

文章编号: 1672-8785(2012)06-0027-05

基于高光谱的苹果树冠层磷素状况 估测模型研究

潘 蓓 赵庚星 朱西存 王娜娜

(山东农业大学资源与环境学院, 山东 泰安 271018)

摘 要: 利用高光谱技术估测了苹果树冠层的磷素含量。先用 ASD Field Spec 3 型地物光谱仪测定了春梢停止生长期苹果树冠层的高光谱反射率, 并对光谱数据进行了多种变换处理。然后对其与磷素含量进行了相关分析, 找出了与磷素相关性较显著的光谱参量, 并通过逐步回归分析建立了磷素估测模型。结果表明, 近红外波段是苹果树冠层磷素的敏感波段; 808 nm、921 nm、1195 nm、1272 nm 及其组合的归一化红外光谱指数与苹果树冠层磷素高度相关。在构建的估测模型中, 以 808 nm、921 nm、1195 nm、1272 nm 及其组合的归一化红外光谱指数为自变量构建的高光谱估测模型的估测效果最佳。该研究实现了苹果树冠层磷素含量的快速估测, 同时也为苹果的实时营养诊断提供了理论依据。

关键词: 高光谱遥感; 苹果树冠层; 磷素含量; 估测模型

中图分类号: S66; TP7 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2012.06.006

Estimation of Phosphorus Content in Apple Tree Canopy Based on Hyperspectrum

PAN Bei, ZHAO Geng-xing, ZHU Xi-cun, WANG Na-na

(College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China)

Abstract: The phosphorus content of apple tree canopy is estimated by using a hyperspectral remote sensing technology. Firstly, a Field Spec 3 type field spectrometer from ASD company is used to measure the hyperspectral reflectance of apple tree canopy in the shoot growth stopping period in spring. The measured spectral data are processed in a variety of transformation forms. Then, correlation of the data with the phosphorus content is analyzed. The spectral parameters more remarkably correlated with the phosphorus content are found. A phosphorus content estimation model is established after the regression analysis is made. The result shows that the near infrared band is the sensitive band of the phosphorus content of apple tree canopy. The wavelengths of 808 nm, 921 nm, 1195 nm and 1272 nm and the normalized infrared spectral index combined by these wavelengths are highly correlated with the phosphorus content of apple tree canopy. This is verified in the established estimation model. This research not only realizes the fast estimation of phosphorus content of apple tree canopy, but also provides the theoretical basis for the real-time diagnosis of nutrition of apple trees.

Key words: hyperspectral remote sensing; apple tree canopy; phosphorus content; estimating model

收稿日期: 2012-04-27

基金项目: 高校博士点基金项目 (20103702110010); 国家“863”计划项目 (2008AA10Z203)

作者简介: 潘蓓 (1990-), 女, 山东曹县人, 硕士研究生, 主要从事光谱分析技术研究。E-mail: pb_land@163.com

0 引言

磷素是苹果生长发育、保证产量和形成品质的物质基础^[1]。它有利于苹果糖分与淀粉的形成和累积,既能改善品质,又能增强其抗病能力。当苹果树缺乏磷素营养时,容易出现生理病害;而磷素过多则会抑制根系生长,产生大量僵果。因此,在苹果树的生长过程中,人们需要及时掌握其磷素营养状况^[2]。长期以来,作为传统的作物磷素含量测定方法,田间植株取样和室内分析测试虽然准确性高,但很难满足时间和空间上的快速、无损监测要求^[3]。

利用高光谱遥感技术能够及时了解植物的生理生态变化和营养状况,对精确农业发展具有独特的应用优势。通过探测植物冠层的光谱反射率估测其理化特性,可以无损获取实时的作物生长信息。这已逐渐成为人们研究的热点。

纵观国内外的相关研究可知,人们已利用高光谱遥感技术进行过作物冠层养分含量的估测研究,认为该含量较多集中于氮素,并且建立了一些较为实用的模型^[4-9],但关于利用高光谱数据对植物磷素含量进行估测的研究相对较少。Osborne S L 等人^[10]在利用光谱检测玉米氮磷营养状况时发现,近红外波段和蓝光波段在玉米生长早期对磷素比较敏感。Sembiring H 等人^[11]发现,430 ~ 440 nm 是百慕达草的氮磷的敏感波段。当 435 nm 为协变量时,可用 652/405 来检测百慕达草对磷素的吸收量。Chen M 等人^[12]用近红外光谱分析了甘蔗叶片的磷含量。通过多元散射校正技术处理数据后,拟合度 R^2 最大可达 0.99。任红艳等人^[13]确定了对磷营养胁迫敏感的光谱波段,并发现小麦冠层光谱的近红外波段(810 ~ 1100 nm)与磷素的相关性较高,而且探测出拔节期是小麦受磷营养胁迫的关键生育期。王磊等人^[3]在研究春玉米磷的光谱特征时指出,春玉米磷素营养的光谱敏感时期是大喇叭口期。350 ~ 730 nm 可见光区域和 1420 ~ 1800 nm 近红外区域是磷素营养的光谱敏感波段。朱西存等人^[14]基于高光谱的苹果花磷素含

量监测模型研究发现,一阶导数和植被指数能够更真实地反映苹果花光谱特征;利用归一化植被指数 NDVI(936, 676)建立的苹果花磷素含量估测模型效果最佳。

针对磷素营养的光谱诊断大多集中在小麦和玉米等大田作物方面,而有关果树的磷素含量及其与高光谱之间的关系尚有待于进一步探索^[7]。本文尝试利用高光谱技术分析苹果春梢停止生长期中冠层光谱反射率与磷素含量的关系,并探索苹果冠层磷素含量的快速无损估测方法。

1 材料与方法

1.1 样品采集

苹果树冠层数据采集于山东省苹果优势产区——临沂市蒙阴县。选取蒙阴县 4 个果园的 83 棵苹果树作为研究样本。采集日期为 2009 年 6 月 23 日,这时处于苹果树营养相对稳定的春梢停止生长期。苹果品种为红富士。

1.2 冠层光谱及全磷含量测定

光谱仪选用美国 ASD 公司生产的 ASD Field Spec 3 型光谱仪,其波段值为 350 ~ 2500 nm。选择晴朗、无风、无云的天气进行观测,观测时间为 11:00 ~ 13:00,光谱仪探头的视场角为 25°,外接光纤的长度为 5 m。观测时,探头垂直向下。根据苹果树冠幅的大小调整光谱仪探头与树冠之间的距离,以确保视场能够覆盖整个冠层。每个样本重复采样 10 次,取其平均值作为该样本的光谱测量值。采样前先进行标准白板校正,并根据天气条件及时对标准白板进行优化校正。

为了保证试验结果的精确性,我们随机采集不同长势的苹果树冠层,并在每棵苹果树外围各取 4 ~ 8 片健康的无损叶片。用钒钼黄法对采集的苹果叶片进行全 P 含量测定。叶片 P 素含量均值则为该果树样本冠层的 P 素状况。

1.3 数据预处理

将测定的苹果冠层反射光谱数据导入 View Spec Pro 5.0 光谱处理软件进行处理。由于在 1360 ~ 1410 nm、1800 ~ 1960 nm 以及 2300 ~ 2500 nm

波段范围内受光谱仪本身和大气、水吸收^[15]等的干扰, 光谱曲线误差较大, 因此我们对数据进行了删除处理。剔除后共有 1739 个波段数据。

本文采用 5 次均值平滑^[16]对原始反射率数据进行平滑处理。为了充分挖掘光谱信息, 我们对原始光谱进行了 8 种变换。具体的变换形式如下: (1) 一阶微分; (2) 二阶微分; (3) 光谱倒数; (4) 光谱倒数的一阶微分; (5) 光谱倒数的对数; (6) 光谱倒数的对数的一阶微分; (7) 光谱的对数; (8) 光谱对数的一阶微分。

1.4 估测模型的建立及检验

本次试验共有 83 组冠层光谱。其中, 68 组用于建立估测模型, 15 组用于检验模型的拟合结果。模型初选标准为相关系数 R 。模型的估测能力采用拟合决定系数 R^2 和相对误差 $RE\%$ 进行评价。

2 结果与分析

2.1 苹果冠层的原始光谱反射率及其变换数据与磷素含量的相关性分析

对苹果冠层的原始光谱反射率及其 8 种变换数据与苹果树冠层的磷素含量进行相关分析。结果发现, 苹果树冠层的磷素含量与原始光谱、原始光谱一阶微分以及原始光谱二阶微分的相关性较强, 与其他数据的相关性较弱。



图 1 原始光谱反射率与苹果树冠层磷素含量的相关性曲线

从图 1 中可以看出, 原始光谱反射率在 758 ~ 1357 nm 和 1413 ~ 1443 nm 近红外波段与苹果冠层磷素含量的相关系数均在 0.277 (显著性水平 $P=0.01$ 处) 以上, 呈极显著正相关。因此, 我

们选择波峰 808 nm、921 nm、1079 nm、1272 nm 和波谷 841 nm、958 nm、1195 nm 作为估测苹果冠层磷素含量的敏感波段。

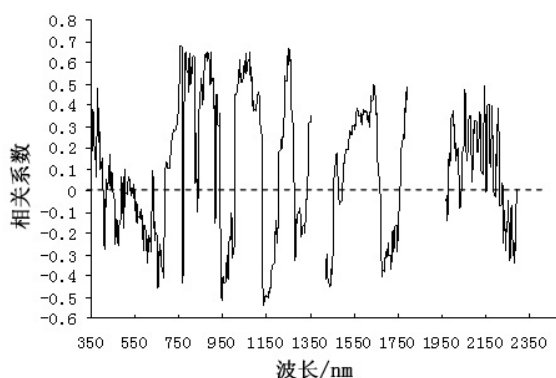


图 2 光谱反射率一阶微分与苹果冠层磷素含量的相关性曲线

从图 2 中可以看出, 一阶微分光谱在 760 nm、782 nm、798 nm、817 nm、901 nm 和 1253 nm 处与苹果冠层磷素含量的相关性达到峰值, 其相关系数均大于 0.6; 在谷值 653 nm、767 nm、947 nm、1138 nm 和 1439 nm 处与苹果冠层磷素含量呈极显著负相关。因此, 我们选择这些波段的一阶微分值作为估测苹果冠层磷素含量的敏感波段区间。

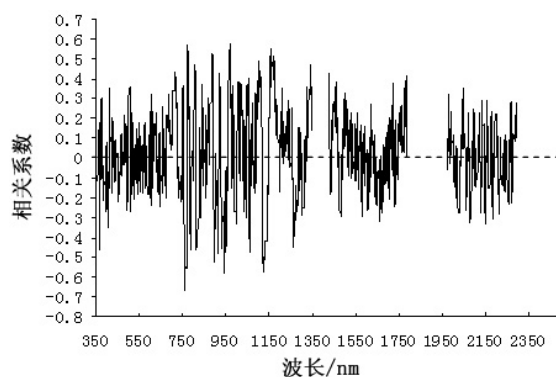


图 3 光谱反射率二阶微分与苹果树冠层磷素含量的相关性曲线

从图 3 中可以看出, 二阶微分光谱在 771 nm、888 nm、965 nm 和 1161 nm 处与苹果冠层磷素含量的相关性达到峰值, 其相关系数均大于 0.5; 在谷值 761 nm、942 nm 和 1125 nm 处与苹果冠层磷素含量呈极显著负相关, 最大相关系数达到 -0.669。因此, 我们选择这些波段的二阶微分值作为估测苹果冠层磷素含量的敏感

波段。

2.2 特征光谱参量的筛选

根据已确定的与苹果冠层磷素含量相关性显著的敏感波段,选择波峰 808 nm、921 nm、1079 nm、1272 nm 和波谷 841 nm、958 nm、1195 nm 波段的光谱反射率,653 nm、760 nm、767 nm、782 nm、798 nm、817 nm、901 nm、947 nm、1138 nm、1253 nm、1439 nm 波段的光谱反射率的一阶微分以及 761 nm、771 nm、888 nm、942 nm、965 nm、1125 nm、1161 nm 波段的光谱反射率的二阶微分作为特征光谱参量。

许多研究表明,归一化植被指数 (NDVI) 能够降低土壤反射对冠层光谱的影响^[17],并能增

强对植被的响应能力^[1]。因此,本文尝试构建基于磷素敏感波段的冠层磷素估测归一化红外光谱指数^[18],以确定苹果冠层磷素的特征光谱参量。

光谱指数构成为 $(R_{nir1} - R_{nir2}) / (R_{nir1} + R_{nir2})$, 用 $R_{nir(1,2)}$ 表示。利用原始光谱在红外波段的 7 个峰谷值构造 21 个归一化光谱指数,也将其作为特征光谱参量进行建模。

2.3 苹果冠层磷素含量高光谱估测模型的构建

分别以原始光谱反射率、一阶微分、二阶微分以及归一化红外光谱指数的特征光谱参量作为自变量,以对应的苹果冠层磷素含量作为因变量,在 SPSS 软件中进行多元逐步回归分析。通过对得到的模型进行比较,得到了 10 个拟合度较高的估测模型 (见表 1)。

表 1 回归模型及其精度参数 (n=68)

自变量	估测模型	R	R ²	F
$R_{nir(808,921)}$	$P=0.206-10.588R_{nir(808,921)}$	0.615**	0.378**	40.057
R''_{761}	$P=0.299-1258.081R''_{761}$	0.621**	0.386**	41.496
R_{808}, R_{921}	$P=0.303-13.553R_{808}+13.324R_{921}$	0.621**	0.386**	20.413
R'_{760}	$P=0.139+277.024R'_{760}$	0.632**	0.400**	43.921
$R_{958}, R_{808}, R_{921}$	$P=0.277-6.579R_{958}-16.832R_{808}+22.813R_{921}$	0.639**	0.408**	14.694
R''_{761}, R''_{942}	$P=0.306-836.404R''_{761}-1934.838R''_{942}$	0.675**	0.456**	27.231
R'_{760}, R'_{653}	$P=0.111+241.851R'_{760}-716.318R'_{653}$	0.669**	0.447**	26.267
$R_{808}, R_{921}, R_{1195}$	$P=0.306-15.979R_{808}+18.840R_{921}-3.584R_{1195}$	0.673**	0.453**	17.666
$R_{nir(808,921)}, R_{nir(1195,1272)}$	$P=-0.177-10.637R_{nir(808,921)}-14.769R_{nir(1195,1272)}$	0.679**	0.462**	27.871
$R_{808}, R_{921}, R_{1195}, R_{1272}$	$P=0.273-14.363R_{808}+15.695R_{921}-20.982R_{1195}+18.317R_{1272}$	0.699**	0.488**	15.013

** $P < 0.01$ (下同)

表 2 模型检验的拟合精度参数 (n = 15)

变量	实测值与估测值拟合方程	检验指标		
		R ²	RMSE	RE%
R''_{761}, R''_{942}	$y = 0.6311x + 0.1345$	0.7473	0.068	14.27
R'_{760}, R'_{653}	$y = 0.7515x + 0.0769$	0.9047	0.052	9.32
$R_{808}, R_{921}, R_{1195}$	$y = 0.959x - 0.0054$	0.8898	0.048	11.07
$R_{nir(808,921)}, R_{nir(1195,1272)}$	$y = 0.913x + 0.0354$	0.9147	0.036	5.20
$R_{808}, R_{921}, R_{1195}, R_{1272}$	$y = 0.931x + 0.0193$	0.9305	0.034	6.57

从表 1 中可以看出,以 R、R'、R'' 和归一化的红外光谱指数为自变量建立的磷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),说明 9 种模型均可用于估测苹果树磷素含量。根据相关系数 R² 最大的优选原则^[20],选择 R² > 0.45 的 5 个估测模型进行模型检验。

2.4 模型的估测效果检验

利用15个苹果冠层高光谱数据及实测的磷素含量对筛选出的5个模型进行检验(结果见表2)。

从表2中可以看出, 5个模型的拟合方程的决定系数(R^2)均较高, 相对误差(RE)均较小, 表明5个模型对于估测磷素含量均具有较高的精度。相比较而言, 以 $R_{nir(808,921)}$, $R_{nir(1195,1272)}$ 和 R_{808} , R_{921} , R_{1195} , R_{1272} 为自变量的苹果冠层磷素含量估测模型的估测精度最高, 分别达到94.80%和93.43%。因此, 确定 $P=0.273-14.363 \cdot R_{808}+15.695 \cdot R_{921}-20.982 \cdot R_{1195}+18.317 \cdot R_{1272}$ 和 $P=-0.177-10.637 R_{nir(808,921)}-14.769 R_{nir(1195,1272)}$ 作为春梢停止生长期苹果树冠层磷素含量的最佳估测模型。同时, 这也说明归一化的红外光谱指数在估测苹果树冠层磷素含量方面具有较高的精度。

3 结论

本文借助地物光谱仪测定苹果树春梢停止生长期冠层反射光谱, 并通过对苹果树冠层反射光谱进行处理来监测磷素含量。结果表明, 近红外波段是苹果冠层磷素含量的敏感波段。由近红外波段构建的归一化红外光谱指数对苹果树冠层磷素含量具有较高的敏感性。归一化红外光谱指数有 $(R_{808}-R_{921})/(R_{808}+R_{921})$ 和 $(R_{1195}-R_{1272})/(R_{1195}+R_{1272})$ 。因此, 确定苹果冠层磷素含量的最佳估测模型为 $P=0.273-14.363 \cdot R_{808}+15.695 \cdot R_{921}-20.982 \cdot R_{1195}+18.317 \cdot R_{1272}$ 和 $P=-0.177-10.637 \cdot R_{nir(808,921)}-14.769 R_{nir(1195,1272)}$ 。本文对苹果树冠层的高光谱特征及其磷素含量的无损估测进行了探索, 为果树营养状况的无损估测提供了一种新方法。

参考文献

- [1] 李民赞. 光谱分析技术及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [2] 窦光明. 浅谈磷肥对农作物的影响[J]. 吉林农业, 2011, 22(08): 93-94.
- [3] 王磊, 白由路, 杨俐苹. 春玉米磷素营养的光谱响应及诊断[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(5): 802-808.
- [4] 王珂, 沈掌泉, 王人潮. 植物营养胁迫与光谱特性[J]. 国土资源遥感, 1999, 20(1): 9-14.
- [5] 孙莉, 陈曦, 包安明, 等. 用高光谱数据诊断水分胁迫下棉花冠层叶片氮素状况的研究[J]. 棉花学报, 2004, 16(5): 291-295.
- [6] 王人潮, 陈铭臻, 蒋亨显, 等. 不同氮素水平的水稻光谱特征及其敏感波段的选择[J]. 浙江农业大学学报, 1993, 19(Z): 7-14.
- [7] Ponzoni F J, Goncalves J L M. Spectral Features Associated with Nitrogen, Phosphorus, and Potassium Deficiencies in Eucalyptus Saligna Seedling Leaves[J]. Remote Sens, 1999, 20(1): 2249-2264.
- [8] Vane G. Terrestrial Imaging Spectrometry: Current Status, Future Trends[J]. Remote Sensing of Environment, 1993, 44(2): 109-127.
- [9] 朱西存, 赵庚星, 王凌, 等. 基于高光谱的苹果花氮素含量预测模型研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(2): 416-420.
- [10] Osborne S L, Schepers J S, Francis D D, et al. Detection of Phosphorus and Nitrogen Deficiencies in Corn Using Spectral Radiance Measurements[J]. Agronomy Journal, 2002, 94(1): 1215-1221.
- [11] Sembiring H, Raun W R, Johnson G V, et al. Detection of Nitrogen and Phosphorus Nutrient Status in Bermudagrass Using Spectral Radiance[J]. Journal of Plant Nutrition, 1998, 21(2): 1189-1206.
- [12] Chen M, Glaz B, Gilbert R A, et al. Near-infrared Reflectance Spectroscopy Analysis of Phosphorus in Sugarcane Leaves[J]. Agronomy Journal, 2002, 94(1): 1324-1331.
- [13] 任红艳, 庄大方, 潘剑君, 等. 磷营养胁迫对冬小麦冠层光谱的影响[J]. 土壤通报, 2008, 39(6): 1326-1330.
- [14] 朱西存, 赵庚星, 董芳, 等. 基于高光谱的苹果花磷素含量监测模型[J]. 应用生态学报, 2009, 20(10): 2424-2430.
- [15] 王凌, 赵庚星, 朱西存, 等. 苹果盛果期冠层高光谱与其组分特征的定量模型研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(10): 2719-2723.
- [16] 朱西存, 赵庚星, 雷彤. 苹果花期冠层反射光谱特征[J]. 农业工程学报, 2009, 25(12): 180-186.
- [17] 万余庆, 谭克龙, 周日平. 高光谱遥感应用研究[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [18] Tim J M, Bruno A, Mark D F, et al. Candidate High Spectral Resolution Infrared Indices for Crop Cover[J]. Remote Sens Environ, 1993, 46(1): 204-212.
- [19] 雷彤, 赵庚星, 朱西存, 等. 基于高光谱的苹果果期冠层光谱特征及其果量估测[J]. 生态学报, 2010, 30(9): 2276-2285.