

文章编号: 1672-8785(2011)12-0031-08

基于高光谱红边参数的不同物候期 苹果叶片的 SPAD 值估测

朱西存^{1,2} 赵庚星¹ 姜远茂³ 王 凌¹ 陈红艳¹ 王 利²

(1. 山东农业大学资源与环境学院, 山东泰安 271018;

2. 山东农业大学农业生态与环境重点实验室, 山东泰安 271018;

3. 山东农业大学园艺科学与工程学院, 山东泰安 271018)

摘 要: 用 FieldSpec 3 地物光谱仪和 SPAD-502 叶绿素计测定了不同物候期红富士苹果叶片的高光谱反射率和 SPAD 值。研究表明, 不同物候期苹果叶片的反射光谱波形曲线的变化规律基本相似。从苹果花期开始, 叶片 SPAD 值逐渐增加, 至秋梢停止生长期达到最高峰, 之后开始下降。苹果叶片的高光谱红边位置 λ_r 、红边斜率 D_r 、红边面积 S_r 与 SPAD 值之间均达到了显著与极显著相关, 但以红边位置参数 λ_r 与叶片 SPAD 值之间的相关性最为显著。以不同物候期苹果叶片的高光谱红边参数 λ_r 作为自变量建立的叶片 SPAD 值经验估测模型与基于偏最小二乘法建立的不同物候期苹果叶片 SPAD 值校正模型, 均以秋梢停止生长期的估测效果最佳。两个模型的检验精度分别为 94.2% 和 96.7%。相比较而言, 基于偏最小二乘法建立的 SPAD 值估测模型的精确度较高。

关键词: 高光谱红边参数; 苹果叶片; SPAD 值; 估测

中图分类号: TP79; Q945.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2011.12.007

Estimation of SPAD Value of Apple Leaf in Different Phenophase Based on Hyperspectral Red Edge Parameters

ZHU Xi-cun^{1,2}, ZHAO Geng-xing¹, JIANG Yuan-mao³, WANG Ling¹, CHEN Hong-yan¹, WANG Li²

(1. College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China;

2. Key Laboratory of Agricultural Ecology and Environment of Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China;

3. College of Horticulture Science and Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China)

Abstract: A FieldSpec 3 spectrometer and a SPAD-502 chlorophyll meter were used to measure the hyperspectral reflectance and SPAD value of Fuji apple leaves in different phenophases. The research result showed that the variation rules of reflection spectrum waveform curves of apple leaves were similar in different phenophases. The SPAD values of Fuji apple leaves were increased gradually in florescence and reached to the peak in autumn shoot pause growth period. Then, the SPAD value began to decline. Although the hyperspectral red edge parameters such as position, slope and area were correlated with the SPAD value remarkably and very remarkably, the red edge position was correlated with the SPAD value most remarkably. An experience SPAD value estimation model in which the red edge position in

收稿日期: 2011-10-20

基金项目: 中国博士后基金 (20110491616); 高等学校博士学科点专项科研基金 (20103702110010); 山东农业大学博士后基金 (89841); 科技部农转资金项目 (2006GB2C600168); 山东省自主创新重大专项 (2009ZHXX1B0801)

作者简介: 朱西存 (1970-), 男, 山东单县人, 博士后, 主要研究方向为农业遥感与信息技术。E-mail: zxc@sdaa.edu.cn

different phenophases was used as an argument and a SPAD value estimation model for apple leaves in different phenophases based on partial least square were established. Both models had their best estimation in the autumn shoot pause growth period. Their test accuracies were 94.2 % and 96.7 % respectively. The model based on the partial least square was relatively better than the experience SPAD value estimation model in estimation accuracy.

Key words: hyperspectral red edge parameter; apple leaf; SPAD value; estimation

0 引言

植物叶片 SPAD (Soil Plant Analysis Development, SPAD) 值反映了植物叶绿素含量的相对大小(植被的色素含量与其光合能力及氮素状况之间具有较好的相关性), 它已成为一种用于评价植被长势的有效手段^[1]。因此, 实时、动态、大面积估测植物叶片的叶绿素含量及其变化, 在植物营养诊断和农业高效管理方面具有重要意义。近年来, 随着高光谱遥感技术的发展, 遥感手段已经可以在光谱维上展开, 并且可直接对地物进行微弱光谱差异的定量分析, 在植被遥感研究与应用中表现出强大优势^[2]。植被叶片的高光谱信息在可见光范围内主要受叶绿素和类胡萝卜素的影响, 因此, 可以利用叶片的高光谱参数来估测叶绿素含量^[3]。苹果是世界四大水果之一, 也是我国主要的水果品种。利用高光谱技术估测苹果叶片 SPAD 值的研究具有重要意义。

分光光度法是一种使用最广泛的传统植物叶绿素含量测定方法。虽然该方法具有准确性高、重现性好等优点, 但是其时效性差, 费时、费力。大量研究表明, 阔叶树叶片 SPAD 值与其叶绿素含量具有显著的相关性。SPAD 值的大小可以较好地反映树木叶绿素含量的变化^[4-8]。对于利用高光谱红边参数估测 SPAD 值, 国内外研究人员已经进行了相关研究。Horler 等人^[9]研究了植被光谱与叶绿素浓度的关系, 证明了红边位置在植被叶绿素浓度估计中的重要作用。Curran 等人^[10]发现, 红边位置对冠层总叶绿素含量敏感。刘飞等人^[11]用可见/近红外光谱技术建立了黄瓜叶片 SPAD 值校正模型。李敏夏等人^[12]研究了礼富一号和嘎啦苹果叶片的光谱反射率、SPAD 值和叶绿素含量之间的关

系, 并建立了基于敏感波段一阶微分光谱值与苹果叶片 SPAD 值和叶绿素含量的回归模型。王秀珍^[13]、刘伟东等人^[14]发现, 红边位置与叶片的叶绿素含量有关。杨海清等人^[15]进行了基于反射光谱技术的植物叶片 SPAD 值预测建模方法研究。方慧等人^[16]对油菜叶片的光谱特征与叶绿素含量之间的关系进行了研究。黄文江等人^[17]建立了红边位置与叶绿素 a 和 a+b 之间的线性关系模型, 为冬小麦营养诊断提供了参考; 谭昌伟等人^[18]构建了以玉米冠层高光谱红边参数为自变量的农学参数反演模型; 袁杰等人^[19]分析了棉花冠层高光谱红边斜率与叶绿素浓度之间存在的较强线性关系。国内外的研究成果大多集中在对大田作物(玉米、小麦、水稻、棉花和油菜等)的研究上, 而针对苹果叶片高光谱红边参数与 SPAD 值估测的研究还较少见诸报道。研究人员大多利用一个生长期的单一红边参数建立经验模型, 而很少对不同物候期的综合对比进行研究。

本文以不同物候期的红富士苹果叶片为研究对象, 分析其高光谱特征及 SPAD 值的变化规律; 筛选最佳高光谱红边参数, 建立基于最佳红边参数的苹果叶片 SPAD 值经验估测模型; 同时以不同物候期苹果叶片的 3 个红边参数及其 SPAD 值为基础, 利用偏最小二乘回归法建立 SPAD 值校正模型; 最后利用独立的检验样本集来检验、分析和比较模型估测精度上的差异。本文提出一种利用高光谱技术获取 SPAD 值的方法, 以期克服以往利用 SPAD 仪逐点对叶片进行反复测量而速度慢的缺点, 实现对 SPAD 值的快速、准确估测, 为利用高光谱技术在苹果营养诊断和生长监测方面的应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

试验于 2009 年 4 月至 10 月在山东省蒙阴县试验苹果园进行。蒙阴县位于东经 $117^{\circ}45' \sim 118^{\circ}15'$ 和北纬 $35^{\circ}27' \sim 36^{\circ}02'$ 之间, 属于暖温带季风性气候, 其年平均气温为 12.8°C , 年降雨量为 820 mm, 年均日照时数为 2280 h, 年无霜期为 191 d。土壤以棕壤为主。试验品种均为 18 a 左右的红富士苹果树。依据蒙阴县的土地利用现状图和果园分布布设采样点, 选取蒙阴县 2 个镇的 4 个果园中的 43 棵苹果树作为采样对象, 随机取样, 以保证试验结果具有代表性, 并尽量涵盖不同树势的叶片。在冠层外围, 采集充分展开、无损、无病虫害、成熟的健康功能叶片。每棵苹果树按东、西、南、北四个方位, 各取 1 片叶片, 共采集 4 片叶。将采集的叶片迅速装入保鲜袋(封口, 编号), 放在盛有冰块的保鲜箱中, 并尽快将其带回实验室。

1.2 光谱测定

采用美国 ASD 公司生产的 FieldSpec 3 地物光谱仪进行光谱测定。该仪器的波段值为 $350 \sim 2500 \text{ nm}$ 。其中, $350 \sim 1000 \text{ nm}$ 光谱采样间隔为 1.4 nm , 光谱分辨率为 3 nm ; $1000 \sim 2500 \text{ nm}$ 光谱采样间隔为 2 nm , 光谱分辨率为 10 nm 。在光谱输出时, 仪器自动进行重采样(重采样间隔为 1 nm), 共输出 2151 个波段数。光谱采集时间为苹果盛花期(4 月中下旬)、春梢停止生长期(6 月下旬)、秋梢停止生长期(9 月中下旬)和苹果成熟期(10 月中下旬)。

我们在一个可控制光照条件的暗室内进行光谱测定。测定前, 用脱脂棉将测定光谱的叶片表面擦拭干净。测定时, 将叶片单层平整置于反射率近似为零的黑色橡胶垫上^[20]。光谱仪的视场角为 25° , 探头垂直向下正对待测叶片的中部, 距样品表面 0.10 m 。光源采用光谱仪自带的 50 W 卤化灯, 光源距样品表面 0.50 m , 角度为 45° 。为了消除外界干扰以保证精度, 对每片叶观测并记录 10 个采样光谱。将其平均值作为该叶片的光谱反射值, 并将同棵树 4 片叶的光谱反射率平均值作为该棵树的光谱反射率值。在测

定过程中, 定时进行标准白板校正。

1.3 叶片 SPAD 值的测定

叶片 SPAD 值的测定与光谱测定同步进行。测定仪器为日本美能达公司生产的 SPAD-502 型叶绿素计。为了减少测定误差, 测定时, 在每个叶片中部均匀测取 5 个点(测定时避开中间叶脉)的 SPAD 值, 并求取其平均值作为此叶片的 SPAD 值; 将同棵树 4 片叶的 SPAD 平均值作为该棵树的叶绿素 SPAD 值。

1.4 数据分析与利用

首先分析不同物候期苹果叶片的高光谱特征及 SPAD 值的变化规律。然后通过对苹果叶片高光谱红边参数与 SPAD 值的相关分析, 筛选与叶片 SPAD 值相关性最佳的红边参数, 并建立基于最佳红边参数的苹果叶片 SPAD 值经验估测模型。同时, 以不同物候期苹果叶片的红边参数及其 SPAD 值数据为基础, 利用偏最小二乘回归法建立 SPAD 值校正模型。最后, 利用独立的检验数据集检验、分析和比较模型估测精度上的差异。采用均方根误差(RMSE)、决定系数(R^2)和相对误差(RE%)对估测值与实测值之间的拟合效果进行综合评定, 以检验模型的精度。试验样本共 43 个, 随机分为 30 个建模样本和 13 个检验样本。

2 结果与分析

2.1 不同物候期苹果叶片的高光谱特征

不同物候期苹果叶片的反射光谱波形曲线的变化规律基本相似。但是由于苹果叶片在不同物候期的叶绿素含量、水分含量以及其它理化成分和结构的不同, 其高光谱反射率在大小上会出现差异(为了避免测定光谱时的偶然性, 图 1 所示为 43 个苹果叶片样品的高光谱反射率平均值的反射率曲线)。在苹果花期到成熟期的过程中, 随着苹果叶片的生长发育, 其光谱反射率也在变化(光合作用逐渐增强, 叶绿素含量逐渐增多, 光谱反射率逐渐下降)。在 9 月中下旬, 由于苹果处于果实生长期, 很多物质及能量主要用于果实成熟, 减少了叶绿素的合成, 导致光谱反射

率增大。在 400 ~ 500 nm 蓝光波段和 630 ~ 680 nm 红光波段, 光辐射被叶片中的叶绿素全部吸收, 产生光合作用, 形成 2 个低反射区, 导致反射率较低, 一般低于 10 %。在从 500 nm 开始的绿波段, 叶片的吸收减少, 反射率增强, 在 550 nm 附近形成明显的反射率峰。此峰左侧是蓝、紫光波段吸收谷, 右侧是 670 nm 左右的红光波段吸收谷, 之后反射率出现陡升, 在 760 ~ 1300 nm 近红外波段形成 1 个较高的反射平台 (不同物候期苹果叶片的高光谱曲线反射率在反射平台上差异明显); 之后光谱反射率逐级跌落, 出现 2 个较深的吸收谷和 2 个反射峰。

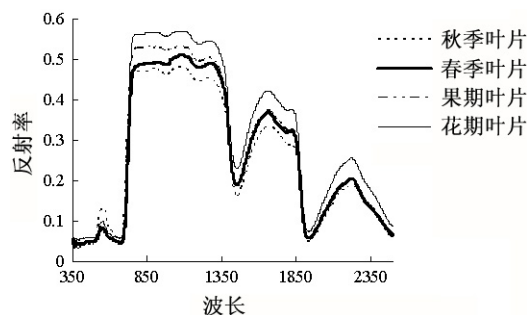


图 1 不同物候期苹果叶片的高光谱曲线

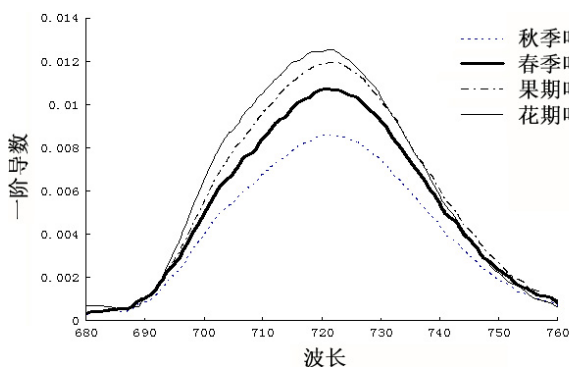


图 2 不同物候期苹果叶片的红边

图 3 所示为同步测定的不同物候期苹果叶片的 SPAD 平均值。从图 3 中可以看出, 不同物候期苹果叶片 SPAD 值的变化趋势是, 在苹果花期, 叶片的 SPAD 值最低, 至春梢停止生长期逐渐增加, 在秋梢停止生长期达到最高值, 之后便开始下降。因为随着苹果叶龄的增加和叶面积的逐渐扩大, 合成的生理活性物质逐渐增多, 叶片的 SPAD 值也逐渐增加。在秋梢停止生长期, 叶片的 SPAD 值达到最高值。随后叶面积停止扩

大, 果实接近采收, 合成生理活性物质的能力下降, 导致叶片氮素开始向贮藏器官转移, 叶片中的叶绿素含量降低。此时, 叶片的颜色受到影响, 导致叶片的 SPAD 值下降。

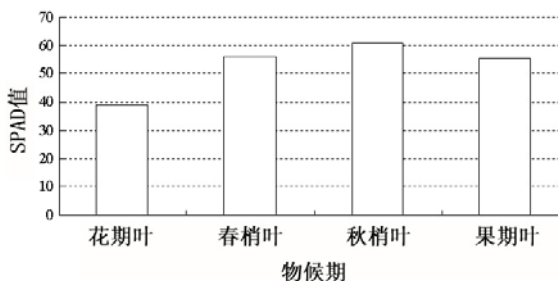


图 3 不同物候期苹果叶片的 SPAD 平均值
($n=43$)

表 1 列出了不同物候期苹果叶片的 SPAD 极值和平均值。从表 1 中可以看出, 不同物候期苹果叶片的 SPAD 最大值出现在秋梢停止生长期, 为 69.1(秋梢停止生长期 > 苹果成熟期 > 春梢停止生长期 > 花期); SPAD 最小值出现在花期, 为 31.9(花期 < 苹果成熟期 < 春梢停止生长期 < 秋梢停止生长期); 在平均值方面, 秋梢停止生长期 > 春梢停止生长期 > 苹果成熟期 > 花期。

表 1 不同物候期苹果叶片 SPAD 值的变化范围 ($n=43$)

物候期	SPAD		
	最大值	最小值	平均值
花期	50.6	31.9	39.4
春梢停止生长期	64.5	43.5	55.9
秋梢停止生长期	69.1	46.5	60.9
苹果成熟期	64.9	41.5	55.6

2.2 苹果叶片的高光谱红边参数与 SPAD 值的相关性分析

“红边”区域蕴涵着丰富的光谱信息。许多光谱指数均与该区域有关。挖掘此区域的光谱信息, 对于估测与色素有关的生化组分具有重要意义。对高光谱红边参数 (红边位置 λ_r 、红边斜率 D_r 和红边面积 S_r) 与不同物候期苹果叶片 SPAD 值进行相关分析, 其结果见表 2。

表 2 苹果叶片的高光谱红边参数与 SPAD 值的相关系数 ($n = 43$)

红边参数	花期	春梢停止生长期	秋梢停止生长期	果实成熟期
λ_r	0.7124**	0.7864**	0.7807**	0.6635**
D_r	-0.3206*	-0.4569**	-0.3910**	-0.3867*
S_r	0.3065*	0.4045**	0.4387**	0.3184*

注: ** $p < 0.01$, * $p < 0.05$

从表 2 中可以看出, 选用的 3 个红边参数与苹果花期、春梢停止生长期、秋梢停止生长期以及苹果成熟期的 SPAD 值之间均达到了显著或极显著的相关水平。因此, 这 3 个红边参数均可用于苹果叶片 SPAD 值的估测。

2.3 不同物候期苹果叶片 SPAD 值的估测模型

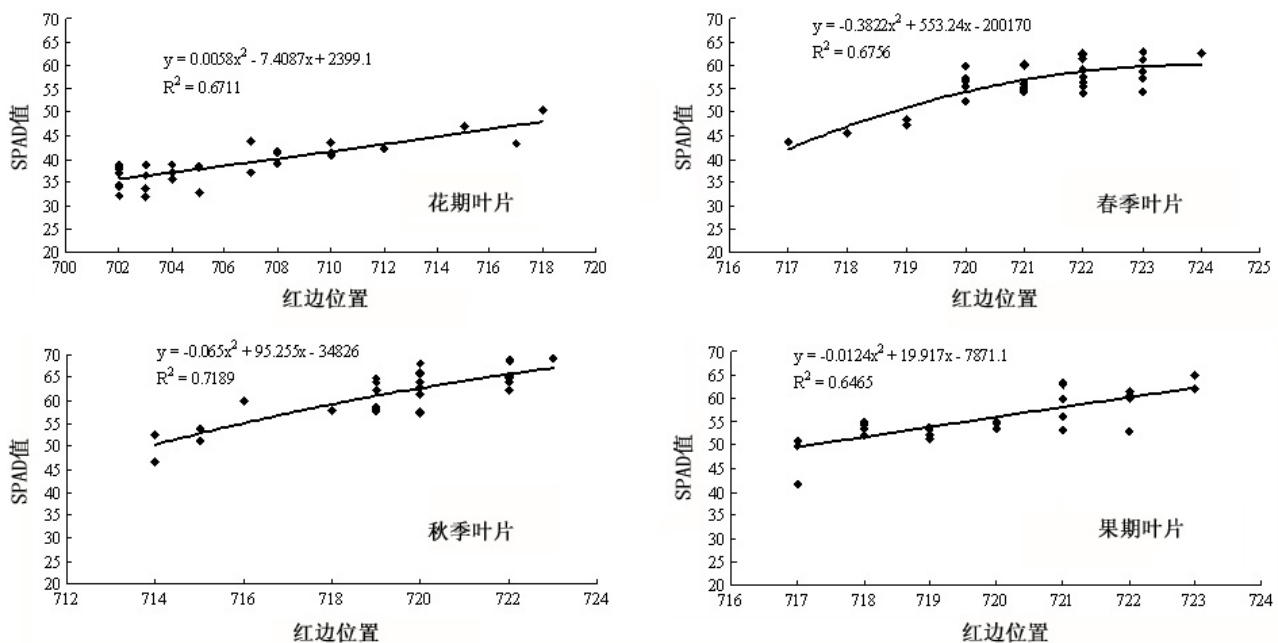
2.3.1 苹果叶片 SPAD 值的经验估测模型

从表 2 中可以看出, 红边位置 λ_r 与叶片 SPAD 值之间的相关系数明显高于其它 2 个红边参数。为了使红边参数能更精确地估测苹果叶片 SPAD 值, 利用表 2 中相关性最高的红边位置 λ_r 作为入选参量, 建立基于不同物候期苹果叶片的高光谱红边参数 λ_r 的 SPAD 值简单线性函数模型 $y = a + bx$ 、对数函数模型 $y = a + b \cdot \ln(x)$ 、二次多项式函数模型 $y = ax^2 + bx + c$ 、幂函数模

型 $y = ax^b$ 以及指数函数模型 $y = a \cdot e^{bx}$ 五种估测模型。从所建模型中选取决定系数 (R^2) 最大的模型。结果显示, 在建立的不同物候期 SPAD 值估测模型中, 效果均数二次多项式模型最优 (见图 4)。从图 4 中可以看出, 利用高光谱红边参数 λ_r 均可较好地估测不同物候期苹果叶片的 SPAD 值。但就比较而言, 以秋梢停止生长期对叶片 SPAD 值的估测效果最好。

2.3.2 基于偏最小二乘法的苹果叶片 SPAD 值估测模型

偏最小二乘法是一种最常用的用于建立光谱多元定量校正模型的方法。该方法在普通多元回归的基础上, 综合了主成分分析与典型相关分析的思想, 很好地解决了自变量间的多重共线性问题。它能尽可能提取包含自变量更多

图 4 苹果叶片高光谱红边参数的 SPAD 值估测模型 ($n = 30$)

信息成分, 并保证提取成分与因变量之间具有最大的相关性。通过用偏最小二乘法处理不同物候期苹果叶片的红边参数 (红边位置 λ_r 、红边斜率 D_r 和红边面积 S_r) , 可以得到样本残差和光谱参数累计贡献率。然后根据残差和累计贡

献率两项指标综合选取主因子 (见表 3) , 建立苹果叶片的 SPAD 值校正模型。图 5 为不同物候期苹果叶片各样本的 SPAD 实测值与模型估测值的散点图。

从图 5 中可以看出, 该模型的决定系数 (R^2)

表 3 不同物候期苹果叶片的红边参数 PLS 模型的主要参数

花期			春梢停止生长期		
主因子数	残差	累计贡献率	主因子数	残差	累计贡献率
1	2.824	0.534	1	3.537	0.663
2	0.747	0.914	2	1.564	0.990
3	2.987	1.000	3	1.683	1.000
秋梢停止生长期			苹果成熟期		
主因子数	残差	累计贡献率	主因子数	残差	累计贡献率
1	1.198	0.719	1	3.538	0.652
2	1.329	0.992	2	2.706	0.985
3	2.404	1.000	3	3.069	1.000

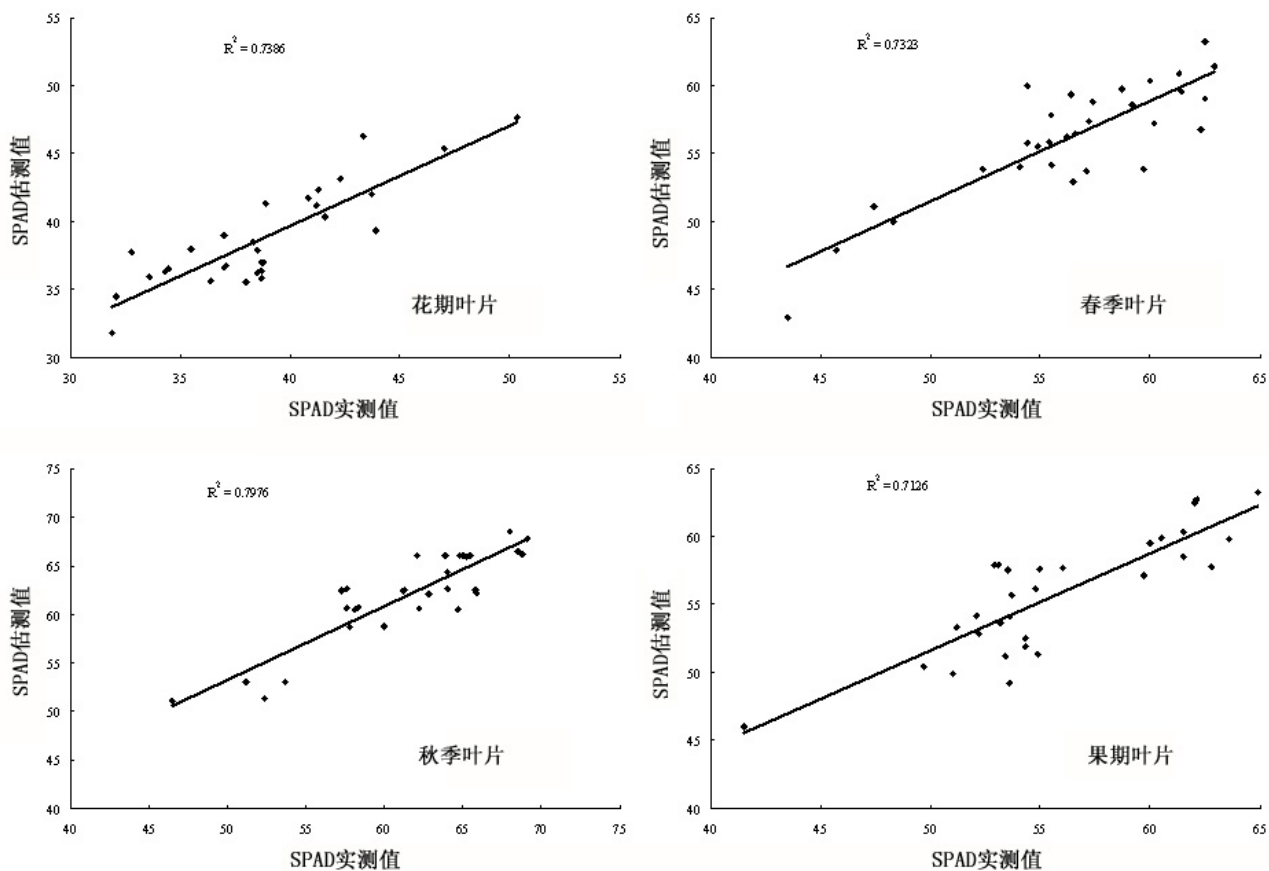


图 5 不同物候期苹果叶片的 SPAD 实测值与估测值的比较散点图

均比利用单一红边参数建立的估测模型的大, 说明基于偏最小二乘法的不同物候期苹果叶片 SPAD 值估测模型的稳定性更好。其中, 秋梢停止生长期的 SPAD 估测模型的决定系数 (R^2) 最大。因此, 以苹果秋梢停止生长期的高光谱红边参数建立的叶片 SPAD 值估测模型的效果最优。这与利用单一最佳红边参数 λ_r 建立的 SPAD 值估测模型的结论相同。

3 估测模型的检验与精度比较

为了检验估测模型的稳定性和精确性, 我们利用在秋梢停止生长期测定的 13 个苹果叶片的独立试验数据, 对苹果叶片 SPAD 值的最优经验估测模型和基于偏最小二乘法的最优估测

模型进行检验。采用决定系数 (R^2)、均方根差 (RMSE) 和相对误差 ($RE\%$) 三个指标检验模型的估测能力, 并对检验结果分别作 1:1 比较关系图 (见图 6)。

从图 6(a) 中可以看出, 苹果叶片 SPAD 值经验模型检验的决定系数 R^2 为 0.7739, 均方根差 RMSE 为 0.9387, 相对误差 $RE\%$ 为 5.8, 检验精度为 94.2%。从图 6(b) 中可以看出, 对于基于偏最小二乘法的苹果叶片 SPAD 值模型, 其检验模型的决定系数 R^2 为 0.8292, 均方根差 RMSE 为 0.8761, 相对误差 $RE\%$ 为 3.3, 检验精度为 96.7%。因此, 这两个模型均可较好地估测苹果叶片的 SPAD 值, 但基于偏最小二乘法的估测模型的检测精度明显高于经验模型。

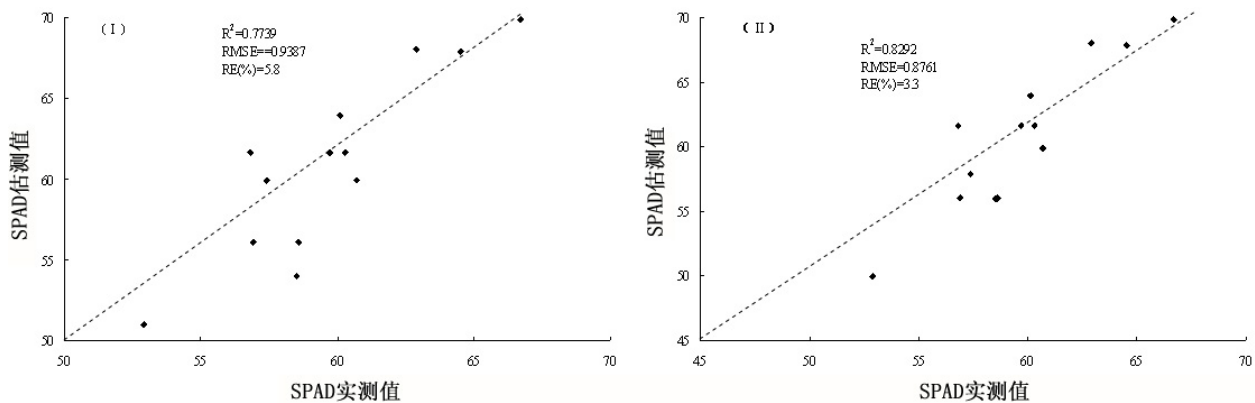


图 6 苹果叶片的 SPAD 估测值与实测值的比较 ($n = 13$)

4 结论

不同物候期红富士苹果叶片的 SPAD 值变化规律是, 花期叶片的 SPAD 值开始逐渐增加, 至秋梢停止生长期达到最高值, 之后开始下降。苹果叶片的高光谱红边位置 λ_r 、红边斜率 D_r 、红边面积 S_r 与 SPAD 值之间均达到了极显著与显著相关水平, 但红边位置 λ_r 与叶片 SPAD 值之间的相关性最显著。以不同物候期苹果叶片的高光谱红边位置 λ_r 与 SPAD 值之间建立的估测模型与基于偏最小二乘法建立的不同物候期苹果叶片 SPAD 值校正模型, 均以秋梢停止生长期估测叶片 SPAD 值的效果最佳。对检验模型的稳定性与检验精度进行比较, 其决定系数 R^2 分别

为 0.7739 和 0.8292, 均方根差 RMSE 分为 0.9387 和 0.8761, 相对误差 $RE\%$ 分别为 5.8 和 3.3, 检验精度分别为 94.2% 和 96.7%。可以看出, 校正模型明显优于经验模型。本文初步探明了不同物候期苹果叶片的 SPAD 值变化规律与高光谱估测方法, 为苹果营养诊断和生长监测提供了理论依据和技术支持, 同时也为在光谱和生物化学方面基于卫星遥感技术对苹果园进行大面积、快速估测提供了依据。这些都将会促进高光谱技术在苹果生产管理中的应用。

参考文献

- [1] Filella D, Pen-uelas J. The Red Edge Position and Shape as Indicators of Plant Chlorophyll Content,

- Biomass and Hydric Status [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1994, **15**(7): 1459–1470.
- [2] Gausman H W, Allen W A, Cardenas R. Relation of Light Reflectance to Histological and Physical Evaluations of Cotton Leaf Maturity [J]. *Applied Optics*, 1970, **9**(2): 545–552.
- [3] Card D H, Peterson D L, Matson P A. Prediction of Leaf Chemistry by The Use of Visible and Near Infrared Reflectance Spectroscopy [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1988, **26**(4): 123–147.
- [4] Vane G. Terrestrial Imaging Spectrometry: Current Status, Future Trends [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1993, **44**(2): 109–127.
- [5] 艾天成, 李方敏, 周治安, 等. 作物叶片叶绿素含量与 SPAD 值相关性研究 [J]. *湖北农学院学报*, 2000, **20**(1): 6–8.
- [6] 姜丽芬, 石福臣, 王化田, 等. 叶绿素计 SPAD-502 在林业上应用 [J]. *生态学杂志*, 2005, **24**(12): 1543–1548.
- [7] 裴正军, 宋海燕, 何勇, 等. 应用 SPAD 和光谱技术研究油菜生长期间的氮素变化规律 [J]. *农业工程学报*, 2007, **23**(7): 150–154.
- [8] 姚付启, 张振华, 杨润亚, 等. 基于红边参数的植被叶绿素含量高光谱估算模型 [J]. *农业工程学报*, 2009, **25**(2): 123–129.
- [9] Horler D N H, Barber J, Barringer A R. Effects of Heavy Metals on The Absorbance and Reflectance Spectra of Plants [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1980, **1**(2): 121–136.
- [10] Curran P J, Dungan J I, Gholz H. Explorong The Relationship between Reflectance Red Edge and Chlorophyll Content in Slash Pine [J]. *Tree Physiology*, 1990, **7**(7): 33–38.
- [11] 刘飞, 王莉, 何勇, 等. 基于可见 / 近红外光谱技术的黄瓜叶片 SPAD 值检测 [J]. *红外与毫米波学报*, 2009, **28**(4): 272–276.
- [12] 李敏夏, 张林森, 李丙智, 等. 苹果叶片高光谱特性与叶绿素含量和 SPAD 值的关系 [J]. *西北林学院学报*, 2010, **25**(2): 35–39.
- [13] 王秀珍, 王人潮, 黄敬峰. 微分光谱遥感及其在水稻农学参数测定上的应用研究 [J]. *农业工程学报*, 2002, **18**(1): 9–13.
- [14] 刘伟东, 项月琴, 郑兰芬, 等. 高光谱数据与水稻叶面积指数及叶绿素密度的相关分析 [J]. *遥感学报*, 2000, **4**(4): 279–283.
- [15] 杨海清, 姚建松, 何勇. 基于反射光谱技术的植物叶片 SPAD 值预测建模方法研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2009, **29**(6): 1607–1610.
- [16] 方慧, 宋海燕, 曹芳, 等. 油菜叶片的光谱特征与叶绿素含量之间的关系研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2007, **27**(9): 1731–1734.
- [17] 黄文江, 王纪华, 刘良云, 等. 冬小麦红边参数变化规律及其营养诊断 [J]. *遥感技术与应用*, 2003, **18**(4): 206–211.
- [18] 谭昌伟, 王纪华, 郭文善, 等. 利用遥感红边参数估算夏玉米农学参数的可行性分析 [J]. *福建农林大学学报: 自然科学版*, 2006, **30**(2): 123–128.
- [19] 袁杰, 王登伟, 黄春燕, 等. 基于高光谱数据的棉花叶绿素密度定量提取研究 [J]. *干旱地区农业研究*, 2007, **25**(3): 89–93.
- [20] 唐延林, 王秀珍, 黄敬峰, 等. 棉花高光谱及其红边特征 (I) [J]. *棉花学报*, 2003, **15**(3): 146–150.

(上接第 16 页)

(1) 通过对光线通过一个至三个平板的光程进行分析, 我们可以得出一个光线通过任意多个平板时的光程表达式;

(2) 通过对光程差进行分析, 我们可以发现此光程差随着入射角的增大而增大, 这与实际情况相符;

(3) 通过对广角条件进行分析与讨论, 为傅里叶变换红外光谱仪的分析和设计提供了理论依据。

参考文献

- [1] Shepherd G G, Thullier G, Gault W A, et al. WINDII, The Wind Imaging Interferometer on The Upper Atmosphere Research Satellite [J]. *J Geophys Res*, 1993, **98**(2): 10725–10750.
- [2] 贺健, 张淳民, 唐远河, 等. 洛伦兹光谱线型高层大气风场探测的原理分析 [J]. *光学学报*, 2005, **25**(5): 577–580.
- [3] He Jian, Zhang Chunmin. The Accurate Calculation of the Fourier Transform of Voigt Profile [J]. *J Opt A: Pure and Appl Opt*, 2005, **41**(7): 613–616.
- [4] 贺健, 张淳民, 张庆国. 佛克脱光谱线型干涉图的理论及其应用研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2007, **27**(3): 423–426.
- [5] 贺健, 张庆国, 孙红章. 佛克脱光谱线型半高宽的理论研究 [J]. *红外*, 2008, **29**(10): 5–8.
- [6] Gault W A, Brown S, Moise A, et al. ERWIN: An E-region Wind Interferometer [J]. *Appl Opt*, 1996, **35**(3): 2913–2922.
- [7] Shepherd G G, Gault W A, Miller D W, et al. WAMDII: Wide-angle Michelson Doppler Imaging Interferometer for Spacelab [J]. *Appl Opt*, 1985, **24**(2): 1571–1583.