

基于高光谱‘叶尔羌’扁桃氮磷钾含量 估测模型研究

庄红梅, 卢春生, 龚 鹏, 谢 辉, 徐叶挺, 樊丁宇, 张 雯

(1. 新疆农业科学院 园艺作物研究所, 新疆 乌鲁木齐 830091;

2. 农业部新疆地区果树科学观测试验站, 新疆 叶城 844900)

摘 要: 通过分析果实不同生长发育阶段叶片光谱反射率与氮、磷、钾含量的相关性, 探寻叶尔羌扁桃叶片 N、P、K 含量估算的光谱模型, 旨在为莎车‘叶尔羌’扁桃简便快捷的非破坏性营养诊断提供高效、适时的方法。基于‘3414’肥料效应实验, 利用 Unispec-SC 光谱仪测定‘叶尔羌’扁桃在不同 N、P、K 施肥水平下果实关键发育期的叶片光谱反射率, 实验室测定叶片 N、P、K 含量, 采用相关分析与回归分析方法进行统计分析。结果表明, ‘叶尔羌’扁桃果实坐果期、膨大期、硬核期、成熟期叶片光谱反射率或其衍生变量与氮、磷、钾含量存在一定的关系, 以相关性最强的两个反射率之和为自变量, N、P、K 含量为因变量, 拟合的 Cubics Ration、二次曲线方程 R^2 值较高。最终确定‘叶尔羌’扁桃坐果期叶片氮营养诊断最佳模型为: $Y = -2051.4471 - 7099.5965X - 6048.4479X^2$, 其中 X 为 $\lg R_{823} + \lg R_{880}$, 果实膨大期的最佳模型为: $Y = (21.8812 + 39.8456X + 24.3772X^2 + 5.1255X^3)/(0.005188X^3)$, 其中 X 为 $\lg R_{382} + \lg R_{383}$; 坐果期的 P 营养诊断最佳模型为 $Y = (-0.000003 + 0.000803X - 0.070160X^2 + 2.8169X^3)/(0.407026X^3)$, X 为 $\lg(R_{789} + R_{790})$; 坐果期的 K 营养诊断最佳模型为 $Y = (-7.7960 + 22.5853X - 21.8023X^2 + 7.0133X^3)/0.000032X^3$, 其中 X 为 $R_{830} + R_{850}$, Y 均为估测值含量。由此得出, 可根据果实不同生长发育阶段叶片 N、P、K 素光谱敏感波段、光谱反射率或其衍生变量通过一定的函数关系能够建立 N、P、K 含量监测模型。

关键词: ‘叶尔羌’扁桃; 叶片; N 含量; P 含量; K 含量; 光谱分析; 相关分析; 回归分析

中图分类号: S662.9; S143 **文献标志码:** A

Prediction on nitrogen, phosphorus, potassium contents in almond leaves based on Yarkent Models by hyper spectrum

ZHUANG Hong-mei, LU Chun-sheng, GONG Peng, XIE Hui, XU Ye-ting, FAN Ding-yu, ZHANG Wen

(1. Institute of Horticultural Crops - Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi, Xinjiang 830091, China;

2. Scientific Observing and Experimental Station of Pomology (Xinjiang), Ministry of Agriculture, Yecheng, Xinjiang 844900, China)

Abstract: To establish a model to estimate foliar nitrogen, phosphorus and potassium contents in leaves, analysis in correlation between foliar nitrogen (N), phosphorus (P), and potassium (K) contents, providing effective, timely and nondestructive nutrition diagnosis for Yarkent almond. Based on effect by the experiment of using 3414 fertilizer, Unispec-SC spectrometer was employed to determine leaf spectral reflectance of Yarkent almond under different N, P and K fertilizer levels at fruiting, swelling, hardcoring and maturing stages in Shache. In addition, correlation analysis and regression analysis methods were carried out for statistical analysis. The results showed that the spectral sensitive bands of foliar N, P and K elements are different at fruiting, swelling, hardcoring and maturing stages. There is a certain relationship between leaf N, P and K contents and the spectral reflectance or its derivative variables. The R^2 value of the fitting Cubics Ration and quadratic curve equation was high when the two spectral reflectances were used as independent variables, and the N, P, and K contents as the dependent variables. The best model for Yarkent almond leaf nitrogen nutrition diagnosis at the fruiting stage is $Y = -2051.4471 - 7099.5965X - 6048.4479X^2$, $X = \lg R_{823} + \lg R_{880}$; The best model

收稿日期: 2015-12-23

基金项目: 新疆维吾尔自治区科技重大专项(201130102-2); 新疆维吾尔自治区科技计划(201111121); 公益性行业(农业)科研专项(201003043)

作者简介: 庄红梅(1987—), 江苏连云港人, 女, 硕士, 助理研究员, 研究方向为植物生理。E-mail: zhuanghongmei86@163.com。

通信作者: 卢春生, 男, 研究员, 主要从事果树栽培与生理研究。E-mail: luchshxj@163.com。

for Yarkent almond leaf nitrogen nutrition diagnosis at the swelling stage is $Y = (21.8812 + 39.8456X + 24.3772X^2 + 5.1255X^3)/(0.005188X^3)$, $X = \lg R_{382} + \lg R_{383}$; The best model for Yarkent almond leaf phosphorus nutrition diagnosis at the fruiting stage is $Y = (-0.000003 + 0.000803X - 0.070160X^2 + 2.8169X^3)/(0.407026X^3)$, $X = \lg(R_{789} + R_{790})$; The best model for Yarkent almond leaf potassium nutrition diagnosis at the fruiting stage is $Y = (-7.7960 + 22.5853X - 21.8023X^2 + 7.0133X^3)/0.000032X^3$, $X = R_{830} + R_{850}$. In conclusion, the spectral sensitive bands of N, P and K elements are different at these four phenological stages for Yarkent almond fruit development. The models for estimating foliar N, K and P content of Yarkent almond can be established according to the spectral sensitivity, spectral reflectance or its derivative variables.

Keywords: Yarkent almond; leaf; nitrogen content; phosphorus content; potassium content; spectral analysis; correlation analysis; regression analysis

作物缺乏生长发育所需的大量营养元素氮、磷、钾, 不仅会严重影响作物生长速度和产量, 而且还能引起植株体内相关生理、生化指标的变化^[1]。探寻一种实时、快速、无损、精准的植物营养诊断方法已成为各国农业学者研究的热点之一^[2-4]。光谱分析技术具有速度快、效率高、重现性好、测试方便、成本低的特点, 成为探测和获取作物营养状况和长势信息的有效手段^[5]。在田间栽培管理中, 缺乏对南疆扁桃 (*Amygdalus communis* L.) 树体营养盈亏状况的科学施肥, 经验施肥和盲目施肥现象较为突出。因此, 研发 N、P、K 含量光谱诊断估算模型可为叶尔羌扁桃树体营养元素含量的实时、快速检测提供技术手段, 对科学施肥具有重要意义。前人利用光谱分析技术在作物营养素的含量监测方面做了大量的研究。其中, 利用光谱反射率来估测作物 N 元素营养状况的研究多于估测 P、K 元素营养状况的研究。光谱分析诊断技术已经应用在玉米^[6-10]、小麦^[11-12]、水稻^[13-14]、番茄^[15-16]、棉花^[17]、黑麦草^[18]、紫叶稠李^[19] N 营养的实时检测与营养诊断, 有研究发现, 窄波段绿光、红边比值指数 SR (R_{780} , R_{580}) 和 SR (R_{780} , R_{704}) 可用于冠层全 N 含量的监测^[20], 560 nm、650 nm 和 720 nm 作为特征波长及 940 nm 作为参比波长适用于植物营养快速无损诊断, $(T_{940} - T_{560})/(T_{940} + T_{560})$ 、 $\log(T_{940}/T_{560})$ 和 $\log(T_{940}/T_{650})$ 与植物 N 营养水平的相关性较好^[21]。Thomas 等^[22]测定甜椒叶片的反射率发现, N 元素营养水平对甜椒叶片在 550 nm 和 670 nm 波段反射率的影响大, 这与胡珍珠等^[23]研究轮台白杏叶片光谱反射率在 550 nm 处差异显著的结果一致。Osborne 等^[24]发现玉米叶片内 N 含量的预测应在红光和绿光波段, 具体波段随生育期不变。Al-Abbas 等发现不同营养 N、P、K 胁迫下不同位置叶片的光谱特性, 其营养胁迫对 530 nm 波段处作物叶片光谱反射率

有显著性影响, Daughtry 等提出可以利用作物叶片反射光谱率进行叶片叶绿素含量评价^[25-28]。杨慧等^[31]通过基于临界氮浓度构建的氮营养指数、氮吸收模型对番茄的适宜施氮量诊断结果一致。这些研究表明, 光谱反射率可以间接反映作物 N、P、K 元素营养状况。叶尔羌扁桃果实不同生育期叶片光谱反射率与 N、P、K 的相关性及叶片氮、磷、钾的光谱估算模型尚待研究, 本文切入点以果实不同生育期叶片光谱反射率对 N、P、K 的敏感性分析及光谱估算模型的建立为切入点。采用“3414”肥料效应田间试验, 通过分析不同氮、磷、钾施肥水平下‘叶尔羌’扁桃果实发育期叶片光谱反射率与叶片 N、P、K 含量的相关性, 并建立具有普适性的估算叶尔羌扁桃果实不同发育阶段叶片 N、P、K 营养元素含量的光谱估算模型, 旨在为‘叶尔羌’扁桃快速、精准、非破坏性营养诊断技术提供理论依据。

1 材料与方法

试验地点位于新疆喀什地区莎车县阿热勒乡 14 村的扁桃园内 (N38°21'37.1", E77°17'11.5")。土壤质地为沙壤土, 其理化性状为 pH 8.4、有机质 11.1 g·kg⁻¹、碱解氮 50 mg·kg⁻¹、有效磷 11.9 mg·kg⁻¹、速效钾 102 mg·kg⁻¹ (数据来自莎车县农技推广中心 2008 年测得数据)。试验地属暖温带大陆性干旱气候, 四季分明, 气候干燥, 日照长, 蒸发量大, 昼夜温差大。年日照时数 3 056.7 h, 是中国日照较长的地区之一^[29]。

1.1 试验设计

试验设计见表 1。

1.2 材料

于 2014 年 5—8 月, 以新疆喀什地区莎车县阿热勒乡 14 村的扁桃园内的‘叶尔羌’扁桃叶片为材料。

表 1 ‘叶尔羌’扁桃田间施肥方案

Table 1 Field experiment scheme of fertilize for Yarkent almond

| 序号 No. | 处理 Treatment | 试验因子编码 Coding of experimental factor | | | 每株养分用量/(kg·株 ⁻¹) Each nutrient consumption /(kg·plant ⁻¹) | | | 施肥量(纯量 kg) Fertilizing amount per tree (pure amount, kg) | | |
|-----------|--|--|-------------------------------|------------------|---|-------------------------------|------------------|--|---|---|
| | | N | P ₂ O ₅ | K ₂ O | N | P ₂ O ₅ | K ₂ O | 尿素实际量 Actual amount of urea | 重过磷酸钙实际量 Actual amount of heavy calcium superphosphate | 硫酸钾实际量 Actual amount potassium sulfate |
| 1 | N ₀ P ₀ K ₀ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.00 |
| 2 | N ₀ P ₂ K ₂ | 0 | 2 | 2 | 0 | 0.4 | 0.25 | 0 | 0.870 | 0.50 |
| 3 | N ₁ P ₂ K ₂ | 1 | 2 | 2 | 0.25 | 0.4 | 0.25 | 0.543 | 0.870 | 0.50 |
| 4 | N ₂ P ₀ K ₂ | 2 | 0 | 2 | 0.5 | 0 | 0.25 | 1.087 | 0 | 0.50 |
| 5 | N ₂ P ₁ K ₂ | 2 | 1 | 2 | 0.5 | 0.2 | 0.25 | 1.087 | 0.435 | 0.50 |
| 6 | N ₂ P ₂ K ₂ | 2 | 2 | 2 | 0.5 | 0.4 | 0.25 | 1.087 | 0.870 | 0.50 |
| 7 | N ₂ P ₃ K ₂ | 2 | 3 | 2 | 0.5 | 0.6 | 0.25 | 1.087 | 1.304 | 0.50 |
| 8 | N ₂ P ₂ K ₀ | 2 | 2 | 0 | 0.5 | 0.4 | 0 | 1.087 | 0.870 | 0.00 |
| 9 | N ₂ P ₂ K ₁ | 2 | 2 | 1 | 0.5 | 0.4 | 0.125 | 1.087 | 0.870 | 0.25 |
| 10 | N ₂ P ₂ K ₃ | 2 | 2 | 3 | 0.5 | 0.4 | 0.375 | 1.087 | 0.870 | 0.75 |
| 11 | N ₃ P ₂ K ₂ | 3 | 2 | 2 | 0.75 | 0.4 | 0.25 | 1.630 | 0.870 | 0.50 |
| 12 | N ₁ P ₁ K ₂ | 1 | 1 | 2 | 0.25 | 0.2 | 0.25 | 0.543 | 0.435 | 0.50 |
| 13 | N ₁ P ₂ K ₁ | 1 | 2 | 1 | 0.25 | 0.4 | 0.125 | 0.543 | 0.870 | 0.25 |
| 14 | N ₂ P ₁ K ₁ | 2 | 1 | 1 | 0.50 | 0.2 | 0.125 | 1.087 | 0.435 | 0.25 |

1.3 数据采集

光谱数据用美国 UniSpec - SC(单通道)便携式光谱分析仪进行采集。该光谱分析仪自带光源,可在可见光/近红外 310~1 130 nm 波长范围内进行连续测量,光谱分辨率在 $\lambda/100$,扫描波长 3.3 nm。在扁桃‘叶尔羌’的 4 个生育期,即:坐果期(5 月 10 日)、果实膨大期(6 月 6 日)、硬核期(7 月 15 日)、果实成熟期(8 月 6 日)。每个肥料处理选取树体 5 株,每株树体大小一致。在树冠中部东、西、南、北方向随机选取生长健康的叶片,每株选取叶 12 片。每次数据采集前对光谱仪进行标准校正,活体健康叶片 3 次重复测定。在进行叶片光谱测定时,选取叶片的中上部(避免探头直接对着叶脉)进行光谱测定。为保证数据可比性,测定条件尽可能一致(选择晴朗无风或风力不大天气,北京时间为 10:30—13:00 太阳高度角变化量小的时间段进行)。测定可见光波段的叶片光谱反射率^[30],用于‘叶尔羌’扁桃果实不同生育期叶片光谱反射率与 N、P、K 含量的相关性分析。

1.4 叶片采集与叶片 N、P、K 含量测定

扁桃四个果实关键发育期,采集扁桃新梢中部叶片,不同肥料处理各取 5 株果树、每株果树取 2 片叶,共 10 叶片。取叶片(带叶柄)带回实验室内,于 105℃ 恒温杀青 30 min 后 70℃ 烘至恒重,用不锈钢

料理机粉碎后装入自封袋备用。

叶片全氮的测定,先用 H₂SO₄ - H₂O₂ 消煮,用开氏法测定;叶片全磷的测定,先用 H₂SO₄ - H₂O₂ 消煮,然后用钒钼黄法在紫外可见分光光度计(UV - 1800)450 nm 处比色测定;叶片全钾的测定,先用 H₂SO₄ - H₂O₂ 消煮,然后用原子吸收分光光度计(PE - Analyst100)测定。

1.5 数据分析

本试验氮、磷、钾元素含量与光谱反射率的相关性分析与作图采用 Origin9.0 统计软件完成,模型拟合采用 DPS v9.5 统计软件完成。

2 结果与分析

2.1 ‘叶尔羌’扁桃叶片 N、P、K 含量与不同波段光谱反射率的相关性

2.1.1 叶片 N 含量与不同波段光谱反射率的相关性 果实坐果期,‘叶尔羌’扁桃叶片 N 含量与其光谱反射率在可见光波段 310~750 nm 呈正相关关系,在 682~703 nm(红光)波段相关性较强;在 751~1 082 nm 波段呈负相关关系,在 750~778 nm 波段范围内,相关性最弱;在 815~894 nm 波段,负相关系数达到 0.71,相关程度高于可见光波段(682~703 nm);1 083~1 130 nm 波段呈正相关关系,相关性较弱。因此,815~894 nm 波段可作为‘叶尔羌’扁桃果

实坐果期叶片 N 含量的指示波段。

果实膨大期,‘叶尔羌’扁桃叶片 N 含量与其光谱反射率在可见光波段 310~639 nm 波段呈负相关性,在 375~398 nm 波段相关性较强,在 383 nm 左右相关系数达到最大 0.8;在 640~687 nm 波段呈正相关性,相关性极小,均在 0.05 以下;688~848 nm 波段呈负相关性,相关性较弱,均在 0.28 以下;849~1 069 nm 波段呈正相关性,相关性较弱,均在 0.15 以下;1 070~1 130 nm 波段呈负相关性。因此,375~398 nm 波段可作为‘叶尔羌’扁桃果实膨大期叶片 N 含量的指示波段。

果实硬核期,‘叶尔羌’扁桃叶片 N 含量与其光谱反射率在可见光波段 310~715 nm 波段呈正相关性,在 608~616 nm 波段,相关系数达到最高值 0.5。

在 716~1 124 nm 波段呈负相关性,负相关系数最高值在 1 026~1 059 nm 波段出现,为 0.3,相关程度低于可见光 608~616 nm 波段;在 1 125~1 130 nm 波段呈正相关性,相关系数均在 0.1 以下;因此,608~616 nm 波段可作为‘叶尔羌’扁桃果实硬核期叶片 N 含量的指示波段。

果实成熟期,‘叶尔羌’扁桃叶片 N 含量与其光谱反射率在 310~1 129 nm 波段,呈负相关性,负相关系数最高值出现在 429~437 nm 波段,为 0.47;在 1 130 nm 波段出现唯一的正相关性,相关系数为 0.39。相比较 429~437 nm 波段正相关性较强,因此,429~437 nm 波段可作为‘叶尔羌’扁桃果实成熟期叶片 N 含量的指示波段,见图 1。

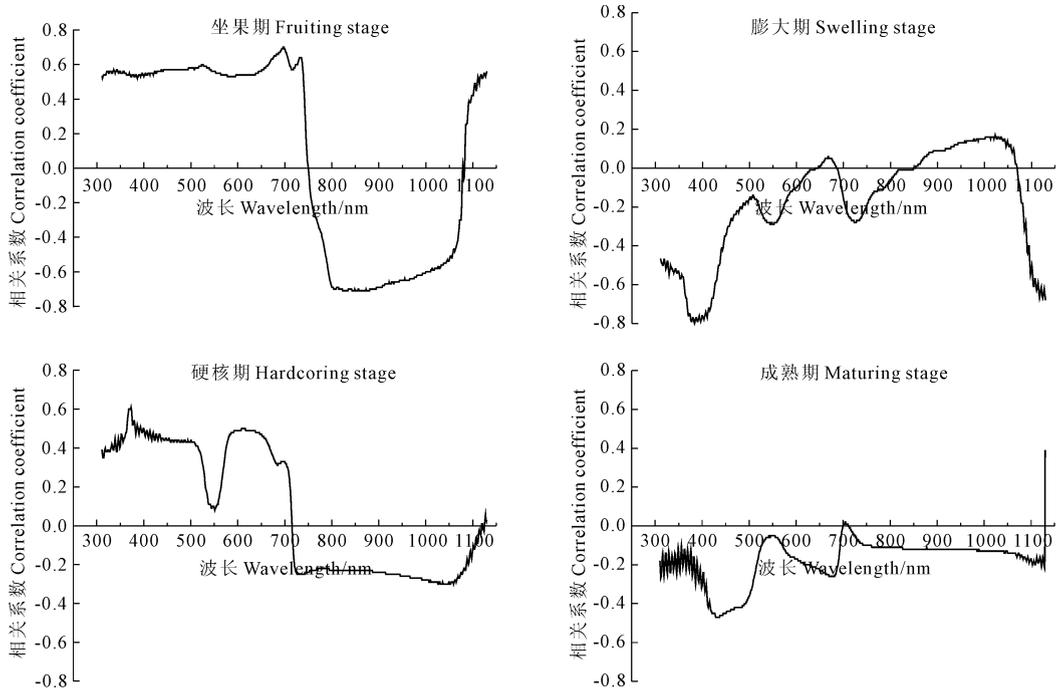


图 1 ‘叶尔羌’扁桃果实不同生长发育阶段叶片 N 含量与光谱反射率的相关系数

Fig. 1 Correlation coefficients between foliar N content and spectral reflectance of Yarkent almond at various phenological stages during fruit development

2.1.2 叶片 P 含量与不同波段光谱反射率的相关性 果实坐果期,‘叶尔羌’扁桃叶片 P 含量与其光谱反射率在可见光波段 310~740 nm 波段呈正相关性,在 712~727 nm 波段相关系数较高,达到 0.67;1 083~1 130 nm 波段呈正相关性,相关系数均较低,在 0.39 以下;在 741~1 082 nm 波段呈负相关性,在 766~802 nm 波段相关系数较高,在 790 nm 波段左右相关系数最高达到 0.76,因此 766~802 nm 波段可作为‘叶尔羌’扁桃果实坐果期叶片 P 含量的指示波段。

果实膨大期,‘叶尔羌’扁桃叶片 P 含量与其光谱反射率在可见光波段 310~726 nm 波段呈正相关性,在 315 nm 附近相关系数达到最高,为 0.48;在 727~1 115 nm 波段呈负相关性,在 1 023~1 063 nm 波段,负相关系数达到最大值,为 0.6;在 1 122~1 130 nm 波段呈正相关性,相关系数值逐渐升高,最高值仅为 0.16。因此 1 023~1 063 nm 波段可作为‘叶尔羌’扁桃果实膨大叶片 P 含量的指示波段。

果实硬核期,‘叶尔羌’扁桃叶片 P 含量与其光谱反射率在可见光波段 310~367 nm 呈现负相关

性,负相关性较弱,均在 0.3 以下;368 ~ 720 nm 处呈现正相关性,在 708 ~ 713 nm 处正相关系数达到最高值,为 0.63;在 721 ~ 1 130 nm 波段呈负相关性,相关程度较弱;758 ~ 881 nm 波段,负相关系数达到最大值,为 0.45;因此 708 ~ 713 nm 波段可作为‘叶尔羌’扁桃果实硬核期叶片 P 含量的指示波段。

果实成熟期,‘叶尔羌’扁桃叶片 P 含量与其光谱反射率在可见光波段 310 ~ 383 nm 处,呈负相关性,相关性较弱,相关系数均在 0.23 以下;在 384 ~

591 nm 波段呈现出较弱正相关性,在 536 ~ 543 nm 处,相关系数达到最高值,为 0.42;在 592 ~ 692 nm 波段,呈负相关性,相关性较弱;在 667 ~ 677 nm 处,相关系数达到最高值,为 0.42;在 693 ~ 1 129 nm 波段,呈正相关性,相关系数在 744 ~ 896 nm 波段,达到最高值,为 0.58;在 1 130 nm 处,呈现显著的负相关性,相关系数为 0.96;因此,1 130 nm 处可作为‘叶尔羌’扁桃果实成熟期叶片 P 含量的指示波段(图 2)。

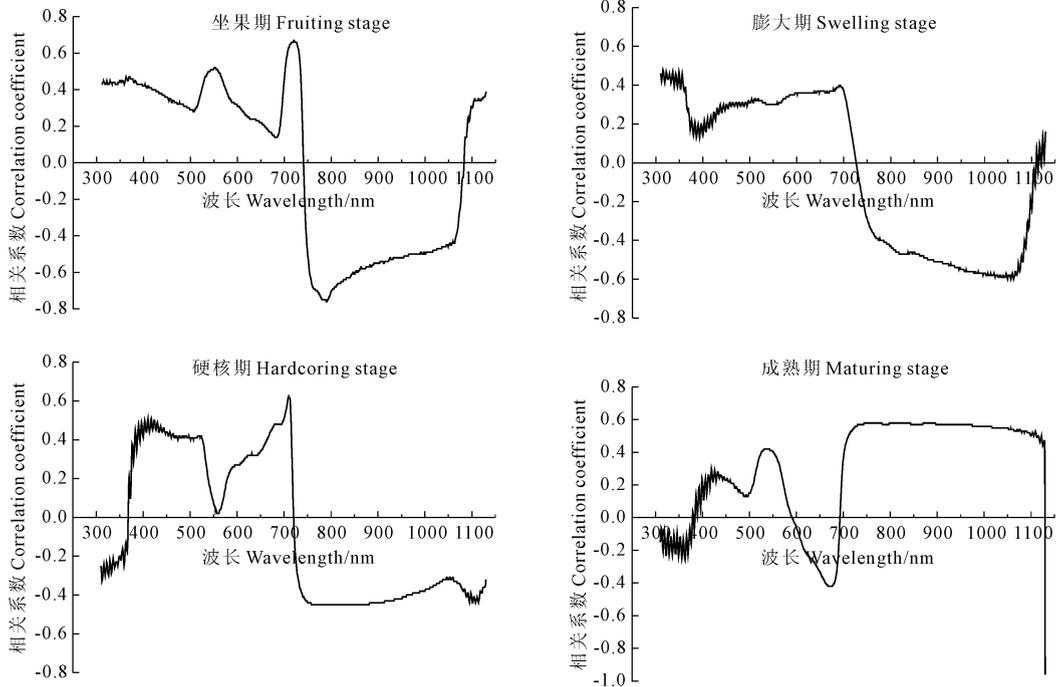


图 2 ‘叶尔羌’扁桃果实不同生长发育阶段叶片 P 含量与光谱反射率的相关系数

Fig.2 Correlation coefficients between foliar P content and spectral reflectance of Yarkent almond at various phenological stages of fruit development

2.1.3 叶片 K 含量与不同波段光谱反射率的相关性 果实坐果期,‘叶尔羌’扁桃叶片 K 含量与其光谱反射率在可见光波段 310 ~ 750 nm 波段呈正相关性,在 693 ~ 700 nm 波段,相关系数最高值达到 0.7;在 751 ~ 1 082 nm 波段呈负相关性,在 815 ~ 894 nm 波段,相关系数最高值达到 0.71;在 1 083 ~ 1 130 nm 波段呈正相关性,相关系数呈上升趋势,但相关性不强;因此,815 ~ 894 nm 波段可作为‘叶尔羌’扁桃果实坐果期叶片 K 含量的指示波段。

果实膨大期,‘叶尔羌’扁桃叶片 K 含量与其光谱反射率在可见光波段 310 ~ 804 nm 波段呈正相关性;在 345 ~ 368 nm 波段,相关系数达到最高值,为 0.59;在 807 ~ 1 082 nm 波段呈负相关性,且相关性很弱,相关系数最大值仅为 0.32;在 1 083 ~ 1 130 nm 波段呈正相关性,随着波长的增加,相关系数逐渐增大,最大值为 0.55。因此,345 ~ 368 nm 波段可作为

‘叶尔羌’扁桃果实膨大期叶片 K 含量的指示波段。

果实硬核期,‘叶尔羌’扁桃叶片 K 含量与其光谱反射率在可见光波段 310 ~ 368 nm、371 ~ 375 nm、713 ~ 1 130 nm 波段呈较弱的负相关性,相关系数最高值仅为 0.2;在 387 ~ 712 nm 波段呈较弱的正相关性,相关系数最高值仅为 0.17;因此,没有合适波段可作为‘叶尔羌’扁桃果实硬核期叶片 K 含量的指示波段。

果实成熟期,‘叶尔羌’扁桃叶片 K 含量与其光谱反射率在可见光波段 310 ~ 704 nm 波段呈正相关性,在 475 ~ 491 nm 波段,相关系数最高值达到 0.63;在 705 ~ 1 113 nm 波段与 1 130 波点处呈较弱的负相关性,相关系数最高值仅为 0.38;在 1 114 ~ 1 129 nm 波段呈较弱的正相关性;因此,475 ~ 491 nm 波段可作为‘叶尔羌’扁桃果实成熟期叶片 K 含量的指示波段,以上结果见图 3。

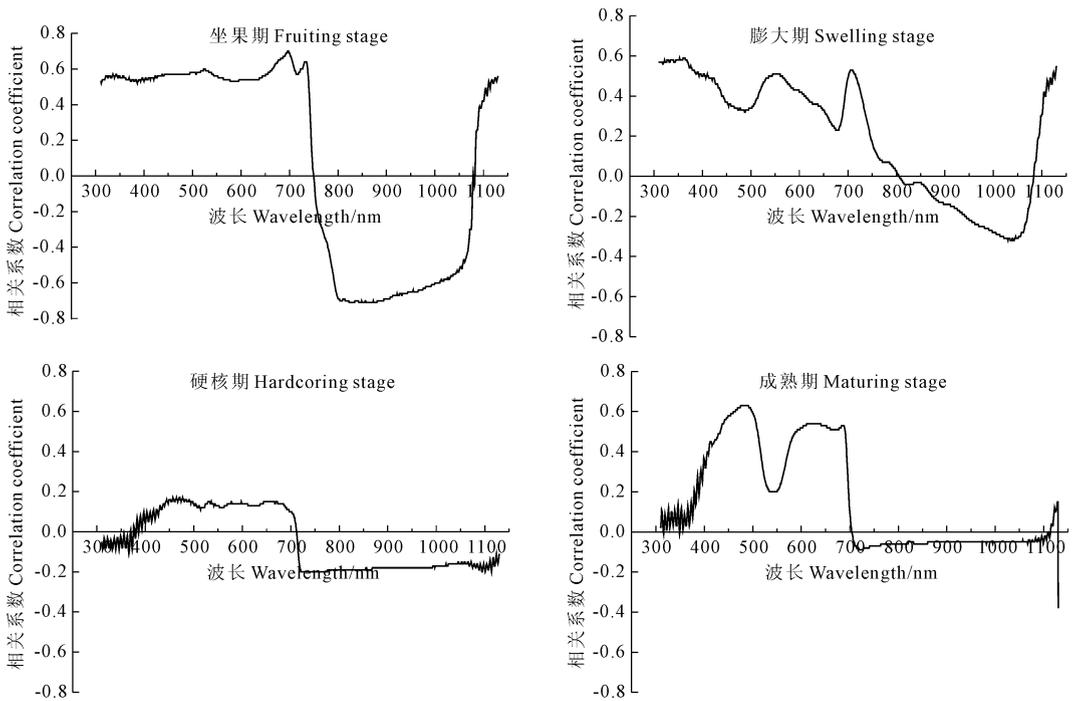


图 3 ‘叶尔羌’扁桃果实不同生长发育阶段叶片 K 含量与光谱反射率的相关系数

Fig.3 Correlation coefficients between foliar K content and spectral reflectance of Yarkent almond at various phenological stages during fruit development

2.2 ‘叶尔羌’扁桃叶片 N、P、K 含量光谱估算模型

2.2.1 叶片 N 含量估算模型 以叶片 N 含量与不同波段光谱反射率的相关性为依据,选取相关性最强的两个波段,将叶片光谱反射率进行算术相加,算数相加后取常用对数(简称对数,下同),各自取对数后相加三种数学处理所得的光谱反射率或其衍生变量作为自变量,以叶片 N 含量为因变量,建立二次曲线函数或 Cubics Ration 函数回归关系,除了硬核期,所得回归方程的拟合度(R^2)在 0.9142 ~ 0.9515 之间,表明回归方程的拟合度均比较好。其中,采用两个波段光谱反射率算数相加作为自变量,使回归方程的拟合度有所提高。因而,在‘叶尔羌’扁桃果实坐果期与膨大期,可通过获取双波段的叶片光谱反射率利用二次曲线函数或 Cubics Ration 函数对其叶片 N 含量进行估算。

2.2.2 叶片 P 含量估算模型 以叶片 P 含量与不同波段光谱反射率的相关性分析结果为依据,选取相关性最强的两个波段,将叶片光谱反射率进行算术相加,算术相加后取对数,各自取对数后相加三种数学处理所得的光谱反射率或其衍生变量作为自变量,以叶片 P 含量为因变量,建立 Cubics Ration 模型、Logistic 模型、Gompertz 模型、二次曲线回归关系,所得回归方程一般。

在果实坐果期与硬核期,叶片 P 含量与光谱反

射率及其衍生变量建立的 Cubics Ration 模型回归方程拟合度均较高,其中都以算术相加后取对数为自变量拟合度较好,在硬核期拟合度低于坐果期。在果实膨大期,叶片 P 含量与光谱反射率及其衍生变量建立的模型回归方程拟合度均较低,均在 0.5 以下。因此,在‘叶尔羌’扁桃果实发育的坐果期,可以通过获取双指示波段的叶片光谱反射率经进行算术相加,算术相加后取对数,各自取对数后相加三种数学处理所得的光谱反射率或其衍生变量作为自变量,利用 Cubics Ration 模型对其叶片 P 元素含量进行估算。

2.2.3 叶片 K 含量估算模型 以叶片 K 含量与不同波段光谱反射率的相关性分析结果为依据,选取相关性最强的两个波段,将叶片光谱反射率进行算术相加,算术相加后取对数、各自取对数后相加三种数学处理所得的光谱反射率或其衍生变量作为自变量,以叶片 K 含量为因变量,建立模型。计算结果显示,坐果期,以三种衍生变量拟合的 Cubics Ration 模型拟合度均较好,其中以算术相加后取对数作为自变量,Cubics Ration 模型拟合度较高;膨大期,以三种衍生变量为自变量,Logistic 模型拟合度一致,均为 0.9032;硬核期,叶片 K 含量与不同波段光谱反射率的相关性非常低,无法拟合。成熟期,以三种衍生变量拟合的二次曲线模型拟合度均较低,在 0.5

表 2 ‘叶尔羌’扁桃果实不同发育阶段叶片 N 含量与光谱变量的回归关系
Table 2 Regression relationships of the spectra variables and foliar N content of Yarkent almond at various phenological stages during fruit development

| 果实生长发育阶段 Phenological stage of fruit development | 光谱变量(X) Spectra variable | 回归方程 Regression equation | 拟合度(R ²) Fitting degree |
|--|--|---|--|
| 坐果期 Fruiting stage | R ₈₂₃ + R ₈₈₀ | $Y = -4424.5464 + 8757.9273X - 4302.8253X^2$ | 0.9161 二次曲线 Quadratic curve |
| | lg(R ₈₂₃ + R ₈₈₀) | $Y = 30.5161 + 367.0945X - 24197.4955X^2$ | 0.9143 二次曲线 Quadratic curve |
| | lgR ₈₂₃ + lgR ₈₈₀ | $Y = -2051.4471 - 7099.5965X - 6048.4479X^2$ | 0.9142 二次曲线 Quadratic curve |
| 膨大期 Swelling stage | R ₃₈₂ + R ₃₈₃ | $Y = (0.111566 - 1.1980X + 4.3907X^2 - 4.7221)$ | 0.9515 Cubics Ration model |
| | lg(R ₃₈₂ + R ₃₈₃) | $Y = (0.640427 + 3.7376X + 7.4013X^2 + 5.3635X^3) / (0.017901X^3)$ | 0.9445 Cubics Ration model |
| | lgR ₃₈₂ + lgR ₃₈₃ | $Y = (21.8812 + 39.8456X + 24.3772X^2 + 5.1255X^3) / (0.005188X^3)$ | 0.9459 Cubics Ration model |
| 硬核期 Hardcoring stage | R ₆₀₈ + R ₆₁₆ | $Y = 106.3876X^{0.747392}$ | 0.2463 幂函数 Power function |
| | lg(R ₆₀₈ + R ₆₁₆) | $Y = -19.2167X^{-1.5025}$ | 0.2462 幂函数 Power function |
| | lgR ₆₀₈ + lgR ₆₁₆ | $Y = 3.1453e^{-4.7288/X}$ | 0.2461 负指数函数 Negative exponential function |
| 成熟期 Maturing stage | R ₄₂₉ + R ₄₃₇ | 无法拟合 Fitting method can not be used directly | |
| | lg(R ₄₂₉ + R ₄₃₇) | 无法拟合 Fitting method can not be used directly | |
| | lgR ₄₂₉ + lgR ₄₃₇ | 无法拟合 Fitting method can not be used directly | |

注: X 为光谱变量, Y 为 N 元素含量。

Note: X representation of the meaning of spectral variables X, Y representation of the meaning of N element content.

表 3 ‘叶尔羌’扁桃果实不同发育阶段叶片 P 含量与光谱变量的回归关系
Table 3 Regression relationships of the spectra variables and foliar P content of Yarkent almond at various phenological stages during fruit development

| 果实生长发育阶段 Phenological stage of fruit development | 光谱变量(X) Spectra variable | 回归方程 Regression equation | 拟合度(R ²) Fitting degree |
|--|--|---|--|
| 坐果期 Fruiting stage | R ₇₈₉ + R ₇₉₀ | $Y = (-2.8244 + 8.249X - 8.0314X^2 + 2.6063X^3) / (0.000005X^3)$ | 0.9726 Cubics Ration model |
| | lg(R ₇₈₉ + R ₇₉₀) | $Y = (-0.000003 + 0.000803X - 0.070160X^2 + 2.8169X^3) / (0.407026X^3)$ | 0.9875 Cubics Ration model |
| | lgR ₇₈₉ + lgR ₇₉₀ | $Y = (-0.261198 - 1.3540X - 2.3395X^2 - 1.3472X^3) / (0.000009X^3)$ | 0.9709 Cubics Ration model |
| 膨大期 Swelling stage | R ₁₀₆₂ + R ₁₀₆₃ | $Y = 2.7530 / (1 + e^{-5.3978 + 4.5422X})$ | 0.3554 Logistic model |
| | lg(R ₁₀₆₂ + R ₁₀₆₃) | $Y = 1.9342 - 6.1952X - 16.8100X^2$ | 0.3554 二次曲线 Quadratic curve |
| | lgR ₁₀₆₂ + lgR ₁₀₆₃ | $Y = 1.4539 - 8.1576X - 4.2022X^2$ | 0.3554 二次曲线 Quadratic curve |
| 硬核期 Hardcoring stage | R ₇₁₀ + R ₇₁₁ | $Y = (0.278584 - 1.9514X + 4.5522X^2 - 3.5329X^3) / (0.001976X^3)$ | 0.7748 Cubics Ration model |
| | lg(R ₇₁₀ + R ₇₁₁) | $Y = (0.099911 + 0.815139X + 2.2140X^2 + 2.0047X^3) / (0.001713X^3)$ | 0.7790 Cubics Ration model |
| | lgR ₇₁₀ + lgR ₇₁₁ | $Y = (5.5869 + 12.5258X + 9.3572X^2 + 2.3297X^3) / (0.000338X^3)$ | 0.7778 Cubics Ration model |
| 成熟期 Maturing stage | R ₈₉₀ + R ₁₁₃₀ | $Y = 1.5050EXP(-0.000281e^{23.0308X})$ | 0.9203 Gompertz model |
| | lg(R ₈₉₀ + R ₁₁₃₀) | 无法拟合 Fitting method can not be used directly | |
| | lgR ₈₉₀ + lgR ₁₁₃₀ | 无法拟合 Fitting method can not be used directly | |

注: X 为光谱变量, Y 为 P 元素含量。

Note: X representation of the meaning of spectral variables X, Y representation of the meaning of P element content.

表 4 ‘叶尔羌’扁桃果实不同发育阶段叶片 K 含量与光谱变量的回归关系

Table 4 Regression relationship of the spectra variables and foliar K content of Yarkent almond at various phonological stages during fruit development

| 果实生长发育阶段 Phenological stage of fruit development | 光谱变量(X) Spectra variable | 回归方程 Regression equation | 拟合度(R ²) Fitting degree |
|--|--|--|--|
| 坐果期 Fruiting stage | R ₈₃₀ + R ₈₅₀ | $Y = (-7.7960 + 22.5853X - 21.8023X^2 + 7.0133X^3) / (0.000032X^3)$ | 0.9523 Cubics Ration model |
| | lg(R ₈₃₀ + R ₈₅₀) | $Y = (0.000001 - 0.000847X + 0.149484X^2 - 1.5956X^3) / (0.492020X^3)$ | 0.9798 Cubics Ration model |
| | lgR ₈₃₀ + lgR ₈₅₀ | $Y = (-1.2803 - 6.7021X - 11.6870X^2 - 6.7879X^3) / (0.000082X^3)$ | 0.9542 Cubics Ration model |
| 膨大期 Swelling stage | R ₃₆₀ + R ₃₆₁ | $Y = 15.9013 / (1 + e^{129.2188 - 177.1312X})$ | 0.9032 Logistic model |
| | lg(R ₃₆₀ + R ₃₆₁) | $Y = 15.9013 / (1 + e^{-41.5115 - 303.2159X})$ | 0.9032 Logistic model |
| | lgR ₃₆₀ + lgR ₃₆₁ | $Y = 15.9013 / (1 + e^{-132.8547 - 151.6813X})$ | 0.9032 Logistic model |
| 硬核期 Hardcoring stage | R ₇₄₂ + R ₇₄₃ | 无法拟合 Fitting method can not be used directly | |
| | lg(R ₇₄₂ + R ₇₄₃) | 无法拟合 Fitting method can not be used directly | |
| | lgR ₇₄₂ + lgR ₇₄₃ | 无法拟合 Fitting method can not be used directly | |
| 成熟期 Maturing stage | R ₄₈₉ + R ₄₉₀ | $Y = 87.0666 - 1207.7813X + 4760.7086X^2$ | 0.4350 二次曲线 Quadratic curve |
| | lg(R ₄₈₉ + R ₄₉₀) | $Y = 500.6003 + 1103.9097X + 621.5324X^2$ | 0.4406 二次曲线 Quadratic curve |
| | lgR ₄₈₉ + lgR ₄₉₀ | $Y = 889.2446 + 739.0646X + 155.3852X^2$ | 0.4406 二次曲线 Quadratic curve |

注: X 为光谱变量, Y 为 K 元素含量。

Note: X representation of the meaning of spectral variables X, Y representation of the meaning of K element content.

以下;因此,在‘叶尔羌’扁桃果实发育的坐果期与膨大期,可以通过获取双指示波段的叶片光谱反射率经进行算术相加,算术相加后取对数、各自取对数后相加三种数学处理所得的光谱反射率或其衍生变量作为自变量,利用 Cubics Ration 模型, Logistic 模型对其叶片 K 元素含量进行估算。最终确定‘叶尔羌’扁桃坐果期叶片氮营养诊断最佳模型为: $Y = -2051.4471 - 7099.5965X - 6048.4479X^2$, 其中 X 为 $\lg R_{823} + \lg R_{880}$, 果实膨大期的最佳模型为: $Y = (21.8812 + 39.8456X + 24.3772X^2 + 5.1255X^3) / (0.005188X^3)$, 其中 X 为 $\lg R_{382} + \lg R_{383}$, 坐果期 P 营养诊断最佳模型为 $Y = (-0.000003 + 0.000803X - 0.070160X^2 + 2.8169X^3) / (0.407026X^3)$, X 为 $\lg(R_{789} + R_{790})$; 坐果期 K 营养诊断最佳模型为 $Y = (-7.7960 + 22.5853X - 21.8023X^2 + 7.0133X^3) / 0.000032X^3$, 其中 X 为 $R_{830} + R_{850}$, Y 均为估测值含量。

3 讨论

本研究以‘叶尔羌’扁桃果实不同发育阶段光谱反射率与 N、P、K 含量的相关性为基础,将叶片光谱反射率进行算术相加,算术相加后取对数,各自取对数后相加三种数学处理所得的光谱反射率或其衍生变量作为自变量,扁桃叶片 N、P、K 含量为因变量,建立了不同果实发育阶段, N、P、K 含量检测模型,

为‘叶尔羌’扁桃果实发育阶段, N、P、K 素营养状况的无损与精确监测、实时营养检测和诊断提供了理论依据和技术支持,对促进‘叶尔羌’扁桃栽培与管理信息化具有重要的意义。

研究表明,在坐果期,以 N、P、K 含量为因变量,经过三种数学处理的光谱反射率或其衍生变量为自变量,建立的 N、P、K 含量监测模型的拟合度均较高。在果实膨大期,以 K 素含量为因变量,经过三种数学处理的光谱反射率或其衍生变量为自变量,建立的 K 含量监测模型的拟合度均较好, N 素与 P 素模型均较差。在硬核期,以 P 素含量为因变量,经过三种数学处理的光谱反射率或其衍生变量为自变量,建立的 P 含量监测模型的拟合度均较好, N 素模型拟合度较差, K 素模型无法拟合。在成熟期,以 P 素含量为因变量,经过三种数学处理的光谱反射率或其衍生变量为自变量,建立的 P 含量监测模型的拟合度均较好, N 素、K 素模型拟合度较差。模型无法拟合或者拟合度较低,均是由于在该发育阶段‘叶尔羌’扁桃叶片相关元素含量与光谱反射率相关性较低。关于植物光谱营养诊断模型的建立的相关研究多集中在小麦、玉米上,而关于果树方面研究甚少。如吉海彦等^[30]使用 ASD 便携式光谱仪和 LI-COR 1800 型积分球,在 350 ~ 1 650 nm 的光谱范围内,测量冬小麦叶片在不同生长期的反射光谱,用偏最小二乘方法建立了冬小麦叶片叶绿素和水分含量

与反射光谱的定量分析模型。在 400 ~ 750 nm 的光谱范围,建立了叶绿素含量与反射光谱的模型,在小麦估产、农情监测等方面具有重要的意义,同时可为进行高光谱遥感提供基础。王磊等^[10]在玉米关键生育期,经过光谱监测及回归分析和验证建立的 RNIR/Red 与叶片氮含量对数模型和指数模型,为研发低成本便携式作物氮素营养光谱诊断仪提供依据。这说明光谱营养诊断模型的建立能够为快速、精准的营养诊断提供依据。

4 结 论

‘叶尔羌’扁桃果实不同生长发育阶段叶片 N、P、K 营养元素与光谱反射率存在关联,可根据光谱敏感指示波段的光谱反射率或其衍生变量利用二次函数、Cubics Ration、Logistic 函数建立叶尔羌扁桃果实不同生长发育阶段叶片 N、P、K 营养元素含量光谱估算模型。

致谢 本课题在选题及研究过程中得到卢春生与龚鹏两位专家的亲切关怀和悉心指导,在此谨致以诚挚的谢意。

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: 176-180.

[2] 薛利红, 曹卫星, 罗卫红, 等. 基于冠层反射光谱的水稻群体叶片氮素状况监测[J]. 中国农业科学, 2003, 36(7): 807-812.

[3] Bronson K F, Chua T T, Booker J D. In-season nitrogen status in sensing irrigated cotton: II. Leaf nitrogen and biomass[J]. Soil Science Society of American Journal, 2003, 67: 1439-1448.

[4] Racy M B, James S S, Garye V. Nitrogen deficiency detection using reflected short-wave radiation from irrigated corn canopies[J]. Agronomy Journal, 1996, 88: 1-5.

[5] 蒋焕煜, 彭永石, 谢丽娟, 等. 扫描次数对番茄叶漫反射光谱和模型精度的影响研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(8): 1763-1766.

[6] 李敏霞. 苹果叶片光谱反射率与叶绿素和全氮含量的相关研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2009: 1-40.

[7] 周丽丽, 冯汉宇, 阎忠敏, 等. 玉米叶片氮含量的高光谱估算及其品种差异[J]. 农业工程学报, 2010, 26(8): 195-199.

[8] 孙 红, 李民赞, 张彦娥, 等. 不同施氮水平下玉米冠层光谱反射特征分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(3): 715-719.

[9] 梁惠平, 刘湘南. 玉米氮营养指数的高光谱计算模型[J]. 农业工程学报, 2010, 26(1): 250-255.

[10] 王 磊, 白由路, 卢艳丽, 等. 基于光谱分析的玉米氮素营养诊断[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(2): 333-340.

[11] 张俊华, 张佳宝. 冬小麦特征光谱对其全氮和硝态氮的响应[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(1): 104-110.

[12] 胡 昊, 白由路, 杨俐苹, 等. 不同氮营养冬小麦冠层光谱红边特征分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(6): 1317-1323.

[13] 覃 夏, 王绍华, 薛利红. 江西鹰潭地区早稻氮素营养光谱诊断模型的构建与应用[J]. 中国农业科学, 2011, 44(4): 691-698.

[14] 唐延林. 水稻高光谱特征及其生物理化参数模拟与估测模型研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004: 1-64.

[15] 韩小平, 左月明, 李灵芝. 水培番茄施氮量近红外光谱预测模型的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(9): 2479-2483.

[16] 李灵芝, 郭 荣, 李海平, 等. 不同氮浓度对温室番茄生长发育和叶片光谱特性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(4): 965-969.

[17] 王克如, 潘文超, 李少昆, 等. 不同施氮量棉花冠层高光谱特征研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(7): 1868-1872.

[18] 杨红丽, 陈 功, 吴建付. 施氮水平对多花黑麦草植株氮含量及反射光谱特征的影响[J]. 草业学报, 2011, 20(3): 239-244.

[19] 李雪飞, 韩甜甜, 董 彦, 等. 紫叶稠李叶片色素及氮含量与其光谱反射特性的相关性[J]. 林业科学, 2011, 47(8): 75-81.

[20] 田永超, 杨 杰, 姚 霞, 等. 利用叶片高光谱指数预测水稻群体叶层全氮含量[J]. 作物学报, 2010, 36(9): 1529-1537.

[21] 贺冬仙, 胡娟秀. 基于叶片光谱透过特性的植物氮素测定[J]. 农业工程学报, 2011, 27(4): 214-218.

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

[23] 胡珍珠, 潘存德, 王世伟, 等. 轮台白杏叶片氮磷钾含量光谱估算模型[J]. 新疆农业科学, 2013, 50(2): 238-248.

[24] Osborne S L, Schepers J S, Schlemmer M R, et al. Detection of Phosphorus and nitrogen deficiencies in corn using spectral radiance measurements[J]. Agronomy Journal, 2002, 94: 1215-1221.

[25] AI - 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.

[26] Daughtry C S T, Walthall C L, Kim M S, et al. Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance[J]. Remote Sensing of Environment, 2000, 74: 229-239.

[27] Milton N M, Ager C M, Eiswerth B A, et al. Arsenic and selenium induced changes in spectral reflectance and morphology of soybean plants[J]. Remote Sensing of Environment, 1989, 30(3): 263-269.

[28] Milton N M, Eiswerth B A, Ager C M. Effect of Phosphorus deficiency on spectral reflectance and morphology of soybean plants[J]. Remote Sensing of Environment, 1991, 36: 121-127.

[29] 杨 波, 车玉红, 崔艳丽, 等. 扁桃叶片矿质元素质量分数的年周期变化[J]. 西北农业学报, 2013, 22(4): 114-119.

[30] 吉海彦, 王鹏新, 严泰来. 冬小麦活体叶片叶绿素和水分含量与反射光谱的模型建立[J]. 光谱学与光谱分析, 2007(3): 514-516.

[31] 杨 慧, 曹红霞, 柳美玉, 等. 水氮耦合条件下番茄临界氮浓度模型的建立及氮素营养诊断[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(5): 1234-1242.