

锦橙叶片钾含量光谱监测模型研究

易时来¹, 邓烈³, 何绍兰², 郑永强¹, 毛莎莎¹

(¹西南大学柑桔研究所, 重庆 400712; ²中国农业科学院柑桔研究所, 重庆 400712; ³国家柑桔工程技术研究中心, 重庆 400712)

摘要: 【目的】快速、无损、准确地获取柑橘叶片营养信息。【方法】以盆栽蓬安 100 锦橙为试材, 通过精确控制施肥处理 (K_0 : 0 g, K_1 : 30 g, K_2 : 75 g, K_3 : 90, K_4 : 120 g k_2O /株/年), 利用鲜叶进行光谱检测钾素营养状况分析。【结果】可见近红外波段范围内, 各施钾处理蓬安 100 锦橙夏梢叶片光谱反射强度呈 $K_3 > K_0 > K_1 > K_2 > K_4$ 趋势。通过对反射光谱、一阶微分、二阶微分和倒数对数光谱进行多元散射 (multiple scattering correction, MSC) 校正处理, 运用偏最小二乘法 (partial least square method, PLS) 与内部交叉验证建立了钾含量预测回归模型, 其中反射光谱的二阶微分光谱钾含量定标模型具有最好的预测能力, 其预测相关系数最大, $r = 0.82$; 预测均方根误差较小, $RMSEP = 0.0038$; 偏差 (Bias) 绝对值最小, $Bias = -2.34E-05$ 。【结论】通过锦橙叶片反射光谱二阶微分值与叶片钾含量构建的 PLS 回归模型, 可以较好地预测蓬安 100 锦橙夏梢叶片钾含量。进一步分析表明, 波段 477—515 nm、541—588 nm、632—669 nm、701—718 nm 和 754—794 nm 是反射光谱二阶微分与蓬安 100 锦橙叶片钾含量定标模型的特征波长。

关键词: 锦橙叶片; 钾含量; 二阶微分; 偏最小二乘法; 可见近红外光谱

A Spectrum Based Models for Monitoring Leaf Potassium Content of *Citrus sinensis* (L)cv. Jincheng Orange

YI Shi-lai¹, DENG Lie³, HE Shao-lan², ZHENG Yong-qiang¹, MAO Sha-sha¹

(¹Citrus Research Institute, Southwest University, Chongqing 400712; ²Citrus Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Chongqing 400712; ³National Engineering Research Center for Citrus Technology, Chongqing 400712)

Abstract: 【Objective & Method】 Field experiments were conducted to assess the potassium content in leaves of *Citrus sinensis* (L)cv. Peng'an 100 Jincheng orange by using VIS/NIRS spectral method. Before calibration, principal component analysis (PCA) and partial least square (PLS) techniques were applied in data pre-processing. 【Result】 The order of leaf reflective spectrum intensity was $K_3 > K_0 > K_1 > K_2 > K_4$ in the visible near-infrared range of 400-1000 nm, where the K fertilizer usage of K_0, K_1, K_2, K_3, K_4 treatments were 0 g, 30 g, 75 g, 90 g, 120 g(k_2O /plant/year), respectively. The calibration models of potassium content were built by applying PLS and internal cross-validation test method and through processing the reflectance spectrum, the first derivatives, the second derivatives and the reciprocal logarithm spectrum of Peng'an 100 Jincheng leaves using multiplicative scatter correction(MSC). The results showed that the model of the second derivatives calibration of reflectance spectrum had the best predicative ability, the highest correlation coefficient, the smallest root mean square error of prediction (RMSEP) and the smallest absolute bias at 0.82, 0.0038 and -2.34E-05, respectively. 【Conclusion】 The second derivatives of reflectance spectrum could be used to predict the potassium content in Peng'an 100 Jincheng leaves. And 477-515 nm, 541-588 nm, 632-669 nm, 701-718 nm and 754-794 nm were the characteristics of wavelengths of second derivatives of reflectance spectrum predicting potassium content in summer shoot leaves of of Peng'an 100 Jincheng.

Key words: Jincheng orange leaf; potassium content; second derivatives; partial least squares (PLS); Vis/NIR-spectroscopy

收稿日期: 2009-05-12; 接受日期: 2009-11-07

基金项目: 重庆市重大攻关项目 (CSTC,2006)、科技部支撑计划项目 (2007BAD47B04-1)、重庆市自然科学基金项目 (CSTC,2007BB1378)、重庆市柑橘学重点实验室和重庆市教委果树学重点实验室联合资助项目

作者简介: 易时来, 助理研究员, 硕士。Tel: 023-68349706/68349726; Fax: 023-68247006; E-mail: liedeng@163.com; yishilai@126.com

0 引言

【研究意义】测量作物元素含量是精准农业中一项重要而又关键的工作, 只有精确诊断作物的营养水平, 才能及时进行精确、科学施肥^[1]。因此, 如何实时、快速、无损、准确地获取作物营养信息, 成为世界各国精准农业研究的热点之一^[2-4]。常规化学分析方法(如火焰光度计法, 原子吸收法等)虽是测试柑橘营养元素的主要方法, 但存在费时繁琐、破坏植株和实时性差等缺点; 田间速测方法, 虽实时性强, 但精度不高。植物光谱分析能在不需化学试剂的情况下快速测试多个指标, 并且操作简单、自动化程度高。研究基于光谱分析技术的柑橘实时快速营养诊断技术, 对于提升果树快速营养诊断技术, 建立和完善施肥技术体系都具有重要的理论和实践意义。【前人研究进展】柑橘是世界第一大水果作物, 其种植面积和产量均居果树作物之首。据 2008 年统计, 中国柑橘种植面积为 $213 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 产量约 $2\,200 \times 10^4 \text{ t}$, 均居世界第一位, 成为世界第一大柑橘生产国。目前, 有关基于光谱估测作物营养元素的研究主要集中在水稻^[5-6]、小麦^[7-9]、棉花^[10-12]、烟草^[13-14]、油菜^[15-17]等大田作物上, 并且大多数是针对植物氮素水平与光谱特性关系的研究^[1-4, 7-9]。邢东兴等^[18]利用光谱技术对红富士苹果叶片全钾含量进行估测研究, 乔欣等^[19]利用冠层光谱信息估算大豆全钾含量, 均取得了较好的预测效果。对于多年生常绿柑橘果树作物, 尤其是柑橘钾素的高光谱诊断方面, 未见报道。【本研究切入点】钾对叶绿素的形成具有重要作用, 钾的丰缺与植物叶片结构、水分等状况密切相关, 其结果必然会影响到其可见-近红外等波段的光谱信息^[7]。因此, 通过对柑橘叶片不同钾含量的光谱反应试验研究与分析, 试图建立基于光谱技术的柑橘叶片钾含量预测回归模型, 为实现柑橘叶片钾素营养的光谱诊断提供技术支撑。【拟解决的关键问题】通过对中国柑橘的重要品种锦橙叶片钾含量与可见近红外反射光谱信息的相关性研究, 在不同光谱预处理方法比较分析下, 建立最佳光谱预处理的钾含量光谱响应, 以期对柑橘叶片钾含量的快速、无损、实时的光谱诊断及钾肥科学管理提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验品种为盆栽单系枳砧 (*Poncirus trifoliata*) 蓬安 100 锦橙 [*Citrus sinensis*(L)cv. Peng'an 100 Jincheng

orange]。苗木于 2007 年 9 月中旬嫁接, 2008 年 4 月上旬定植于直径为 20 cm、高 45 cm 的圆柱体钵(装土 66 kg/钵)中, 每钵 1 株。土壤为沙土, pH 8.04, 全氮 $8.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (N 计), 全磷 $0.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (P_2O_5 计), 全钾 $62.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (K_2O 计), 有机质 $15.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验处理

钾肥设 K_0 、 K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_4 共 5 个水平(各处理氮磷用量相同), 单株处理, 5 次重复, 共 25 株。钾肥为含 K_2O 50% 的硫酸钾, 各处理的施用总量分别为 0、30、75、90、120 g/株/年, 分别在春梢、夏梢、秋梢萌动和顶芽停止生长时, 分 6 次等量施用。

1.3 试验方法

2008 年 11 月夏梢叶片完全老熟时, 采集正常夏梢叶 10 片/株, 洗净, 擦干; 利用美国 ASD 公司生产的 FieldSpec HH 光谱辐射仪 (325—1 075 nm) 在暗室中进行鲜叶光谱数据采集。以 USHIO 公司生产的 A128932 型钨卤灯作光源, 光源距离检测叶片 30 cm。光谱采样间隔约 1.5 nm, 光谱分辨率为 3.5 nm, 视场角为 25° 。叶片光谱反射率测试前以标准白板定标。被测叶片放置在 $100 \text{ cm} \times 100 \text{ cm}$ 黑布上, 探头离目标物的距离视其大小而定, 保证探头的视野范围落在目标物体上, 每株测定 10 片叶, 每叶测定 10 条曲线, 每条光谱曲线设为 10 次平均值。叶片钾含量用火焰光度计法测定。

1.4 数据处理与分析

取 400—1 000 nm 范围的原始反射光谱数据, 用光谱仪自带的 ViewSpec Pro 软件初步转换, 获取一阶微分、二阶微分及倒数对数光谱数据, 再通过 Unscramble V9.7 软件对数据进行不同降噪方法处理, 运用偏最小二乘法 (PLS) 及内部交叉验证构建模型。

2 结果

2.1 不同施钾处理蓬安 100 锦橙夏梢叶片钾含量

不同钾用量处理, 蓬安 100 锦橙夏梢叶片钾含量如表 1 所示。随着钾肥用量的增加, 锦橙叶片钾含量呈增加的趋势, 施钾处理均高于对照 (K_0)。其中 K_4 处理最高, 其平均钾含量比对照高 42%; K_2 略高于 K_3 处理, 居其次; K_1 处理平均含量为 $0.241 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 比对照高 28%。经 SPSS 方差统计分析表明, 不同钾肥用量各处理之间的差异均不显著 ($P=0.388 > 0.05$)。

2.2 不同施钾水平蓬安 100 锦橙夏梢叶片光谱特征

不同钾含量蓬安 100 锦橙夏梢叶片光谱反射率如图 1 所示。可以看出, 在 400—1 000 nm 波段范围

表 1 不同钾处理蓬安 100 锦橙夏梢叶片钾含量

Table 1 The potassium content in summer shoot leaves of Peng'an 100 Jincheng in different potassium treatments

处理 Treatments	钾含量 Potassium content (g·kg ⁻¹)	比对照高 Higher than the control (%)
K ₀	0.188±0.079a	-
K ₁	0.241±0.061a	28.43
K ₂	0.257±0.073a	37.06
K ₃	0.257±0.058a	36.74
K ₄	0.266±0.064a	41.53

*不同小写字母表示 0.05 水平差异显著

Different lowercase letters indicate the significant differences at the level of 0.05

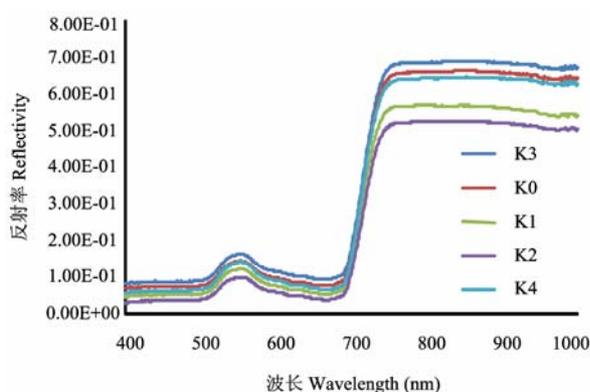


图 1 蓬安 100 锦橙夏梢叶片钾含量及其反射光谱特征

Fig. 1 The reflective spectrum characteristics in summer shoot leaves of Peng'an 100 Jincheng with different potassium contents

内, 所有施钾水平处理的蓬安 100 锦橙叶片, 其反射光谱在可见光区都具有较弱的反射率, 并且在 550 nm 处都有一个强反射峰。从 700—750 nm, 反射迅速增强, 在 750—1 000 nm 内趋于平缓而略有降低, 基本

形成一个高的“反射平台”。而不同钾量处理, 蓬安 100 锦橙叶片的反射光谱有明显的不同, 在 400—1 000 nm 范围内, 反射光谱反射强度呈 K₃>K₀>K₁>K₂>K₄ 趋势, 即随施钾量增加, 反射强度基本呈降低趋势。并且从可见光至近红外, 不同钾肥处理的反射光谱差异越来越明显, 这为钾含量光谱诊断提供了可能。

2.3 光谱预处理方法选择

目前, 偏最小二乘法 (PLS) 是化学计量学中最普遍使用的定量分析方法, 该方法可除去噪声, 解决光谱共线问题, 有效地提取光谱信息^[20-21]。为了减少光程变化、样品粒度、基线平移与旋转可能对模型的影响, 本文采用 Savitzky-Golay 平滑法 (S-G)、多元散射校正 (multiple scattering correction, MSC)、消噪 (Noise) 和变量标准化 (standardization of variables, SNV) 4 种方法分别建模, 不同光谱预处理方法的 PLS 建模结果见表 2。

采用 PLS 建立校正模型时, 如果主成分过少, 不能反映未知样品被测组分产生的测量数据变化, 预测准确度就会降低; 如主成分过多, 就会将一些代表噪音的主成分加到模型中, 其预测能力也会降低。由表 2 可见, S-G 对光谱数据预处理后的主成分数 13 个, 也只能表达定标波段 64% 的信息, 而 MSC、Noise 及 SNV 这 3 种光谱预处理的主成分数和累计贡献率基本相当。PLS 法建立的较好模型要求预测相关系数尽量高、建模与预测均方差尽量低及建模与预测均方差尽量接近, 以此对光谱不同预处理方法进行综合评价, MSC 和 SNV 光谱预处理所建模型基本相当, 均较优。因此, 本文采用 MSC 校正方法。

2.4 蓬安 100 锦橙夏梢叶片钾含量与反射光谱校正模型参数

蓬安 100 锦橙夏梢叶片原始反射光谱经 MSC 校正及内部交叉验证, 运用偏最小二乘法 PLS 建立的原

表 2 不同光谱预处理方法的 PLS 建模分析

Table 2 Analysis of modeling by partial least squares with different spectrum pretreatment methods

光谱处理 Spectrum pretreatments	主成分 Principal components	累积贡献率 Cumulative contribution rates	预测相关系数 Correlation coefficient of prediction	建模均方差 Root mean square error of calibration	预测均方差 Root mean square error of prediction	偏差 Bias
S-G	13	64	0.8717	0.0003	0.0034	1.000E-04
MSC	2	74	0.8147	0.0034	0.0039	6.170E-05
Noise	3	75	0.7623	0.0012	0.0043	1.430E-05
SNV	2	74	0.8147	0.0034	0.0039	6.160E-05

始反射光谱 (reflectance spectrum, RS)、一阶微分光谱 (first derivatives spectrum, FDS)、二阶微分光谱 (second derivatives spectrum, SDS) 以及倒数对数光谱 (reciprocal logarithm spectrum, RLS) 与叶片钾含量之间定标模型, 其相关参数精度如表 3 所示。

从表 3 可以看出, 在波长 400—1000 nm 范围内, 原始反射光谱等 4 种光谱数据所建模的主成分数相同, 而累计贡献率呈 FDS>SDS>RS>RLS 的趋势。

表 3 蓬安 100 锦橙夏梢叶片光谱与钾含量定标模型精度 (n=25)

Table 3 The precision of calibration models between spectrum and potassium content in summer shoot leaves of Peng'an 100 Jincheng (n=25)

光谱*	主成分	累积贡献率	预测相关系数	建模均方差	预测均方差	偏差
Spectrum	Principal component	Cumulative contribution rate (%)	Predicted correlation coefficient	Root mean square error of calibration	Root mean square error of prediction	Bias
RS	2	74	0.81**	0.0034	0.0039	6.17E-05
FDS	2	76	0.82**	0.0033	0.0038	3.28E-05
SDS	2	75	0.82**	0.0033	0.0038	-2.34E-05
RLS	2	70	0.77**	0.0037	0.0043	-3.73E-05

* 定标波长为 400-1 000 nm * Calibration wavelength of 400-1 000 nm

PLS 模型质量较优的标准为有较高的预测相关系数 (r) 和较低的建模均方差及预测均方差, 并且建 RMSEC 与 RMSEP 尽量接近, 同时偏差绝对值较小^[22-23]。综合评价叶片原始反射光谱及其一阶、二阶、倒数对数光谱与钾含量的定标模型各参数, 可知二阶微分光谱钾含量定标模型最佳。因此, 可以用原始光谱的二阶微分光谱来预测蓬安 100 锦橙叶片钾含量。

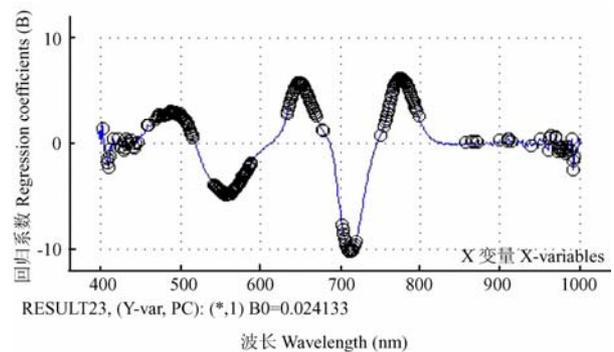
2.5 蓬安 100 锦橙夏梢叶片钾含量与反射光谱相关的定标模型回归系数

蓬安 100 锦橙夏梢叶片钾含量与二阶微分光谱经 MSC 及内部交叉验证构建的定标模型的回归系数如图 2 所示。进一步统计分析表明, 477—515 nm、541—588 nm、632—669 nm、701—718 nm 和 754—794 nm 波段的回归系数为原始反射光谱的二阶微分值与钾含量定标模型的特征变量, 因此, 477—515 nm、541—588 nm、632—669 nm、701—718 nm 和 754—794 nm 波段是蓬安 100 锦橙夏梢叶片反射光谱的二阶微分值与钾含量定标模型的特征波段。

3 讨论

本试验通过对蓬安 100 锦橙叶片钾含量与反射光

FDS 和 SDS 定标模型的预测关系相同, 即 $r=0.82$, 并且都略高于 RS 和 RLS 定标模型的相关系数, 4 种预测相关系数均极显著 ($r_{0.01(23)}=0.505$); 并且 FDS、SDS 的建模均方差 (RMSEC) 和预测均方差 (RMSEP) 相对较小, 并且 RMSEC 与 RMSEP 相对比较接近。但其偏差 (Bias) 绝对值的大小呈 SDS<FDS<RLS<RS 的趋势, 即二阶微分与叶片钾含量定标模型的偏差绝对值相对最小, Bias=-2.34E-05。



标 “○” 为特征 X 变量 ‘○’ significant x-variables

图 2 蓬安 100 锦橙夏梢叶片钾含量与二阶微分光谱定标模型回归系数

Fig. 2 The regression coefficients of the potassium content and the second derivatives spectrum in summer shoot leaves of Peng'an 100 Jincheng

谱的相关性进行了研究。施钾量不同, 蓬安 100 锦橙夏梢叶片钾营养水平也各异, 并且在可见近红外 400—1 000 nm 整个波段范围内, 原始光谱反射强度与钾含量基本都呈负相关关系, 这可能与缺钾时柑橘叶片

表皮细胞和内部细胞结构发生变化,叶面厚度增加,叶片栅栏、海绵组织的细胞收缩和局部破裂的结果。而与王珂等^[6]对水稻冠层不同钾营养水平下的反射光谱特征研究结果为随着钾营养水平的提高,近红外反射率逐渐增加,可见光部分却有相反的趋势有所差异。柑橘作为多年生常绿果树,其叶片与水稻、小麦及油菜等作物的结构差别较大,并且柑橘叶片具有独特的蜡质结构,这是水稻、小麦等作物所不具有的,柑橘叶片的这种特殊结构是否影响光谱反射特征,其内在生理生化机理以及柑橘不同生长发育时期的特征光谱波段的遴选等方面还有待深入研究。在近红外波段 750—1 000 nm,出现了较高的“反射平台”,并且叶片钾含量不同,反射光谱差异非常明显,这与前人研究基本一致^[6,14]。因此,利用柑橘叶片光谱分析诊断柑橘钾素营养状况提供了可能。

目前,可见近红外分析技术主要通过光谱仪(仪器设备)、化学计量软件(数据分析)和应用模型(模型反演)三者的有机结合才能满足快速分析的技术要求。而应用模型的构建主要有多元线性回归(MLR)、逐步回归(SMR)、主成份分析(PCA)与偏最小二乘法(PLS)等分析方法^[24]。MLR 和 SMR 法在分析样品时只用了一些特征波长点的光谱信息,其它点的信息被丢失,易产生模型的过适性。PCR 和 PLS 的最显著特点就是利用了全部的光谱信息,可以压缩所需样品数量,将高度相关的波长点归于一个独立变量中,根据为数不多的独立变量建立回归方程,通过内部检验防止过模型现象,并且比 SMR 和 MLR 分析精度高。同时,原始光谱数据含有来自高频随机噪音、样本不均匀、基线漂移、光散射等不利因素的影响,因此,需对光谱数据进行预处理。

本试验利用美国 ASD 公司研制的地物光谱辐射计进行原始反射光谱数据采集,由于原始反射光谱数据含有来自高频随机噪音、样本不均匀、基线漂移、光散射等不利因素的影响,运用仪器配套的数据软件将原始反射光谱数据转化成一阶微分、二阶微分和倒数对数光谱数据。通过对原始反射光谱等 4 种光谱数据进行平滑、变量标准化及多元散射校正等预处理,通过多次尝试后的结果表明,利用反射光谱的二阶微分经 MSC 光谱处理,运用偏最小二乘法所建立的钾含量预测模型的效果最佳。

由于受仪器设备条件的限制,本研究未利用 1 000—2 500 nm 的光谱反射率对柑橘叶片钾元素含量进行分析。

4 结论

(1) 随着钾肥用量的增加,蓬安 100 锦橙叶片钾含量呈增加的趋势。施钾量不同,蓬安 100 锦橙夏梢叶片反射光谱特征不同。在可见近红外整个波段范围内,各施钾处理的原始光谱反射强度随施钾量的增加基本呈下降趋势。尤其在近红外波段区域(750—1 000 nm),各施钾水平反射光谱特征差异最明显,因此,可以认为该波段区是柑橘叶片钾含量的敏感波段区。

(2) 通过对反射光谱、一阶微分、二阶微分和倒数对数光谱进行 MSC 处理,运用偏最小二乘法(PLS)与内部交叉验证建立的锦橙叶片钾含量预测回归模型,其精度分析表明,利用叶片反射光谱的二阶微分值来预测蓬安 100 锦橙叶片钾含量具有一定的可行性。

(3) 柑橘作为多年生常绿果树,其物候期复杂,如何真正获取田间柑橘植株的光谱信息,遴选柑橘不同生育期的敏感光谱波段,提高田间无损实时柑橘生理生化成分的预测精度,还需进行大量的试验研究、验证与校正。

References

- [1] 蒋金豹,陈云浩,黄文江,李京. 条锈病胁迫下冬小麦冠层叶片氮素含量的高光谱估测模型. 农业工程学报, 2008, 24(1): 35-39.
Jiang J B, Chen Y H, Huang W J, Li J. Hyperspectral estimation models for LTN content of winter wheat canopy under stripe rust stress. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(1): 35-39. (in Chinese)
- [2] 薛利红,曹卫星,罗卫红,姜东,孟亚利,朱艳. 基于冠层反射光谱的水稻群体叶片氮素状况监测. 中国农业科学, 2003, 36(7): 807-812.
Xue L H, Cao W X, Luo W H, Jiang D, Meng Y L, Zhu Y. Diagnosis of nitrogen status in rice leaves with the canopy spectral reflectance. *Scientia Agricultura Sinica*, 2003, 36(7): 807-812. (in Chinese)
- [3] Bronson K F, Chua T T, Booker J D, Keeling J W, Lascano R J. In-season nitrogen status in irrigated cotton II leaf nitrogen and biomass. *Soil Science Society of American Journal*, 2003, 67: 1439-1448.
- [4] Balckmer T M, Schepers J S, Varvel G E, Walter-Shea E A. Nitrogen deficiency detection using reflected short-wave radiation from irrigated corn canopies. *Agronomy Journal*, 1996, 88: 1-5.
- [5] 王珂,沈掌泉,王人潮. 利用水稻光谱分析估测钾素含量的研究初报. 浙江农业大学学报, 1993, 19: 104-107.

- Wang K, Shen Z Q, Wang R C. Study on the feasibility of estimating potassium content by rice spectral analysis. *Journal of Zhejiang Agricultural University*, 1993, 19: 104-107. (in Chinese)
- [6] 王珂, 沈掌泉, Abou-Ismaïl O, Yaghi A, 王人潮. 不同钾营养水平的水稻冠层和叶片光谱特征研究初报. *科技通报*, 1997, 13(4): 211-214.
- Wang K, Shen Z Q, Abou-Ismaïl O, Yaghi A, Wang R C. Preliminary study on canopy and leaf reflectance characteristics of rice with various potassium levels. *Bulletin of Science and Technology*, 1997, 13(4): 211-214. (in Chinese)
- [7] 蒋阿宁, 黄文江, 赵春江, 刘克礼, 刘良云, 王纪华. 基于光谱指数的冬小麦变量施肥效应研究. *中国农业科学*, 2007, 40(9): 1907-1913.
- Jiang A N, Huang W J, Zhao C J, Liu K L, Liu L Y, Wang J H. Effects of variable nitrogen application based on characteristics of canopy light reflectance in wheat. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(9): 1907-1913. (in Chinese)
- [8] Lukina E V, Raun W R, Stane M L, Solie J B, Johnson G V, Lees H L, Laruffa J M, Phillips S B. Effect of row spacing, growth stage, and nitrogen rate on spectral irradiance in winter wheat. *Journal of Plant Nutrition*, 2000, 23(1): 103-122.
- [9] 冯伟, 朱艳, 姚霞, 田永超, 庄森, 曹卫星. 小麦氮素积累动态的高光谱监测. *中国农业科学*, 2008, 41(7): 1937-1946.
- Feng W, Zhu Y, Yao X, Tian Y C, Zhuang S, Cao W X. Monitoring plant nitrogen accumulation dynamics with hyperspectral remote sensing in wheat. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(7): 1937-1946. (in Chinese)
- [10] Tarpley L, Reddy K R, Sassenrath-Cole G F. Reflectance indices with precision and accuracy in predicting cotton leaf nitrogen concentration. *Crop Science*, 2000, 40: 1814-1819.
- [11] 柏军华, 李少昆, 王克如, 张小均, 肖春华, 隋学艳. 棉花叶面积指数冠层反射率光谱响应及其反演. *中国农业科学*, 2007, 40(1): 63-69.
- Bai J H, Li S K, Wang K R, Zhang X J, Xiao C H, Sui X Y. The response of canopy reflectance spectrum for the cotton LAI and LAI inversion. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(1): 63-69. (in Chinese)
- [12] Chua T T, Bronson K F, Booker J D, Keeling J W, Mosier A R, Bordovsky J P, Lascano R J, Green C J, Segarra E. In-Season nitrogen status sensing in irrigated cotton: I. yields and nitrogen-15 recovery. *Soil Science Society of American Journal*, 2003, 67: 1428-1438.
- [13] 郭贺, 金兰淑, 林国林. 利用近红外光谱法对烟叶氮钾含量的快速测定. *黑龙江农业科学*, 2008(4): 103-104.
- Guo H, Jin L S, Lin G L. Rapid determination of nitrogen and potassium contents in tobacco leaves by near infrared reflectance spectroscopy. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2008(4): 103-104. (in Chinese)
- [14] 李向阳, 刘国顺, 杨永锋, 赵春华, 喻奇伟, 宋世旭. 烤烟叶片高光谱参数与多种生理生化指标关系研究. *中国农业科学*, 2007, 40(5): 987-994.
- Li X Y, Liu G S, Yang Y F, Zhao C H, Yu Q W, Song S X. Relationship between hyperspectral parameters and physiological and biochemical indexes of flue-cured tobacco leaves. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(5): 987-994. (in Chinese)
- [15] 王渊, 黄敬峰, 王福民, 刘占宇. 油菜叶片和冠层水平氮素含量的高光谱反射率估算模型. *光谱学与光谱分析*, 2008, 28(2): 273-277.
- Wang Y, Huang J F, Wang F M, Liu Z Y. Predicting nitrogen concentrations from hyperspectral reflectance at leaf and canopy for rape. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2008, 28(2): 273-277. (in Chinese)
- [16] 张俊华, 张佳宝. 不同生育期冬小麦光谱特征对叶绿素和氮素的响应研究. *土壤通报*, 2008, 39(3): 586-592.
- Zhang J H, Zhang J B. Response of winter wheat spectral reflectance to leaf chlorophyll, total nitrogen of above ground. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 39(3): 586-592. (in Chinese)
- [17] 张雪红, 刘绍民, 何蓓蓓. 基于包络线消除法的油菜氮素营养高光谱评价. *农业工程学报*, 2008, 24(10): 151-155.
- Zhang X H, Liu S M, He B B. Hyperspectral evaluation of rape nitrogen nutrition using continuum-removed method. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(10): 151-155. (in Chinese)
- [18] 邢东兴, 常庆瑞. 基于光谱分析的果树叶片全氮、全磷、全钾含量估测研究——以红富士苹果树为例. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2009, 37(2): 141-147.
- Xing D X, Chang Q R. Research on predicting the TN, TP, TK contents of fresh fruit tree leaves by Spectral Analysis with Red Fuji Apple tree as an example. *Journal of Northwest A&F University: National Science Edition*, 2009, 37(2): 141-147. (in Chinese)
- [19] 乔欣, 马旭, 张小超, 梁留锁. 大豆叶绿素和钾素信息的冠层光谱响应. *农业机械学报*, 2008, 39(4): 108-111, 116.
- Qiao X, Ma X, Zhang X C, Liang L S. Response of coronary spectrum on chlorophyll and K information of soy. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2008, 39(4): 108-111, 116. (in Chinese)
- [20] 朱尔一, 杨芑原. 化学计量学技术及应用. 北京: 科学出版社,

- 2001: 11.
- Zhu E Y, Yang P Y. *Application and Technique of Chemometrics*. Beijing: Science Press, 2001: 11. (in Chinese)
- [21] Phil William Karl Norris. *Near-Infrared Technology in the Agricultural and Food Industries*. St. Paul: the American Association of Cereal Chemists, Inc. Minnesota, USA, 1987.
- [22] 宋海燕, 何 勇. 近红外光谱法分析土壤中磷、钾含量及 pH 值的研究. 山西农业大学学报: 自然科学版, 2008, 285(3): 275-278.
- Song H Y, He Y. Determination of the phosphorus, kalium contents and pH values in soils using near-infrared spectroscopy. *Shanxi Agricultural University: Natural Science Edition*, 2008, 285(3): 275-278. (in Chinese)
- [23] 刘 飞, 方 慧, 张 帆, 金宗来, 周伟军, 何 勇. 应用光谱技术无损检测油菜叶片中乙酰乳酸合成. 分析化学, 2009, 37(1): 67-71.
- Liu F, Fang H, Zhang F, Jin Z L, Zhou W J, He Y. Nondestructive determination of acetolactate synthase in oilseed rape leaves using visible and near infrared spectroscopy. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2009, 37(1): 67-71. (in Chinese)
- [24] 刘建学. 实用近红外光谱分析技术. 北京: 科学出版社, 2007.
- Liu J X. *Analysis Techniques of Practical Near-Infrared Spectroscopy*. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese)

(责任编辑 曲来娥)