

基于叶片光谱透过特性的植物氮素测定

贺冬仙, 胡娟秀

(中国农业大学农业部设施农业工程重点开放实验室, 北京 100083)

摘要: 该文通过不同施氮水平下营养液栽培的水稻和黄瓜叶片在 300~1100 nm 的分光光谱透过率, 与其叶绿素含量和含氮量的相关性分析, 确定了 560、650 和 720 nm 作为特征波长, 940 nm 作为参比波长可用于植物营养的快速无损诊断。以上述波长的光谱透过率构建的 21 组光谱特征参数中, $(T_{940}-T_{560})/(T_{940}+T_{560})$ 、 $\log(T_{940}/T_{560})$ 和 $\log(T_{940}/T_{650})$ 与水稻和黄瓜叶片的叶绿素含量和含氮量的相关性较好, 且经回归估测检验的相对误差均小于 8%。因此, 上述光谱特征参数可作为植物氮素营养指标用于植物叶片的叶绿素含量和含氮量的快速无损估测, 从而为植物营养无损诊断提供技术支持。

关键词: 叶绿素含量, 含氮量, 光谱特征参数, 分光光谱透过率, 无损检测

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2011.04.037

中图分类号: S127

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2011)-04-0214-05

贺冬仙, 胡娟秀. 基于叶片光谱透过特性的植物氮素测定[J]. 农业工程学报, 2011, 27(4): 214-218.

He Dongxian, Hu Juanxiu. Plant nitrogen detection based on leaf spectral transmittance[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(4): 214-218. (in Chinese with English abstract)

0 引言

氮肥的当季利用率低和不合理施氮引起的环境污染已经成为制约农业可持续发展的突出问题^[1-2]。施氮量与植物体的氮素营养水平密切相关^[3], 通过检测植物体的氮素营养水平从而进行科学施肥是解决上述问题的有效手段之一。植物的叶绿素含量和含氮量是体现其氮素营养水平的重要指标。利用传统的化学分析方法进行植物叶绿素含量和含氮量测量, 结果虽然较为可靠, 但测量过程繁琐费时, 难以满足及时指导施肥的生产需求^[4]。光谱分析技术在农业中的应用为植物氮素营养快速无损诊断提供了新手段。迄今为止, 国内外利用植物的反射光谱特性开展了许多氮素营养诊断研究, 其中大多数是关于冠层或叶片反射光谱的变化规律与氮素敏感波段选择的探讨^[5-7], 并通过统计分析反射光谱与氮素营养状况指标间的相关关系, 建立回归公式对植物氮素含量进行估测^[8-10]。对于植物光谱透过特性与氮素营养的研究方面, Watanabe 等利用叶片对 660~690 nm 和 760~1 100 nm 的光谱透过特性差异研制了一个植物叶绿素活体检测装置, 该装置采用光谱特征参数 $\log(I_{660-690}/I_{760-1100})$ 估测叶片叶绿素含量, 其中 $I_{660-690}$ 和 $I_{760-1100}$ 分别为对应波段的光透过叶片后的光照强度^[11]。之后日本美能达公司在此基础上作了算法改进并开发了便携式叶绿素计, 该仪器采用的光谱特征参数为 $\log(T_{940}/T_{650})$ 即 SPAD (soil and plant analysis development) 值, 其中 T_{940} 和 T_{650} 分别为对应波长的透过率。该便携式叶绿素计已被广泛用于水稻、

玉米、小麦和棉花等大田作物, 油菜和甘薯等园艺植物及一些木本植物的氮素营养快速无损诊断, 均取得良好的应用效果^[12-16]。

国内外关于利用植物反射光谱进行氮素营养诊断已开展了大量研究, 而对植物光谱透过特性方面多是基于上述便携式叶绿素计的应用研究。本文基于不同施氮水平下营养液栽培的水稻和黄瓜叶片的光谱透过率, 确定其与植物氮素营养直接相关的特征波段, 并构建光谱特征参数与叶片叶绿素含量和含氮量进行相关性分析及回归估测误差分析, 从而确定植物氮素营养指标用于植物叶片叶绿素含量和含氮量的估测。

1 材料与方法

1.1 植物样本的培育

本研究采用大田作物和园艺作物的代表型植物水稻 (*Oryza sativa* L., cv. 武育粳 3 号) 和黄瓜 (*Cucumis sativus* L., cv. 中农 8 号和北京 203) 作为指示植物进行栽培试验, 通过控制各栽培试验区的营养液氮素含量, 从而培育出不同氮素营养水平的植物叶片作为样本。栽培试验于 2008-2009 年期间在环境控制型实验温室内分别进行了 3 次作为重复。将育好的水稻或黄瓜苗移栽至温室内 5 个相同的栽培槽 (250 cm×60 cm×40 cm), 每个栽培槽内种植 16 株, 栽培基质采用蛭石、草炭和珍珠岩以 3:1:1 的比例混合均匀的人工基质。温室内的温度和光照通过湿帘风机和内/外遮阳幕进行适度环境调控。

对栽培槽内的水稻或黄瓜苗分别定期供给 5 个不同氮素水平的营养液配方, 见表 1。各配方营养元素浓度见表 2。营养液以日本山崎黄瓜配方^[17]中的氮素水平作为 100% 标准液 N100, 并考虑氨态氮和硝态氮的平衡, 在保证其他主要营养元素含量相同的情况下分别减少或增加营养液中含氮量为标准液的 50% 和 100%, 共设置了 5 个

收稿日期: 2010-02-24 修订日期: 2011-04-27

基金项目: 国家科技部 863 面上项目 (2006AA10Z206)

作者简介: 贺冬仙 (1970-), 女, 山西太谷人, 副教授, 博士生导师, 主要从事植物工厂、环境监控、环境生理学等方面的研究。北京 海淀区清华东路 17 号中国农业大学 67 信箱, 100083。Email: he_dongxian@hotmail.com

不同氮素营养水平的试验区 N0、N50、N100、N150 和 N200。各营养液中的微量元素含量均按通用配方进行配制, pH 值调整在 6.5~7.5 之间。营养液利用潜水泵和定时器进行自动定时灌溉。

表1 水稻和黄瓜栽培在不同试验区营养液的大量元素配方
Table 1 Nutrient solution in different treatments for cucumber and rice cultivation

配方	营养液的大量元素配方/(mg L ⁻¹)				
	N0	N50	N100	N150	N200
Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	0	0	826	826	826
CaCl ₂ ·2H ₂ O	516	516	0	0	0
KNO ₃	0	607	607	607	607
KCl	370	0	0	0	0
KH ₂ PO ₄	136	0	0	0	0
NH ₄ H ₂ PO ₄	0	115	115	115	115
NH ₄ NO ₃	0	0	0	280	560
MgSO ₄ ·7H ₂ O	483	483	483	483	483

表2 各配方主要营养元素浓度

Table 2 Main nutrient element concentrations for each solution

元素	主要营养元素浓度/(mmol L ⁻¹)				
	N0	N50	N100	N150	N200
N	0	7	14	21	28
P	1	1	1	1	1
K	6	6	6	6	6
Ca	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
Mg	2	2	2	2	2

1.2 测量参数与方法

水稻栽培中的分蘖期和黄瓜栽培中的快速生长期, 在每个试验区各选取 5 个叶片样本进行分光光谱特性和氮素营养水平的测量。分光光谱特性主要测量了叶片在 300~1 100 nm 的分光光谱透过率, 氮素营养水平主要测量了叶绿素含量和含氮量。

(1) 分光光谱透过率

水稻和黄瓜叶片的光谱透过率利用分光光度计 (UV3150, 岛津制作所, 日本) 大样品室中的积分球进行测量。分光光度计的扫描波长为 300~1 100 nm, 步长为 1 nm; 氙灯和钨灯的光源切换点在 360 nm 处, 光栅切换点在 820 nm 处, 狭缝宽度为 20 nm。每个叶片选取主叶脉两侧的叶片中部各 2 个位置进行 4 次分光光谱透过率测量。

(2) 叶绿素含量

称取水稻叶片 0.05 g 或黄瓜叶片 0.20 g 并剪成细丝放到 10 mL 试管内, 加入 10 mL 体积分数为 1:1 的乙醇-丙酮混合液后放置于 4℃ 冰箱内的暗黑条件下浸提 16~18 h, 将提取液摇匀后取上清液进行叶绿素含量的测量。叶绿素含量利用分光光度计 (UV3150, 岛津制作所, 日

本) 测定 663 nm 和 645 nm 的吸光度后按照 Arnon 法修正公式进行计算^[18]。

(3) 含氮量

将烘干后的水稻或黄瓜叶片研磨至直径为 0.2 mm 左右, 称取 0.10 g 置于 100 mL 消煮管中, 先滴入少量水润湿, 再加入 4 mL 浓 H₂SO₄, 盖上弯颈小漏斗轻轻摇匀后放置过夜。次日将消煮管利用消煮炉先升温至 180℃ 消煮 1 h, 再升温至 300℃ 消煮 2 h。待消煮溶液呈棕红色时取下稍冷 (约 3 min), 滴入 15 滴 30% 的 H₂O₂ 至溶液中并摇匀, 再放到 300℃ 的消煮炉上继续消煮约 15 min 后取下稍冷再次滴入 10 滴 30% 的 H₂O₂。重复上述步骤数次并且滴入的 H₂O₂ 依次减少, 直至溶液变成清亮, 之后再加热 20 min 以除尽多余的 H₂O₂。将该透明消煮液利用全自动凯氏定氮仪 (KDY-9830, 北京通润源机电技术有限责任公司, 中国) 进行蒸馏滴定后得到叶片含氮量。

1.3 数据处理及统计分析

每个叶片样本在 300~1 100 nm 的分光光谱透过率取其 4 次测量结果的均值, 每个试验区叶片的光谱透过率结果取其 5 个样本的均值。叶片的光谱透过率与其叶绿素含量和含氮量利用 SPSS 软件进行相关性分析, 从而确定用于植物氮素营养诊断的特征波长和参比波长。通过特征波长和参比波长的光谱透过率构建的光谱特征参数与叶片叶绿素含量和含氮量的相关性分析, 确定植物氮素营养指标后进行了实测检验。

2 结果与分析

2.1 叶片的光谱透过率

不同施氮水平下, 水稻和黄瓜叶片在 300~1 100 nm 的分光光谱透过率的变化趋势基本一致 (图 1)。在光合有效辐射波段 (400~700 nm), 叶片的光谱透过率在 550 nm 附近为波峰, 在 680 nm 附近为波谷; 且在 400~700 nm 叶片的光谱透过率随着施氮量的增加而降低。在近红外波段 (800~1 100 nm), 分光光谱透过率均在 40~50% 之间, 且变化幅度较小。

植物叶片的光谱特性主要由叶片的叶绿体色素、水分、蛋白质、核酸、糖类等物质对光波的吸收、反射和传导所引起的^[4-5]。在 400~700 nm, 叶片的光谱特性主要受叶绿素影响, 叶绿素对绿色光极少吸收而对红色光强烈吸收, 从而导致叶片的光谱透过率在 550 nm 附近形成波峰, 而在 680 nm 附近形成波谷。植物在快速生长阶段, 随着施氮量的增加, 叶片的叶绿素含量和含氮量也会随之增加, 因而叶片能吸收更多的 400~700 nm 的光进行光合作用, 所以植物叶片在该波段的光谱透过率随着施氮量的增加而降低。在近红外波段 (800~1 100 nm), 植物叶片的光谱特性主要受叶片内的组织结构影响, 叶绿素对其影响甚微, 叶片对该波段的吸收率一般不足 10%, 反射率在 50% 左右, 透过率约在 40~50% 之间, 这一结果与文献中关于植物叶片反射光谱的研究结果一致^[5,9,19]。

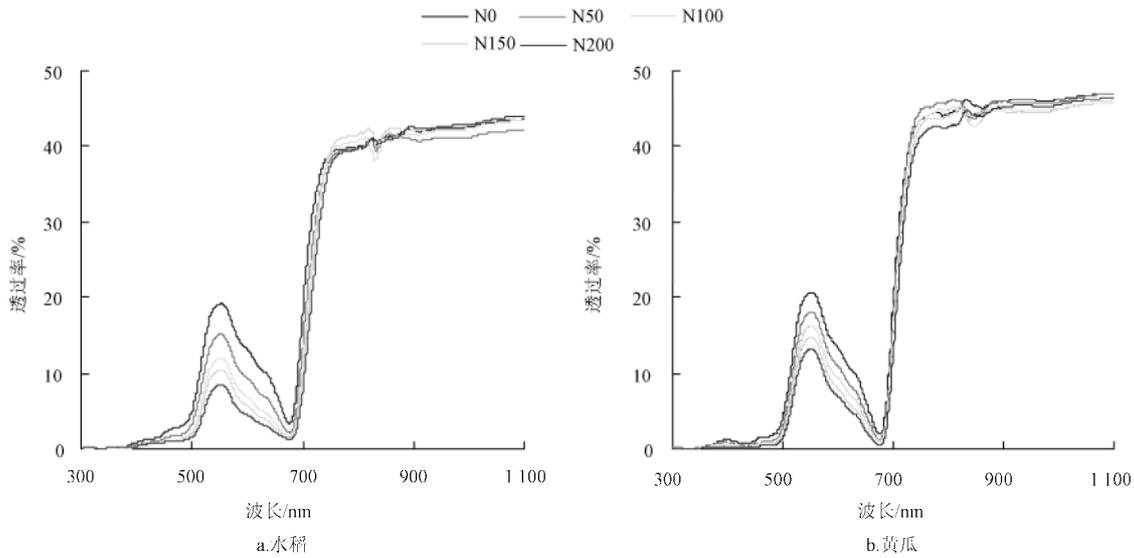


图 1 不同施氮水平下营养液栽培的水稻和黄瓜叶片的光谱透射率

Fig. 1 Leaf spectral transmittance of rice and cucumber leaves treated with culture solution in different nitrogen levels

2.2 叶片的光谱透射率与其叶绿素含量和含氮量的相关性

水稻和黄瓜叶片在 500~720 nm 波段的光谱透射率与其叶绿素含量和含氮量呈显著负相关关系，相关系数均在-0.8~-0.9 (P=0.01) 之间，而在 900~1 100 nm 波段的光谱透射率与叶片的叶绿素含量和含氮量的相关性不显著 (图 2)。

为了尽量减小植物叶片结构、厚度等对光谱数据分析的影响，不少相关研究或专利产品采用了特征波段与参比波段的光谱参数的差值或比值等组合式光谱特征参数，从而提高叶绿素含量或含氮量估测的准确性。例如，日本美能达公司生产的便携式叶绿素计 (SPAD-502) 使

用光谱特征参数 $\log(T_{940}/T_{650})$ 来估测植物叶片叶绿素含量；Fuchigami 等^[20]研制的便携式植物营养检测仪使用 T_{940}/T_{560} 和 T_{940}/T_{720} 分别来估测叶片叶绿素含量和含氮量；赵春江等^[21]和李庆波等^[22]分别采用 $\log(T_{650-690}/T_{740-760})$ 和 $a_1 \log(T_{650}) - a_2 \log(T_{940})$ 来估测叶片叶绿素含量。植物的叶绿素 640~660 nm 的红光强烈吸收，诸多对植物反射光谱的研究中指出在 550~570 nm 形成反射波峰，而在 680~750 nm 形成红边。因此，结合分光光谱透射率及其与叶绿素含量和含氮量的相关性分析结果，本文在 500~750 nm 波段内选取了 560、650 和 720 nm 作为典型的特征波长，并在 900~1 100 nm 波段内选取 940 nm 作为参比波长构建了 21 组光谱特征参数用于进行植物氮素营养诊断 (表 3)。

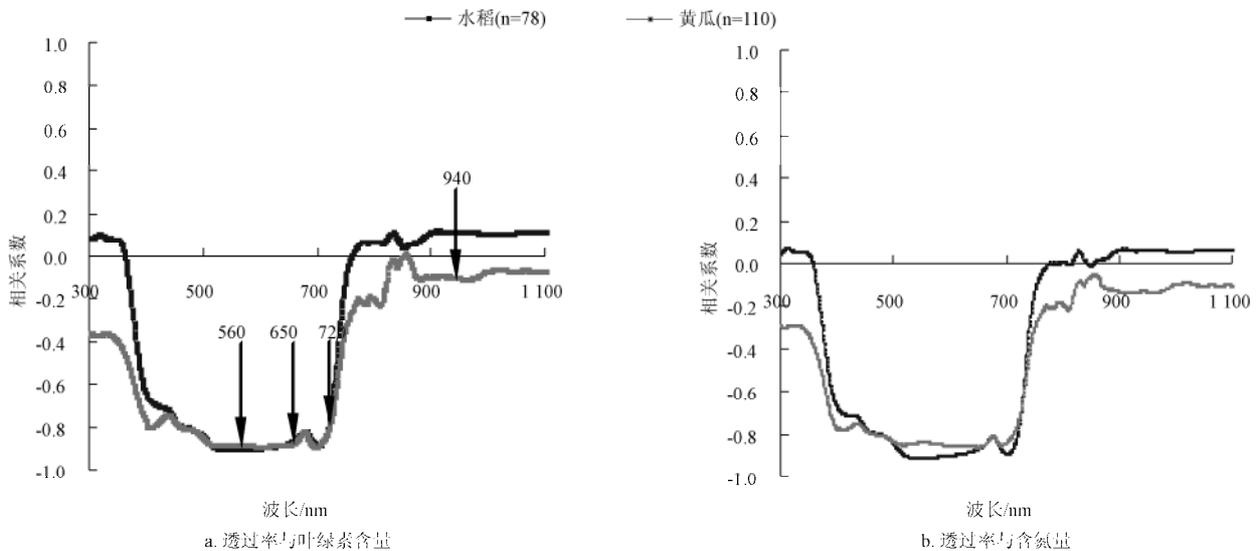


图 2 叶片分光光谱透射率与其叶绿素含量和含氮量之间的相关系数

Fig. 2 Correlation coefficient of leaf spectral transmittance with chlorophyll content and nitrogen content

表3 光谱特征参数与叶绿素含量和含氮量的相关系数
Table 3 Correlation coefficient between spectral feature parameter, chlorophyll content and nitrogen content

光谱特征参数	光谱特征参数与叶绿素含量的相关系数		光谱特征参数与含氮量的相关系数	
	水稻(n=78)	黄瓜(n=110)	水稻(n=78)	黄瓜(n=110)
T_{940}/T_{560}	0.94	0.90	0.93	0.87
$(T_{940}-T_{560})/(T_{940}+T_{560})$	0.95	0.91	0.92	0.87
$(T_{940}-T_{560})/T_{940}$	0.94	0.90	0.91	0.87
$T_{940}-T_{560}-T_{940}\times T_{560}$	0.92	0.89	0.88	0.86
$(1/T_{560}-1/T_{940})/(1/T_{940})$	0.94	0.90	0.93	0.87
$\log(T_{940}/T_{560})$	0.95	0.91	0.93	0.88
$\log(T_{940}/T_{560})/\log(T_{940})$	-0.92	-0.88	-0.87	-0.84
T_{940}/T_{650}	0.94	0.89	0.92	0.87
$(T_{940}-T_{650})/(T_{940}+T_{650})$	0.91	0.91	0.89	0.90
$(T_{940}-T_{650})/T_{940}$	0.90	0.90	0.88	0.89
$T_{940}-T_{650}-T_{940}\times T_{650}$	0.76	0.78	0.71	0.76
$(1/T_{650}-1/T_{940})/(1/T_{940})$	0.94	0.89	0.92	0.87
$\log(T_{940}/T_{650})$	0.94	0.92	0.92	0.90
$\log(T_{940}/T_{650})/\log(T_{940})$	-0.88	-0.89	-0.84	-0.88
T_{940}/T_{720}	0.90	0.86	0.88	0.81
$(T_{940}-T_{720})/(T_{940}+T_{720})$	0.90	0.86	0.88	0.81
$(T_{940}-T_{720})/T_{940}$	0.90	0.86	0.88	0.80
$T_{940}-T_{720}-T_{940}\times T_{720}$	0.89	0.85	0.87	0.80
$(1/T_{720}-1/T_{940})/(1/T_{940})$	0.90	0.86	0.88	0.80
$\log(T_{940}/T_{720})$	0.90	0.86	0.89	0.81
$\log(T_{940}/T_{720})/\log(T_{940})$	-0.92	-0.84	-0.88	-0.78

2.3 光谱特征参数与叶绿素含量和含氮量的相关性

与水稻叶绿素含量的相关系数超过 0.94($P=0.01$) 的光谱特征参数为 T_{940}/T_{560} 、 $(T_{940}-T_{560})/(T_{940}+T_{560})$ 、 $(1/T_{560}-1/T_{940})/(1/T_{940})$ 、 $(T_{940}-T_{560})/T_{940}$ 、 $\log(T_{940}/T_{560})$ 、 T_{940}/T_{650} 、 $(1/T_{650}-1/T_{940})/(1/T_{940})$ 、 $\log(T_{940}/T_{650})$ ，且上述光谱特征参数与其含氮量的相关系数均超过了 0.91($P=0.01$) (表 3)。与黄瓜叶绿素含量的相关系数高于 0.91($P=0.01$) 的光谱特征参数为 $(T_{940}-T_{560})/(T_{940}+T_{560})$ 、 $\log(T_{940}/T_{560})$ 、 $(T_{940}-T_{650})/(T_{940}+T_{650})$ 、 $\log(T_{940}/T_{650})$ ，上述光谱特征参数中的前两组与黄瓜含氮量的相关系数分别为 0.87 和 0.88 ($P=0.01$)，后两组与其含氮量的相关系数均为 0.90 ($P=0.01$)。结果表明，与水稻和黄瓜叶绿素含量和含氮量相关性较好的光谱特征参数是 $(T_{940}-T_{560})/(T_{940}+T_{560})$ 、 $\log(T_{940}/T_{560})$ 及 $\log(T_{940}/T_{650})$ 。

2.4 光谱特征参数的实测检验

另外分别取 30 个新的水稻和黄瓜叶片样本通过化学方法测量其叶绿素含量和含氮量，并与其光谱特征参数 $(T_{940}-T_{560})/(T_{940}+T_{560})$ 、 $\log(T_{940}/T_{560})$ 和 $\log(T_{940}/T_{650})$ 进行线性回归，利用回归公式估测叶绿素含量和含氮量并与实测值进行了比较 (表 4)。结果表明：利用 $(T_{940}-T_{560})/(T_{940}+T_{560})$ 、 $\log(T_{940}/T_{560})$ 和 $\log(T_{940}/T_{650})$ 估测水稻的叶绿素含量和含氮量的相对误差均小于 6%；利用上述光谱特征参数估测黄瓜的叶绿素含量的相对误差在 5% 以下，估测其含氮量的相对误差在 8% 以下。

以上结果表明，利用光谱特征参数 $(T_{940}-T_{560})/(T_{940}+$

$T_{560})$ 、 $\log(T_{940}/T_{560})$ 和 $\log(T_{940}/T_{650})$ 进行植物叶片的叶绿素含量和含氮量估测，其相对误差满足生产现场对植物氮素营养水平活体检测要求，适宜作为植物氮素营养指示器。其中， $(T_{940}-T_{560})/(T_{940}+T_{560})$ 与 Fuchigami 等开发的便携式植物营养检测仪采用的光谱特征参数一致； $\log(T_{940}/T_{650})$ 与日本美能达公司生产的便携式叶绿素计 (SPAD-502) 采用的光谱特征参数一致。

表4 利用光谱特征参数估测叶片叶绿素含量和含氮量的相对误差 (均值±标准偏差)

光谱特征参数	Table 4 Relative error of estimated chlorophyll and nitrogen contents using spectral feature parameter %			
	水稻		黄瓜	
	叶绿素含量的估测误差	含氮量的估测误差	叶绿素含量的估测误差	含氮量的估测误差
$(T_{940}-T_{560})/(T_{940}+T_{560})$	5.3±3.7	5.2±3.4	4.4±3.5	7.6±5.0
$\log(T_{940}/T_{560})$	5.2±3.7	4.7±3.0	4.5±3.5	7.7±5.0
$\log(T_{940}/T_{650})$	5.1±3.7	5.4±3.4	4.5±3.9	6.5±4.6

注: $n=30$

3 结论

本文通过分析不同施氮水平下营养液栽培的水稻和黄瓜叶片在 300~1 100 nm 的分光光谱透过率与其叶绿素含量和含氮量的相关关系，确定了 560、650 和 720 nm 作为特征波长及 940 nm 作为参比波长适用于植物营养快速无损诊断。以上述波长的光谱透过率构建的 21 组光谱特征参数中， $(T_{940}-T_{560})/(T_{940}+T_{560})$ 、 $\log(T_{940}/T_{560})$ 和 $\log(T_{940}/T_{650})$ 与植物氮素营养水平的相关性较好，且进行回归估测的叶绿素含量和含氮量的相对误差均小于 8%，基本满足生产现场对植物氮素营养水平活体检测的要求。因此，上述光谱特征参数可作为植物氮素营养指标用于植物叶片叶绿素含量和含氮量的快速无损估测。

[参考文献]

- [1] 曾希柏, 李菊梅. 中国不同地区化肥施用及其对粮食生产的影响[J]. 中国农业科学, 2004, 37(3): 387-392.
Zeng Xibai, Li Jumei. Fertilizer application and its effect on grain production in different counties of China [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2004, 37 (3): 387-392. (in Chinese with English abstract)
- [2] Ju Xiaotang, Xing Guangxi, Chen Xinping, et al. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems [J]. Proceedings of the National Academy of Science, 2009, 106(9): 3041-3046.
- [3] 张福锁, 李春剑. 土壤与植物营养研究新动态 (第四卷) [M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2001: 42-48.
- [4] 焦雯珺, 闵庆文, 林焜, 等. 植物氮素营养诊断的进展与展望[J]. 中国农学通报, 2006, 22(12): 351-355.
Jiao Wenjun, Min Qingwen, Lin Kun, et al. Progress and perspective on nutrition diagnosis of plant nitrogen [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2006, 22 (12): 351-355. (in Chinese with English abstract)
- [5] Thomas J R, Oerther G F. Estimating nitrogen content of sweet pepper leaves by reflectance measurements [J]. Agronomy

- Journal, 1972, 64(1): 11—13.
- [6] Filella I, Serra L, Penuelas J, et al. Evaluating wheat nitrogen status with canopy reflectance indices and discriminant analysis[J]. *Crop Science*, 1995, 35(5): 1400—1405.
- [7] 吴长山, 童庆禧, 郑兰芬, 等. 水稻、玉米的光谱数据与叶绿素的相关分析[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2000, 8(1): 31—37.
Wu Changshan, Tong Qingxi, Zheng Lanfen, et al. Correlation analysis between spectral data and chlorophyll of rice and maize [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2000, 8 (1): 31—37. (in Chinese with English abstract)
- [8] Daughtry C S T, Walthall C L, Kim M S, et al. Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance[J]. *Remote Sensing Environment*, 2000, 74(2): 229—239.
- [9] 张金恒. 光谱遥感诊断水稻氮素营养机理与方法研究[D]. 浙江大学, 2003.
- [10] Pu R, Gong P, Biging G S et al. Extraction of red edge optical parameters from Hyperion data for estimation of forest leaf area index[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(4): 916—921.
- [11] Watanabe Shigeru, Kuzunuki Tatsuo. Method of and device for measuring chlorophyll of living leaves [P]. Japan, 4 295 042, 1981-10-13.
- [12] Piekielek W P, Fox R H. Use of a chlorophyll meter to predict side-dress Nitrogen requirements for maize [J]. *Agronomy Journal*, 1992, 84(1): 59—65.
- [13] 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, 25(2): 135—138.
Wu Lianghuan, Tao Qinnan. Nitrogen fertilizer application based on the diagnosis of nitrogen nutrition of rice plants using chlorophyll meter [J]. *Journal of Zhejiang Agricultural University*, 1999, 25 (2): 135—138. (in Chinese with English abstract)
- [14] Chang S X., Robison D J. Nondestructive and rapid estimation of hardwood foliar nitrogen status using the SPAD-502 chlorophyll meter[J]. *Forest Ecology and Management*, 2003, 181(3): 331—338.
- [15] 李海云, 任秋萍, 孙书娥, 等. 10种园林树木叶绿素与SPAD值相关性研究[J]. *林业科技*, 2009, 34(3): 68—70.
Li Haiyun, Ren Qiuping, Sun Shue, et al. Study on relation between SPAD value and chlorophyll contents in 10 kinds horticulture woody plants [J]. *Forestry Science and Technology*, 2009, 34 (3): 68—70. (in Chinese with English abstract)
- [16] 裘正军, 宋海燕, 何勇, 等. 应用SPAD和光谱技术研究油菜生长期间的氮素变化规律[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(7): 150—154.
Qiu Zhengjun, Song Haiyan, He Yong, et al. Variation rules of the nitrogen content of the oilseed rape at growth stage using SPAD and visible-NIR [J]. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23 (7): 150—154. (in Chinese with English abstract)
- [17] 刘士哲. 现代实用无土栽培技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001: 98.
- [18] Lichtenthaler H K, Wellbuen A R. Determinations of total carotenoids and chlorophyll a and b leaf extracts in different solvents[J]. *Biochemical Society Transactions*, 1983, 11(5): 591—592.
- [19] Bauerle W L, Weston D J, Bowdena J D, et al. Leaf absorptance of photosynthetically active radiation in relation to chlorophyll meter estimates among woody plant species [J]. *Scientia Horticulturae*, 2004, 101(1/2): 169—178.
- [20] Fuchigami L H, Ding P H, Barnes G E. Portable meter to measure chlorophyll, nitrogen and water and methods [P]. USA, WO 2007062196, 2007-05-31.
- [21] 王纪华, 赵春江, 黄文江, 等. 一种便携式植物氮素和水分含量的无损检测方法及其测量仪器[P]. 中国, 200510088935.0, 2006-01-04 公开.
- [22] 李庆波, 徐玉坡, 张超航, 等. 基于光谱技术的植物叶绿素浓度无损检测仪器的研制[J]. *光谱学与光谱分析*, 2009, 29(10): 2875—2878.
Li Qingbo, Xu Yupo, Zhang Chaohang, et al. Development of chlorophyll concentration nondestructive measurement instrument based on spectral analysis technology [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, 29(10): 2875—2878. (in Chinese with English abstract)

Plant nutrition indices using leaf spectral transmittance for nitrogen detection

He Dongxian, Hu Juanxiu

(Key Laboratory of Agriculture Engineering in Structure and Environment of Ministry of Agriculture,
China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Spectral transmittances in wavelength ranged from 300 to 1100 nm of rice and cucumber leaves treated with culture solution in five different nitrogen levels were measured in this study. The correlated relationships between the above spectral transmittances and their chlorophyll contents and nitrogen contents indicated that the 560, 650, and 720 nm as feature wavelength and 940 nm as reference wavelength were useful for plant nutrient diagnosis. Correlation analysis and their regression examination between 21 spectral feature parameters composed by the transmittances at above wavelength, and the leaf chlorophyll contents and nitrogen contents showed that spectral feature parameters of $(T_{940}-T_{560})/(T_{940}+T_{560})$, $\log(T_{940}/T_{560})$ and $\log(T_{940}/T_{650})$ were available for plant nutrient diagnosis with less than 8% relative error in measurement tests of rice and cucumber leaves. Therefore, the above spectral feature parameters as plant nitrogen indices can be used to estimate the chlorophyll content and nitrogen content and thus support for nondestructive plant nutrient detection.

Key words: chlorophyll content, nitrogen content, spectral feature parameter, spectral transmittance, nondestructive detection