

ISSN 1000-0933

CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第33卷 第9期 Vol.33 No.9 2013

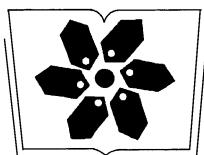
中国生态学学会

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9期 2013年5月 (半月刊)

目 次

前沿理论与学科综述

- 可持续发展研究的学科动向 茶 娜, 邬建国, 于润冰 (2637)
代谢异速生长理论及其在微生物生态学领域的应用 贺纪正, 曹 鹏, 郑袁明 (2645)
植物内生菌促进宿主氮吸收与代谢研究进展 杨 波, 陈 晏, 李 霞, 等 (2656)
中国园林生态学发展综述 于艺婧, 马锦义, 袁韵珏 (2665)

个体与基础生态

- 基于最小限制水分范围评价不同耕作方式对土壤有机碳的影响 陈学文, 王 农, 时秀焕, 等 (2676)
草原土壤有机碳含量的控制因素 陶 贞, 次旦朗杰, 张胜华, 等 (2684)
外源钙离子与南方菟丝子寄生对喜旱莲子草茎形态结构的影响 车秀霞, 陈惠萍, 严巧娣, 等 (2695)
毛竹出笋后快速生长期茎秆色素含量与反射光谱的相关性 刘 琳, 王玉魁, 王星星, 等 (2703)
巴郎山异型柳叶片功能性状及性状间关系对海拔的响应 冯秋红, 程瑞梅, 史作民, 等 (2712)
外源磷或有机质对板蓝根吸收转运砷的影响 高宁大, 耿丽平, 赵全利, 等 (2719)
不同猎物饲喂对南方小花蝽捕食量和喜好性的影响 张昌容, 郅军锐, 莫利锋 (2728)
捕食风险对东方田鼠功能反应格局的作用 陶双伦, 杨锡福, 姚小燕, 等 (2734)
基于线粒体细胞色素 c 氧化酶亚基 I 基因序列的帘蛤科贝类分子系统发育研究
..... 程汉良, 彭永兴, 董志国, 等 (2744)

不同实验生态环境对海刺猬遮蔽行为的影响

常亚青, 李云霞, 罗世滨, 等 (2754)

种群、群落和生态系统

- 基于 RS 与 GIS 的赣江上游流域生态系统服务价值变化 陈美球, 赵宝萍, 罗志军, 等 (2761)
长江口及邻近海域富营养化指标响应变量参照状态的确定 郑丙辉, 朱延忠, 刘录三, 等 (2768)
长江口及邻近海域富营养化指标原因变量参照状态的确定 郑丙辉, 周 娟, 刘录三, 等 (2780)
鸭绿江口及邻近海域生物群落的胁迫响应 宋 伦, 王年斌, 杨国军, 等 (2790)
杭州西溪湿地大型底栖动物群落特征及与环境因子的关系 陆 强, 陈慧丽, 邵晓阳, 等 (2803)
生物土壤结皮对荒漠土壤线虫群落的影响 刘艳梅, 李新荣, 赵 昕, 等 (2816)
大棚模拟条件下角倍蚜春季迁飞数量动态及其与气象因子的关系 李 杨, 杨子祥, 陈晓鸣, 等 (2825)
宁南山区植被恢复对土壤团聚体水稳定及有机碳粒径分布的影响 程 曼, 朱秋莲, 刘 雷, 等 (2835)
1958—2008 年太白山太白红杉林碳循环模拟 李 亮, 何晓军, 胡理乐, 等 (2845)
不同干扰对黄土区典型草原物种多样性和生物量的影响 陈芙蓉, 程积民, 刘 伟, 等 (2856)
乌拉山自然保护区白桦种群的年龄结构和点格局分析 胡尔查, 王晓江, 张文军, 等 (2867)
西南干旱对哀牢山常绿阔叶林凋落物及叶面积指数的影响 杞金华, 章永江, 张一平, 等 (2877)
阿尔泰山小东沟林区乔木物种丰富度空间分布规律 井学辉, 曹 磊, 藏润国 (2886)

景观、区域和全球生态

太湖流域生态风险评价 许 妍,高俊峰,郭建科 (2896)

基于 GIS 的关中-天水经济区土地生态系统固碳释氧价值评价 周自翔,李 璞,冯雪铭 (2907)

资源与产业生态

淹水条件下控释氮肥对污染红壤中重金属有效性的影响 梁佩筠,许 超,吴启堂,等 (2919)

研究简报

高温强光对小麦叶绿体 Deg1 蛋白酶和 D1 蛋白的影响及水杨酸的调节作用 郑静静,赵会杰,胡巍巍,等 (2930)

不同 CO₂ 浓度变化下干旱对冬小麦叶面积指数的影响差异 李小涵,武建军,吕爱锋,等 (2936)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 308 * zh * P * ¥ 90.00 * 1510 * 32 * 2013-05



封面图说: 肥美的当雄草原——高寒草甸是在寒冷的环境条件下,发育在高原和高山的一种草地类型。其植被组成主要是多年生草本植物,冬季往往有冰雪覆盖,土壤主要为高山草甸土。当雄草原位于藏北高原,藏南与藏北的交界地带,海拔高度为 5200—4300m,受海洋性气候影响,呈现高原亚干旱气候,年平均降水量 293—430mm。主要有小嵩草草甸、藏北嵩草草甸和沼泽草甸等,覆盖度为 60%—90%,其中小嵩草草甸分布面积最大,连片分布于广阔的高原面上。高寒草甸草层低,草质良好,是畜牧业优良的夏季牧场。

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

DOI: 10.5846/stxb201201200118

刘琳,王玉魁,王星星,张洁,高岩,温国胜,高荣孚,张汝民.毛竹出笋后快速生长期茎秆色素含量与反射光谱的相关性.生态学报,2013,33(9):2703-2711.

Liu L, Wang Y K, Wang X X, Zhang J, Gao Y, Wen G S, Gao R F, Zhang R M. Correlation between pigment content and reflectance spectrum of *Phyllostachys pubescens* stems during its rapid growth stage. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(9): 2703-2711.

毛竹出笋后快速生长期茎秆色素含量与反射光谱的相关性

刘琳¹, 王玉魁², 王星星¹, 张洁¹, 高岩¹, 温国胜¹, 高荣孚^{1,3}, 张汝民^{1,*}

(1. 浙江农林大学亚热带森林培育国家重点实验室培育基地, 临安 311300; 2. 国家林业局竹子研究开发中心, 杭州 310012;
3. 北京林业大学生物科学与技术学院, 北京 100083)

摘要:为了探讨毛竹出笋后快速生长期茎秆色素含量与反射光谱特性间的相互关系,测定了毛竹茎秆在快速生长期内的色素含量与反射光谱参数,并对两者进行了相关性分析。结果表明:(1)在毛竹出笋后快速生长期内,随着茎秆不断生长,叶绿素a、叶绿素b和类胡萝卜素含量也随之增加,在60 d时含量最高。(2)反射光谱参数GNDVI、PSDN_a、PSSD_a、PSSD_b、PSDN_b、mND₇₀₅、mSR₇₀₅、CRI₁、ARI₁和PRI等均随着茎秆生长而增加,NPCI、S_{IPI}和RGI则随生长而降低;S_{red}随着茎秆生长基本呈现出不断增大的趋势。各参数在20 d到30 d时的变化均达到极显著水平($P < 0.01$)。(3)GNDVI、PSSR_a、PSSR_b、PSSR_c、PSND_a、PSND_b、PSND_c、NPCI、mSR₇₀₅、mND₇₀₅、CRI₂、PRI、 $D\lambda_{red}$ 和 λ_{red} 等反射光谱参数与叶绿素a、叶绿素b和类胡萝卜素含量之间的相关性均达到极显著水平($P < 0.01$),其中PSSR_b、mSR₇₀₅、CRI₂、PRI、ARI₁和ARI₂与叶绿素a、叶绿素b和类胡萝卜素含量之间的相关性高于或接近0.9,说明毛竹出笋后快速生长期反射光谱特征及其参数可用来估算叶绿素和类胡萝卜素含量,并为利用反射光谱监测其生长趋势提供了可能。

关键词:毛竹; 色素; 茎秆; 反射光谱

Correlation between pigment content and reflectance spectrum of *Phyllostachys pubescens* stems during its rapid growth stage

LIU Lin¹, WANG Yukui², WANG Xingxing¹, ZHANG Jie¹, GAO Yan¹, WEN Guosheng¹, GAO Rongfu^{1,3}, ZHANG Rumin^{1,*}

1 The Nurturing Station for the State Key Laboratory of Subtropical Silviculture, Zhejiang Agriculture and Forestry University, Lin'an 311300, China

2 China Bamboo Research Center, Hangzhou 310012, China

3 College of Biological Sciences and Biotechnology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract: *Phyllostachys pubescens*, one of the most important bamboo plants in the world, is widely distributed and planted in China. Due to its rapid growth feature, long growth period and high photosynthetic efficiency, this plant has high environmental and economic value. It has been reported that the photosynthetic pigment content and its reflectance spectrum was closely related to leaf growth process of *P. pubescens*, and a model of reflectance spectrum was established for monitoring the plant growth. The stem of *P. pubescens* has abundant pigments. However, to our knowledge, no study has been reported on the relationship between reflectance spectrum characteristics and pigment contents in the stems of the plant. So we tested the pigment contents and reflectance spectrum parameters in the stem and examined its correlations. The

基金项目:国家自然基金(30972397, 31270497);浙江农林大学科研发展基金(2010FR058);浙江农林大学研究生科研创新基金(2112010005)资助

收稿日期:2012-01-20; 修订日期:2013-06-04

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

results showed that: (1) The content of chlorophyll a, chlorophyll b and carotenoids increased with the stem growth under its rapid growth stage, and the content of these pigments reached the highest level after 60 days, (2) The value of the reflectance spectral parameters (GNDVI, PSDNa, PSSDa, PSSDb, PSDNb, mND₇₀₅, mSR₇₀₅, CRI1, ARI1 and PRI) increased with the growth of the stems but the value of NPCI, SIPI and RGI decreased. The change of S_{red} was mainly raised under the rapid growth stage. The value of those parameters was significantly changed from 20 days to 30 days. (3) The reflectance spectrum parameters, such as GNDVI, PSSRa, PSSRb, PSSRc, PSNDA, PSNDb, PSNDc, NPCI, mSR₇₀₅, mND₇₀₅, $D\lambda_{\text{red}}$ and λ_{red} , were significantly ($P < 0.01$) correlated with the content of chlorophyll a, chlorophyll b and carotenoids. The correlation coefficients between reflectance spectral parameters (PSSRb, mSR₇₀₅, CRI2, PRI, ARI1 and ARI2) and pigment (chlorophyll a, chlorophyll b and carotenoid) content were higher and near to 0.9, indicating that these reflectance spectral parameters can be used to evaluate the content of chlorophyll and carotenoids.

Key Words: *Phyllostachys pubescens*; pigment; stem; reflectance spectrum

叶绿素是植物叶片中吸收和传递光能的主要色素分子,直接影响光合作用的效能与水平,是植物活力的重要体现^[1-4]。类胡萝卜素除具有吸收光能传递给中心色素 Chl a 的功能外,还具有保护叶绿素免遭光氧化伤害的作用。在植物生长发育过程中,光合色素含量会发生相应变化^[5]。从水仙(*Narcissus pseudonarcissus*)抽薹到花后期,叶片中叶绿素含量逐渐增加,并且花后期含量为抽薹期的 2 倍^[6]。冬小麦(*Triticum aestivum*)从拔节期到扬花期叶绿素含量整体呈上升趋势,进入谷粒灌浆期后开始下降,随后乳熟期又有所升高^[7]。随着板栗(*Castanea mollissima*)幼叶的生长,叶绿素含量也随之逐渐增加,然而类胡萝卜素与叶绿素含量的比值则明显降低^[8]。在番茄(*Solanum lycopersicum*)成熟过程中,总类胡萝卜素含量呈指数形式增加,并且其组分叶黄素和 β -类胡萝卜素含量均明显增加^[9]。这表明光合色素含量与植物的生长发育密切相关,是反映植物生长发育进程的重要指标。

大量研究表明植物在可见光区(400—700 nm)、红边区(680—760 nm)和近红外光区(780—1300 nm)光谱反射率与叶片光合色素含量有较高的相关性^[4, 10-11]。Blackburn^[12]利用 670 nm 附近吸收峰构造了色素比值指数(PSSR)和色素归一化指数(PSND)用于估算橡树(*Quercus palustris*)、枫树(*Acer rubrum*)和甜栗子(*Castanea mollissima*)等 3 种树木叶片的色素含量;此外,他还利用小波分析法研究了森林植被冠层叶片色素含量与光谱反射率之间的关系,并建立了叶片反射率与色素浓度监测模型^[13-14]。Gitelson 和 Merzlyak^[15]研究表明近红外波段反射率(> 750 nm)与 700 nm 和 550 nm 的比值(R_{750}/R_{700} 、 R_{750}/R_{550})与枫木(*Acer rubrum*)、栗子(*Castanea mollissima*)和栒子(*Cotoneaster horizontalis*)等叶片中叶绿素 a 和总叶绿素含量具有良好的相关性;同时利用 550 nm 反射率构造的绿度归一化光谱指数(GNDVI)对叶绿素 a 的含量变化非常敏感^[16]。Sims 和 Gamon^[17]在前人的研究基础上提出了修正型红边比值指数(mSR₇₀₅)和修正型红边归一化差值指数(mND₇₀₅)用于估算具有不同表面反射率的树木叶片中叶绿素含量。唐延林^[11]通过研究不同品种类型、不同株型、不同发育期玉米(*Zea mays*)叶片的光谱特征发现,叶片中叶绿素和类胡萝卜素含量与反射光谱参数 R_{800}/R_{550} 、 R_{673}/R_{640} 、色素比值指数 a(PSSRa)、色素归一化差值指数 a(PSNDA)、类胡萝卜素指数(CRI)、红边位置(λ_{red})、红边幅值($D\lambda_{\text{red}}$)和红边面积(S_{red})均具有极显著的相关性。此外,冯伟等^[18]研究表明 λ_{red} 与叶片色素含量之间具有稳定而密切的相关性。这些研究均表明光谱反射率与光合组织(叶片)中光合色素含量有较高的相关性,而与非光合组织(茎、果实)中色素含量间是否存在相关性则鲜见报道。

毛竹(*Phyllostachys pubescens*)是集经济、生态和社会效益于一体的竹种之一,其竹林面积为 270 万 hm²,占全国竹林总面积的 64.1%^[19-20],是我国南方重要的森林资源。对毛竹叶片叶绿素含量的年动态研究中发现,竹叶在 6—8 月份逐渐发育成熟,叶绿素合成迅速,其含量在 10 月份达到第 1 个高峰,之后,随着光照减弱、气温降低,叶绿素含量下降;翌年,叶绿素含量又略有回升,并在 2 月份出现第 2 个高峰,然而,在 4 月份随着叶片衰老,叶绿素含量急剧下降,因此,其含量年动态变化呈现双峰曲线。毛竹叶片在由幼叶发育到成熟叶

的过程中,叶绿素a、叶绿素b和类胡萝卜素含量逐渐增加,并且叶片在绿光区的光谱反射率随施肥处理不同而变化^[21]。除叶片外,毛竹茎秆中亦含有大量的色素分子,而目前尚未有关于其茎秆中色素与反射光谱的研究报道。因此,本文以毛竹出笋后快速生长期(10—60 d)的茎秆为研究对象,综合分析毛竹茎秆中部反射光谱及其相关参数在快速生长时期的变化特征,并对茎秆中叶绿素和类胡萝卜素含量与其反射光谱特性间的关系进行了相关性分析,旨在探讨毛竹茎秆这一非同化器官在不同发育时期色素含量变化与其反射光谱间的相互关系,从而为毛竹出笋后快速生长期茎秆色素含量的实时、快速和无损伤监测提供理论依据,进而为建立通过茎秆色素含量监测毛竹生长状况提供帮助。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地设在临安市现代毛竹示范园内,该示范园位于浙江省临安市($118^{\circ}51' - 119^{\circ}52'E$, $29^{\circ}56' - 30^{\circ}27'N$),属于中亚热带季风气候,温暖湿润,四季分明,年平均气温为 $15.8^{\circ}C$,7月为最热月,平均气温为 $28.1^{\circ}C$,1月为最冷月,平均气温为 $3.4^{\circ}C$ 。极端高温 $41.9^{\circ}C$,极端低温 $-13.3^{\circ}C$ 。全年降雨量为 1628.6 mm ,平均日照时数 1939 h ,无霜期 234 d ,森林覆盖率 76.5% 。毛竹林土壤属山地红壤,土层深度均在 60 cm 以上。

1.2 试验材料

供试材料为毛竹(*Phyllostachys pubescens*)。从2011年4月13日—6月2日分别在毛竹出笋10、20、30、40、50和60 d时进行取样,取样时间为10:00—12:00。每次选取3株生长良好、无病虫害的毛竹(笋),按其茎秆长度平均划分为3个部位:基部、中部和顶部,在茎秆中部进行取样。测定竹笋反射光谱时去除其笋衣。

1.3 研究方法

1.3.1 叶绿素和类胡萝卜素含量测定

切取毛竹茎秆的竹青部位($< 2\text{ mm}$),将 0.1 g 剪碎的竹青置于具塞试管中,加入 5 mL 80%丙酮,室温下避光萃取至样品完全变白后,分别在 470 、 646 和 663 nm 处测定其OD值,每个样品重复6次。然后,按Lichtenthaler的计算公式^[22](1)分别计算叶绿素a(C_a)、叶绿素b(C_b)和类胡萝卜素含量(C_{ar})。

$$\begin{aligned} C_a &= 12.25 \times D_{663} - 2.79 \times D_{646} \\ C_b &= 21.50 \times D_{646} - 5.10 \times D_{663} \\ C_{ar} &= (1000 \times D_{470} - 1.82 \times C_a - 85.02 \times C_b) / 198 \end{aligned} \quad (1)$$

1.3.2 光谱数据采集

采用UniSpec-SC型单通道光谱分析仪(PP-System, US)测定毛竹茎秆在 $310 - 1130\text{ nm}$ 处的反射光谱数据,采样间隔 1 nm ,分辨率 1 nm 。Unispec-SC单通道光谱分析仪内置一个卤素灯,测定时,将分支光纤的一端连接到卤素灯的输出端口,另一端连接到检测器的输入端口,光纤探头端固定在UNI500标准夹中。每次测定选取毛竹茎秆3株,每株重复6次,取其平均值作为该样品的光谱反射率。测量过程中及时进行标准白板校正,用Multispec 5.1数据处理软件读取反射光谱原始数据。

1.3.3 光谱分析方法

光谱数据微分处理:将毛竹叶片反射光谱通过公式(2)进行一阶微分处理得到微分光谱。

$$D_{\lambda_i} = \frac{|R_{\lambda(i+1)} - R_{\lambda(i-1)}|}{2\Delta\lambda} \quad (2)$$

式中, λ_i 为波段*i*处的波长值; R_{λ_i} 为波长 λ_i 处的光谱反射率值; $\Delta\lambda$ 为波长 $\lambda_{(i-1)}$ 到 λ_i 的差值,由光谱采样间隔决定。

“三边”参数计算方法:分别在 $505 - 545\text{ nm}$ 、 $560 - 640\text{ nm}$ 和 $680 - 750\text{ nm}$ 范围内确定蓝边、黄边和红边位置、幅值和面积。 λ_{red} 为红光范围内一阶导数光谱最大值所对应的波长, $D\lambda_{red}$ 为一阶导数光谱的最大值, S_{red} 为一阶导数光谱线所包围的面积。黄边(黄边位置, λ_{yellow} ;黄边幅值, $D\lambda_{yellow}$;黄边面积, S_{yellow})和蓝边(蓝边位置, λ_{blue} ;蓝边幅值, $D\lambda_{blue}$;蓝边面积 S_{blue})参数与红边参数意义类似。可直接利用相关公式计算得到的反

射光谱相关参数。详见表1。

表1 本研究采用的反射光谱参数

Table 1 The reflectance spectrum parameters in the present research

反射光谱参数 Reflectance spectrum parameters	定义 Definition	文献来源 Reference
绿度归一化指数 GNDVI Green normalized difference vegetation index	$(R_{750} - R_{550}) / (R_{750} + R_{550})$	[15]
色素比值指数 a PSSRa Pigment specific simple ratio index a	R_{800} / R_{680}	[12]
色素比值指数 b PSSR b Pigment Specific Simple Ratio index b	R_{800} / R_{675}	[12]
色素比值指数 c PSSRc Pigment Specific Simple Ratio index c	R_{800} / R_{470}	[12]
叶绿素指数 Rch Chlorophyll index	$(R_{640} - R_{673}) / R_{673}$	[23]
色素归一化差值指数 a PSNDA Pigment Specific Normalized Difference index a	$(R_{800} - R_{680}) / (R_{800} + R_{680})$	[12]
色素归一化差值指数 b PSNDb Pigment Specific Normalized Difference index b	$(R_{800} - R_{635}) / (R_{800} + R_{635})$	[12]
色素归一化差值指数 c PSNDC Pigment Specific Normalized Difference index c	$(R_{800} - R_{470}) / (R_{800} + R_{470})$	[12]
类胡萝卜素指数 1 CRII Carotenoid reflectance index 1	$(1/R_{510}) - (1/R_{550})$	[24]
类胡萝卜素指数 2 CRI2 Carotenoid reflectance index 2	$(1/R_{510}) - (1/R_{700})$	[24]
花青素指数 1 ARI1 Anthocyanin reflectance index 1	$(1/R_{550}) - (1/R_{700})$	[25]
花青素指数 2 ARI2 Anthocyanin reflectance index 2	$R_{800} [(1/R_{550}) - (1/R_{700})]$	[25]
归一化叶绿素指数 NPCI Normalized difference pigment chlorophyll index	$(R_{680} - R_{430}) / (R_{680} + R_{430})$	[26]
结构不敏感色素指数 SIPI Structure-insensitive pigment index	$(R_{800} - R_{445}) / (R_{800} - R_{680})$	[26]
光化学反照率指数 PRI Photochemical reflectance index	$(R_{531} - R_{570}) / (R_{531} + R_{570})$	[27]
红绿比指数 RGI Red/Green Index	$\sum_{i=600nm}^{700nm} R_i / \sum_{i=500nm}^{600nm} R_i$	[27]
修正型红边归一化差值指数 mND ₇₀₅ Modified red edge normalized difference vegetation index	$(R_{750} - R_{705}) / (R_{750} + R_{705} - 2 \times R_{445})$	[17]
修正型红边比值指数 mSR ₇₀₅ Modified red edge simple ratio index	$(R_{750} - R_{445}) / (R_{705} - R_{445})$	[17]

R 代表反射,下标代表光谱波段或波长

1.4 数据处理

试验数据采用 SPSS 13.0 统计软件进行统计分析,用 Duncan 新复极差法检验差异显著性。用 MATLAB 7.1 软件对光谱信息进行去噪处理,并提取出与叶绿素有关的特征波段。利用 OriginPro 8.0 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 毛竹出笋后快速生长期茎秆叶绿素含量差异分析

在毛竹生长初期(10—30 d),茎秆有竹箨包被,阳光不能直射,色素合成缓慢,含量较低,并且变化较小;随着竹箨的慢慢脱落,茎秆中色素合成速度加快,叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素含量呈极显著($P < 0.01$)增加。当毛竹生长至 60 d 时(长出嫩叶),叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素含量分别比 30 d 时提高了 15.2 倍、17.8 倍和 7.7 倍(表 2)。

表2 毛竹出笋后快速生长期茎秆中色素含量的变化($\mu\text{g/g}$ 鲜重)Table 2 Changes of pigment contents in the stems of *P. pubescens* under the rapid growth stage

生长时期 Growth stage/d	叶绿素 a Chl a	叶绿素 b Chl b	叶绿素总量 Chl a+b	类胡萝卜素 Carotenoids	叶绿素 a/b Chl a/b
10	3.9±0.6eE	3.3±1.2dD	7.2±1.8eE	1.0±0.3eE	1.2±0.8cC
20	5.5±0.8eE	4.2±1.2dD	9.7±2.1eE	0.9±0.3eE	1.3±0.4bB
30	17.7±1.6dD	7.2±0.7dD	24.9±0.9dD	6.5±0.6dD	2.1±0.5aA
40	135.3±0.1cC	65.3±2.2cC	200.7±2.2cC	42.1±0.1cC	2.0±0.2aA
50	179.8±0.9bB	94.6±1.7bB	274.4±1.9bB	46.2±0.3bB	2.0±0.3aA
60	269.6±4.0aA	128.0±1.2aA	397.6±5.2aA	49.8±3.6aA	2.1±0.1aA

小写字母不同表示0.05水平上的差异性($P < 0.05$)，大写字母不同表示0.01水平上的差异性($P < 0.01$)

2.2 毛竹出笋后快速生长期茎秆反射光谱特征

毛竹在6个不同发育阶段茎秆反射率曲线的整体变化趋势一致,但是在不同生长期反射光谱的反射率大小则存在明显差异(图1),并且生长期为10 d和20 d的样品相对于其他时期的样品差异较大。反射光谱在绿光区(525—605 nm)存在明显差异,其次是黄光区(605—655 nm)和近红外区(750—1000 nm)。在可见光区,毛竹茎秆的反射率随茎秆生长而逐渐降低。反射光谱在500 nm和670 nm处各有一个吸收低谷,在500 nm处30 d茎秆反射率比10 d时降低了40.0%;670 nm处反射率更小,仅为10 d时的50.0%。在近红外区反射率随着茎秆发育出现一定的波动,其中生长期为40 d时的反射率最低。

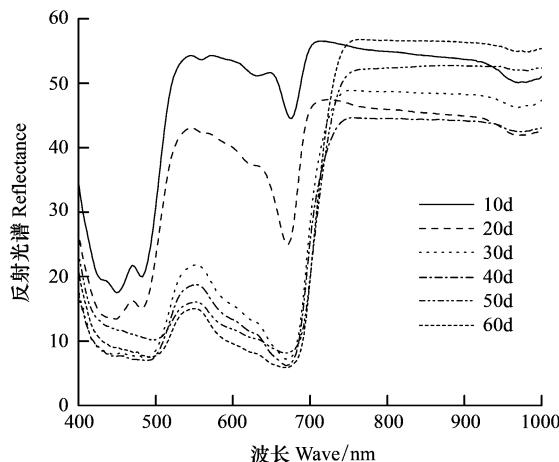


图1 毛竹出笋后快速生长期茎秆的反射光谱

Fig. 1 Reflectance spectra in the stems of *P. pubescens* under the rapid growth stage

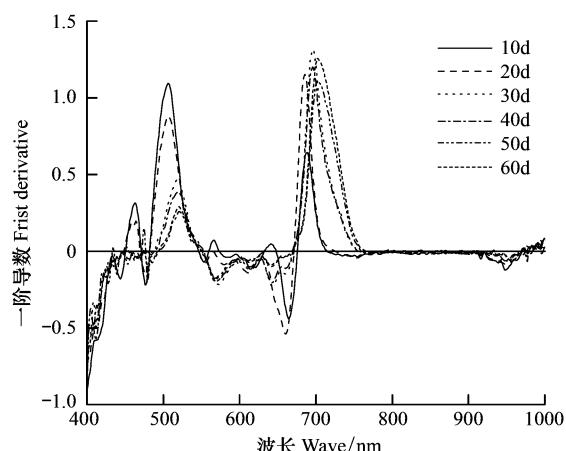


图2 毛竹出笋后快速生长期茎秆反射光谱一阶导数

Fig. 2 First derivative of reflectance spectra in the stems of *P. pubescens* under the rapid growth stage

2.3 不同发育时期茎秆反射光谱的三边特征

由于背景噪声对反射光谱的影响很大,因此在实际分析光谱数据时,为了降低背景噪声以提高各参数的准确性,常常需要对原始数据进行微分变换。将毛竹出笋后快速生长期茎秆的反射光谱数据进行一阶导数处理,结果如图2所示。 λ_{red} 位于绿色植物反射光谱红光范围(680—760 nm)内,主要与叶绿素含量有关,是绿色植物光谱最明显的特征之一。不同生长阶段的毛竹茎秆在680—760 nm波段内都只有1个峰值(图2),并且随着茎秆发育, λ_{red} 逐渐向长波方向移动(表3)。在生长期为30 d时 λ_{red} 极显著($P < 0.01$)增大,而30 d后基本稳定在700 nm左右; S_{red} 随着茎秆生长基本呈现出不断增大的趋势,其中在20 d到30 d时的变化最明显。 $D\lambda_{blue}$ 和 S_{blue} 随着茎秆生长呈现出逐渐降低的趋势,而 λ_{blue} 则逐渐增大; λ_{yellow} 和 $D\lambda_{yellow}$ 呈逐渐降低趋势,而 S_{yellow} 则随着茎秆生长呈现先减小后增大的趋势。无论是蓝边还是黄边,最明显的变化都出现在30 d时的生长期(表3)。

表3 毛竹出笋后快速生长期茎秆的“三边”参数

Table 3 Three edge parameters in the stems of *P. pubescens* under the rapid growth stage

参数 Parameter	生长时期 Different growth stages/d					
	10	20	30	40	50	60
λ_{blue}	506.3 ± 0.6cB	506.3 ± 0.6cB	518.8 ± 0.8bA	519.4 ± 1.1abA	520.9 ± 0.8aA	520.2 ± 1.1aA
$D\lambda_{blue}$	1.10 ± 0.04aA	0.88 ± 0.03bB	0.47 ± 0.03cC	0.39 ± 0.04cC	0.30 ± 0.03dD	0.29 ± 0.02dD
S_{blue}	30.71 ± 0.95aA	25.04 ± 0.84bB	12.1 ± 0.92cC	9.88 ± 1.30cC	7.76 ± 0.70dD	6.07 ± 0.56dD
λ_{yellow}	613.3 ± 0.6aA	580.0 ± 1.0bB	571.4 ± 3.0cC	570.0 ± 2.3cC	569.0 ± 2.1cC	568.6 ± 2.3cC
$D\lambda_{yellow}$	-0.12 ± 0.01bB	-0.09 ± 0.0 aA	-0.22 ± 0.01dC	-0.21 ± 0.02cdC	-0.20 ± 0.01cC	-0.20 ± 0.01cC
S_{yellow}	-2.30 ± 0.63aA	-5.85 ± 0.25bB	-9.93 ± 0.35dD	-8.69 ± 0.63dD	-8.03 ± 0.52cdCD	-7.28 ± 0.49cC
λ_{red}	688.3 ± 1.2cC	685.7 ± 0.6dD	696.0 ± 0.7bB	695.6 ± 0.9bB	698.0 ± 0.7abA	702.0 ± 0.0aA
$D\lambda_{red}$	0.65 ± 0.10cB	1.15 ± 0.07bA	1.32 ± 0.03aA	1.20 ± 0.06abA	1.23 ± 0.09abA	1.26 ± 0.10abA
S_{red}	10.57 ± 2.11dD	18.33 ± 1.35cC	40.67 ± 1.33bB	37.31 ± 2.59bB	44.40 ± 3.78abB	49.75 ± 4.74aAB

2.4 毛竹出笋后快速生长期茎秆光谱参数的变化

光谱参数是绿色植物的光谱反射特征,是反映植物生长状况的最常用光谱变量。GNDVI、PSDN_a、PSSD_a、PSSD_b、PSDN_b、mND₇₀₅、mSR₇₀₅、CRI1、ARI1、PRI等参数均随毛竹茎秆生长而增加(表4);NPCI、SIP_i和RGI随茎秆生长呈下降趋势;Rch则随茎秆生长呈先增大后降低的趋势。各光谱参数在发育期为20—30 d时均极显著($P < 0.01$)的增加或降低。

表4 毛竹出笋后快速生长期茎秆反射光谱参数的变化

Table 4 Changes of reflectance spectrum parameters in the stems of *P. pubescens* under the rapid growth stage

光谱参数 spectral parameters	生长时期 different growth stages/d					
	10	20	30	40	50	60
GNDV I	0.015±0.004dC	0.044±0.008cC	0.384±0.030bB	0.409±0.044bB	0.561±0.031aA	0.577±0.022aA
PSSRa	1.210±0.051cC	1.568±0.061cC	5.789±0.406bB	6.027±0.862bB	7.880±1.020aA	8.660±1.077aA
PSSRb	1.073±0.017cC	1.240±0.031cC	3.951±0.440bB	4.262±0.663bB	6.493±0.485abA	7.318±0.795aA
PSSRc	2.531±0.080cC	2.834±0.130cC	6.313±0.316bAB	6.266±0.455bB	6.756±0.693aA	6.854±0.796aA
Rch	0.152±0.056bC	0.451±0.034bB	0.605±0.075aA	0.543±0.051aAB	0.292±0.01cC	0.230±0.025cC
PSND _a	0.095±0.021dD	0.221±0.019cC	0.705±0.018bB	0.712±0.034bB	0.778±0.03aA	0.791±0.022aA
PSND _b	0.035±0.008dD	0.107±0.012cC	0.593±0.037bB	0.615±0.046bB	0.741±0.021aA	0.758±0.021aA
PSND _c	0.433±0.013dC	0.478±0.018cB	0.726±0.012abA	0.724±0.017bA	0.720±0.022bA	0.743±0.025aA
NPCI	0.400±0.020aA	0.351±0.005bA	-0.012±0.029cB	-0.064±0.037dC	-0.208±0.006dC	-0.21±0.008dC
SIP _i	3.999±0.751aA	1.961±0.104bB	1.013±0.009cC	0.993±0.014cC	0.963±0.006cC	0.951±0.007eC
mND ₇₀₅	-0.006±0.002cC	0.002±0.002cC	0.234±0.020bB	0.244±0.031bB	0.469±0.003aA	0.476±0.008aA
mSR ₇₀₅	0.988±0.003cC	1.004±0.005cC	1.611±0.066bB	1.649±0.111bB	2.789±0.057abA	2.816±0.061aA
PRI	-0.012±0.002cC	-0.006±0.001cC	0.007±0.006bB	0.012±0.007bB	0.038±0.001aA	0.041±0.003aA
RGI	0.991±0.023aA	0.884±0.006bB	0.688±0.011cC	0.690±0.014cC	0.688±0.010cC	0.668±0.014dC
CRI1	0.006±0.001cC	0.008±0.001cC	0.042±0.004bB	0.047±0.006bAB	0.047±0.002bB	0.049±0.005aA
CRI2	0.006±0.001dC	0.010±0.001dC	0.053±0.006cB	0.061±0.009bAB	0.063±0.004aA	0.064±0.007aA
ARI1	0.000±0.000dC	0.001±0.000cB	0.010±0.002bA	0.014±0.003bA	0.014±0.001bA	0.015±0.002aA
ARI2	0.024±0.007dC	0.068±0.013dC	0.511±0.079cB	0.640±0.131bB	0.815±0.091aA	0.868±0.121aA

2.5 反射光谱与色素含量的相关性

GNDVI、PSSD_a、PSSD_b、PSDN_a、PSDN_b、mND₇₀₅、mSR₇₀₅、CRI1、ARI1、PRI和NPCI等绝大多数参数都与叶绿素a、叶绿素b和类胡萝卜素含量之间存在极显著($P < 0.01$)的相关性(表5),其中PRI与叶绿素a、叶绿素b和类胡萝卜素的相关系数分别为0.918、0.936和0.905。SIP_i与叶绿素a、叶绿素b和类胡萝卜素含量

之间的相关性均达到显著水平($P < 0.05$) ,而与叶绿素 a/b 的相关性则达到极显著水平($P < 0.01$)。

表 5 毛竹出笋后快速生长期茎秆反射光谱参数与色素含量的相关性

Table 5 The correlation between reflectance spectrum parameters and pigment contents in the stems of *P. pubescens* under the rapid growth stage

光谱参数 Spectral parameters	叶绿素 a Chl a	叶绿素 b Chl b	类胡萝卜素 Carotinoid	叶绿素 a/b Chl a/b	光谱参数 Spectral parameters	叶绿素 a Chl a	叶绿素 b Chl b	类胡萝卜素 Carotinoid	叶绿素 a/b Chl a/b
GNDVI	0.840 **	0.821 **	0.852 **	0.546 *	PSSRa	0.837 **	0.822 **	0.849 **	0.535 *
PSSRb	0.895 **	0.898 **	0.895 **	0.396	PSSRc	0.694 **	0.653 **	0.721 **	0.696 **
Rch	-0.187	-0.269	-0.148	0.822 **	PSNDA	0.729 **	0.689 **	0.750 **	0.706 **
PSNDb	0.790 **	0.759 **	0.807 **	0.626 *	PSNDc	0.681 **	0.635 *	0.708 **	0.730 **
CRII	0.878 **	0.859 **	0.890 **	0.503	CRI2	0.899 **	0.903 **	0.898 **	0.387
ARII	0.894 **	0.909 **	0.888 **	0.326	ARI2	0.894 **	0.906 **	0.889 **	0.345
NPCI	-0.838 **	-0.813 **	-0.852 **	-0.555 *	SIPi	-0.564 *	-0.517 *	-0.578 *	-0.827 **
mND ₇₀₅	0.886 **	0.887 **	0.885 **	0.413	mSR ₇₀₅	0.901 **	0.922 **	0.889 **	0.273
PRI	0.918 **	0.936 **	0.905 **	0.271	λ_{red}	0.766 **	0.725 **	0.791 **	0.634 *
D λ_{red}	0.791 **	0.752 **	0.814 **	0.613 *	S_{red}	0.858 **	0.824 **	0.876 **	0.545 *

* 表示差异显著($P < 0.05$) , ** 表示差异极显著($P < 0.01$)

3 讨论

叶绿素是植物体内的主要光合色素,其含量往往是植物营养胁迫、光合能力和衰老进程等生理状态的良好指示剂^[1-2, 28]。同一植物在不同生长发育阶段,其体内的各种色素含量、生理状况等都会发生相应变化^[29]。毛竹茎秆叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素含量均随茎秆生长呈增加趋势(表 1),其中毛竹在 30 d 生长期时色素含量均极显著增加,其原因可能为 30 d 前竹笋有笋衣包被,不能直接与阳光接触,其合成叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素能力较低;而 30 d 后毛竹脱去笋衣,茎秆可直接接触阳光,因此其合成叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素的速度加快,含量迅速增加,这与同化器官叶片展叶过程中叶绿素 a 和 b 的含量变化相一致。

由于植物在不同发育时期的生理状况不同,反射光谱特性也会发生相应的变化。随着毛竹茎秆的发育,可见光波段内的光谱反射率逐渐降低,而色素含量却逐渐升高,这表明此波段内的光谱反射率与色素含量具有负相关性^[28];近红外波段内光谱反射率随茎秆发育而发生波动,这可能与茎秆结构、表皮厚度等因素影响叶绿素指数的敏感性有关。由于叶绿素的吸收特性,茎秆的反射光谱在 500 nm 和 670 nm 处各有一个低谷,并且在快速生长 30 d 时,由于叶绿素含量显著增加,此两处的反射率降低更为明显。毛竹茎秆在 550 nm 附近呈现出叶绿素的强反射峰,这与前人的研究结果相一致^[26, 28-29]。

植物叶片的光谱参数主要与色素含量有关^[10, 28],因此常用于监测作物长势、估算植被光合效率和生物量^[11, 30-31]。通过对光谱数据求微分、多波段组合等方法构建光谱参数,可以减少背景噪声的影响,充分发挥多波段及微分技术的优势,使反射光谱信息最大化、外部因素影响最小化,从而取得较理想的研究成果。利用红边计算得到的参数与叶绿素含量有很好的相关性^[8, 15],谭昌伟等^[32]利用一阶微分光谱和红边位置可精确推算玉米(*Zea mays*)叶绿素密度,此外,反射光谱的“蓝移”大小还可用来监测水稻的成熟程度^[11, 33]。随着茎秆发育, λ_{red} 向长波方向移动,发生“红移现象”, S_{red} 不断增加,这表明叶绿素含量升高,红边区域吸收增加,从而导致红边向长波方向移动。PSDN_a、PSSD_a 和 PSSD_b、PSDN_b 以及 GNDVI、mND₇₀₅、mSR₇₀₅ 可分别用来分析叶绿素 a、叶绿素 b 和叶绿素总含量,CRII 和 ARII、ARI2 可用来监测类胡萝卜素和花青素^[29]。光谱参数 GNDVI、PSSRa、PSSRb、PSSRc、CRII、ARII、 λ_{red} 和 D λ_{red} 等随毛竹茎秆发育而增加,这与色素含量增加相吻合,与前人对叶片的研究结果相一致。

无论山核桃(*Carya cathayensis*)叶片中叶绿素含量高低,反射光谱参数 GNDVI、Rch、mSR₇₀₅、mND₇₀₅ 和 λ_{red} 都与其具有极显著的相关性^[34],玉米叶片中叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素总量及类胡萝卜素含量也与光谱

参数 PSSRa、PSNDa、Rch、CARI、 λ_{red} 、 $D\lambda_{red}$ 和 S_{red} 表现出极显著的相关性^[33]。杨杰等^[35]通过研究水稻(*Oryza sativa*)上部的反射光谱发现红边比值指数(Red edge simple ratio index, SR₇₀₅)、mSR₇₀₅、红边比值指数(Red edge normalized difference vegetation index, ND₇₀₅)、mND₇₀₅ 和 GNDVI 等光谱参数与水稻叶片叶绿素 a 和叶绿素总含量具有很好的相关性($R^2 > 0.9$)，与 Chl b 的相关性也达到较高水平($R^2 > 0.86$)。在本研究中 GNDVI、PSSRa、PSSRb、PSNDa、PSNDb、mSR₇₀₅、mND₇₀₅、CRI1、CRI2、ARI1、ARI2、PRI、 λ_{red} 和 S_{red} 也都与茎秆中色素含量表现出极显著的正相关性，NPCI、SIPI 和 RGI 则与色素含量表现出显著的负相关性(表 4 和表 5)，这与同化器官的研究结果相类似。其中，PSSRb、mSR₇₀₅、CRI2、PRI、ARI1 和 ARI2 与叶绿素 a、叶绿素 b 及类胡萝卜素含量的相关性最好(高于或接近 0.9)(表 5)，这表明 PSSRb、mSR₇₀₅、CRI2、PRI、ARI1 和 ARI2 等 6 种参数更适用于监测毛竹快速生长期内的光合色素含量变化。与山核桃和玉米不同，反射光谱参数 Rch 与毛竹茎秆中叶绿素和类胡萝卜素含量均未表现出相关性，这可能与不同植物材料的反射特性有关。

References:

- [1] Collins W. Remote sensing of crop type and maturity. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1978, 44(1): 43-45.
- [2] Richardson A D, Duigan S P, Berlyn G P. An evaluation of noninvasive methods to estimate foliar chlorophyll content. *New Phytologist*, 2002, 153(1): 185-194.
- [3] Gitelson A A, Gitzt Y, Merzlyak M N. Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves. *Journal Plant of Physiology*, 2003, 160(3): 271-282.
- [4] Moorthy I, Miller J R, Noland T L. Estimating chlorophyll concentration in conifer needles with hyperspectral data: an assessment at the needle and canopy level. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(6): 2824-2838.
- [5] Tanaka R, Tanaka A. Chlorophyll cycle regulates the construction and destruction of the light-harvesting complexes. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Bioenergetics*, 2011, 1807(8): 968-976.
- [6] Qiu J, Zhong R, Han C, Yang S C, Chen P. Changes of photosynthetic efficiency and chloroplast ultrastructure of narcissus leaf blades in different development stages. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2007, 15(2): 92-95.
- [7] Sun H, Li M Z, Zhao Y, Zhang Y E, Wang X M, Li X H. The spectral characteristics and chlorophyll content at winter wheat growth stages. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(1): 192-196.
- [8] Sun S, Zhang L T, Yang X H, Gao H Y. Spectral reflectance and chlorophyll fluorescence kinetics of young leaves at the various stages of leaf expansion in field-grown chestnut plants. *Scientia Silvae Sinicae*, 2009, 45(4): 162-166.
- [9] Li J, Hui B L, Pei L P. Variation in the Carotenoid amount of tomato fruit during ripening. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2004, 6(2): 122-125.
- [10] Niemann K O. Remote sensing of forest stand age using airborne spectrometer date. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1995, 61(9): 1119-1127.
- [11] Tang Y L, Huang J F, Wang X Z, Cai S H. Study on hyper spectral characteristics of corn leaves and their correlation to chrolophyll and carotenoid. *Journal of Maize Sciences*, 2008, 16(2): 71-76.
- [12] Blackburn G A. Quantifying chlorophylls and carotenoids at leaf and canopy scales: an evaluation of some hyperspectral approaches. *Remote Sensing of Environment*, 1998, 66(3): 273-285.
- [13] Blackburn G A. Wavelet decomposition of hyperspectral data: a novel approach to quantifying pigment concentrations in vegetation. *International Journal of Remote Sensing*, 2007, 28(12): 2831-2855.
- [14] Blackburn G A, Ferwerda J G. Retrieval of chlorophyll concentration from leaf reflectance spectra using wavelet analysis. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(4): 1614-1632.
- [15] Gitelson A A, Merzlyak M N. Signature analysis of leaf reflectance spectra: algorithm development for remote sensing of chlorophyll. *Journal of Plant Physiology*, 1996, 148(3/4): 494-500.
- [16] Gitelson A A, Kaufman Y J, Merzlyak M N. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 1996, 58(3): 289-298.
- [17] Sims D A, Gamon J A. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 81(2/3): 337-354.
- [18] Feng W, Zhu Y, Yao X, TianY 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.
- [19] Lin Q Y, Chen J X, Yang S Z, Wen G S. Gas exchange with *Phyllostachys pubescens* on Mount Tianmu, Zhejiang Province. *Journal of Zhejiang Forestry College*, 2008, 25(4): 522-526.
- [20] Shi J M, Guo Q R, Yang G Y. Study on the photosynthetic dynamic variation of *Phyllostachys edulis*. *Forest Research*, 2005, 18 (5): 551-555.
- [21] Song Y D, Jin A W, Jin X C, Hu Y B, Du L L, jiang Z Y. Physiology of leaf photosynthesis with fertilization in *Phyllostachys pubescens*. *Journal of Zhejiang Forestry College*, 2010, 27(3): 334-339.

- [22] Lichtenthaler H K. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. *Methods in Enzymology*, 1987, 148: 350-382.
- [23] Gupta R K, Vijayan D, Prasad T S. New hyperspectral vegetation characterization parameters. *Advances of Space Research*, 2001, 28(1): 201-206.
- [24] Gitelson A A, Zur Y, Chivkunova O B, Merzlyak M N. Assessing carotenoid content in plant leaves with reflectance spectroscopy. *Photochemistry and Photobiology*, 2002, 75(3): 272-281.
- [25] Gitelson A A, Merzlyak M N, Chivkunova O B. Optical properties and non-destructive estimation of anthocyanin content in plant leaves. *Photochemistry and Photobiology*, 2001, 74(1): 38-45.
- [26] Peñuelas J, Baret F, Filella I. Semiempirical indexes to assess carotenoids chlorophyll-a ratio from leaf spectral reflectance. *Photosynthetica*, 1995, 31(2): 221-230.
- [27] Gamon J A, Peñuelas J, Field C B. A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency. *Remote Sensing of Environment*, 1992, 41(1): 35-44.
- [28] Zhang X Z, Zhang G Q, Dai T B, Li G Q, Hu F. Estimation models of summer maize leaf pigment content based on canopy reflectance spectra. *Journal of Maize Sciences*, 2009, 18(6): 55-60.
- [29] 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.
- [30] Naidu R A, Perry E M, Pierce F J, Mekuria T. The potential of spectral reflectance technique for the detection of *Grapevine leafroll-associated virus-3* in two red-berried wine grape cultivars. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2009, 66(1): 38-45.
- [31] Zhu X C, Zhao G X, Wang R Y, Dong F, Wang L, Lei T. Hyperspectral characteristics of apple leaves and their pigment contents monitoring. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(6): 1189-1197.
- [32] Tan C W, Wang J H, Huang W J, Liu L Y, Huang Y D, Zhao C J. Study on spectral variation of LTN, CHL and LAI of summer maize. *Acta Botanica Boreali-Occidentalis Sinica*, 2004, 24(6): 1041-1046.
- [33] Tang Y L, Wang R C, Huang J F, Kong W Z, Chang Q. Hyperspectral data and their relationships correlative to the pigment contents for rice under different nitrogen support level. *Journal of Remote Sensing*, 2004, 8(2): 186-192.
- [34] Liu G H, Huang J Q, Pan C X, Wang Z G, Zhang B S, Jin S H. Analysis of the nitrogen levels in leaves of hickory seedling by reflectance spectra. *Scientia Silvae Sinicae*, 2011, 47(1): 165-171.
- [35] Yang J, Tian Y C, Yao X, Cao W X, Zhang Y S, Zhu Y. Hyperspectral estimation model for chlorophyll concentrations in top leaves of rice. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(12): 6561-6571.

参考文献:

- [6] 邱瑾, 钟然, 韩闯, 杨盛昌, 陈平. 水仙生长过程中叶片光合性能与叶绿体超微结构的变化. *中国生态农业学报*, 2007, 15(2): 92-95.
- [7] 孙红, 李民赞, 赵勇, 张彦娥, 王晓敏, 李修华. 冬小麦生长期光谱变化特征与叶绿素含量监测研究. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30(1): 192-196.
- [8] 孙山, 张立涛, 杨兴华, 高辉远. 板栗幼叶展叶过程的反射光谱和叶绿素荧光动力学. *林业科学*, 2009, 45(4): 162-166.
- [9] 李京, 惠伯棣, 裴凌鹏. 番茄果实在成熟过程中类胡萝卜素含量的变化. *中国食品学报*, 2004, 6(2): 122-125.
- [11] 唐延林, 黄敬峰, 王秀珍, 蔡绍洪. 玉米叶片高光谱特征及与叶绿素、类胡萝卜素相关性的研究. *玉米科学*, 2008, 16(2): 71-76.
- [18] 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.
- [19] 林琼影, 陈建新, 杨淑贞, 温国胜. 毛竹气体交换特征. *浙江林学院学报*, 2008, 25(4): 522-526.
- [20] 施建敏, 郭起荣, 杨光耀. 毛竹光合动态研究. *林业科学研究*, 2005, 18(5): 551-555.
- [21] 宋艳冬, 金爱武, 金晓春, 胡元斌, 杜亮亮, 江志友. 施肥对毛竹叶片光合生理的影响. *浙江林学院学报*, 2010, 27(3): 334-339.
- [28] 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*, 2009, 18(6): 55-60.
- [29] 薛中财, 高辉远, 彭涛, 姚广. 光谱分析在植物生理生态研究中的应用. *植物生理学报*, 2011, 47(4): 313-320.
- [31] 朱西存, 赵庚星, 王瑞燕, 董芳, 王凌, 雷彤. 苹果叶片的高光谱特征及其色素含量监测. *中国农业科学*, 2010, 43(6): 1189-1197.
- [32] 谭昌伟, 王纪华, 黄文江, 刘良云, 黄义德, 赵春江. 夏玉米叶片全氮、叶绿素及叶面积指数的光谱响应研究. *西北植物学报*, 2004, 24(6): 1041-1046.
- [33] 唐延林, 王人潮, 黄敬峰, 孔维妹, 程乾. 不同供氮水平下水稻高光谱及其红边特征研究. *遥感学报*, 2004, 8(2): 185-192.
- [34] 刘根华, 黄坚钦, 潘春霞, 王正如, 郑炳松, 金松恒. 基于反射光谱的山核桃幼苗氮素营养状况分析. *林业科学*, 2011, 47(1): 165-171.
- [35] 杨杰, 田永超, 姚霞, 曹卫星, 张玉森, 朱艳. 水稻上部叶片叶绿素含量的高光谱估算模型. *生态学报*, 2009, 29(12): 6561-6571.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33, No. 9 May, 2013 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Analysis of subject trends in research on sustainable development CHA Na, WU Jianguo, YU Runbing (2637)
Metabolic scaling theory and its application in microbial ecology HE Jizheng, CAO Peng, ZHENG Yuanming (2645)
Research progress on endophyte-promoted plant nitrogen assimilation and metabolism YANG Bo, CHEN Yan, LI Xia, et al (2656)

Review on the development of landscape architecture ecology in China YU Yijing, MA Jinyi, YUAN Yunjue (2665)

Autecology & Fundamentals

- Evaluating tillage practices impacts on soil organic carbon based on least limiting water range CHEN Xuewen, WANG Nong, SHI Xiuhuan, et al (2676)
Controls over soil organic carbon content in grasslands TAO Zhen, CI Dan Langjie, ZHANG Shenghua, et al (2684)
Antagonistic interactive effects of exogenous calcium ions and parasitic *Cuscuta australis* on the morphology and structure of *Alternanthera philoxeroides* stems CHE Xiuxia, CHEN Huijing, YAN Qiaodi, et al (2695)
Correlation between pigment content and reflectance spectrum of *Phyllostachys pubescens* stems during its rapid growth stage LIU Lin, WANG Yukui, WANG Xingxing, et al (2703)
Response of leaf functional traits and the relationships among them to altitude of *Salix dissa* in Balang Mountain FENG Qiuhong, CHENG Ruimei, SHI Zuomin, et al (2712)
Effects of phosphate and organic matter applications on arsenic uptake by and translocation in *Isatis indigotica* GAO Ningda, GENG Liping, ZHAO Quanli, et al (2719)
Effect of different preys on the predation and prey preference of *Orius similis* ZHANG Changrong, ZHI Junrui, MO Lifeng (2728)
Effects of predation risk on the patterns of functional responses in reed vole foraging TAO Shuanglun, YANG Xifu, YAO Xiaoyan, et al (2734)
Phylogenetic analysis of Veneridae (Mollusca: Bivalvia) based on the mitochondrial cytochrome c oxidase subunit I gene fragment CHENG Hanliang, PENG Yongxing, DONG Zhiguo, et al (2744)
Effects of different ecological environments in the laboratory on the covering behavior of the sea urchin *Glyptocidaris crenularis* CHANG Yaqing, LI Yunxia, LUO Shabin, et al (2754)

Population, Community and Ecosystem

- The ecosystem services value change in the upper reaches of Ganjiang River Based on RS and GIS CHEN Meiqiu, ZHAO Baoping, LUO Zhijun, et al (2761)
The reference condition for Eutrophication Indicator in the Yangtze River Estuary and adjacent waters — response variables ZHENG Binghui, ZHU Yanzhong, LIU Lusan, et al (2768)
The reference condition for eutrophication Indicator in the Yangtze River Estuary and adjacent waters — Causal Variables ZHENG Binghui, ZHOU Juan, LIU Lusan, et al (2780)
The stress response of biological communities in China's Yalu River Estuary and neighboring waters SONG Lun, WANG Nianbin, YANG Guojun, et al (2790)
Ecological characteristics of macrobenthic communities and its relationships with environmental factors in Hangzhou Xixi Wetland LU Qiang, CHEN Huili, SHAO Xiaoyang, et al (2803)
Effects of biological soil crusts on desert soil nematode communities LIU Yanmei, LI Xinrong, ZHAO Xin, et al (2816)
Associations between weather factors and the spring migration of the horned gall aphid, *Schlechtendalia chinensis* LI Yang, YANG Zixiang, CHEN Xiaoming, et al (2825)
Effects of vegetation on soil aggregate stability and organic carbon sequestration in the Ningxia Loess Hilly Region of northwest China CHENG Man, ZHU Qulian, LIU Lei, et al (2835)

Simulation of the carbon cycle of <i>Larix chinensis</i> forest during 1958 and 2008 at Taibai Mountain, China	LI Liang, HE Xiaojun, HU Lile, et al (2845)
Effects of different disturbances on diversity and biomass of communities in the typical steppe of loess region	CHEN Furong, CHENG Jimin, LIU Wei, et al (2856)
Age structure and point pattern of <i>Butula platyphylla</i> in Wulashan Natural Reserve of Inner Mongolia	HU Ercha, WANG Xiaojiang, ZHANG Wenjun, et al (2867)
The impacts of the Southwest China drought on the litterfall and leaf area index of an evergreen broadleaf forest on Ailao Mountain	QI Jinhua, ZHANG Yongjiang, ZHANG Yiping, et al (2877)
Spatial distribution of tree species richness in Xiaodonggou forest region of the Altai Mountains, Northwest China	JING Xuehui, CAO Lei, ZANG Runguo (2886)
Landscape, Regional and Global Ecology	
The ecological risk assessment of Taihu Lake watershed	XU Yan, GAO Junfeng, GUO Jianke (2896)
The value of fixing carbon and releasing oxygen in the Guanzhong-Tianshui economic region using GIS	ZHOU Zixiang, LI Jing, FENG Xueming (2907)
Resource and Industrial Ecology	
Effect of different controlled-release nitrogen fertilizers on availability of heavy metals in contaminated red soils under waterlogged conditions	LIANG Peijun, XU Chao, WU Qitang, et al (2919)
Research Notes	
Effect of heat and high irradiation stress on Deg1 protease and D1 protein in wheat chloroplasts and the regulating role of salicylic acid	ZHENG Jingjing, ZHAO Huijie, HU Weiwei, et al (2930)
The difference of drought impacts on winter wheat leaf area index under different CO ₂ concentration	LI Xiaohan, WU Jianjun, LÜ Aifeng, et al (2936)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于1981年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科研工作者,探索自然奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科研人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的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;新书评价和学术、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

本期责任编辑 欧阳志云

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9期 (2013年5月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 9 (May, 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

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

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

印 刷 北京北林印刷厂
行 书 学 出 版 社
地址:东黄城根北街16号
邮政编码:100717
电话:(010)64034563
E-mail:journal@cspg.net

订 购 全国各地邮局
国 外 发 行 中国国际图书贸易总公司
地 址:北京399信箱
邮 政 编 码:100044

广 告 经 营 京海工商广字第8013号
许 可 证

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

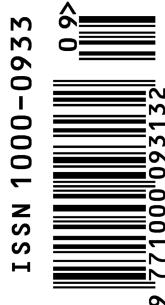
Editor-in-chief WANG Rusong
Supervised by China Association for Science and Technology
Sponsored by Ecological Society of China
Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS
Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China

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

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

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

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



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元