

文章编号: 1672-8785(2010)08-0019-05

基于光谱分析技术的苹果花钾素含量估测研究

朱西存^{1,2} 赵庚星¹ 隋学艳³ 雷彤¹ 孙顶国⁴

(1. 山东农业大学资源与环境学院, 山东泰安 271018;

2. 山东农业大学农业生态与环境重点实验室, 山东泰安 271018;

3. 山东省农业科学院, 山东济南 250100;

4. 烟台市农业局, 山东烟台 264000)

摘 要: 用光谱分析技术手段探索了苹果花钾素含量的估测方法。先对苹果花的原始光谱反射率(R_i)及其8种光谱变换形式(R'_i 、 R''_i 、 $1/R_i$ 、 $(1/R_i)'$ 、 $\lg(1/R_i)$ 、 $(\lg(1/R_i))'$ 、 $\lg R_i$ 、 $(\lg R_i)'$)与钾素含量进行相关分析,找出与钾素含量相关性较显著的光谱形式;然后,采用逐步回归分析方法,筛选敏感波长与光谱参数,建立钾素含量估测模型;进而对模型进行优选和检验,确定最佳估测模型。结果表明,苹果花光谱反射率的一阶微分 R'_i 与钾素含量的相关性最显著;以筛选出的敏感波长669nm和1442nm的一阶微分建立的估测模型具有较好的线性趋势;经检验,其拟合方程的 R^2 为0.6955, $RMSE$ 为2.7, $RE\%$ 为4.6。这表明该模型对苹果花钾素含量的估测具有较好的准确度,可作为最佳估测模型。该研究为快速估测苹果花营养元素含量提供了理论依据与参考。

关键词: 光谱分析; 苹果花; 钾素含量; 估测

中图分类号: TP79; S661.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2010.08.005

Estimation of Kalium Content in Apple Flowers Based on Spectral Analysis Technique

ZHU Xi-cun^{1,2}, ZHAO Geng-xing¹, SUI Xue-yan³, LEI Tong¹, SUN Ding-guo⁴

(1. College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China;

2. Key Laboratory of Agricultural Ecology and Environment of Shandong
Agricultural University, Tai'an 271018, China;

3. Shandong Academy of Agriculture Sciences, Ji'nan 250100, China;

4. Municipal Bureau of Agriculture of Yantai City, Yantai 264000, China)

Abstract: The kalium content in apple flowers are estimated by using a spectroscopic technology. Firstly, the correlation of the original spectral reflectance (R_i) and 8 spectral transformation forms (R'_i , R''_i , $1/R_i$, $(1/R_i)'$, $\lg(1/R_i)$, $(\lg(1/R_i))'$, $\lg R_i$, $(\lg R_i)'$) of apple flowers with the kalium content are analyzed, so as to find the most significant spectral forms. Then, the stepwise regression analysis method is used to select the sensitive wavelengths and spectral parameters and establish kalium content estimation models. Finally, the best estimation models are determined through model verification. The result shows

收稿日期: 2010-03-15

基金项目: 国家863计划项目(2008AA10Z203); 国家级星火计划重点项目(2007EA740002); “十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAD10A10)

作者简介: 朱西存(1970-), 男, 山东单县人, 讲师, 主要从事光谱分析技术方面的研究。E-mail: zxc@sdau.edu.cn

that the first derivative of spectral reflectance R'_i is most correlated with the kalium content in apple flowers. The estimation model established with the 669nm and 1442nm sensitive wavelengths of the first derivative has the best linear trend. In its fitting equation, R^2 is 0.6955, the root mean square error is 2.7 and the relative error RE% is 4.6. This indicates that the model has a better estimation accuracy for the kalium content in apple flowers and can be used as the best estimation model. This study provides the theoretical basis for the fast estimation of nutrient content in apple flowers.

Key words: spectral analysis; apple flower; kalium content; estimation

1 引言

钾素营养与植物叶片的结构和水分状况关系密切,钾素含量的变化也必然会对植物的反射光谱信息产生影响。因此,利用植物的反射光谱信息估测钾素含量具有可行性^[1]。传统的作物钾素含量测定方法主要有田间采样和室内分析测试。它们虽然准确性高、重现性好,但时效性差、费时、费力且会破坏田间植株,难以满足生产中的实时、快速需求。近年来快速发展的高光谱遥感技术具有光谱分辨率高、波段连续性强、光谱信息量大等优点,弥补了传统方法的不足,并使光谱分析诊断技术在农业上得到了广泛的应用。

利用光谱技术对植物中钾素营养进行估测的方法已受到国内外学者的关注。Al-Abbas 等人^[2]在对玉米叶子反射光谱的研究中指出,钾素营养亏损可导致玉米叶子的近红外(830nm、940nm、1100nm)反射率下降。Jackson 等人^[3]分析了缺钾甘蔗与不缺钾处理的 R_{nir}/R_{red} 比值,其结果在 90% 置信水平有较大差异。Ponzoni 等人^[4]研究发现,缺钾桉树苗期叶子症状能容易地用可见光反射光谱检测出来。王珂等人^[5]研究了不同钾营养水平水稻叶片的光谱特征,发现水稻叶片在缺钾时的近红外反射率比正常叶片的高。宫鹏等人^[6]在发现巨杉高光谱数据与全氮磷钾含量相关时,除了通过建立植被指数来预测钾以外,在单变量分析中还发现,全钾含量与光谱参数的相关性最大。程一松等人^[7]在研究钾肥处理下的夏玉米的光谱特性后指出,在低氮低磷水平下,它与氮素胁迫的变化基本一致,但是在高氮高磷水平下却正好相反。王磊等人^[8]在研究玉米植株全钾含量

与叶片光谱反射率的相关程度时发现,在紫光波长 400nm 处相关性较强,相关系数达到 0.71。刘良云等人^[9]利用光谱法对烟叶的研究结果表明,在 360nm ~ 430nm 波段,光谱反射率与钾含量显著或极显著正相关,利用 $(R_{550} - R_{450})/(R_{550} + R_{450})$ 和 $(R_{570} - R_{670})/(R_{570} + R_{670})$ 建立的烟叶钾离子含量的光谱预测模型极显著相关。乔欣等人^[10]采用连续统去除法提取了吸收深度特征参数,运用多元统计回归的方法估算了大豆全钾含量(TK),得到的相关系数为 0.7625。纵观国内外的研究现状,人们的研究大多集中在玉米^[11-14]、水稻^[15-17]、烟草^[9]、大豆^[10]等作物上。目前,高光谱技术在果树方面的应用研究还相对较少^[18,19],而基于高光谱的苹果花钾素含量估测研究未见报道。

本研究以实测的苹果花原始光谱反射率(R_i)以及花钾素含量(KC)为基础,首先对原始光谱反射率(R_i)进行光谱变换;对 R_i 及其光谱变换数据与钾素含量进行相关分析,找出与钾素含量相关性较显著的光谱形式;其次,采用逐步回归分析方法筛选出敏感波长与光谱参数;利用光谱参数建立苹果花钾素含量估测模型;最后,经过对模型的优选与检验,得出最佳的估测模型。本研究旨在确立苹果花钾素含量估测模型,探索出一种快速、无损的钾素含量估测方法,以期应用高光谱遥感技术进行苹果花营养估测提供理论依据。

2 材料与方 法

2.1 试验区概况

试验区位于山东省栖霞市(37°05'–37°32'N、120°33'–121°15'E)。栖霞市地处胶东半岛腹地,总面积 2017km²,属山区丘陵地形。该市属暖温带季风型半湿润气候,四季分明,光照充足,年

均气温为 11.3℃, 年均降雨量为 754mm, 年日照总时数为 2690h, 无霜期为 207d。该区栽培的苹果主要为红富士, 面积达到 33000hm²。

2.2 样品采集

2008 年 4 月 24 日至 28 日, 我们在苹果盛花期进行样品采集, 供试苹果品种为红富士。依据栖霞市土地利用现状图和果园分布状况, 选取栖霞市 14 个乡镇 32 个果园的 120 棵苹果树为采样对象。由于苹果树是多年生乔木, 植株个体大, 根系深, 株间个体差异明显。为了保证实验结果具有代表性, 我们随机布点取样, 并尽量涵盖不同树势的花。对每棵苹果树按东、西、南、北四个方位, 在冠层外围各取 4~6 朵充分展开、无损的鲜花。然后将采集的样品迅速装入保鲜袋并封口, 放于保鲜箱, 快速带回实验室。

2.3 测定项目

2.3.1 光谱测定

光谱测定采用美国的 ASD FieldSpec 3 型地物光谱仪进行, 测定波段为 350nm~2500nm。其中, 350nm~1000nm 的光谱采样间隔为 1.4nm, 光谱分辨率为 3nm; 1000nm~2500nm 的光谱采样间隔为 2nm, 光谱分辨率为 10nm。重采样后的输出波段数为 2151。

我们是在一个能控制光照条件的暗室内进行光谱测定的。测定时, 样品被单层、均匀且无缝隙地平铺在反射率近似为 0 的黑色橡胶上^[20]。光谱仪的视场角为 25°, 探头垂直向下, 距样品表面 0.10m; 光源用光谱仪自带的 50W 卤化灯, 光源的垂直高度为 0.40m, 入射角度为 45°, 光源距样品中心 0.50m。为了消除外界干扰、保证精度, 对每个样品观测 10 个采样光谱, 并以这 10 个采样光谱的平均值作为该样品的光谱反射率值。测定过程中, 我们及时进行了标准白板校正。

2.3.2 钾素含量的测定

将测定光谱的苹果花迅速放入 80℃烘箱中, 进行 15min~30min 杀青处理, 然后等温度降至 60℃后再将其烘干至恒量。用研钵把烘干的样品研磨至粉状, 并用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮, 然

后用火焰光度法测定其全钾含量。

2.4 数据处理

对测定的苹果花反射光谱数据进行预处理后, 通过 EXCEL、SPSS 软件对这些数据作进一步的处理与分析。

为了减小光照强度差异、背景光谱以及仪器噪声对目标物光谱特征的影响^[21], 同时为了充分挖掘光谱信息, 我们对光谱反射率 R_i 进行了 8 种变换。具体变换形式如下: (1) 一阶微分光谱 (R'_i , 其中 R_i 指波长为 i 的光谱反射率, 下同); (2) 二阶微分光谱 (R''_i); (3) 光谱倒数 ($1/R_i$); (4) 光谱倒数的一阶微分 ($(1/R_i)'$); (5) 光谱倒数的对数 ($\lg(1/R_i)$); (6) 光谱倒数的对数的一阶微分 ($(\lg(1/R_i))'$); (7) 光谱的对数 ($\lg R_i$); (8) 光谱对数的一阶微分 ($(\lg R_i)'$)。

由于 ASD FieldSpec 3 光谱仪采集的是离散型数据, 通过式 (1) 可近似地对光谱数据进行一阶微分计算。

$$R' = \frac{R_{i+1} - R_{i-1}}{(\lambda_i - \lambda_{i-1}) + (\lambda_{i+1} - \lambda_i)} = \frac{R_{i+1} - R_{i-1}}{2\Delta\lambda} \quad (1)$$

式中, R_i 是波长为 i 时的反射率值; λ_i 是波长为 i 时的波长值; $\Delta\lambda$ 为波长 λ 到 λ_{i-1} 相邻波长的差值, 它由光谱采样间隔决定。

2.5 模型的建立、优选和检验

首先, 对 120 个苹果花原始光谱反射率 (R_i) 及 8 种光谱变换数据与钾素含量分别进行相关分析, 确定与苹果花钾素含量相关性极显著的光谱形式; 其次, 用逐步回归分析方法筛选出敏感波长与光谱参数; 用光谱参数建立苹果花钾素含量估测模型; 最后, 对模型进行检验。在 120 个样本数据中, 随机选取 96 个用来建立估测模型, 其余 24 个则用于模型的检验。用决定系数 (R^2)、均方根误差 ($RMSE$)、相对误差 ($RE\%$) 这三个指标, 对估测值与实测值之间的拟合效果进行综合评定, 以检验模型的稳定性和适用性。

3 结果与分析

3.1 苹果花原始光谱反射率及其 8 种变换数据与钾素含量之间的相关分析

对苹果花原始光谱反射率及其 8 种变换数

据与钾素含量进行了相关分析。结果显示, 苹果花钾素含量与原始光谱反射率 (R_i)、倒数的对数 ($\lg(1/R_i)$)、二阶微分光谱 (R_i'')、光谱倒数的一阶微分 ($(1/R_i)'$) 和对数的一阶导数 ($(\lg R_i)'$) 的相关性较弱, 与光谱的一阶微分 (R_i') 的相关性最强 (见图 1), 与光谱倒数 ($1/R_i$)、光谱倒数的对数 ($\lg(1/R_i)$)、光谱的对数 ($\lg R_i$) 的变换数据的相关性较强。在钾素含量与一阶微分 (R_i')、光谱倒数 ($1/R_i$)、光谱倒数的对数 ($\lg(1/R_i)$)、光谱的对数 ($\lg R_i$) 的相关系数中, 绝对值大于 0.35 的峰(谷)极值分别出现在 669nm、952nm、1164nm、1442nm, 351nm、352nm、362nm、366nm,

351nm、366nm, 351nm、366nm 处 (见图 1)。

3.2 敏感波长的获取与估测模型的建立

对苹果花钾素含量与其相关性较强的光谱变换数据分别进行了逐步回归分析, 获取了估测苹果花钾素含量的敏感波长。经过多次调试, 最后得到一阶微分 (R_i')、光谱倒数 ($1/R_i$)、光谱倒数的对数 ($\lg(1/R_i)$)、光谱对数 ($\lg R_i$) 的入选敏感波长分别为 669nm 和 1442nm、352nm、351nm 和 351nm。然后以敏感波长构建的光谱参数为自变量, 分别建立了钾素含量估测模型 (见表 1)。

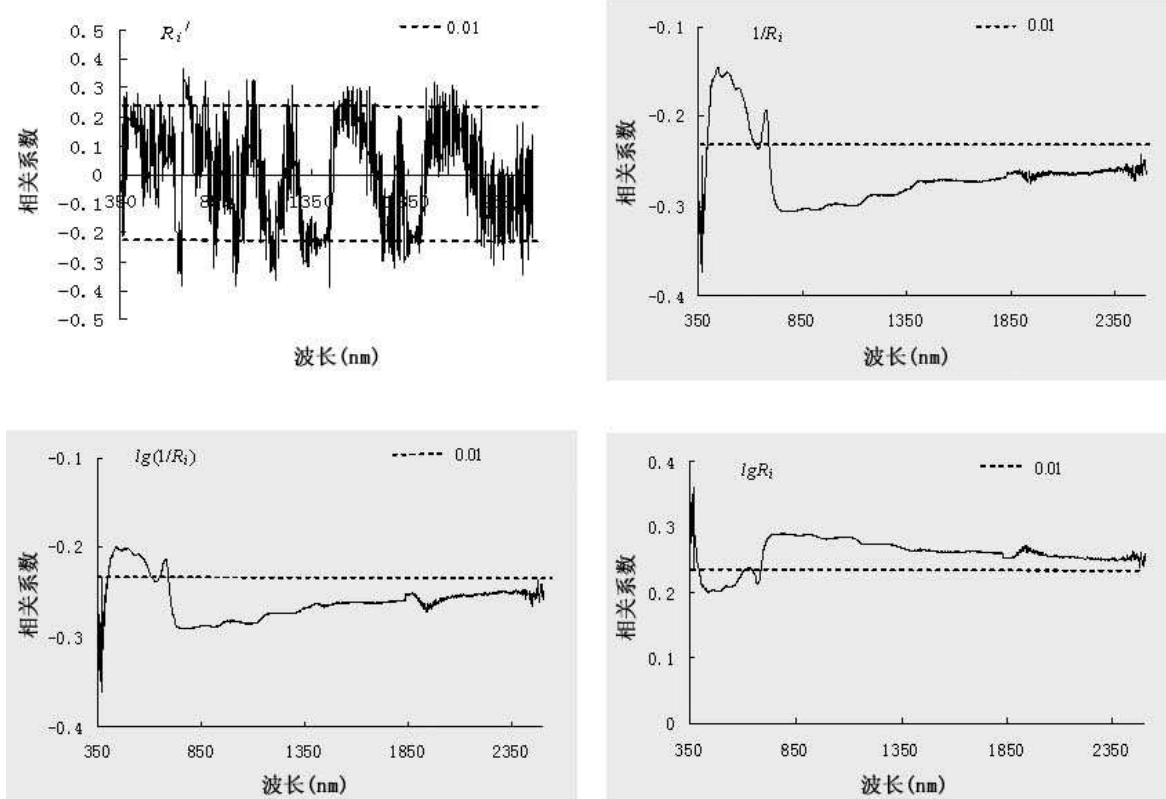


图 1 苹果花钾素含量与原始光谱反射率及其光谱变换形式的相关分析

表 1 苹果花钾素含量估测模型 (n=96)

自变量 x	因变量 y	估测模型	相关系数 r	$F_{0.01}$	P
R'_{669} 、 R'_{1442}	KC	$y = 14.73 - 933.32x_1 - 1121.22x_2$	0.6113**	9.21	0.0002
$1/R_{352}$	KC	$y = 16.72 - 0.035x$	0.4542**	9.30	0.003
$\lg(1/R_{351})$	KC	$y = 18.92 - 2.16x$	0.4134**	3.41	0.007
$\lg R_{351}$	KC	$y = 18.7 + 2.07x$	0.3626**	5.98	0.009

注: ** $P < 0.01$

表1表明, 以 R'_i 、 $1/R_i$ 、 $\lg(1/R_i)$ 、 $\lg R_i$ 为自变量建立的钾素含量估测模型的相关系数 r 均达到了极显著水平 ($P < 0.01$), 这说明4种模型均可估测苹果花钾素含量。依据相关系数 r 最大的优选原则, R'_i 的表现最好, 相关系数 r 达到了0.6113。

3.3 模型的检验

利用24个苹果花样本的独立光谱数据与实测的钾素含量, 对建立的苹果花钾素含量估测模型进行了检验, 结果如图2所示。

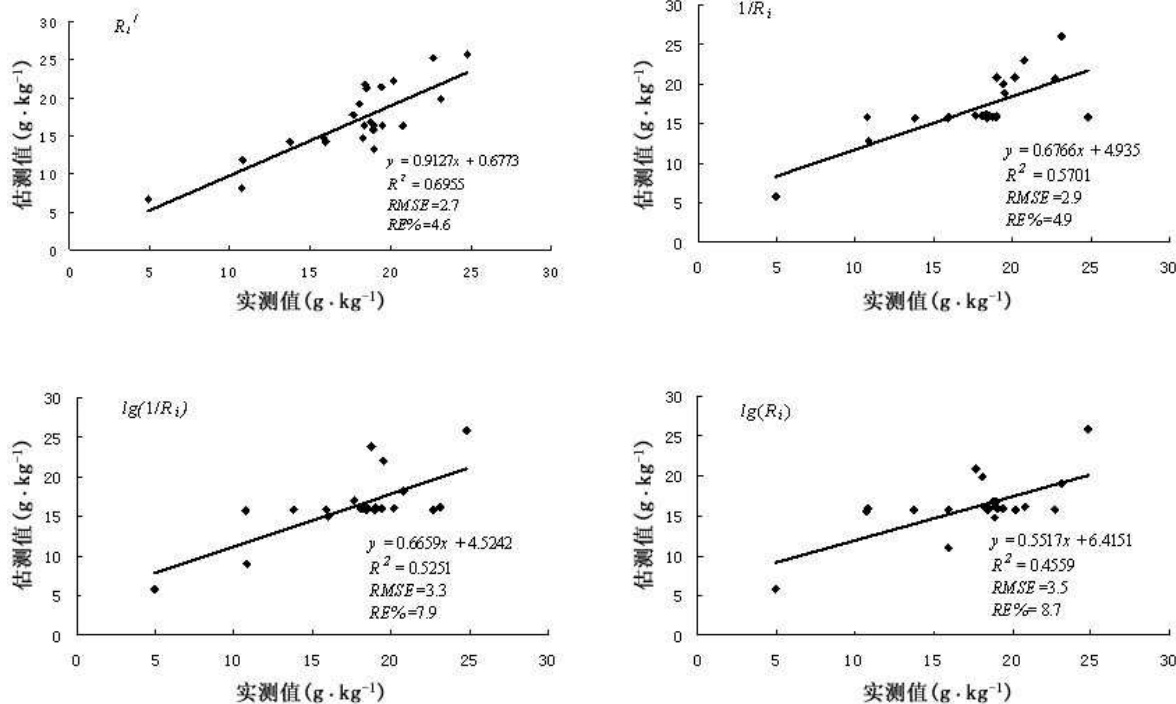


图2 苹果花钾素含量的实测值与回归模型估测值之间的关系 ($n=24$)

4 结论

苹果花钾素含量与原始光谱反射率一阶微分的相关性最好, 其相关系数绝对值较大的峰(谷)极值分别出现在669nm、952nm、1164nm和1442nm波长处。通过逐步回归分析方法筛选出的敏感波长为669nm和1442nm; 以 R'_{669} 与 R'_{1442} 为自变量建立的估测模型具有较好的线性趋势, 相关系数 r 为0.6113。经检测样本的检验, 其拟合方程的 R^2 为0.6955, $RMSE$ 为2.7, $RE\%$ 为4.6, 表明该模型对苹果花钾素含量的估测具

从图2中可以看出, 以 R'_i 为自变量建立的估测模型的拟合效果最好, 其拟合方程的 R^2 为0.6955, 该值与其余3个估测模型相比为最大; $RMSE$ 为2.7, $RE\%$ 为4.6, 该值与其余3个估测模型相比为最小。这表明此模型具有较好的准确性, 其估测结果较为理想。因此, 模型 $y = 14.73 - 933.32x_1 - 1121.22x_2$ (其中 y 为钾素含量, x_1 为 R'_{669} , x_2 为 R'_{1442}) 可作为盛花期红富士苹果花钾素含量的最佳估测模型。

有较好的准确性, 可作为钾素含量的最佳估测模型。本研究为植物钾素营养状况的无损估测提供了一种新的思路。

参考文献

- [1] 王磊, 白由路. 基于光谱理论的作物营养诊断研究进展 [J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(6): 902-912.
- [2] Al-Abbas A H, Barr R, Hall J D, et al. Spectra of normal and nutrient deficient maize leaves [J]. Agronomy Journal, 1974, 66: 16-20.

(下转第43页)