

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

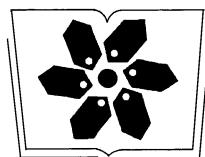
Acta Ecologica Sinica



第33卷 第3期 Vol.33 No.3 2013

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报 (SHENTAI XUEBAO)

第33卷 第3期 2013年2月 (半月刊)

目 次

生态系统服务功能模拟与管理

- 保障自然资本与人类福祉:中国的创新与影响 Gretchen C. Daily, 欧阳志云, 郑 华, 等 (669)
建立我国生态补偿机制的思路与措施 欧阳志云, 郑 华, 岳 平 (686)
区域生态合作机制下的可持续农户生计研究——以“稻改旱”项目为例
..... 梁义成, 刘 纲, 马东春, 等 (693)
生态系统服务功能管理研究进展 郑 华, 李屹峰, 欧阳志云, 等 (702)
白洋淀流域生态系统服务评估及其调控 白 杨, 郑 华, 庄长伟, 等 (711)
汶川地震灾区生物多样性热点地区分析 徐 佩, 王玉宽, 杨金凤, 等 (718)
土地利用变化对生态系统服务功能的影响——以密云水库流域为例 李屹峰, 罗跃初, 刘 纲, 等 (726)
森林生态效益税对陕西省产业价格水平的影响 黎 洁, 刘峰男, 韩秀华 (737)
海南岛生态系统土壤保持功能空间特征及影响因素 饶恩明, 肖 焰, 欧阳志云, 等 (746)
居民对文化林生态系统服务功能的认知与态度 高 虹, 欧阳志云, 郑 华, 等 (756)
青海省三江源自然保护区生态移民补偿标准 李屹峰, 罗玉珠, 郑 华, 等 (764)
张家界武陵源风景区自然景观价值评估 成 程, 肖 焰, 欧阳志云, 等 (771)
国家生态保护重要区域植被长势遥感监测评估 侯 鹏, 王 桥, 房 志, 等 (780)
都江堰市水源涵养功能空间格局 傅 斌, 徐 佩, 王玉宽, 等 (789)
汶川地震重灾区生态系统碳储存功能空间格局与地震破坏评估 彭 怡, 王玉宽, 傅 斌, 等 (798)

前沿理论与学科综述

- “波特假说”——生态创新与环境管制的关系研究述评 董 颖, 石 磊 (809)
生态环境保护与福祉 李惠梅, 张安录 (825)
丛枝菌根真菌最新分类系统与物种多样性研究概况 王宇涛, 辛国荣, 李韶山 (834)

个体与基础生态

- “蒸发悖论”在秦岭南北地区的探讨 蒋 冲, 王 飞, 刘思洁, 等 (844)
内蒙古荒漠草原主要草食动物食性及其营养生态位 刘贵河, 王国杰, 汪诗平, 等 (856)
基于面向对象及光谱特征的植被信息提取与分析 崔一娇, 朱 琳, 赵力娟 (867)
桉树叶片光合色素含量高光谱估算模型 张永贺, 陈文惠, 郭乔影, 等 (876)
枫杨幼苗对土壤水分“湿-干”交替变化光合及叶绿素荧光的响应 王振夏, 魏 虹, 吕 茜, 等 (888)
模拟淹水对杞柳生长和光合特性的影响 赵竑绯, 赵 阳, 张 驰, 等 (898)
梨枣花果期耗水规律及其与茎直径变化的相关分析 张琳琳, 汪有科, 韩立新, 等 (907)
基于上部叶片 SPAD 值估算小麦氮营养指数 赵 舜, 姚 霞, 田永超, 等 (916)

种群、群落和生态系统

- 我国南亚热带几种人工林生态系统碳氮储量 王卫霞, 史作民, 罗 达, 等 (925)

- 低效柏木纯林不同改造措施对水土保持功能的影响..... 黎燕琼, 龚固堂, 郑绍伟, 等 (934)
浙江紧水滩水库浮游植物群落结构季节变化特征..... 张 华, 胡鸿钧, 晁爱敏, 等 (944)
黑龙江凤凰山国家级自然保护区野猪冬季容纳量及最适种群密度 孟根同, 张明海, 周绍春 (957)
云南苍山火烧迹地不同恢复期地表蜘蛛群落多样性..... 马艳滟, 李 巧, 冯 萍, 等 (964)

景观、区域和全球生态

- 基于综合气象干旱指数的石羊河流域近 50 年气象干旱特征分析 张调风, 张 勃, 王有恒, 等 (975)
基于 CLUE-S 模型的湟水流域土地利用空间分布模拟 冯仕超, 高小红, 顾 娟, 等 (985)

研究简报

- 三大沿海城市群滨海湿地的陆源人类活动影响模式..... 王毅杰, 俞 慎 (998)
洋河水库富营养化发展趋势及其关键影响因素..... 王丽平, 郑丙辉 (1011)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 350 * zh * P * ¥ 90.00 * 1510 * 36 * 2013-02



封面图说:卧龙自然保护区核桃坪震后——汶川大地震是新中国成立以来破坏性最强、波及范围最大的一次地震, 地震的强度、烈度都超过了 1976 年的唐山大地震。在这次地震中, 震区的野外大熊猫受到不同程度的影响, 卧龙自然保护区繁育中心的赠台大熊猫团团、圆圆居住的屋舍上方巨石垮塌, 房舍全部毁坏, 只因两只熊猫在屋外玩耍逃过一劫。不过, 圆圆一度因惊恐逃走, 失踪 5 天后才被找回来。由于繁育基地两面山体滑坡, 竹子短缺等原因, 繁育基地只能将大熊猫全部转移下山。

彩图提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites. chenjw@163. com

DOI: 10.5846/stxb201206240889

张永贺,陈文惠,郭乔影,张清林.桉树叶片光合色素含量高光谱估算模型.生态学报,2013,33(3):0876-0887.

Zhang Y H, Chen W H, Guo Q Y, Zhang Q L. Hyperspectral estimation models for photosynthetic pigment contents in leaves of *Eucalyptus*. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(3): 0876-0887.

桉树叶片光合色素含量高光谱估算模型

张永贺,陈文惠*,郭乔影,张清林

(福建师范大学地理科学学院,福州 350007)

摘要:色素在植物的生理生态过程中非常重要,利用高光谱数据,揭示光谱反射率上特征波段与光合色素含量间的关系将有助于理解光合色素光谱反射特征的规律,同时为利用高光谱遥感技术快速无损监测植物叶片光合色素提供了技术支持。利用野外采集的桉树叶片样本,在实验室内测定了叶片的高光谱反射率及对应的叶绿素、类胡萝卜素含量。利用光谱分析技术和统计学方法对光谱数据进行处理分析,提取了光谱特征参量,并建立叶绿素、类胡萝卜素含量与光谱特征参量间的估算模型。通过精度检验,研究结果表明以 $(SDr-SDb)/(SDr+SDb)$ 为变量建立的指数模型估算效果最佳。

关键词:桉树;光合色素含量;高光谱;估算模型

Hyperspectral estimation models for photosynthetic pigment contents in leaves of *Eucalyptus*

ZHANG Yonghe, CHEN Wenhui*, GUO Qiaoying, ZHANG Qinglin

College of Geographical Science, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

Abstract: Pigments are of great importance in physiological and ecological processes of plants. Revealing the relationships between their characteristic bands in the spectral reflectance and the contents of photosynthetic pigments using hyperspectral data will help to understand the spectral reflectance characteristics of photosynthetic pigments and provide the technical supports for rapid non-destructive monitoring of plant photosynthetic pigments using hyperspectral remote sensing. In this paper, eucalyptus leaf samples collected in field were used to measure the hyperspectral reflectance of the leaves and the corresponding contents of chlorophyll, carotenoid in our laboratory. The spectral data were processed using spectral analysis techniques and analyzed using statistical methods to extract spectral characteristic parameters and subsequently to establish the estimation models of spectral characteristics and both chlorophyll and carotenoid contents. Precision tests proved that the best model is the exponential model using $(SDr-SDb)/(SDr+SDb)$ as a variable, where SD_r and SD_b are red and blue edge areas, respectively.

Key Words: eucalyptus; pigment contents; hyperspectral; estimation model

光合作用过程中起吸收作用的色素主要有叶绿素和类胡萝卜素,其中叶绿素是吸收光能的物质,对植被的光能利用有直接关系,叶绿素含量在植被的光合能力、发育阶段以及氮素状况有较好的相关性,它们通常是氮素胁迫、光合作用能力和植被发育阶段的指示器^[1]。植物叶片中很大一部分氮是结合在叶绿素中的,植物缺少Mg、Fe、S、Cu、Zn等元素也会影响到叶绿素的合成,因此色素含量是反映植物生理功能、受害程度和其他

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资助

收稿日期:2012-06-24; 修订日期:2013-01-20

*通讯作者 Corresponding author. E-mail: whchenfz@sohu.com

矿质营养的重要指标^[2]。通常用传统的化学分析法测定植物的色素含量和营养状况,虽然测定结果直观可靠,但对植物具有破坏性。近年来,高光谱遥感技术在植物生理生态研究中得到越来越广泛的应用,可以实时、快速、无损地从叶片水平、群体水平以及生态系统等多个层面研究植物在各种环境条件下的生理生态变化^[3]。国内外许多学者在植被色素浓度反演方面进行了深入的研究,并取得了许多成功的经验和宝贵的研究结果。Strachan 等^[2]研究 3 个施氮水平的玉米红边位置和叶绿素计 SPAD 值呈极显著的相关, $R^2 = 0.81$ 。吴长山^[4]研究与水稻、玉米叶绿素密度相关性显著的敏感波段为一阶导数光谱 762 nm 处。陈维君等^[5]得出 mSR_{705} 、 mND_{705} 和 PRI 等指数可用于估算水稻叶片、穗的色素含量,作为水稻成熟度的监测指标。姚付启等^[6]研究指出与红边位置相比,基于峰度、偏度建立的估算模型可以有效提高估算精度。与单变量模型相比人工神经网络模型反演精度明显提高,是一种良好的植被叶绿素含量高光谱反演模式。吉海彦等^[7]采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。李云梅等^[8]利用 PROSPECT 模型和 FCR 模型,模拟出叶绿素含量变化对叶片反射率的影响,同时发现叶面积指数的影响也不能忽略。

本文通过对桉树叶片原始光谱及其变换形式与叶片色素含量间的相关性分析,找出各光谱形式对色素含量的敏感波段。利用基于光谱位置、面积及植被指数变量的光谱特征参数与色素含量进行相关性分析,寻找最佳相关性的生化组分参量。利用光谱参量进行色素含量相关关系拟合并建立估算模型,用均方根误差进行模型的精度检验。

1 实验数据获取

1.1 样品准备

实验样品桉树叶片采集时间为 2011 年 10 月 11 日,实验地点位于福建省福州市白沙国有林场,实验对象是林龄为 3a 的人工种植的桉树林。采集样品时,采集桉树距离地面 2 m 处幼枝条上的幼叶,立即装入保鲜袋,并在 4 h 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 光谱反射率测定

叶片光谱反射率的测定采用美国 Analytical Spectral Device(ASD)公司生产的便携式野外地物光谱仪 FieldSpec3,该光谱仪波段范围在 350—2500 nm,其中,350—1000 nm 光谱采样间隔为 1.4 nm,光谱分辨率为 3 nm;1000—2500 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。本实验的测试环境由室内 BRDF 测试系统建立,参数设置为光源入射天顶角 30°、入射方位角 0°,观测天顶角 0°,探头视场角为 25°,距离叶片样品表面 13 cm,(叶片宽度约为 5.7—6 cm)^[9]。光谱采样测试过程中,样品被展平置于采样波段接近全吸收的工作台上,以避免杂光干扰,并确保样品充满仪器的视场角,为尽量避免不确定性以保证精度,对每个样品同时采集 10 条光谱曲线,取平均后作为该样品的代表性光谱曲线。每隔 10 min 对仪器做 1 次优化校正。

1.3 光合色素含量测定

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^[3]。

将采集光谱后的新鲜叶片直接在实验室内进行光合色素含量测定,对每个样品取新鲜叶片 3 份,每份 0.2 g 分别加入浓度为 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,25 mL 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,再依据公式计算叶绿素 a,b 和类胡萝卜素的浓度值(mg/kg)^[2-6,10-11]。

2 研究方法

2.1 光合色素含量与原始及变换光谱之间的相关性分析

导数光谱反映了由于植被中生化物质的吸收引起的波形变化并能揭示光谱峰值的内在特征。因此,可以利用导数光谱建立生化组分与反射光谱之间的关系,估算植被内部生化组成及其含量信息^[12-13]。图 1 揭示

了桉树叶片叶绿素与几种光谱的相关关系。

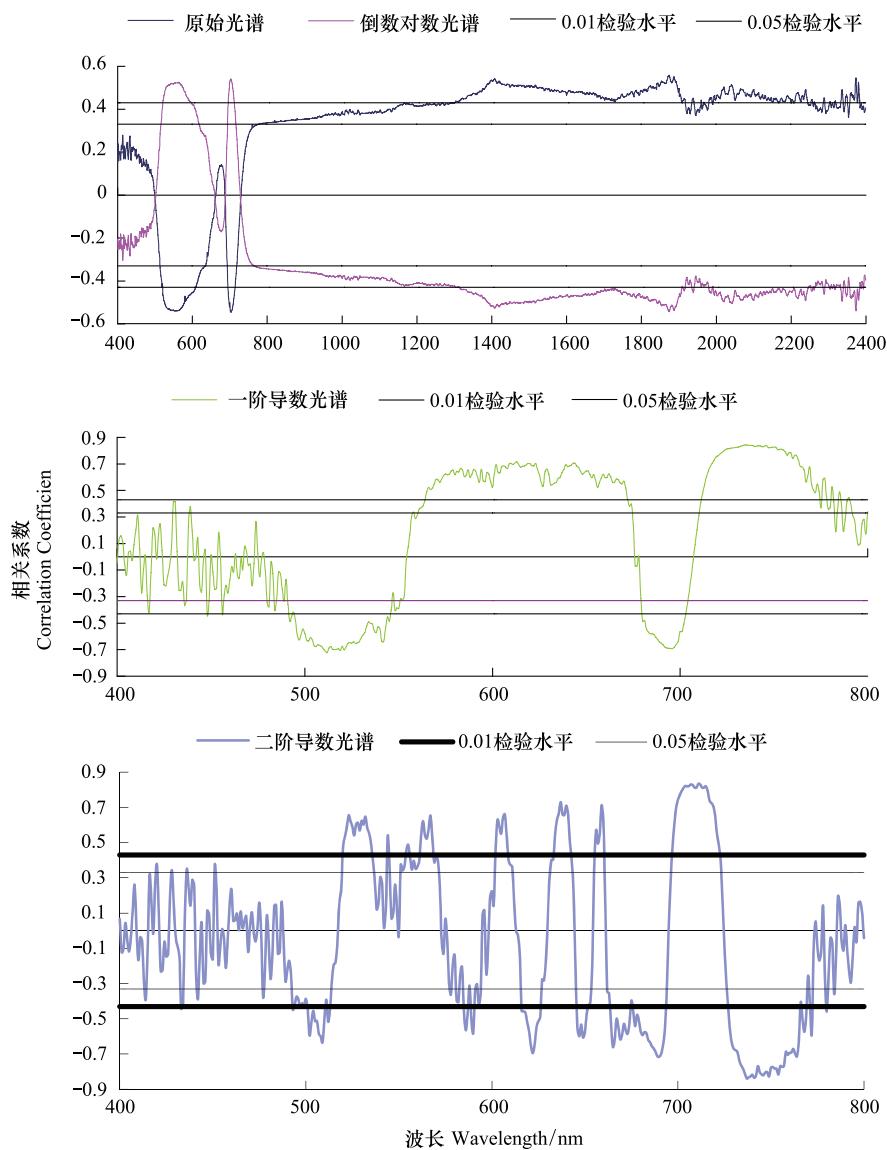


图1 桉树叶片叶绿素(Chlorophyll)与原始光谱、倒数对数光谱、一阶和二阶导数光谱间的相关系数

Fig.1 The correlation coefficient between chlorophyll content and reflectance, reciprocal logarithm spectra, the first derivative spectra, the second derivative spectra of eucalyptus leaf

从图1可看出,在可见光范围内,叶绿素含量与原始光谱反射率呈负相关,在近红外范围内呈正相关。通过图1对比分析印证了叶绿素含量与类胡萝卜素含量有很好的相关性^[8-10,13],表明光合色素含量越高,可见光波段内的光谱反射率越低,而近红外内的光谱反射率越高。无论是一阶还是二阶导数光谱,在500—800 nm范围内与叶片色素含量的相关系数波动稍小一些,且部分波段相关性通过0.01显著性检验,可以比较稳定地反映其相关关系^[14-15]。

2.2 光合色素含量与高光谱特征变量的相关性分析

2.2.1 高光谱特征变量及提取方法

常见的高光谱吸收特征变量包括基于高光谱位置变量、基于高光谱面积变量、基于高光谱植被指数变量3种类型,文种共采用了20个吸收特征变量见表1。

表1 高光谱特征参量及说明

Table 1 The Hyperspectral characteristic parameters and description

光谱特征变量 Spectral characteristic variables	参数说明 Parameter Description
Db (蓝边幅值) The amplitude of the blue edge	490—530 nm 内一阶导数光谱中的最大值
λ_b (蓝边位置) The location of the blue edge	Db 对应的波长位置(nm)
Dy (黄边幅值) Yellow edge amplitude	560—640 nm 内一阶导数光谱中的最大值 ^[9]
λ_y (黄边位置) Yellow edge position	Dy 对应的波长位置(nm)
Dr (红边幅值) The amplitude of the red edge	680—760 nm 内一阶导数光谱中的最大值 ^[10]
λ_r (红边位置) Red edge position	Dr 对应的波长位置(nm)
Rg (绿峰反射率) Green peak reflectance	510—560 nm 内光谱反射率的最大值 ^[10]
λ_g (绿峰位置) Green peak position	Rg 对应的波长位置(nm)
Rr (红谷反射率) Red Valley reflectivity	650—690 nm 内光谱反射率最小值 ^[11]
λ_b (红谷位置) Red Valley location	Rr 对应的波长位置(nm)
SDb (蓝边面积) Blue edge area	蓝边波长范围内一阶导数波段值的总和
SDy (黄边面积) Yellow edge area	黄边波长范围内一阶导数波段值的总和
SDr (红边面积) Red edge area	红边波长范围内一阶导数波段值的总和
SDg (绿峰面积) Green peak area	在510—560 nm 内原始光谱曲线所包围的面积
$VI_1 = Rg/Rr$	绿峰反射率 Rg 与红谷反射率 Rr 的比值
$VI_2 = (Rg - Rr) / (Rg + Rr)$	绿峰反射率 Rg 与红谷反射率 Rr 的归一化值
$VI_3 = SDr/SDb$	红边面积 SDr 与蓝边面积 SDb 的比值 ^[12]
$VI_4 = SDr/SDy$	红边面积 SDr 与黄边面积 SDy 的比值 ^[16]
$VI_5 = (SDr - SDb) / (SDr + SDb)$	红边面积 SDr 与蓝边面积 SDb 的归一化值 ^[13]
$VI_6 = (SDr - SDy) / (SDr + SDy)$	红边面积 SDr 与黄边面积 SDy 的归一化值 ^[7,17]

2.2.2 光合色素含量与光谱特征变量的相关性分析

利用 spss 统计软件计算光合色素含量与高光谱变量之间的相关系数,结果见表2。

表2 光合色素含量与高光谱变量之间的相关系数($n=35$)

Table 2 Correlation coefficients between pigment contents and the hyperspectral variables

光谱变量类型 Spectral types of variables		叶绿素 a Chlorophyll a	叶绿素 b Chlorophyll b	总叶绿素 Total chlorophyll	类胡萝卜素 Carotenoids
光谱位置变量	Db	-0.693 **	-0.688 **	-0.692 **	-0.667 **
Spectral position variables	λ_b	0.685 **	0.675 **	0.683 **	0.676 **
	Dy	0.555 **	0.549 **	0.554 **	0.530 **
	λ_y	-0.271	-0.291	-0.277	-0.291
	Dr	-0.035	-0.026	-0.033	-0.028
	λ_r	0.850 **	0.843 **	0.849 **	0.819 **
	Rg	-0.533 **	-0.549 **	-0.538 **	-0.519 **
	λ_g	-0.114	-0.129	-0.118	-0.118
	Rr	0.132	0.096	0.122	0.122
	λ_b	-0.573 **	-0.586 **	-0.578 **	-0.582 **
光谱面积变量	SDb	-0.697 **	-0.696 **	-0.698 **	-0.674 **
Spectral area of variable	SDy	-0.669 **	-0.663 **	-0.668 **	-0.643 **
	SDr	0.311	0.318	0.314	0.308
	SDg	-0.499 **	-0.518 **	-0.505 **	-0.487 **
植被指数变量	VI_1	-0.640 **	-0.611 **	-0.633 **	-0.616 **
Vegetation index variable	VI_2	-0.674 **	-0.644 **	-0.667 **	-0.647 **
	VI_3	0.874 **	0.873 **	0.875 **	0.841 **
	VI_4	0.859 **	0.858 **	0.860 **	0.825 **
	VI_5	0.840 **	0.842 **	0.842 **	0.815 **
	VI_6	0.840 **	0.838 **	0.840 **	0.812 **

* * 表示通过 0.01 极显著水平,下划线表示相关系数绝对值大于 0.6 的变量

从表2可看出,色素含量与蓝边幅值、蓝边位置、黄边幅值、红边位置、绿峰反射率、红谷位置、蓝边面积、黄边面积、绿峰面积及所有植被指数变量之间的相关系数都达到0.01极显著检验水平^[18]。其中,色素含量与红边位置、“三边”面积构成的植被指数之间的相关系数大于0.8。色素含量与“蓝边参数”、黄边面积、绿峰和红谷反射率构成的植被指数之间的相关系数绝对值在0.6—0.7之间。

3 估算模型建立

将用于建立桉树色素含量估算模型样本的数据随机划分为两组,其中总样本的2/3用于建模,剩余的1/3用于模型验证。根据图1选取波段512、735m、711、737 nm的倒数光谱作为自变量,这些波段之间的相关系数都通过0.01检验。根据表2选取红边位置、蓝边面积、红边面积SDr与蓝边面积SDb的比值、红边面积SDr与蓝边面积SDb的归一化值、红边面积SDr与蓝边面积SDb的归一化值,这些相关系数大于0.6的变量作为估算模型建立的自变量。

3.1 单变量线性和非线性模型

本研究选用4个单变量线性与非线性模型,包括:

$$\text{简单线性模型} \quad Y = a + bX \quad (1)$$

$$\text{对数模型} \quad Y = a + b\ln(X) \quad (2)$$

$$\text{抛物线模型} \quad Y = a + bX + cX^2 \quad (3)$$

$$\text{指数模型} \quad Y = ae^{bx} \quad (4)$$

式中, Y 代表光合色素含量, X 是从高光谱数据中提取的自变量, a 、 b 、 c 为回归系数^[15,19-21]。表3是总叶绿素含量与高光谱变量拟合模型参数表,表4是类胡萝卜素含量与高光谱变量的合模型参数表,图2是叶绿素含量与高光谱变量拟合结果比较,图3是类胡萝卜素含量与高光谱变量的拟合结果比较。

表3 总叶绿素含量与高光谱变量的线性与非线性拟合模型参数表

Table 3 Parameter of linear and nonlinear models between chlorophyll content with the hyperspectral variables

变量 Variable	模型 Model	a	b	c	训练样本($n=23$)		验证样本($n=12$)	
					R^2	F	R^2	RMSE
λr	线性	-57.3665	0.0834		0.831	103.15	0.621	0.4319
	对数	-386.7846	59.2007		0.832	103.76	0.618	0.4451
	抛物线	-57.3665	0.0834	0.0000	0.831	103.15	0.621	0.4436
	指数	$6.6119 * 10^{-17}$	0.0533		0.721	54.37	0.725	0.3936
SDb	线性	2.9437	-19.5864		0.686	45.80	0.341	0.6326
	对数	-1.9524	-1.2982		0.713	52.06	0.536	0.5265
	抛物线	3.4458	-34.3222	96.8695	0.711	24.60	0.486	0.5328
	指数	3.9394	-14.0677		0.753	63.91	0.518	0.5295
VI_3	线性	0.4861	0.1724		0.742	60.26	0.884	0.3528
	对数	-0.7473	1.3021		0.798	83.02	0.776	0.3639
	抛物线	-0.5197	0.4551	-0.0172	0.802	40.50	0.63	0.4141
	指数	0.7502	0.1080		0.619	34.17	0.894	0.6120
VI_4	线性	0.2377	0.2220		0.692	47.26	0.852	0.3278
	对数	-1.2583	1.6087		0.739	59.61	0.765	0.3583
	抛物线	-1.3051	0.6725	-0.0298	0.748	29.72	0.649	0.4082
	指数	0.6461	0.1381		0.570	27.85	0.887	0.3851
VI_5	线性	-2.3055	5.5313		0.787	77.73	0.634	0.4283
	对数	2.9167	3.6948		0.760	66.39	0.556	0.4669
	抛物线	0.1872	-1.7357	5.2137	0.800	39.90	0.724	0.3827
	指数	0.0996	3.8429		0.809	88.77	0.797	0.3612
VI_6	线性	-3.3505	7.0290		0.750	63.03	0.671	0.4049

续表

变量 Variable	模型 Model	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	训练样本(<i>n</i> =23)		验证样本(<i>n</i> =12)	
					Training samples		<i>R</i> ²	RMSE
					<i>R</i> ²	<i>F</i>		
ρ'_{512}	对数	3.3681	4.9840		0.747	62.12	0.621	0.4320
	抛物线	-3.2450	6.7321	0.2069	0.750	30.02	0.673	0.4039
	指数	0.0556	4.6839		0.709	51.11	0.801	0.3534
	线性	2.5919	-543.5051		0.717	53.10	0.345	0.6003
	对数	-4.2449	-0.9100		0.776	72.89	0.602	0.4314
	抛物线	2.9822	-975.9297	97454.7619	0.771	33.71	0.540	0.4636
ρ'_{735}	指数	3.0728	-392.8395		0.797	82.27	0.532	0.4689
	线性	0.2068	365.4898		0.674	43.43	0.769	0.3419
	对数	9.1300	1.3397		0.671	42.76	0.656	0.3975
	抛物线	-0.0695	510.0911	-17319.9335	0.679	21.11	0.731	0.3595
	指数	0.5969	242.5647		0.632	36.04	0.850	0.2849
	线性	1.8613	3383.8042		0.713	52.20	0.683	0.3943
ρ''_{711}	抛物线	1.8402	3549.8846	1472344.1167	0.718	25.42	0.750	0.3576
	指数	1.7899	2247.9471		0.670	42.59	0.824	0.3356
	线性	-0.2350	-6575.5390		0.650	39.08	0.770	0.3303
	抛物线	-0.2840	-6935.4562	-627187.4050	0.651	18.61	0.766	0.3327
	指数	0.4321	-4467.8955		0.639	37.18	0.858	0.2622

表4 类胡萝卜素含量与高光谱变量的线性与非线性拟合模型参数表

Table 4 Parameter of linear and nonlinear models between carotenoids content with the hyperspectral variables

变量 Variable	模型 Model	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	训练样本(<i>n</i> =23)		验证样本(<i>n</i> =12)	
					Training samples		<i>R</i> ²	RMSE
					<i>R</i> ²	<i>F</i>		
λr	线性	-6.4188	0.0094		0.748	62.16	0.623	0.0568
	对数	-43.5183	6.6671		0.749	62.49	0.62	0.0559
	抛物线	-6.4188	0.0094	0.0000	0.748	62.16	0.623	0.0557
	指数	1.3207×10^{-14}	0.0430		0.682	45.10	0.703	0.0489
	线性	0.3721	-2.2040		0.616	33.69	0.337	0.0759
	对数	-0.1748	-0.1446		0.627	35.36	0.531	0.0637
SDb	抛物线	0.4170	-3.5235	8.6736	0.630	17.06	0.458	0.0666
	指数	0.4524	-11.1155		0.682	45.05	0.486	0.0650
	线性	0.0979	0.0190		0.642	37.62	0.858	0.0441
	对数	-0.0410	0.1453		0.705	50.19	0.764	0.0459
	抛物线	-0.0336	0.0560	-0.0022	0.715	25.10	0.546	0.0570
	指数	0.1213	0.0862		0.573	28.17	0.862	0.0588
VI_4	线性	0.0716	0.0243		0.590	30.28	0.84	0.0429
	对数	-0.0942	0.1774		0.638	36.99	0.765	0.0454
	抛物线	-0.1196	0.0802	-0.0037	0.651	18.68	0.62	0.0532
	指数	0.1081	0.1096		0.521	22.86	0.865	0.0424
	线性	-0.2182	0.6218		0.706	50.43	0.632	0.0530
	对数	0.3695	0.4171		0.687	46.09	0.556	0.0575
VI_5	抛物线	-0.0284	0.0686	0.3969	0.711	24.61	0.691	0.0495
	指数	0.0246	3.0468		0.738	59.10	0.76	0.0453
	线性	-0.3272	0.7782		0.652	39.42	0.679	0.0498
	对数	0.4171	0.5530		0.653	39.49	0.633	0.0525

续表

变量 Variable	模型 Model	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	训练样本(<i>n</i> =23)		验证样本(<i>n</i> =12)	
					Training samples		Validation sample	
					<i>R</i> ²	<i>F</i>	<i>R</i> ²	RMSE
ρ'_{512}	抛物线	-0.4703	1.1807	-0.2805	0.653	18.83	0.656	0.0511
	指数	0.0157	3.6926		0.639	37.23	0.777	0.0435
	线性	0.3335	-61.7784		0.657	40.21	0.339	0.0728
	对数	-0.4370	-0.1024		0.698	48.47	0.595	0.0545
ρ'_{735}	抛物线	0.3732	-105.7135	9901.5749	0.697	23.00	0.522	0.0588
	指数	0.3730	-312.2954		0.731	56.99	0.496	0.0601
	线性	0.0652	40.8420		0.597	31.14	0.767	0.0453
	对数	1.0686	0.1508		0.603	31.93	0.652	0.0514
ρ''_{711}	抛物线	0.0243	62.2527	-2564.5184	0.604	15.27	0.716	0.0477
	指数	0.1015	192.5120		0.578	28.72	0.835	0.0390
	线性	0.2499	374.6710		0.620	34.32	0.677	0.0493
	抛物线	0.2481	388.8681	125861.0319	0.623	16.51	0.729	0.0463
ρ''_{737}	指数	0.2425	1770.8504		0.603	31.93	0.792	0.0415
	线性	0.0138	-741.7894		0.587	29.89	0.759	0.0445
	抛物线	-0.0062	-888.9535	-256446.6091	0.588	14.27	0.742	0.0454
	指数	0.0784	-3551.8164		0.586	29.75	0.832	0.0380

3.2 多元回归模型

由于植物叶片中各种生化物质对应特定的光谱吸收特征,是进行波段选择的基本依据。但这些化学成分是混合在一起的,彼此间加强或削弱了各自的吸收特征。因此,估测某一成分时只用单一波段是不够的,需要进行波段选择和重组,选用多元回归分析是最好的方法之一^[22,23]。

多元回归分析方程的一般形式^[22]为:

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \dots + b_i X_i \quad (5)$$

式中, Y 代表估算的色素含量, X_i 代表第 i 个特征变量, b_i 是第 i 个特征变量的回归系数, b_0 为回归常数。

表 5 是基于敏感光谱参量的桉树叶光合色素含量估算多元回归模型,从中可看出,无论是叶绿素还是类胡萝卜素,对于变换光谱数据来说,都是倒数对数光谱特征参数为自变量时拟合最优, R^2 与 F 检验值均最大,其中 R^2 分别是 0.851 和 0.786。

表 5 基于高光谱数据变换的桉树叶色素多元回归模型

Table 5 Multivariate regression models for pigment estimation of eucalyptus leaf based on hyperspectral transformation variables

光谱形式 Spectrum in the form	回归方程 Regression equation	拟合 R^2 Fitting	预测 R^2 Prediction	验证 RMSE
原始光谱	$Chlt = 1.692 + 13.127 \times \rho_{551} - 23.357 \times \rho_{703} + 11.659 \times \rho_{1408} - 2.636 \times \rho_{1874}$	0.821	0.55	0.4768
The original spectrum	$Cars = 0.221 + 1.805 \times \rho_{551} - 2.879 \times \rho_{703} + 0.574 \times \rho_{1408} + 0.533 \times \rho_{1874}$	0.77	0.527	0.0598
倒数对数 Derivative	$Chlt = 0.794 - 8.211 \times \lg(1/\rho_{562}) + 13.362 \times \lg(1/\rho_{703}) - 6.953 \times \lg(1/\rho_{1408}) + 3.062 \times \lg(1/\rho_{1874})$	0.851	0.605	0.4936
logarithmic spectrum	$Cars = 0.168 - 1.024 \times \lg(1/\rho_{562}) + 1.595 \times \lg(1/\rho_{703}) - 0.450 \times \lg(1/\rho_{1408})$	0.786	0.593	0.0601
一阶导数	$Chlt = 1.515 + 178.313 \times \rho'_{735} - 483.112 \times \rho'_{512} - 337.872 \times \rho'_{613}$	0.793	0.562	0.4614
First derivative spectrum	$Cars = 0.203 + 16.245 \times \rho'_{735} - 94.588 \times \rho'_{512} - 52.874 \times \rho'_{613} + 11.396 \times \rho'_{696}$	0.726	0.504	0.06
二阶导数	$Chlt = 0.996 - 5134.365 \times \rho''_{737} - 523.279 \times \rho''_{711} - 3790.018 \times \rho''_{637} - 1849.146 \times \rho''_{690}$	0.786	0.667	0.3873
Second derivative spectrum	$Cars = 0.14 - 673.09 \times \rho''_{737} - 149.652 \times \rho''_{711} - 492.981 \times \rho''_{637} - 250.47 \times \rho''_{690}$	0.711	0.62	0.0518

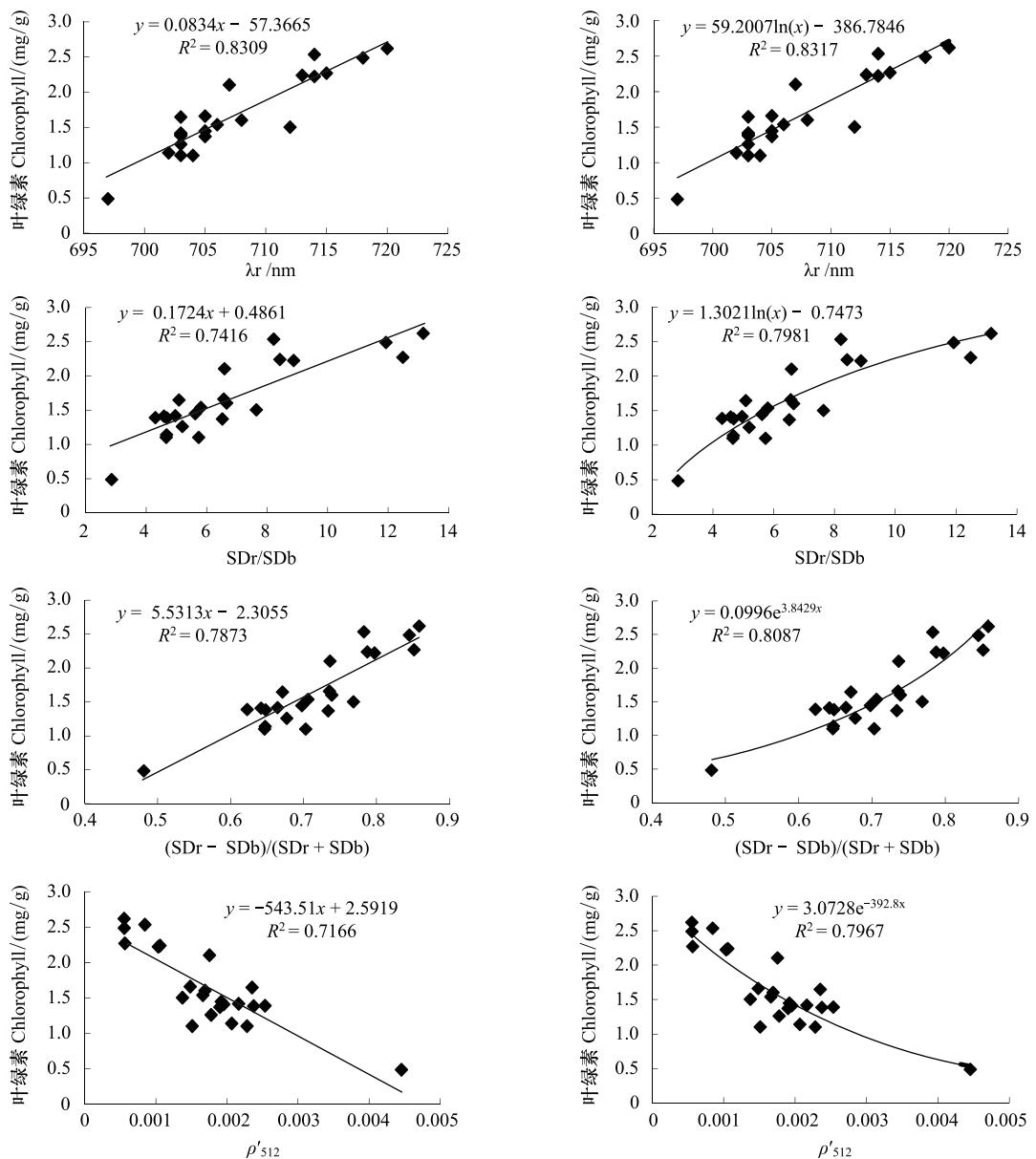
图2 叶绿素含量与高光谱变量的线性与非线性拟合结果比较($n=23$)

Fig. 2 Comparison between linear and nonlinear models of chlorophyll content estimation using the hyperspectral variables

4 模型精度检验

本研究采用均方根误差(RMSE)^[23-25]评价模型精度。

$$\text{RMSE} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - y'_i)^2 / n} \quad (6)$$

式中, y_i 和 y'_i 分别为叶片色素含量的实测值和用拟合模型计算的预测值, n 为样本数, RMSE 值越小则结果越精确。

从表3和表4可看出,无论是叶绿素还是类胡萝卜素,除 SDb 、 ρ'_{512} 预测的 R^2 小于 0.6 外,模型预测精度较高。除 VI_5 外,其他验证样本 R^2 最大和 RMSE 最小都不与其最优拟合模型相对应。对于叶绿素含量估算模型中,拟合 R^2 与预测 R^2 均大于 0.75 的模型只有 VI_3 为自变量的对数模型及 VI_5 为自变量的指数模型,其中又以 VI_5 为自变量的指数模型最优,拟合 R^2 、预测 R^2 及 RMSE 分别为 0.809、0.797 和 0.3612。而对于类胡萝卜素含量估算模型中,拟合 R^2 与预测 R^2 均大于 0.7 的模型也只有这两个,其中也以 VI_5 为自变量的指数

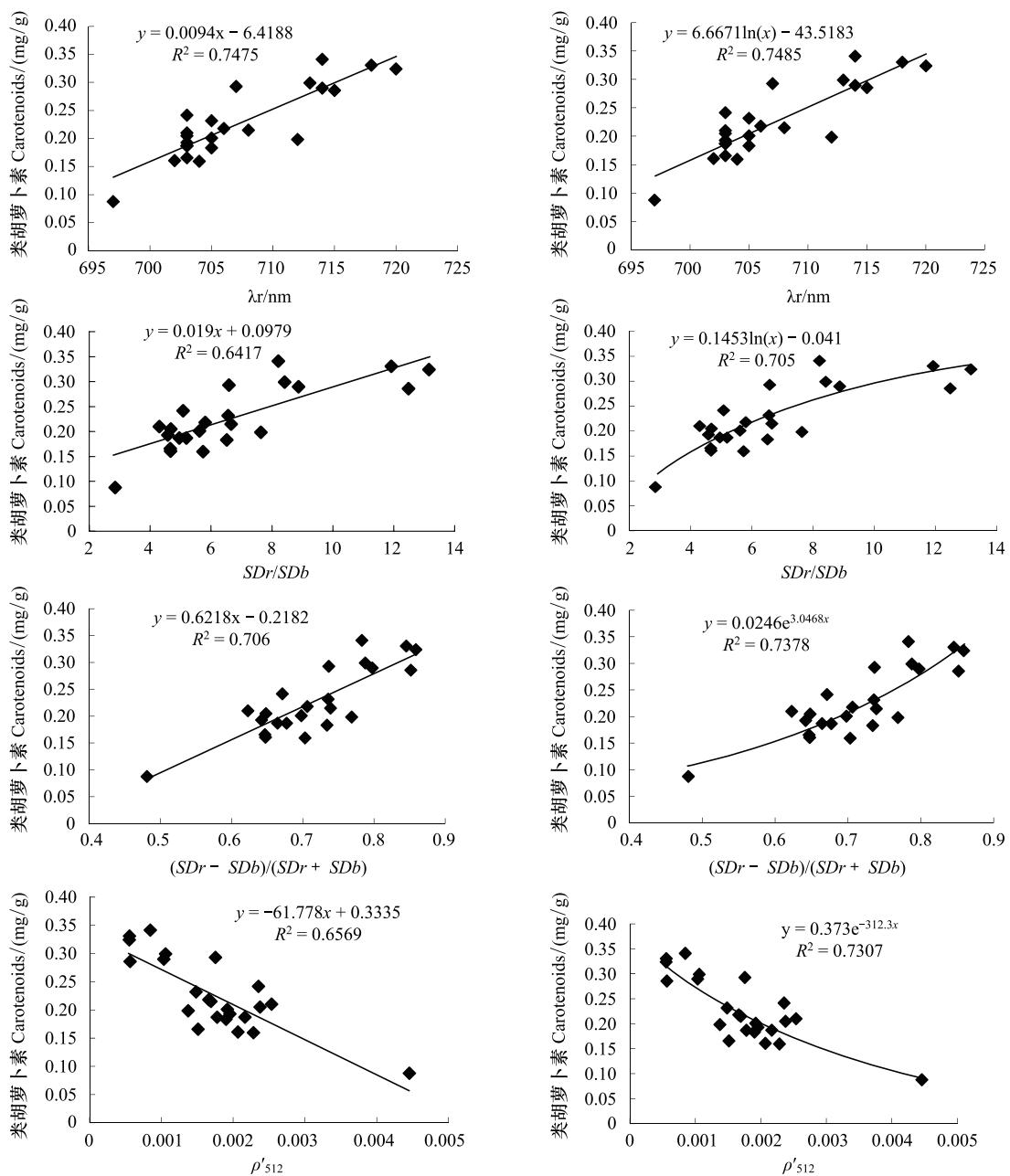
图3 类胡萝卜素含量与高光谱变量的线性与非线性拟合结果比较($n=23$)

Fig. 3 Comparison between linear and nonlinear models of carotenoids content estimation using the hyperspectral variables

模型最优,拟合 R^2 、预测 R^2 及RMSE分别为0.738、0.76和0.0453。

从表5中可看出,无论是叶绿素还是类胡萝卜素,以倒数对数光谱为自变量的预测 R^2 虽然比以二阶导数光谱为自变量的预测 R^2 小,但数值相差不大,因此仍认为倒数对数光谱为自变量的估算模型最优。^[26]其中总叶绿素含量的估算模型拟合 R^2 、预测 R^2 及RMSE分别为0.851、0.605和0.4936,类胡萝卜素含量的估算模型拟合 R^2 、预测 R^2 及RMSE分别为0.786、0.593和0.060。

从整体上看,以 $(SDr-SDb)/(SDr+SDb)$ 为自变量的指数模型最优,其训练样本拟合与验证样本精度检验水平均较高。从图4中可看出色素含量的估算效果整体上较好,实测值与估算值相关性较强^[27-28]。

5 结果及讨论

在本研究中,通过对光合色素含量与高光谱特征变量之间的相关性分析、估算模型建立及模型的精度检

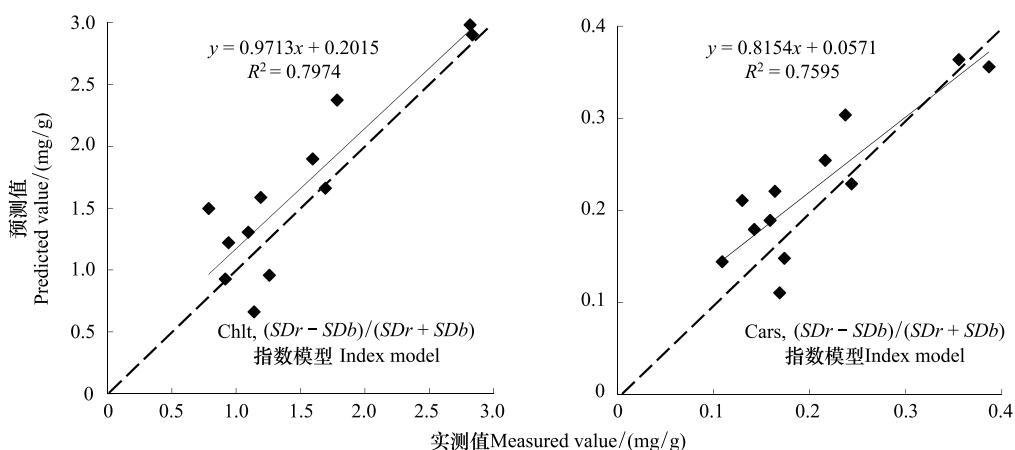
图 4 总叶绿素和类胡萝卜素含量估算模型的预测效果检验($n=12$)

Fig. 4 Validation of models for chlorophyll and carotenoids content estimation

验,可以得出以下结论:

(1) 原始光谱和倒数对数光谱与色素含量在各波长范围中的相关性具有一致性,且在近红处也有 600 nm 左右波段范围相关性通过 0.01 极显著检验,波动较小,相关性较稳定。这一结论与黄敬峰等^[3]叶绿素含量与光谱反射率在可见光和近红外光区均呈极显著负相关研究成果一致。在一阶、二阶导数光谱与色素含量的相关性最大,但相关性在较近的波长范围内上下波动的频率大,且只在 500—800 nm 部分波段通过 0.01 极显著性检验。这一研究结果与吴长山等^[4]导数光谱与叶绿素密度具有较高的相关性,特别是导数光谱在 720—770 nm 波段与叶绿素密度的相关关系拟合度达到了 0.89 研究结果相近。

(2) 由相关性得出敏感光谱波段:原始光谱为 551、703、1408、1874 nm,倒数对数光谱为 562、703、1408、1874 nm,一阶导数光谱为 512、613、696、735 nm,二阶导数光谱为 637、690、711、737 nm。其中以倒数对数光谱为自变量的估算模型为最优。这一研究与刘璇等^[24]对杉木光谱反射率一阶导数与叶绿素 a 含量相关分析,叶绿素 a 含量敏感的光谱波段为 530 nm 和 690 nm,相关系数均通过了 0.05 或 0.01 显著性检验水平,结果相近。

(3) 光合色素含量与 Db 、 λb 、 Dy 、 λy 、 Rg 、 $\lambda 0$ 、 SDb 、 SDy 、 SDg 、 Rg/Rr 、 $(Rg-Rr)/(Rg+Rr)$ 、 SDr/SDb 、 SDr/SDy 、 $(SDr-SDb)/(SDr+SDb)$ 、 $(SDr-SDy)/(SDr+SDy)$ 之间的相关性通过了 0.01 极显著性检验水平,其中 λr 、 SDr/SDb 、 SDr/SDy 、 $(SDr-SDb)/(SDr+SDb)$ 、 $(SDr-SDy)/(SDr+SDy)$ 与光合色素含量的相关系数高达 0.8 以上。以 ρ'_{s12} 、 λr 、 SDr/SDb 、 $(SDr-SDb)/(SDr+SDb)$ 为自变量的单变量非线性估算模型拟合较好。该结论与刘秀英等^[18]叶绿素含量与 Db 、 Rg 、 Rg/Ro 、 $(Rg-Ro)/(Rg+Ro)$ 之间的相关系数达到了 0.01 极显著性检验水平研究成果一致。并与冯伟等^[26]光谱参数 SDr/SDb 可以较好地监测小麦叶片色素密度,其中以叶绿素 a 和叶绿素 a+b 表现最好结论相近^[22]。

(4) 利用色素含量与高光谱特征变量之间的关系,建立了桉树叶片色素含量的估算模型,通过精度检验分析,优选出了桉树叶片色素含量最适合的估算模型。但是对不同年龄组,不同色素含量级别与光谱之间的相关性研究还未深入探讨,样本的数据量有待增加,以便建立基于大量统计数据基础上的桉树光合色素含量高光谱估算模型。

References:

- [1] Filella I, Serrano L, Serra J, Pefiuelas J. Evaluating wheat nitrogen status with canopy reflectance indices and discriminant analysis. Crop Science, 1995, 35(5): 1400-1405.
- [2] Strachan I B, Pattey P, Boisvert J B. Impact of nitrogen and environmental conditions on corn as detected by hyper spectral reflectance. Remote

- Sensing of Environment, 2002, 80(2) : 213-224.
- [3] Chen L, hung J F, Wang F M, Tang Y L. Comparison between back propagation neural network and regression models for the estimation of pigment content in rice leaves and panicles using hyper spectral data Remote Sensing, 2007, 28(16) : 3457-3478.
- [4] Wu C S, Xiang Y Q, Deng L F, Tong Q X. Estimating chlorophyll density of crop canopies by using Hyperspectral data. Journal of Remote Sensing, 2000, 4(3) : 228-232.
- [5] Chen W J, Zhou Q F, Huang J F. Estimating pigment contents in leaves and panicles of rice after milky ripening by hyperspectral vegetation indices. Chinese Journal of Rice Science, 2006, 20(4) : 434-439.
- [6] Yao F Q, Zhang Z H, Yang R Y, Sun J W, Cui S F. Hyperspectral models for estimating vegetation chlorophyll content based on red edge parameter. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(2) : 123-129.
- [7] Ji H Y, Wang P X, Yan T L. Estimations of chlorophyll and water contents in live leaf of winter wheat with reflectance spectroscopy. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2007, 27(3) : 514-516.
- [8] Li Y M, Ni S Y, Huang J F. Discussing effects of different chlorophyll concentration to leaf and canopy reflectance by hyperspectral data. Remote Sensing Technology and Application, 2003, 18(1) : 1-5.
- [9] Huang J F, Wang F M, Wang X Z, et al. Relationship between narrow band normalized difference vegetation index and rice agronomic variables, communications in soil. Science and Plant Analysis, 2004, 35(20) : 2689-2708.
- [10] Yang X H, Wang F M, Huang J F, Wang J W, Wang R C, Shen Z Q, Wang X Z. Comparison between radial basis function neural network and regression model for estimation of rRice Biophysical parameters using remote sensing. Soil Science Society of China, 2009, 19(2) : 176-188.
- [11] Huang J F, Blackburn G A. Optimizing predictive models for leaf chlorophyll concentration based on continuous wavelet analysis of hyperspectral data. International Journal of Remote Sensing, 2011, 32(24) : 1-22.
- [12] Xue Z C, Gao H Y, Peng T, Yao G. Application of spectral reflectance on research of plant eco-physiology. Plant Physiology Journal, 2011, 47 (4) : 313-320.
- [13] Ding S Y, Li H M, Qian L X. Research advances in remote sensing techniques in estimation of vegetation biochemical material contents. Chinese Journal of Ecology, 2004, 23(4) : 109-117.
- [14] Wang F M, Huang J F, Wang J X. Normalized difference ratio pigment index for estimating chlorophyll and carotenoid contents of in leaves of rice. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2009, 29(4) : 1064-1068.
- [15] Lu X, Liu F C, Tian H J. Relationship between spectral characteristics parameters at leaf level of spartina anglica and chlorophyll concentration. Science of Surveying and Mapping, 2010, 35(6) : 99-102.
- [16] Yang X G, Fan W Y, Yu Y. Establishment of hyperspectral remote sensing model for estimating forest chlorophyll content in Daxing'anling Mountain. Forest Engineering, 2010, 26(2) : 8-11.
- [17] Qian Y R, Yang F, Li J L, Gan X Y, Yang Y, Wang E Y. Estimation of photosynthetic pigment of Festuca arundinacea using hyper-spectral data. Acta Prataculturae Sinica, 2009, 18(4) : 94-102.
- [18] Liu X Y, Lin H, Wan L F, Sun H, Xong Y J, Huang D K. Hyper-spectral estimation models of the chlorophyll contents of young camphor trees based on remote sensing data. Journal of Central South University of Forestry: Technology, 2007, 27(4) : 49-54.
- [19] Tang X G, Song K S, Liu D W, Wang Z M, Zhang B, Du J, Zeng L H, Jiang G J, Wang Y D. Comparison of methods for estimating soybean chlorophyll content based on visual/near infrared reflection spectra. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, 31(2) : 371-374.
- [20] Shi R H, Zhuang D F, Niu Z, Wang W. Quantitative inversion of chlorophyll content based on radiative transfer model. Chinese Journal of Ecology, 2006, 25(5) : 591-595.
- [21] Sun Y X, Wang J H, Li B G, Liu L Y, Huang W J. Contrastive analysis based on neural network of winter wheat's chlorophyll concentration inversion with hyperspectral data. Remote Sensing Technology and Application, 2007, 22(4) : 492-496.
- [22] Zhang X Z, Deng G Q, Dai Y B, Li G Q, Hu F. Estimation models of summer maize leaf pigment content based on canopy reflectance spectra. Journal of Maize Sciences, 2010, 18(6) : 55-60.
- [23] Liu Z Y, Huang J F, Wu XH, Dong Y P, Wang F M, Liu P T. Hyperspectral remote sensing estimation models for the grassland biomass. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(2) : 111-115.
- [24] Liu X, Lin H, Zang Z, Wu X M. Study on correlation between chlorophyll-a and hyperspectral data of Cunninghamia lanceolata. Journal of Central South University of Forestry and Technology, 2010, 30(5) : 72-76.
- [25] Song K S, Zhang B, Wang Z M, Liu H J, Duan H T. Inverse model for estimating soybean chlorophyll concentration using in-situ collected canopy hyperspectral data. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(8) : 16-21.
- [26] Feng W, Zhu Y, Yao X, Tian Y C, Yao X F, Cao W X. Monitoring of wheat leaf pigment concentration with hyper-spectral remote sensing. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(5) : 992-999.

- [27] Zhao X, Liu S H, Wang P J, Wang J D, Tian Z K. A method for inverting chlorophyll content of wheat using hyperspectral. *Geography and Geo-Information Science*, 2004, 20(3): 36-39.
- [28] Yi Q X, Huang J F, Wang X Z, Qian L. Hyperspectral remote sensing estimation models for chlorophyll concentration in corn. *Bulletin of Science and Technology*, 2007, 23(1): 83-87.

参考文献:

- [4] 吴长山,项月琴,郑兰芬,童庆禧.利用高光谱数据对作物群体叶绿素密度估算的研究. *遥感学报*, 2000, 4(3): 228-232.
- [5] 陈维君,周启发,黄敬峰.用高光谱植被指数估算水稻乳熟后叶片和穗的色素含量. *中国水稻科学*, 2006, 20(4): 434-439.
- [6] 姚付启,张振华,杨润亚,孙金伟,崔素芳.基于红边参数的植被叶绿素含量高光谱估算模型. *农业工程学报*, 2009, 25(2): 123-129.
- [7] 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. *光谱学与光谱分析*, 2007, 27(3): 514-516.
- [8] 李云梅,倪绍祥,黄敬峰.高光谱数据探讨水稻叶片叶绿素含量对叶片及冠层光谱反射特性的影响. *遥感技术与应用*, 2003, 18(1): 1-5.
- [12] 薛忠财,高辉远,彭涛,姚广.光谱分析在植物生理生态研究中的应用. *植物生理学通讯*, 2011, 47(4): 313-320.
- [13] 丁圣彦,李昊民,钱乐祥.应用遥感技术评价植被生化物质含量的研究进展. *生态学杂志*, 2004, 23(4): 109-117.
- [14] 王福民,黄敬峰,王秀珍.水稻叶片叶绿素、类胡萝卜素含量估算的归一化色素指数研究. *光谱学与光谱分析*, 2009, 29(4): 1064-1068.
- [15] 卢霞,刘付程,田慧娟.大米草室内叶片光谱特征参数与叶绿素浓度关系研究. *测绘科学*, 2010, 35(6): 99-102.
- [16] 杨曦光,范文义,于颖.森林叶绿素含量的高光谱遥感估算模型的建立. *森林工程*, 2010, 26(2): 8-11.
- [17] 钱育蓉,杨峰,李建龙,干晓宇,杨齐,王卫源.利用高光谱数据快速估算高羊茅牧草光合色素的研究. *草业学报*, 2009, 18(4): 94-102.
- [18] 刘秀英,林辉,万玲凤,孙华,熊育久,莫登奎.樟树幼林叶绿素含量的高光谱遥感估算模型. *中南林业科技大学学报:自然科学版*, 2007, 27(4): 49-54.
- [19] 汤旭光,宋开山,刘殿伟,王宗明,张柏,杜嘉,曾丽红,姜广甲,王远东.基于可见/近红外反射光谱的大豆叶绿素含量估算方法比较. *光谱学与光谱分析*, 2011, 31(2): 371-374.
- [20] 施润和,庄大方,牛铮,王汶.基于辐射传输模型的叶绿素含量定量反演. *生态学杂志*, 2006, 25(5): 591-595.
- [21] 孙焱鑫,王纪华,李保国,刘良云,黄文江,赵春江.基于BP和GRNN神经网络的冬小麦冠层叶绿素高光谱反演建模研究. *遥感技术与应用*, 2007, 22(4): 492-496.
- [22] 张学治,郑国清,戴廷波,李国强,胡峰.基于冠层反射光谱的夏玉米叶片色素含量估算模型研究. *玉米科学*, 2010, 18(6): 55-60.
- [23] 刘占宇,黄敬峰,吴新宏,董永平,王福民,刘朋涛.草地生物量的高光谱遥感估算模型. *农业工程学报*, 2006, 22(2): 111-115.
- [24] 刘璇,林辉,臧卓,吴学明.杉木叶绿素a含量与高光谱数据相关性分析. *中南林业科技大学学报:自然科学版*, 2010, 30(5): 72-76.
- [25] 宋开山,张柏,王宗明,刘焕军,段洪涛.大豆叶绿素含量高光谱反演模型研究. *农业工程学报*, 2006, 22(8): 16-21.
- [26] 冯伟,朱艳,姚霞,田永超,姚鑫峰,曹卫星.小麦叶片色素含量的高光谱监测. *应用生态学报*, 2008, 19(5): 992-999.
- [27] 赵祥,刘素红,王培娟,王锦地,田振坤.基于高光谱数据的小麦叶绿素含量反演. *地理与地理信息科学*, 2004, 20(3): 36-39.
- [28] 易秋香,黄敬峰,王秀珍,钱翌.玉米叶绿素高光谱遥感估算模型研究. *科技通报*, 2007, 23(1): 83-87.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33, No. 3 February, 2013 (Semimonthly)
CONTENTS

Ecosystem Service Simulation and Management

- Securing Natural Capital and Human Well-Being: Innovation and Impact in China
..... Gretchen C. Daily, Ouyang Zhiyun, Zheng Hua, et al (677)
Establishment of ecological compensation mechanisms in China: perspectives and strategies
..... OUYANG Zhiyun, ZHENG Hua, YUE Ping (686)
Regional cooperation mechanism and sustainable livelihoods: a case study on paddy land conversion program (PLCP)
..... LIANG Yicheng, LIU Gang, MA Dongchun, et al (693)
Progress and perspectives of ecosystem services management ZHENG Hua, LI Yifeng, OUYANG Zhiyun, et al (702)
Ecosystem services valuation and its regulation in Baiyangdian basin: Based on InVEST model
..... BAI Yang, ZHENG Hua, ZHUANG Changwei, et al (711)
Identification of hotspots for biodiversity conservation in the Wenchuan earthquake-hit area
..... XU Pei, WANG Yukuan, YANG Jinfeng, et al (718)
Effects of land use change on ecosystem services: a case study in Miyun reservoir watershed
..... LI Yifeng, LUO Yuechu, LIU Gang, et al (726)
Impacts of forest eco-benefit tax on industry price levels in Shaanxi Province, China LI Jie, LIU Zhengnan, HAN Xiuhua (737)
Spatial characteristics of soil conservation service and its impact factors in Hainan Island
..... RAO Enming, XIAO Yi, OUYANG Zhiyun, et al (746)
Perception and attitudes of local people concerning ecosystem services of culturally protected forests
..... GAO Hong, OUYANG Zhiyun, ZHENG Hua, et al (756)
Standard of payments for ecosystem services in Sanjiangyuan Natural Reserve LI Yifeng, LUO Yuzhu, ZHENG Hua, et al (764)
Natural landscape valuation of Wulingyuan Scenic Area in Zhangjiajie City
..... CHENG Cheng, XIAO Yi, OUYANG Zhiyun, et al (771)
Satellite-based monitoring and appraising vegetation growth in national key regions of ecological protection
..... HOU Peng, WANG Qiao, FANG Zhi, et al (780)
Spatial Pattern of Water Retention in Dujiangyan County FU Bin, XU Pei, WANG Yukuan, et al (789)
Spatial distribution of carbon storage function and seismic damage in wenchuan earthquake stricken areas
..... PENG Yi, WANG Yukuan, FU Bin, et al (798)

Frontiers and Comprehensive Review

- The Porter Hypothesis: a literature review on the relationship between eco-innovation and environmental regulation
..... DONG Ying, SHI Lei (809)
Ecological protection and well-being LI Huimei, ZHANG Anlu (825)
An overview of the updated classification system and species diversity of arbuscular mycorrhizal fungi
..... WANG Yutao, XIN Guorong, LI Shaoshan (834)

Autecology & Fundamentals

- Evaporation paradox in the northern and southern regions of the Qinling Mountains
..... JIANG Chong, WANG Fei, LIU Sijie, et al (844)
The diet composition and trophic niche of main herbivores in the Inner Mongolia Desert steppe
..... LIU Guihe, WANG Guojie, WANG Shiping, et al (856)
Abstraction and analysis of vegetation information based on object-oriented and spectra features
..... CUI Yijiao, ZHU Lin, ZHAO Lijuan (867)
Hyperspectral estimation models for photosynthetic pigment contents in leaves of *Eucalyptus*
..... ZHANG Yonghe, CHEN Wenhui, GUO Qiaoying, et al (876)
Response of photosynthesis and chlorophyll fluorescence characteristics of *Pterocarya stenoptera* seedlings to submergence and
drought alternation WANG Zhenxia, WEI Hong, LÜ Qian, et al (888)

Effect of flooding stress on growth and photosynthesis characteristics of <i>Salix integra</i>	ZHAO Hongfei, ZHAO Yang, ZHANG Chi, et al (898)
Water consumption of pear jujube trees (<i>Ziziphus jujuba</i> Mill.) and its correlation with trunk diameter during flowering and fruit development periods	ZHANG Linlin, WANG Youke, HAN Lixin, et al (907)
Estimation of nitrogen nutrient index on SPAD value of top leaves in wheat	ZHAO Ben, YAO Xia, TIAN Yongchao, et al (916)
Population, Community and Ecosystem	
Carbon and nitrogen storage under different plantations in subtropical south China	WANG Weixia, SHI Zuomin, LUO Da, et al (925)
Impact on water and soil conservation of different bandwidths in low-efficiency cypress forest transformation	LI Yanqiong, GONG Gutang, ZHENG Shaowei, et al (934)
Seasonal changes of phytoplankton community structure in Jinsuitian Reservoir, Zhejiang, China	ZHANG Hua, HU Hongjun , CHAO Aimin, et al (944)
Winter carrying capacity and the optimum population density of wild boar in fenghuang Mountains National Nature Reserve of Heilongjiang Province	MENG Gentong, ZHANG Minghai,ZHOU Shaochun (957)
Diversity of ground-dwelling spider community in different restoring times of post-fire forest, Cangshan Mountain, Yunnan Province	MA Yanyan,LI Qiao,FENG Ping,et al (964)
Landscape, Regional and Global Ecology	
Drought characteristics in the shiyang river basin during the recent 50 years based on a composite index	ZHANG Tiaofeng, ZHANG Bo, WANG Youheng, et al (975)
Land use spatial distribution modeling based on CLUE-S model in the Huangshui River Basin	FENG Shichao,GAO Xiaohong,GU Juan,et al (985)
Research Notes	
Patterns of terrestrial anthropogenic impacts on coastal wetlands in three city clusters in China	WANG Yijie, YU Shen (998)
Eutrophication development and its key affected factors in the Yanghe Reservoir	WANG Liping, ZHENG Binghui (1011)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的生态学专业性高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 33 卷 第 3 期 (2013 年 2 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 3 (February, 2013)

编 辑 《生态学报》编辑部
地址:北京海淀区双清路 18 号
邮政编码:100085
电话:(010)62941099
www.ecologica.cn
shengtaixuebao@rcees.ac.cn

Edited by Editorial board of
ACTA ECOLOGICA SINICA
Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
Tel: (010) 62941099
www.ecologica.cn
shengtaixuebao@rcees.ac.cn

主 编 王如松
主 管 中国科学技术协会
主 办 中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
地址:北京海淀区双清路 18 号
邮政编码:100085

Editor-in-chief WANG Rusong
Supervised by China Association for Science and Technology
Sponsored by Ecological Society of China
Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS
Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China

出 版 科 学 出 版 社
地址:北京东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717

Published by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China

印 刷 行 科 学 出 版 社
地址:东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717
电话:(010)64034563

Printed by Beijing Bei Lin Printing House,
Beijing 100083, China

订 购 国 外 发 行
全国各 地邮局
中国国际图书贸易总公司
地址:北京 399 信箱
邮政编码:100044

Distributed by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North
Street, Beijing 100717, China
Tel: (010) 64034563
E-mail: journal@cspg.net

广 告 经 营 许 可 证
京海工商广字第 8013 号

Domestic All Local Post Offices in China
Foreign China International Book Trading
Corporation
Add: P. O. Box 399 Beijing 100044, China

