

基于水稻扫描叶片图像特征的氮素营养诊断研究

祝锦霞¹, 邓劲松^{1,2,*}, 石媛媛¹, 陈祝炉¹, 韩凝¹, 王珂^{1,2}

1. 浙江大学农业遥感与信息技术应用研究所, 浙江 杭州 310029

2. 浙江省农业遥感与信息技术重点实验室, 浙江 杭州 310029

摘 要 选用扫描仪获取水稻叶片的数字图像, 运用数字图像处理技术研究不同氮素水平水稻的叶色、纹理和形态特征, 尝试建立基于叶色、纹理和形态特征的综合水稻氮素营养诊断模型。研究表明: (1) 通过水稻叶绿素 a 含量和叶片颜色特征之间的相关性分析, 得到有效颜色特征参量 B , b , $b/(r+g)$, b/r , b/g , 同时分析叶绿素 a 含量随叶位的空间分布特征, 选择较为稳定的第三完全展开叶作为指示叶或诊断叶; (2) 通过与高光谱遥感数据的相关性分析, 从机理上说明基于机器视觉的水稻氮素营养诊断是有理论依据的, 是可行的; (3) 提取水稻叶片颜色、形态综合特征信息, 与 YIQ 电视信号彩色坐标系统的 C_B 值建立水稻氮营养水平的识别模型, 得到 4 个氮素水平的正确识别率为: N_0 : 74.9%; N_1 : 52%; N_2 : 84.7%; N_3 : 75%。初步研究结果表明基于扫描图像特征的田间水稻氮素水平诊断方法是有优势和前景的, 有可能建立一种新的实时、快速、准确的田间水稻氮素营养诊断的方法。

关键词 颜色特征; 主成分分析; 综合特征

中图分类号: S2 **文献标识码**: A **DOI**: 10.3964/j.issn.1000-0593(2009)08-2171-05

引 言

水稻是中国最主要的粮食作物, 水稻生产对中国粮食安全具有举足轻重的作用。氮是影响水稻产量和品质最重要的营养元素, 我国东南沿海水稻产区氮肥过量施用普遍, 不仅浪费资源、增加农业生产成本, 还污染环境, 这与没有一种快速、经济、可操作性好的田间氮素营养诊断方法有关。

遥感技术在作物识别、长势监测、面积量算和产量估计等方面得到了较为广泛的应用, 为农业生产的宏观管理与决策提供了技术支撑。目前的卫星遥感技术受时间和空间分辨率的限制很难满足田间作物管理的需要, 特别是我国南方稻田破碎且水稻生长期多阴雨。基于遥感技术的地面便携式仪器在田间作物信息快速采集上有优势, 叶绿素计 (SPAD) 在田间作物氮肥管理中的大量应用就是一个例证。但叶绿素计采集的信息面偏小, 对测定规范有较高的要求, 而且还遇到诊断标准较难掌握等困难。数码相机价格的不断下降, 图像质量的不断提高使其在田间作物营养诊断中有很大的应用潜力^[1-6], 但该类图像易受拍摄角度、相机参数、日光强度、

气候情况等众多因素的限制, 要真正应用于田间作物养分诊断还有很多技术问题需要研究解决。

扫描图像的获取是在一个相对封闭的系统内进行, 周围环境对图像采集的干扰较小, 能保证色彩的真实度, 扫描图像分辨率较高, 在获取静态图像的颜色、纹理等信息上显示出巨大的优势。因此, 田间作物叶片等扫描图像既含有叶色特征等光谱信息, 又有叶面积、纹理等形态信息, 有可能成为一种田间快速、经济、可操作性好的氮素营养诊断方式, 而且还有可能进一步发展成为一种远程诊断技术。目前小型便携式的扫描仪已市场化, 如基于扫描叶片特征的作物氮素营养水平诊断获得成功, 就有可能为田间水稻氮素营养诊断和养分管理提供准确、实时的辅助决策依据, 也为远程诊断奠定技术基础。

1 材料与方法

1.1 实验设计

水稻田间试验在浙江省富阳市高桥镇进行, 供试水稻品种为晚稻秀水 110。试验采用单因素完全随机区组设计, 设 4

收稿日期: 2008-06-26, 修订日期: 2008-09-28

基金项目: 国家自然科学基金项目 (30571112, 30800703), 国家“863”高科技研究发展计划项目 (2006AA10Z204) 和浙江省科技计划项目 (2007C2308, 2008C33008) 资助

作者简介: 祝锦霞, 女, 1982 年生, 浙江大学农业遥感与信息技术应用研究所博士研究生 e-mail: ko-ko998@163.com

*通讯联系人 e-mail: jsong_deng@zju.edu.cn

个水平,分别为 0, 60, 90, 120 kg · hm⁻², 氮肥施用品种为尿素,折合成尿素量分别为 0, 133.4, 200.0, 266.7 kg · hm⁻², 记为 N0, N1, N2, N3, 氮肥分 3 次施用,其中,基肥 50%,分蘖肥 35%,穗肥 15%,每个施肥水平设 4 个重复。于 2007 年 7 月 2 日采取直播方式种植于试验区内。在 2007 年 8 月 30 日水稻拔节期采集各种实验数据。

1.2 数据采集与分析

1.2.1 水稻数字图像获取

利用平板扫描仪 EPSON EXPRESSION 1680 采集不同氮素水平水稻样品的第一完全展开叶(L1)、第三完全展开叶(L2)的数字图像,分辨率设置为 300DPI。取样后尽快扫描,避免叶片枯萎造成颜色变化。

1.2.2 SPAD 读数的测定

选用美国 ASD (analytical spectral device) 公司的 ASD Fieldspec Pro FRTM 光谱仪和日本 SPAD-502 型叶绿素计定期测定不同氮素水平水稻叶片的光谱参数^[7]。由于测定部位对 SPAD 读数影响较大,应尽量保持一致并避开叶脉,每个氮素水平随机选取 20 片第一完全展开叶 L1 和第三完全展开叶 L2,测定其 SPAD 读数取其平均值。

1.2.3 生物化学参数

根据李合生的方法测定水稻叶片的叶绿素 a 浓度^[8]。采集的叶片 105 杀青 30 min, 75 烘干至恒重,用凯氏定氮法测定全氮含量^[7]。

1.3 叶片特征信息提取

扫描仪采集的数字图像由于传递和转换的原因,会或多或少地引起图像质量下降。因此,在图像特征信息提取前,采用中值滤波法去除图像扫描噪声。同时选取 RGB 和 HSV 颜色系统以及 YIQ 电视信号彩色坐标系统^[9]实现作物数字图像的颜色特征提取,并通过著名的非线性转换器标定 RGB 颜色坐标,大大减少因亮度变化带来的影响^[10];研究不同氮素水平下图像对应的灰度共生矩阵的极差分布提取纹理特征信息;采用于峰提出的算法测定水稻叶面积参数^[11]。

2 结果与分析

2.1 不同氮素营养水平对不同叶位的光谱特性的影响

植物氮素营养状况与叶绿素含量密切相关,叶绿素 b 与 SPAD 值的相关性($r = 0.912^{**}$)要比叶绿素 a($r = 0.926^{**}$)稍差,因此,选择叶绿素 a 含量和 3 个颜色系统对应的 L1 和 L2 的光谱参数进行相关性分析(表 1),综合选择相关系数较高的特征参数 B , b , $b' (r + g)$, $b' r$, $b' g$ 为颜色特征参量。

水稻不同叶位、位点叶色差异明显。从叶片形态分析,越靠近基部,叶脉越大,测得 SPAD 值越低,影响叶片颜色特征提取的稳定性;从氮素转运分析,氮素在水稻体内移动性很大^[12-15]。氮素转运的不一致性,对上位叶叶尖及下位叶颜色特征的重现性有较大影响。在不同的氮素水平下,L2 对应的颜色特征参量与叶绿素 a 的相关性明显优于 L1;不同叶位颜色特征参量对应的变异系数 CV 随着叶位的增加而减小(表 2)。由此选择 L2 作为氮素营养诊断的指示叶。

Table 1 Relationship between Chl-a and feature parameter

	B	b	$b' (r + g)$	$b' r$	$b' g$
N0(L1)	0.226	0.282	0.277	0.393	0.208
N0(L2)	0.629 *	0.605 *	0.611 *	0.576	0.626 *
N1(L1)	0.484	0.571	0.576 *	0.579 *	0.566
N1(L2)	0.687 *	0.650 *	0.649 *	0.626 *	0.660 *
N2(L1)	0.578	0.496	0.504	0.443	0.536
N2(L2)	0.875 *	0.879 **	0.88 **	0.654 *	0.931 **
N3(L1)	0.793	0.688	0.691	0.631	0.717
N3(L2)	0.753 **	0.846 **	0.846 **	0.874 **	0.771 **

*, ** : Signification at 5 % and 1 % levels respectively. L1 : 1st leaf from the top ; L2 : 3rd leaf from the top. The same as below

Table 2 Coefficients of variance of feature parameters of different position leaves

CV	B	b	$b' (r + g)$	$b' r$	$b' g$
N0(L1)	0.283	0.181	0.197	0.172	0.218
N0(L2)	0.221	0.117	0.126	0.101	0.148
N1(L1)	0.338	0.231	0.259	0.223	0.284
N1(L2)	0.170	0.088	0.097	0.103	0.104
N2(L1)	0.161	0.130	0.140	0.134	0.145
N2(L2)	0.155	0.111	0.121	0.113	0.129
N3(L1)	0.189	0.166	0.181	0.209	0.163
N3(L2)	0.113	0.052	0.060	0.131	0.051

2.2 识别诊断机理研究

2.2.1 光谱参数与叶绿素 a 之间的相关性分析

作物颜色变化的实质是植物体内叶绿素浓度发生变化,叶绿素浓度往往是植被光合效率、氮素胁迫,特别是衰老过程的指示器,因此通过分析植株的叶绿素浓度已成为评价作物氮素营养和长势的一种有效手段。不同氮素营养水平 L2 的叶绿素 a 含量与颜色特征参量之间存在较强的相关性,初步说明可以通过分析叶片的颜色特征参量反映水稻叶片的氮素水平(表 1)。

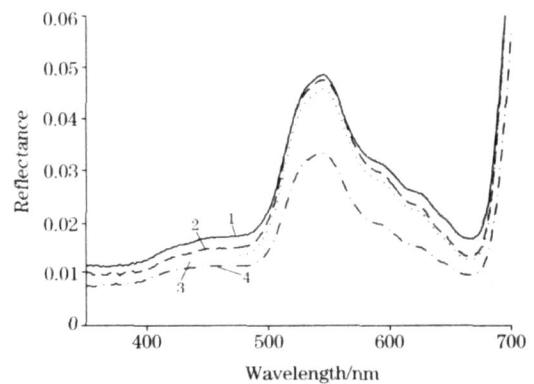


Fig 1 Canopy spectrum at visible band of rice

1: N0; 2: N1; 3: N2; 4: N3

2.2.2 扫描图像的叶色特征与高光谱特征的相关性分析

4 个不同氮素水平对应的波形基本保持一致,并且高光

谱反射率随施氮水平的提高而下降。水稻叶片对绿光波段(500~560 nm)反射最大,红光波段(600~700 nm)次之,而蓝光波段(350~400 nm)最少,与扫描数字图像获得的光谱参数 g , r , b 值反映的趋势一致(图 1)。同时,叶片吸收蓝紫

光进行光合作用,分析比较该波段范围内冠层平均光谱反射率与光谱参数 R , G , B , r , g , b 之间的相关关系,得到 B 值与蓝紫光波段的冠层反射率的相关性最强(表 3),这也初步说明扫描图像能一定程度反映作物光合作用能力。

Table 3 Relationship between spectral parameter B , b value and spectral reflectance at different band

光谱参数 y	高光谱参数 x	氮素水平	方程	相关系数
B	390~470 nm 蓝紫光波段内光谱反射率的平均值	N0	$y = -1\,000\,000x^2 + 27\,221x - 160.42$	0.726 4
		N1	$y = -833\,977x^2 + 19\,684x - 93.045$	0.765 5
		N2	$y = -1\,000\,000x^2 + 23\,802x - 104.36$	0.802 4
		N3	$y = -1\,000\,000x^2 + 25\,773x - 98.448$	0.789 3
b	390~470 nm 蓝紫光波段内光谱反射率的平均值	N0	$y = 3\,917.7x^2 - 103.57x + 1.199\,4$	0.733 9
		N1	$y = -2619.1x^2 + 63.021x - 0.279\,1$	0.752 0
		N2	$y = -3\,594.3x^2 + 75.722x - 0.302\,2$	0.830 3
		N3	$y = -3\,948.8x^2 + 82.48x - 0.307\,7$	0.430 1

2.2.3 不同氮素营养对作物扫描叶片图像颜色、纹理、形状特征的分析

(1)颜色特征:作物颜色的变化是表征作物营养水平的重要信息,并且具有一定的稳定性,对大小、方向都不敏感,表现出相当强的鲁棒性。因此,提取作物数字图像的颜色信息作为特征参量,可以实现作物营养水平的诊断。叶片对可见光波段的红光、绿光的反射值 R 和 G 变化趋于一致,蓝光反射值 B 的变化趋势有所不同。4 个不同的氮素水平均表

现出 $G > R > B$,表明叶片反射的绿光最多,红光较少,反射的蓝紫光最少,吸收最多(图 2)。这与叶绿素主要利用红光(640~660 nm)、蓝紫光部分(430~450 nm)进行光合作用相一致。同时, G 和 R 值随供氮水平的提高没有表现出非常明确的变化规律, B 值则随供氮水平的提高而增加(图 2)。

(2)纹理特征:样本对应的灰度共生矩阵(GLCM)描述水稻叶片的纹理特征。GLCM 的极差分布均匀,变异系数 $CV = 0.052\,512$,说明不同的氮素水平对应的水稻扫描叶片纹理结构差异较小,因此在研究中不考虑水稻纹理特征。

(3)形状特征:叶片是作物进行光合作用的主要器官,其面积大小直接影响作物的受光。叶面积是作物氮素营养诊断的一种标志参数,也是表征作物对光能吸收的一个重要的生物学指标。一般来说,氮素营养水平与水稻叶面积呈显著正相关。因此,提取扫描图像的叶面积信息,有利于提高水稻氮素营养水平的识别和诊断精度。

2.3 水稻的综合特征信息提取

本研究选用主成分分析法提取叶片的综合特征信息。为消除实验数据由于量纲不同带来的影响,在 SPSS 13.0 软件中采用样本相关矩阵求主成分对原数据进行标准差标准化处理,得到样本相关矩阵对应的特征信息(表 4)。主成分的贡献率随着特征值的下降而降低,并且不同氮素水平对应的第一和第二主成分,累计贡献率高达 94.5 %。

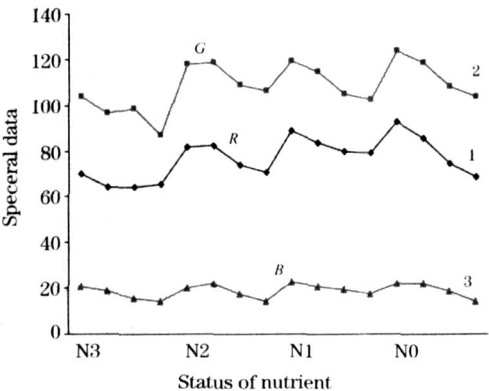


Fig 2 Values of spectral parameters of rice based on the digital images
1: R ; 2: G ; 3: B

Table 4 Result of the correlation matrix

	$F1(N0)$	$F2(N0)$	$F1(N1)$	$F2(N1)$	$F1(N2)$	$F2(N2)$	$F1(N3)$	$F2(N3)$
特征值	4.921	0.97	4.607	1.037	4.874	1.06	4.67	1.006
贡献率/ %	82.023	16.159	76.777	17.285	81.225	17.671	77.835	16.759
累积贡献率/ %	82.023	98.182	76.777	94.062	81.225	98.897	77.835	94.595
特征向量 B	0.126	-0.001	0.767	-0.585	0.139	0.043	-0.542	-0.035
b	0.221	-0.023	0.082	0.252	0.216	-0.011	0.321	-0.035
$b/r + g$	0.222	-0.024	0.073	0.26	0.216	-0.014	0.38	0.041
b/r	0.26	-0.027	-0.692	1.16	0.244	-0.025	0.332	0.046
b/g	0.197	-0.022	0.625	-0.438	0.197	-0.01	0.411	0.013
area	-0.107	1.015	0.336	-0.221	-0.031	1.012	0.069	1

(3) 综合特征信息的提取: 统计学认为, 一般方差的累计贡献率应在 80 % 以上。本研究 4 个不同氮素水平对应的第一主成分, 其贡献率均达到 76 % 以上, 能集中反映出对应水平的特征和趋势。因此水稻综合特征信息的提取只选择第一主成分 PC1, 对 48 幅数字图像的 PC1 值分析。

PC1 值能较好的识别水稻氮素的不同水平。计算 PC1 值对应的变异系数 ($CV = 2.6165$), 说明不同氮素水平其 PC1 值存在显著差别, 证明第一主成分 PC1 的确能有效的识别不同的氮素水平。分析得到叶片 4 个不同氮素水平的综合特征函数如下。

$$F(N3) = -0.542B + 0.321b + 0.38(b'(r + g)) + 0.332(b'r) + 0.411(b'g) + 0.069area$$

$$F(N2) = 0.139B + 0.216b + 0.216(b'(r + g)) + 0.244(b'r) + 0.197(b'g) - 0.031area$$

$$F(N1) = 0.767B + 0.082b + 0.073(b'(r + g)) - 0.692(b'r) + 0.625(b'g) + 0.336area$$

$$F(N0) = 0.126B + 0.221b + 0.222(b'(r + g)) + 0.26(b'r) + 0.197(b'g) - 0.107area$$

2.4 模型的建立

颜色特征信息提取使用的 YIQ 电视信号彩色坐标系统是由颜色属性值——亮度 Y 、红光差 C_R 、蓝光差 C_B 、绿光差 C_G 组成。其中 RGB 颜色系统和 YIQ 电视信号彩色坐标系统之间的转换通过式 (1) 得到, 颜色属性值通过差值运算得到 (2) 式。

$$Y = 0.3R + 0.6G + 0.1B \quad (1)$$

$$C_B = B - Y \quad (2)$$

叶片 B 值随着供氮水平的提高而提高 (图 1), B 和 b 是综合特征函数的参量之一, 说明蓝色特征值最能反映水稻氮素水平的差异。由此选择与蓝色特征值相关的参量——RGB 颜色系统的 B 值和 b 值, YIQ 电视信号彩色坐标系统的蓝光差 C_B 值和综合特征函数值进行回归分析^[16]。通过比较选择能减小系统误差的蓝光差 C_B 作为回归参数, 建立 48 幅数字图像的值与 4 个综合特征函数 [$F(N0)$, $F(N1)$, $F(N2)$, $F(N3)$] 之间的映射关系, 得到不同氮素水平对应的识别函数 $y = 0.0169x^2 - 1.2195x - 61.515$ ($R^2 = 0.79$)。

2.5 试验结果与分析

实验采集同期的水稻扫描叶片 109 幅, 48 组数据作为训练样本, 61 组数据作为测试样本。图 3 能直观地识别水稻的 4 个不同的氮素水平。

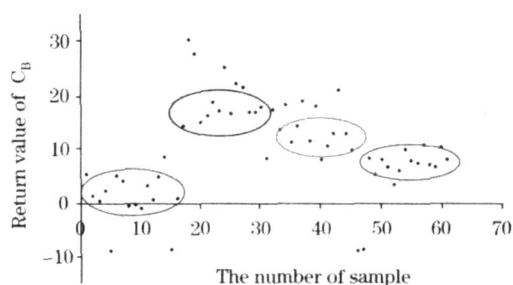


Fig 3 Distribution of the result

方差分析法定量的分析研究结果具有较好的区分度, 对应的 F 值很大 ($F = 93.782$); 相伴概率明显小于 0.05 ($\text{sig} = 0.00$), 表明 4 个样本组之间存在显著差别。分析得到不同氮素水平的识别规则为: $N0: (5.24 \sim 8.18)$; $N1: (8.18 \sim 17.40)$; $N2: (17.41 \sim 30.38)$; $N3: (-9.05 \sim 3.97)$, 相应的正确识别率为: $N0: 74.9\%$; $N1: 52\%$; $N2: 84.7\%$; $N3: 75\%$ 。现有的初步研究结果说明扫描数字图像的综合特征信息诊断水稻氮素营养水平是可行的, 有可能在生产实践中加以推广和应用。

3 总结与讨论

氮素营养状况影响水稻叶绿素含量, 导致叶片光谱特性发生变化, 扫描图像中包含的颜色特征和光谱反射特征, 与叶绿素含量和光合作用能力密切相关, 因此扫描影像中的颜色特征是识别和诊断作物氮素营养的重要信息; 扫描图像扫描影像特征能定量反映作物的叶面积大小, 而叶面积大小与作物氮素水平有密切相关, 快速经济定量获取水稻叶片叶面积信息将有利于作物氮素营养水平的监测。本文通过研究提出的综合利用扫描数字图像的光谱和形态特征诊断水稻氮素营养水平是有理论依据的, 总体上能够反映出作物叶片的氮素营养情况, 初步研究结果表明基于水稻扫描数字图像的综合特征信息诊断水稻氮素营养的方法是可行的, 有可能建立一种新的田间水稻氮素水平诊断方法, 也为基于图像传输的远程诊断打下了基础。

本研究建立的基于综合特征信息的氮素营养诊断模型虽具有较高的识别氮素营养水平的正确率, 但是还没有建立相应的诊断标准并与水稻氮肥施用推荐相结合, 有待进一步深入研究。

参 考 文 献

- [1] Scaife M A, Stevens K L. Commum. Soil Sci. Plant Anal., 1983, 14(9): 761.
- [2] Iida T N, Noguchi C K, Terao Ishii H. Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery, 2000, 62(2): 87.
- [3] Scharf P C, Lory J A. Agron, J, 2002, 94: 394.
- [4] Douglas E, Karcherand, Michael D R, et al. Crop Sci., 2003, 43: 943.
- [5] CHENG Jia-juan, JI Shou-wen, et al (陈佳娟, 纪寿文, 等). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (农业工程学报), 2000, 16(3): 115.
- [6] SUN Ming, LING Yun (孙明, 凌云). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery (农业机械学报), 2002, 33(5): 75.

- [7] WANG Yuan, HUANG Jing-feng, WANG Fu-ming, et al (王 渊, 黄敬峰, 王福明, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis (光谱学与光谱分析), 2008, 28(2): 273.
- [8] LI He-sheng, et al (李合生, 等). The Theory and Technology of Plant Physiology (植物生理生化实验原理和技术). Beijing: Higher Education Press (北京: 高等教育出版社), 2001. 123.
- [9] Bulanon D M, Kataoka T, Ota Y. Biosystems Engineering, 2002, 83(4): 405.
- [10] Tian L F, Slaughter D C. Computer & Election. in Agric., 1998, 21(3): 153.
- [11] YU Feng, ZHANG Bin, ZHANG Jun-feng (于 峰, 张 彬, 张峻峰). Journal of China Agricultural University (中国农业大学学报), 2007, 12(4): 67.
- [12] Charles Edwards D, Stutzel H, Ferraris R, et al. Annals of Botany, 1987, 60: 421.
- [13] Anten N, Schieving F, Werger M. Oecologia, 1995, 101: 504.
- [14] Vouillot M, Devienne F. Annals of Botany, 1999, 83: 569.
- [15] Milroy S, Bange M, Sadras V. Annals of Botany, 2001, 87: 325.
- [16] ZHENG Yong-mei, ZHANG Jun, CHEN Xing-dan (郑咏梅, 张 军, 陈星旦). Spectroscopy and Spectral Analysis (光谱学与光谱分析), 2004, 24(6): 675.

Diagnoses of Rice Nitrogen Status Based on Characteristics of Scanning Leaf

ZHU Jin-xia¹, DENG Jin-song^{1,2*}, SHI Yuan-yuan¹, CHEN Zhu-lu¹, HAN Ning¹, WANG Ke^{1,2}

1. Institute of Agricultural Remote Sensing and Information Technology Application, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China

2. Key Laboratory of Zhejiang Province Agricultural Remote Sensing and Information System, Hangzhou 310029, China

Abstract In the present research, the scanner was adopted as the digital image sensor, and a new method to diagnose the status of rice based on image processing technology was established. The main results are as follows: (1) According to the analysis of relations between leaf percentage nitrogen contents and color parameter, the sensitive color parameters were abstracted as B , b , $b'/(r+g)$, b'/r and b'/g . The leaf position (vertical spatial variation) effects on leaf chlorophyll contents were investigated, and the third fully expanded leaf was selected as the diagnosis leaf. (2) Field ground data such as ASD were collected simultaneously. Then study on the relationships between scanned leaf color characteristics and hyperspectral was carried out. The results indicated that the diagnosis of nitrogen status based on the scanned color characteristic is able to partly reflect the hyperspectral properties. (3) The leaf color and shape features were intergrated and the model of diagnosing the status of rice was established with calculated at YIQ color system. The distinct accuracy of nitrogen status was as follows: N0: 74.9%; N1: 52%; N2: 84.7%; N3: 75%. The preliminary study showed that the methodology has been proved successful in this study and provides the potential to monitor nitrogen status in a cost-effective and accurate way based on the scanned digital image. Although, some confusion exists, with rapidly increasing resolution of digital platform and development of digital image technology, it will be more convenient for larger farms that can afford to use mechanized systems for site-specific nutrient management. Moreover, deeper theory research and practice experiment should be needed in the future.

Keywords Color character; Principal component analysis; Synthesis character

(Received Jun. 26, 2008; accepted Sep. 28, 2008)

* Corresponding author