

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.018

基于可见光-近红外光谱特征参数的苹果叶片氮含量预测

杨福芹¹ 冯海宽² 李振海² 杨贵军² 戴华阳³

(1. 河南工程学院土木工程学院, 郑州 451191; 2. 国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100097;
3. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083)

摘要: 苹果叶片氮素是反映苹果品质高低的营养元素之一。为了准确地估算苹果叶片全氮含量(LNC),从可见光-近红外区域的高光谱反射曲线中提取光谱特征参数,应用经验回归分析,实现了对苹果 LNC 的高光谱监测。研究表明,除了光谱特征曲线面积变量 $S_{\triangle EFG}$ 显著相关以及面积归一化植被指数 $(S_{\triangle CDE} - S_{\triangle FGH}) / (S_{\triangle CDE} + S_{\triangle FGH})$ 不相关外,其余光谱特征参数与苹果 LNC 都极显著相关,其中光谱特征曲线斜率 K_{ge} 、 K_{epv} ,光谱特征曲线面积 $S_{\triangle ABC}$ 、 $S_{\triangle BCD}$,面积比值植被指数 $S_{\triangle CDE} / S_{\triangle ABC}$ 、 $S_{\triangle CDE} / S_{\triangle BCD}$ 、 $S_{\triangle DEF} / S_{\triangle ABC}$,面积归一化植被指数 $(S_{\triangle CDE} - S_{\triangle ABC}) / (S_{\triangle CDE} + S_{\triangle ABC})$ 、 $(S_{\triangle CDE} - S_{\triangle BCD}) / (S_{\triangle CDE} + S_{\triangle BCD})$ 和 $(S_{\triangle DEF} - S_{\triangle ABC}) / (S_{\triangle DEF} + S_{\triangle ABC})$ 可以较好地描述 LNC 的动态变化,这些特征参数对苹果 LNC 进行估算是可行的。通过检验,最终确定基于 $S_{\triangle CDE} / S_{\triangle ABC}$ 、 $(S_{\triangle CDE} - S_{\triangle ABC}) / (S_{\triangle CDE} + S_{\triangle ABC})$ 和 $(S_{\triangle DEF} - S_{\triangle ABC}) / (S_{\triangle DEF} + S_{\triangle ABC})$ 所构建的模型为预测苹果 LNC 的理想模型。

关键词: 苹果; 高光谱遥感; 光谱特征; 叶片全氮含量

中图分类号: TP79; O657.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)09-0143-09

Prediction for Nitrogen Content of Apple Leaves Using Spectral Features Parameters from Visible and Near Infrared Lights

YANG Fuqin¹ FENG Haikuan² LI Zhenhai² YANG Guijun² DAI Huayang³

(1. College of Civil Engineering, Henan Institute of Engineering, Zhengzhou 451191, China

2. National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China

3. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: Apple nitrogen status is a key indicator for evaluating quality of apple fruits. In order to estimate total nitrogen content of apple leaves (LNC), a way was proposed to monitor LNC which extracted spectral characteristics parameters from hyperspectral reflectance in the visible and near infrared regions. Hyperspectral monitoring of LNC was realized by using empirical regression analysis. Results showed that the correlation between spectral parameters and leaf nitrogen content was good in whole growth period, the best spectral parameters were K_{ge} and $S_{\triangle ABC}$, respectively, the correlation coefficient was 0.85, the correlation between spectral parameters and leaf nitrogen content was bad, and a lot of spectral parameters were highly uncorrelated. Modeling results showed that the best model in the slope of the spectral characteristic curve was K_{ge} of Fuji apple, the determination coefficient was 0.76, the root mean square error was 0.28, the relative error was zero, the best model in spectral characteristic curve area was $S_{\triangle ABC}$ and $S_{\triangle BCD}$ of gala apple, the determination coefficient was all 0.76, the root mean square error was all 0.30, the relative error was all 0.01% and zero; the best model in area ratio vegetation index was $S_{\triangle CDE} / S_{\triangle BCD}$ and $S_{\triangle CDE} / S_{\triangle BCD}$ of Fuji apple and $S_{\triangle DEF} / S_{\triangle ABC}$ of Gala apple, the determination coefficient was 0.74, the root mean square error was all 0.35, the relative error was 0.01% and 0.02%, the best model in area normalized vegetation index was $(S_{\triangle CDE} - S_{\triangle BCD}) / (S_{\triangle CDE} + S_{\triangle BCD})$ in the whole growth period and $(S_{\triangle CDE} - S_{\triangle ABC}) / (S_{\triangle CDE} + S_{\triangle ABC})$ of Gala apple, the determination coefficient was all 0.73, the root mean square error was 0.36 and 0.31, and the relative error was zero

收稿日期: 2017-01-11 修回日期: 2017-03-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(41601346)、北京市自然科学基金项目(4141001)和国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2011AA100703)

作者简介: 杨福芹(1979—),女,讲师,博士,主要从事农业定量遥感研究,E-mail: yangfuqin0202@163.com

通信作者: 冯海宽(1982—),男,副研究员,主要从事农业遥感应用研究,E-mail: fenghaikuan123@163.com

and -0.01% . The best verification results was area ratio vegetation index $S_{\triangle CDE}/S_{\triangle ABC}$, the determination coefficient, the root mean square error and the relative error was 0.47, 0.34 and -3.78% in the whole growth period, respectively. The determination coefficient, the root mean square error and the relative error was 0.37, 0.34, 3.00% and 0.40, 0.38, 3.70% in Fuji and Gala apple varieties, respectively. The other spectral characteristic parameters were significantly correlated with the LNC except spectral characteristic area variable $S_{\triangle EFG}$ and normalized area vegetation index $(S_{\triangle CDE} - S_{\triangle FGH})/(S_{\triangle CDE} + S_{\triangle FGH})$, in which spectral characteristic curve slope K_{ge} and K_{gprv} , spectral characteristic area $S_{\triangle ABC}$ and $S_{\triangle BCD}$, area ratio vegetation index $S_{\triangle CDE}/S_{\triangle ABC}$, $S_{\triangle CDE}/S_{\triangle BCD}$ and $S_{\triangle DEF}/S_{\triangle ABC}$, normalized area vegetation index $(S_{\triangle CDE} - S_{\triangle ABC})/(S_{\triangle CDE} + S_{\triangle ABC})$, $(S_{\triangle CDE} - S_{\triangle BCD})/(S_{\triangle CDE} + S_{\triangle BCD})$ and $(S_{\triangle DEF} - S_{\triangle ABC})/(S_{\triangle DEF} + S_{\triangle ABC})$ can describe preferably dynamic changes of LNC and these characteristic parameters were feasible for prediction of LNC of apples. By the precision evaluation of estimation models, the algorithm model constructed by $S_{\triangle CDE}/S_{\triangle ABC}$, $S_{\triangle CDE}/S_{\triangle FGH}$ and $(S_{\triangle CDE} - S_{\triangle ABC})/(S_{\triangle CDE} + S_{\triangle ABC})$ was proved to be the best model for estimation of LNC of apples. The results showed that the characteristics of the hyperspectral curve can provide a new reference for monitoring nitrogen nutrition.

Key words: apple; hyperspectral remote sensing; spectral feature; leaf nitrogen concentration

引言

氮素是影响果树生长发育、产量和品质的营养元素之一,叶片组织结构内氮素的变化会引起叶片生理和形态的改变,光谱反射特性随氮素含量的变化而变化^[1]。因此,快速、实时和准确地监测果树叶片全氮含量(Leaf nitrogen concentration, LNC)的变化,对果树长势诊断和营养调控具有重要指导意义。利用高光谱手段对果树叶片生化参数进行快速、无损监测已成为评价果树生长状况的重要内容^[2-4]。邢东兴等^[5]建立了光谱反射率及其变换形式与苹果 LNC 的回归方程,筛选出了最优光谱反射率及其变换形式。李丙智等^[2]选定 723 nm 处的光谱反射率一阶微分值作为苹果 LNC 的最佳预测模型。朱西存等^[6]确定了基于 640 nm 和 676 nm 原始光谱反射率的苹果 LNC 的最佳预测模型。MENESATTI 等^[7]利用高光谱数据建立了塔罗科血橙和锦橙 LNC 的偏最小二乘法估算模型。ZHANG 等^[8]建立了近红外反射光谱与苹果 LNC 的多元线性回归方程。张瑶等^[9]利用小波包分析技术分析了不同生育期果树的光谱信息,利用提取的光谱信息建立了苹果 LNC 的多元线性回归模型。王凌等^[10]利用 TM 和 ALOS 影像,构建了对氮素敏感的光谱指数,结果表明采用支持向量机回归建立的氮素反演模型精度最优。黄双萍等^[11]以高光谱反射率为自变量,建立了柑橘 LNC 的偏最小二乘法和支持向量机回归模型。李萍等^[12]研究表明 720 nm 处的原始光谱和 703 nm 处的一阶微分构建的库尔勒香梨 LNC 估算模型最优。

目前利用高光谱手段监测作物氮含量的研究比较多^[13-15],但是对果树氮含量的定量化估算研究比较少。本研究以不同年份、不同品种的田间试验为

基础,通过分析苹果叶片光谱曲线特征,尝试对光谱特征参数进行定义,分析光谱曲线特征参数与 LNC 的响应关系,比较多种光谱特征参数估算 LNC 的效果,以期建立苹果 LNC 的最佳定量监测模型,为利用遥感技术进行作物长势与营养诊断提供理论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区在山东省肥城市潮泉镇下寨村国家农业信息化工程技术研究中心的 2 个示范基地果园,位于 $116^{\circ}50'22''E, 36^{\circ}14'01''N$ 。主栽品种为富士和嘎啦,于 2012 年选取 60 棵苹果树,其中富士品种 44 棵,嘎啦品种 16 棵,2013 年选取 36 棵苹果树,其中富士品种 27 棵,嘎啦品种 9 棵。在树冠 4 个方向及外围中部、当年延长枝中部分别取 8 片叶(带叶柄),在苹果的不同生育期进行叶片全氮含量(LNC)取样及光谱测定(光谱反射率)(表 1)。

表 1 试验测定数据的详细列表
Tab.1 Data acquired at each measured time

日期	富士生育期	嘎啦生育期	富士	嘎啦
			样本量	样本量
2012-05-10	春梢旺长期	春梢旺长期	44	16
2012-07-03	春梢停长期	春梢停长期	43	15
2012-08-10	果实膨大期	果实成熟期	44	16
2012-09-20	果实膨大期	叶变色期	43	16
2012-10-18	果实成熟期	叶变色期	44	16
2013-04-20	开花盛期	开花盛期	27	9
2013-05-25	春梢旺长期	春梢旺长期	27	9
2013-07-18	秋梢旺长期	秋梢旺长期	27	9
2013-08-30	果实膨大期	果实成熟期	27	9
2013-10-25	果实成熟期	叶变色期	27	9
总计			353	124

1.2 苹果叶片光谱测定

叶片光谱采用 FieldSpec® Pro FR 型光谱仪 (ASD Inc., Boulder, Colorado, USA) 和叶片夹 (ASD leaf clip) 进行测定。测量前用标准白板进行校正,在树冠 4 个方向各取 1 片叶片用于测量光谱,每片叶片测定 4 个不同位置,取 16 个光谱反射率平均值作为该颗苹果树的叶片反射率。光谱仪波段范围为 350 ~ 2 500 nm,波段均自动插值为 1 nm 间隔,光谱分辨率在 350 ~ 1 000 nm 内为 3 nm,在 1 000 ~ 2 500 nm 内为 10 nm,在 350 ~ 1 000 nm 范围内采样间隔为 1.4 nm,在 1 000 ~ 2 500 nm 范围内采样间隔为 2 nm。

1.3 苹果 LNC 测定

将打孔测量叶绿素后的 4 片苹果叶片和 28 片苹果叶片,在 105℃ 下杀青 30 min,然后将所有苹果叶片样品在 75℃ 下干燥 48 h 以上,直至恒质量再称量干质量。最后采用凯氏定氮仪 (Buchi B - 339, Switzerland) 对苹果 LNC 进行测定,不同品种苹果叶片氮含量描述性统计见表 2。

表 2 不同时间苹果叶片全氮含量描述性统计分析表

Tab.2 Descriptive statistical analysis of LNC in different periods

时间	样本数	最大值/(g·(100 g) ⁻¹)	最小值/(g·(100 g) ⁻¹)	均值/(g·(100 g) ⁻¹)	标准差/(g·(100 g) ⁻¹)
2012 年	297	3.78	1.84	2.91	0.44
2013 年	180	4.60	1.99	2.61	0.60

1.4 不同品种不同生育期叶片冠层反射率光谱曲线

图 1 为富士和嘎啦苹果在不同生育期叶片的反射光谱曲线。氮在可见光-近红外波段不存在特征吸收,氮的光谱特征实质上是由于氮素与叶绿素之间存在强相关,进而通过叶绿素吸收表达的。在可见光波段(390 ~ 780 nm),叶片(主要是叶绿素)对红光和蓝光具有强烈吸收作用,对绿光具有弱吸收作用,形成了典型的绿峰反射光谱曲线;在近红外波段(780 ~ 1 050 nm),由于叶片的多重反射,反射率

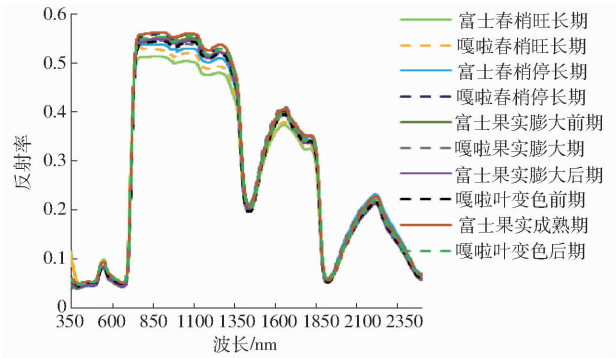


图 1 不同品种、不同生育期苹果叶片反射光谱曲线
Fig.1 Reflectance spectrum curves of apple leaf from different varieties and growth stages

急速增加,形成了典型的可见光红谷和近红外高反射平台光谱曲线。根据叶片光谱曲线的吸收反射特性,提出了反射光谱曲线的不同波段范围内的斜率、面积和植被指数变量等新特征变量。

1.5 光谱参数定义

苹果叶片反射率的光谱特征反映了氮素的吸收和反射特征(图 2)^[16-18],根据光谱特征曲线斜率、光谱特征曲线面积、面积比值植被指数、归一化面积植被指数构建了苹果 LNC 的 21 个光谱特征,其定义的新变量如表 3 所示。

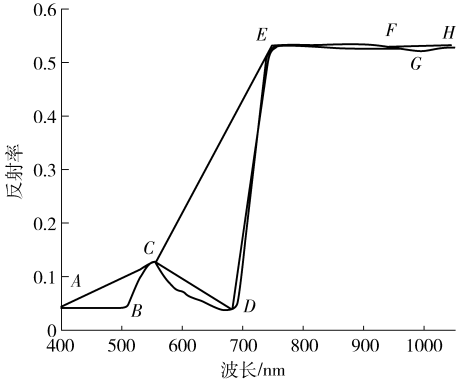


图 2 苹果叶片反射光谱曲线

Fig.2 Reflectance spectra curves of apple leaves

1.6 统计分析

选取决定系数(R^2)、均方根误差(RMSE)、相对误差(RE)作为评价建模与验证精度的指标。 R^2 表示模拟值与实测值的拟合程度, R^2 越接近于 1,表明该拟合曲线精度越高;RMSE 和 RE 反映了模拟值与实测值的偏离程度,其值越小,模型精度越高。

2 结果与分析

2.1 光谱特征参数与 LNC 的相关性

利用 2013 年采集的 180 片苹果叶片(富士品种 135 片叶片,嘎啦品种 45 片叶片)全氮含量及对应的光谱数据,建立不同生育期和全生育期光谱特征参数与 LNC 的相关性,结果见表 4。由表 4 可以看出,同一光谱特征参数与 LNC 在不同生育期相关性差别较大,甚至同一个光谱参数在不同生育期与 LNC 不相关、显著相关($p < 0.05$)和极显著相关($p < 0.01$)都有可能。光谱特征曲线斜率与 LNC 在全生育期都达到了极显著相关,不同品种中除了 K_{pb} 与嘎啦不相关之外,其余均极显著相关,其中相关性最好的光谱特征曲线斜率是 500 ~ 550 nm 绿光波段光谱曲线斜率 K_{ge} ,其相关系数是 0.86,相关性最差的是 680 ~ 760 nm 红边波段光谱曲线斜率 K_{re} ,其相关系数是 0.24;光谱特征曲线面积与 LNC 在全生育期及不同品种的相关性,除 $S_{\Delta EFG}$ 不相关外,其他都达到了显著或极显著相关,相关性最好的曲线面积是

表 3 光谱特征曲线参数定义		
Tab.3 Definition of parameters from spectral curves		
类型	光谱参数	定义
光谱特征曲线斜率	K_{pb}	400 ~ 500 nm 蓝光所在波段光谱曲线斜率 k_{AB}
	K_{ge}	500 ~ 550 nm 绿光波段光谱曲线斜率 k_{BC}
	K_{gprv}	绿峰到红谷 550 ~ 680 nm 波段光谱曲线斜率 k_{CD}
	K_{re}	680 ~ 760 nm 红边波段光谱曲线斜率 k_{DE}
	K_{nir1}	760 ~ 910 nm 波段光谱曲线斜率 k_{EF}
	K_{nir2}	910 ~ 960 nm 波段光谱曲线斜率 k_{FG}
	K_{nir3}	960 ~ 1 050 nm 波段光谱曲线斜率 k_{GH}
光谱特征曲线面积	$S_{\triangle ABC}$	400 ~ 500 nm 与 500 ~ 550 nm 波段光谱曲线围成的面积
	$S_{\triangle BCD}$	500 ~ 550 nm 与 550 ~ 680 nm 波段光谱曲线围成的面积
	$S_{\triangle CDE}$	550 ~ 680 nm 与 680 ~ 760 nm 波段光谱曲线围成的面积
	$S_{\triangle DEF}$	680 ~ 760 nm 与 760 ~ 910 nm 波段光谱曲线围成的面积
	$S_{\triangle EFG}$	760 ~ 910 nm 与 910 ~ 960 nm 波段光谱曲线围成的面积
	$S_{\triangle FGH}$	910 ~ 960 nm 与 960 ~ 1 050 nm 波段光谱曲线围成的面积
	$S_{\triangle CDE}/S_{\triangle ABC}$	面积比值植被指数
植被指数变量	$S_{\triangle CDE}/S_{\triangle BCD}$	
	$S_{\triangle CDE}/S_{\triangle FGH}$	
	$S_{\triangle DEF}/S_{\triangle ABC}$	
	$(S_{\triangle CDE} - S_{\triangle ABC})/(S_{\triangle CDE} + S_{\triangle ABC})$	面积归一化植被指数
	$(S_{\triangle CDE} - S_{\triangle BCD})/(S_{\triangle CDE} + S_{\triangle BCD})$	
	$(S_{\triangle CDE} - S_{\triangle FGH})/(S_{\triangle CDE} + S_{\triangle FGH})$	
	$(S_{\triangle DEF} - S_{\triangle ABC})/(S_{\triangle DEF} + S_{\triangle ABC})$	

表 4 LNC 与相关光谱参数变量之间的相关系数								
Tab.4 Correlation coefficients between LNC and spectral features								
光谱变量	开花盛期 ($n = 36$)	春梢旺长 ($n = 36$)	秋梢旺长 ($n = 36$)	果实膨大 ($n = 36$)	果实成熟 ($n = 36$)	富士 ($n = 135$)	嘎啦 ($n = 45$)	全生育期 ($n = 180$)
K_{pb}	-0.44 **	0.33 **	0.44 **	0.15 *	0.31 **	0.53 **	0.03 ^{NS}	0.37 **
K_{ge}	-0.21 **	0.05 ^{NS}	0.28 **	-0.12 ^{NS}	-0.08 ^{NS}	0.86 **	0.83 **	0.85 **
K_{gprv}	0.17 *	-0.05 ^{NS}	-0.04 ^{NS}	0.15 *	0.03 ^{NS}	-0.84 **	-0.84 **	-0.84 **
K_{re}	-0.05 ^{NS}	0.36 **	0.28 **	0.17 *	-0.11 ^{NS}	0.45 **	0.24 ^{NS}	0.40 **
K_{nir1}	-0.08 ^{NS}	0.39 **	-0.18 *	0.11 ^{NS}	0.43 **	-0.57 **	-0.63 **	-0.58 **
K_{nir2}	-0.42 **	-0.08 ^{NS}	-0.02 ^{NS}	-0.20 **	0.55 **	-0.61 **	-0.72 **	-0.64 **
K_{nir3}	-0.15 *	0.02 ^{NS}	-0.32 **	0.24 **	0.13 ^{NS}	-0.32 **	-0.37 **	-0.32 **
$S_{\triangle ABC}$	-0.13 ^{NS}	-0.04 ^{NS}	0.12 ^{NS}	-0.21 **	-0.15 *	0.85 **	0.85 **	0.85 **
$S_{\triangle BCD}$	-0.20 **	0.05 ^{NS}	0.21 **	-0.13 ^{NS}	-0.07 ^{NS}	0.85 **	0.84 **	0.84 **
$S_{\triangle CDE}$	-0.13 ^{NS}	0.37 **	0.26 **	0.12 ^{NS}	-0.10 ^{NS}	0.74 **	0.63 **	0.71 **
$S_{\triangle DEF}$	-0.05 ^{NS}	0.35 **	0.31 **	0.15 *	-0.17 *	0.57 **	0.41 **	0.53 **
$S_{\triangle EFG}$	0.32 **	0.23 **	-0.15 *	0.19 *	0.07 ^{NS}	-0.18 *	-0.12 ^{NS}	-0.15 *
$S_{\triangle FGH}$	0.17 *	0.06 ^{NS}	-0.26 **	0.28 **	-0.18 *	0.19 *	0.37 **	0.24 **
$S_{\triangle CDE}/S_{\triangle ABC}$	0.12 ^{NS}	0.12 ^{NS}	-0.07 ^{NS}	0.26 **	0.16 *	-0.84 **	-0.85 **	-0.83 **
$S_{\triangle CDE}/S_{\triangle BCD}$	0.23 **	0.05 ^{NS}	-0.19 *	0.18 *	0.06 ^{NS}	-0.84 **	-0.86 **	-0.84 **
$S_{\triangle CDE}/S_{\triangle FGH}$	0.20 **	0.01 ^{NS}	-0.29 **	0.28 **	-0.15 *	0.03 ^{NS}	0.24 ^{NS}	-0.83 **
$S_{\triangle DEF}/S_{\triangle ABC}$	0.13 ^{NS}	0.11 ^{NS}	-0.06 ^{NS}	0.26 **	0.15 *	-0.84 **	-0.85 **	-0.84 **
$(S_{\triangle CDE} - S_{\triangle ABC})/(S_{\triangle CDE} + S_{\triangle ABC})$	0.12 ^{NS}	0.15 *	-0.07 ^{NS}	0.27 **	0.15 *	-0.84 **	-0.85 **	-0.84 **
$(S_{\triangle CDE} - S_{\triangle BCD})/(S_{\triangle CDE} + S_{\triangle BCD})$	0.20 **	0.06 ^{NS}	-0.19 *	0.19 *	0.06 ^{NS}	-0.85 **	-0.85 **	-0.84 **
$(S_{\triangle CDE} - S_{\triangle FGH})/(S_{\triangle CDE} + S_{\triangle FGH})$	-0.20 **	-0.01 ^{NS}	0.29 **	-0.28 **	0.15 *	-0.03 ^{NS}	-0.24 ^{NS}	-0.09 ^{NS}
$(S_{\triangle DEF} - S_{\triangle ABC})/(S_{\triangle DEF} + S_{\triangle ABC})$	0.12 ^{NS}	0.14 ^{NS}	-0.05 ^{NS}	0.27 **	0.13 ^{NS}	-0.84 **	-0.85 **	-0.83 **

注：**表示极显著($p < 0.01$), * 表示显著($p < 0.05$), NS 表示不相关。

400 ~ 500 nm 与 500 ~ 550 nm 波段光谱曲线所围成的面积 $S_{\triangle ABC}$,其相关系数均为 0.85,相关性最差的是 910 ~ 960 nm 与 960 ~ 1 050 nm 波段光谱曲线所围成的面积 $S_{\triangle FGH}$,与富士的相关系数是 0.19;面积

比值植被指数与 LNC 在全生育期均达到了极显著相关,其中不同品种中除 $S_{\triangle CDE}/S_{\triangle FGH}$ 没达到显著相关外,其余都达到了极显著相关,其相关系数最小值为 0.83;面积归一化植被指数与 LNC 的相关性,除

$(S_{\triangle CDE} - S_{\triangle FGH}) / (S_{\triangle CDE} + S_{\triangle FGH})$ 与 LNC 在全生育期和不同品种不相关外,其他植被指数都达到了极显著相关,相关系数最小值为 0.83。

2.2 苹果 LNC 估算模型的建立

利用 2013 年采集的 180 片苹果叶片 LNC 及相应的光谱数据,根据表 4 中光谱特征与 LNC 的相关性分析结果,选择相关系数绝对值较大的光谱特征构建苹果 LNC 估算模型,估算模型以线性、多项式、对数为主。由表 5 可知,这些光谱特征对苹果叶片 LNC 均具有较好的估算精度,其中富士和嘎啦估算模型的 RE 接近,但是富士的 RMSE 均小于嘎啦的 RMSE。光谱特征曲线斜率中估算模型较好的是富士苹果的 K_{ge} ,其 R^2 为 0.76, RMSE 为 0.28 g/(100 g), RE 为 0;光谱特征曲线面积中估算模型较好的是全生育期的 $S_{\triangle ABC}$ 和 $S_{\triangle BCD}$,其 R^2 均为 0.76, RMSE 均

为 0.30 g/(100 g), RE 分别为 0.01% 和 0;面积比值植被指数中估算模型较好的是嘎啦苹果的 $S_{\triangle CDE} / S_{\triangle ABC}$ 、 $S_{\triangle CDE} / S_{\triangle BCD}$ 和 $S_{\triangle DEF} / S_{\triangle ABC}$,其 R^2 均为 0.74, RMSE 均为 0.35 g/(100 g), RE 分别为 -0.01%、0.01% 和 0.02%;面积归一化植被指数中估算模型较好的是嘎啦苹果的 $(S_{\triangle CDE} - S_{\triangle ABC}) / (S_{\triangle CDE} + S_{\triangle ABC})$ 和全生育期的 $(S_{\triangle CDE} - S_{\triangle BCD}) / (S_{\triangle CDE} + S_{\triangle BCD})$,其 R^2 均为 0.73, RMSE 分别为 0.36、0.31 g/(100 g), RE 分别为 0 和 -0.01%。结果表明,本文提出的光谱曲线特征变量参数可以不受不同品种的影响而较好地描述苹果 LNC。

2.3 苹果 LNC 估算模型的验证

为了考察模型的精度和可靠性,使用 2012 年 297 个苹果叶片样本(富士苹果 218 片叶片,嘎啦苹果 79 片叶片)的 LNC 及相应的光谱数据进行验证。

表 5 苹果 LNC 与不同光谱参数的定量关系
Tab.5 Quantitative relationships between apple LNC and spectral features

光谱类型	光谱参数	全生育期 (n = 180)	R^2	RMSE/ (g·(100 g) ⁻¹)	RE/%
		富士 (n = 135) 嘎啦 (n = 45)			
光谱特征曲线斜率	K_{ge}	$y = 1.5216 \ln x + 13.642$	0.75	0.30	0.02
		$y = 1.4636 \ln x + 13.248$	0.76	0.28	0
		$y = 1.6693 \ln x + 14.64$	0.74	0.35	-0.01
	K_{gprv}	$y = 3370.2x + 1.7086$	0.70	0.33	0
		$y = -3229.7x + 1.7814$	0.71	0.30	0
		$y = -3751.8x + 1.4999$	0.70	0.37	0
光谱特征曲线面积变量	$S_{\triangle ABC}$	$y = -0.1642x^2 + 1.5382x + 0.4148$	0.76	0.30	0.01
		$y = 1.4832 \ln x + 1.826$	0.75	0.28	0
		$y = 1.714 \ln x + 1.533$	0.75	0.34	0
	$S_{\triangle BCD}$	$y = -0.0469x^2 + 0.8149x + 0.4718$	0.76	0.30	0
		$y = 1.4533 \ln x + 0.9498$	0.75	0.28	0
		$y = 1.6664 \ln x + 0.5973$	0.74	0.34	0
面积比值植被指数	$S_{\triangle CDE} / S_{\triangle ABC}$	$y = 0.0066x^2 - 0.3114x + 6.14$	0.72	0.32	-0.36
		$y = -1.604 \ln x + 7.3672$	0.72	0.30	-0.02
		$y = -1.839 \ln x + 7.8598$	0.74	0.35	-0.01
	$S_{\triangle CDE} / S_{\triangle BCD}$	$y = 0.0177x^2 - 0.5038x + 5.9009$	0.73	0.31	0.11
		$y = -1.59 \ln x + 6.3445$	0.73	0.30	0.01
		$y = -0.2429x + 5.0211$	0.74	0.35	0.01
	$S_{\triangle DEF} / S_{\triangle ABC}$	$y = 0.0141x^2 - 0.4372x + 5.7234$	0.73	0.31	-0.02
		$y = -1.518 \ln x + 7.2401$	0.72	0.30	0.02
		$y = -1.743 \ln x + 7.7259$	0.74	0.35	0.02
	$(S_{\triangle CDE} - S_{\triangle ABC}) / (S_{\triangle CDE} + S_{\triangle ABC})$	$y = -55.419x^2 + 81.348x - 25.736$	0.72	0.32	-0.03
		$y = -11.695x + 13.186$	0.71	0.30	-0.01
		$y = -13.307x + 14.437$	0.73	0.36	0
面积归一化植被指数	$(S_{\triangle CDE} - S_{\triangle BCD}) / (S_{\triangle CDE} + S_{\triangle BCD})$	$y = -22.152x^2 + 24.984x - 2.9664$	0.73	0.31	-0.01
		$y = -7.127x + 8.517$	0.72	0.30	0
		$y = -8.1295x + 9.1958$	0.72	0.36	0
	$(S_{\triangle DEF} - S_{\triangle ABC}) / (S_{\triangle DEF} + S_{\triangle ABC})$	$y = -62.203x^2 + 93.706x - 31.222$	0.72	0.32	-0.01
		$y = -11.531x + 13.13$	0.71	0.31	0
		$y = -13.138x + 14.393$	0.72	0.36	-0.02

验证结果如表 6 所示。由表 6 可以看出,基于可见光-近红外高光谱特征的苹果 LNC 验证结果都达到了显著相关,其中富士苹果和嘎啦苹果估算模型的 RE 接近,但是富士的 RMSE 均小于嘎啦的 RMSE。验证结果最好的是面积比值植被指数 $S_{\triangle CDE}/S_{\triangle ABC}$,在全生育期的 R^2 、RMSE 和 RE 分别为 0.47、0.34 g/(100 g) 和 -3.78%,富士品种的 R^2 、RMSE 和 RE 分别为 0.37、0.34 g/(100 g) 和 3.00%,嘎啦品种的 R^2 、RMSE 和 RE 分别为 0.40、0.38 g/(100 g) 和 3.70%;其次是面积归一化植被指数 $(S_{\triangle CDE} - S_{\triangle ABC})/(S_{\triangle CDE} + S_{\triangle ABC})$ 和 $(S_{\triangle DEF} - S_{\triangle ABC})/(S_{\triangle DEF} + S_{\triangle ABC})$,二者全生育期的 R^2 、RMSE、RE 分别为 0.44、0.35 g/(100 g)、-3.64% 和 0.39 g/(100 g)、0.35、-2.63%,富士品种的 R^2 、RMSE、RE 分别为 0.41、0.33 g/(100 g)、3.00% 和 0.40、0.33 g/(100 g)、2.80%,嘎啦品种的 R^2 、RMSE、RE 分别为 0.43、0.38 g/(100 g)、2.65% 和 0.41、0.38 g/(100 g)、2.33%;验证结果最差的是 500 ~ 550 nm 绿光波段光谱曲线斜率 K_{gprv} ,全生育期的 R^2 、RMSE 和 RE 分

别为 0.17、0.42 g/(100 g)、-5.34%,富士品种的 R^2 、RMSE 和 RE 分别为 0.19、0.38 g/(100 g) 和 -1.93%,嘎啦品种的 R^2 、RMSE 和 RE 分别为 0.10、0.45 g/(100 g) 和 -1.66%。由于 R^2 除了与精度有关,也与样本量有关,而估算模型的样本是 180 个,验证样本是 297 个,验证的样本量远大于建模的样本量,所以验证的 R^2 小于建模的 R^2 ;验证模型的 RMSE 与估算模型的 RMSE 接近,说明模型的稳定性较好,预测能力较高。虽然验证模型的 RE 稍大于估算模型的 RE,但是都小于 10%,表明模型拟合效果极好。综合考虑利用可见光-近红外高光谱特征估算苹果 LNC 的建模和验证精度,最终选取面积比值植被指数 $S_{\triangle CDE}/S_{\triangle ABC}$ 、面积归一化植被指数 $(S_{\triangle CDE} - S_{\triangle ABC})/(S_{\triangle CDE} + S_{\triangle ABC})$ 和 $(S_{\triangle DEF} - S_{\triangle ABC})/(S_{\triangle DEF} + S_{\triangle ABC})$ 作为苹果叶片 LNC 的最佳预测模型,如图 3 所示。

3 讨论

本文提出的光谱特征曲线斜率、光谱特征曲线

表 6 苹果 LNC 估算模型验证结果 (n = 297)
Tab.6 Validation results of apple LNC estimation model

光谱参数	类别	R^2	RMSE/(g·100 g ⁻¹)	RE/%
K_{ge}	全生育期 (n = 297)	0.24	0.4	-5.14
	富士 (n = 218)	0.26	0.37	-3.40
	嘎啦 (n = 79)	0.16	0.44	-1.45
K_{gprv}	全生育期	0.17	0.42	-5.34
	富士	0.19	0.38	-1.93
	嘎啦	0.10	0.45	-1.66
$S_{\triangle ABC}$	全生育期	0.35	0.36	-2.13
	富士	0.34	0.35	2.39
	嘎啦	0.30	0.40	3.14
$S_{\triangle BCD}$	全生育期	0.23	0.42	-5.81
	富士	0.24	0.37	-3.37
	嘎啦	0.14	0.44	-1.74
$S_{\triangle CDE}/S_{\triangle ABC}$	全生育期	0.47	0.34	-3.78
	富士	0.37	0.34	3.00
	嘎啦	0.40	0.38	3.70
$S_{\triangle CDE}/S_{\triangle BCD}$	全生育期	0.31	0.39	-5.68
	富士	0.26	0.40	-5.37
	嘎啦	0.25	0.42	-2.31
$S_{\triangle DEF}/S_{\triangle ABC}$	全生育期	0.29	0.4	-5.82
	富士	0.36	0.34	2.81
	嘎啦	0.38	0.38	3.46
$(S_{\triangle CDE} - S_{\triangle ABC})/(S_{\triangle CDE} + S_{\triangle ABC})$	全生育期	0.40	0.35	-2.55
	富士	0.41	0.33	3.00
	嘎啦	0.43	0.38	2.65
$(S_{\triangle CDE} - S_{\triangle BCD})/(S_{\triangle CDE} + S_{\triangle BCD})$	全生育期	0.29	0.41	-6.47
	富士	0.31	0.35	-1.64
	嘎啦	0.25	0.41	-1.00
$(S_{\triangle DEF} - S_{\triangle ABC})/(S_{\triangle DEF} + S_{\triangle ABC})$	全生育期	0.39	0.35	-2.63
	富士	0.40	0.33	2.80
	嘎啦	0.41	0.38	2.33

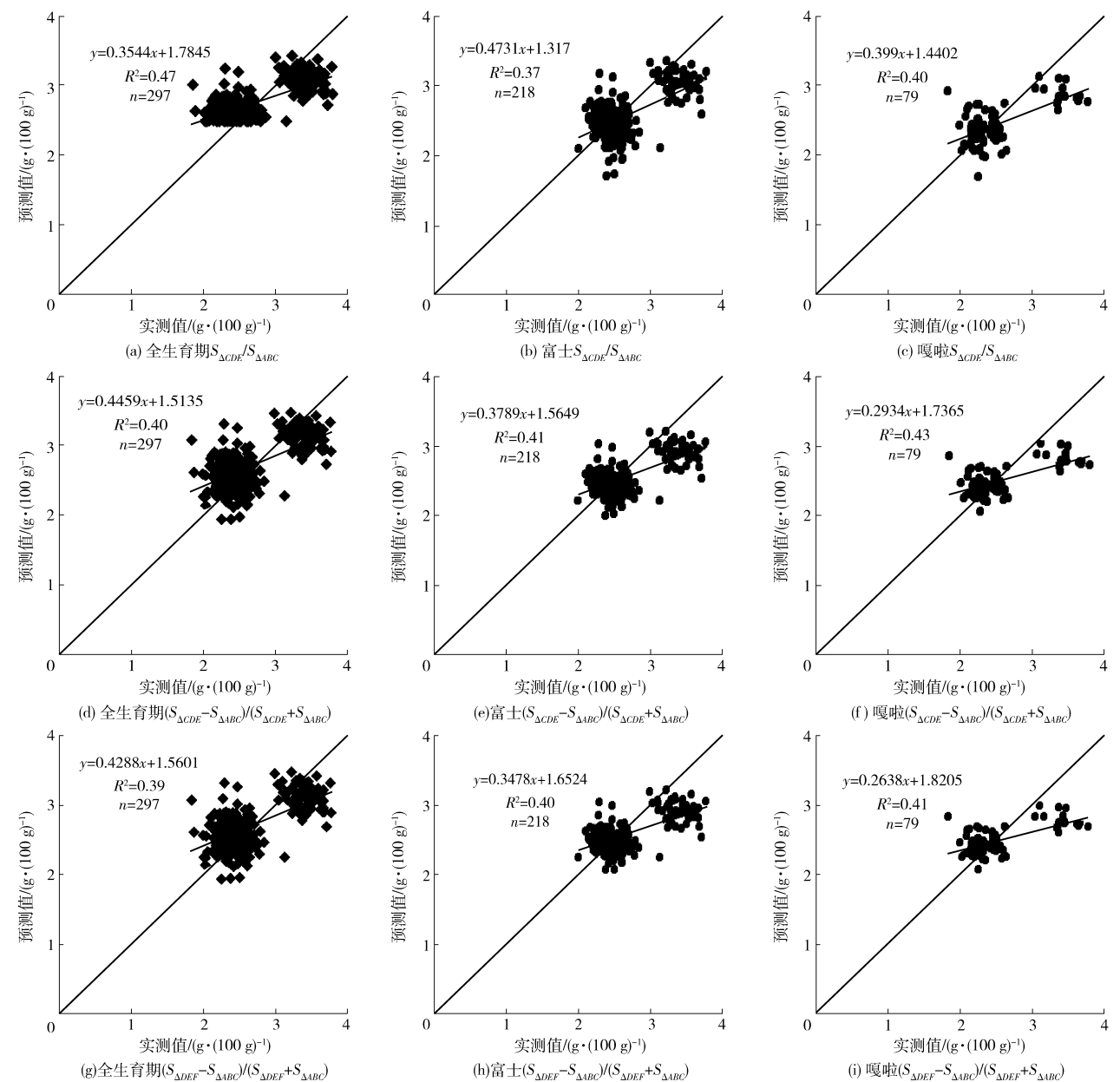


图 3 苹果叶片全氮含量预测值和实测值比较

Fig. 3 Comparisons of predicted and measured apple LNC

面积、面积比值植被指数和面积归一化植被指数,利用分段技术对分段范围内的所有波长反射率信息进行了简化和浓缩,同时也利用了所有波长的光谱信息,波段的累加效应提高了反演模型的精度,增加了抗环境干扰能力,与单个或几个敏感波段的反演模型相比,稳定性大大提高。 K_{ge} 、 K_{gprv} 、 $S_{\Delta ABC}$ 和 $S_{\Delta BCD}$ 与苹果 LNC 的相关性比其他的光谱特征曲线斜率和光谱特征曲线面积都要高很多,这主要是由于 K_{ge} 、 K_{gprv} 、 $S_{\Delta ABC}$ 和 $S_{\Delta BCD}$ 充分利用了可见光区的光谱曲线信息,而可见光波段的光谱特性主要是受各种色素,特别是受叶绿素的控制,而氮素与叶绿素含量相关^[19-20],所以很多氮素估算模型利用叶绿素在可见光波段的吸收特性设计^[21-22]。面积比值植被指数和面积归一化植被指数除 $(S_{\Delta CDE} - S_{\Delta FGH})/$

$(S_{\Delta CDE} + S_{\Delta FGH})$ 外,其余植被指数与苹果 LNC 均表现出较好的相关性,这是由于植被指数归一化后有利于降低仪器本身和其它干扰源的影响,消除了反射光谱特征的比例变化,增强了对被观测目标的光谱响应^[23-25]。面积比值植被指数相对于光谱特征曲线斜率和光谱特征曲线面积,增强了植被与土壤背景之间的辐射差异^[26]。

另外,本研究中还有一些不足之处,由于气候原因,2013 年的生育期与 2012 年的生育期不完全一致,导致验证模型的相对误差值与估算模型相比偏大,且氮素含量较大时实测值普遍大于预测值。今后应积累更多的试验数据,设置不同水分和氮素水平,研究可见光-近红外光谱特征参数估算苹果叶片氮含量的潜力,为利用高光谱技术进行大面积果树

氮营养诊断提供理论依据。

4 结 论

(1)根据苹果叶片高光谱的吸收和反射特征,定义了光谱特征曲线斜率、光谱特征曲线面积、面积比值植被指数和面积归一化植被指数,并与不同生育期、不同品种苹果 LNC 进行了相关性分析,结果表明单一生育期相关性较差,全生育期除了光谱特征曲线面积 $S_{\triangle EFG}$ 显著相关以及面积归一化植被指数 $(S_{\triangle CDE} - S_{\triangle FGH}) / (S_{\triangle CDE} + S_{\triangle FGH})$ 不相关外,其余光谱特征与苹果 LNC 均极显著相关,不同品种苹果

除了 $S_{\triangle CDE} / S_{\triangle FGH}$ 、 $(S_{\triangle CDE} - S_{\triangle FGH}) / (S_{\triangle CDE} + S_{\triangle FGH})$ 、 $S_{\triangle EFG}$ 、 K_{pb} 、 K_{re} 不相关和 $S_{\triangle FGH}$ 相关性较差外,其余都达到了极显著相关。

(2)利用线性或非线性回归方法建立苹果 LNC 估算模型。研究表明,光谱曲线特征建立的苹果 LNC 估算模型都有较好的预测能力,不受品种影响的限制,验证模型中以面积比值植被指数 $S_{\triangle CDE} / S_{\triangle ABC}$ 、面积归一化植被指数 $(S_{\triangle CDE} - S_{\triangle ABC}) / (S_{\triangle CDE} + S_{\triangle ABC})$ 和 $(S_{\triangle DEF} - S_{\triangle ABC}) / (S_{\triangle DEF} + S_{\triangle ABC})$ 为最优。结果表明定义的高光谱曲线特征可以为监测氮营养提供一种新的方法。

参 考 文 献

1 MIPHOKASAP P, HONDA K, VAIPHASA C, et al. Estimating canopy nitrogen concentration in sugarcane using field imaging spectroscopy[J]. Remote Sensing, 2012, 4(6): 1651 – 1670.

2 李丙智, 李敏夏, 周璇, 等. 苹果树叶片全氮含量高光谱估算模型研究[J]. 遥感学报, 2010, 14(4): 761 – 773. LI Bingzhi, LI Minxia, ZHOU Xuan, et al. Hyperspectral estimation models for nitrogen contents of apple leaves[J]. Journal of Remote Sensing, 2010, 14(4): 761 – 773. (in Chinese)

3 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.

4 YAO X, ZHU Y, TIAN Y C, et al. Exploring hyperspectral bands and estimation indices for leaf nitrogen accumulation in wheat[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2010, 12(2): 89 – 100.

5 邢东兴, 常庆瑞. 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[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2009, 37(2): 141 – 147. XING Dongxing, CHANG Qingrui. Research on predicting the Fe, Mn, Cu, Zn contents in fruit trees' fresh leaves by spectral analysis—red Fuji apple tree as an example[J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2009, 37(2): 141 – 147. (in Chinese)

6 朱西存, 赵庚星, 王凌, 等. 基于高光谱的苹果花氮素含量预测模型研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(2): 416 – 420. ZHU Xicun, ZHAO Gengxing, WANG Ling, et al. Hyperspectrum based prediction model for nitrogen content of apple flowers[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010, 30(2): 416 – 420. (in Chinese)

7 MENESATTI P, ANTONUCCI F, PALLOTTINO F, et al. Estimation of plant nutritional status by Vis – NIR spectrophotometric analysis on orange leaves [Citrus sinensis (L) Osbeck cv Tarocco][J]. Biosystems Engineering, 2010, 105(4): 448 – 454.

8 ZHANG G C, LI Z, YAN X M, et al. Rapid analysis of apple leaf nitrogen using near infrared spectroscopy and multiple linear regression[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2012, 43(13): 1768 – 1772.

9 张瑶, 郑立华, 李民赞, 等. 基于光谱学原理与小波包分解技术预测苹果树叶片氮素含量[J]. 农业工程学报, 2013, 29(增刊): 101 – 108. ZHANG Yao, ZHENG Lihua, LI Minzan, et al. Predicting apple tree leaf nitrogen content based on hyperspectral and wavelet packet analysis[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(Supp.): 101 – 108. (in Chinese)

10 王凌, 赵庚星, 朱西存, 等. 花期苹果树冠氮素营养状况的卫星遥感反演[J]. 应用生态学报, 2013, 24(10): 2863 – 2870. WANG Ling, ZHAO Gengxing, ZHU Xicun, et al. Satellite remote sensing retrieval of canopy nitrogen nutritional status of apple trees at blossom stage[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(10): 2863 – 2870. (in Chinese)

11 黄双萍, 洪添胜, 岳学军, 等. 基于高光谱的柑橘叶片磷含量估算模型实验[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(4): 202 – 207. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20130435&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.04.035.

HUANG Shuangping, HONG Tiansheng, YUE Xuejun, et al. Hyperspectral estimation model of total phosphorus content for citrus leaves[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(4): 202 – 207. (in Chinese)

12 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 content in Korla fragrant pear leaves based on spectra[J]. Nonwood Forest Research, 2013, 31(3): 48 – 53. (in Chinese)

13 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]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 1993, 19(增刊): 7 – 14.

WANG Renchao, CHEN Mingzhen, JIANG Hengxian. Studies on agronomic mechanism of the rice yield estimation by remote sensing: 1. the rice reflectance characteristics of different nitrogen levels and the selection of their sensitive bands[J]. Journal of Zhejiang Agricultural University: Agriculture and Life Science Edition, 1993, 19(Supp.): 7 – 14. (in Chinese)

14 周启发, 王人潮. 水稻氮素营养水平与光谱特性的关系[J]. 浙江农业大学学报, 1993, 19(增刊): 40 – 45.

ZHOU Qifa, WANG Renchao. A preliminary study on the relationship between the nitrogen levels and the spectral characteristics of early rice leaves[J]. Journal of Zhejiang Agricultural University, 1993, 19(Supp.): 40 – 45. (in Chinese)

15 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 Lihong, CAO Weixing, LUO Weihong, et al. Correlation between leaf nitrogen status and canopy spectral characteristics in wheat[J]. Acta Phytocologica Sinica, 2004, 28(2): 172 – 177. (in Chinese)

16 徐新刚, 赵春江, 王纪华, 等. 基于可见光-近红外新光谱特征和最优组合原理的大麦叶片氮含量监测[J]. 红外与毫米波学报, 2013, 32(4): 351 – 358.

XU Xin'gang, ZHAO Chunjiang, WANG Jihua, et al. Associating new spectral features from visible and near infrared regions with optimal combination principle to monitor leaf nitrogen concentration in barley[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2013, 32(4): 351 – 358. (in Chinese)

17 ROUSE J J W, RAAS R H, SCHEII J A, et al. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS[C] // Proceedings of the 3rd ERTS Symposium NASASP – 3H, 1973: 309 – 317.

18 PEARSON R L. Remote mapping of standing crop biomass for estimation of the productivity of the shortgrass prairie[J]. Remote Sensing of Environment, VIII. 1972, 45(2): 7 – 12.

19 JONGSCHAAP R E E, BOOIJ R. Spectral measurements at different spatial scales in potato: relating leaf, plant and canopy nitrogen status[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2004, 5(3): 205 – 218.

20 BOTHA E J, ZEBARTH B J, LEBLON B. Non-destructive estimation of potato leaf chlorophyll and protein contents from hyperspectral measurements using the PROSPECT radiative transfer model[J]. Canadian Journal of Plant Science, 2006, 86(1): 279 – 291.

21 HANSEN P M, SCHJOERRING J K. Reflectance measurement of canopy biomass and nitrogen status in wheat crops using normalized difference vegetation indices and partial least squares regression[J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 86(4): 542 – 553.

22 CHEN P, HABOUDANE D, TREMBLAY N, et al. New index for estimating crop nitrogen concentration using hyperspectral data [J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(9): 1987 – 1997.

23 HUETE A R, JACKSON R D, POST D F. Spectral response of a plant canopy with different soil backgrounds[J]. Remote Sensing of Environment, 1985, 17(1): 37 – 53.

24 QI J, CHEHBOUNI A, HUETE A R, et al. A modified soil adjusted vegetation index[J]. Remote Sensing of Environment, 1994, 48(2): 119 – 126.

25 STAGAKIS S, MARKOS N, SYKIOTI O, et al. Monitoring canopy biophysical and biochemical parameters in ecosystem scale using satellite hyperspectral imagery: an application on a Phlomis fruticosa mediterranean ecosystem using multiangular CHRIS/PROBA observations[J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(5): 977 – 994.

26 赵英时. 遥感应用分析原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2013.