植物营养与肥料学报 2015,21(1):259-268
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer doi: 10.11674/zwyf.2015.0129

应用数字图像技术进行水稻氮素营养诊断

李岚涛,张 萌,任 涛,李小坤,丛日环,吴礼树,鲁剑巍*
(华中农业大学资源与环境学院,农业部长江中下游耕地保育重点实验室,湖北武汉 430070)

摘要:【目的】研究田间试验条件下水稻不同生育期冠层图像色彩参数(G、NRI、NGI、NBI、G/R 和 G/B)及植株氮素营养指标(叶片含氮量、植株全氮含量、生物量、氮素累积量和冠层 NDVI 值)的时空变化特征,并分析两者间的相关性,确立水稻氮素营养诊断的最佳色彩参数和方程模型,为探明数码相机在水稻上的适宜性及精确诊断水稻氮素营养状况提供理论基础。**【方法】**于 2013 年 5 月～9 月在湖北省武汉市华中农业大学试验基地(30°28′08″N,114°21′36″E)采用不同施氮处理的田间试验,以籼型两系杂交稻"两优 6326"为供试作物,设置 4 个施氮水平:0、75、150 和 225 kg/hm^2(分别以 N0、N75、150 和 N225 表示),3 次重复,随机区组排列。分别在水稻分蘖期、拔节期、孕穗期和灌浆期采用数码相机(Nikon-D700,1200 万像素)获取水稻冠层图像,应用 Adobe photoshop7.0 软件直方图程序提取图像的红光值 R、绿光值 G 和蓝光值 B,研究数码相机进行水稻氮素营养诊断色彩参数,确定植株氮素营养指标诊断模型。**【结果】**较对照(N0)相比,分蘖期、拔节期、孕穗期和灌浆期 3 个施氮处理水稻地上部生物量、叶片含氮量、植株全氮含量、氮素累积量、冠层 NDVI 值和成熟期产量增幅分别平均为 40.7%～98.0%、42.4%～72.4%、36.2%～85.3%、125.5%～209.1%、51.3%～60.6% 和 60.1%～117.0%,差异显著。水稻不同生育期各冠层数字化指标 G、NRI、NGI、NBI 、G/R 和 G/B 与上述氮素营养参数相关性差异较大,且以数字图像红光标准化值 NRI 表现最佳,建议作为应用数码相机进行水稻氮素营养诊断的最佳冠层图像色彩参数指标。进一步分析表明,可以用统一的线性回归方程来描述不同生育期、不同氮素水平下水稻植株氮素营养指标随冠层色彩参数 NRI 的变化模式。**【结论】**数码相机进行水稻氮素营养诊断测试结果稳定,具有快速、便捷、非破坏性等优点,冠层色彩参数 NRI 与水稻氮素营养指标和产量之间均表现出较好的相关性,满足氮素营养无损诊断的需求,对实时、快速监测水稻长势状况及氮素营养丰缺水平具有较高的可行性,有望发展成为新时期作物氮素营养无损诊断技术的潜力。

关键词: 数字图像;水稻;氮素营养诊断
中图分类号: S126;S511 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2015)01-0259-10

Diagnosis of N nutrition of rice using digital image processing technique

LI Lan-tao, ZHANG Meng, REN Tao, LI Xiao-kun, CONG Ri-huan, WU Li-shu, LU Jian-wei*
[*College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University/Key Laboratory of Arable Land Conservation (Middle and Lower Reaches of Yangtse River), Ministry of Agriculture, Wuhan 430070, China*]

Abstract:【Objectives】 The spatial and temporal distribution of color indexes of canopy (G, NRI, NGI, NBI, G/R and G/B) and the indexes of N nutrition in rice plants were studied to determine the best color parameters and regression equations for nitrogen with a digital camera, and provide a theoretical basis and technical approach for monitoring plant nitrogen status of rice and precision management of nitrogen fertilization. **【Methods】** Field experiments were carried out from May to September 2013 in rice growing season at the Experimental Farm of Huazhong Agricultural University (30°28′08″N, 114°21′36″E). A two-line *indica* hybrid (Liangyou6326) was chosen as test cultivar. Four N treatments: N 0, 75, 150 and 225 kg/ha were designed and recorded as N0, N75, N150, N225, respectively. A color digital camera (D700, Nikon, Japan) with a resolution of 12.0 mega pixels

收稿日期: 2013-12-30 **接受日期:** 2014-08-25
基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201103039);中央高校基本科研业务费专项(2013PY113);长江学者和创新团队发展计划(IRT1247)资助。
作者简介: 李岚涛(1987—),男,河南周口人,硕士,主要从事作物营养与现代施肥技术。E-mail: lijianwei@webmail.hzau.edu.cn
* 通信作者 E-mail: lujianwei@mail.hzau.edu.cn

was employed to capture color images of rice canopy at the tillering, jointing, booting and filling stage. The image resolution was 1936 × 1296 pixels of 14 bit for red, green and blue. The images of size 2.72 MB were transferred in joint photographic experts group (JPEG) format to a computer and processed with Adobe Photoshop 7.0 to extract color information for studying possibility of using digital image analysis method for plant N status diagnosis and for determining the best color parameters and regression equations in rice. 【**Results**】Compared with N0, the biomass, leaf N content, plant total N content, N accumulation and canopy NDVI values of rice with N treatments at the tillering stage, jointing stage, booting stage and filling stage are averagely increased by 40.7%-98.0%, 42.4%-72.4%, 36.2%-85.3%, 125.5%-209.1% and 51.3%-60.6%, respectively, at mature stage, the average increase of yield are from 60.1% to 117.0%. Compared with other plant canopy color parameters, the normalized redness intensity (NRI), calculated as R/(R+G+B), is much better as it has better correlations with the index of N-nutrient in rice plants, rice yield and canopy NDVI values at the different growth stages. An integrated linear regression equation could be used for describing the relationship between NRI and leaf N content, plant total N content, N accumulation, canopy NDVI values, yield at different growing stages and nitrogen levels of rice. 【**Conclusions**】The digital image processing technique is usable in detecting the N nutrition in rice and has advantages of fast, stable results, easy to apply, and non-destructive. Simultaneously, the color parameter NRI has a preferable interrelation with the index of N-nutrition and yield than others, thus NRI is suitable for rapid diagnosis of nitrogen nutrition, and the digital image processing technique method shows the potential of being used in fast rice nitrogen diagnosis without damage.

Key words: digital image; rice; N status diagnosis

传统的氮素营养诊断和氮肥推荐多以田间采集植株样品、实验室化学分析为主,该方法在样品的采集、测试以及数据处理等方面需耗费大量的人力、物力和财力,时效性差,不利于推广应用[1-2]。数字图像技术通过判断作物冠层颜色深浅了解作物氮素营养状况继而进行施肥推荐或产量预测,具有操作简便、快捷、非破坏性等优点[3-4]。此外,由于数码相机价格的不断下降以及所采用图像感应器件的快速发展,使通过数码相机测量光反射强度来评价作物氮素营养状况成为可能[5],近年来在冬小麦[6]、蔬菜[7]、棉花[5]和玉米[8]等多种作物上得到广泛应用。李红军等[6]利用数码相机对小麦冠层进行拍照,通过分析色彩参数与作物氮素营养状况之间的关系,认为返青期反光叶面的 G/R 与 R/(R+G+B)值能较好的反映小麦氮素营养状况。宋述尧等[7]通过分析黄瓜冠层数字化诊断指标与施氮量、土壤无机氮(Nmin)及植株氮素营养之间的关系,得出了以绿光标准化值 G/(R+G+B)作为诊断黄瓜结果期氮素营养状况的适宜数字化参数。Blackmer 等[9]通过分析玉米冠层航空图片,指出航片红光深度绝对值(R)、绿光深度绝对值(G)和蓝光深度绝对值(B)均与玉米产量呈显著线性相关关系。

水稻作为一种重要的粮食作物,其生长发育和产量形成受氮素营养的影响极大。前人利用数码相机进行水稻氮素诊断的研究已有一些报道。王远等[10]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。Kyu-Jong 等[11]利用数码相机获取水稻冠层图像,指出绿光深度绝对值(G)与地上部生物量、氮素累积量和叶面积指数均可用指数方程进行拟合,R^2 分别为0.83、0.83 和0.86。陆秀明等[12]通过图像处理获取水稻冠层图像的覆盖度,利用覆盖度估测的叶面积指数与实测叶面积指数之间的相关系数在0.77～0.93,达到显著水平。贾良良等[1]对应用数码相机进行水稻氮素营养诊断的可行性进行研究,认为数字图像色彩分析技术具有发展成为新一代作物氮营养诊断的潜力。上述研究大都采用不同手段将作物冠层色彩参数与地面覆盖度或作物生长状况进行分析,而对于整个作物冠层全生育期的色彩参数变化特征及模型构建与筛选的研究相对较少。在此基础上,本文通过研究水稻生育期地上部生物量、成熟期产量及植株氮素营养指标的变化规律,并分析其与冠层数码指标之间的相关性,从而确定水稻氮素营养诊断的最佳色彩参数及方程模型,为探明数字图像技术在水稻上的适应性及精确诊断水稻氮素状况和推荐施肥提供理论基础。

1　材料与方法

1.1　试验材料

试验于 2013 年 5 月至 9 月在湖北省武汉市华中农业大学试验基地内进行。供试土壤为黄棕壤,前茬作物为油菜,0—20 cm 耕层土壤 pH 7.41、有机质 6.72 g/kg、全氮 0.32 g/kg、碱解氮 23.96 mg/kg、速效磷 7.16 mg/kg、速效钾 180.5 mg/kg。

供试品种为杂交水稻“两优 6326”。

1.2　试验设计与方法

氮肥设置 0、75、150 和 225 kg/hm^2 四个水平,分别用 N0、N75、N150 和 N225 表示,分 3 次施用,即 50% 基肥、35% 分蘖肥和 15% 穗肥。磷、钾肥按 P_2O_5 75 kg/hm^2、K_2O 120 kg/hm^2 施入,磷肥全部基施,钾肥按 70% 基肥和 30% 分蘖肥施用。氮、磷、钾肥品种分别为尿素(含 N 46%)、过磷酸钙(含 P_2O_5 12%)和氯化钾(含 K_2O 60%)。小区面积 20 m^2(5 m×4 m),3 次重复,随机区组排列。2013 年 5 月 6 日育苗,6 月 18 日移栽。定植密度为 2.0×10^5 蔸/hm^2,2013 年 9 月 21 日收获。

1.3　数字图像获取与处理

选取晴天分别于水稻分蘖期(2013 年 7 月 11 日)、拔节期(2013 年 7 月 22 日)、孕穗期(2013 年 7 月 31 日)和灌浆期(2013 年 8 月 11 日),在太阳高度角相对稳定的 12:00～13:00 之间,同时以标准白色比色板进行校正,利用数码相机(Nikon-D700,1200 万像素)获取水稻冠层图像。拍摄时,将相机镜头距离地面 1.5 m 垂直高度(距水稻冠层约 1.0 m),与地面呈 60°夹角进行,同时将相机调至 Auto 模式下,以自动曝光控制色彩平衡(图 1)。图片以 JPEG 格式存储,分辨率为 1936×1296 像元,应用 Adobe photoshop7.0 软件直方图程序获取图像的红光值 R(redness intensity)、绿光值 G(greenness intensity)和蓝光值 B(blueness intensity)[4,6]。备选的数码图像特征值包括:绿光深度绝对值(G)、绿光深度绝对值与红光深度绝对值比值(G/R)、绿光深度绝对值与蓝光深度绝对值比值(G/B)、红光标准化值(NRI)、绿光标准化值(NGI)和蓝光标准化值(NBI)。各标准化值的计算如下:

红光标准化值(NRI, normalized redness intensity) = R/(R + G + B)

绿光标准化值(NGI, normalized greenness intensity) = G/(R + G + B)

蓝光标准化值(NBI, normalized blueness intensity) = B/(R + G + B)

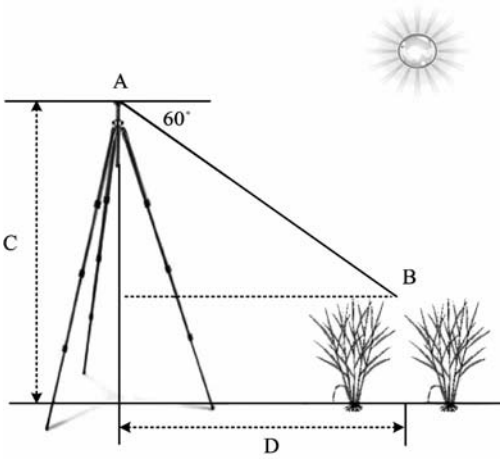

图 1　数码相机进行水稻氮素营养诊断示意图

Fig. 1　Sketch map of diagnosis of N status of rice using digital camera

[注(Note): A—数码相机 Digital camera; B—水稻冠层 Rice canopy; C—相机距地面垂直距离 1.5 m The camera was positioned 1.5 m above the ground; D—相机距水稻水平距离 Horizontal distance between A and B.]

1.4　测定项目与方法

冠层 NDVI 值的测定:用美国 Ntech 公司生产的 Greenseeker 手持光谱仪采集水稻冠层 NDVI 数据。测量时,将光照探头平行于水稻冠层,垂直高度约 60 cm。各处理小区随机选取 4 个 1 m^2 左右区域进行测定,结果直接通过掌上电脑进行采集。

植株与叶片全氮含量的测定:分别于上述各时期内每小区选取代表性水稻 5 株,分叶片和茎秆两部分,105℃下杀青 30 min,60℃烘箱中烘至恒重,采用 $H_2SO_4-H_2O_2$ 法消化,AA3 流动注射分析仪测定含氮量[13]。

1.5　数据处理与分析

数据处理与分析采用 Microsoft Excel 2003 及 SPSS 17.0 进行,LSD 法检验 $P<0.05$ 水平上的差异显著性;制图采用 Origin8.5 软件。

2　结果与分析

2.1　氮肥施用对水稻生物量和产量的影响

各生育时期水稻地上部生物量均以 N225 处理最大(表 1)。施氮有利于水稻干物质量积累,与对照(N0)相比,分蘖期、拔节期、孕穗期和灌浆期施氮处理水稻地上部生物量分别平均增加 40.7%、98.0%、62.2% 和 62.5%。成熟期产量结果表明,随氮肥用量增加,水稻产量呈显著升高趋势,与不施

表1 不同氮肥用量水稻生物量和产量（t/hm²）

Table 1 Effect of nitrogen (N) application rates on biomass and yield of rice

处理 Treatment	生物量 Biomass				产量 Yield
	分蘖期 Tillering stage	拔节期 Jointing stage	孕穗期 Booting stage	灌浆期 Filling stage	
N0	1.23 Bc	2.30 Bc	4.09 Bb	4.16 Bb	3.52 Cd
N75	1.75 ABb	3.42 Bb	5.89 ABb	6.18 ABa	5.64 Bc
N150	2.22 Aa	4.92 Aa	6.40 ABab	6.72 ABa	6.78 Ab
N225	2.24 Aa	5.31 Aa	7.62 Aa	7.40 Aa	7.64 Aa

注(Note)：表中不同的小写字母和大写字母分别表示达到5%和1%上的差异显著水平 Different lowercase letters or capital letters within the same column indicate significant differences at the 5% and 1% probability.

氮相比,施氮处理产量增幅高达60.1%～117%。

2.2 不同施氮水平对水稻氮素营养参数及冠层NDVI值的影响

施氮可显著提高水稻植株氮素营养指标及冠层NDVI值(表2)。叶片含氮量、植株全氮含量及氮素累积量方面,与对照(N0)相比,分蘖期、拔节期、孕穗期和灌浆期三者分别平均增加72.4%、48.5%、42.4%、61.0%,85.3%、41.8%、36.2%、51.6%和209.1%、191.8%、125.5%、149.9%,差异极显著。对于冠层NDVI值,氮肥施用后,上述各时期内分别平均提高0.20、0.23、0.20、0.20个单位,差异显著。

表2 不同氮素水平对水稻植株氮素营养指标及冠层NDVI值的影响

Table 2 Effects of different nitrogen treatments on the index of N-nutrient in rice plants and canopy NDVI values respectively at different growth stages

时期 Growth stage	处理 Treatment	叶片含氮量(%) Leaf N content	植株全氮含量(%) Plant total N content	氮素累积量(t/hm²) N accumulation	NDVI值 NDVI value
分蘖期 Tillering stage	N0	1.46 Cc	1.05 Cc	1.31 Cc	0.39 Bc
	N75	2.07 Bb	1.57 Bb	2.70 Bb	0.55 Ab
	N150	2.72 Aa	2.07 Aa	4.58 Aa	0.63 Aa
	N225	2.76 Aa	2.17 Aa	4.86 Aa	0.60 Aab
拔节期 Jointing stage	N0	1.21 Cc	0.90 Cc	2.06 Cc	0.38 Cc
	N75	1.37 Cc	0.93 Cc	3.19 Cc	0.55 Bb
	N150	1.79 Bb	1.26 Bb	6.20 Bb	0.62 ABa
	N225	2.23 Aa	1.64 Aa	8.69 Aa	0.65 Aa
孕穗期 Booting stage	N0	1.06 Cc	0.70 Ab	2.86 Bb	0.33 Ad
	N75	1.27 BCb	0.90 Aab	5.40 ABab	0.45 Bc
	N150	1.44 Bb	0.84 Aab	5.36 ABab	0.54 Ab
	N225	1.82 Aa	1.12 Aa	8.61 Aa	0.60 Aa
灌浆期 Filling stage	N0	1.00 Cc	0.62 Cc	2.59 Bc	0.35 Cd
	N75	1.35 BCb	0.74 BCbc	4.58 ABbc	0.47 Bc
	N150	1.58 ABb	0.93 ABb	6.22 ABab	0.56 Ab
	N225	1.90 Aa	1.15 Aa	8.60 Aa	0.60 Aa

注(Note)：表中不同的小写字母和大写字母分别表示达到5%和1%上的差异显著水平 Different lowercase letters or capital letters within the same column indicate significant differences at the 5% and 1% probability.

2.3　水稻冠层 NDVI 值与植株氮素营养参数的相关性分析

水稻整个生育期不同施氮量的冠层 NDVI 值与叶片含氮量、植株全氮含量、生物量和氮素累积量相关性均达到极显著水平(表 3)。该结果表明,NDVI 值能够成熟表征水稻植株氮素营养指标(叶片含氮量、植株全氮含量和氮素累积量)及群体生长发育状况(生物量)。同时,以 NDVI 值作为一种标准变量来反演水稻冠层数字化指标具有较高的可行性。

表 3　不同生育时期水稻冠层 NDVI 值与植株氮素营养指标的相关系数(r)

Table 3　Correlation between canopy NDVI values and rice index of N-nutrient

时期 Growth stage	叶片含氮量(%) Leaf N content	植株全氮含(%) Plant total N content	生物量(t/hm^2) Biomass	氮素累积量(t/hm^2) N accumulation
分蘖期 Tillering stage	0.897**	0.876**	0.887**	0.924**
拔节期 Jointing stage	0.649**	0.742**	0.865**	0.951**
孕穗期 Booting stage	0.935**	0.730**	0.822**	0.883**
灌浆期 Filling stage	0.935**	0.869**	0.863**	0.821**

注(Note): $n=12$; *, ** 分别表示在 5% 和 1% 水平下的显著性 Mean significant at the 5% and 1% levels, respectively.

2.4　水稻冠层数字化指标与植株氮素营养参数及冠层 NDVI 值的相关性分析

对水稻不同生育期各冠层数字化指标 G、G/R、G/B、NRI、NGI 和 NBI 与氮素营养参数及冠层 NDVI 值进行回归分析,结果表明, G、G/R、G/B、NGI 和 NBI 与植株及叶片含氮量、生物量、氮素累积量和 NDVI 值均呈线性正相关关系,而 NRI 呈极显著线性负相关关系。分蘖期和孕穗期,以 NRI 和 G/R 与上述各回归参数相关性较高,且 r_{NRI} 显著高于 $r_{G/R}$。拔节期和灌浆期,则以 NRI 和 NBI 相关性较好,且 r_{NRI} 明显大于 r_{NBI}。因此,以 NRI 作为应用数码相机进行水稻氮素营养诊断的指标选择,具有较高的代表性和稳定性。各生育期间,图像特征参数 NRI 与水稻氮素营养指标及 NDVI 值相关性并无明显差异,而分蘖期作为水稻氮素吸收利用旺盛时期,是确定水稻有效分蘖数、确保高产稳产的重要基础,较拔节期、孕穗期和灌浆期而言,其相关性并不是最优的,主要原因在于分蘖期(2014 年 7 月 11 日)时水稻植株较小,而土壤和田面水背景相对凸出,数码相机在提取水稻冠层色彩信息(作物在不同氮营养水平下所表现出的色彩差异,在 400 ~ 700nm 可见光波段反射率较小,720 ~ 1300nm 近红外波段反射率较大)时受到一定影响,这也是作物无损诊断精确性相对较低的原因之一,受其他因素影响较多,如环境条件、病虫害、品种等。

2.5　水稻冠层数字化诊断指标 NRI 的可行性分析及诊断模型

为更精确诊断水稻冠层数字化图像参数 NRI,本研究在分析其与植株氮素营养指标相关性时,进一步利用线性和非线性回归分析,以氮素营养指标为自变量(x),图像指标 NRI(y)为因变量,采用线性函数、抛物线函数、幂函数、指数函数和对数函数构建不同诊断模型(表 5)。结果表明,不同回归分析方法间水稻冠层图像参数 NRI 与其氮素营养指标均表现出较好相关性,达到极显著水平,且线性和非线性模型拟合效果非常接近。考虑到线性模型的数学表达式较为简单,因此选取以氮素营养指标为自变量(x)所构建的图像诊断指标 NRI(y)直线方程诊断模型(图 2)。同时建立基于线性回归方程对水稻冠层图像参数 NRI 与氮肥用量(R^2 = 0.747**)、产量(R^2 = 0.778**)、NDVI(R^2 = 0.798**)、叶片氮含量(R^2 = 0.445**)、植株全氮含量(R^2 = 0.326**)和氮素累积量(R^2 = 0.460**)的定量诊断方程(图 2),为便捷、无损监测和反演水稻氮素营养状况提供理论基础,同时也为数码相机进行水稻氮素营养诊断提供一个快捷数字化指标(*NRI*)和方法(线性方程)。

3　讨论与结论

3.1　应用数码相机进行水稻氮素营养诊断指标的选择

作物冠层颜色深浅与氮素营养状况密切相关,不同的营养水平、光温条件及群体结构均显著影响作物的生长发育,从而使植株冠层呈现出不同的颜色[14]。因此,选取合适的冠层数码诊断指标,对准

表4 不同生育时期水稻特征光谱参数与植株氮素营养指标及冠层NDVI值的相关系数(r)

Table 4 Correlation between the feature spectral parameters and N-nutrition indexes and canopy NDVI values at different growth stages

时期 Growth stage	指标 Index	叶片含氮量(%) Leaf N content	植株全氮含量(%) Plant total N	生物量(t/hm^2) Biomass	氮素累积量(t/hm^2) N accumulation	NDVI值 NDVI value
分蘖期 Tillering stage	G	0.552	0.548	0.446	0.525	0.467
	NRI	-0.842**	-0.828**	-0.891**	-0.846**	-0.928**
	NGI	0.561	0.548	0.691*	0.575	0.759**
	NBI	0.675*	0.660*	0.643*	0.671*	0.615*
	G/R	0.794**	0.782**	0.856**	0.800**	0.896**
	G/B	0.414	0.416	0.318	0.413	0.243
拔节期 Jointing stage	G	0.809**	0.747**	0.881**	0.839**	0.894**
	NRI	-0.892**	-0.847**	-0.911**	-0.899**	-0.939**
	NGI	0.328	0.293	0.413	0.336	0.530
	NBI	0.898**	0.852**	0.825**	0.877**	0.785**
	G/R	0.808**	0.767**	0.857**	0.824**	0.904**
	G/B	0.802**	0.758**	0.753**	0.786**	0.713**
孕穗期 Booting stage	G	0.868**	0.745**	0.729**	0.776**	0.810**
	NRI	-0.903**	-0.756*	-0.803**	-0.798*	-0.947**
	NGI	0.563	0.530	0.580*	0.532	0.727**
	NBI	0.551	0.462	0.436	0.481	0.497
	G/R	0.717**	0.650*	0.667*	0.645*	0.854**
	G/B	0.137	0.021	0.015	0.032	0.038
灌浆期 Filling stage	G	0.151	0.115	0.146	0.023	0.031
	NRI	-0.823**	-0.771**	-0.686*	-0.745**	-0.883**
	NGI	0.021	0.025	0.097	0.016	0.173
	NBI	0.709**	0.672*	0.594*	0.634*	0.758**
	G/R	0.505	0.433	0.500	0.435	0.677*
	G/B	0.551	0.528	0.477	0.511	0.589*

注(Note): $n=12$; *, ** 分别表示在5%和1%水平下的显著性 Mean significant at the 5% and 1% levels, respectively.

确评估作物氮素营养状况及氮肥推荐具有重要意义[15]。李红军等[6]研究表明,拔节期冬小麦不反光叶面和反光叶面红光标准化值NRI(R/R+G+B)与植株全氮含量存在较好相关性。白金顺等[16]研究发现,灌浆期红光标准化值(R/(R+G+B))与春玉米氮素营养指标相关性较好,且与玉米产量间呈显著直线回归关系,回归系数为46%。肖焱波等[17]应用数码相机在冬小麦上研究指出,数字图像红光标准化值R/(R+G+B)与冬小麦常规营养诊断指标(SPAD值、茎基部硝酸盐含量、植株全氮含量、生物量)的相关系数达到了0.809～0.946,是较好表征作物氮营养状况诊断指标。综合前人研究结果,利用红光标准化值进行作物氮营养诊断较其他光谱指数相比虽可行性较高,但主要以单一生育期为主,而系统研究全生育期色彩参数变化及方程模型构建与筛选并得到结果相对稳定和一致的则相对较少,这也为无损、便捷和快速诊断作物氮素营养与生长发育状况带来一定困难。本试验通过对比分析水稻分蘖期、拔节期、孕穗期和灌浆期6种数码图像特征值与植株氮素营养指标间的相关性,得

出冠层色彩参数 NRI 为应用数码相机进行水稻氮素营养诊断的最佳指标,同时建立了基于 NRI 的水稻叶片氮含量、植株全氮含量、氮肥用量、氮素累积量、NDVI 值和产量的线性回归方程模型,为应用数码相机无损、快速研究水稻氮素营养状况提供数码指标参考和理论依据。

表 5　水稻冠层 NRI 与其氮素营养指标的线性和非线性回归分析(n =48)

Table 5　Linear and non-linear regerssion analysis between canopy NRI and rice index of N-nutrient

	模型类型 Model type									
	直线方程 Linear		二次方程 Parabola		幂方程 Power		指数方程 Exponential		对数方程 Logarithm	
	R^2	F	R^2	F	R^2	F	R^2	F	R^2	F
氮肥用量 N application rate	0.747	135.6**	0.770	75.5**	0.755	141.5**				
产量 Yield	0.778	161.1**	0.786	82.7**	0.778	161.7**	0.747	135.8**	0.743	133.1**
NDVI	0.798	181.3**	0.798	88.7**	0.785	168.4**	0.789	172.3**	0.772	155.7**
叶片含氮量 Leaf N content	0.445	36.85**	0.560	28.6**	0.453	38.0**	0.504	46.7**	0.510	47.9**
植株全氮含量 Plant total N	0.326	22.3**	0.409	15.6**	0.334	23.1**	0.375	27.6**	0.383	28.6**
氮素累积量 N accumulation	0.460	39.2**	0.551	27.6**	0.460	39.3**	0.547	55.6**	0.538	53.6**

注(Note): *, ** 分别表示在 5% 和 1% 水平下的显著性 Mean significant at the 5% and 1% levels, respectively.

3.2　应用数码相机进行水稻氮素营养诊断的可行性

作物冠层色彩信息是表征其营养状况的重要组成部分,使其在不同的营养状况下表现出差异明显的茎叶颜色,尤其是受氮肥供给量的影响[18]。在 400～700nm 可见光波段范围内,由于叶绿素和其他色素吸收,植物冠层光反射率较低,且随氮肥用量增加而降低。700～1300nm 近红外波段,由于细胞排列方式和冠层结构影响,植物对光吸收很弱,表现出较强的反射率,并随氮肥用量增加而提升[19]。作物对光谱的吸收和反射差异最终表现在群体(冠层)颜色上,由于作物冠层绿色变化通常与叶绿素含量有关,而植株叶绿素含量与氮素营养相关密切。因此,通过分析作物冠层颜色深浅了解作物氮素营养状况,继而进行推荐施肥或产量预测的研究日益增多[3]。数码相机通过图像传感器获取物体图像,将图像转换成数字图像,并利用计算机模拟人的功能区分识别图像色彩信息,达到分析作物冠层色彩差异和进行诊断的目的[18]。此外,应用数码相机和数字图像处理技术进行氮素营养诊断较其他方法(如高光谱和 SPAD 仪法)相比具有成本低、覆盖面大和分辨率高等优点,易于推广应用[20]。Thomas 等[21]通过试验证明了光谱技术诊断甜椒氮素营养的可行性。Adamsenden 等[22]利用数码相机成功估算了油菜花的数量,得出了花的数目与像素之间的决定系数(R^2)为 0.83,达到极显著水平。Richardson 等[23]应用数字图像处理技术对草地地面覆盖度成功进行了预测,其预测值与实测值之间 R^2 高达 0.99。上述研究将利用数码相机所获取作物冠层参数与作物营养及生长状况进行分析,均表明应用数字图像技术可用来评估田间作物的营养状况[5]。本试验条件下,在所分析的 6 种数码图像特征值中,水稻冠层数字指标红光标准化值 NRI 与植株氮素营养参数相关性较好且表现稳定,均达到显著或极显著水平,且采用线性方程模型拟合 NRI 与氮肥用量、产量、NDVI、叶片氮含量、植株全氮含量和氮素累积量相关性较好(图 2),表明应用数码相机定量、快捷研究和反演水稻氮素营养状况具有较高可行性。

3.3　有待进一步研究和说明的问题

氮作为影响水稻生长发育和产量形成的必需元素之一,在生产实际中,氮肥过量施用的现象仍然非

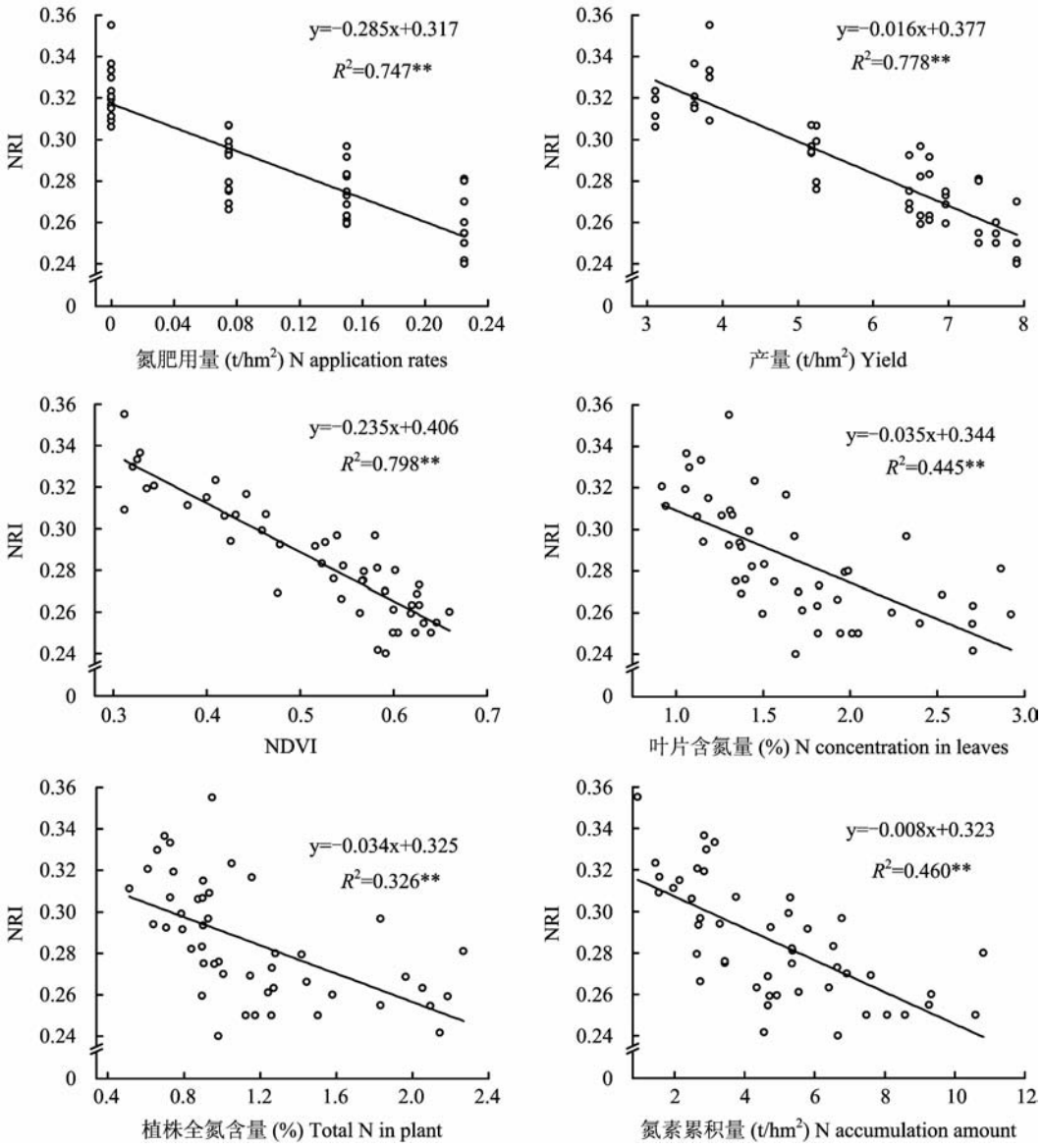

图2 水稻冠层NRI与氮素营养指标的线性回归分析（$n=48$）

Fig. 2 Linear regression analysis between NRI and rice index of N-nutrient

常普遍。冯洋等[24]在湖北黄冈调查结果表明，目前农民水稻施氮量普遍在N 240～300 kg/hm² 之间。葛梦婕等[25]通过对长江中下游7个粳型超级稻试验指出，超级粳稻在施氮量300 kg/hm² 条件下产量最高，普通粳稻的最高产量施氮量也高达263 kg/hm²。彭少兵等[26]在湖南长沙曾观察到，超级杂交稻两优培九即使施氮量达到240 kg/hm² 时仍没有出现倒伏现象，而当农民应用这些新品种或组合时，通常会施用更多的氮肥以获得高产。本试验条件下，当施氮量分别为0、75、150和225 kg/hm²时，水稻产量分别为3520、5637、6778和7640 kg/hm²，呈线性显著增加趋势。因此，本试验仅对“缺氮—氮优化用量”之间应用数字图像技术进行水稻氮素营养诊断提供了一种方法和思路。在此基础上，探索“缺氮—氮优化—氮过剩”条件下水稻冠层数码指标的时空变化特征及可行性，仍需我们开展相关研究。此外，本研究是在其他条件相同（磷钾肥用量充足且一致、拍照时间统一且限定在晴天太阳高度角变化较小的时间段12：00～13：00之间、相机拍摄角度保证一致等）而氮肥水平差异（N0、N75、N150和N225）情况下得出的，而水稻不同生育期冠层颜色变化受很多因素影响，如品种、生长环境、养分类型及用量等，因此，探索不同条件下水稻冠层数码指标的差异机理及可行性仍需我们开展相关研究。

本试验通过分析不同氮素处理下各数字化诊断

参数与水稻叶片含氮量、植株全氮含量、氮素累积量、生物量、冠层 NDVI 值和产量之间的关系,得出了以红光标准化值 NRI 作为应用数码相机诊断水稻氮素营养状况的指标选择,继而对比分析不同方程模型间差异及适宜性,建立了基于 NRI 的水稻植株氮素营养指标线性方程模型。但该结果仅是在单一试验品种(两优 6326)和试验年限(一年)下得出的,要阐明规律性和实用性更强的结果尚需进一步试验验证。同时,作物氮素营养无损诊断的核心是建立推荐追肥体系,并以此进行施肥推荐[15]。因此,建立基于上述试验结果的不同生育期临界 NRI 值及推荐施氮量,继而以追肥的方式提供氮肥,仍需要更多、更广泛的试验来验证。

参 考 文 献:

[1] 贾良良, 范明生, 张福锁, 等. 应用数码相机进行水稻氮素营养诊断[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(8): 2176-2179.
Jia L L, Fan M S, Zhang F S *et al*. Nitrogen status diagnosis of rice by using a digital camera[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2009, 29(8): 2176-2179.

[2] 屈卫群, 王绍华, 陈兵林, 等. 棉花主茎叶 SPAD 值与氮素营养诊断研究[J]. 作物学报, 2007, 33(6): 1010-1017.
Qu W Q, Wang S H, Chen B L *et al*. SPAD value of cotton leaves on main stem and nitrogen diagnosis for cotton growth[J]. Acta Agronomice Sinica, 2007, 33(6): 1010-1017.

[3] 李桂娟, 朱丽丽, 李井会. 作物氮素营养诊断的无损测试研究与应用现状[J]. 黑龙江农业科学, 2008(4): 127-129.
Li G J, Zhu L L, Li J H. Present status of research and application of non-destructive measurement of nitrogen nutrition diagnosis[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2008(4): 127-129.

[4] 贾良良. 应用数字图像技术与土壤植株测试进行冬小麦氮营养诊断[D]. 北京: 中国农业大学博士学位论文, 2003.
Jia L L. To dectect nitrogen status of winter wheat by using color digital camera[D]. Beijing: PhD dissertation of China Agricultural University, 2003.

[5] 王娟, 雷咏雯, 张永帅, 等. 应用数字图像分析技术进行棉花氮素营养诊断的研究[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(1): 145-149.
Wang J, Lei Y W, Zhang Y S *et al*. Diagnosis of cotton N status using digital image analysis technique[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2008, 16(1): 145-149.

[6] 李红军, 张立周, 陈曦鸣, 等. 应用数字图像进行小麦氮素营养诊断中图像分析方法的研究[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(1): 155-159.
Li H J, Zhang L Z, Chen X M *et al*. Image analysis method in application of digital image on diagnosing wheat nitrogen status J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(1): 155-159.

[7] 宋述尧, 王秀峰. 数字图像技术在黄瓜氮素营养诊断上的应用研究[J]. 吉林农业大学学报, 2008, 30(4): 460-465.
Song S Y, Wang X F. Diagnosis of N status of cucumber usign digital image processing technique [J]. Journal of Jilin Agricurtural University, 2008, 30(4): 460-465.

[8] 孙钦平, 李吉进, 邹国元, 等. 应用数字图像技术对有机肥施用后玉米氮营养诊断研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(9): 2447-2450.
Sun Q P, Li J J, Zou G Y *et al*. Nitrogen status diagnosis by using digital photography analysis for organic fertilized maize [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010, 30(9): 2447-2450.

[9] Blackmer T M, Schepers J S, Varel G E. Light reflectance compared with other nitrogen stress measurements in corn leaves [J]. Jorunal of Production Agriculture, 1994, 6: 934-938.

[10] 王远, 王德建, 张刚, 王灿. 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.
Wang Y, Wang D J, Zhang G, Wang C. Digital camera-based image segmentation of rice canopy and diagnosis of nitrogen nutrition[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(17): 131-136.

[11] Kyu J L, Byuu W L. Estimation of rice growth and nitrogen nutrition status using color digital camera image analysis[J]. European Jorunal of Agronomy, 2013, (6): 57-65.

[12] 陆秀明, 黄庆, 孙雪晨, 等. 图像处理技术估测水稻叶面积指数的研究[J]. 中国农学通报, 2011, 27(3): 65-68.
Lu X M, Huang Q, Sun X C *et al*. Application of image processing technology in rice canopy leaf area index[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(3): 65-68.

[13] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
Bao S D. Soil and agro-chemistry analysis (3rd ed.) [M]. Beijing: Chinese Agricultural Press, 2000.

[14] 李亚兵, 毛树春, 韩迎春, 等. 不同棉花群体冠层数字图像颜色变化特征研究[J]. 棉花学报, 2012, 24(6): 541-547.
Li Y B, Mao S C, Han Y C *et al*. Study on the color characteristic variation of cotton canopy digital images[J]. Cotton Science, 2012, 24(6): 541-547.

[15] 危常州, 张福锁, 朱和明, 等. 新疆棉花氮营养诊断及追肥推荐研究[J]. 中国农业科学, 2002, 35(12): 1500-1505.
Wei C Z, Zhang F S, Zhu H M *et al*. Study on cotton nitrogen diagnosis and topdressing recommendation in north xinjiang[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2002, 35(12): 1500-1505.

[16] 白金顺, 曹卫东, 熊静, 等. 应用数码相机进行绿肥翻压后春玉米氮素营养诊断和产量预测[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(12): 3334-3338.
Bai J S, Cao W D, Xiong J *et al*. Nitrogen status diagnosis and yield prediction of spring maize after green manure incorporation by using a digital camera [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(12): 3334-3338.

[17] 肖焱波, 贾良良, 陈新平, 张福锁. 应用数字图像分析技术进行冬小麦拔节期氮营养诊断[J]. 中国农学通报, 2008, 24(8): 448-453.
Xiao Y B, Jia L L, Chen X P, Zhang F S. N status diagnosis of

winter wheat by using digital image analysis technology[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2008, 24(8): 448-453.

[18] 石媛媛. 基于数字图像的水稻氮磷钾营养诊断与建模研究[D]. 杭州: 浙江大学博士学位论文, 2011.
Shi Y Y. Rice nutrition diagnosis and modeling based on digital image[D]. Hangzhou: PhD dissertation of Zhejiang University, 2011.

[19] 吴华兵, 朱艳, 田永超, 等. 棉花冠层高光谱参数与叶片氮含量的定量关系[J]. 植物生态学报, 2007, 31(5): 903-909.
Wu H B, Zhu Y, Tian Y C *et al*. Relationship between canopy hyperspectra parameter and leaf nitrogen concentration in cotton[J]. Journal of Plant Ecology, 2007, 31(5): 903-909.

[20] 王远, 王德建, 张刚. 基于数码相机的水稻氮素营养诊断[J]. 中国农学通报, 2012, 28(24): 111-117.
Wang Y, Wang D J, Zhang G. Nitrogen status diagnosis of rice based on a digital camera[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28(24): 111-117.

[21] Thomas J R, Oerther G F. Estimating nitrogen content of sweet pepper leaves by reflectance measurements[J]. Agronmy Journal, 1972, 27: 11-13.

[22] Adamsen F J, Coffelt T A, Nelson J M *et al*. Method for using images from a color digital camera to estimate flower number[J]. Crop Science, 2000, 40: 704-709.

[23] Richardson M D, Karcher D E, Purcell L C. Quantifying turfgrass cover using digital image analysis[J]. Crop Science, 2001, 41: 1884-1888.

[24] 冯洋, 陈海飞, 胡孝明, 等. 高、中、低产田水稻适宜施氮量和氮肥利用率的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(1): 7-16.
Feng Y, Chen H F, Hu X M *et al*. Optimal nitrogen application rates on rice grain yield and nitrogen use efficiency in high, middle and low-yield paddy fields[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20(1): 7-16.

[25] 葛梦婕, 王亚江, 颜希亭, 等. 长江中下游稻区粳型超级稻高产形成及氮素利用的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(2): 259-270.
Ge M J, Wang Y J, Yan X T *et al*. Research on the formation of high yield and the nitrogen use of *japonica* super rice in the middle and lower areas of the Yangtza River[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20(2): 259-270.

[26] 彭少兵, 黄见良, 钟旭华, 等. 提高中国稻田氮肥利用率的研究策略[J]. 中国农业科学, 2002, 35(9): 1095-1103.
Peng S B, Huang J L, Zhong X H *et al*. Research strategy in improving fertilizer-nitrogen use efficiency of irrigated rice in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2002, 35(9): 1095-1103.