

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.09.016

# 便携式作物氮素监测仪性能水稻田间测试<sup>\*</sup>

刘海俊 孙传范 曹卫星 焦学磊 习志仁 徐志刚

(南京农业大学江苏省信息农业高技术研究重点实验室, 南京 210095)

**【摘要】** 设计了2个品种和4个施氮水平的水稻田间试验,采用自行研制的便携式作物氮素监测仪获取各关键生育期的水稻冠层反射光谱信息,并实施田间协同取样和实验室氮素含量测定。通过分析水稻叶片氮含量与冠层光谱反射率及植被指数之间的相关性和定量关系,测试并评价便携式作物氮素监测仪的工作性能。结果表明,便携式作物氮素监测仪具有优异的氮素监测效果和优良的田间工作性能,在其所具备的4个特征波段中,660、710和810 nm单一波长的光谱反射率与叶片氮含量的相关性均大于0.5,并全部通过0.01水平的极显著检验;在各生育期中,所有双波段光谱植被指数与叶片氮含量的拟合系数均大于0.7,并以开花期和成熟期的拟合系数(大于0.83)为最高;对全生育期的整体分析表明,归一化光谱指数NDVI(810,710)和NDVI(710,546)与叶片氮素含量的决定系数分别达到了0.804和0.759。

**关键词:** 水稻 氮素含量 监测仪 性能分析 田间试验

**中图分类号:** S237 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)09-0080-05

## Evaluation of Portable Crop Nitrogen Monitoring Instrument Based on Rice Field Experiment

Liu Haijun Sun Chuanfan Cao Weixing Jiao Xuelei Xi Zhiren Xu Zhigang

(Jiangsu Key Laboratory for Information Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

### Abstract

By using self-developed portable instrument for crop nitrogen monitoring, the information of rice canopy reflectance spectra was obtained from the field experiments with two rice varieties and four nitrogen application rates, and the rice plant was sampled from each plot for measurement of leaf nitrogen concentration (LNC) simultaneously. The correlations and the quantitative relationships between LNC and rice canopy reflectance spectra were analyzed, and the performance of portable nitrogen monitoring instrument was evaluated. Results show that its ability in monitoring nitrogen is excellent, and its performance is steady in field condition. Testing the correlations between LNC and canopy reflectance spectrum of four characteristic bands included in the instrument, the correlations in the mono-band of 660 nm, 710 nm and 810 nm are all more than 0.5 with a significance testing ( $p < 0.01$ ). During the all growth stages, the coefficients of determination  $R^2$  between LNC and spectral vegetation index (VI) with double-bands are more than 0.7, especially in the flowering and mature stages ( $R^2 > 0.83$ ). In the whole growth period, the VI are significantly correlated with LNC, such as NDVI(810,710) and NDVI(710,546), the determination of coefficients  $R^2$  are 0.804 and 0.759.

**Key words** Rice, Nitrogen concentration, Monitoring instrument, Performance analysis, Field experiment

收稿日期: 2009-11-10 修回日期: 2009-12-31

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金资助项目(30871448)、“十一五”国家科技支撑计划资助项目(2008BADA4B02)、教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-08-0797)、江苏省创新学者攀登计划资助项目(BK20081479)和江苏省自然科学基金资助项目(BK2008330)

**作者简介:** 刘海俊, 硕士生, 主要从事信息农学研究, E-mail: 2007101089@njau.edu.cn

**通讯作者:** 徐志刚, 教授, 博士, 主要从事农业信息工程研究, E-mail: xuzhigang@njau.edu.cn

引言

作物氮素含量是评价作物长势、产量和品质的重要指标。目前,我国作物氮素或其他生长信息的监测多依赖于国外进口光谱仪,主要应用于科研领域。进口光谱仪应用于田间农业生产中存在价格高、性能冗余等问题,且受知识产权制约而难以二次开发。

快捷、实时、准确的作物氮素营养监测与诊断是作物氮肥科学管理的必要手段。有关作物氮素营养状况与冠层光谱信息的定量关系研究,在水稻、小麦、大豆、油菜等作物上已有报道<sup>[1~4]</sup>,为作物氮素营养无损监测设备的研发提供了理论支撑。植物冠层反射光谱负载了作物氮素信息,通过冠层反射光谱的监测分析能够反演作物氮素信息,这是作物氮素无损监测仪的工作机理。近年来,以田间实际生产应用为目标,相关仪器设备的研发得到了国内研究者的关注和重视<sup>[5~7]</sup>。

本文采用自行研制的便携式作物氮素监测仪,通过大田小区栽培试验,监测并获取水稻各生育期的冠层光谱反射率和叶片氮含量,研究水稻叶片氮含量与冠层光谱反射率之间的相关性以及与光谱指数之间的定量关系,以此测验并评价便携式作物氮素监测仪在田间生产实际中的性能。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于2008年在南京市农林局江宁试验站(东经118°59',北纬31°56')进行,供试品种为武香粳14和27123。土壤为黄白土,有机质含量为1.61%,全氮含量1.36 g/kg,速效磷含量为10.36 mg/kg,速效钾含量为82.1 mg/kg。氮肥肥料种类为尿素(N含量为46.2%)。两水稻品种均设4个氮素水平,分别为0、130、260和390 kg/hm<sup>2</sup>纯氮。随机区组设计,3次重复,共24个小区,小区面积为29.25 m<sup>2</sup>。施肥方案为基肥、蘖肥、促花肥、保花肥所需肥料的质量比为4:1:2.5:2.5,另外配施P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 135 kg/hm<sup>2</sup>,K<sub>2</sub>O 190 kg/hm<sup>2</sup>,均作基肥一次性施入。移栽株、行距为15 cm×25 cm,每穴2株。其他管理同常规高产田。

1.2 数据获取与处理方法

1.2.1 冠层光谱反射率

采用江苏省信息农业高技术研究重点实验室自主开发的便携式作物氮素监测仪,于水稻的N-n期、拔节期、孕穗期、开花期、灌浆期、成熟期等6个关键生育期采集冠层光谱反射率,仪器设有546、

660、710、810 nm 4个波段,带宽均为10 nm。田间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(太阳高度角大于35°)。测量时,便携式氮素监测仪的探头距冠层顶部垂直高度1.0 m,每个小区重复测量6次。每次采集前后均对监测仪实施参考板校正。

1.2.2 叶片氮含量

与冠层光谱测定同步,每小区取2穴植株带回实验室。将叶片从植株上分离后在105℃下杀青30 min,80℃干燥至恒质量,称叶片干质量,粉碎后用半微量凯氏定氮法测定叶片氮含量。

1.3 数据处理方法

对每个小区的冠层光谱反射率进行归一化处理,以消减环境因素对田间光谱测量的影响,归一化处理的公式为

$$y = \frac{x - E_{\min}}{E_{\max} - E_{\min}}$$

式中 x——每个小区所测6次原始的冠层反射率算术平均值

$E_{\max}$ 、 $E_{\min}$ ——每个小区所测6个光谱测量值的最大值、最小值

对所测得水稻冠层4个波段的光谱反射率数据实施两两组合,分别计算比值植被指数<sup>[8]</sup>(ratio vegetation index,简称RVI)、归一化植被指数<sup>[9]</sup>(normalized difference vegetation index,简称NDVI)和差值植被指数<sup>[10]</sup>(differential vegetation index,简称DVI),总计得到18个植被指数数据,各植被指数的计算方法如表1。采用SPSS 17.0统计分析软件,对计算的水稻各生育期植被指数和叶片氮含量实测值之间的关系进行回归分析。

表1 常见光谱植被指数计算公式  
Tab.1 Formulas of vegetation index

| 名称            | 计算公式                                             |
|---------------|--------------------------------------------------|
| 比值植被指数(RVI)   | $R_{VI} = \frac{\rho_{NIR}}{\rho_{RED}}$         |
| 归一化植被指数(NDVI) | $N_{DVI} = \frac{\rho_{NIR} - 1}{\rho_{VI} + 1}$ |
| 差值植被指数(DVI)   | $D_{VI} = \rho_{NIR} - \rho_{RED}$               |

注:ρ表示光谱反射率。

2 结果与分析

2.1 水稻叶片氮含量随施氮量的变化特征

叶片氮含量是表征水稻氮素状况的主要指标之一。如表2所示,在各生育期,2个水稻品种的叶片氮含量均随施氮量的增加而提高,不同处理间的差异随生育进程而表现不同;在拔节期,2个水稻品种的叶片氮含量在0、130和260 kg/hm<sup>2</sup>这3个施氮水

平间均有显著差异,但在 260 和 390 kg/hm<sup>2</sup>这 2 个施氮水平间差异不显著,说明在高氮条件下,作物表现出一定的氮饱和。在开花期和灌浆期,2 个水稻品种的叶片氮含量在 4 个施氮水平间都表现出显著的差异,这与作物强烈的氮肥需求有关。在孕穗期,2 个水稻品种叶片氮含量的变化规律不明显,在 0 和 130 kg/hm<sup>2</sup> 2 个施氮水平间差异不显著,在 130 和 260 kg/hm<sup>2</sup> 2 个施氮水平间差异显著,这可能是由于不同品种后期的氮素转运速率不同所造成的。

表 2 不同施氮量下水稻叶片氮素含量的动态变化  
Tab.2 Dynamic changes of leaf nitrogen content under different nitrogen levels

| 品 种    | 施氮水平<br>/kg·hm <sup>-2</sup> | 叶片氮素含量/%            |                    |                   |                   |
|--------|------------------------------|---------------------|--------------------|-------------------|-------------------|
|        |                              | 拔节期                 | 孕穗期                | 开花期               | 灌浆期               |
| 武香粳 14 | 0                            | 2.55 <sup>e</sup>   | 2.26 <sup>cd</sup> | 2.06 <sup>d</sup> | 2.09 <sup>d</sup> |
|        | 130                          | 3.02 <sup>cd</sup>  | 2.49 <sup>c</sup>  | 2.27 <sup>c</sup> | 2.43 <sup>c</sup> |
|        | 260                          | 3.11 <sup>abc</sup> | 2.93 <sup>ab</sup> | 2.55 <sup>b</sup> | 2.61 <sup>b</sup> |
|        | 390                          | 3.37 <sup>a</sup>   | 3.14 <sup>a</sup>  | 2.83 <sup>a</sup> | 2.77 <sup>a</sup> |
| 27123  | 0                            | 2.67 <sup>de</sup>  | 2.28 <sup>d</sup>  | 2.10 <sup>d</sup> | 2.11 <sup>d</sup> |
|        | 130                          | 3.06 <sup>bcd</sup> | 2.44 <sup>cd</sup> | 2.29 <sup>c</sup> | 2.48 <sup>c</sup> |
|        | 260                          | 3.19 <sup>ab</sup>  | 2.87 <sup>b</sup>  | 2.59 <sup>b</sup> | 2.67 <sup>b</sup> |
|        | 390                          | 3.40 <sup>a</sup>   | 3.07 <sup>a</sup>  | 2.84 <sup>a</sup> | 2.77 <sup>a</sup> |

注:不同字母表示试验处理间 5% 水平的显著差异。

总体来看,在 0 ~ 390 kg/hm<sup>2</sup>的施氮水平内,叶片氮含量变幅为 15% ~ 25%。叶片氮含量总的趋势表现为:在拔节期,27123 品种高于武香粳 14;在孕穗期,武香粳 14 高于 27123;在开花期和灌浆期,27123 高于武香粳 14。由于孕穗期是氮素转运的关键时期,孕穗期之前,作物强烈吸收土壤的氮肥,叶片氮含量开始增加,孕穗期之后氮素开始向籽粒内部转运,叶片氮含量开始下降。上述趋势表明武香粳 14 品种的氮素累积和转运能力都较强。在同一生育期和相同施氮量下,叶片氮含量在 2 个品种之间无显著差异。另外,两个品种叶片氮含量都在拔节期达到最大,之后下降直至成熟。

2.2 单波段冠层光谱反射率与叶片氮含量的相关分析

各单波段冠层光谱反射率与水稻叶片氮含量之间的相关系数如表 3 所示。4 个波长的光谱反射率与叶片氮含量的相关性在不同生育期差别较大,这是由不同生育期植株的冠层结构和生化组分发生剧烈变化引起的。从拔节期到孕穗期,植株生长旺盛,冠层覆盖度急剧增加,并在孕穗至开花期维持较高水平;从灌浆期开始,随着籽粒灌浆进程的推进,碳水化合物及氮素开始向籽粒转移

并积累,绿叶减少,枯黄叶增加,叶片氮含量也随之下降。

表 3 水稻叶片氮素含量与单波段冠层光谱反射率的相关系数  
Tab.3 Correlations between leaf nitrogen content and mono-band spectra reflectance

| 波长/nm | 拔节期     | 孕穗期     | 开花期     | 灌浆期      | 全生育期     |
|-------|---------|---------|---------|----------|----------|
| 546   | 0.73 ** | 0.75 ** | 0.85 *  | 0.37     | 0.36 **  |
| 660   | 0.15    | 0.60 ** | 0.73    | -0.57 ** | -0.72 ** |
| 710   | 0.28    | 0.49 *  | 0.79    | -0.58 ** | -0.82 ** |
| 810   | 0.85 ** | 0.89 ** | 0.94 ** | 0.66 **  | 0.51 **  |

注: \* 代表 5% 的显著水平, \*\* 代表 1% 的显著水平。

在拔节期、孕穗期和开花期这 3 个阶段,546 nm 和 810 nm 的光谱反射率与叶片氮含量均表现出 1% 水平上的显著相关;对于灌浆期,660、710 和 810 nm 波段表现出较好的相关性并通过 1% 水平的显著检验(表 3)。在水稻拔节期,660 nm 和 710 nm 波段的光谱反射率与叶片氮含量的相关系数较低,且没有通过 1% 的显著性检验,这可能是因为拔节前稻株未封行,稻田水面对水稻冠层特征光谱反射率具有较大干扰。在所有 4 个生育期中,810 nm 波段的光谱反射率与叶片氮含量达到 1% 水平的显著相关(表 3)。从拔节期到灌浆期,810 nm 波段的反射率与叶片氮含量的相关系数先逐步增高,至开花期达到最高,随后开始下降,这是由于 810 nm 波段对作物冠层的覆盖度很敏感,开花期作物叶面积达到最高,从而导致此波段的反射率与叶片氮含量之间的相关系数也达到最大值。至灌浆期,随着氮素向籽粒转移,黄叶增加,810 nm 的反射率降低,相关系数随之下降。

对于全生育期数据的综合分析表明,546 nm 和 810 nm 波段的反射率与叶片氮素含量的相关系数为正值,在 660 nm 和 710 nm 处的相关系数为负值,这与已有的文献报道<sup>[11-12]</sup>不一致,其原因有待深入探讨。在 4 个波段中,除了 546 nm 以外,其他 3 个波段与叶片氮含量的相关性都在 0.5 以上,在 710 nm 处高达 0.82,且 4 个波段都通过 0.01 水平的显著性检验,这显示了本仪器良好的田间氮素监测能力。

2.3 冠层反射光谱指数与叶片氮含量的定量关系

2.3.1 不同生育期

由于冠层反射光谱反映的是植被群体的光谱信息,是包括叶片、茎秆、穗及土壤等背景光谱信息的综合体,单一波段的光谱信息极易受到叶面积、生物量和背景等的干扰,还易受传感器姿态和大气吸收

等因素的干扰,而通过两波段组合的光谱指数,能够在一定程度上消减背景噪声的干扰,提高监测精度。对于便携式氮素无损监测仪所采集到的水稻各生育期的冠层光谱反射率数据,依据表 1 的方法进行计算,构建了不同的光谱指数,并对冠层反射光谱指数与叶片氮含量进行了回归分析。为了尽可能展现不

同生育期内便携式作物氮素监测仪对叶片氮含量的预测能力,选择了直线、对数曲线、二次曲线、三次曲线、复合函数曲线、幂函数曲线和指数函数曲线 7 种回归方程,并对回归方程进行方差检验,以便选取最显著的回归方程。每个生育期选取 2 个决定系数最高的回归方程予以分析,如表 4 所示。

表 4 水稻不同生育期叶片氮含量  $y$  与不同光谱指数  $x$  之间的定量关系

| 生育期     | 光谱植被指数        | 回归方程                             | 决定系数 $R^2$ | 预测标准误差 |
|---------|---------------|----------------------------------|------------|--------|
| N - n 期 | DVI(810,546)  | $y = 24.90x^2 - 8.903x + 2.971$  | 0.714      | 0.193  |
|         | DVI(810,710)  | $y = 1.284e^{1.968x}$            | 0.707      | 0.161  |
| 拔节期     | RVI(810,710)  | $y = 0.912e^{0.236x}$            | 0.838      | 0.189  |
|         | DVI(810,660)  | $y = 3.680x^{0.649}$             | 0.811      | 0.165  |
| 孕穗期     | DVI(810,710)  | $y = 3.734x + 0.694$             | 0.778      | 0.188  |
|         | DVI(810,660)  | $y = 1.137e^{1.509x}$            | 0.778      | 0.143  |
| 开花期     | DVI(810,710)  | $y = -10.47x^2 + 15.92x - 3.364$ | 0.837      | 0.203  |
|         | DVI(810,660)  | $y = -10.44x^2 + 16.56x - 3.871$ | 0.860      | 0.211  |
| 灌浆期     | NDVI(710,546) | $y = 0.877e^{4.812x}$            | 0.626      | 0.154  |
|         | NDVI(810,710) | $y = 4.330x^{1.742}$             | 0.580      | 0.166  |
| 成熟期     | DVI(810,710)  | $y = -133.4x^2 + 76.52x - 9.947$ | 0.898      | 0.147  |
|         | NDVI(810,660) | $y = -74.66x^2 + 80.92x - 20.89$ | 0.854      | 0.181  |

由表 4 分析可知,在 N - n 期、拔节期、孕穗期、开花期、灌浆期、成熟期这 6 个生育期中,除了灌浆期光谱指数与叶片氮含量的拟合系数在 0.6 左右以外,其他 5 个生育期的拟合系数都在 0.7 以上,特别是开花期和成熟期的拟合系数达到 0.83 以上。综合分析水稻各生育期的光谱指数与叶片氮含量的各类回归方程,指数方程与二次方程表现尤显突出,均通过 1% 水平的显著性检验。810 nm 和 710 nm 波段所组成的各种光谱指数决定系数较高,显示了这 2 个波段组合的优越性,其中 DVI(810,710)的表现

最佳。  
2.3.2 全生育期

水稻全生育期光谱指数与叶片氮含量的综合分析表明归一化光谱指数的预测性最好(图 1)。归一化光谱指数 NDVI(810,710)和 NDVI(710,546)与叶片氮含量的决定系数分别达到了 0.804 和 0.759,而且全部是指数回归方程,表明 810 nm 和 710 nm 这 2 个波段所构建的归一化指数与叶片氮含量之间具有优异的拟合效果,也展示出作物氮素监测仪优良的氮素监测性能。

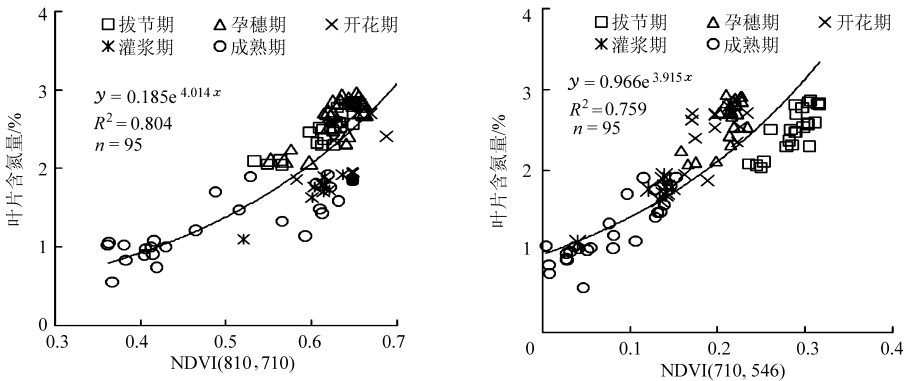


图 1 水稻叶片氮含量与光谱指数 NDVI(810,710)和 NDVI(710,546)的关系  
Fig.1 Relationship between LNC and NDVI(810,710)and NDVI(710,546)

### 3 结 论

采用自主研发的便携式作物氮素监测仪开展水稻田间试验与测试,通过研究水稻冠层光谱反射率及其光谱指数与叶片氮含量之间的相关性及其定量关系,评价了便携式作物氮素监测仪在水稻田间的实际应用性能,结果表明:

(1) 该仪器所获取的 810 nm 波段的冠层光谱反射率在拔节、孕穗、开花、灌浆期以及整个生育期都表现出与叶片氮含量具有 1% 水平上的显著相关性,相关系数均值在 0.70 左右。

(2) 在该仪器的 4 个波段中,除了 546 nm 以

外,其他 3 个波段与叶片氮含量的相关性都在 0.5 以上,在 710 nm 处高达 0.82,且 4 个波段都通过 0.01 水平的显著性检验,显示本仪器具有良好的田间工作性能。

(3) 仪器对水稻各生育期叶片氮含量的监测性能优良,拟合系数都在 0.7 以上,特别是开花期和成熟期拟合系数达到 0.83 以上,均通过 1% 水平的显著性检验。

(4) 仪器对水稻全生育期叶片氮含量的整体监测展现出优良性能,NDVI(810,710)和 NDVI(710,546)与叶片氮含量的决定系数分别达到了 0.804 和 0.759,且均为指数回归方程,具有较好的拟合效果。

### 参 考 文 献

- 1 乔欣,马旭,张小超,等. 大豆叶绿素和钾素信息的冠层光谱响应[J]. 农业机械学报,2008,39(4):108~111.  
Qiao Xin, Ma Xu, Zhang Xiaochao, et al. Response of coronary spectrum on chlorophyll and K information of soy[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2008,39(4):108~111. (in Chinese)
- 2 张晓东,毛罕平. 油菜氮素光谱定量分析中水分胁迫与光照影响及修正[J]. 农业机械学报,2009,40(2):164~168.  
Zhang Xiaodong, Mao Hanping. Effect and correction of water stress and lighting factor on rape nitrogen content spectral analysis[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2009,40(2):164~168. (in Chinese)
- 3 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(2):203~209.  
Li Yingxue, Zhu Yan, Tian Yongchao, et al. Quantitative relationship between leaf nitrogen concentration and canopy reflectance spectra[J]. Acta Agronomica Sinica,2006,32(2):203~209. (in Chinese)
- 4 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 Yan, Li Yingxue, Zhou Dongqin, 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)
- 5 王秀,赵春江,周汉昌,等. 冬小麦生长便携式 NDVI 测量仪的研制与试验[J]. 农业工程学报,2004,20(4):95~98.  
Wang Xiu, Zhao Chunjiang, Zhou Hanchang, et al. Development and experiment of portable NDVI instrument for estimating growth condition of winter wheat[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2004,20(4):95~98. (in Chinese)
- 6 徐志刚,朱艳,焦学磊,等. 作物氮素营养无损监测仪的光学系统设计[J]. 农业机械学报,2008,39(3):120~122.  
Xu Zhigang, Zhu Yan, Jiao Xuelei, et al. Design of optic system for crop nitrogen non-destructive monitoring instrument[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2008,39(3):120~122. (in Chinese)
- 7 徐志刚. 基于冠层反射光谱的便携式作物氮素无损监测光谱仪研制[D]. 南京:南京农业大学,2008.
- 8 Pearson R L, Miller D L. Remote mapping of standing crop biomass for estimation of the productivity of the shortgrass prairie [C]//Proceedings of the Eighth International Symposium on Remote Sensing of Environment. Ann Arbor, Michigan: 1972, 2: 1357~1381. (in Chinese)
- 9 Rouse J W, Haas R H, Schell J A. Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation[R]. Final Report, NASA/GSFC, Type III, Greenbelt, MD, USA, 1974:371.
- 10 Richardson A J, Wiegand C L. Distinguishing vegetation from soil background information[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1977, 43(12):1541~1552.
- 11 王延颐,陈玉泉. 水稻长势、产量结构与水稻光谱参数的关系[C]//环境监测与作物估产的遥感研究论文集. 北京:北京大学出版社,1991.
- 12 周启发,王人潮. 水稻氮素营养水平与光谱特征的关系[J]. 浙江农业大学学报,1993,19(增刊):40~46.