

基于光谱分析的果树叶片微量元素含量估测研究

——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】** 探讨利用光谱分析手段估测果树微量元素含量的精度与应用潜力。**【方法】** 首先对果树鲜叶的光谱反射率(R_λ)以及叶片铁(Fe)、锰(Mn)、铜(Cu)、锌(Zn)4种元素含量进行测定,并分别对各种元素含量与 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)的相关性进行了分析,找出了与每种元素含量相关性最强的光谱数据形式。最后采用逐步回归法,分别对每种元素含量及与其相关性最强的光谱变式数据进行了回归分析,得到了入选波长,并利用入选的波长 R_λ 进行了基于最小误差平方和的偏最小二乘回归建模。**【结果】** 叶片 Fe、Mn、Cu、Zn 含量与 R_λ 的相关性均较弱,但分别与四点差分的一阶微分光谱 $f'(R_\lambda)$ 及波长间隔设为 17,25 和 15 nm 的 $d^1 R_\lambda$ 的相关性最强;用入选波长 R_λ 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】** 利用光谱分析手段估测果树叶片 Fe、Mn、Cu、Zn 元素含量的精度较高,具有一定的应用潜力。

【关键词】 光谱分析;果叶叶片;微量元素

【中图分类号】 TP701 **【文献标识码】** A **【文章编号】** 1671-9387(2008)11-0143-08

Research on predicting the Fe, Mn, Cu, Zn contents in fruit trees' fresh leaves by spectral analysis

—Red Fuji apple tree as an example

XING Dong-xing^{1,2}, CHANG Qing-rui¹

(1 College of Environment and Resources Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling, Shaanxi 712100, China;
2 Department of Resources and Environment, Xianyang Normal College, Xianyang, Shaanxi 712000, China)

Abstract: **【Objective】** The research was to evaluate the possibility and application potential of the method of spectral analysis on predicting trace elements of fruit trees. **【Method】** Firstly, the spectral reflectance (R_λ) and the Fe, Mn, Cu, Zn contents of fresh leaves were measured, and the statistical correlation was analyzed 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 the spectral reflectance variant, which has the highest absolute value of the correlation coefficient with each of the element's content, was found. Subsequently, the regression analysis was done to each element content and the corresponding spectral reflectance variant of the highest correlation coefficient through the stepwise regression method, and the eigenvalue wavelengths was chosen to carry on partial least squares regression modeling based on the least error square sum. **【Result】**

* **【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
【通讯作者】 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

The results showed that the correlation between the Fe, Mn, Cu, Zn content with R_λ was rather weak and the correlation coefficient was the highest between Fe content and the first derivative of 4 points difference of spectral reflectance $f'(R_\lambda)$, or between Mn content and the first derivative of spectral reflectance with derivative gap = 17 nm d¹ R_λ , or between Cu content and the first derivative of spectral reflectance with derivative gap = 25 nm d¹ R_λ , or between Zn content and the first derivative of spectral reflectance with derivative gap = 15 nm d¹ R_λ . The result also indicated that the regression models established using the wavelengths selected when Sig(it's a probability numerical higher than F detection value) was set to 0.01 and Ramoval to 0.02 had better linear trend, and R^2 values were above 0.8. 【Conclusion】 As a whole, the method of spectral analysis has some applications potential to determine trace elements of fruit trees.

Key words: spectral analysis; fruit tree leaf; trace element

Fe、Mn、Cu、Zn 等微量元素是果树生长所必需的营养成分,其对果树的生理功能各有侧重,相互间不可替代^[1]。实时、快捷、准确地监测果树微量元素含量,并依据测评结果指导果农对果树进行及时科学、合理的施肥,对保障区域果业优质高效生产与可持续发展具有重要的实际意义。叶(片化学)分析是目前普遍采用的一种高精度诊断果树微量元素含量的传统手段。然而,这一手段由于受到高耗性、繁冗复杂性、时滞性等方面的局限,而不能够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、快捷与准确地监测已经成为可能,并且正在形成遥感领域的研究热点。

早在 1972 年,Thomas 等^[2]通过研究发现,甜椒叶片的氮素含量与 550~675 nm 波段内叶片的光谱反射率高度相关,叶片氮素实测值和预测值之间的误差小于 7%。这一研究表明,光谱分析手段有可能快速、简便并较精确地监测植物的氮素含量。此后,国内外研究人员相继利用叶片、叶簇或冠层尺度上的高光谱数据(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、桉树等植物的生化组分(如叶绿素、木质素、糖、氮、磷、钾等)含量进行了估测研究^[3-12],并取得了一定的研究成果。

截止目前,国内外利用高光谱数据对植物 Fe、Mn、Cu、Zn 等微量元素含量进行定量化估测的研究报道尚比较少。马超飞等^[13]在对马尾松、水杉、蕨、灌以及南竹叶片的的光谱反射率以及其 Fe、Mn、Cu、Zn、Mo、Co、Cr、B 微量元素含量进行测定的基础上,分析了原始光谱波形、光谱壳特征和导数特征及其与微量元素含量之间的相关性,发现 Co 的含量与植物光谱绿区(560 nm 附近)反射率存在较强的负相关,Mn、B、Mo 和 Zn 分别与中心波长为 400,

1 160;470,880,2 190,2 340;1 620 和 2 340 nm 的光谱反射峰位置有较好的相关性。甘甫平等^[14]的研究表明,落叶松、白桦冠层的光谱反射率与其 As、Pb、Cu、Mo 元素含量之间存在着一定的相关性。

综上所述,前人利用高光谱数据对植物微量元素含量进行定量化估测的研究较少,对果树微量元素含量的定量化估测研究更为鲜见。如何在果树叶片这一小尺度上,利用光谱分析手段对其 Fe、Mn、Cu、Zn 等元素含量予以精确的估测,并且其估测精度能否达到区分果树 Fe、Mn、Cu、Zn 等元素含量盈缺的精度等,这些问题尚待于进行研究,以指导果业的生产。为此,本研究以红富士苹果树为例,对其单鲜叶片的光谱反射率和叶片中的 Fe、Mn、Cu、Zn 4 种元素含量进行了测定,并对其测试结果进行了相关处理与统计分析,以期探试光谱分析手段估测果树微量元素含量的精度与应用潜力,进而为我国今后利用机载、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,土壤属于红油土,果业生产中无灌溉条件。为了获取理想的试验结果,本研究在对该镇果树种植与施肥管理等状况进行多次详细调查的基础上,最后选取 45 个红富士苹果园作为叶样采集地。这些果园的树龄为 10~12 年,均为乔砧、主杆分层型树型。在 2007-07 中旬采集叶样,在每个果园内部,选取长势正常的苹果树 10 株,在每株树冠外围,距地 1.5~1.7 m 高度处,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,在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

组^[15-16],共采集了 45 组叶样。

1.2 光谱测试

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,其光谱采样间隔约为 1.5 nm,波长范围为 325~1 075 nm,光谱分辨率为 3.5 nm。在测试时,以黑色胶板作为背景^[11,17],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,每次记录 10 个光谱,然后取其平均值。在测试过程中,每隔 10 min 对仪器进行 1 次优化与校正。

1.3 叶片 Fe、Mn、Cu、Zn 元素含量(干物质重量比)的测定

将经过光谱测试后的叶样尽快用保鲜袋封装,置冰桶中于 2 h 之内运至实验室,并对其进行标准化前处理。Fe、Mc、Cu、Zn 4 种元素含量的测定均采用 AAS 法^[1]进行,并且均设 3 次重复。

1.4 数据处理

利用 ENVI、ASD ViewSpec Pro、Excel、SPSS、DPS 软件,相继对数据进行以下处理。

1.4.1 光谱数据预处理 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的噪音较大,故截取 400~900 nm 波长用于分析^[18-19]。随后,为了进一步消除由基线漂移和背景干扰等带来的影响,对波长为 λ 的光谱反射率 R_λ 进行了如下的变换:(1)光谱倒数($1/R_\lambda$);(2)光谱倒数的对数($\lg(1/R_\lambda)$);(3)一阶微分光谱($d^1 R_\lambda$,在变换时,波长间隔分别取 3,5,7,9,11,15,17,19 和 25 nm);(4)二阶微分光谱($d^2 R_\lambda$,所取波长间隔同上);(5)四点差分的一阶微分光谱^[20]($f'(R_\lambda)$, $f'(R_\lambda)=1/6 h \times (-11R_\lambda + 18R_{\lambda-1} - 9R_{\lambda-2} + 2R_{\lambda-3})$,其中 h 为波长间隔,设为 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对数^[21]($\lg(1/BNC)$);(9)基线归一法^[23-24](Dn)。对经过预处理的光谱数据重新编码后,创建数据库并以 ASC II 格式导出,以供随后的处理与分析。

1.4.2 微量元素之间的相关性分析 对叶片 Fe、Mn、Cu、Zn 4 种元素的含量数据进行相关性分析,以确定是采用元素对分析方法,还是采用单个元素含量分析方法。

1.4.3 入选波长的确定、回归模型的建立及其检验

首先,分别对 Fe、Mn、Cu、Zn 4 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。随后采用逐步回归法,分别对每种元素含量及与其相关性最强的光谱变式数据进行回归分析,并确定入选波长。最后,利用入选波长进行了基于最小误差平方和的偏最小二乘回归(PLS)建模,并用检测样本(从叶样中抽取 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 4 个模型的估测精度进行检验。

2 结果与分析

2.1 4 种微量元素含量间及其与 R_λ 间的相关性分析

2.1.1 4 种微量元素含量间的相关性分析 通过对相关数据的处理可知,Fe、Mn、Cu、Zn 4 种元素含量之间的相关性均较低,Fe 与 Mn、Cu、Zn 间的相关系数分别为 0.14,0.33 和 0.21,Mn 与 Cu、Zn 间的相关系数分别为 -0.085,-0.12,Cu 与 Zn 间的相关系数为 0.499。因此,本研究分别用 4 种单个元素的含量进行统计与分析。

2.1.2 叶片 Fe 含量与 R_λ 及其变式数据之间的相关性分析 通过对相关数据的处理分析得知,叶片 Fe 含量与 R_λ 的相关性较弱,而与四点差分的一阶微分光谱 $f'(R_\lambda)$ 的相关性最强,与其他变式的相关性较强。由图 1 可见,在 Fe 含量与 R_λ 的相关系数中,其绝对值大于 0.45 的峰(谷)区分别出现在 436~440、515~604、609~635、692~700、745~900 nm 波段。在 Fe 含量与 $f'(R_\lambda)$ 的相关系数中,其绝对值大于或接近 0.5 的峰(谷)区分别出现在 406、525、601、696、736 nm 附近,其对应的相关系数的极值分别为 -0.498 89,-0.498 97,0.511 634,-0.529 36 和 0.901 212。

2.1.3 叶片 Mn 含量与 R_λ 及其变式数据之间的相关性分析 叶片 Mn 含量与 R_λ 的相关性较弱,而与波长间隔设为 17 nm 的 $d^1 R_\lambda$ 相关性最强,与其他变式的相关性较强。由图 2 可见,在叶片 Mn 含量与 R_λ 的相关系数中,绝对值大于 0.3 的峰(谷)区分别出现在 517~592、696~703、755~900 nm 波段,在叶片 Mn 含量与波长间隔设为 17 nm 的 $d^1 R_\lambda$ 的相关系数中,其绝对值大于或接近 0.6 的峰(谷)区分别出现在 729~765、775~780 与 638 nm 附近波段,对应的相关系数极值分别为 0.829 367,0.653 726 和 0.597 377。

2.1.4 叶片 Cu 含量与 R_λ 及其变式数据之间的相关性分析 叶片 Cu 含量与 R_λ 的相关性较弱,而与波长间隔设为 25 nm 的 d^1R_λ 的相关性最强,与其他变式的相关性较强。由图 3 可以看出,在叶片 Cu 含量与 R_λ 的相关系数中,其绝对值大于 0.5 的峰(谷)区分别出现在 511~516,597~660,680~722

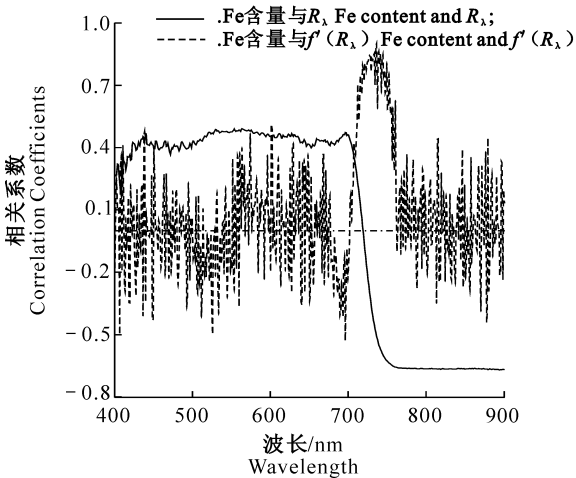


图 1 铁元素含量与光谱反射率及四点差分的一阶微分光谱间的相关系数

Fig. 1 The Correlation Coefficients between the Fe elements content with the spectral reflectance and 4 points difference of spectral reflectance

nm 波段;在叶片 Cu 含量与波长间隔设为 25 nm 的 d^1R_λ 的相关系数中,其绝对值大于 0.6 的峰(谷)区分别出现在 460,439,446,477 nm 附近的波段,对应的相关系数的极值分别为 0.834 517,0.742 219,0.715 626 和 0.651 813。

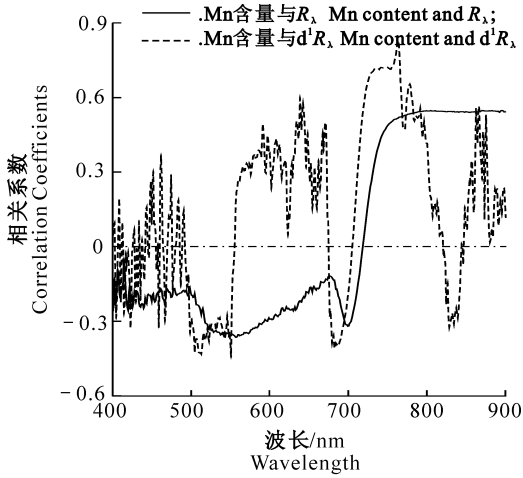


图 2 锰元素含量与光谱反射率及一阶微分光谱间的相关系数

Fig. 2 The Correlation Coefficients between the Mn elements content with the spectral reflectance and the first derivative of spectral reflectance

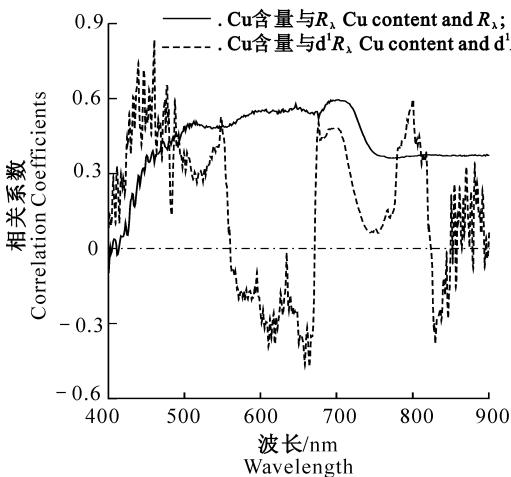


图 3 铜元素含量与光谱反射率及一阶微分光谱间的相关系数

Fig. 3 The Correlation Coefficients between the Cu elements content with the spectral reflectance and the first derivative of spectral reflectance

2.1.5 叶片 Zn 含量与 R_λ 及其变式数据之间的相关性分析 叶片 Zn 含量与 R_λ 的相关性较弱,而与波长间隔设为 15 nm 的 d^1R_λ 的相关性最强,与其他变式的相关性较强。由图 4 可知,在叶片 Zn 含量与 R_λ 的相关系数中,绝对值大于 0.3 的峰(谷)区出现

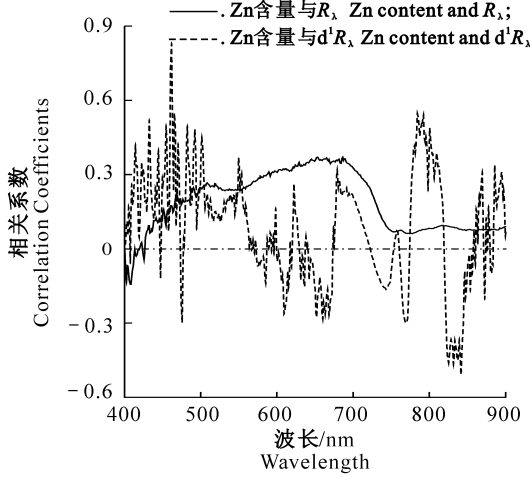


图 4 锌元素含量与光谱反射率及一阶微分光谱间的相关系数

Fig. 4 The Correlation Coefficients between the Zn elements content with the spectral reflectance and the first derivative of spectral reflectance

在 587~707 nm 波段。在叶片 Zn 含量与波长间隔设为 15 nm 的 d^1R_λ 的相关系数中,绝对值大于 0.5 的峰(谷)区分别出现在 461,784,792 nm 附近的波段,其对应的相关系数的极值分别为:0.828 766,0.546 442,0.541 263。

2.2 4 种微量元素含量与 R_λ 及其变式间估测模型的建立与检验

2.2.1 入选波长的确定与模型的建立 在不断调整 Sig 与 Removal 的设置值情况下,分别对 4 种元素含量及与其相关性最强的光谱变式数据进行了逐步回归分析,以获取估测叶片 Fe、Mn、Cu、Zn 含量的入选波长。经过多次调试,最后确定用 Sig 均设为 0.01,Removal 均设为 0.02 时的入选波长进行建模。此时,Fe 含量与 $f'(R_\lambda)$ 的回归结果为:入选波长共 2 个,分别为 736 和 737 nm;Mn 含量与波长间隔设为 17 nm 的 d^1R_λ 回归结果为:入选波长共 3 个,分别为 763,862 和 859 nm;Cu 含量与波长间隔设为 25 nm 的 d^1R_λ 的回归结果为:入选波长共 5

个,分别为 460,473,634,649 和 482 nm;Zn 含量与波长间隔设为 15 nm 的 d^1R_λ 的回归结果为:入选波长共 4 个,分别为 461,463,473 和 841 nm。

在确定了入选波长后,用其建立基于最小误差平方和的偏最小二乘回归(PLS)模型,其结果如下:

(1)Fe 含量与入选波长 R_λ 的回归。

当潜变量个数 K 值设为 2 时,误差平方和最小,为 4.103 2,此时 Fe 含量与入选波长 R_λ 的回归模型为:

$$\text{Fe}(\text{mg}/\text{kg})=505.157\ 910+749\ 56.844\ 545\ R_{736}-232\ 26.906\ 891R_{737},R^2=0.858\ 5。$$

用该模型模拟的 Fe 含量值(y)与校正样本的实测值(x)间的关系如图 5 所示。

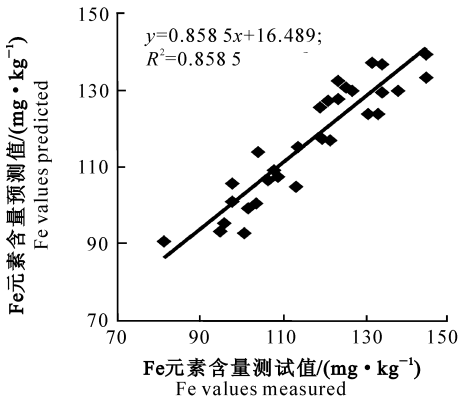


图 5 叶片 Fe 元素含量的测试值与 PLS 估测模型预测值间的关系

Fig. 5 Correlativity of Fe content measured and predicted by PLS

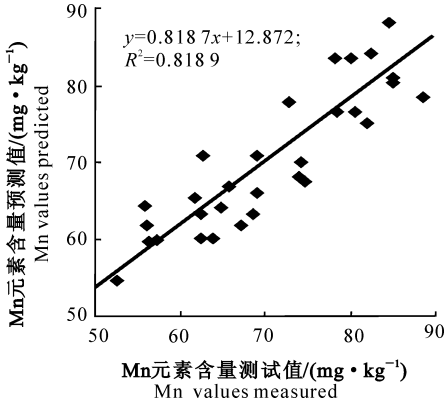


图 6 叶片 Mn 元素含量的测试值与 PLS 估测模型预测值间的关系

Fig. 6 Correlativity of Mn content measured and predicted by PLS

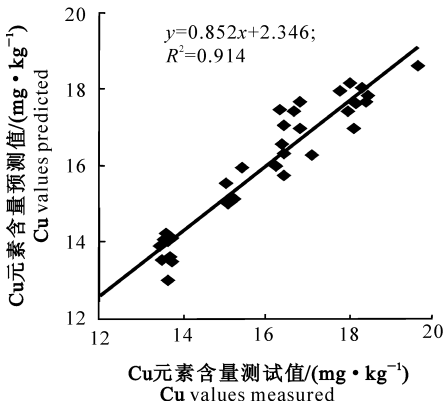


图 7 叶片 Cu 元素含量的测试值与 PLS 估测模型预测值间的关系

Fig. 7 Correlativity of Cu content measured and predicted by PLS

(2)Mn 含量与入选波长 R_λ 的回归。

当潜变量个数 K 值设为 3 时,误差平方和最小,为

5.795 8,此时 Mn 含量与入选波长 R_λ 的回归模型为:

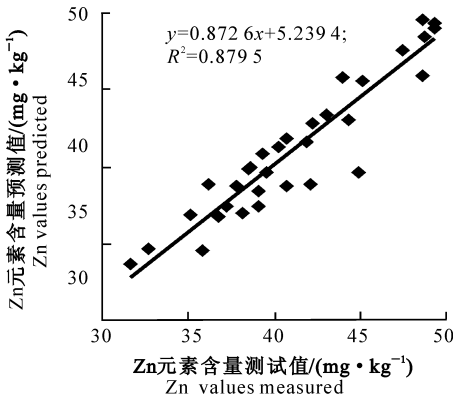


图 8 叶片 Zn 元素含量的测试值与 PLS 估测模型预测值间的关系

Fig. 8 Correlativity of Zn content measured and predicted by PLS

$Mn(mg/kg) = -23.197\ 990 + 28.068\ 717R_{763} + 43.865\ 366R_{862} - 32.483\ 971R_{859}$, $R^2 = 0.818\ 9$ 。

用该模型模拟的 Mn 值(y)与校正样本的实测值(x)之间的关系见图 6。

(3)Cu 含量与入选波长 R_λ 的回归。

当潜变量个数 K 值设为 5 时,误差平方和最小,为 2.880 3,此时 Cu 含量与入选波长 R_λ 的回归模型为:

$Cu(mg/kg) = 14.461\ 358 + 6.117\ 370R_{460} + 3.524\ 257R_{473} + 6.201\ 828R_{634} - 4.520\ 259R_{649} - 2.228\ 261R_{482}$, $R^2 = 0.914\ 1$ 。

用该模型模拟的 Cu 值(y)与校正样本的实测

值(x)间的关系见图 7。

(4)Zn 含量与入选波长 R_λ 的回归。

当潜变量个数 K 值设为 4 时,误差平方和最小,为 3.737 0,此时 Zn 含量与入选波长 R_λ 的回归模型为:

$Zn(mg/kg) = 40.668\ 584 + 9.735\ 786R_{461} + 5.840\ 608R_{463} - 5.684\ 794R_{473} - 3.004\ 235R_{841}$, $R^2 = 0.879\ 5$ 。

用该模型模拟的 Zn 值(y)与校正样本的实测值(x)间的关系见图 8。

2.2.2 模型的检验 对 2.2.1 中的 4 个估测模型进行检验,其结果见表 1。

表 1 检测叶样中 Fe、Mn、Cu、Zn 元素含量的测试值与模拟值之间的统计结果
Table 1 Statistical values of Fe, Mn, Cu, Zn element contents in the leaves measured and simulated by the model for the testing leaf samples

项目 Item	Fe	Mn	Cu	Zn
实测值总平均 Mean value of measured	108.955	74.186 44	14.837 29	37.749 81
模拟值总平均 Mean value of predicted	110.214 7	74.993 05	15.366 16	38.688 33
绝对值最大的误差 The largest absolute error	19.382 2	16.200 1	2.654 16	7.611 56
绝对值最小的误差 The smallest absolute error	0.470 09	1.969 634	0.271 061	2.572 45
实测与模拟总平均之差 Differential value of Means of measured and predicted	-1.259 77	-0.806 61	-0.528 87	-0.938 52
误差绝对值的总平均值 Mean of the absolute error	10.151 99	8.916 61	1.366 139	5.250 037

由表 1 可见,对估测 Fe 含量模型的检验结果表明,检测样本实测值与模拟值之间的误差绝对值的总平均值为 10.151 99,此值不仅小于陕西省红富士苹果叶片 Fe 含量分级标准值域^[15](缺乏:<100 mg/kg;低值:100~119 mg/kg;正常值:120~150 mg/kg;高值:151~180 mg/kg;过高:>180 mg/kg)中的级间中值差(即相邻两级别中值之差,下同)25.5 或 30.5,而且也小于级内中值与边值差(即同级别内中值与边界值之差,下同)14.5 或 15,但大于 9.5 这一个级内中值与边值差以及 5 个级别之间的分断值(即相邻两级别断开值,下同)1。

对估测 Mn 含量模型的检验结果表明,检测样本实测值与模拟值之间误差绝对值的总平均值为 8.916 61,此值不仅小于陕西省红富士苹果叶片 Mn 含量分级标准值域^[15](缺乏:<40 mg/kg;低值:40~51 mg/kg;正常值 mg/kg:52~80 mg/kg;高值:81~100 mg/kg;过高:>100 mg/kg)中的级间中值差 20.5 或 24.5,而且也小于级内中值与边值差 14 或 9.5,但大于 5.5 这一个级内中值与边值差以及 5 个级别之间的分断值 1。

对估测 Cu 含量模型的检验结果表明,检测样本实测值与模拟值之间误差绝对值的总平均值为 1.366 139,此值不仅小于陕西省红富士苹果叶片 Cu 含量分级标准值域^[15](缺乏:<10 mg/kg;低值:10~19 mg/kg;正常值:20~50 mg/kg;高值:51~100 mg/kg;过高:>100 mg/kg)中的级间中值差 20 或 40.5,而且也小于级内中值与边值差 4,15 或 24.5,但大于 5 个级别之间的分断值 1。

对估测 Zn 含量模型的检验结果显示,检测样本的实测值与模拟值间误差绝对值的总平均值为 5.250 037,此值不仅小于陕西省红富士苹果叶片 Zn 含量分级标准值域^[15](缺乏:<15 mg/kg;低值:15~23 mg/kg;正常值:24~45 mg/kg;高值:46~75 mg/kg;过高:>75 mg/kg)中的级间中值差 15.5 或 26,而且也小于级内中值与边值差 10.5 或 14.5,但大于 4 这一个级内中值与边值差以及 5 个级别之间的分断值 1。

由以上分析可见,本研究建立的 4 个模型在估测果树叶片 Fe、Mn、Cu、Zn 含量时具有一定的潜力,可以大致区分果树叶片 Fe、Mn、Cu、Zn 含量的

高、低、正常等级别^[13]归属,但其估测精度仍有待于进一步的研究与提高。

3 讨 论

从本研究结果可以发现,本研究得到的能够反映果树叶片 Fe、Mn、Cu、Zn 元素含量的敏感波长,与对应元素的吸收峰区间存在偏差^[24],而且与前人得出的结果略有不同^[13]。造成这些差异的原因是多方面的,例如逐步回归本身的局限性、元素之间的相关性、测量仪器本身的性能及测试环境条件、测试对象与尺度(植物种类有别,则冠层或叶片测试尺度有别)、测试方式等等。此外,本研究得到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,这与前人的研究结果一致^[11,13]。但与之有别的是,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一阶微分光谱数据形式(即以不同波长间隔进行的一阶微分变换的数据形式)。另外,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,建立并有效提高了估测模型的精度。

需要说明的是,由于受仪器设备条件所限,本研究未能利用 900~2 500 nm 波段区间的光谱反射率,对元素含量进行相关分析与估测建模。

4 结 论

1) 叶片 Fe、Mn、Cu、Zn 含量都与 R_λ 的相关性较弱,而分别与四点差分的一阶微分光谱 $f'(R_\lambda)$ 及波长间隔设为 17,25 和 15 nm 的 d^1R_λ 的相关性最强;

2) 用 Sig 均设为 0.01、Removal 均设为 0.02 时的入选波长所建立的估测模型,均具有较好的线性趋势, R^2 都在 0.8 以上;

3) 利用检测样本对所建模型进行了检测,结果表明,建立的对应模型在估测果树叶片 Fe、Mn、Cu、Zn 含量时具有一定的潜力,可以大致区分果树叶片 Fe、Mn、Cu、Zn 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的研究与提高。

[参考文献]

[1] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 275.
Bao S D. Agricultural chemical analysis of soil [M]. Beijing:

China Agriculture Publishing House, 2000: 275 (in Chinese)

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

[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. 水稻遥感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(Suppl): 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): 40-46.

[6] Stone M L, Solie J B, Raun W R, et al. Use of spectral radiance for correctiong 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 Phytoecologica Sinica, 2004, 28(2): 172-177. (in Chinese)

[8] Munden R, Curran P J, 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] Broge 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, 26(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, 26(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): 125-128. (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] 马超飞,马建文,韩秀珍. 微量元素在植物光谱中的响应机理研究 [J]. 遥感学报,2001,5(5):334-339.

Ma C F,Ma J W,Han X Z. Mechanism analysis of leaf spectrum response resulted from trace elements [J]. Journal of Remotr Sensing,2001,5(5):334-339. (in Chinese)

[14] 甘甫平,刘圣伟,周 强. 德兴铜矿矿山污染高光谱遥感直接识别研究 [J]. 地球科学-中国地质大学学报,2004,29(1):119-126.

Gan F P,Liu S W,Zhou Q. Identification of mining pollution using hyperion hata at dexing copper mine in Jiangxi province [J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences,2004,29(1):119-126. (in Chinese)

[15] 安贵阳. 苹果叶营养元素含量的标准值及其影响因素研究 [D]. 陕西 杨凌:西北农林科技大学,2004.

An G Y. Apple leaf nutrient content of the standard and its impact factors [D]. Yangling,Shaanxi:Northwest Agriculture and Forestry University,2004. (in Chinese)

[16] 李港丽,苏润宇,沈 隽. 几种落叶果树叶内矿质元素含量标准值的研究 [J]. 园艺学报,1987,14(2):81-89.

Li G L,Su R Y,Shen Y. Research on some deciduous fruit trees in the standard value of mineral elements [J]. Acta Horticulturae Sinica,1987,14(2):81-89. (in Chinese)

[17] Grossman Y L,Ustin S L. Critique of stepwise multiple linear regression for the extraction of leaf biochemistry information From leaf reflectance data [J]. Remote Sensing Environ, 1996,56:182-193.

[18] 何 勇,李晓丽. 基于主成分分析和神经网络的近红外光谱苹果品种鉴别方法研究 [J]. 光谱学与光谱分析,2006,26(5):850-853.

He Y,Li X L. Discrimination of varieties of apple using uear infrared spectra based on principal component analysis and artif icial neural network model [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis,2006,26(5):850-853. (in Chinese)

[19] Malthus T J,Maderia A C. High resolution spectrora-diometry:spectral reflectance of field bean leaves infected by botrytis fabae [J]. Remote Sens Environ,1993,45:107-116.

[20] 李民赞. 光谱分析技术及其应用 [M]. 北京:科学出版社,2006:123.

Li M Z. Spectroscopy and Application [M]. Beijing: Science Press,2006:123. (in Chinese)

[21] Dury S J,Wallis I R,Foley W J. Estimating foliage nitrogen concentration from HYMAP data using continuum removal analysis [J]. Remote Sensing of Environment, 1993, 1-2: 18-29.

[22] Kokaly R F,Clark R N. Spectroscopic determination of leaf bio-chemistry using band-depth analysis of absorption features and stepwise multiple linear regression [J]. Remote Sensing of Environment,1999,67:267-287.

[23] Kokaly R F. Investigating a physical basis for spectroscopic estimates of leaf nitrogen concentration [J]. Remote Sensing of Environment,2001(75):153-161.

[24] 童庆禧,张 兵,郑兰芬. 高光谱遥感的多学科应用 [M]. 北京:电子工业出版社,2006:154.

Tong Q X,Zhang B,Zheng L F. Hyperspectral remote sensing and it's multidisciplinary applications [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry,2006:154. (in chinese)

(上接第 142 页)

[53] 丁效华. 作物数量性状基因图位克隆研究进展 [J]. 植物遗传资源学报, 2005,6(4):464-468.

Ding X H. Advances in map-based cloning for crop quantitative trait loci [J]. Journal of Plant Genetic Resources,2005, 6(4):464-468. (in Chinese)

[54] 熬 雁,朱明星,徐辰武. 贝叶斯统计在 QTL 作图中的应用研究进展 [J]. 遗传,2007,29(6):668-674.

Ao Y,Zhu M X,Xu C W,et al. Advances in researches on application of bayesian methods to QTL mapping [J]. Hereditas,2007,29(6):668-674. (in Chinese)

[55] 杨小红,严建兵,郑艳萍,等. 植物数量性状关联分析研究进展 [J]. 作物学报,2007,33(4):523-530.

Yang X H,Yan J B,Zheng Y P,et al. Reviews of association analysis for quantitative traits in plants [J]. Acta Agronomica Sinica,2007,33(4):523-530. (in Chinese)

[56] 张 磊,张宝石. 植物数量性状基因的定位与克隆 [J]. 植物学通报,2007,24(4):553-560.

Zhang L,Zhang B S. Mapping and cloning of quantitative trait genes in plants [J]. Chinese Bulletin of Botany,2007,24(4): 553-560. (in Chinese)