

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.S0.061

苹果叶片氮素含量快速检测模型*

张瑶 郑立华 李民赞 邓小蕾

(中国农业大学现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室,北京 100083)

【摘要】 利用 UV-2450 型光谱分析仪测量苹果叶片光谱反射率,同时在实验室利用凯氏定氮法测量苹果叶片的氮素质量比,建立了适用于便携式检测仪的苹果叶片氮素含量快速检测模型。研究了苹果叶片光谱特性并进行了光谱反射率与氮素的相关性分析,获得了两个氮素敏感波长 652 nm 和 772 nm。同时,利用分段减量精细采样法,构建了 350~730 nm 与 740~880 nm 波段内所有两两波段形成的归一化植被指数 NDVI,并获取了与氮素含量相关性最高的波段组合(859 nm,364 nm)来构建苹果树 NDVI。最后建立了基于苹果树 NDVI、652 nm 处反射率以及 772 nm 处反射率的偏最小二乘回归模型,建模精度达到 0.904 8,均方根误差为 0.159 7,检验模型精度达到 0.917,均方根误差为 0.283 3。

关键词: 苹果叶片 氮素含量 检测模型 植被指数 高光谱

中图分类号: O657.3; S126 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)S0-0300-05

Rapid Determination Model of Apple Leaf Nitrogen Content

Zhang Yao Zheng Lihua Li Minzan Deng Xiaolei

(Key Laboratory of Modern Precision Agriculture System Integration Research, Ministry of Education, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract

The visible and near infrared spectral reflectance was measured for the leaves by using Shimadzu UV-2450 spectrograph. At the same time, the nitrogen content of apple tree leaves were measured in Kjeldahl nitrogen method. The rapid determination model of apple leaf nitrogen content suitable for portable detector was built. The spectral properties were explored and the analysis of correlation was conducted among the nitrogen content of apple tree leaves and their spectral reflectance. Then two sensitive wavebands (652 nm, 772 nm) were obtained. At the same time, by adopting the method of segment reduced precise sampling, the detailed NDVI within the range of 350~730 nm and 740~880 nm were constructed, and then the wavebands (859 nm,364 nm) of the highest correlation with nitrogen content were selected to construct NDVI for apple tree. Finally the nitrogen partial least square regression model of apple tree leaves was established based on apple tree NDVI (859 nm,364 nm) and reflectance at 652 nm and 772 nm. The R^2 of the calibration model reached to 0.904 8, RMSEC was 0.159 7, and the R^2 of predicted model reached to 0.917, RMSEP was 0.283 3. The model reaches practical level and can be used as the nitrogen content rapid determination model to develop a portable apple tree nutrition detector.

Key words Apple leaf, Nitrogen content, Determination model, Vegetation index, Hyperspectral

收稿日期:2012-07-07 修回日期:2012-08-06

* 国家自然科学基金资助项目(31071330)

作者简介:张瑶,硕士生,主要从事植物光谱营养诊断研究,E-mail:zhycou@yahoo.cn

通讯作者:郑立华,副教授,主要从事精细农业研究,E-mail:zhenglh@cau.edu.cn

引言

在作物的整个生长周期,氮素的作用都非常基础而又非常重要。同一品种作物的氮含量直接影响作物自身的健康状态和产量等^[1]。因此在农业生产过程中实时获取植物氮素含量就成为重中之重。传统的实验室化学分析方法虽然检测精度高,但周期长、分析复杂、成本高、具有破坏性,而光谱遥感估测方法,由于具有操作简便、测量速度快、经济环保、非破坏性等众多突出的优点,受到了越来越多的关注。

国内外的科学家先后找到了反映小麦、玉米、水稻^[2~3]含量的敏感波段,利用不同敏感波段处光谱数据的代数组合得到光谱植被指数,在预测植被氮素含量方面也取得了较好的效果^[4~8]。以上研究多针对单年生农作物,而对于多年生农作物——果树来讲,相关研究相对较少。

基于光谱学的氮素含量检测模型的实际应用也取得了一定的进展^[9~10]。但以上研究选取的敏感波段在预测苹果叶片氮素含量时不能获得良好的效果,本文以开发便携式苹果营养检测仪为目的,旨在建立精度高且普适性好的苹果叶片氮素含量快速测定模型。

1 材料与方 法

1.1 实验设计

样品于2011年5月9日采自北京市昌平区香堂文化新村。供试苹果品种为结果盛期的红富士。实验分别在不同区域随机选取20棵果树(15棵结果树,5棵小年树),每棵树选取一根向阳主枝作为目标主枝,取目标主枝的3个部分(基部、中部、顶部)作为代表部位进行取样,共计得到60个样本。分别测定采集样本的光谱反射率,并使用实验室方法测定样本叶片氮素含量。

1.2 光谱测定

测量仪器为日本岛津公司生产的UV-2450型光谱分析仪,波长范围为300~900 nm,光谱分辨率为1 nm,数据采集前进行标准白板校正(标准白板反射率为1)。每个样本测定光谱3次,取其平均值作为该样本的相对反射率。

1.3 氮素含量的测定

苹果叶片全氮含量采用FOSS凯氏定氮法测定。首先将叶片在100℃条件下杀青20 min,然后80℃条件下干燥12 h,取出并研磨粉碎后称取0.4 g,混合6.2 g 催化剂(K_2SO_4 与 $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ 按质量比30:1混合研磨),再加入12 mL 浓硫酸进行

硝化,待冷却后使用定氮仪进行蒸馏,最后测得果树叶片的氮素质量比。

1.4 果树归一化植被指数构建

由于苹果果树营养检测不能简单借用其他植物种类的检测模型,因此基于分段减量精细采样法在全谱范围内进行了归一化植被指数(normalized difference vegetation index, 简称NDVI)构建。在可见光波段内选取350~730 nm 谱段信息,在近红外区域选取740~880 nm 谱段信息,以矩阵联立的形式,组建所有可能两两波段形成的归一化植被指数。在局部连续谱段范围内寻找适用于果树叶片营养检测的最优植被指数,与传统定义方法相比,具有更强的说服力与通用性。

通常情况下归一化指数的计算方法为

$$N_{NDVI}(i, j) = \frac{R_{IR}(i) - R_R(j)}{R_{IR}(i) + R_R(j)}$$

式中 $R_{IR}(i)$ ——近红外特征波长*i*处的植被反射率
 $R_R(j)$ ——可见光特征波长*j*处的植被反射率
本文中,*i*的范围是740~880 nm;*j*的范围是350~730 nm。

2 结果与分析

2.1 果叶氮素的反射光谱特性分析

作物氮素在自然环境下植物的光合作用中起着关键作用。叶片叶绿素和氮素含量状况是植物营养胁迫、光合能力和衰老进程各阶段的良好指示剂。因此利用光谱分析的方法检测苹果叶片的氮素含量对于果园精细管理具有重要的实用价值。

图1为利用UV-2450型光谱分析仪测量的苹果叶片在300~900 nm范围内的平均原始光谱反射率。由图可见,在不同氮素水平(质量比)下,苹果叶片的光谱曲线走势基本一致。在400~490 nm波段的反射光谱曲线平缓且反射率较低;在550 nm波段处反射率曲线呈波峰形态,分析是由于550 nm处为叶绿素的绿色强反射波段所致;650~700 nm波段光谱曲线呈波谷形态,具有较低反射率,分析主要是由于叶绿素的强吸收造成的;在700~750 nm波段苹果叶片呈现绿色植物的红边特征,反射率急剧上升;在750 nm以后光谱呈现缓慢的下降趋势,在760 nm处光谱曲线出现高频噪声,分析原因是由于系统误差造成;在880 nm以后由于系统在此局部波段工作不稳定等原因而出现较大震荡。图1为3个不同氮素含量水平下的苹果叶片反射光谱。可以看到,在可见光区域,苹果叶片氮素含量与光谱反射率呈负相关关系;而在近红外区域,氮素含量则与光谱反射率呈正相关关系。同时,随着氮素含量的增加,

红边位置向长波长方向偏移,而绿峰位置则向短波长方向偏移,绿峰幅值变小。

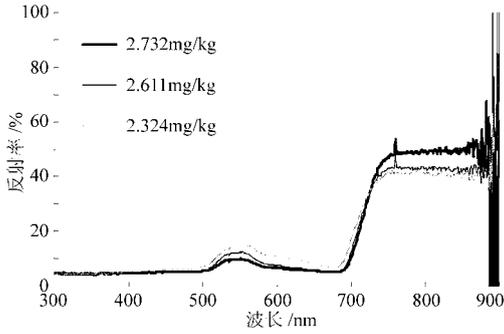


图1 苹果叶片光谱信号

Fig.1 Spectral signature of apple leaves

2.2 NDVI 敏感波段的确定

针对本文光谱数据量大的特点,采取降采样法和精细采样法相结合^[4],设计了分段减量精细采样法,从而实现光谱信息的快速分析与提取。在可见光区域(350~730 nm),由于光谱反射率变化大,因此采取精细采样法,即每隔1个波段读取光谱反射率数据(波段间隔1 nm)。在近红外区域,由于光谱反射率平稳在一个高反射台,所以采取减量采样法,即在740~880 nm范围内每隔10个波段读取光谱反射率数据(波段间隔10 nm)。两两组合构建所有可能的归一化植被指数,分别与果树叶片氮素含量进行相关性分析,结果如图2所示。

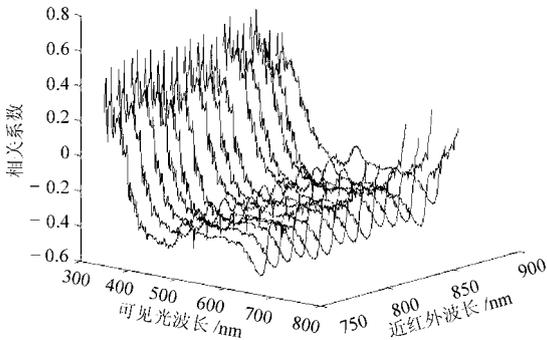


图2 NDVI与氮素含量的相关性曲线

Fig.2 Correlation coefficients between NDVI and nitrogen content of apple leaves

从图2可以看出,在近红外区间间隔采样的14个波长分别与350~730 nm区间内各个波长构建形成的NDVI值与苹果叶片氮素含量之间的相关性曲线趋势基本一致。正相关峰值均在各近红外波段与可见光364 nm组合而构成的NDVI值处,且数值相差不大,均在0.6左右,因此本文选取相关性最高的859 nm与364 nm组合成苹果树NDVI,与氮素相关性达到0.6427。

2.3 单波段反射率的选取

叶片进行光合作用时,与其他植物组织相比,需要更多的氮素。进行光合作用的器官中的氮素主要

存在于光反应的色素蛋白质及与光合作用碳消耗循环相关的蛋白质中。由于叶片含氮量与叶绿素含量之间的变化趋势相似,叶绿素含量可以成为氮素含量的指示剂,所以可以通过测定叶绿素含量来监测植株氮素营养。因此本文选取了叶绿素敏感波长652 nm作为预测氮素含量的敏感波长^[11]。

综合分析苹果叶片氮素含量与单波段反射率之间的关系表明,红边位置772 nm处的光谱反射率与苹果叶片氮含量相关性较好,相关系数达到0.7951。大量研究也表明,红边是作物反射光谱中最明显的特征之一,红边位置与植物叶绿素含量以及氮素营养、生物量、生长状态等因素有密切关系^[12-15]。因此可以选用772 nm作为苹果叶片氮含量的敏感波长。

2.4 苹果果叶氮含量快速检测模型构建

为了进一步提炼简化上述参量之间的关系,以0.5 mg/kg为步长,按氮素不同质量比进行聚类分析,将60个苹果果叶样本划分为31类,再将各类中对应样本的相关数据进行平均后得到31个样本数据。在得到的31个聚类样本中,选取20个样本进行建模,11个样本对模型进行检验。将单特征波长652 nm处反射率、772 nm处反射率以及(859 nm, 364 nm)处苹果树NDVI分别与苹果树叶片氮素含量建立单元线性回归模型,最后将各光谱参数与氮素建立PLS回归模型,如表1所示。并作预测值与观察值的1:1关系图验证所选模型的可靠性和一致性,如图3所示,图中 R_c^2 表示建模精度, R_v^2 表示模型验证精度。

表1 苹果果叶氮素预测模型

Tab.1 Nitrogen content prediction models of apple tree leaves

自变量	回归方程
苹果树NDVI	$y = 21.187x_{\text{NDVI}} - 14.229$
652 nm处反射率	$y = 0.1337x_{652} + 1.8175$
772 nm处反射率	$y = 0.0376x_{772} + 1.0196$
综合光谱参数	$y = 0.6746 - 1.6327x_{\text{NDVI}} - 0.1493x_{652} + 0.094x_{772}$

分析发现,当单特征光谱参数预测苹果叶片氮素含量时,归一化植被指数较单波段特征波长有更强的预测能力。当NDVI与单特征波长反射率相结合,与苹果叶片氮素含量建立偏最小二乘回归模型时,模型精度有了较大提高,建模精度达到0.9048,均方根误差为0.1597,检验模型精度达到0.917,均方根误差为0.2833。说明此模型达到了实用精度,可以作为苹果叶片氮含量快速检测装置的测定模

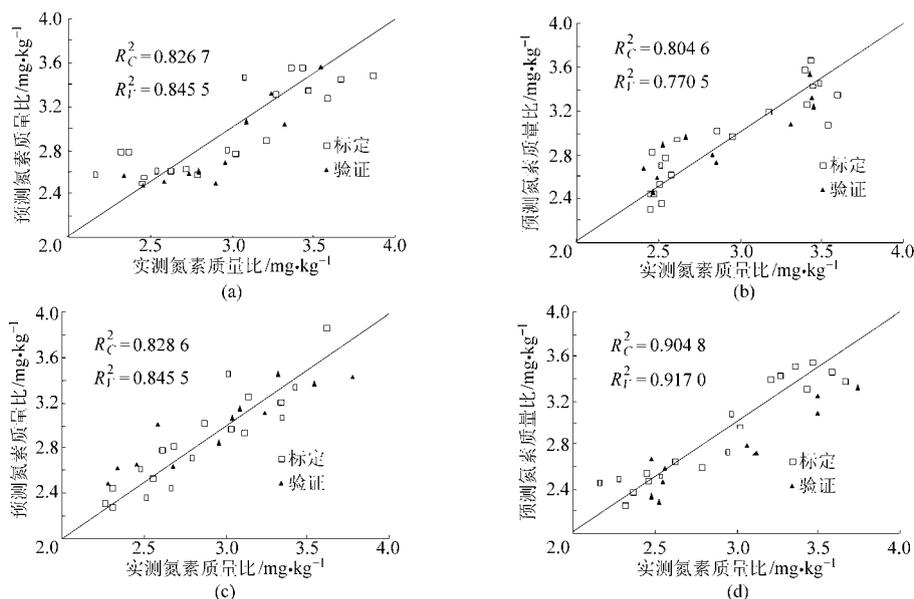


图3 全氮含量预测效果

Fig. 3 Prediction results of apple leaf nitrogen content

(a) 652 nm 处反射率 (b) 772 nm 处反射率 (c) (859 nm, 364 nm) 处 NDVI (d) 综合光谱参数

型。

3 结论

(1) 探明了苹果树叶片光谱特征及其敏感波段。在可见光区, 苹果树叶片光谱曲线总体表现为对蓝光和红光的吸收及对绿光的反射, 在 550 nm 处出现一个反射峰, 在 700 nm 附近, 反射率骤然上升, 在近红外 750 ~ 900 nm 区间呈现出强烈的反射。随着叶片氮素含量的增加, 其光谱反射率在可见光区不断降低, 而在近红外区不断提高。

(2) 采用分段减量精细采样法, 在可见光 350 ~ 730 nm, 近红外 740 ~ 880 nm 波段内组合任意可能

的归一化植被指数, 分别与氮素含量进行相关性分析。分析表明, 近红外波段的差异对于 NDVI 与氮素的相关关系变化并无明显贡献, 而可见光的差异会造成相关关系显著的不同, 因此本文选取 859 nm 和 364 nm 组合的苹果树 NDVI。同时, 根据原始光谱与氮素含量的相关分析, 选取 772 nm 和 652 nm 作为氮素敏感波长。

(3) 利用综合光谱参数与苹果叶片氮素建立偏最小二乘回归模型, 建模精度达到 0.9048, 均方根误差为 0.1597, 检验模型精度达到 0.917, 均方根误差为 0.2833。模型达到了较高的精度, 为便携式苹果营养检测仪的研制开发提供了理论依据。

参 考 文 献

- 李修华. 基于光谱学和遥感技术的作物生长实时检测研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2012.
Li Xiuhua. Real time detection of crop health status with spectral analysis and remote sensing[D]. Beijing: China Agricultural University, 2012. (in Chinese)
- 姚霞. 小麦冠层和单叶氮素营养指标的高光谱监测研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2009.
Yao Xia. Monitoring nitrogen status at canopy and leaf scales with hyperspectral sensing in wheat[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2009. (in Chinese)
- 王磊, 白由路, 卢艳丽, 等. 不同形式的光谱参量对春玉米氮素营养诊断的比较[J]. 农业工程学报, 2010, 26(2): 218 ~ 223.
Wang Lei, Bai Youlu, Lu Yanli, et al. Nitrogen nutrition diagnosis for corn using different spectral parameters[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(2): 218 ~ 223. (in Chinese)
- 张金恒, 王珂, 王人潮, 等. 水稻叶片反射光谱诊断氮素营养敏感波段的研究[J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2004, 30(3): 340 ~ 346.
Wang Jinheng, Wang Ke, Wang Renchao, et al. Sensitive band ranges of leaf spectral reflectance in diagnosis of rice nitrogen nutrition[J]. Journal of Zhejiang University: Agriculture & Life Sciences, 2004, 30(3): 340 ~ 346. (in Chinese)
- 姚霞, 朱艳, 冯伟, 等. 监测小麦叶片氮积累量的新高光谱特征波段及比值植被指数[J]. 光谱学与光谱分析, 2009,

29(8):2 191 ~ 2 195.

Yao Xia, Zhu Yan, Feng Wei, et al. Exploring novel hyperspectral band and key index for leaf nitrogen accumulation in wheat[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2009, 29(8):2 191 ~ 2 195. (in Chinese)

- 6 宋英博. 光谱诊断马铃薯叶片氮素敏感波段的研究[J]. 中国马铃薯, 2010, 24(3):176 ~ 178.
Song Yingbo. Sensitive band ranges of leaf spectral reflectance in diagnosis of potato nitrogen nutrition[J]. Chinese Potato Journal, 2010, 24(3):176 ~ 178. (in Chinese)
- 7 姚霞, 刘小军, 王薇, 等. 小麦氮素无损监测仪敏感波长的最佳波段宽度研究[J]. 农业机械学报, 2011, 42(2):162 ~ 167.
Yao Xia, Liu Xiaojun, Wang Wei, et al. Optimal bandwidths of sensitive bands for portable nitrogen monitoring instrument in wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(2):162 ~ 167. (in Chinese)
- 8 朱咏莉, 李萍萍, 毛罕平, 等. 生菜叶片光谱红边参数对氮营养的响应特征分析[J]. 农业机械学报, 2011, 42(11):174 ~ 177.
Zhu Yongli, Li Pingping, Mao Hanping, et al. Response features of red edge parameters for lettuce leaf spectra under different nitrogen levels[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(11):174 ~ 177. (in Chinese)
- 9 朱艳, 李映雪, 周冬琴. 稻麦叶片氮含量与冠层反射光谱的定量关系[J]. 生态学报, 2006, 26(10):3 463 ~ 3 469.
Zhu Yan, Li Yingxue, Zhou Dongqin. Quantitative relationship between leaf nitrogen concentration and canopy reflectance spectra in rice and wheat[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(10):3 463 ~ 3 469. (in Chinese)
- 10 张喜杰, 李民赞, 崔笛, 等. 温室作物长势的光谱学诊断方法研究与仪器开发[J]. 光谱学与光谱分析, 2006, 26(5):887 ~ 890.
Zhang Xijie, Li Minzan, Cui Di, et al. New method and instrument to diagnose crop growth status in greenhouse based on spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2006, 26(5):887 ~ 890. (in Chinese)
- 11 李修华, 李民赞, 崔笛, 等. 基于双波段作物长势分析仪的东北水稻长势监测 [J]. 农业工程学报, 2011, 27(8):206 ~ 210.
Li Xiuhua, Li Minzan, Cui Di, et al. Monitoring of rice plant growth in Northeast China using dual-wavebands crop growth analyzer[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(8):206 ~ 210. (in Chinese)
- 12 张金恒, 王珂, 王人潮. 叶绿素计 SPAD-502 在水稻氮素营养诊断中的应用[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2003, 31(2):177 ~ 180.
Zhang Jinheng, Wang Ke, Wang Renchao. Application of chlorophyll meter SPAD-502 in diagnosis of nitrogen status and nitrogenous fertilizer in rice[J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2003, 31(2):177 ~ 180. (in Chinese)
- 13 Ju Changhua, Tian Yongchao, Yao Xia, et al. Estimation leaf chlorophyll content using red edge parameters [J]. Pedosphere, 2010, 20(5):633 ~ 644.
- 14 杨杰, 田永超, 姚霞, 等. 利用高光谱参数反演水稻叶片类胡萝卜素含量[J]. 植物生态学报, 2010, 34(7):845 ~ 854.
Yang Jie, Tian Yongchao, Yao Xia, et al. Estimation leaf carotenoid content with hyperspectral parameters in rice [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, 34(7):845 ~ 854. (in Chinese)
- 15 Mutange O, Skidmore A K. Red edge shift and biochemical content in grass canopies[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2007, 62(1):34 ~ 42.