

# 基于光谱特征参量的核桃叶片氮素含量估测模型

胡珍珠, 潘存德<sup>\*</sup>, 肖冰, 潘鑫

(新疆农业大学林学与园艺学院, 新疆教育厅干旱区林业生态与产业技术重点实验室, 乌鲁木齐 830052)

**摘要:** 建立基于光谱特征参量的新温 185 号 (*Juglans regia* ‘Xinwen185’) 核桃叶片氮素含量估测模型, 旨在为快速监测新温 185 号核桃叶片 N 营养状况提供技术途径。基于肥料效应田间试验, 测定 N 肥不同施用量水平下新温 185 号核桃果实坐果期、速生长期、脂化期和近成熟期的叶片光谱反射率和 N 素含量, 采用 Pearson 相关分析方法筛选与叶片 N 素含量呈极显著相关的光谱特征参量, 并应用回归分析方法建立叶片 N 素含量光谱特征参量估测模型。结果表明: 与叶片 N 素含量呈极显著相关 ( $P < 0.01$ ) 的光谱特征参量在果实坐果期有绿峰反射率和红色比值指数, 在果实速生长期有黄边位置、红谷反射率和绿色比值指数、红色比值指数、绿色归一化差值指数、红色归一化差值指数, 在果实脂化期有绿峰反射率和红色比值指数, 在果实近成熟期有绿峰反射率、黄边幅度和红边面积。分别以绿峰反射率、黄边位置、红色比值指数和黄边幅度为自变量采用三次函数建立的果实坐果期、速生长期、脂化期和近成熟期叶片 N 素含量回归估测模型的拟合度  $R^2$  均在 0.99 以上, 且模型具有很好的稳定性和很高的估测精度。表明可采用三次函数建立果实不同生育时期叶片 N 素含量光谱特征参量估测模型对新温 185 号核桃树体 N 营养水平进行监测。光谱技术在核桃树体 N 营养信息探测方面有较大的应用潜力。

**关键词:** 光谱测定法; 氮素; 回归分析; 特征参量; 估测模型

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.09.028

中图分类号: S664.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-09-0180-07

胡珍珠, 潘存德, 肖冰, 等. 基于光谱特征参量的核桃叶片氮素含量估测模型[J]. 农业工程学报, 2015, 31(9): 180—186.

Hu Zhenzhu, Pan Cunde, Xiao Bing, et al. Spectral characteristic parameter-based models for foliar nitrogen concentration estimation of *Juglans regia*[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(9): 180—186. (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

氮(N)是植物体内不可或缺的营养元素,它在多方面直接或间接地影响作物的生理代谢活动和生长发育<sup>[1]</sup>,不仅是作物生长和产量、品质形成所必须,而且也是评价作物长势的重要指标。因此,只有快速、准确地监测作物体内 N 素营养水平才能及时进行精确、科学施肥<sup>[2]</sup>。作物 N 素营养监测的现行方法主要是基于植物组织的实验室化学分析,其不仅费时、费力,而且具有破坏性<sup>[3]</sup>。因此,寻求简便、快速、无损、精准地提取作物 N 素营养水平的方法尤为必要。由于作物体内营养元素的丰缺直接影响作物的生长发育,并在作物的形态和光谱特性中表现出来<sup>[4]</sup>,因此可采用光谱手段监测作物 N 素营养水平<sup>[5]</sup>。应用光谱技术监测作物体内 N 素营养水平的方法,国内外学者已进行了大量的研究并取得了丰硕的成果,对于一年生经济作物体内 N 素营养水平监测的研究

成果尤其显著,但结果各异。有研究表明,以归一化指数 $(SD_r - SD_b)/(SD_r + SD_b)$ 为自变量构建的光谱估测模型可较精确地预测水稻 N 素水平<sup>[6]</sup>,而不同玉米品种叶片 N 素含量则采用归一化差值指数 NDVI (714, 554) 和比值光谱指数 RVI (714, 554) 构建的线性和指数回归模型估测精度相对较高<sup>[7]</sup>。此外,利用光谱技术监测多年生木本果树树体 N 素水平的研究也较多,如:采用比值指数(绿峰反射率/红谷反射率,  $R_g/R_o$ )和归一化指数 $(R_g - R_o)/(R_g + R_o)$ 构建的库尔勒香梨叶片 N 素含量光谱估测模型具有较高的拟合度,其决定系数分别为 0.962 和 0.958<sup>[8]</sup>;桃叶片 N 素含量则采用一阶微分光谱构建的回归模型估测精度相对较高<sup>[9]</sup>。但上述研究均采用被动式(SVC HR-768 或 ASD FieldSpec)光谱仪,虽然认为建立的模型拟合度或估测精度相对较高,却没有涵盖不同生育时期,而且模型要么没有经过独立样本的检验,要么没有给出明确的量化精度,模型的误差和普适性难以满足实际生产应用的需要。核桃作为世界四大坚果树种之一,其果实的营养和经济价值很高。但能否应用光谱技术对核桃树体的 N 素含量进行定量监测以指导其精准施肥,鲜有相关文献报道。鉴于此,以新温 185 号核桃品种为研究对象,采用主动式(UniSpec-SC)光谱仪测定活体叶片光谱反射率,通过筛选果实不同生育时期与其叶片 N 素含量呈极显著相关的光谱特征参量,旨在构建基于光谱特征参量并经过独立样本检验、具有普适性的叶片 N 素含量光

收稿日期: 2014-12-22 修订日期: 2015-04-17

基金项目: 新疆维吾尔自治区“十二五”重大科技专项课题(201130102-2); 新疆研究生科研创新项目(XJGR12014082)

作者简介: 胡珍珠,女,江苏徐州人,博士生,主要从事果树栽培与生理研究。乌鲁木齐 新疆农业大学林学与园艺学院, 830052。

Email: huzhenzhu2785@163.com

\*通信作者: 潘存德,男,新疆奇台人,教授,博士生导师,主要从事森林生态与经营方面的研究和教学工作。乌鲁木齐 新疆农业大学林学与园艺学院, 830052。Email: pancunde@163.com

谱估测模型, 以期为新温 185 号核桃树体 N 素含量的快速监测和精准施肥提供技术途径。

## 1 材料与方法

试验地选择在新疆阿克苏地区乌什县阿克托海乡喀塔尔玉吉买村的核桃生产园(地理坐标: N 41°12'54.36"~41°13'03", E 79°15'41.28"~79°15'52.02"; 海拔 1 394 m)。试验地面积 2 hm<sup>2</sup>, 核桃主栽品种新温 185 号, 授粉品种新新 2 号(*J. regia* 'Xinxin2'), 株行距 5 m×6 m, 东西行向栽植, 林相整齐, 树龄 12 a, 树体健康, 无病虫害, 树形为疏散分层形。

### 1.1 试验设计

为了获得比新温 185 号核桃一般大田生产园栽培条件下植株叶片 N 素含量及对应光谱反射率覆盖范围更广的数据, 减弱所建模型受两端数据的影响, 使其更具普适性, 对试验地核桃样株采用“3414”肥料效应田间试验<sup>[10]</sup>进行人工定量施肥干扰, 即: 肥料因素为 N、磷(P)、钾(K), 4 个水平分别为不施肥、常规施肥量的 0.5 倍、常规施肥量和常规施肥量的 1.5 倍, 共 14 个处理。每个处理设 3 个重复小区, 共 42 个试验小区, 随机排列。每一试验小区 10 株树, 全部 420 株参试新温 185 号核桃样株树体大小一致。每一样株 N、P、K 的常规施肥量(纯量)分别为 1.6、0.6 和 0.2 kg。N 肥用含 N 46% 的尿素(CO(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>) (新疆塔里木油田石化分公司生产), P 肥用含 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 46% 的重钙(Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>) (云南云天化国际化工有限公司生产), K 肥用含 K<sub>2</sub>O 51% 的硫酸钾(K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) (国投新疆罗布泊钾盐有限责任公司生产)。肥料在核桃萌芽前一次性施入。施用方式为环状沟施, 位置在树冠垂直投影 2/3 处, 施肥深度 50 cm。田间施肥于 2013 年 3 月下旬实施。

### 1.2 光谱数据采集

选择晴朗无风天气, 在 12:00~15:00 (北京时间) 太阳高度角变化不大的时间段进行新温 185 号核桃样株叶片光谱数据采集。光谱数据采集采用 PP Systems 公司生产的 UniSpec-SC (单通道) 便携式光谱分析仪。该型号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<10 nm, 输出波段数为 821 (光谱仪最后将数据重采样成 1 nm)。光谱仪每次数据采集前进行标准校正, 试验小区每一样株从东、南、西、北 4 个方向选取树冠中上部外围当年生枝条中部健康叶片 10 片, 对活体健康叶片 6 次重复测定。试验光谱数据测定在新温 185 号核桃果实的 4 个生育时期, 即: 坐果期(5 月 5 日)、速生生长期(5 月 30 日)、脂化期(7 月 1 日)和近成熟期(8 月 25 日)。

### 1.3 叶片采集及 N 素含量测定

采集进行光谱数据测定的新温 185 号核桃样株叶片, 每个试验小区采集的叶样(100 个)混合成一个样品, 共 42 个样品。用脱脂棉擦拭干净, 去除主叶脉, 105℃杀青 30 min, 80℃下烘至恒质量, 粉碎样品并过 60 目尼龙筛。取 0.2 g 干样, 用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 消煮后, 采用凯氏定 N 法测定。试验采集的新温 185 号核桃叶样 N 素质量分数在

19~45 g/kg 之间。

### 1.4 数据分析

依据在水稻<sup>[6]</sup>、香梨<sup>[8]</sup>、玉米<sup>[11]</sup>上的相关研究, 本研究共选用对叶片 N 素含量有较好预测性的光谱特征参量 3 类 25 种<sup>[12]</sup>, 其中: 光谱位置特征参量有蓝边幅值  $D_b$  (spectra slop of blue edge)、蓝边位置  $\lambda_b$  (blue edge position)、红边幅值  $D_r$  (spectra slop of red edge)、红边位置  $\lambda_r$  (red edge position)、黄边幅值  $D_y$  (spectra slop of yellow edge)、黄边位置  $\lambda_y$  (yellow edge position)、绿峰反射率  $R_g$  (reflectance of the green peak position)、绿峰位置  $\lambda_g$  (green peak position)、红谷反射率  $R_o$  (reflectance of the red valley position) 和红谷位置  $\lambda_o$  (red valley position) 10 种; 光谱面积特征参量有蓝边面积  $SD_b$  (blue edge area)、黄边面积  $SD_y$  (yellow edge area) 和红边面积  $SD_r$  (red edge area) 3 种; 光谱指数特征参量有绿色比值指数(RNIR/Green)、红色比值指数(RNIR/Red)、蓝色比值指数(NIR/Blue)、红边蓝边面积比值( $SD_r/SD_b$ )、红边黄边面积比值( $SD_r/SD_y$ )、绿峰红谷比值( $R_g/R_o$ )、绿色归一化差值指数 $[(NIR-Green)/(NIR+Green)]$ 、红色归一化差值指数 $[(NIR-Red)/(NIR+Red)]$ 、蓝色归一化差值指数 $[(NIR-Blue)/(NIR+Blue)]$ 、红边蓝边面积归一化值 $[(SD_r-SD_b)/(SD_r+SD_b)]$ 、绿峰红谷归一化值 $[(R_g-R_o)/(R_g+R_o)]$ 、红边黄边面积归一化值 $[(SD_r-SD_y)/(SD_r+SD_y)]$  12 种。

应用 Pearson 相关计算 N 素含量与光谱特征参量的相关系数, 采用双侧方法检验新温 185 号核桃叶片 N 素含量与光谱特征参量的相关性; 应用回归分析建立叶片 N 素含量光谱特征参量估测模型, 采用的函数式共 6 种, 即: 幂函数( $y=ax^b$ )、指数函数( $y=ae^{bx}$ )、半对数函数( $y=a\ln x+b$ )、一次函数( $y=ax+b$ )、二次函数( $y=ax^2-bx+c$ )和三次函数( $y=ax^3+bx^2+cx+d$ )。

采用纠正后的拟合度( $R^2$ )比较模型拟合的优劣程度。利用独立样本, 采用置信椭圆  $F$  检验法<sup>[13]</sup>检验模型估测值与实测值是否存在差异。采用均方根误差(RMSE)和相对误差(RE)<sup>[14]</sup>度量模型的估测精度。

统计分析采用 SPSS 17.0 软件; 数据整理、计算采用 Microsoft Excel 2003 软件。

## 2 结果与分析

### 2.1 果实不同生育时期叶片 N 素含量与光谱特征参量的相关性

#### 2.1.1 果实坐果期叶片 N 素含量与光谱特征参量的相关性

由表 1 得到, 新温 185 号核桃果实坐果期, 叶片 N 素含量与“三边”光谱参量  $D_b$ 、 $R_o$  呈显著正相关( $P<0.05$ ), 与  $R_g$  呈极显著正相关( $P<0.01$ )。叶片 N 素含量与“三边位置”光谱参量  $\lambda_r$  呈显著负相关( $P<0.05$ )。叶片 N 素含量与光谱指数 RNIR/Green、 $SD_r/SD_b$ 、 $(NIR-Green)/(NIR+Green)$ 、 $(NIR-Red)/(NIR+Red)$  呈显著负相关( $P<0.05$ ), 与 RNIR/Red 呈极显著负相关( $P<0.01$ )。叶片 N 素含量与“三边面积”光谱参量的相关性较弱, 均未达到显著水平( $P>0.05$ )。

表 1 核桃叶片不同生育期 N 素含量与光谱参量的相关性

Table 1 Pearson correlation coefficients between spectral parameters and foliar N concentration of *J. regia* at different development periods

光谱参量 Spectral parameter		相关系数 Correlation coefficient <i>r</i>			
		坐果期 Fruit setting period	速生生长期 Fruit rapid growth period	果实脂化期 Fruit fating period	果实近成熟期 Fruit near-mature period
基于光谱位置特征参量 Characteristic parameters based on spectral position	$D_b$	0.9128*	-0.7990	0.7648	-0.8232
	$\lambda_b$	0.7593	-0.7811	0.7652	0.7543
	$D_r$	0.8729	0.9077*	-0.5171	-0.9367*
	$\lambda_r$	-0.9077*	-0.7208	-0.4855	0.8597
	$D_y$	-0.7956	0.1168	-0.9203*	0.9698**
	$\lambda_y$	0.3431	-0.9865**	0.9299*	-0.4961
	$R_g$	0.9986**	-0.9215*	-0.9853**	-0.9609**
	$\lambda_g$	0.8536	-0.9188*	0.5845	0.2563
	$R_o$	0.9274*	-0.9923**	-0.8567	-0.8904
	$\lambda_o$	0.6074	-0.8529	-0.4863	-0.8597
基于光谱面积特征参量 Characteristic parameters based on spectral area	$SD_b$	0.7999	-0.6636	0.8218	-0.7703
	$SD_y$	-0.2086	-0.5964	-0.5925	0.9584*
	$SD_r$	-0.4618	0.8462	-0.4723	-0.9605**
基于光谱指数特征参量 Characteristic parameters based on spectral index	RNIR/Green	-0.9273*	0.9740**	0.3312	0.883
	RNIR/Red	-0.9611**	0.9756**	0.9798**	-0.7961
	NIR/Blue	-0.0419	0.7587	0.8739	-0.7891
	$SD_r/SD_b$	-0.8969*	0.5269	-0.9004*	-0.9265*
	$SD_r/SD_y$	0.3507	-0.7998	0.6724	-0.9478*
	$R_g/R_o$	-0.1572	0.2902	0.6578	-0.8972
	(NIR-Green)/(NIR+Green)	-0.9463*	0.9790**	0.327	0.8805
	(NIR-Red)/(NIR+Red)	-0.9573*	0.9712**	0.9307*	-0.7983
	(NIR-Blue)/(NIR+Blue)	0.0204	0.7707	0.8886	-0.7926
	$(SD_r-SD_b)/(SD_r+SD_b)$	-0.8700	0.7618	-0.8468	0.7628
	$(SD_r-SD_y)/(SD_r+SD_y)$	0.4349	-0.8126	0.7027	-0.9265*
	$(R_g-R_o)/(R_g+R_o)$	-0.1489	0.2996	0.6577	-0.9041

注: \*\* 在 0.01 水平上极显著相关 ( $P<0.01$ ); \* 在 0.05 水平上显著相关 ( $P<0.05$ )。下同。

Note: \*\* Correlation is highly significant at the 0.01 level ( $P<0.01$ ); \* Correlation is significant at the 0.05 level ( $P<0.05$ ). The same as below.

### 2.1.2 果实速生生长期叶片 N 素含量与光谱特征参量的相关性

新温 185 号核桃果实速生生长期,“三边”光谱参量中,仅有  $D_r$ 、 $R_g$  与叶片 N 素含量的相关性达到了显著水平 ( $P<0.05$ )。叶片 N 素含量与“三边位置”光谱参量  $\lambda_g$  呈显著负相关 ( $P<0.05$ ),而与  $\lambda_y$ 、 $R_o$  呈极显著负相关 ( $P<0.01$ )。叶片 N 素含量与光谱指数 RNIR/Green、RNIR/Red、(NIR-Green)/(NIR+Green)、(NIR-Red)/(NIR+Red)的正相关关系均达到了极显著水平 ( $P<0.01$ )。“三边面积”光谱参量与叶片 N 素含量的相关性均未达到显著水平 ( $P>0.05$ )。

### 2.1.3 果实脂化期叶片 N 素含量与光谱特征参量的相关性

新温 185 号核桃果实脂化期,叶片 N 素含量与“三边”光谱参量  $R_g$  呈极显著负相关 ( $P<0.01$ ),与光谱指数 RNIR/Red 呈极显著正相关 ( $P<0.01$ ),与  $D_y$ 、 $SD_r/SD_b$  呈显著负相关 ( $P<0.05$ ),与  $\lambda_y$ 、(NIR-Red)/(NIR+Red)呈显著正相关 ( $P<0.05$ )。“三边面积”光谱参量与叶片 N 素含量的相关性均未达到显著水平 ( $P>0.05$ )。

### 2.1.4 果实近成熟期叶片 N 素含量与光谱特征参量的相关性

新温 185 号核桃果实近成熟期,“三边”光谱参量

中,叶片 N 素含量与  $R_g$  呈极显著负相关 ( $P<0.01$ ),与  $D_y$  呈极显著正相关 ( $P<0.01$ )。叶片 N 素含量与光谱指数  $SD_r/SD_b$ 、 $SD_r/SD_y$  和  $(SD_r-SD_y)/(SD_r+SD_y)$  的负相关关系仅达到了显著水平 ( $P<0.05$ )。叶片 N 素含量与“三边面积”光谱参量  $SD_y$  呈显著正相关 ( $P<0.05$ ),与  $SD_r$  的负相关关系达到了极显著水平 ( $P<0.01$ )。

## 2.2 叶片 N 素含量光谱特征参量估测模型

为了更精确地监测农学参数,选取与新温 185 号核桃叶片 N 素含量呈极显著相关的光谱特征参量为自变量 ( $x$ ),以 N 素含量为因变量 ( $y$ ),采用幂函数、指数函数、半对数函数、一次函数、二次函数和三次函数建立回归模型。果实坐果期、速生生长期、脂化期均表现为采用三次函数建立的回归模型拟合度 ( $R^2$ ) 最高(表 2),其中:果实坐果期的光谱特征参量为  $R_g$ ,果实速生生长期的光谱特征参量为  $\lambda_y$ ,果实脂化期的光谱特征参量为 RNIR/Red。果实近成熟期则以光谱特征参量  $D_y$  为自变量采用二次和三次函数建立的回归模型拟合度 ( $R^2$ ) 分别达到了 0.9982 和 0.9965,但二者相差很小。

表 2 果实不同生育时期新温 185 号核桃叶片 N 素含量光谱估测模型的拟合度

Table 2 Fittings of regression models using spectral parameter about foliar N concentration of *J. regia* at various phenological periods of fruit development

果实生育时期 Phenological period of fruit development	光谱特征参量 Spectral parameter	模型拟合度 Fitting degrees of models $R^2$					
		幂函数 Power function	指数函数 Exponential function	半对数函数 Semilog function	一次函数 Linear function	二次函数 Quadratic function	三次函数 Cubic function
果实坐果期 Fruit setting period	$R_g$	0.9930	0.9980	0.9914	0.9972	0.9997	0.9997
	RNIR/Red	0.9191	0.9230	0.9198	0.9237	0.9356	0.9954
	(NIR-Red)/(NIR+Red)	0.9146	0.9157	0.9154	0.9165	0.9445	0.9955
速生长期 Fruit rapid growth period	$\lambda_y$	0.2218	0.9365	0.9727	0.9731	0.9895	0.9950
	$R_a$	0.9888	0.9874	0.9879	0.9847	0.9885	0.9942
	RNIR/Green	0.9521	0.9424	0.9560	0.9487	0.9573	0.9672
	RNIR/Red	0.9502	0.9529	0.9478	0.9518	0.9529	0.9684
	(NIR-Green)/(NIR+Green)	0.9582	0.9558	0.9597	0.9584	0.9596	0.9688
	(NIR-Red)/(NIR+Red)	0.9443	0.9464	0.9409	0.9432	0.9514	0.9602
果实脂化期 Fruit fat change period	$R_g$	0.9652	0.9679	0.9686	0.9708	0.9773	0.9912
	RNIR/Red	0.9659	0.9549	0.9701	0.9601	0.9832	0.9920
果实近成熟期 Fruit near-mature period	$D_y$	0.9210	0.9493	0.9532	0.9406	0.9982	0.9965
	$R_g$	0.9209	0.9231	0.9224	0.9233	0.9233	0.9532
	$SD_t$	0.9188	0.9216	0.9207	0.9226	0.9230	0.9523
拟合度统计量 Fitting degree of statistics	均值 Mean	0.8953	0.9482	0.9519	0.9511	0.9631	0.9807
	极差 Range	0.7712	0.0823	0.0760	0.0807	0.0767	0.0474
	方差 Variance	0.0382	0.0006	0.0006	0.0006	0.0007	0.0003
	变异系数 Variation coefficient/%	19.56	2.5722	2.6581	2.6039	2.7471	1.8172

2.3 叶片 N 素含量光谱特征参量估测模型精度检验

于 2014 年在新温 185 号核桃果实的 4 个不同生育时期，随机抽取 42 个样株作为独立样本对筛选的果实不同生育期 N 素含量光谱特征参量估测模型进行检验(图 1)。

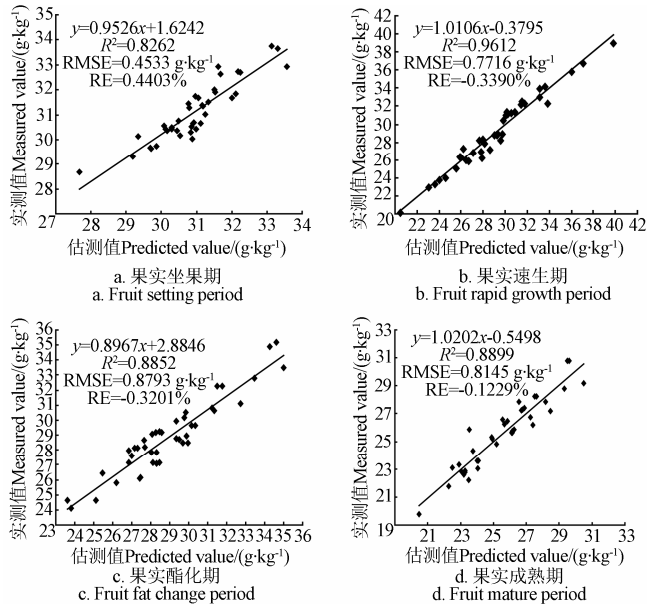


图 1 果实不同生育时期核桃叶片 N 素含量估测值与实测值之间的关系

Fig.1 Relationship between predicted values and measured values for foliar N concentration of *J. regia* at various phenological periods of fruit development

果实 4 个生育时期估测模型置信椭圆检验  $F$  值依次为  $F_{zg}=2.2235$  (坐果期)、 $F_{ss}=0.2994$  (速生长期)、

$F_{zh}=3.010$  (脂化期) 和  $F_{cs}=0.0927$  (成熟期)，均小于  $F_{0.05}(2,40)=3.23$ ，表明模型估测值与实测值之间的差异不显著。果实 4 个生育时期估测模型的均方根误差 (RMSE) 和相对误差 (RE) 依次为 0.4533 g/kg、0.4403%，0.7716 g/kg、-0.3390%，0.8793 g/kg、-0.3201%，0.8145 g/kg、-0.1229%，表明模型均具有很高的估测精度。

3 讨论

研究结果表明，新温 185 号核桃果实坐果期、脂化期、近成熟期叶片 N 素含量与  $R_g$  相关性均较强。这是因为在可见光波段内，叶红素、叶黄素、花青素等各种色素是决定植物光谱特性的主要因素，其中叶红素和叶黄素在 450 nm 附近有一个吸收带，并与叶绿素的吸收带相重叠，因而导致上述 2 种色素的吸收总是被叶绿素的吸收所掩盖，使得在可见光波段内叶绿素对作物的光谱特性起主导作用<sup>[5]</sup>。与此同时，N 元素是植物生命的基石，也是氨基酸、蛋白质、酶、核酸的主要成分<sup>[15]</sup>，可促进叶绿素的合成，使得叶片光谱反射率随叶绿素含量的增加而降低的现象在绿光波段 (510~560 nm) 尤为突出<sup>[16]</sup>，从而呈现出叶片 N 素含量与绿峰反射率 ( $R_g$ ) 的相关性较强。

研究结果还表明，果实坐果期、速生长期、脂化期叶片 N 素含量与 RNIR/Red 的相关性也较强。这是因为近红外区的光谱反射率主要受叶片内部结构的影响<sup>[17]</sup>。当叶片细胞内叶绿体等细胞器、细胞质或蛋白质类的颗粒大小与波长相当时产生散射；而电子跃迁 (叶绿体在光合色素中的卟啉环)、多原子分子振动 (主要涉及水，其

占鲜叶片液泡质量的 40%~90%) 则产生吸收。叶片上表皮细胞对光的折射和漫反射可提高近红外的反射率, 而其表面部分凸起的细胞可将光源集中在栅栏组织中从而降低近红外波段的光谱反射率。叶肉中细胞在不同组织中对光谱反射率的影响各不相同, 栅栏组织中的细胞较为细长、排列整齐紧密, 并包含大量的叶绿体从而导致反射率降低; 海绵组织则因其构成的细胞形状不规则、排列不整齐、疏松且具较多间隙而导致反射率较高。纤维素、半纤维素及细胞壁上其他的化合物可加强和保护叶片结构。新温 185 号核桃从果实坐果期到脂化期, 叶片从鲜嫩逐渐成熟, 叶片内细胞也逐渐增大直至成熟, 栅栏组织、海绵组织的形态、密集度等也相应发生改变, 从而导致光谱反射率的变化。此外, 本试验施用的 N 肥也影响叶片结构, 即施 N 量较少的叶片组织结构比较紧实, 细胞水化度低, 而 N 素含量高的叶片因叶细胞大而间隙大, 细胞的水化度也高, 从而导致近红外波段光谱反射率产生变化。有研究表明, 基于  $R_g$  (绿峰位置) 和  $R_o$  (红谷位置) 构建的库尔勒香梨叶片 K 素含量光谱估测模型的决定系数达到 0.96 以上<sup>[18]</sup>, 采用光谱比值指数 RNIR/Red 预测玉米叶绿素含量也较为精准<sup>[19]</sup>。

在新温 185 号核桃果实速生长期, 与叶片 N 素含量相关性较强的光谱特征参量有  $\lambda_y$ 、 $R_o$ 、RNIR/Green、RNIR/Red、 $(\text{NIR}-\text{Green})/(\text{NIR}+\text{Green})$ 、 $(\text{NIR}-\text{Red})/(\text{NIR}+\text{Red})$ 。这是因为在果实速生长期, 果实、叶片均处于快速生长阶段, 对 N 元素需求量均急剧增加, 且随着叶片的完全展开, 叶片扩张的“稀释作用”不复存在, 果实对叶片 N 元素的竞争导致叶片中的 N 素含量剧烈变化, 致使光谱反射率也发生相应的改变。在近红外波段, 植物的光谱特性主要受植物叶片内部构造的控制, 表现为反射率高, 透过率高, 吸收率低。此外, 近红外波段高频噪音对光谱的影响以及叶绿素与叶片内部结构的反射和散射的交互作用也是导致呈现上述现象的主要原因<sup>[15]</sup>。有研究表明, 采用可见光波段 503 和 483 nm 的归一化组合  $\exp[2.5-23.5 \times (R_{503}-R_{483})/(R_{503}+R_{483})]$  估测水稻植株 N 素含量的效果较好<sup>[20]</sup>, 而预测不同生育时期小麦 (*Triticum aestivum*) 植株 N 素含量采用光谱比值指数 RNIR/Red 和归一化差值指数  $(\text{NIR}-\text{Red})/(\text{NIR}+\text{Red})$  构建的回归模型较为精准<sup>[21]</sup>。研究结果还反映出, 在果实速生长期, 与叶片 N 素含量呈显著或极显著相关的光谱特征参量最多, 表明果实速生长期叶片光谱对 N 元素较为敏感, 为新温 185 号核桃叶片光谱的 N 素敏感期。

另外, 研究结果显示以同新温 185 号核桃叶片 N 素含量呈极显著相关的光谱特征参量为自变量, 在果实不同生育时期采用三次函数建立的回归模型拟合度 ( $R^2$ ) 均值最大, 且其极差、方差和变异系数最小 (表 2), 表明采用三次函数建立的回归模型稳定性最好。同时, 通过独立样本检验表明, 采用三次函数建立的叶片 N 素含量光谱特征参量估测模型不仅估测值与实测值之间的差异不显著, 而且均具有很高的估测精度。可见, 新温 185 号核桃果实不同生育时期均可采用三次函数建立基于光

谱特征参量的叶片 N 素含量估测模型。另外, 独立样本的检验结果还表明, 本研究建立的叶片 N 素含量光谱特征参量估测模型对新疆南疆盆地新温 185 号核桃生产园果实不同生育时期树体 N 素营养状况的快速监测和精准施肥具有重要应用价值。

但是在此需要特别指出的是, N 素含量估测模型的估测精度除了会受到模型所采用的函数关系形式和拟定的参数影响外, 还会受到模型输入变量—光谱特征参量所依赖的光谱反射率测量准确性的影响。影响光谱反射率测量准确性的因素主要有测量所采用的仪器和光照环境条件<sup>[22-23]</sup>。本研究所采用的 UniSpec-SC (单通道) 便携式光谱分析仪自带光源, 属主动式, 相比于被动式光谱仪 (如 ASD 公司生产的 FieldSpec 光谱仪), 虽然测量的光谱分辨率要低一些, 但其可有效滤除自然光环境引起的干扰, 一定程度上能够克服被动式测量对环境光依赖的缺陷, 在少风或微风环境下, 近距离的光谱反射率测量值具有较高的稳定性<sup>[24]</sup>, 降低了光谱反射率测量受光环境影响的随机误差。这一点在对水稻植株 N 积累量的预测研究中得到了很好印证<sup>[25]</sup>。另外, 估测模型采用的光谱特征参量对光谱反射率的变换不仅趋向于增强可见光区的光谱差异, 而且还趋向于减少因光照环境等条件变化引起的乘性因素影响<sup>[26]</sup>, 这在一定程度上也能够削弱因光照环境等条件变化造成的光谱反射率测量误差对估测精度的影响。

虽然本研究建立的新温 185 号核桃叶片 N 素含量光谱特征参量估测模型具有很高的估测精度, 但模型是否具有时间 (年际) 上的可重复性和空间上的广泛普适性, 尚须进一步的验证。

## 4 结 论

本研究通过测定人工定量施肥干扰下新温 185 号核桃果实坐果期、速生长期、脂化期和近成熟期的叶片光谱反射率和 N 素含量, 采用 Pearson 相关分析方法筛选与叶片 N 素含量呈极显著相关的光谱特征参量, 并应用回归分析方法建立叶片 N 素含量光谱特征参量估测模型, 得出以下结论:

1) 与叶片 N 素含量呈极显著相关 ( $P < 0.01$ ) 的光谱特征参量在果实坐果期有绿峰反射率和红色比值指数, 在果实速生长期有黄边位置、红谷反射率和绿色比值指数、红色比值指数、绿色归一化差值指数、红色归一化差值指数, 在果实脂化期有绿峰反射率和红色比值指数 (RNIR/Red), 在果实近成熟期有绿峰反射率、黄边幅值和红边面积, 且各生育时期相关系数的绝对值均大于 0.96。

2) 新温 185 号核桃果实不同生育时期分别以绿峰反射率、黄边反射率、红色比值指数和黄边幅值为自变量采用三次函数建立的果实坐果期、速生长期、脂化期和近成熟期叶片 N 素含量回归估测模型的拟合度高 ( $R^2 \geq 0.9920$ )、稳定性好, 独立样本检验的均方根误差 (RMSE) 和相对误差 (RE) 仅为 0.4533 g/kg、0.4403%、0.7716 g/kg、-0.3390%、0.8793 g/kg、-0.3201%,

0.8145 g/kg、-0.1229%。可采用三次函数建立果实不同生育时期叶片 N 素含量光谱特征参量估测模型对新温 185 号核桃树体 N 元素营养水平进行监测。光谱技术在核桃树体营养信息探测方面较大的应用潜力。

### [参 考 文 献]

- [1] Allen V B, David J P. Handbook of Plant Nutrition[M]. Florida: The Chemical Rubber Company Press, 2007: 21—50.
- [2] 蒋金豹, 陈云浩, 黄文江, 等. 条锈病胁迫下冬小麦冠层叶片氮素含量的高光谱估测模型[J]. 农业工程学报, 2008, 24(1): 35—39.  
Jiang Jinbao, Chen Yunhao, Huang Wenjiang, et al. Hyperspectral estimation models for LIN content of winter wheat canopy under stripe rust stress[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transaction of the CSAE), 2008, 24(1): 35—39. (in Chinese with English abstract)
- [3] 张金恒, 唐延林. 在水稻氮素营养诊断中的应用研究[M]. 北京: 中国农业出版社, 2012: 27—34.
- [4] 李民赞. 光谱分析技术及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 180—194.
- [5] Johnson L F, Hlavka C A, Perterson D L. Multivariate analysis of AVIRIS data for canopy biochemical estimation along the oregon transect[J]. Remote Sensing of Environment, 1994, 47: 216—230.
- [6] 谭昌伟, 周清波, 齐腊, 等. 水稻氮素营养高光谱遥感诊断模型[J]. 应用生态学报, 2008, 19(6): 1261—1268.  
Tan Changwei, Zhou Qingbo, Qi La, et al. Hyperspectral remote sensing diagnosis models of rice plant nitrogen nutritional status[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(6): 1261—1268. (in Chinese with English abstract)
- [7] 周丽丽, 冯汉字, 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.  
Zhou Lili, Feng Hanyu, Yan Zhongmin, et al. Hyperspectral diagnosis of leaf N concentration of maize and variety difference[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transaction of the CSAE), 2010, 26(8): 195—199. (in Chinese with English abstract)
- [8] 李萍, 柴仲平, 武红旗, 等. 基于光谱的库尔勒香梨叶片氮素含量估算模型[J]. 经济林研究, 2013, 31(3): 48—53.  
Li Ping, Chai Zhongping, Wu Hongqi, et al. Prediction models for total nitrogen contention Korla fragrant pear leaves based on spectral[J]. Nonwood Forest Research, 2013, 31(3): 48—53. (in Chinese with English abstract)
- [9] 王植, 周连第, 李红, 等. 桃树叶片氮素含量的高光谱遥感监测[J]. 中国农学通报, 2011, 27(4): 85—90.  
Wang Zhi, Zhou Liandi, Li Hong, et al. Predicting nitrogen concentration in fresh peach leaf from hyper spectral remote sensing[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(4): 85—90. (in Chinese with English abstract)
- [10] 张福锁, 江荣风, 陈新平, 等. 测土配方施肥技术[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2011: 80.
- [11] 易秋香, 黄敬峰, 王秀珍, 等. 玉米全氮含量高光谱遥感估算模型研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(9): 138—143.  
Yi Qiuxiang, Huang Jingfeng, Wang Xiuzhen, et al. Hyperspectral remote sensing estimation models for nitrogen contents of maize[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transaction of the CSAE), 2006, 22(9): 138—143. (in Chinese with English abstract)
- [12] 浦瑞良, 宫鹏, 王秀珍, 等. 高光谱遥感及其应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010: 123—327.
- [13] 钟义山, 陈华豪. 关于材积表适用性 F 检验的一点讨论[J]. 林业资源管理, 1987, 1(1): 74—77.  
Zhong Yishan, Chen Huahao. Some discussions about the F test of volume table adaptive[J]. Forest Resource Management, 1987, 1(1): 74—77. (in Chinese with English abstract)
- [14] 吴仲贤. 生物统计[M]. 北京: 北京农业大学出版社, 1993: 192—266.
- [15] Petra M. Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants[M]. San Diego: Academic Press, 2012.
- [16] 高淑然, 潘存德, 王振锡, 等. 轮台白杏叶片光谱特征及对施肥的响应[J]. 新疆农业科学, 2011, 48(11): 1961—1966.  
Gao Shuran, Pan Cunde, Wang Zhenxi, et al. The leaf spectral characteristics of *Armeniaca vulgaris* cv. Luntaibaixing and it's response to the fertilize[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2011, 48(11): 1961—1966. (in Chinese with English abstract)
- [17] Suplick-Ploense M R, Alshammary S F, Qian Y L. Spectral reflectance response of three turf grasses to leaf dehydration[J]. Asian Journal of Plant Sciences, 2011, 10(1): 67—73.
- [18] 柴仲平, 陈波浪, 蒋平安, 等. 库尔勒香梨叶片全钾含量高光谱估算模型研究[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(1): 80—86.  
Chai Zhongping, Chen Bolang, Jiang Pingan, et al. Hyperspectral estimation models foe total potassium content of Kuerle Fragrant Pear leaves[J]. Chinese Journal of Ecological Agriculture, 2014, 22(1): 80—86. (in Chinese with English abstract)
- [19] 易秋香, 黄敬峰, 王秀珍, 等. 玉米叶绿素高光谱遥感估算模型研究[J]. 科技通报, 2007, 23(1): 83—87, 105.  
Yi Qiuxiang, Huang Jingfeng, Wang Xiuzhen, et al. Hyperspectral remote sensing estimation models for chlorophyll concentration in corn[J]. Bulletin of Science and Technology, 2007, 23(1): 83—87, 105. (in Chinese with English abstract)
- [20] Stroppiana D, Boschetti M, Brivio P A, et al. Plant nitrogen concentration in paddy rice from field canopy hyperspectral radiometry[J]. Field Crops Research, 2009, 111(1): 119—129.
- [21] 代辉, 胡春胜, 程一松, 等. 不同氮水平下冬小麦农学参数与光谱植被指数的相关性[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(4): 16—21.  
Dai Hui, Hu Chunsheng, Cheng Yisong, et al. Correlation between agronomic parameters and spectral vegetation index in winter wheat under different nitrogen levels[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2005, 23(4): 16—21. (in Chinese with English abstract)
- [22] 李修华, 李民赞, 崔笛. 基于光谱学原理的无损式作物冠层分析仪[J]. 农业机械学报, 2009, 40(增刊): 252—255.  
Li Xiuhua, Li Minzan, Cui Di. Non-destructive crop canopy analyzer based on spectral principle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(Suppl.): 252—255. (in Chinese with English abstract)
- [23] 朱西存, 赵庚星, 雷彤, 等. 苹果花期冠层光谱探测的规范化技术方法探讨[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(6): 1591—1595.

- Zhu Xicun, Zhao Gengxing, Lei Tong, et al. Standardization of technical methods for apple florescence canopy spectral detection[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010, 30(6): 1591-1595. (in Chinese with English abstract)
- [24] 丁永前, 朱艳, 李杨, 等. 基于主动光源的作物冠层反射光谱测量方法[J]. 农业机械学报, 2013, 44(12): 210—214. Ding Yongqian, Zhu Yan, Li Yang, et al. A method for measuring reflection spectrum of crop canopy based on active light source[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(12): 210—214. (in Chinese with English abstract)
- [25] 陈青青, 田永超, 顾凯健, 等. 基于多种光谱仪的水稻前期植株氮积累监测[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 223—229. Chen Qingqing, Tian Yongchao, Gu Kaijian, et al. Monitoring plant nitrogen accumulation with different canopy spectrometers at early growth stages in rice[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2011, 27(1): 223—229. (in Chinese with English abstract)
- [26] 王磊, 白由路. 基于光谱理论的作物营养诊断研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(6): 902—912. Wang Lei, Bai Youlu. Rerearch advance on plant nutrition diagnosis based on spectral theory[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2006, 12(6): 902—912. (in Chinese with English abstract)

## Spectral characteristic parameter-based models for foliar nitrogen concentration estimation of *Juglans regia*

Hu Zhenzhu, Pan Cunde<sup>\*</sup>, Xiao Bing, Pan Xin

(College of Forestry and Horticulture, Xinjiang Agricultural University, Key Laboratory of Forestry Ecology and Industry Technology in Arid Region, Education Department of Xinjiang, Urumqi 830052, China)

**Abstract:** With the establishment of the models based on spectral characteristic parameter for estimating foliar nitrogen concentrations of *Juglans regia* ‘Xinwen 185’, this paper aimed to explore spectral technical approaches to rapidly monitoring the foliar N nutritional status of *Juglans regia* ‘Xinwen 185’. Based on the field experiment of fertilizer efficiency, the foliar spectral reflectance and N concentrations of the foliar samples under different amounts of N fertilizer, which were applied in the fruit setting period, the fruit rapid-growth period, the fruit fat-change period and the fruit near-mature period, were measured separately with Unispec-SC and chemical analysis in the laboratory. The Pearson correlation analysis of the foliar spectral reflectance and foliar N element concentrations was done in the 4 phenological periods of fruit development, and the spectral characteristic parameters highly significantly correlated with the foliar spectral reflectance and foliar N element concentration were selected. Finally, the spectral characteristic parameter estimating models of the foliar N element concentration were established by employing regression analysis, with the adopted functions including power function, exponential function, semi-log function, linear function, quadratic function and cubic function, and then the independent sample was used to test the precision of the models, of which the one with the highest fitting degree was screened out. The results indicated that the spectral characteristic parameters, highly significantly correlated with the foliar N element concentration ( $P < 0.01$ ), were reflectance of the green peak position and ratio of red index in fruit setting period, yellow edge position, red valley position, ratio of green index, ratio of red index, normalized difference of green index and normalized difference of red index in the fruit fast-growing period, reflectance of the green peak position and ratio of red index in the fruit fat-change period, and reflectance of the green peak position, the spectra slope of yellow edge and red edge area in the fruit near-mature period. Moreover, the absolute values of the correlation coefficient were all greater than 0.96 in the 4 phenological periods of fruit development. Through cubic function analysis with the reflectance of the green peak position, yellow edge position, ratio of red index and the spectra slope of yellow edge as independent variables, the regression estimation models of the foliar N element concentration in the 4 phenological periods of fruit development were established respectively, and their fitting degrees  $R^2$  were all above 0.99. In addition, the predicted values for foliar N concentration of *Juglans regia* ‘Xinwen185’ were relatively close to measured values, and all the models were examined by the confidence ellipse test; and RMSE and the relative errors (RE) of the independent sample tests were only 0.4533 g/kg and 0.4403%, 0.7716 g/kg and -0.3390%, 0.8793 g/kg and -0.3201%, 0.8145 g/kg and -0.1229% separately in the 4 phenological periods of fruit development. The models showed their significant stability and high estimation accuracy. The findings in this paper manifested that it was feasible to monitor foliar N nutritional levels of *Juglans regia* ‘Xinwen 185’ in the 4 phenological periods of fruit development by establishing spectral characteristic parameter models of foliar N element concentration estimation. Spectrum technology possesses great application potential in monitoring N element nutritional status of *Juglans regia* ‘Xinwen 185’.

**Key words:** spectrometry; nitrogen; regression analysis; characteristic parameter; estimation model