

叶片—冠层尺度的毛竹林分光谱特征

俞欣妍^{1,2}, 刘健^{1,2}, 余坤勇^{1,2*}, 邓洋波^{1,2}, 曾琪^{1,2}, 陈樟昊^{1,2}, 郑文英^{1,2}

(1. 福建农林大学 林学院,福建 福州 350002;2. 3S 技术与资源优化利用福建省高校重点实验室,福建 福州 350002)

摘要:通过测定毛竹林的林分光谱数据与相应的叶绿素含量,选用原始光谱反射率、导数变换光谱与“三边”参数3种光谱形式,研究不同形式的光谱信息与相应叶绿素含量的相关关系,揭示毛竹林分光谱特征在叶片—冠层尺度的差异。结果表明,叶片尺度上,原始光谱反射率对叶绿素的敏感波段在可见光区域的543~580 nm,导数光谱的敏感区域在532~543 nm、599~607 nm以及728~736 nm,“三边”参数的敏感参数为黄边面积参数(SDy);冠层尺度上,原始光谱在可见光区域及近红外区域对叶绿素的响应程度未达到显著性水平,导数光谱的敏感响应波段在近红外区域的816~819 nm,“三边”参数中各参数与叶绿素含量均没有良好的相关性。叶片—冠层尺度上,某些波段的导数光谱比原始光谱对叶绿素具有更好的响应,并且“三边”参数的黄边区域参数对叶绿素的敏感性均高于其他参数,但冠层尺度与叶片尺度光谱对叶绿素的敏感区间不存在重叠。

关键词:毛竹;尺度;遥感监测;叶绿素

中图分类号:S795.7 文献标志码:A 文章编号:1001-7461(2017)03-0007-07

Spectral Scale Differences between Leaf and Canopy of Spectral Characteristics of *Phyllostachys pubescens* Forest

YU Xin-yan^{1,2}, LIU Jian^{1,2}, YU Kun-yong^{1,2*}, DENG Yang-bo^{1,2}, ZENG Qi^{1,2},
CHEN Zhang-hao^{1,2}, ZHENG Wen-ying^{1,2}

(1. College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002, China;

2. University Key Lab for Geomatics Technology and Optimize Resources Utilization in Fujian Province, Fuzhou, Fujian 350002, China)

Abstract: The correlation relationship was analyzed between chlorophyll content and spectral information of different patterns (original spectral reflectivity, derivative transformation spectral reflectance and trilateral parameters) to reveal spectral scale differences in spectral characteristics between leaf and canopy of *Phyllostachys pubescens* forest by determining spectral data of *P. pubescens* stands and its chlorophyll content. The results showed that in the leaf scale, the sensitive bands of chlorophyll were 543—580 nm at the visible range of the original spectrum, 532—543 nm, 599—607 nm and 728—736 nm at the first derivative spectrum; and the sensitive parameter of trilateral parameters was yellow edge region (SDy). In the canopy scale, The correlation relationship between original spectrum in the visible and near-infrared regions and chlorophyll content did not reach significant levels; the sensitive bands of the first derivative spectrum in near-infrared regions was 816—819 nm, and there was no good correlation between trilateral parameters with chlorophyll content. In the leaf and canopy scale, the first derivative spectrum of some bands responded better than the original spectrum, and SDy of trilateral parameters was better sensitive to chlorophyll content than the other parameters, while there was no overlapping sensitive areas between the leaf and canopy scale.

Key words: *Phyllostachys pubescens*; scale; remote sensing monitoring; chlorophyll

收稿日期:2016-10-27 修回日期:2016-12-21

基金项目:福建省科技计划项目(2016N0003);福建省高校产学研合作项目(2015N5010)。

作者简介:俞欣妍,女,在读硕士,研究方向:3S技术应用及资源监测。E-mail:fjyuxy@126.com

*通信作者:余坤勇,男,博士,副教授,研究方向:3S技术应用与资源监测。E-mail:yuky@126.com

毛竹(*Phyllostachys pubescens*)林具有生长周期短、生长速度快的特点,是南方集体林区重要树种。但由于毛竹林调查时间长,工作难度大的特点,无法快速、实时地对毛竹林资源完成监测,因而,高光谱遥感技术在毛竹林的调查中得到越来越广泛的应用^[1]。植被叶片上含有的叶绿素含量决定了植物对太阳辐射的利用率,使得光合作用与植被的生长过程密切相关。利用叶绿素含量可估测整体生产力,叶绿素反映植物营养状况、光合能力以及对植物长势具有良好的指示效果,是光谱监测的重要指标^[2-6],可为遥感估算植被生产力提供关键参数。实时、准确地掌握植物叶片叶绿素含量,有助于有效监测植物生长过程中的光合作用能力,并对其生长状况、产量进行实时的调控和预测^[7-8]。大量研究的对象所表现的特征均是依附在某一尺度上^[9],不同的研究尺度往往会产生不同研究结果^[10]。由于陆表地物结构的复杂性,在同一尺度上形成的原理及规律,不一定适用于另一尺度^[11-12]。因此,只有在连续的空间尺度上对同一对象进行研究,才能把握他们

的内在规律。尺度大小的选择,尺度之间的关系,尺度中最佳信息的选取都是科学的研究过程中不可或缺的一个环节。本研究以毛竹叶绿素含量为生理指标,分别从叶片尺度和冠层尺度研究光谱信息与叶绿素的关系,揭示基于在叶片尺度、冠层尺度进行毛竹林分调查的差异,为毛竹林快速、无损监测提供技术指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

采样地点为福建省南平市顺昌县西北部(117°30'~118°14'E, 26°39'~29°12'N),属亚热带季风气候,年平均雨量约为1752 mm,年平均日照数为1700 h,年平均气温为16.3℃,极端温度最高为37℃,最低为-4℃。土壤类型多为红壤、黄壤。根据毛竹林的分布,采用分散布点与定点集中测量相结合的方法,选取顺昌县大干镇不同毛竹小班的20株毛竹为研究对象,试验样本为长势良好、叶量充足、叶片健康的毛竹。

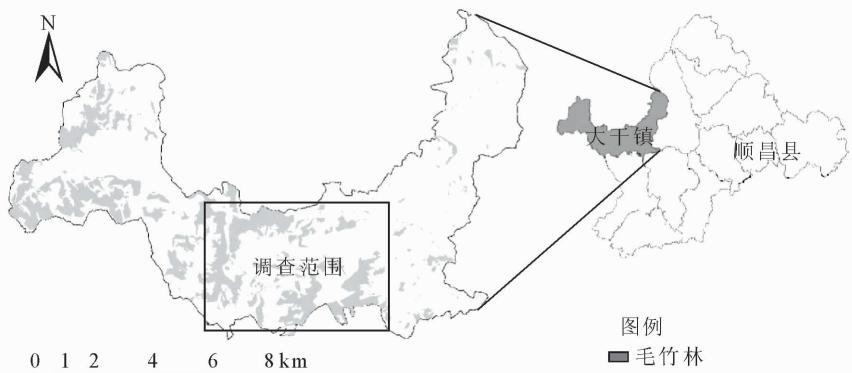


图1 研究区地理位置及毛竹林分布

Fig. 1 Location of the study area and distribution of *P. pubescens* forest

1.2 数据获取

1.2.1 光谱测定 光谱数据测定的仪器为ISI921VF-256野外光谱辐射仪(北京西迈威科科技有限公司),测定时间为2016年6月28日—7月8日。测定过程将毛竹砍下,保留其原始的冠层结构,使用长杆固定光谱仪在顶端,举至冠层顶部,距离冠层20~30 cm,在阳光下用进行光谱数据的采集,作为冠层尺度光谱;取冠层外围的叶片10片,分别测定每片叶片的光谱,作为叶片尺度光谱。测量后的叶片以样地分组,装入黑色自封袋后放入装有冰袋的保温箱中,带回实验室测定叶绿素含量^[13]。

1.2.2 叶绿素测定 采用浸提法与分光光度法。使用丙酮与无水乙醇按体积1:1配置的溶液进行叶绿素的萃取。叶片去除中脉,剪碎,将0.05 g叶片与8 mL配置好的溶液加入10 mL连盖离心管,

在黑暗且恒温的环境中静置。48 h后,用UV-3000型分光光度计(上海美谱达公司)对叶绿素提取液进行测量,采用波长为645、663 nm进行光密度值测量,并依据Arnon公式^[14]计算叶绿素含量。每组样本设置3次重复试验,选取数值接近的2次重复取平均值,得到最终叶绿素含量。测定结果可同时代表冠层尺度与叶片尺度的叶绿素含量^[1,15]。

1.3 数据处理

1.3.1 光谱反射率曲线预处理 为了消除仪器在野外扫描时不可避免的噪声,减少种种外界因素带给光谱数据的影响^[16],将不同尺度各样的光谱反射率去除异常值之后,累加平均,输入快速傅里叶变换滤波器,进行去噪处理,滤除高频信号的干扰,实现曲线平滑,数据点个数选择4~8之间。

1.3.2 光谱反射率曲线标准化处理 为了消除同

一测量环境下无量纲的影响,将光谱反射率曲线进行标准化处理,标准化处理的公式为:

$$Z_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{i\min}}{x_{i\max} - x_{i\min}} \quad (1)$$

式中, Z_{ij} 为第*i*株毛竹处于*j*波长值时的标准化反射率,*i*表示毛竹样本的编号,取值范围为1~20;*j*是光谱曲线的波长范围,取值范围是379~1 017 nm;*x*表示0~100%的光谱反射率值。

1.3.3 光谱曲线的变换形式 对光谱数据进行求导计算,可以很好的优化图谱信息,消除仪器背景飘

移对光谱信号的影响。为提高光谱敏感度,对光谱反射率进行求导(A')、以及对光谱反射率倒数对数进行求导($(\lg(1/A))'$)^[17-18]。

1.3.4 光谱数据的“三边”参数 为进一步研究光谱数据与叶绿素含量的关系,按照植物光谱反射率曲线的上升、下降趋势,对光谱数据进行特征信息的提取。光谱的“三边”参数是基于光谱位置特征的相关变量,即把光谱曲线按照波长范围分为蓝边(490~530 nm)、黄边(560~640 nm)、红边(680~760 nm)^[19-20]。选取的“三边”参数如表1。

表1 “三边”参数的定义

Table 1 Definition of trilateral parameters

范围	定义	“三边”参数	内涵
蓝边	蓝边	<i>Db</i>	490~530 nm 内最大一阶导数值
	蓝边位置	<i>WP-b</i>	<i>Db</i> 对应的波长
	蓝边面积	<i>SDb</i>	蓝边内一阶导数的总和
绿峰	绿峰反射率	<i>Rg</i>	530~560 nm 内最小的波段反射率
	绿峰反射率位置	<i>WP-g</i>	<i>Rg</i> 对应的波长
黄边	黄边	<i>Dy</i>	560~640 nm 内最大一阶导数值
	黄边位置	<i>WP-y</i>	<i>Dy</i> 对应的波长
	黄边面积	<i>SDy</i>	黄边内一阶导数的总和
红谷	红谷反射率	<i>Rr</i>	640~680 nm 内最小的波段反射率
	红边	<i>Dr</i>	680~760 nm 内最大一阶导数值
红边	红边位置	<i>WP-r</i>	<i>Dr</i> 对应的波长
	红边面积	<i>SDr</i>	红边内一阶导数的总和
基于植被指数形式的变量	红—蓝面积比值	<i>SDr/SDb</i>	红边面积与蓝边面积的比值
	红—黄面积比值	<i>SDr/SDy</i>	红边面积与黄边面积的比值
	红—蓝面积归一	$(SDr - SDb) / (SDr + SDb)$	红边面积与蓝边面积的归一化比值
	红—黄面积归一	$(SDr - SDy) / (SDr + SDy)$	红边面积与黄边面积的归一化比值

2 结果与分析

2.1 毛竹叶片尺度光谱反射率与叶绿素含量的变化响应

2.1.1 叶片尺度原始光谱反射率与叶绿素含量的变化响应 将叶片尺度光谱反射率与叶绿素含量的进行相关性分析,得到相关性曲线(图2)可以看出,原始光谱反射率(*A*)在430~665 nm、678~990 nm范围内与叶绿素含量呈现负相关关系,叶片光谱反射率与叶绿素的显著相关波段范围在绿光区域的543~580 nm,原始光谱反射率与叶绿素含量没有极显著的相关关系。

2.1.2 叶片尺度导数变换光谱与叶绿素含量的变化响应 将叶片尺度光谱反射率的不同形式进行一阶导数处理,得到的曲线与叶绿素含量建立相关关系(图3)可以看出,叶片尺度一阶导数变换光谱(*A'*)与叶绿素含量在410~460、490~550、670~725、780~813、880~920 nm与960~970 nm范围内与叶绿素含量呈负相关关系,在527~543 nm范

围内,*A'*与叶绿素含量存在显著关系,尤其是532~543 nm含有连续的极显著相关关系;在波段范围为440~410、460~490、551~670、725~780、813~880、920~960 nm与970~1 000 nm范围内,*A'*与叶绿素含量呈现正相关关系,尤其在593~615 nm范围内,*A'*与叶绿素含量的相关性具有显著关系(*P*=0.05),在599~607 nm范围内,*A'*与叶绿素含量呈现出极显著相关关系(*P*=0.01)。表明一阶导数变换光谱在可见光区域的532~543 nm和599~607 nm波段上与叶绿素含量显著相关。叶片尺度光谱反射率倒数对数的一阶导数形式($(\lg(1/A))'$)与叶绿素也具有良好的相关性:在720~775 nm与890~900 nm波段存在显著相关关系,红光区域的728~736 nm存在极显著相关关系,说明叶片尺度光谱倒数对数的一阶导数形式对叶绿素有很强的敏感性。

2.1.3 叶片尺度光谱“三边”参数与叶绿素含量的变化响应 将“三边”参数与叶绿素含量进行相关分析(表2),对比叶片尺度的各个特征参数与叶绿素

的相关关系可以看出, SDy 的相关性最好, 相关系数为 0.4673, 叶片尺度特征参数与叶绿素含量变化的相关关系按照大小排列为: $SDy > (SDr - SDy) / (SDr + SDy) > SDr / Sdy > WP - r > Db > SDb > SDr / SDb > (SDr - SDb) / (SDr + SDb) > Dy > Rg$, 其余特征参数相关性弱或没有相关性 $P = 0.05$, 蓝光波段范围内的 Db 对叶绿素变化的响应高于其他参数, 绿峰范围中的 Rg 与叶绿素的相关关系高于 $WP-g$ 参数, 在黄边波段中求其光谱曲线与 x 轴之间的面积得到的 SDy , 此变量对叶绿素的变化响应高于叶片尺度其他特征参数。根据叶片尺度相关系数的整体分布情况可知, 利用特征参数进行相应的比值或归一化指数对叶绿素含量变化的相关性大体分布一致, $WP-r$ 、 Db 、 SDb 3 个特征参数对叶绿素含量的敏感性相近。根据 SDy 参数对叶绿素的变化响应通过 $P=0.05$ 的显著相关水平, 说明叶片尺度的黄边波段与叶绿素含量变化具有良好的敏感性, 可以利用此参数对叶绿素含量进行估算。

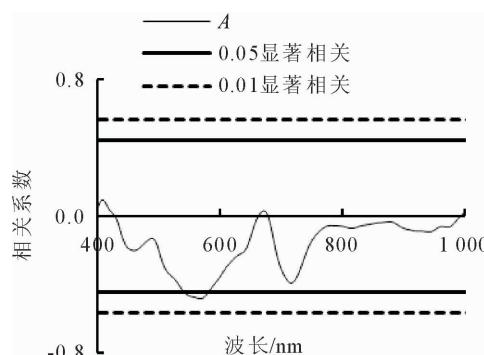


图 2 叶片尺度光谱反射率与叶绿素含量的相关关系

Fig. 2 The correlation relationship between spectral reflectivity and chlorophyll content in the leaf scale

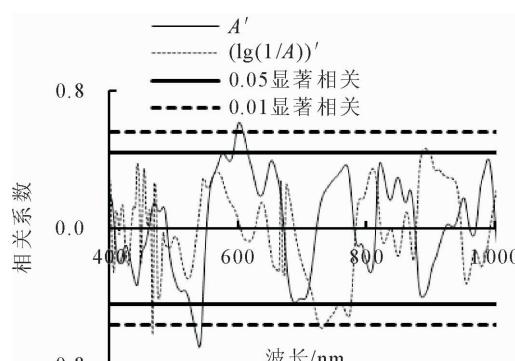


图 3 叶片尺度一阶导数变换光谱与叶绿素含量的相关关系

Fig. 3 The correlation relationship between the first derivative spectrum and chlorophyll content in the leaf scale

2.2 毛竹冠层尺度光谱反射率与叶绿素含量的变化响应

2.2.1 冠层尺度原始光谱反射率与叶绿素含量的

变化响应 冠层尺度整体趋势为波长 < 923 nm 时, 原始光谱反射率 (A) 与叶绿素含量呈负相关关系; 波长 > 923 nm 时, A 与叶绿素含量呈正相关关系。在负相关关系的波段中, 波长越靠近近红外区域, 相关性越低, 但在可见光波段的 500 nm、670 nm 附近有两处凸起(图 4), 与一般植物对叶绿素的敏感具有相似性^[1,21], 表明冠层尺度的光谱信息虽然受到干扰的尺度很大, 但是还保留了对植物叶片叶绿素含量的响应。

表 2 “三边”参数与叶绿素含量相关关系

Table 2 The correlation relationship between trilateral parameters and chlorophyll content

“三边”参数	相关系数	
	叶片尺度	冠层尺度
Db	-0.375 6	-0.036 9
$WP-b$	-0.061 8	0.008 8
SDb	-0.367 5	-0.042 9
Rg	-0.235 8	-0.096 6
$WP-g$	0.126 5	-0.078 2
Dy	0.292 0	0.018 5
$WP-y$	-0.109 1	-0.308 2
SDy	-0.467 3*	0.047 3
Rr	-0.041 8	-0.230 6
Dr	-0.053 3	-0.016 2
$WP-r$	0.375 0	0.051 9
SDr	-0.095 7	-0.000 6
SDr/SDb	0.343 2	0.109 9
SDr/Sdy	0.400 5	-0.075 2
$(SDr-SDb)/(SDr+SDb)$	0.299 0	0.088 8
$(SDr-SDy)/(SDr+SDy)$	0.412 5	-0.104 9

注: * 表示 0.05 水平上显著。

2.2.2 冠层尺度导数光谱与叶绿素含量的变化响应 将冠层尺度光谱反射率的不同变化形式进行一阶导数处理, 建立与叶绿素含量建立相关关系(图 4)。可以看出, 冠层尺度的 A' 在可见光波段与叶片色素无显著相关性, 在 > 760 nm 的波段出现 2 个显著正相关的波段、1 个显著负相关的波段分别是 810 ~ 821 nm、900 ~ 901 nm 与 970 ~ 981 nm, 其中, 816 ~ 819 nm 具显著性检验 ($P=0.01$)。冠层尺度的 $(\lg(1/A))'$ 与叶绿素的相关性不大, 在可见光波段不存在显著相关, 且 450 ~ 500 nm、600 ~ 700 nm 范围内 $(\lg(1/A))'$ 的曲线剧烈抖动, 说明冠层尺度的 $(\lg(1/A))'$ 与叶绿素的相关性较低, 不利于毛竹叶绿素含量的估测, 而 $(\lg(1/A))'$ 相关性曲线在 975 ~ 981 nm 近红外波段正相 ($P=0.05$), 此范围与 A' 的其中一个显著区间吻合, 说明冠层尺度的导数光谱在 975 ~ 981 nm 与叶绿素具有稳定的相关性。

2.2.3 冠层尺度光谱“三边”参数与叶绿素含量的变化响应 冠层尺度光谱“三边”参数与叶绿素含量

的相关关系(表2)可以看出,在各个特征参数中,相关性由大到小为: $WP_y > Rr > SD_r/SD_b > (SD_r - SD_y)/(SD_r + SD_y)$,其余特征参数对叶绿素含量的响应程度非常弱。黄边区域与红谷区域的特征参数对叶绿素含量的变化更为敏感,对应的参数分别是黄边位置参数与红谷反射率参数。

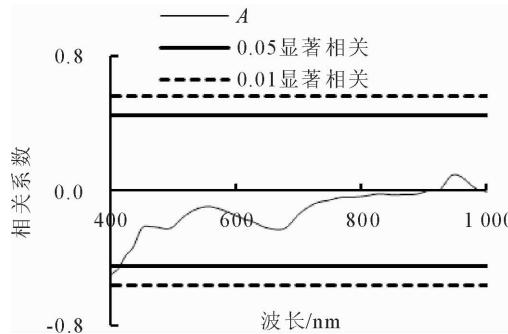


图4 冠层尺度光谱反射率与叶绿素含量的相关关系

Fig. 4 The correlation relationship between spectral reflectivity and chlorophyll content in the canopy scale

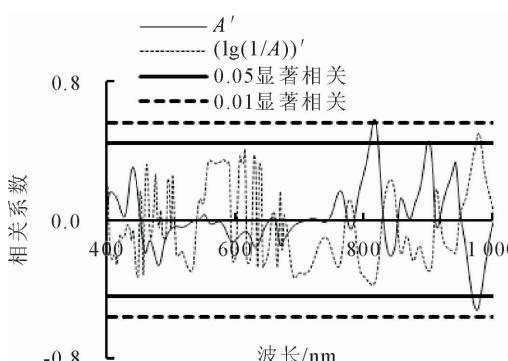


图5 冠层尺度一阶导数变换光谱与叶绿素含量的相关关系

Fig. 5 The correlation relationship between the first derivative spectrum and chlorophyll content in the leaf scale

2.3 毛竹林响应于叶绿素含量变化的“叶片—冠层”尺度差异分析

2.3.1 原始光谱反射率“叶片—冠层”尺度差异

原始光谱反射率与叶绿素含量在可见光波段内呈负相关(图6)。叶片尺度原始光谱与叶绿素含量的相关程度优于冠层尺度,尤其在绿光区域的543~580 nm,叶绿素含量与叶片尺度原始光谱反射率存在显著相关,叶片尺度上的叶绿素光谱敏感区域集中在可见光区域,冠层尺度叶绿素光谱响应敏感区间不存在可见区间,说明2种尺度下的光谱反射率与叶绿素含量的相关关系存在很大的不同,可能是由于不同尺度下调查的外部因素差异影响了光谱反射率曲线。所以,对不同尺度的光谱进行对比分析是有必要的,可以对比分析不同尺度的影响因素,以便对进行无关因素确认;又因为原始光谱反射率与叶绿素含量的相关程度不足,故仅基于光谱反射率曲线

进行与叶绿素含量的相关性分析的效果不理想,对光谱进行形式转换以及有必要引入光谱特征参数。

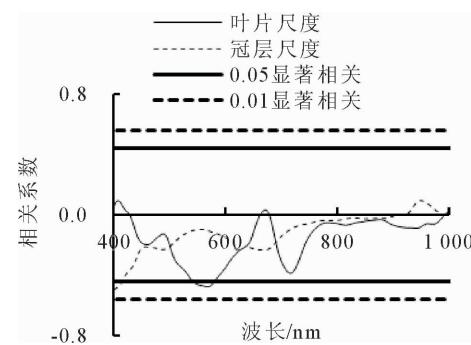


图6 叶片—冠层尺度原始光谱反射率与叶绿素含量的相关关系

Fig. 6 The correlation relationship between original spectral reflectivity and chlorophyll content in the leaf and canopy scale

2.3.2 导数变换光谱“叶片—冠层”尺度差异 结合图3与图5,提取导数变换光谱在“叶片—冠层”尺度中对叶绿素含量变化的表现(表3)可知,叶片尺度的 A' 及 $(\lg(1/A))'$ 与叶绿素含量变化的相关性波段范围均广于冠层尺度,叶片尺度的显著光谱波段范围多存在于可见光区域,冠层尺度则多存在于近红外区域,说明叶片尺度的光谱导数形式可以更好地反映叶片叶绿素含量的变化情况;叶片尺度在可见光区域与叶绿素含量变化有很好的相关关系,冠层尺度在近红外区域与叶绿素含量变化有相关关系,可能原因是叶片尺度光谱信息能更大程度反映叶片色素含量,而冠层尺度光谱信息所受的外界干扰多于叶片尺度,仅利用导数变化难以将干扰消除完全。

表3 导数变换光谱与叶绿素含量变化显著相关波段信息

Table 3 Significant correlation bands of derivative spectrum and chlorophyll content

尺度	光谱形式	P=0.05 显著相关波段 /nm	P=0.01 显著相关波段 /nm
叶片尺度	A'	①527~543 ②593~615	①532~543 ②599~607
	$(\lg(1/A))'$	①720~775 ②890~900	①728~736
	A'	①810~821 ②900~901 ③970~981	①816~819
	$(\lg(1/A))'$	①975~981	—

2.3.3 光谱反射率“三边”参数的“叶片—冠层”尺度差异 叶片尺度与冠层尺度对比(图7),可以看出叶片尺度与冠层尺度中,黄边区域为叶绿素含量最敏感的参数区,红光区域次之。对于“三边”参数总体而言,蓝边波段中,叶片尺度与叶绿素相关程度

最大的参数为 Db , 冠层尺度为 SDb ; 在绿峰波段中, 叶片—冠层尺度与叶绿素含量相关性最大的参数均为 Rg , 但相关性较低; 在黄边波段中, 叶片尺度的 SDy 与叶绿素含量相关性最好, 且达到显著相关水平, 冠层尺度的 $WP-y$ 与叶绿素具有较高的相关性; 红谷—红边波段中, 叶片尺度与叶绿素相关程度最大的参数为 $WP-r$, 与叶绿素相关关系较好, 且为正相关, 冠层尺度为 Rr , 与叶绿素的相关性较小。

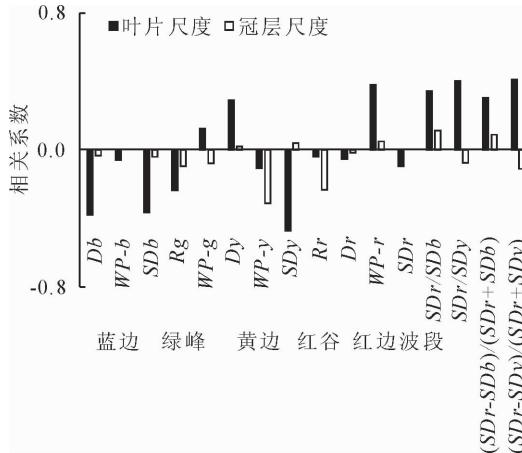


图 7 “叶片—冠层”尺度光谱反射率“三边”参数相关系数对比

Fig. 7 Contrast of correlation of spectral reflectivity in the leaf and canopy scale and trilateral parameters

3 结论与讨论

通过测定毛竹林的林分光谱数据与相应的叶绿素含量, 比较了不同尺度的光谱信息与对应叶绿素含量的相关关系。冠层尺度光谱与叶片尺度光谱对叶绿素变化的敏感区间不存在重叠, 这与叶片尺度、冠层尺度对叶绿素响应的敏感区间差异有关: 1) 由于控制植被可见光区域反射率的主要因素是叶片色素, 植被近红外区域反射率则是受植被纹理信息控制^[22]; 2) 冠层尺度采集的光谱信息更多受到土壤背景、枯枝落叶层、草本层等的影响, 导致无法准确反映被测样本的光谱^[23], 故造成冠层尺度上的可见光区域光谱被严重干扰、近红外区域光谱对植被的敏感性更强; 3) 叶片尺度则因为受到的环境背景影响比冠层尺度小, 更能准确反映毛竹叶片的自身光谱特性。因此, 基于相同的光谱数据处理手段, 叶片尺度光谱与叶绿素的敏感波段出现在可见光波段, 冠层尺度与叶绿素的敏感波段出现在近红外波段。

无论冠层尺度或叶片尺度, 毛竹林分导数变换形式的光谱比原始光谱在某些波段对叶绿素含量的变化具有更好的响应, 与卢璐^[24]、吴长山^[21]的研究相一致。研究所选择的 2 种导数光谱与叶绿素含量

密切相关的波段为: 叶片尺度的 532~543 nm、599~607 nm、728~736 nm 与冠层尺度的 813~819 nm, 与高彦华^[25]在混合植被中提取的叶绿素理想波段相近; 其中, A' 与叶绿素含量的相关性高于 $(\lg(1/A))'$, 说明一阶导数形式可以更好地消除干扰, 构建较高的相关关系^[26-27]。综上, 光谱的一阶导数形式不仅具备消除背景干扰的效果, 还可更好地还原毛竹叶片的色素信息。

“三边”参数研究中, 毛竹黄边区域参数与叶绿素含量的相关性高于其他, 相关性显著, 与张永贺^[1]在桉树叶片尺度上提取的光谱特征变量一致, 说明叶片尺度的黄边面积参数为无损监测毛竹叶绿素含量的最优参数, 但最优参数与宫兆宁^[22]等对湿地植物进行研究时选出的红边位置参数不同, 可能原因在于调查环境与背景差异、树种不同以及其他空间异质性因素影响。

参考文献:

- [1] 张永贺, 陈文惠, 郭乔影, 等. 桉树叶光合色素含量高光谱估算模型[J]. 生态学报, 2013, 33 (3): 876-887.
ZHANG Y H, CHEN W H, GUO Q Y, et al. Hyperspectral estimation models for photosynthetic pigment contents in leaves of *Eucalyptus*[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33 (3): 876-887. (in Chinese)
- [2] MAHAJAN M, PAL P K. Growing conditions influence non-destructive estimation of chlorophyll in leaves of *Valeriana jatamansi*[J]. Journal of Applied Research on Medicinal & Aromatic Plants, 2016, 3(3): 131-135.
- [3] COLLINS W. Remote sensing of crop type and maturity[J]. Photogr. Eng. Remote Sens., 1978, 44(1): 43-55.
- [4] HENDRY G A F, HOUGHTON J D, BROWN S B. The degradation of chlorophyll: a biological enigma[J]. New Phytologist, 2006, 107(2): 255-302.
- [5] MERZLYAK M N, GITELSON A A, CHIVKUNOVA O B, et al. Non-destructive optical detection of pigment changes during leaf senescence and fruit ripening[J]. Physiologia Plantarum, 1999, 106 (1): 135-141.
- [6] 王鑫梅, 卞洪香, 李春友, 等. 107 杨叶片叶绿素含量高光谱反演的研究[J]. 西北林学院学报, 2015, 30(3): 35-38.
WANG X M, MOU H X, LI C Y, et al. Inversion of *Populus × euramericana* cv. "74/76" chlorophyll concentration based on the hyper-spectrum[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2015, 30(3): 35-38. (in Chinese)
- [7] 王冰, 张羽震, 贺文美, 等. 山桃叶片叶绿素 SPAD 值颜色特征与时空特征分析[J]. 西北林学院学报, 2016, 31(5): 311-315.
WANG B, ZHANG Y Z, HE W M, et al. Color and spatio-temporal characteristics of chlorophyll SPAD values of *Prunus davidiana* leaves[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2016, 31(5): 311-315. (in Chinese)
- [8] 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.

- LI M X, ZHANG L S, LI B Z, et al. Relationship between spectral reflectance feature and their chlorophyll concentrations and SPAD value of apple leaves[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2010, 25(2): 35-39. (in Chinese)
- [9] 彭懿. 空间数据尺度转换和尺度效应研究[D]. 中山: 中山大学, 2007.
- [10] 栾海军, 田庆久, 余涛, 等. 定量遥感升尺度转换研究综述[J]. 地球科学进展, 2013, 28 (6): 657-664.
- LUAN H J, TIAN Q J, YU T, et al. Review of up-scaling of quantitative remote sensing[J]. Advances in Earth Science, 2013, 28 (6): 657-664. (in Chinese)
- [11] 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 (Supp. 2): 123-129.
- [12] 李小文, 王祎婷. 定量遥感尺度效应当议[J]. 地理学报, 2013, 68 (9): 1163-1169.
- LI X W, WANF Y W. Prospects on future developments of quantitative remote sensing [J]. Acta Geographica Sinica, 2013, 68 (9): 1163-1169. (in Chinese)
- [13] 宋艳冬, 金爱武, 金晓春, 等. 毛竹叶片光合色素的光谱估算模型[J]. 北京林业大学学报, 2010, 32 (1): 31-34.
- SONG Y D, JIN A W, JIN X C, et al. Models for estimation of photosynthetic pigmental spectra in *Phyllostachys pubescens* leaves[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2010, 32 (1): 31-34. (in Chinese)
- [14] 叶济宇. 关于叶绿素含量测定中的 Arnon 计算公式[J]. 植物生理学杂志, 1985(6): 69.
- YE J Y. About arnon formula in determination of chlorophyll content [J]. Plant Physiology Communications, 1985(6): 69. (in Chinese)
- [15] 潘蓓, 赵庚星, 朱西存, 等. 利用高光谱植被指数估测苹果树冠层叶绿素含量[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33 (8): 2203-2206.
- PAN B, ZHAO G X, ZHU X C, et al. Estimation of chlorophyll content in apple tree canopy based on hyperspectral parameters[J]. Spectroscopy & Spectral Analysis, 2013, 33 (8): 2203-2206. (in Chinese)
- [16] 高荣强, 范世福, 严衍禄, 等. 近红外光谱的数据预处理研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2004, 24(12): 1563-1565.
- GAO R Q, FAN S F, YAN Y L, et al. Preprocessing of near infrared spectroscopic data[J]. Spectroscopy & Spectral Analysis, 2004, 24 (12): 1563-1565. (in Chinese)
- [17] 李园园, 宋于洋, 陈兵, 等. 荒漠公益林中典型灌木树种光谱特征研究[J]. 西北林学院学报, 2011, 26(1): 155-159.
- LI Y Y, SONG Y Y, CHEN B, et al. Spectral features of typical shrubberies in welfare forests in desert areas[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2011, 26(1): 155-159. (in Chinese)
- [18] 侯艳军, 塔西甫拉提·特依拜, 买买提·沙吾提, 等. 荒漠土壤有机质含量高光谱估算模型[J]. 农业工程学报, 2014, 30 (16): 113-120.
- HOU, Y J, TASHPOLAT · TIYIP, MAMAT · SAWUT, et al. Estimation model of desert soil organic matter content using hyperspectral data[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30 (16): 113-120. (in Chinese)
- [19] 杜华强, 葛宏立, 范文义, 等. 马尾松针叶光谱特征与其叶绿素含量间关系研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29 (11): 3033-3037.
- DU H Q, GE H L, FAN W Y, et al. Study on relationships between total chlorophyll with hyperspectral features for leaves of *Pinus massoniana* forest[J]. Spectroscopy & Spectral Analysis, 2009, 29 (11): 3033-3037. (in Chinese)
- [20] 史冰全, 张晓丽, 白雪琪, 等. 基于“三边”参数的油松林叶绿素估算模型[J]. 东北林业大学学报, 2015 (5): 80-83.
- SHI B Q, ZHANG X L, BAI X Q, et al. Chlorophyll estimation model of *Pinus tabulaeformis* based on “Sanbian” parameters[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2015, 43(5): 80-83. (in Chinese)
- [21] 吴长山, 童庆禧, 郑兰芬, 等. 水稻、玉米的光谱数据与叶绿素的相关分析[J]. 应用基础与工程科学学报, 2000, 8(1): 31-37.
- WU C S, TONG Q X, ZHENG L F, et al. Correlation analysis between spectral data and chlorophyll of rice and maize[J]. Journal of Basicience & Engineering, 2000, 8(1): 31-37. (in Chinese)
- [22] 宫兆宁, 赵雅莉, 赵文吉, 等. 基于光谱指数的植物叶片叶绿素含量的估算模型[J]. 生态学报, 2014, 34 (20): 5736-5745.
- GONG Z N, ZHAO Y L, ZHAO W J, et al. Estimation model for plant leaf chlorophyll content based on the spectral index content[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34 (20): 5736-5745. (in Chinese)
- [23] 梁亮, 张连蓬, 林卉, 等. 基于导数光谱的小麦冠层叶片含水量反演[J]. 中国农业科学, 2013, 46(1): 18-29.
- LIANG L, ZHANG L P, LIN H, et al. Estimating canopy leaf water content in wheat based on derivative spectra[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(1): 18-29. (in Chinese)
- [24] 卢璐, 苏荣国, 王修林, 等. 基于四阶导数的浮游植物叶绿素荧光激发光谱特征研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2007, 27 (11): 2307-2312.
- LU L, SU R G, WANG X L, et al. Study on the characters of phytoplankton chlorophyll fluorescence excitation spectra based on fourth-derivative[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2007, 27 (11): 2307-2312. (in Chinese)
- [25] 高彦华, 陈良富, 周旭, 等. 估算混合植被叶绿素含量的理想波段分析[J]. 遥感学报, 2009, 13 (4): 623-630.
- GAO Y H, CHEN L F, ZHUO X, et al. Analysis of ideal bands for estimating chlorophyll content of mixed vegetation [J]. Journal of Remote Sensing, 2009, 13 (4): 623-630. (in Chinese)
- [26] TSAI F, PHILPOT W. Derivative analysis of hyperspectral data[J]. Remote Sensing of Environment, 1998, 66 (1): 41-51.
- [27] XUE L, YANF L. Deriving leaf chlorophyll content of green-leafy vegetables from hyperspectral reflectance [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2009, 64 (1): 97-106.