

基于红边位置的木荷叶片叶绿素含量估测模型研究

张永贺¹, 郭啸川¹, 褚武道¹, 艾金泉¹, 项天宋¹, 郭乔影², 周毅军¹, 陈文惠¹

(1. 福建师范大学 地理科学学院,福建 福州 350007;
2. 浙江大学 环境与资源学院,浙江 杭州 310029)

摘要: 利用红边参数反演作物参数是定量遥感研究的一个热点, 红边参数中红边位置与作物生化组分强相关, 为监测作物胁迫提供了一个非常敏感的指标。准确估测植被叶绿素含量, 对于研究森林健康和胁迫、森林生产力的估计, 碳循环的研究有着重要的意义。介绍几种红边位置算法, 并对这些算法及其应用进行了比较, 通过选取红边位置的不同敏感波段来估测植被叶片叶绿素含量。经室内光谱获取叶片的光谱数据, 采用一阶光谱导数法、平滑处理后一阶光谱导数法、线性四点内插法、五次多项式拟合法四种算法处理光谱数据, 获得红边位置变量, 并与叶绿素含量进行拟合, 构建估测木荷叶片叶绿素含量的回归模型。结果表明: 各种算法获取的红边位置变量所构建的回归模型估测叶绿素含量是可行的; 五次多项式拟合法估算精度是最高的, 其获取红边位置计算相对复杂; 线性四点内插法估算精度次之, 但计算较简便。

关键词: 光谱分析; 红边位置; 叶绿素含量; 木荷

中图分类号: TN21 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2013)03-0798-07

Estimation model of schima superba leaf chlorophyll content based on red edge position

Zhang Yonghe¹, Guo Xiaochuan¹, Chu Wudao¹, Ai Jinquan¹, Xiang Tiansong¹, Guo Qiaoying², Zhou Yijun¹, Chen Wenhui¹

(1. College of Geographical Science, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China;
2. College of Environment & Resource Science, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China)

Abstract: Red edge parameters are widely used to inversely deduce crop parameters in quantitative remote sensing studies. Among them, the red edge position, as a very sensitive indicator for monitoring crop stress, is strongly correlated with crop biochemical components. Accurate estimation of the chlorophyll content of vegetation is of importance for studies on forest health, stress, and productivity estimation, as well as carbon cycle. In this article, several algorithms of red edge position were introduced firstly, their applications were compared, and the leaf chlorophyll content of vegetation was estimated through selecting its different sensitive bands. Then leaf spectral data from indoor spectra were extracted, four algorithms were used (first -order derivative spectrometry, first -order derivative spectrometry after smoothing, four point interpolation, and quintic polynomial fitting) to process spectral data and obtain red edge position variables. Finally the obtained variables were used to fit the chlorophyll

收稿日期: 2012-07-08; 修订日期: 2012-08-23

基金项目: 福建省科技厅重点项目(2010Y0019); 福建师范大学研究生创新基金

作者简介: 张永贺(1986-), 男, 助理研究员, 主要从事资源环境遥感和地图学与地理信息系统方面研究。Email: zyh3545871@126.com

content, and various regression models of these algorithms for estimating leaf chlorophyll content were established. The results show that all these established models are feasible to estimate chlorophyll content. Among them, the quintic polynomial fitting method is most accurate, but highly complex in obtaining the red edge position while the four point linear interpolation is next to it in accuracy, but simpler.

Key words: spectral analysis; red edge position; chlorophyll content; schima superba

0 引言

叶绿素含量是作物主要的生化参数，其变化可用来评价作物的光合作用能力，直接控制着植被能量和物质的循环。叶绿素含量是植物营养胁迫、光合能力、发育阶段和病虫害监测的重要指标。准确估测植被叶绿素含量，对于研究森林健康和胁迫、生产力的估计、碳循环有着重要的意义^[1]。在可见光波段内，植物的光谱特征主要是由叶片各种色素决定的，其中叶绿素起着最重要的作用。分析叶片反射光谱与叶绿素含量之间关系，运用红边位置建立叶绿素含量的高光谱估算模型并检验其精度，具有简便、大面积、无损伤特点，而传统化学分析方法测定叶绿素含量需要一系列化学药剂，繁琐的实验过程。因此，基于红边位置叶片叶绿素含量估测模型可用于树种的培育与管理，用以部分代替费时、费力的传统化学分析方法。

红边是由于植被在红光波段叶绿素的强烈吸收与近红外波段光在叶片内部的多次散射而形成的强反射造成的，反射率急剧上升，形成陡而近于直线的斜边，红光范围一般在 680~760 nm^[2-3]。红边位置(REP)是描述植被红边的一个非常重要的参量。当绿色植被叶绿素含量高、生长旺盛时，“红边位置”会向长波方向偏移，即红移；相反，当绿色植被衰老或感染病虫害，叶绿素含量减少时，“红边位置”将向短波方向偏移，即蓝移^[3-4]。绿色植被所特有的这种反射光谱特性，一直深受国内外学者关注。黄敬峰等研究表明：叶绿素含量、生物量、物候变化、冠层结构和叶片结构等因素都能使红边位置和红边幅值发生变化^[5]。Horler 等研究植被光谱与叶绿素浓度的关系，提出光谱红边位置(植被的导数光谱在 700 nm 附近的极大值位置的波长值)在植被叶绿素浓度估计中的作用^[6]。Curran 等研究表明，红边位置对冠层叶绿素含量敏感^[7]。刘伟东、王秀珍等研究表明，红边位置与

叶片的叶绿素含量有关^[8-9]。国内学者较深入地研究农作物的生理参数的高光谱模型反演与估算，但对森林植被生理参数的高光谱反演研究较少。为了可靠地获取植被健康状况，准确地计算红边位置是关键。目前，计算红边位置的方法主要有两大类：一类是基于导数光谱，如最大一阶导数法、拉格朗日内插法、线性外推法等；另一类则基于曲线拟合技术，如四点内插法、倒高斯模型法、多项式拟合法等^[10]。Dawson 等^[11]认为最大一阶导数法提取 REP 的精度取决于传感器的宽度和波段位置；Clevers 等^[12]认为 Dawson 等利用拉格朗日法对于粗分辨率光谱是适用的，但针对在提取 REP 出现双峰现象时的不稳定却无法解决，而线性四点插值方法计算简单，只需要 4 个波段和简单的插值运算，是从光谱数据中提取红边位置的最实际的办法。Pu 等^[13]采用线性四点插值、多项式拟合、拉格朗日法和倒高斯(IG)4 种方法从 Hyperion 数据反演的反射率影像中提取红谷位置(red well position, RWP) 和红边位置，结果表明，线性四点插值法是从 Hyperion 数据中提取这两个参数的最佳方法；Pu 等提出五次多项式拟合法，对五次多项式曲线求导数，可以获得连续的导数曲线，并利用实测光谱数据验证，发现大部分的样品的模型校验的 R^2 值均大于 0.998，他认为该方法可以准确反演红边位置及红谷位置。Li 等^[14]进行了多项式配准和拉格朗日插值的精度研究，认为拉格朗日法对数据的噪音敏感，且其精度取决于所使用的波段组合，而多项式拟合法能获取不对称的红边位置，比拉格朗日法精度高。通过以上的分析，文中采用一阶导数光谱法、线性四点内插法和五次多项式拟合法来建立木荷树种高光谱曲线与叶绿素含量的关系模型，并对不同模型模拟精度进行检验。

木荷具有森林防火墙的作用，是良好的用材林，又是美丽的观赏林，但国内外应用高光谱于木荷叶绿素含量的研究较少。因此，文中在分析木荷叶片反

射光谱与叶片叶绿素含量之间关系的基础上, 分别用光谱导数法(一阶导数法, 平滑后一阶导数法)、四点内插法及五次多项式拟合法确定红边位置, 运用红边位置这个参数反演高光谱数据的叶绿素含量, 建立叶绿素含量的高光谱遥感估算模型并检验其精度。比较各种方法的优点和缺点, 为准确预测木荷叶片叶绿素, 为木荷的培育、种植、管理等提供简单高效的方法和依据。同时也为其他森林树种高光谱与叶绿素关系的建立提供借鉴方法。

1 实验数据获取

1.1 样品准备

实验样品木荷叶片采集时间为2011-10-11, 实验地点位于福建省福州市白沙国有林场, 采样样本为林龄8年的木荷, 样本总数为44个。在采集样品时, 采集桉树距离地面2m处幼枝条上的幼叶, 立即装入保鲜袋, 并在4h内送回实验室, 清理树叶表面灰尘污渍处理后进行光谱数据采集和色素含量测定。

1.2 光谱测量

该实验的光谱测量是在BRDF测试系统形成的室内进行的, 光源是光谱仪配套的功率为50W的卤素灯, 能够准确记录不同测量方式的方位角和观测天顶角。通过控制光源和探头的高度角和方位角模拟各种光谱测量环境, 能够避免光谱测量时因角度不统一带来的误差。该实验的测量环境设置为光源入射方位角0°、观测方位角300°、入射天顶角30°、观测天顶角0°。光谱测量仪器是美国Analytical Spectral Device(ASD)公司生产的便携式野外光谱仪FieldSpec3。光谱采集采用25°视场角, 探头垂直向下, 距离叶片样品表面13cm, 每一叶片样本进行10次光谱重复测量, 测量时及时进行标准白板校正(标准白板反射率为1, 这样所测得的目标物光谱是无量纲的相对反射率); 再将测得的叶片光谱反射率剔除异常值再取其平均值作为该样本的反射率光谱值, 并对测量光谱的叶片同步进行化学实验处理, 进行叶绿素测定。

1.3 叶绿素含量测定

根据叶绿体色素提取液对可见光谱的吸收, 利用分光光度计在某一特定波长下测定其消光度D值, 由朗伯比尔定律即可用公式计算提取液中各色

素的含量^[9]。将每次采集光谱后的新鲜叶片直接在实验室内进行叶绿素含量测定, 取新鲜叶片3份, 每份0.2g分别加入95%乙醇及少量石英砂和碳酸钙粉将其研磨成匀浆, 至组织发白, 过滤, 定容, 然后用UV2450-紫外可见分光光度计测量665 nm, 649 nm和470 nm波长下的消光度D值, 再用如下公式计算叶绿素a和叶绿素b的浓度值^[3-9]:

$$Ca(\text{mg/L}) = 13.95 \times D665 - 6.88 \times D649 \quad (1)$$

$$Cb(\text{mg/L}) = 24.99 \times D649 - 6.88 \times D665 \quad (2)$$

$$\text{色素含量}(\text{mg/g}) = C \cdot V/W/1000 \quad (3)$$

$$\text{叶绿素含量}(\text{mg/g}) = \text{叶绿素 a 含量} + \text{叶绿素 b 含量} \quad (4)$$

式中: Ca、Cb分别为叶绿素a、b的浓度值; D665, D649分别为波长在665 nm和649 nm处的消光度值; C为色素浓度(mg/L); V为提取液体积(ml); W为叶片样品鲜重(g)。

2 研究方法

2.1 一阶导数光谱法

一阶导数处理可以消除线性或者接近线性的背景、噪声光谱对目标光谱的影响^[15]。由图1可见, 杉

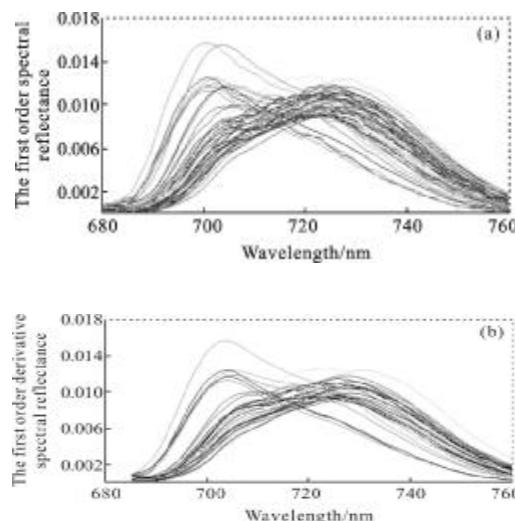


图1 平滑前后的光谱反射率曲线(n=34)

Fig.1 The first-order spectral derivative curves before and after smooth(n=34)

木在红边区域内, 当一阶导数达到最大值时所对应的波长即为红边位置。对680~780 nm波段范围内的原始光谱做如公式(5)变换:

$$FDR_{\lambda(i)} = \frac{(R_{\lambda(i+1)} - R_{\lambda(i)})}{\Delta\lambda} \quad (5)$$

式中: $FDR_{\lambda(i)}$ 为波长*i*处的一阶导数值; $R_{\lambda(i)}$ 为波长*i*处的原始光谱反射率; $R_{\lambda(i+1)}$ 为波长*i+1*处的原始光谱反射率; $\Delta\lambda$ 为波长*i*与*i+1*的间距。图1(a)、(b)分别为一阶导数光谱反射率曲线和平滑后的一阶光谱反射率曲线,对平滑前后的一阶光谱反射率计算得红边位置 REP_{1dv} 和 $REP_{1dsmooth}$ 。

2.2 线性四点内插法

这是由Baret et al.在1987年首次提出的一种简单的方法,也叫线性内插法^[16]。四点内插法是假设红边反射率曲线简化为一条直线,中心介于约780 nm的近红外和叶绿素吸收造成的光谱反射率最小值(大约在670 nm处)间的中点附近。该方法采用4个波段波长分别670 nm、700 nm、740 nm及780 nm,红边位置通过公式(6)和(7)确定。

$$Rre = \frac{R670 + R780}{2} \quad (6)$$

$$REP_{4points} = 700 + 40 \times \left(\frac{Rre - R700}{R740 - R700} \right) \quad (7)$$

式中: $R670$ 、 $R780$ 为670 nm和780 nm处的光谱反射率; Rre 为拐点处反射率; $REP_{4points}$ 为该算法计算的红边位置。

2.3 五次多项式拟合法

对红边反射率曲线在红光反射率最小值到近红外反射率最大值间光谱曲线进行如公式(8)所示的五次多项式拟合^[17]。

$$R(\lambda) = a_0 + \sum_{i=1}^5 a_i \lambda^i \quad (8)$$

式中: λ 为红边范围680~780 nm之间的波长,对拟合后的光谱曲线进行一阶导数处理,一阶导数最大值所对应的波长值即为红边位置 REP_{5fit} 。

3 建模方法

采用回归分析方法,对其中24个木荷样本数据建立光谱特征变量与叶片叶绿素含量之间的线性与非线性回归方程,其余20个样本数据作为模型检验。文中选用5种不同类型的数学统计模型,具体如下:

线性回归模型(Linear): $Y = b_0 + b_1 X$

对数模型(Logarithmic): $Y = b_0 + b_1 \ln X$

倒数模型(Inverse): $Y = b_0 + b_1 / X$

S模型: $Y = \exp(b_0 + b_1 / X)$

生长函数模型(Growth): $Y = \exp(b_0 + b_1 X)$

式中: b_0 、 b_1 为回归系数; X 为计算出的红边位置; Y 为预测叶片叶绿素含量^[18]。

4 结果分析

4.1 统计模型回归分析

将上述不同红边算法获取的 REP_{1dv} 、 $REP_{1dsmooth}$ 、 $REP_{4points}$ 及 REP_{5fit} 与木荷叶片叶绿素含量运用Spss 14.0统计软件建立回归模型,包括线性与非线性拟合,其中建立模型是采用在所有的样本中随机选取24个作为建模,剩下的20个样本作为检验。具体拟合结果如表1~4所示。表中, R^2 表示模型的拟合度, R^2 越大,表示拟合得越好; F 表示检验值, F 值越大,意

表1 叶绿素含量与 REP_{1dv} 拟合结果($n=24$)

Tab.1 Result of Chlorophyll content and REP_{1dv} model fitting($n=24$)

Regression equation	REP_{1dv}						
	R^2	F	Sig.	df_1	df_2	b_0	b_1
Linear	0.754	67.396	0	1	22	-62.161	0.090
Logarithmic	0.754	67.311	0	1	22	-420.626	64.359
Inverse	0.753	67.220	0	1	22	66.565	-45 901.011
S	0.810	93.539	0	1	22	33.593	-23 500.816
Growth	0.808	92.752	0	1	22	-32.275	0.046

表2 叶绿素含量与 $REP_{1dsmooth}$ 拟合结果($n=24$)

Tab.2 Result of chlorophyll content and $REP_{1dsmooth}$ model fitting($n=24$)

Regression equation	$REP_{1dsmooth}$						
	R^2	F	Sig.	df_1	df_2	b_0	b_1
Linear	0.7659	97.994	0	1	22	-65.430	0.094
Logarithmic	0.765	71.697	0	1	22	-442.078	67.581
Inverse	0.764	71.398	0	1	22	69.741	-48 366.428
S	0.815	97.333	0	1	22	35.098	-24 675.497
Growth	0.815	97.188	0	1	22	-33.824	0.0481

表 3 叶绿素含量与 REP_{4points} 拟合结果(n=24)Tab.3 Result of chlorophyll content and REP_{4points} model fitting(n=24)

Regression equation	REP _{4point}						
	R ²	F	Sig.	df ₁	df ₂	b ₀	b ₁
Linear	0.762	70.379	0	1	22	-184.180	0.259
Logarithmic	0.762	70.255	0	1	22	-1223.761	186.392
Inverse	0.761	70.128	0	1	22	188.604	-133 951.801
S	0.787	81.345	0	1	22	94.265	-67 276.850
Growth	0.787	81.193	0	1	22	-92.906	0.130

表 4 叶绿素含量与 REP_{5fit} 拟合结果(n=24)Tab.4 Result of chlorophyll content and REP_{5fit} model fitting(n=24)

Regression equation	REP _{2lines}						
	R ²	F	Sig.	df ₁	df ₂	b ₀	b ₁
Linear	0.767	72.550	0	1	22	-113.475	0.161
Logarithmic	0.767	72.364	0	1	22	-758.282	115.668
Inverse	0.766	72.172	0	1	22	117.863	-82 894.315
S	0.807	92.006	0	1	22	59.264	-42 013.805
Growth	0.806	91.668	0	1	22	-57.930	0.082

意味着模型的效果越佳; df₁、df₂ 表示自由度, 统计量 F 服从于自由度 df₁=1, df₂=n-2 的 F 分布, 在显著水平 α 下, 若 $F > F_{\alpha}(1, n-2)$, 则认为回归方程效果在此水平下显著; Sig. 表示是否通过 0.01 或者 0.05 显著性检验; b₀、b₁ 表示回归模型的系数; n 表示训练样本数。

4.2 模型精度评价

文中模型精度评价采用标准差, 也称均方根差, 对各叶绿素估测模型进行精度评价^[19-20]:

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - y'_i)^2 / n} \quad (9)$$

式中: y_i 为叶绿素实测值; y'_i 为模型计算的叶绿素预测值; n 为检验样本数; RMSE 值越小, 则结果越精确, 回归模型及其精度检验结果如表 5 所示。表中, 拟合 R² 值和预测 R²_{for} 值越大则回归模型越好。

从表 5 中, 对比不同红边位置算法, 通过预测 R²_{for} 值, 可总结出五次多项式法算出的红边位置构建回归模型估算木荷叶绿素含量, 其预测 R²_{for} 值是相对最高的; 四点内插法的估测叶绿素含量的高光谱模型比平滑处理后一阶导数法拟合效果好, 拟合效果最差的是一阶导数法算出的红边位置。通过 RMSE 值,

预测叶绿素与实际叶绿素含量对比, 可归纳出五次多项式法算出的红边位置构建回归模型估算木荷叶绿素含量, 其误差较小(除 Growth 模型外); 四点内插法误差次之; 一阶导数平滑处理后算出的红边位置估算叶绿素含量误差最大。

表 5 模型精度检验结果(n=20)

Tab.5 Test result of model accuracy(n=20)

Variable of REP	Regression equation	R ² _{fit}	R ² _{for}	RMSE
		Y=-62.161+0.09×X	0.732 8	0.758 5
REP _{1dv}	Y=-420.626 2+64.359 1×lnX	0.732 8	0.757 3	0.691 4
REP _{1dvsmooth}	Y=66.565-45 901.011/X	0.753	0.758 0	0.691 1
	Y=exp(33.593-23 500.816/X)	0.810	0.721 8	0.710 8
	Y=exp(-32.275+0.046×X)	0.808	0.718 0	0.758 5
	Y=-65.430+0.094×X	0.766	0.763 3	0.701 3
	Y=-442.078+67.581×lnX	0.694 3	0.763 8	0.700 8
REP _{4points}	Y=69.741-48 366.428/X	0.694 3	0.764 3	0.700 5
	Y=exp(35.098-24 675.497/X)	0.815	0.740 2	0.715 7
	Y=exp(-33.824+0.048 1×X)	0.815	0.737 5	0.718 4
	Y=-184.180+0.259×X	0.762	0.794 0	0.693 2
	Y=-1 223.761+186.392×lnX	0.631 2	0.792 4	0.641 5
REP _{5fit}	Y=188.604-133 951.801/X	0.632 1	0.792 5	0.641 4
	Y=exp(94.265-67 276.850/X)	0.787	0.761 1	0.665 6
	Y=exp(-92.906+0.130×X)	0.787	0.759 9	0.793 9
	Y=-113.475+0.161×X	0.748 2	0.802 8	0.634 6
	Y=-758.282+115.668×lnX	0.747 4	0.802 9	0.634 6
	Y=117.863-82 894.315/X	0.766	0.782 2	0.634 8
	Y=exp(59.264-42 013.805/X)	0.807	0.687 7	0.644 4
	Y=exp(-57.930+0.082×X)	0.806	0.782 2	0.874 9

对比不同建模方法, 综合分析拟合 R²_{fit} 值、预测 R²_{for} 值及 RMSE 值, 归纳:(1) REP_{1dv} 估算叶绿素含量效果, Y=-62.161+0.09×X 模型拟合最佳, 其次是 Y=66.565-45 901.011/X 模型; 因此 REP_{1dv} 估算叶绿素含量选择线性和倒数建模方法拟合结果更接近实际叶绿素含量。(2) REP_{1dvsmooth} 估算叶绿素含量, Y=69.741-48 366.428/X 与 Y=-442.078+67.581×lnX 两模型拟合效果较好, 即倒数和对数建模方法更适合。(3) REP_{4points} 估算叶绿素含量, Y=188.604-133 951.801/X 模型拟合最佳, 其次是 Y=-1 223.761+186.392×lnX 即倒数和对数建模方法。(4) REP_{5fit} 估算叶绿素含量, Y=-113.475+0.161×X 与 Y=-758.282+115.668×lnX 两模型拟合效果较好, 即线性和对数建模方法。图 2 为不同算法得到的红边位置构建模型效果相对较好。

的估测效果图。

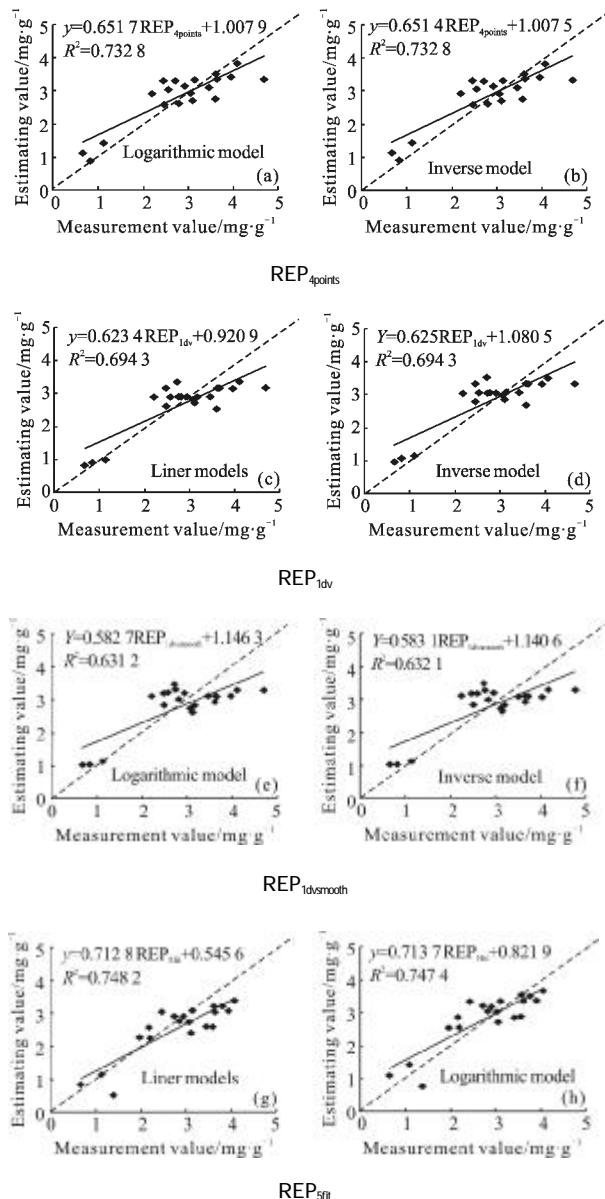


图2 不同算法的红边位置构建模型估测效果图(n=20)

Fig.2 Effect of the statistical equations for predicting chlorophyll content in different algorithm (n=20)

5 结论

该研究采用一阶导数光谱法、平滑处理一阶导数光谱法、四点内插法、五次多项式拟合法四种算法计算红边位置，采用 Linear、Logarithmic、Inverse、S、Growth 五种函数模型，分别用于构建木荷叶片叶绿素含量的估算模型。通过木荷叶片叶绿素含量估算过程，分析结果讨论如下：

五次多项式拟合法获取红边位置估算叶绿素含

量的精度是最高的，计算是最复杂的。一阶导数光谱法最简便，估算叶片叶绿素含量的精度不是最高的，但其运算过程简便，不易出错，可以减少数据处理误差。基于一阶导数光谱法获取红边位置构建叶片叶绿素含量的估算模型具有简便性、省时省力的特点。四点内插法获取红边位置也较简便，且估算叶片叶绿素含量的精度优于一阶导数光谱法。以上研究结果与 Pu 等^[13]采用线性四点插值、多项式拟合、拉格朗日法和倒高斯(IG)四种方法从 Hyperion 数据反演的反射率影像中提取红谷位置和红边位置，结果表明，线性四点插值法是从 Hyperion 数据中提取这两个参数的最佳方法。对于 Pu 等提出的五次多项式拟合法，利用实测光谱数据验证，发现大部分的样品的模型校验的 R² 值均大于 0.998。

文中各种算法估算叶片叶绿素含量与实际叶绿素含量存在误差，分析可能存在的原因：(1)采样样本数只有 44 个，对测量样本的叶绿素含量预测虽然精度通过了数理统计中的检验，但是经过验证的模型对样本数更多的叶绿素含量估算可能会存在一定误差；(2)样本实验误差，采集的样本保存和运输过程以及送实验室处理一系列分析化验过程中可能出现的叶片叶绿素分解，造成实验测量误差。(3)光谱测量误差，室内测量光谱条件虽然经过严格的控制，但是叶片在摆放过程中会存在不同程度重叠，可能导致光谱测量产生误差。

参考文献：

- [1] Yang Xiguang, Fan Wenyi, Yu Ying. Forest establishment of hyper spectral remote sensing estimation models for chlorophyll content [J]. Forest Engineering, 2010, 26(2): 8 - 11. (in Chinese)
- [2] Wang Xiuzhen, Wang Renchao, Li Yunmei, et al. Different levels of nitrogen on rice canopy spectra and its application of red edge parameters [J]. Journal of Zhejiang University, Agriculture and Life Sciences, 2001, 27 (3): 301 - 306. (in Chinese)
- [3] Bao Yansong, Wang Jihua, Liu Liangyun, et al. Remote sensing monitoring method and its application of nitrogen in winter wheat in different scales [J]. Journal of Agricultural Engineering, 2007, 23(2): 139 - 145. (in Chinese).
- [4] Zhang Qinglin, Chen Wenhui , Zhang Yonghe, et al. Red

- edge position of the Taiwan study on estimating model of chlorophyll content in leaves of *Acacia* [J]. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2011, 6(3): 9–17. (in Chinese)
- [5] Huang Jingfeng, Wang Yuan, Wang Fumin, et al. Rapeseed higher spectral red edge characteristics and leaf area index estimation model [J]. *Journal of Agricultural Engineering*, 2006, 22(8): 22–26. (in Chinese)
- [6] 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.
- [7] Curran P J, Dungan J L, Gholz H L. Exploring the relationship between reflectance red edge and chlorophyll content in slash pine[J]. *Tree Physiology*, 1990, 7: 33–38.
- [8] Liu Weidong, Xiang Yueqin, Zheng Lanfen, et al. Hyper spectral data and correlation analysis of rice leaf area index and chlorophyll density [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2000, 4(4): 279–283. (in Chinese)
- [9] Wang Xiuzhen, Wang Renchao, Huang Jingfeng. Differential using hyper spectral remote sensing and its application in rice agronomic parameters determination [J]. *Journal of Agricultural Engineering*, 2002, 18(1): 9–15. (in Chinese)
- [10] Wang Dacheng, Zhang Dongyan, Jin Zhaoling, et al. Location extraction based on red verify the consistency of imaging and non-imaging hyper spectral data[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, 31(9): 2450–2454. (in Chinese)
- [11] Dawson T P, Curran P J. A new technique for interpolating the reflectance red edge position[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, 19(11): 2133–2139.
- [12] Clevers J G P W, De Jong S M, Epema G F, et al. Derivation of the red edge index using MERIS standard band setting [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2002, 23(16): 3169–3184.
- [13] Pu R, Gong P, Biging G S, et al. Extraction of red edge optical parameters from hyperion data for estimation of forest leaf area index [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(4): 916–921.
- [14] Li L, Ustin S L, Lay M. Application of AVIRIS data in detection of oil-induced vegetation stress and cover change at Jornada, New Mexico [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 94: 1–16
- [15] Liu Xuan, Lin Hui, Zang Zhuo, et al. Correlation between chlorophyll a content of *Cunninghamia lanceolata* and hyper spectral data analysis [J]. *Journal of Central South University of Forestry and Technology*, 2010, 30(5): 72–76. (in Chinese)
- [16] Xue Lihong, Yang Linzhang. Different extraction technology of red edge position estimation of comparative study on the chlorophyll content of vegetables [J]. *Journal of Agricultural Engineering*, 2008, 2(9): 165–169. (in Chinese)
- [17] Zou Hongyu, Zheng Hongping. Discussion vegetation "red edge" effect and its quantitative analysis method [J]. *Remote Sensing Information-Summary*, 2010, 21(4): 112–116. (in Chinese)
- [18] Liu Xiuying, Xiong Jianli, Lin Hui, et al. Based on the high spectral characteristic parameters camphor chlorophyll content estimation model [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2011, 5: 1–44. (in Chinese)
- [19] Yi Qiuixiang, Huang Jingfeng, Wang Xiuzhen, et al. The corn chlorophyll of hyper spectral remote sensing estimation model research [J]. *Science and Technology*, 2007, 23(1): 83–87. (in Chinese)
- [20] Zhao Xiang, Liu Suhong, Wang Peijuan, et al. Based on the hyperspectral data of wheat chlorophyll content inversion [J]. *Journal of Geography and Geographic Information Science*, 2004, 20(3): 36–39. (in Chinese)