

利用遥感信息提取作物冠层叶片水分状况的信息是实施精确作物水分管理的关键技术之一。有关光谱对叶片水分胁迫下的响应及其关系, 国内外已有一些研究(田庆久等, 2000; Tian *et al.*, 2001; 王纪华等, 2001)。Hinzman 等(1986)分析了水分和氮素对小麦光谱的影响, 但没有提出量化关系和水分监测模型。本研究建立了基于冠层比值植被指数 ( $R_{810}/R_{460}$ ) 的水稻叶片含水率和植株含水率的量化监测模型, 能较准确地监测拔节后水稻不同生育期冠层水分状况的变化, 从而克服了以往水分遥感模型只适用于叶片和作物特定生育阶段的缺点。

本研究结果及文献资料(Fernandez *et al.*, 1994; Hinzman *et al.*, 1986)表明, 在同一水分处理下, 高氮处理的冠层含水率高于低氮处理; 高氮处理的水稻冠层光谱反射率在可见光区低于低氮处理, 近红外波段高于低氮处理, 在短波红外波段则低于低氮处理, 表明水稻植株体内不同氮素状况会影响水分吸

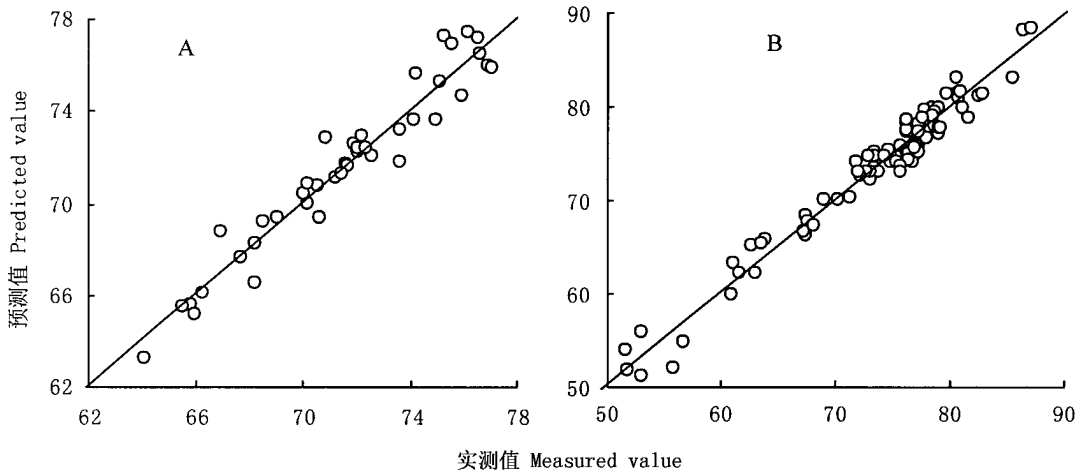


图5 叶片(A)和植株(B)含水率预测值与实测值的比较  
Fig.5 Comparison of predicted with measured leaf (A) and plant (B) water content in rice

收,从而引起作物冠层光谱发生变化。因此,在建立作物水分反演模型时,应该综合体现氮素水平对作物体内水分状况及冠层光谱的影响。Penuelas 等(1997)曾提出水分指数(WI:  $R_{970}/R_{900}$ )和归一化植被指数(NDVI:  $(R_{800} - R_{680})/(R_{800} + R_{680})$ )的比值可较好地预测植物水分状况,但未考虑水氮互作的影响。本研究所得监测模型建立在不同水氮处理组合的基础上,因而在一定程度上消除了施氮水平和水氮互作的影响。另外,本研究所得监测模型建立单一水稻品种和生态点之上,故还有待于在多个水稻品种和生态点进一步检验和完善。

水稻植株含水率是整个地上部植株的含水率,可直观方便地反映作物水分及生长状况。作物冠层反射光谱信息是叶片、茎鞘以及穗部(抽穗后)等器官对特定波长光线进行多次吸收、反射和透射之后最终反射回传感器的信息,包含了整个作物冠层的水分信息,而两波段的比值可以减轻地形、生物量及背景的影响,扩展植被等地物间的光谱差异,并可充分利用植被冠层各波段的有益光谱信息,提高光谱诊断的精度(Tracy *et al.*, 1994)。本研究中  $R_{810}/R_{460}$  与植株含水率的相关性高于与叶片含水率的相关性就证明了这一点。在利用遥感信息获取植株含水率的基础上,进一步研究建立作物冠层水分状况的量化适宜指标动态,则可实现对作物水分状况的量化遥感诊断和智能化管理决策。

#### 参 考 文 献

Cao W, Moss DN(1997). Modeling phasic development in wheat: a conceptual integration of physiological components. *Journal of Agricultural Science*, 129, 163 – 172.

Ceccato P, Flasse S, Tarantola S(2001). Detecting vegetation leaf water content using reflectance in the optical domain. *Remote Sensing of Environment*, 77, 22 – 33.

Chen HL (陈怀亮), Mao LX (毛留喜), Feng DY (冯定原) (1999). A review: theories, methods and development on soil moisture monitoring by remote sensing. *Remote Sensing Technology and Application* (遥感技术与应用), 14 (2), 55 – 65. (in Chinese with English abstract)

CROPSCAN Inc. (2000). *Data Logger Controller, User's Guide and Technical Reference*. CROPSCAN Inc., Rochester, MN.

Fernandez S, Vidal D, Simon E(1994). Radiometric characteristics of *Triticum aestivum* cv. Astral under water and nitrogen stress. *International Journal of Remote Sensing*, 15, 1867 – 1884.

Hinzman LD, Bauer ME, Daughtry CST(1986). Effects of nitrogen fertilization on growth and reflectance characteristics of winter wheat. *Remote Sensing of Environment*, 19, 47 – 61.

Penuelas J, Gamon A, Fredeen L(1994). Reflectance indices associated with physiological changes in nitrogen and water limited sunflower leaves. *Remote Sensing of Environment*, 48, 135 – 146.

Penuelas J, Filella I, Serrano L(1996). Cell wall elasticity and water index ( $R_{970nm}/R_{900nm}$ ) in wheat under different nitrogen availabilities. *International Journal of Remote Sensing*, 17, 373 – 382.

Penuelas J, Filella I, Biel C, Serrano L(1993). The reflectance at the 950 – 970 nm region as an indicator of plant water status. *International Journal of Remote Sensing*, 14, 1887 – 1905.

Penuelas J, Pinol J, Ogaya R(1997). Estimation of plant water concentration by the reflectance water index WI ( $R_{900}/R_{970}$ ). *International Journal of Remote Sensing*, 18, 2869 – 2875.

Shen GR (申广荣), Tian GL (田国良) (2000). Remote sensing monitoring of drought in Huanghe, Huaihe and Haihe plain based on GIS—the calculation of crop water stress index model. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 20, 224 – 228. (in Chinese with

English abstract)

- Tian QJ (田庆久), Gong P (宫鹏), Zhao CJ (赵春江), Guo XW (郭晓维) (2000). The feasibility analysis of diagnosing the water status of wheat by spectral reflectance. *Chinese Science Bulletin* (科学通报), 45, 2645 – 2650. (in Chinese)
- Tian Q, Tong Q, Guo X, Zhao C(2001). Spectroscopic determination of wheat water status using 1650 – 1850 nm spectral absorption features. *International Journal of Remote Sensing*, 22, 2329 – 2338.
- Tracy MB, James SS, Gary EV(1994). Light reflectance compared with other nitrogen stress measurements in corn leaves. *Agronomy*

*Journal*, 86, 934 – 938.

- Tucker CJ(1980). Remote sensing of leaf water content in the near infrared. *Remote Sensing of Environment*, 10, 23 – 32.
- Wang JH (王纪华), Zhao CJ (赵春江), Guo XW (郭晓维), Tian QJ (田庆久) (2001). Study on the water status of the wheat leaves diagnosed by the spectra reflectance. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 34, 104 – 107. (in Chinese with English abstract)
- Xue LH, Cao WX, Luo WH, Jiang D (2003). Diagnosis of nitrogen status in rice leaves with canopy spectral reflectance. *Agricultural Sciences in China*, 12(3), 250 – 257.

责任编辑: 骆世明 责任编辑: 张丽赫