

# 基于智能手机可见光成像的水稻叶片 氮素状况诊断

刘文豪<sup>1</sup>, 徐俊增<sup>1\*</sup>, 陆 韬<sup>2</sup>, 朱莉莉<sup>2</sup>, 王乙江<sup>3</sup>, 徐玉良<sup>4</sup>

(1. 河海大学农业工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 昆山市城市水系调度与信息管理处, 江苏 苏州 215300;  
3. 昆山市张浦水利(水务)站, 江苏 苏州 215300; 4. 昆山市水利局, 江苏 苏州 215300)

**摘要:**稻田氮肥过量施用造成氮肥利用率低下,加剧了农田面源污染。实时实地的氮素亏缺诊断技术将为实地氮肥管理提供决策,可以合理控制施肥量,提高氮肥利用效率。经长期研究,叶绿素相对值(SPAD 值)可以作为水稻氮素营养水平的准确反映。通过智能手机拍摄不同生育期各氮素营养水平下的水稻冠层可见光图像,利用 Eureqa 软件的符号回归算法进行不同颜色特征组合与 SPAD 值之间的关系拟合,分别建立了水稻返青期、分蘖期、拔节孕穗期基于可见光图像的最优 SPAD 值拟合模型。结果表明,验证期各模型相关系数( $r$ )均在 0.9 以上;均方根误差最低为 4.82,最高为 7.41;平均绝对误差最低为 1.87,最高为 2.06,具备较高预测精度,总体上,拔节孕穗期模型精度最高。本研究旨在为基于智能手机的水稻氮素亏缺诊断与水稻实地氮肥管理提供决策支持。

**关键词:**可见光图像;符号回归算法;颜色特征组合;SPAD 值;智能手机

**中图分类号:**S511 **文献标识码:**B **文章编号:**1007-7839(2019)04-0037-05

## Diagnosis of nitrogen status of rice leaves based on visible light image of smart phone

LIU Wenhao<sup>1</sup>, XU Junzeng<sup>1\*</sup>, LU Tao<sup>2</sup>, ZHU Lili<sup>2</sup>, WANG Yijiang<sup>3</sup>, XU Yuliang<sup>4</sup>

(1. College of Agricultural Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu;  
2. Urban Water Scheduling and Information Management Department of Kunshan, Suzhou 215300, Jiangsu;  
3. Kunshan Zhangpu Water Conservancy Station, Suzhou 215300, Jiangsu;  
4. Kunshan Water Resources Bureau, Suzhou 215300, Jiangsu)

**Abstract:** Excessive application of nitrogen fertilizer in rice fields results in low nitrogen use efficiency, which exacerbates non-point source pollution in farmland. The real-time field nitrogen deficiency diagnosis technology will provide decision-making for site-specific nitrogen management, which can reasonably control the amount of fertilizer application and improve nitrogen use efficiency. After long-term studies, the relative value of chlorophyll (SPAD value) can be used as an accurate index of nitrogen nutrient condition in rice. The visible light image of rice canopy under different nitrogen application levels at different growth stages was photographed by smart phone. The symbol regression algorithm of Eureqa software was used to fit the relationship between different color feature combinations and SPAD values, and the models of rice turning green period, tillering period and jointing period

收稿日期:2018-12-06

基金项目:江苏水利科技项目(2016068)

作者简介:刘文豪(1994—),男,硕士研究生,主要从事节水灌溉与农田生态效应研究工作。

通讯作者:徐俊增(1980—),男,教授,博士,主要从事节水灌溉与农田生态效应研究工作。

were established respectively. The results showed that the correlation coefficient ( $r$ ) of each model in the verification period was above 0.9; Among 3 models, the lowest root mean square error was 4.82, the highest was 7.41; the lowest average absolute error was 1.87, the highest was 2.06, and the prediction accuracy of all models was high. In general, the model of jointing and booting stage had the highest prediction accuracy. The research results could provide decision support for rice nitrogen deficiency diagnosis and site-specific nitrogen management based on smart phones.

**Key words:** visible light image; symbol regression algorithm; color feature combinations; SPAD value; smart phone

目前我国一些高产稻田的施氮量为  $270 \sim 300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 个别已达到  $350 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ <sup>[1]</sup>。过量施肥与稻田不合理灌排导致的氮、磷等养分的流失已成为农业面源污染的主要来源<sup>[2]</sup>, 也是进一步导致水体污染的重要因素。

科学合理施肥是减少农田面源污染排放的第一要务。开展作物氮素营养诊断是科学合理施肥的基础。目前, 作物氮素营养诊断的常见方法主要有传统诊断法(植株、土壤含氮量测定)、经验判断法(叶色观察)、叶绿素计法<sup>[3]</sup>。其中叶绿素计(SPAD-502)便携且操作简便, 利用其读数叶绿素相对值(SPAD 值)进行田间氮素诊断得到了广泛研究。研究表明 SPAD 值与不同生育时期水稻功能叶的叶绿素含量、全氮含量及施氮水平呈极显著相关<sup>[4-5]</sup>, 表明 SPAD 值可以作为水稻氮素营养水平的准确反映。

近年来, 利用数字图像提取颜色特征进行水稻营养诊断成为研究热点。王远等<sup>[6]</sup>研究表明拔节期和孕穗期水稻红光标准化值(NRI)与叶片 SPAD 值和含氮量具有良好的相关关系。李岚涛等<sup>[7]</sup>通过研究同样发现水稻冠层数字图像 NRI 与植株全氮含量相关性最佳。贾良良等<sup>[8]</sup>研究发现数字图像绿光标准化值(NGI)与水稻氮素营养参数呈显著正相关关系。综上所述, 基于水稻冠层数字图像颜色特征的 SPAD 值拟合已有一定研究基础, 但研究中数字图像大多通过数码相机或扫描仪获取, 无法进行田间实地实时诊断, 目前智能手机的普及及其拍照成像水平的提升为基于智能手机开展实地实时作物氮素状况诊断提供了手段, 相关研究还未见报道。

本文以水稻为例, 设置了不同供氮水平的试验, 通过智能手机拍摄不同生育期各氮素营养水平下的水稻冠层可见光图像, 测定水稻叶片指定位点的 SPAD 值, 提取对应测点的颜色特征, 利用符号回归算法进行不同颜色特征组合与 SPAD 值之间的关系拟合, 建立水稻不同生育期基于可见光图像的最

优 SPAD 值拟合模型, 为基于智能手机的水稻氮素亏缺诊断与水稻实地氮肥管理提供决策支持, 以期更好地解决农田面源污染问题。

## 1 数据与方法

### 1.1 试验区概况

试验于 2017 年 6~8 月与 2018 年 6~8 月在昆山排灌试验基地开展。试验基地位于江苏省昆山市千灯镇( $31^{\circ}15'15'' \text{ N}$ ,  $120^{\circ}57'43'' \text{ E}$ )。试区属亚热带南部季风气候区, 年平均气温  $15.5^{\circ}\text{C}$ , 年降雨量  $1097.1 \text{ mm}$ , 年蒸发量  $1365.9 \text{ mm}$ , 日照时数  $2085.9 \text{ h}$ , 平均无霜期  $234 \text{ d}$ 。当地习惯稻麦轮作, 土壤为潴育型黄泥土, 耕层土壤为重壤土,  $0 \sim 18 \text{ cm}$  土层土壤有机质  $21.71 \text{ g/kg}$ , 全氮  $1.79 \text{ g/kg}$ , 全磷  $1.4 \text{ g/kg}$ , 全钾  $20.86 \text{ g/kg}$ , pH 值 7.4。水稻品种为“苏香粳”。

### 1.2 试验设计

2017 年与 2018 年均设计盆栽试验, 共设 5 个施氮处理, 分别标记为 A、B、C、D、E; 每个处理设置 2 个重复, 分别标记为 1、2。盆栽采用规格为  $810 \text{ mm}$ (长)  $\times 570 \text{ mm}$ (宽)  $\times 505 \text{ mm}$ (高) 的塑料桶, 共计 10 个, 随机区组排列, 埋置在大田试验区中。各处理灌溉模式均为控制灌溉, 基肥为复合肥( $\text{N} \geq 16\%$ ), 蘖肥与穗肥均为尿素( $\text{N} \geq 46.4\%$ ), 施肥方式采用农民习惯。设立 5 个施氮梯度, 由 E 处理至 A 处理, 每个梯度施氮量较 E 处理依次减少 25%, 不同生育期各处理施氮量如表 1 所示。

### 1.3 可见光图像获取与处理

本研究分别于 2017 年水稻返青期(7.11、7.12、7.13、7.15、7.16)、分蘖期(7.21、7.24、7.30、8.5、8.10)、拔节孕穗期(8.16、8.19、8.21、8.24、8.27)与 2018 年水稻返青期(7.12、7.15、7.18)、分蘖期(7.27、7.30、8.2)、拔节孕穗期(8.4、8.9、8.11)利用 Android 系统手机(小米 6)原生相机拍摄水稻冠层图像以获取可见光图像。为减少拍摄手法与光照强度的影响, 本研究拍摄时间为晴日午

表1 盆栽试验各处理施氮方案

施氮处理	施氮量(kg/hm <sup>2</sup> )			
	基肥	蘖肥	穗肥	总计
A	0.00	0.00	0.00	0.00
B	21.00	26.10	13.92	61.02
C	42.00	52.20	27.84	122.04
D	63.00	78.30	41.76	183.06
E	84.00	104.40	55.68	244.08

间 12:00 ~ 14:00,于手机镜头距离地面 1.0 m 垂直高度(距水稻冠层约 0.8 m),与竖直方向夹角 30 ± 5°处进行拍摄,曝光与白平衡均为自动模式。图片以 JPG 格式存储,分辨率为 1574 × 2100 像素。应用 Adobe Photoshop 软件获取图像的原始红光值 R、绿光值 G 和蓝光值 B。

#### 1.4 水稻叶片 SPAD 值测定方法

利用 SPAD-502 叶绿素仪进行叶片 SPAD 值的测定,测定时避开病叶,测定位点优先选取水稻顶 1 全展叶或顶 2 全展叶距离叶基部 2/3 处<sup>[9]</sup>,各处理下每个重复选取 3 个测点。在对应可见光图像上进行点对点标记,以便提取对应测点的颜色特征。

#### 1.5 符号回归算法模型与评价指标

符号回归算法只需输入自变量、因变量系列数据,函数组成以及适应度函数,软件会自动生成若干包含不同函数组成的拟合模型<sup>[10-12]</sup>。本研究利用 Eureqa 软件的符号回归算法,针对水稻返青期、分蘖期、拔节孕穗期分别建立水稻叶片可见光图像颜色特征组合与 SPAD 值的拟合模型,其中 2017 年数据用于模型拟合,2018 年数据用于模型验证。本研究在生成的一系列拟合公式中选取相关系数( $r$ )最大的公式作为拟合模型。

研究选取的颜色特征组合包括:红光值(模型中记为  $R_N$ )、绿光值(模型中记为  $G_N$ )、蓝光值(模型中记为  $B_N$ )和蓝红光值差( $B_N - R_N$ )、绿红光值差( $G_N - R_N$ )、绿蓝光值差( $G_N - B_N$ )以及  $B_N/(G_N + R_N)$  与  $B_N/R_N$ 。上述颜色特征中: $R_N = R/255$ 、 $G_N = G/255$ 、 $B_N = B/255$ 。本研究在 Eureqa 软件内选取的符号函数包括:常数、加(+)、减(-)、乘(\*)、除(/)、正弦函数(sin)、余弦函数(cos)、对数函数(log)、幂函数(^)。采用平均绝对误差( $\delta_{MAE}$ )、均方根误差( $\delta_{RMSE}$ )、相关系数( $r$ )作为模型评价指标,计算公式如下:

$$\delta_{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |SPAD_{P,i} - SPAD_i| \quad (1)$$

$$\delta_{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (SPAD_{P,i} - SPAD_i)^2} \quad (2)$$

$r =$

$$\frac{\sum_{i=1}^n (SPAD_{P,i} - \overline{SPAD_P})(SPAD_i - \overline{SPAD})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (SPAD_{P,i} - \overline{SPAD_P})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (SPAD_i - \overline{SPAD})^2}} \quad (3)$$

式中, $SPAD_P$ 为模型预测的 SPAD 值, $SPAD$ 为 SPAD-502 叶绿素仪实测值, $i$ 为预测样本序号。

## 2 结果与分析

### 2.1 SPAD 值拟合模型建立

分别将返青期、分蘖期、拔节孕穗期拍摄的各处理水稻可见光图像对照 SPAD 测点进行点对点颜色特征(R、G、B)提取,计算得到颜色特征指标: $R_N$ 、 $G_N$ 、 $B_N$ 、 $B_N - R_N$ 、 $G_N - R_N$ 、 $G_N - B_N$ 、 $B_N/(G_N + R_N)$ 、 $B_N/R_N$ ,将 SPAD 值与对应测点的以上颜色特征指标输入 Eureqa 软件,在前述符号选择下进行模型拟合,分别得到了 3 个生育期对应的水稻 SPAD 值拟合模型(表 2)。

返青期模型中包含的颜色特征指标有: $B_N$ 、 $B_N - R_N$ 、 $G_N - R_N$ 、 $G_N - B_N$ ;包含的运算符号有: +、-、\*、/、sin;分蘖期模型中包含的颜色特征指标有: $B_N - R_N$ 、 $G_N - R_N$ 、 $G_N - B_N$ ;包含的运算符号有: +、-、\*、cos、^;拔节孕穗期模型中包含的颜色特征指标有: $R_N$ 、 $B_N - R_N$ 、 $G_N - R_N$ ;包含的运算符号有: +、-、\*、/、cos。3 个模型在函数组合上具有较高相似性,返青期与拔节孕穗期模型中运算符号均为 +、-、\*、/、与 sin 或 cos 的组合,分蘖期模型中出现了幂函数,无除法运算。3 个模型在颜色特征组合上也具有相同点,公式中均出现了  $B_N - R_N$  与  $G_N - R_N$ 。

本研究得到的水稻 3 个生育期 SPAD 值拟合模型中,颜色特征包含了  $R_N$ 、 $B_N$ 、 $B_N - R_N$ 、 $G_N - R_N$ 、 $G_N - B_N$ ,与先前学者研究推荐的水稻颜色特征指标部分吻合<sup>[5-6]</sup>,本研究发现颜色特征  $B_N - R_N$  在 3 个生育期模型中均有出现,是返青期至拔节孕穗期与 SPAD 值拟合模型关联最高的颜色特征。

3 种模型的复杂程度不同造成了模型拟合过程中精度表现不一(表 2),精度表现最高的为拔节孕穗期模型,拟合过程中的  $\delta_{MAE}$  与  $\delta_{RMSE}$  分别为 0.80 和 1.02,相关系数  $r$  为 0.9697;精度次之的为返青

表 2 不同生育期水稻 SPAD 值拟合模型

生育期	模型公式	精度评价指标		
		$\delta_{MAE}$	$\delta_{RMSE}$	$r$
返青期	$SPAD_p = 58.86 + B_N + 13.49 * \sin(69.36 * (G_N - R_N)) + 74.43 * (G_N - B_N) * \sin(55.92 * (B_N - R_N)) - 80.39 * (G_N - B_N) - 27.07 * \sin(55.92 * (B_N - R_N)) - 69.36 * (G_N - R_N) * \sin(2053.13 / (G_N - R_N))$	1.34	3.54	0.9654
分蘖期	$SPAD_p = 74.12 + 138.71 * (B_N - R_N) + 315.83 * (G_N - R_N)^2 + 1.90 * \cos(5504.64 * (G_N - B_N)) + 2706.58 * (B_N - R_N) * (G_N - R_N)^2 - 210.21 * (G_N - B_N) - 71.01 * R_N * (B_N - R_N)$	1.65	5.14	0.9372
拔节孕穗期	$SPAD_p = 53.82 + 4.43 * \cos(4.05 + 59.42 * R_N) - 44.76 * (B_N - R_N) - 3.04 * \cos(671.98 * (G_N - R_N) + 58.14 * (G_N - R_N) / \cos(3.83 + 60.00 * R_N))$	0.80	1.02	0.9697

期模型,主要表现为  $\delta_{MAE}$  与  $\delta_{RMSE}$  的增大,二者分别为 1.34 和 3.54,  $r$  为 0.965;精度最低的为分蘖期模型,  $\delta_{MAE}$  与  $\delta_{RMSE}$  分别为 1.65 和 5.14,相关系数  $r$  为 0.9372。

## 2.2 SPAD 值拟合模型验证

将 2018 年数据输入各生育期 SPAD 值拟合模型得到模型拟合的  $SPAD_p$  值,与对应实测 SPAD 值比较,进行精度验证。结果表明,返青期与拔节孕穗期模型的拟合优度较高,分蘖期模型的拟合优度较低(图 1),与建模过程的精度表现相一致。返青期、分蘖期、拔节孕穗期模型拟合的 0 截距回归线的斜率分别为 0.9948、0.9900、0.9946。返青期与拔节孕穗期模型在整个验证过程中较稳定,分蘖期模型在 SPAD 值较小时预测值与实测值的拟合优度较低,在 SPAD 值低于 40 时较为发散。

各模型在验证期的 SPAD 拟合精度(表 3)表明,与 SPAD 实测值相比均存在不同程度的误差。在精度评价指标方面,各模型的相关系数均保持在 0.9 以上,且返青期模型的相关系数最高,为 0.9652。此外,返青期、分蘖期、拔节孕穗期模型在验证期的  $\delta_{MAE}$  分别为 1.91、2.06、1.87;  $\delta_{RMSE}$  分别为 5.38、7.41、4.82。分蘖期模型的公式复杂程度低于其他模型,猜想是导致其精度较低的原因。综上,各模型 SPAD 值拟合精度在可接受范围内,可以用于实际预测。

表 3 各拟合模型验证期误差比较

方法	精度评价指标		
	$\delta_{MAE}$	$\delta_{RMSE}$	$r$
返青期	1.91	5.38	0.9652
分蘖期	2.06	7.41	0.9277
拔节孕穗期	1.87	4.82	0.9384

## 2.3 APP 开发

本研究为智能手机平台的氮素亏缺诊断 APP 开发提供算法支持,充分利用智能手机的普及性与

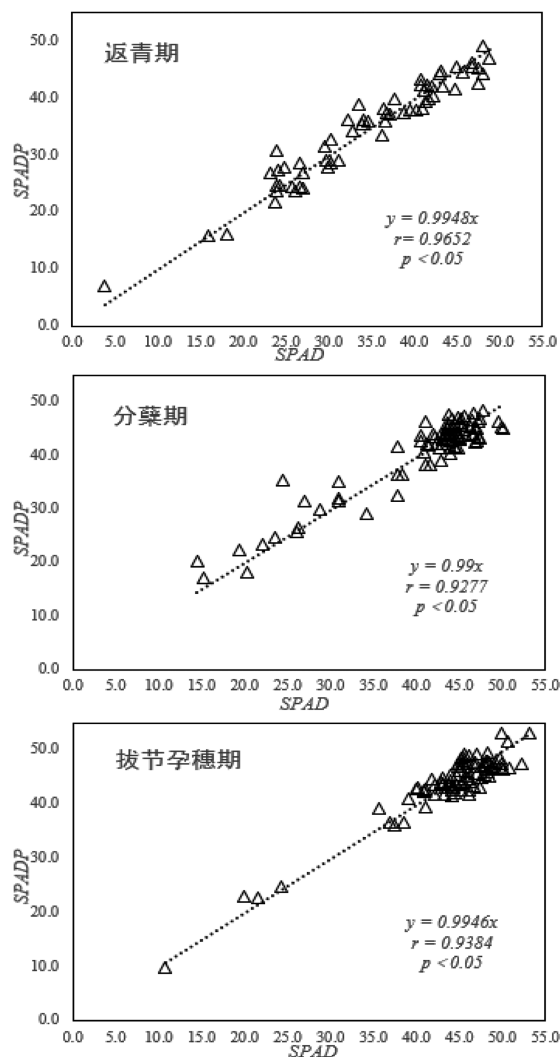


图 1 各模型验证期 SPAD 拟合值与实测值对比

便携性,利于在田间大范围推广,具有广泛应用前景,实际精度还有待田间验证。进一步展望,可在手机可见光镜头前覆盖不同波段的滤镜片,以针对不同粮食作物与经济作物建立智能手机端营养诊断模型。利用氮素亏缺诊断 APP 进行实地氮肥管理对于控制施肥量,减轻面源污染具有较大意义。

### 3 结论

本研究通过智能手机拍摄不同生育期各氮素营养水平下的水稻冠层可见光图像,利用 Eureqa 软件的符号回归算法进行不同颜色特征组合与 SPAD 值之间的关系拟合,建立了水稻返青期、分蘖期、拔节孕穗期基于可见光图像的 SPAD 值拟合模型,验证期各模型相关系数  $r$  均在 0.9 以上;  $\delta_{\text{RMSE}}$  最低为 4.82,最高为 7.41;  $\delta_{\text{MAE}}$  最低为 1.87,最高为 2.06,具备较高预测精度,拔节孕穗期模型精度最高。本文为基于智能手机可见光图像的水稻氮素亏缺诊断 APP 提供算法支持,利于水稻实地氮肥管理决策。

### 参考文献:

- [1] 张耗,褚光,剧成欣,等.实地氮肥管理对水稻根系形态生理和产量的影响[J].扬州大学学报(农业与生命科学版),2013,34(04):62-66+93.
- [2] 于艳梅.明沟控制排水稻田水氮流失规律与模拟[D].南京:河海大学,2014.
- [3] 王涛,刘洋,左月明.作物氮营养无损诊断研究进展[J].农业研究与应用,2013(06):56-60.
- [4] 吴良欢,陶勤南.水稻叶绿素计诊断追氮法研究[J].浙江农业大学学报,1999(02):27-30.
- [5] 艾天成,李方敏,周治安,等.作物叶片叶绿素含量与 SPAD 值相关性研究[J].湖北农学院学报,2000(01):6-8.
- [6] 王远,王德建,张刚,等.基于数码相机的水稻冠层图像分割及氮素营养诊断[J].农业工程学报,2012,28(17):131-136.
- [7] 李岚涛,张萌,任涛,等.应用数字图像技术进行水稻氮素营养诊断[J].植物营养与肥料学报,2015,21(01):259-268.
- [8] 贾良良,范明生,张福锁,等.应用数码相机进行水稻氮营养诊断[J].光谱学与光谱分析,2009,29(08):2176-2179.
- [9] 李刚华,丁艳锋,薛利红,等.利用叶绿素计(SPAD-502)诊断水稻氮素营养和推荐追肥的研究进展[J].植物营养与肥料学报,2005(03):412-416.
- [10] Schmidt M D, H Lipson. Distilling free-form natural laws from experimental data [J]. Science, 2009, 324(5923):81-85.
- [11] Dubcakova R. Eureqa; software review [J]. Genetic Programming and Evolvable Machines, 2011, 12(2):173-178.
- [12] 刘博弈,王海渝,龚严,等.基于天气预报和符号回归算法的参考作物腾发量预测研究[J].中国农村水利水电,2018(08):22-26.