

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

邢东兴^{1,2}, 常庆瑞¹

(1 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2 咸阳师范学院 资源环境系, 陕西 咸阳 712000)

【摘要】 **【目的】**探讨采用光谱分析手段估测果树 N、P、K 营养元素含量的精度及应用潜力。**【方法】**首先,对果树鲜叶的光谱反射率(R_λ)以及叶片全氮(TN)、全磷(TP)、全钾(TK)含量进行测定,并对各种元素含量与 R_λ 及其多种变式数据($1/R_\lambda$ 、 $\lg(1/R_\lambda)$ 、 $d^1 R_\lambda$ 、 $d^2 R_\lambda$ 、 $d^1[\lg(1/R_\lambda)]$ 、 $d^2[\lg(1/R_\lambda)]$ 、 $\lg(1/BNC)$ 、 $f'(R_\lambda)$ 、 Dn)的相关性进行分析,找出与每种元素含量相关性最强的光谱数据形式;其次,采用逐步回归法,对每种元素含量和与其相关性最强的光谱数据形式进行回归分析,得到入选波长;最后,利用入选的波长,进行基于最小误差平方和的偏最小二乘回归建模。**【结果】**叶片 TN、TK 含量与波长间隔设为 5 nm 的 $d^1 R_\lambda$ 的相关性最强,TP 含量与波长间隔设为 9 nm 的 $d^1[\lg(1/R_\lambda)]$ 的相关性最强;利用入选的特征波长建立的估测模型均具有较好的线性趋势, R^2 均在 0.8 以上。**【结论】**光谱分析手段对果树 N、P、K 营养元素含量的估测精度较高,具有一定的应用潜力。

【关键词】 光谱分析;果树叶片;全氮;全磷;全钾;估测

【中图分类号】 TP701

【文献标识码】 A

【文章编号】 1671-9387(2009)02-0141-07

Research on predicting the TN, TP, TK contents of fresh fruit tree leaves by Spectral Analysis with Red Fuji Apple tree as an example

XING Dong-xing^{1,2}, CHANG Qing-rui¹

(1 College of Environment and Resources, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2 Department of Resources and Environment, Xianyang Normal College, Xianyang, Shaanxi 712000, China)

Abstract: **【Objective】** The research was expected to evaluate the possibility and application potential of spectral analysis on predicting nutritional element of fruit trees. **【Method】** Firstly, we measure the specific reflectance (R_λ) of fruit tree fresh leaves and the leaves total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), total potassium (TK) contents, and analyzed the statistical correlation between each element content and R_λ as well as its several transformations ($1/R_\lambda$, $\lg(1/R_\lambda)$, $d^1 R_\lambda$, $d^2 R_\lambda$, $d^1[\lg(1/R_\lambda)]$, $d^2[\lg(1/R_\lambda)]$, $\lg(1/BNC)$, $f'(R_\lambda)$, Dn) within the wavelength range from 400 nm to 900 nm by factor analysis method, and discovered the spectral reflectance variant of the highest correlation coefficient. Subsequently, we carried on the regression analysis of each element content and the corresponding spectral reflectance variant of the highest correlation coefficient by stepwise regression method, and chose the eigenvalue wavelengths with which to carry on partial least squares regression modeling based on the least square error. **【Result】** The results show that the correlation coefficient is the highest between the leaves TN or TK content and the first derivative of spectral reflectance with derivative gap = 5 nm; the correlation coefficient is the highest be-

* [收稿日期] 2008-04-15

[基金项目] 国家自然科学基金项目(30571527)

[作者简介] 邢东兴(1969—),男,陕西礼泉人,在读博士,主要从事土地资源与空间信息技术研究。E-mail: pah72@sohu.com

[通信作者] 常庆瑞(1959—),男,陕西子洲人,教授,博士生导师,主要从事土地资源与空间信息研究。

E-mail: changqr@nwsuaf.edu.cn

tween the leaves TP content and $d^1[\lg(1/R_\lambda)]$ with derivative gap = 9 nm; the regression models established using the wavelengths selected by stepwise regression method when Sig(it's a probability numerical higher than F detection value) is set to 0.02 and ramoval is set to 0.03 have the better linear trend, and R^2 values are higher than 0.8. 【Conclusion】 As a whole, the method of spectral analysis has some application potential to predict TN, TP, TK element of fruit trees.

Key words: spectral analysis; fruit tree leaf; TN; TP; TK; predicting

N、P、K 营养元素是果树生长和果实产量、品质形成所必需的重要养分。实时、快捷、准确地监测果树 N、P、K 营养元素含量,并依据其测评结果及时指导果农对果树进行科学合理施肥,是保障区域果业优质高效生产和可持续发展的重要环节。传统的叶片化学分析方法,虽然对果树 N、P、K 营养元素含量具有较高的检测精度,但由于受高耗性、繁冗复杂性、时滞性等的制约,不能对大范围果树进行全面、快速的营养诊断。近年来,随着高光谱遥感技术的快速发展与不断完善,利用高光谱数据对各种植物的生化组分含量进行实时、快捷监测已成为可能,并且正在形成遥感领域的研究热点。

早在 1972 年,Thomas 等^[1]通过研究发现,甜椒叶片的 N 素含量与 550~675 nm 波段内叶片的光谱反射率高度相关,叶片 N 素实测值和预测值之间的误差小于 7%。此研究表明,光谱分析手段有可能快速、简便、较精确地监测植物的 N 素含量。随后,相关研究人员相继利用高光谱数据(包括高光谱遥感影像数据和地面光谱测试数据),分别对小麦、水稻、土豆、桉树等植物的 N 素含量进行了估测研究^[2-22]。Fernandez 等^[2]研究发现,利用红光(660 nm)和绿光(545 nm)2 个波段的线性组合可以估测小麦的 N 素含量。Everitt 等^[3]在对杂草和花卉植物的研究中发现,500~750 nm 波段的光谱反射率与其叶片 N 素含量具有很高的相关性,并提出用 550~600 nm 与 800~900 nm 波段反射率的比值来监测植株 N 素的状况。王人潮等^[4]、周启发等^[5]研究发现,诊断水稻 N 素营养水平的叶片光谱敏感波段为 760~900,630~660 和 530~560 nm。Stone 等^[6]通过研究提出,用 671 nm 和 780 nm 2 个波长处光谱反射率组合的植被指数来估算小麦植株的 N 素含量。薛利红等^[7]的初步研究表明,用 660 nm 和 460 nm 2 个波长处反射率组成的冠层植被指数可以较好地反映小麦叶片 N 素含量。近年来,随着高光谱遥感的兴起,越来越多的学者利用微分光谱和红边特性等来估测植物的 N 素状况^[8-9]。直到目前,利用高光谱数据对植物 P、K 元素含量进行估测

的研究报道较少,并且其研究结果相互间存在偏差^[11,22-23]。

已有研究结果显示,植物 N、P、K 营养元素含量的特征光谱,随不同的植物、不同的试验条件而有所差异,有关植物 N、P、K 营养元素含量与光谱参数的规律性和定量化的关系,还有待进一步研究^[10]。再之,前人利用光谱数据对果树 N、P、K 3 大营养元素含量进行定量化估测的研究较少,光谱分析手段能否或如何在果树叶片这一小尺度上,对其 N、P、K 营养元素含量予以精确估测,其估测精度能否达到区分果树 N、P、K 元素含量盈缺的精度等问题尚未明确。本研究以红富士苹果树为例,对其单鲜叶片的光谱反射率,以及叶片中全氮(TN)、全磷(TP)、全钾(TK)含量进行了测定,并对其测定结果进行了相关处理和统计分析,以期探讨光谱分析手段估测果树 N、P、K 营养元素含量的精度及应用潜力,为我国利用机载、星载高(超)光谱传感器技术,开展精准果业生产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 叶样采集

叶样采集地选择在陕西省礼泉县的石潭镇(108°22'E、34°32'N)。该镇地处渭北台塬,属于红油土壤,0~20 cm 土层有机质含量为 7.8 g/kg,碱解氮含量为 45 mg/kg,速效磷含量为 16.08 mg/kg,速效钾含量为 135.5 mg/kg,果业生产无灌溉条件。为了获取理想的试验结果,本研究对该镇果树种植与施肥管理等状况进行了详细调查,最后选取 135 个红富士苹果园作为叶样采集地。这些果园的树龄为 10~15 年,均为乔砧、主杆分层型树型。近 3 年的施肥状况为:40 个果园以施氮肥为主,施氮最高(折合为纯氮量,下同)为 1 575 kg/hm²,最低为 225 kg/hm²,大多数果园施氮量在 450~750 kg/hm²;50 个果园以施磷肥为主,施磷最高(P₂O₅,下同)为 1 800 kg/hm²,最低为 270 kg/hm²,大多数果园施磷量为 300~450 kg/hm²;有 45 个果园施氮、磷量相近(施氮约为 600 kg/hm²,磷约为 375 kg/hm²),施钾

(K_2O ,下同)最高为 $1\ 200\ kg/hm^2$, 较低为 $150\sim 300\ kg/hm^2$, 其中有 5 个果园从未施钾。

2007 年 7 月中旬采集叶样。在 40 个以施氮为主的果园, 于每个果园内部, 选取长势正常的苹果树 10 株, 在每株苹果树树冠外围, 距地 $1.5\sim 1.7\ m$ 处, 选择当年生新梢中部无病虫害、无机械损伤的健康叶片, 每梢采 1~2 片, 全树不同方位角共采叶 10 片, 10 株共采叶 100 片, 将其混合作为一个叶样^[24-25]。所采集的 40 个叶样作为测试叶片全氮含量及其光谱反射率的样本。以同样的方式采集到施磷和施钾为主的 50 与 45 个叶样, 分别作为测试叶片全磷、全钾含量及其光谱反射率的样本。

1.2 光谱反射率的测定

叶片采集后, 立刻在室内对其进行光谱测试。光谱测试仪器为美国 ASD 公司出产的 FieldSpec HandHeld(325~1 075 nm)型光谱辐射计, 其光谱采样间隔约 $1.5\ nm$, 波长为 $325\sim 1\ 075\ nm$, 光谱分辨率为 $3.5\ nm$ 。在测试时, 采用视场角为 7° 的探头, 光源是与光谱辐射计配套的卤素灯, 用黑色胶板作为背景^[11,26]。将剪去叶柄的叶片平置于胶板上, 光谱辐射计固定在三角架上, 探头向下垂直照射, 光谱采样以 10 个光谱为一采样光谱, 每次记录 10 个光谱, 取其平均值。在测试过程中, 每隔 10 min 对仪器进行一次优化与校正。

1.3 叶片 TN、TP、TK 含量(干物质质量比)的测定

将经过光谱测试后的叶样尽快用保鲜袋封装, 置于冰桶, 在 2 h 内运回实验室, 并对其进行标准化前处理。全氮用凯氏法测定, 全磷用钒钼黄比色法测定, 全钾用火焰光度计法测定^[27], 3 次重复。

1.4 数据处理

利用 ENVI、ASD ViewSpec Pro、Eecel、SPSS、DPS 软件, 对试验数据进行以下处理。

1.4.1 光谱数据预处理 首先, 在剔除异样光谱曲线的基础上, 对其他光谱曲线予以平均、平滑处理, 并考虑到因系统误差致使光谱曲线首尾两端噪音较大, 而截取 $400\sim 900\ nm$ 波长用于分析^[28-29]。其次, 为了进一步消除基线漂移和背景干扰等的影响, 对光谱反射率 R_λ 进行如下变换: (1) 光谱倒数 ($1/R_\lambda$, 其中 R_λ 指波长为 λ 的光谱反射率, 下同); (2) 光谱倒数的对数 ($\lg(1/R_\lambda)$); (3) 一阶微分光谱 (d^1R_λ , 在变换时, 波长间隔分别取 3, 5, 7, 9, 11, 15, 17, 19, 25 nm); (4) 二阶微分光谱 (d^2R_λ , 所取波长间隔同上); (5) 四点差分的一阶微分光谱^[30] ($f'(R_\lambda)$, $f'(R_\lambda) = 1/6\ h(-11R_\lambda + 18\ R_{\lambda-1} - 9\ R_{\lambda-2} +$

$2R_{\lambda-3})$, 其中 h 为波长间隔, 取值为 1); (6) 光谱倒数的对数的一阶微分 ($d^1[\lg(1/R_\lambda)]$, 所取波长间隔同上); (7) 光谱倒数的对数的二阶微分 ($d^2[\lg(1/R_\lambda)]$, 所取波长间隔同上); (8) 包络线去除后的光谱反射率的对数^[31] ($\lg(1/BNC)$); (9) 基线归一化方法^[18,32] (Dn)。最后, 对经过预处理的光谱数据重新编码, 创建了数据库, 并以 ASCII 格式导出, 以供随后的处理。

1.4.2 入选波长的确定及回归模型的建立与检验

首先, 分别对各种元素含量与 R_λ 及其多种变式数据的相关性进行分析, 并找出与每种元素含量相关性最强的光谱数据形式。其次, 采用逐步回归法, 对每种元素含量和与其相关性最强的光谱数据形式进行回归分析, 得到入选波长。最后, 利用入选的波长进行基于最小误差平方和的偏最小二乘回归 (PLS) 建模, 并利用检测样本 (从 3 组叶样中各抽取 10 个叶样作为检测样本, 其余叶样作为校正样本) 分别对最终建立的 3 个模型的估测精度进行检验。

2 结果与分析

2.1 叶片 TN、TP、TK 含量与 R_λ 及其变式数据之间的相关性

2.1.1 TN 含量与 R_λ 及其变式数据之间的相关性

通过相关数据处理可知, 叶片 TN 含量与 R_λ 的相关性较弱, 而与波长间隔设为 $5\ nm$ 的 d^1R_λ 相关性最强, 与其他 R_λ 变式数据的相关性较强。在 TN 含量与 R_λ 的相关系数中 (见图 1 之 2), 绝对值大于 0.5 的峰 (谷) 区分别出现在 $522\sim 570, 705\sim 729\ nm$ 。在 TN 含量与波长间隔设为 $5\ nm$ 的 d^1R_λ 的相关系数中 (见图 1 之 1), 绝对值较大的峰 (谷) 区分别出现在 $521, 568, 704\ nm$ 附近, 其对应的极值分别为 $-0.800, 0.752, -0.726$ 。

2.1.2 TP 含量与 R_λ 及其变式数据之间的相关性

通过相关数据处理可知, 叶片 TP 含量与 R_λ 的相关性较弱, 而与波长间隔设为 $9\ nm$ 的 $d^1[\lg(1/R_\lambda)]$ 的相关性最强, 与其他 R_λ 变式数据的相关性较强。在叶片 TP 含量与 R_λ 的相关系数中 (见图 2 之 2), 绝对值大于 0.4 的峰 (谷) 区分别出现在 $544\sim 562, 703\sim 729\ nm$ 。在叶片 TP 含量与波长间隔设为 $9\ nm$ 的 $d^1[\lg(1/R_\lambda)]$ 的相关系数中 (见图 2 之 1), 绝对值较大的峰 (谷) 区分别出现在 $542, 688, 585\ nm$ 附近, 其对应的极值分别为 $-0.851, 0.687, -0.614$ 。

2.1.3 TK 含量与 R_λ 及其变式数据之间的相关性

通过相关数据处理可知,叶片 TK 含量与 R_{λ} 的相关性较弱,而与波长间隔设为 5 nm 的 d^1R_{λ} 相关性最强,与其他 R_{λ} 变式数据的相关性较强。在叶片 TK 含量与 R_{λ} 的相关系数中(见图 3 之 2),绝对值大于 0.35 的峰(谷)区分别出现在 400~420,738~

758,767~809 nm。在叶片 TK 含量与波长间隔设为 5 nm 的 d^1R_{λ} 的相关系数中(见图 3 之 1),绝对值较大的峰(谷)区分别出现在 553,434,413,671 nm 附近,其对应的极值分别为 0.681, -0.532, -0.470, -0.465。

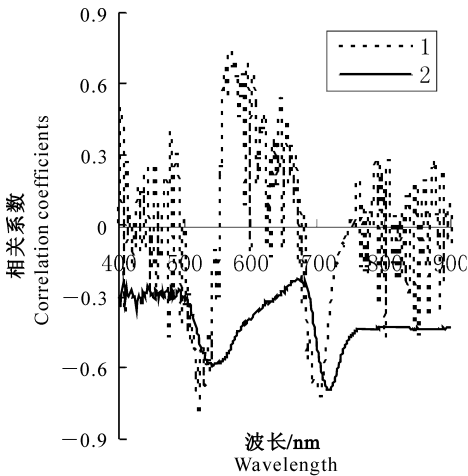


图 1 TN 含量与光谱反射率或一阶微分光谱的相关系数

- 1. TN 含量与波长间隔设为 5 nm 的 d^1R_{λ} 的相关系数;
- 2. TN 含量与 R_{λ} 的相关系数

Fig. 1 Correlation coefficients between TN element content with the spectral reflectance or the first derivative of spectral reflectance

- 1. TN content and d^1R_{λ} ; 2. TN content and R_{λ}

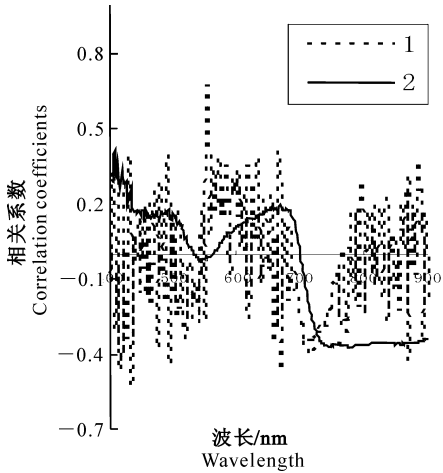


图 3 TK 含量与光谱反射率或一阶微分光谱的相关系数

- 1. TK 含量与波长间隔设为 5 nm 的 d^1R_{λ} 的相关系数;
- 2. TK 含量与 R_{λ} 的相关系数

Fig. 3 Correlation coefficients between TK element content with the spectral reflectance or the first derivative of spectral reflectance

- 1. TK content and d^1R_{λ} ; 2. TK content and R_{λ}

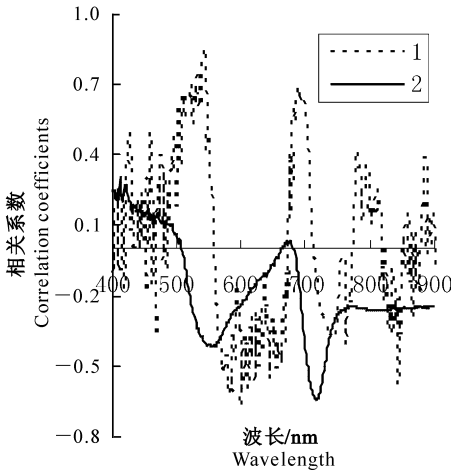


图 2 TP 含量与光谱反射率或光谱倒数的对数的一阶微分的相关系数

- 1. TP 含量与波长间隔设为 9 nm 的 $d^1[\lg(1/R_{\lambda})]$ 的相关系数;
- 2. TP 含量与 R_{λ} 的相关系数

Fig. 2 Correlation coefficients between TP element content with the spectral reflectance or $d^1[\lg(1/R_{\lambda})]$

- 1. TP content and $d^1[\lg(1/R_{\lambda})]$; 2. TP content and R_{λ}

2.2 叶片 TN、TP、TK 含量估测模型的建立与检验

2.2.1 入选波长的获取与估测模型的建立 在不断调整 Sig 与 Removal 设置值的情况下,分别对 N、P、K 3 种元素含量和与其相关性最强的光谱变式数据进行逐步回归分析,以获取估测 TN、TP、TK 元素含量的入选波长。经过多次调试,最后以 Sig 均设为 0.02,Removal 均设为 0.03 时所入选的波长进行建模。此时,TN 含量与波长间隔设为 5 nm 的 d^1R_{λ} 回归结果为:入选波长共 4 个,分别为 521, 441,845,486 nm;TP 含量与波长间隔设为 9 nm 的 $d^1[\lg(1/R_{\lambda})]$ 回归结果为:入选波长共 7 个,分别为 542,462,459,819,454,865,472 nm;TK 含量与波长间隔设为 5 nm 的 d^1R_{λ} 回归结果为:入选波长共 5 个,分别为 553,667,870,626,649 nm。在确定了入选波长后,用其进行基于最小误差平方和的偏最小二乘回归建模。

(1) TN 含量与入选波长 R_{λ} 的回归结果。当潜变量个数 K 值设为 4 时,误差平方和最小,为

46.027,此时 TN 含量与入选波长 R_{λ} 的回归模型为:

$$\text{TN}(\text{g/kg})=29.080-4\,894.066R_{521}+3\,303.491R_{441}-3\,197.317R_{845}+3\,106.104R_{486},$$
$$R^2=0.841.$$

用该模型模拟的 TN 值(y)与校正样本的实测值(x)之间的关系见图 4。

(2)TP 含量与入选波长 R_{λ} 的回归结果。当潜变量个数 K 值设为 6 时,误差平方和最小,为 13.554,此时的回归模型为:

$$\text{TP}(\text{g/kg})=2.036+421.349R_{542}-82.248R_{462}+56.484R_{459}-603.766R_{819}-47.610R_{454}-386.588R_{865}-32.947R_{472},R^2=0.954.$$

用该模型模拟的 TP 值(y)与校正样本的实测值(x)之间的关系见图 5。

(3)TK 含量与入选波长 R_{λ} 的回归结果。当潜变量个数 K 值设为 5 时,误差平方和最小,为 23.626,此时的回归模型为:

$$\text{TK}(\text{g/kg})=7.823+13\,831.072R_{553}+11\,139.282R_{667}-3\,674.680R_{870}-$$

$4\,464.490R_{626}-3\,168.907R_{649},R^2=0.918.$

用该模型模拟的 TK 值(y)与校正样本的实测值(x)之间的关系见图 6。

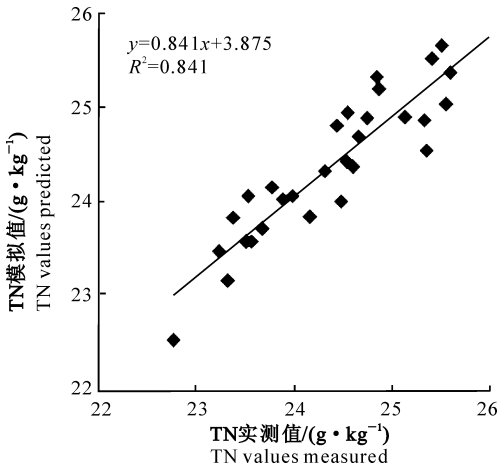


图 4 叶片 TN 含量的实测值(x)与 PLS 回归模型模拟值(y)之间的关系

Fig. 4 Correlativity of the leaf nitrogen content measured and predicted by PLS

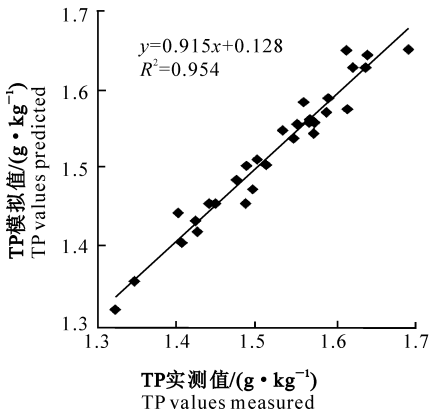


图 5 叶片 TP 含量的实测值(x)与 PLS 回归模型模拟值(y)之间的关系

Fig. 5 Correlativity of the leaf phosphor content measured and predicted by PLS

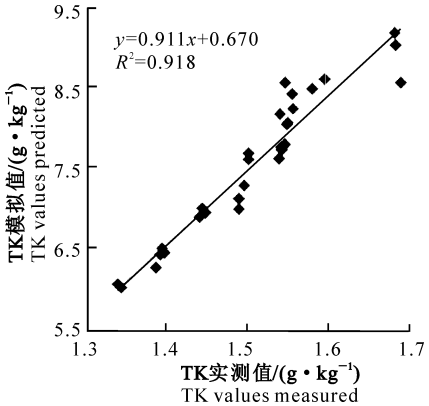


图 6 叶片 TK 含量的实测值(x)与 PLS 回归模型模拟值(y)之间的关系

Fig. 6 Correlativity of the leaf potassium content measured and predicted by PLS

2.2.2 估测模型的检验 对 2.2.1 中的 3 个估测模型进行检验,结果见表 1。从表 1 可见:(1)在对估测叶片 TN 含量的模型检验结果中,检测样本的实测值与模拟值之间的绝对值最大误差值为 1.991 g/kg,绝对值最小误差值为-0.044 g/kg,实测与模拟值总平均之差为 0.119 g/kg,误差绝对值的总平均值为 0.577 g/kg。其中,误差绝对值的总平均值不仅小于陕西省红富士苹果叶片 TN 含量分级标准值域^[24](缺乏:<21.5 g/kg;低值:21.5~

23.0 g/kg;正常值:23.1~25.0 g/kg;高值:25.1~26.6 g/kg;过高:>26.6 g/kg)中的级间中值差(即相邻 2 个级别的中值之差,下同)1.8 g/kg,而且也小于级内中值与边值差(即同级别内中值与边值之差,下同)0.75 g/kg 或 0.95 g/kg,但大于级间分断值(即相邻 2 个级别的分断值,下同)0.1 g/kg。

(2)在对估测叶片 TP 含量的模型检验结果中,检测样本的实测值与模拟值之间的绝对值最大误差值为 0.227 g/kg,绝对值最小误差值为-0.013

g/kg,实测与模拟值总平均之差为 0.027 g/kg,误差绝对值的总平均值为 0.060 g/kg。其中,误差绝对值的总平均值不仅小于陕西省红富士苹果叶片 TP 含量分级标准值域^[24](缺乏:<1.18 g/kg;低值:1.18~1.37 g/kg;正常值:1.38~1.66 g/kg;高值:1.67~1.86 g/kg;过高:>1.86 g/kg)中的级间中值差 0.245 g/kg,且也小于级内中值与边值差 0.095或 0.14 g/kg,但大于级间分断值0.01 g/kg。

(3)在对估测叶片 TK 含量的模型检验结果中,检测样本的实测值与模拟值之间的绝对值最大误差

表 1 检测叶样中 TN、TP、TK 含量的实测值与模拟值之间的统计结果

Table 1 Statistical values of the leaves nitrogen,phosphorus,potassium element content measured and simulated by the model for the testing leaf samples				g/kg
项目 Item	TN	TP	TK	
实测值总平均 Mean value of measured	24.510	1.481	7.911	
模拟值总平均 Mean value of predicted	24.390	1.454	7.482	
绝对值最大误差值 The largest absolute error	1.991	0.227	2.878	
绝对值最小误差值 The smallest absolute error	-0.044	-0.013	0.149	
实测与模拟值总平均之差 Differential value of Mean of measured and predicted	0.119	0.027	0.429	
误差绝对值的总平均值 Mean of the absolute error	0.577	0.060	1.173	

综上所述,本研究建立的对应模型在估测果树叶片 TN、TP、TK 含量时具有一定潜力,可以大致区分果树叶片 TN、TP、TK 含量的高、低、正常等级别归属,但其估测精度仍有待于进一步研究与提高。

3 讨论

本研究得出的能够反映果树叶片 TN、TP、TK 含量的特征波长,与前人^[11]研究结果略有不同。其原因是多方面的,如逐步回归本身的局限性、测量仪器本身的性能、测试环境条件、测试对象与尺度(植物种类有别,冠层或叶片测试尺度有别)以及测试方式等。此外,本研究得出的与各元素含量相关性较强的光谱数据形式,是一阶微分光谱,这与前人^[11]的研究结果一致。但不同的是,本研究为了寻求与元素含量相关性更强的光谱数据形式,不仅对 R_{λ} 进行了 9 种数据形式变换,而且对 R_{λ} 以 9 种不同的波长间隔进行了一阶微分等形式变换,并在其变换结果中,找出了与各元素含量相关性更强的光谱微分数据形式。再之,本研究在优选数据形式、筛选入选波长、优化模型参数的基础上,建立的估测模型较前人^[11]的估测精度高。

由于受仪器设备条件所限,本研究未利用900~2 500 nm 的光谱反射率,对 N、P、K 元素含量进行相关分析与估测建模。

值为 2.878 g/kg,绝对值最小误差值为 0.149 g/kg,实测与模拟值总平均之差为 0.429 g/kg,误差绝对值的总平均值为 1.173 g/kg。其中,误差绝对值的总平均值不仅小于陕西省红富士苹果叶片 TK 含量分级标准值域^[24](缺乏:<5.5 g/kg;低值:5.5~7.2 g/kg;正常值:7.3~9.8 g/kg;高值:9.9~11.6 g/kg;过高:>11.6 g/kg)中的级间中值差 2.2 g/kg,而且也小于级内中值与边值差 1.25 g/kg,但大于级内中值与边值差 0.85 g/kg 以及级间分断值 0.1 g/kg。

表 1 检测叶样中 TN、TP、TK 含量的实测值与模拟值之间的统计结果

Table 1 Statistical values of the leaves nitrogen,phosphorus,potassium element content measured and simulated by the model for the testing leaf samples				g/kg
项目 Item	TN	TP	TK	
实测值总平均 Mean value of measured	24.510	1.481	7.911	
模拟值总平均 Mean value of predicted	24.390	1.454	7.482	
绝对值最大误差值 The largest absolute error	1.991	0.227	2.878	
绝对值最小误差值 The smallest absolute error	-0.044	-0.013	0.149	
实测与模拟值总平均之差 Differential value of Mean of measured and predicted	0.119	0.027	0.429	
误差绝对值的总平均值 Mean of the absolute error	0.577	0.060	1.173	

4 结论

(1)叶片 TN 含量与波长间隔设为 5 nm 的 d^1R_{λ} 的相关性最强,在其相关系数中,绝对值较大的峰(谷)区分别出现在 521,568,704 nm 附近。叶片 TP 含量与波长间隔设为 9 nm 的 $d^1[\log(1/R_{\lambda})]$ 的相关性最强,在其相关系数中,绝对值较大的峰(谷)区分别出现在 542,688,585 nm 附近。叶片 TK 含量与波长间隔设为 5 nm 的 d^1R_{λ} 的相关性最强,在其相关系数中,绝对值较大的峰(谷)区分别出现在 553,434,413,671 nm 附近。(2)用 Sig 均设为 0.02,Removal 均设为 0.03 时所入选的波长,建立的回归模型都具有较好的线性趋势, R^2 都在 0.8 以上。(3)利用检测样本对估测模型进行检验的结果表明,建立的对应模型在估测果树叶片 TN、TP、TK 含量时具有一定潜力,而且可以大致区分果树叶片 TN、TP、TK 含量的高、低、正常等级别归属,但其估测精度仍有待于进一步研究与提高。

[参考文献]

[1] Thomas J R,Oerther G F. Estimating nitrogen content of sweet pepper leaves by reflectance measurements [J]. Agronomy Journal,1972(64):11-13.

[2] Fernandez S,Vidal D,Simon E, et al. Radiometric characteristics of triticum aestivum astral under water nitrogen stress [J]. International Journal of Remote Sensing, 1994, 15 (9):

- 1867-1884.
- [3] Everitt J H, Pettit R D, Alaniz M A. Remote sensing of broom snake weed (*Gutierrezia sarothrae*) and spiny aster (*Aster spinosus*) [J]. Weed Science, 1987, 35(2): 295-302.
- [4] 王人潮, 陈铭臻, 蒋亨显. 水稻估产的农学机理研究. I. 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(增刊): 7-14.
- Wang R C, Chen M Z, Jiang H X. Studies on agronomic mechanism of the rice yield estimation by remote sensing. I. The rice reflectance characteristics of different nitrogen levels and the selection of their sensitive bands [J]. Journal of Zhejiang Agricultural University, 1993, 19(Sup.): 7-14. (in Chinese)
- [5] 周启发, 王人潮. 水稻氮素营养水平与光谱特征的关系[J]. 浙江农业大学学报, 1993, 19(增刊): 40-46.
- Zhou Q F, Wang R C. A preliminary study on the relationship between the nitrogen levels and the spectral characteristics [J]. Journal of Zhejiang Agricultural University, 1993, 19(Sup.): 40-46. (in Chinese)
- [6] Stone M L, Solie J B, Raun W R, et al. Use of spectral radiance for correction in-season fertilizer nitrogen deficiencies in winter wheat [J]. Transaction of the ASAE, 1996, 39(5): 1623-1631.
- [7] 薛利红, 曹卫星, 罗卫红, 等. 小麦叶片氮素状况与光谱特性的相关性研究 [J]. 植物生态学报, 2004, 28(2): 172-177.
- Xue L H, Cao W X, Luo W H, et al. Correlation between leaf nitrogen status and canopy spectral characteristics in wheat [J]. Acta Phytocologica Sinica, 2004, 28(2): 172-177. (in Chinese)
- [8] Munden R, Curran P G, Catt J A. The relationship between red edge and chlorophyll concentration in the broad balk winter wheat experiment at Rothamsted [J]. International Journal of Remote Sensing, 1994, 15: 705-709.
- [9] Brog N H, Mortensen J V. Deriving green crop area index and canopy chlorophyll density of winter wheat from spectral reflectance data [J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 81: 45-57.
- [10] 朱 艳, 李映雪, 周冬琴, 等. 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(10): 3463-3469.
- Zhu Y, Li Y X, Zhou D Q, et al. Quantitative relationship between leaf nitrogen concentration and canopy reflectance spectra in rice and wheat [J]. Acta Ecologica Sinica, 2006(10): 3463-3469. (in Chinese)
- [11] 牛 铮, 陈永华, 隋洪智, 等. 叶片化学组分成像光谱遥感探测机理分析 [J]. 遥感学报, 2000, 4(2): 125-130.
- Niu Z, Chen Y H, Sui H Z, et al. Mechanism analysis of leaf biochemical concentration by high spectral remote sensing [J]. Journal Remote Sensing, 2000, 4(2): 125-130. (in Chinese)
- [12] 王秀珍, 王人潮, 李云梅, 等. 不同氮素营养水平的水稻冠层光谱红边参数及其应用研究 [J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2001, 27(3): 301-306.
- Wang X Z, Wang R C, Li Y M, et al. Study on red edge characteristics of rice spectral caused by nitrogen level [J]. Journal of Zhejiang University: Agric& Life Sci, 2001, 27(3): 301-306. (in Chinese)
- [13] Jensen A, Lorenzen B. Radiometric estimation of biomass and nitrogen content of barley grown at different nitrogen levels [J]. International Journal of Remote Sensing, 1990, 11(10): 1809-1820.
- [14] Filella I, Serrano L, Serra J, et al. Evaluating wheat nitrogen status with canopy reflectance indices and discriminant analysis [J]. Crop Science, 1995, 35: 1400-1405.
- [15] Yoder B J, Pettigrew-Crosby R E. Predicting nitrogen and chlorophyll concentrations from reflectance spectra (400 — 2 500 nm) at leaf and canopy scales [J]. Remote Sensing of Environment, 1995, 53: 199-211.
- [16] Lee T, Raja K, Reddy G. Reflectance indices with precision and accuracy in predicting cotton leaf nitrogen concentration [J]. Crop Science, 2000, 40: 1814-1819.
- [17] Raymond E E J, Rennie B. Spectral measurements at different spatial scales in potato: relating leaf, plant and canopy nitrogen status [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geo-information, 2004(5): 205-218.
- [18] Kokaly R F. Investigating a physical basis for spectroscopic estimates of leaf nitrogen concentration [J]. Remote Sensing of Environment, 2001, 75: 153-161.
- [19] Blackmer T M, Schepers J S, Varvel G E, et al. Nitrogen deficiency detection using short wave radiation from irrigated corn canopies [J]. Agronomy Journal, 1996(88): 1-5.
- [20] 王纪华, 黄文江, 赵春江, 等. 利用光谱反射率估算叶片生化组分和籽粒品质指标研究 [J]. 遥感学报, 2003, 7(4): 277-284.
- Wang J H, Huang W J, Zhao C J, et al. The inversion of leaf biochemical components and grain quality indicators of winter wheat with spectral reflectance [J]. Journal of Remote Sensing, 2003, 7(4): 277-284. (in Chinese)
- [21] Curran P J, Dungan J L. Reflectance spectroscopy of fresh whole leaves for the estimation of chemical concentration [J]. Remote Sensing of Environment, 2002(39): 153-166.
- [22] 浦瑞良, 宫 鹏. 高光谱遥感及其应用 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 186-228.
- Pu R L, Gong P. Hyperspectral remote sensing and it's applications [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000: 186-228. (in Chinese)
- [23] 王 珂, 沈掌泉, 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 [J]. 科技通报, 1997, 13(4): 211-214.
- Wang K, Shen Z Q, Wang R C. Study on the characteristics of rice spectral caused by phosphorus level [J]. Bulletin of Science and Technology, 1997, 13(4): 211-214. (in Chinese)