

雷竹叶绿素与高光谱植被指数关系及其反演模型

李亚丹^{1,2}, 杜华强^{1,2}, 周国模^{1,2}, 谷成燕^{1,2}, 徐小军^{1,2}, 孙少波^{1,2}, 高国龙^{1,2}

(1. 浙江农林大学 浙江省森林生态系统碳循环与固碳减排重点实验室, 浙江 临安 311300; 2. 浙江农林大学 环境与资源学院, 浙江 临安 311300)

摘要: 雷竹 *Phyllostachys violascens* 快速生长过程中, 采用 ASD 便携式野外光谱测量仪和 CCM-200 手持式叶绿素仪对研究区样竹反射光谱曲线和相对叶绿素进行连续观测, 在此基础上分析了植被指数与雷竹叶绿素在不同观测时间的相关关系, 并构建了叶绿素反演模型。研究表明: ①绿度指数(GM), 红边指数(Vog3), 双重差值指数(DD), 修正型归一化指数(mND₇₀₅), 修正型比值指数(mSR₇₀₅)和红边拐点指数(REP)等 6 个高光谱植被指数在整个生长过程均与雷竹叶绿素有较好的相关关系, 而其他植被指数在某些时间或时间段里与雷竹叶绿素具有较好的关系, 且在观测末期, 几乎所有植被指数与叶绿素均有较好的相关性; ②采用以上 6 个植被指数建立的一元线性模型, 在 99% 置信水平下的相关系数均在 0.85 以上, 且 2 种方案所建立的多元线性模型能够对雷竹叶绿素进行高精度的预测, 预测与实测叶绿素之间的相关系数在 0.89 以上。图 4 表 2 参 45

关键词: 植物学; 雷竹; 叶绿素; 高光谱植被指数; 相关性; 模型

中图分类号: S718.4 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2015)03-0335-11

Chlorophyll content in *Phyllostachys violascens* related to hyper-spectral vegetation indices and development of an inversion model

LI Yadan^{1,2}, DU Huaqiang^{1,2}, ZHOU Guomo^{1,2}, GU Chengyan^{1,2}, XU Xiaojun^{1,2}, SUN Shaobo^{1,2}, GAO Guolong^{1,2}

(1. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Carbon Cycling in Forest Ecosystems and Carbon Sequestration, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China; 2. School of Environmental and Resources Science, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China)

Abstract: Reflectance data and relative chlorophyll content for *Phyllostachys violascens* at leaf scale were measured during the growth period from April, 5th to June, 18th using a portable Analytical Spectral Devices (ASD) field spectrometer and a hand-held Chlorophyll Content Meter (CCM)-200. Correlation analyses were conducted between hyper-spectral vegetation indices and chlorophyll content based on the data. Then individual univariate linear inversion models were developed for chlorophyll content and hyper-spectral vegetation indices, such as red edge indexes GM, Vog3, double difference index DD, modified normalized differential vegetation index mND₇₀₅, modified simple ratio mSR₇₀₅, and Red-edge positions (REP). Also multivariate linear models for selected hyper-spectral vegetation indices and chlorophyll content were tested. Multivariate linear models are designed in two methods, strategy A is based on the 20 *Phyllostachys violascens* samples, and each data for the sample is the average for all the 14 times. On the contrary, strategy B is based on the data of 14 times, which average the 20 samples for each time. Results over the entire growth period showed (1) significant ($P < 0.01$) correlations between chlorophyll content and hyper-spectral vegetation indices, GM ($r =$

收稿日期: 2014-09-12; 修回日期: 2014-11-24

基金项目: 浙江省杰出青年科学基金资助项目(LR14C160001); 国家自然科学基金资助项目(31370637); 浙江省林业碳汇与计量创新团队资助项目(2012R10030-01); 浙江省本科院校中青年学科带头人学术攀登计划项目(pd2013239); 浙江农林大学农林碳汇与生态环境修复研究中心预研基金资助项目

作者简介: 李亚丹, 从事森林资源遥感监测与信息技术等研究。E-mail: 919937099@qq.com。通信作者: 杜华强, 教授, 博士, 从事遥感、森林碳汇遥感估算以及空间统计等研究。E-mail: dhqrs@126.com

0.866 3), $Vog3$ ($r = 0.927 4$), DD ($r = 0.880 6$), mND_{705} ($r = 0.917 9$), mSR_{705} ($r = 0.924 9$), and REP ($r = 0.895 4$). At the end of the growth period, all vegetation indices had a favorable relationship with chlorophyll content, showing as the high correlation coefficients, although some indexes perform bad in most other time periods; (2) Using the univariate linear model, correlation for hyper-spectral vegetation indices and chlorophyll content showed $r > 0.85$. The multivariate linear models of the six hyper-spectral vegetation indices listed above and chlorophyll content using two strategies, both accurately predicted chlorophyll content of *Phyllostachys violascens* [with correlation coefficients between predicted values and measured values that were all above $r = 0.89$]. The multivariate linear models can be used to predict chlorophyll content in the leaf of *Phyllostachys violascens*. Considering the calculate method, strategy B is more fit for the dynamic change of chlorophyll content for *Phyllostachys violascens* at leaf scale. [Ch, 4 fig. 2 tab. 45 ref.]

Key words: botany; *Phyllostachys violascens*; chlorophyll content; hyperspectral vegetation indices; correlation analysis; model

叶绿素在植物生长过程中起着至关重要的作用, 可为植被生长状况、病理诊断等提供科学依据, 而且生物化学信息对于研究和理解生态系统过程如光合作用、碳氮循环以及描述和模拟生态系统都十分重要^[1]。定量估测叶绿素等植被生化、生理参数, 也是植被监测的一个研究重点, 而遥感尤其是高光谱遥感技术在这方面发挥了重要的作用, 并在近年的研究中取得很大的进展^[2-7]。相对多光谱遥感而言, 高光谱数据在探测植被生物物理参数上更有效^[2,8], 其连续的光谱曲线更利于获取识别植被生长状况及反映植被生物物理参数的特征参数以及一些植被指数如红边位置、红边面积、光谱比值、归一化植被指数、叶绿素吸收比指数、三角植被指数等^[9-19]。如 Carter^[20]通过 R_{695}/R_{670} , R_{695}/R_{420} , R_{605}/R_{760} 等比值指数研究植株胁迫, 其结果表明: 从 760~800 nm 区域的任意波段的反射率都可以与 605, 695 或 710 nm 的反射率相比产生一个对胁迫敏感的指数; Zou 等^[6]等利用高光谱植被指数对黄瓜 *Cucumis sativus* 叶片的叶绿素及在叶片的分布进行了计算, 研究结果表明: 基于红边范围内的比值植被指数如 R_{710}/R_{760} , $(R_{780}-R_{710})/(R_{780}-R_{680})$, $(R_{750}-R_{705})/(R_{750}+R_{705})$ 等能很好地估算黄瓜叶绿素相对含量; Zarco-Tejada 等^[21]利用 700~750 nm 波段反射率构造的高光谱指数估算葡萄 *Vitis vinifera* 叶片叶绿素相对含量, 取得了很好的效果; Sims 等^[22]在前人的研究基础上, 对原有的简单比值指数和归一化指数进行修正, 提出了用修正型比值指数 (mSR_{705}) 和修正型归一化指数 (mND_{705}) 估算树木叶片叶绿素相对含量, 提高了指数在估算叶绿素相对含量中的稳健性; Russell 等^[23]对 73 个已有的植被指数的稳健性进行评价, 研究结果表明: 红边基础上衍生的植被指数稳健性好, 并且这些指数大多数都是基于 690~730 nm 范围内的简单比值或归一化差值。这些研究为利用统计模型、光学传输模型等方法反演冠层生物化学参数提供了众多输入参数的选择^[11,24]。竹林是中国亚热带地区的一种特殊的森林类型, 在森林生态系统平衡、全球气候变暖、固碳减排等方面有着较为重要的作用。雷竹 *Phyllostachys violascens* 作为一种优良的笋用竹种, 因出笋早, 产量高, 经济效益好, 雷竹笋用林种植面积不断增加; 另外, 竹类植物还具有生长迅速的特征, 其生长过程中生化参数的变化对评价其生长状况具有重要的生态意义^[25]。本研究将对雷竹生长过程中叶片高光谱反射率及其叶绿素连续监测, 分析雷竹叶绿素与高光谱植被指数之间的关系, 选择适合雷竹快速生长过程中一直与叶绿素具有较好相关关系的高光谱植被指数, 并建立叶绿素反演模型, 反演雷竹林叶绿素。研究结果将为雷竹林遥感实时监测及经营管理提供参考。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区域概况

研究区位于浙江省临安市 (29°56'~30°23'N, 118°51'~119°52'E)。该区属中亚热带季风气候, 温暖湿润, 雨水充沛; 年平均气温为 16.0 ℃, 年降水量 1 700.0 mm 以上。临安为全国十大“竹子之乡”之一, 也是中国雷竹集中栽植的区域, 雷竹笋是该市农民的主要经济收入之一, 且随着其经济效应的凸显, 雷竹的栽植面积也在不断扩大。临安市雷竹林主要分布于图 1 所示临安东部的 17 个乡镇^[26]。本研究将以太湖源镇通量塔周围的雷竹作为对象展开研究。

1.2 雷竹高光谱反射率数据测量

选取通量塔附近 400 m² 范围内的 20 株雷竹进行编号，作为固定观测样本，并从 2011 年 4 月初至 2011 年 7 月中旬大致间隔 1 周对 20 株样本重复采样 1 次，共测量 14 次。

高光谱反射率数据采用便携式野外光谱测量仪 (ASD) 获取，其基本指标为：光谱范围 350~2 500 nm；光谱分辨率 3.0 nm (350~1 000 nm)，10.0 nm (1 000~2 500 nm)；扫描时间 100 ms；采样间隔 1.4 nm (350~1 050 nm)，2.0 nm (1 000~2 500 nm)；波长精度 ±1 nm；标准参考板：聚四氟乙烯标准白板。该仪器配有模拟太阳光源探头，因此测量植被光谱受外部环境影响较小。每次测量之前先进行参考板测量和自动优化，测量时仪器自动获取同一叶片 10 组光谱数据。取叶片 10 片·株⁻¹ 测量其反射光谱曲线，并取平均值作为该雷竹本次测量结果。

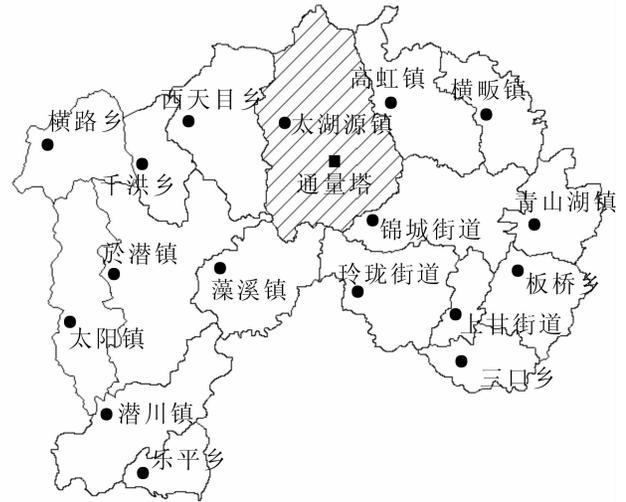


图 1 临安雷竹林主要分布乡镇及本研究位置
Figure 1 Study area and main towns full of *Phyllostachys violascens* in Lin'an City

1.3 叶绿素相对含量测定

采用 CCM-200 手持式叶绿素仪测量叶片的相对叶绿素。在光谱测量后，采用 CCM-200 在相应的叶片的基部、中部和尖部重复 3 次，取雷竹叶片 10 片·株⁻¹ 的平均值作为该株雷竹本次叶绿素的测量值。

1.4 高光谱植被指数

根据已有文献，本研究归纳了可用于植被生物物理化学参数尤其是叶绿素估算的相关指数，如表 1 所示。这些指数大致包括以下 5 种类型：①比值型植被指数(第 1 类)：这类植被指数主要依据可见光到近红外波段反射峰谷特征，采用 2 个波段的比值来反映植被理化参数及其变化，如简单比值指数 (SR) 和绿度指数 (GM) 等。②差值型植被指数(第 2 类)：主要通过 2 个或 2 个以上波段之间的减法运算，得到反映绿色植被信息的相关指标，如双重差值指数 (DD) 等。③归一化型植被指数(第 3 类)：众所周知，归一化植被指数 (NDVI) 是广泛应用于解译植被生长状况及与叶面积指数 (LAI)，绿色生物量，植被覆盖度以及光合作用有关的一个重要指数^[27]，它主要通过增加植被在近红外波段范围绿叶的散射与红色波段

表 1 可用于叶绿素相对含量估算的高光谱植被指数
Table 1 Hyperspectral vegetation indices for estimating chlorophyll content

指数类型	指数缩写	计算公式	意义或说明	参考文献
1	SR	R_{774}/R_{677}	简单比值指数	[28]
	G	R_{554}/R_{677}	绿度指数	[29]
	lic3	R_{440}/R_{740}		[28]
	SRPI	R_{430}/R_{680}	色素指数，与叶片不同受害状况相关性较好	[30]
	PSSRa	R_{800}/R_{680}	色素简化指数，与叶绿素 a 和叶绿素 b 存在指数关系	[31]
	PSSRb	R_{800}/R_{635}		
	GM	R_{750}/R_{700}	与叶绿素相对含量线性相关	[32]
	Vog3	R_{740}/R_{720}	与叶绿素 a，叶绿素 b 和总叶绿素相对含量高度相关	[33]
	Carter1	R_{695}/R_{420}	对植被胁迫比较敏感	[20]
	Carter2	R_{695}/R_{760}	对植被胁迫敏感	
	PSSR	R_{810}/R_{674}	色素简化指数	[28]
2	DD	$(R_{750}-R_{720})-(R_{700}-R_{670})$	双重差值指数	[34]
	RVSI	$(R_{714}-R_{752})/2-R_{733}$	红边植被胁迫指数	[28]
3	NDVI1	$(R_{774}-R_{677})/(R_{774}+R_{677})$	归一化植被指数	[28]
	NDVI2	$(R_{800}-R_{670})/(R_{800}+R_{670})$		[35]

表 1 (续)
Table 1 Continued

指数类型	指数缩写	计算公式	意义或说明	参考文献
	mND ₇₀₅	$(R_{750}-R_{705})/(R_{750}+R_{705}-2R_{445})$	改进的归一化比值指数	[22]
	mSR ₇₀₅	$(R_{750}-R_{445})/(R_{705}+R_{445})$		
	D ₇₁₅ /D ₇₀₅	$(R_{716}-R_{714})/(R_{706}-R_{704})$	与叶绿素 a, 叶绿素 b 和总叶绿素相对含量高度相关	[33]
	NPQI	$(R_{415}-R_{435})/(R_{415}+R_{435})$	对叶片微弱损害非常敏感, 可以用于早期的胁迫监测	[36]
	NPCI	$(R_{680}-R_{430})/(R_{680}+R_{430})$	归一化叶绿素比值指数, 随着总色素与叶绿素比值而变化变, 对植株的物候和生理状态有指示作用	[37]
	PRI1	$(R_{531}-R_{570})/(R_{531}+R_{570})$		
	PRI2	$(R_{550}-R_{531})/(R_{550}+R_{531})$	光化学植被指数, 对类胡萝卜素、叶绿素和类胡萝卜素的比值敏感	[38]
3	PRI3	$(R_{570}-R_{539})/(R_{570}+R_{539})$		
	lic2	$(R_{800}-R_{680})/(R_{800}+R_{680})$	红光最大吸收谷和近红外最大反射之间的反差进行归一化计算	[28]
	SIPI	$(R_{800}-R_{450})/(R_{800}+R_{450})$	结构不敏感色素指数, 能反映不同样本、不同条件下的胡萝卜素、叶绿素 a 与与光谱反射率的关系	[31]
	Vog1	$(R_{734}-R_{747})/(R_{715}+R_{720})$		
	Vog2	$(R_{734}-R_{747})/(R_{715}+R_{726})$	改进的归一化指数	[39]
	PSND	$(R_{810}-R_{674})/(R_{810}+R_{674})$	归一化比值叶绿素指数	[28]
	RENDVI	$(R_{780}-R_{680})/(R_{780}+R_{680})$	红边归一化植被指数	[7]
	mCAI	$\frac{R_{545}+R_{752}}{2} \times (752-545) - \sum_{R_{645}}^{R_{752}} R$	叶绿素吸收积分	[40]
	CARI	$C_{AR} \times \frac{1}{R_{670}}$, 其中: $C_{AR} = \frac{ \alpha \times 670 + R_{670} + \beta }{\sqrt{\alpha^2 + 1}}$, $\alpha = (R_{700} - R_{550}) / 150$, $\beta = R_{550} - 550\alpha$	叶绿素吸收比值指数: C_{AR} 表示 670 nm 到以绿峰反射峰(550 nm)和 700 nm 构成的基线间的距离	[10]
	MCARI	$[(R_{700}-R_{670})-0.2(R_{700}-R_{550})] \frac{R_{700}}{R_{670}}$	改进叶绿素吸收比值指数	[41]
4	TCARI	$3 \times [(R_{700}-R_{670})-0.2(R_{670}-R_{700}) \frac{R_{700}}{R_{670}}]$	转换叶绿素吸收反射指数, 在 CARI 的基础上降低背景影响	[42]
	I_{TCARI}/I_{OSAVI}	TCARI 与 OSAVI 的比值。 其中 I_{OSAVI} 为优化土壤调节植被指数 $I_{OSAVI} = 1.16 \times \frac{R_{800}-R_{670}}{R_{800}+R_{670}+0.16}$	降低了指数对叶面积指数和背景因素的敏感性	
	I_{MCARI}/I_{OSAVI}	MCARI 与 OSAVI 的比值		[41]
	TVI	$0.5 \times [120 \times (R_{750}-R_{300}) - 200 \times (R_{670}-R_{550})]$	三角形植被指数。绿、红、近红外波段构成的三角形区域的总面积随叶绿素吸收和近红外反射率增加而增加	[10]
	REP	$700 + 40 \times (R_{redge} - R_{700}) / (R_{740} - R_{700})$ 其中: $R_{redge} = (R_{670} + R_{780}) / 2$	红边位置	[43]
	HG	$1 - \frac{R_{300} + \frac{R_{670}-R_{500}}{\lambda_{670}-\lambda_{500}} (\lambda_{560}-\lambda_{500})}{R_{560}}$	绿峰反射高度	[16]
5	HR	$1 - \frac{R_{670}}{R_{560} + \frac{R_{760}-R_{560}}{\lambda_{760}-\lambda_{560}} (\lambda_{670}-\lambda_{560})}$	红谷吸收深度	
	AR	$\sum_{i=450}^{680} R_i$	450~680 nm 反射率下覆盖的面积	[35]
	AD	$\sum_{i=680}^{760} D_i$	红边光谱导数的面积	

说明: R_i 表示某波长处的反射率, D_i 表示某波长处反射率的导数。

范围叶绿素吸收的差异, 达到解释植被相关信息的目的。这类植被多是对传统归一化植被指数进行改进或根据具体的研究目标而重新构造, 如修正型归一化植被指数(mND₇₀₅), 修正型比值植被指数(mSR₇₀₅)和红边归一化植被指数(RENDVI)等。④叶绿素吸收比型植被指数(第 4 类): 植被在 550 nm 附近的绿峰和 670 nm 附近的红色吸收谷主要反映植被叶绿素的反射和吸收特征。因此, 这类植被指数多利用这 2 个波段的特征来反映叶绿素的变化, 如叶绿素吸收比值指数(CARI)和三角植被指数(TVI)等。⑤反映植被反射光谱峰谷特征指数(第 5 类): 如红边位置、绿峰高度等常用于叶绿素的估算。

1.5 叶绿素相对含量与植被指数的关系及其反演模型构建

对每次测量的 20 株样竹数据, 分别计算表 1 所示各种高光谱植被指数, 并分析它们与样竹叶绿素之间的 Pearson 相关系数(R)。对某次观测, 某植被指数与叶绿素的相关系数采用(1)式计算。

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (u_i - \bar{u})(v_i - \bar{v})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (u_i - \bar{u})^2 \sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2}} \quad (1)$$

式(1)中: u_i 表示第 i 株样竹的相对叶绿素, v_i 为第 i 株样竹植被指数, \bar{u} 和 \bar{v} 分别是相对叶绿素和植被指数的平均值, n 为样竹总数。

以光谱反射率对叶绿素的敏感性作为分析叶绿素与植被指数相关关系的辅助指标。敏感性主要基于实测雷竹叶片光谱数据, 并利用 PROSPECT 辐射传输模型模拟不同叶绿素水平下雷竹叶片光谱反射率曲线^[44]。以 x_0 为参考点, 定量分析的敏感度(s)定义如下:

$$s = \sum_{j=1}^n (\rho_{x_0}^{(j)} - \rho_{x_0 + \Delta x}^{(j)})^2 / \rho_{x_0}^{(i)} \quad (2)$$

式(2)中: x_0 为模型参数, Δx 为参数的步长; $\rho_{x_0}^{(j)}$ 为模型某个参数下的原始叶片反射率; $\rho_{x_0 + \Delta x}^{(j)}$ 为模型参数 x_0 增加步长值 Δx 后模拟的叶片反射率值; n 为模型参数增加步长的次数; s 为灵敏度。

在相关性分析的基础上, 选择在不同观测时间均与叶绿素有较好相关关系的植被指数, 建立雷竹叶绿素反演模型并对结果进行评价。

2 结果分析

2.1 植被指数与叶绿素相对含量相关性

表 2 为 2011 年不同测量时期各指数与雷竹叶绿素之间的相关系数(R)分布。一般认为, 相关系数大于 0.6, 说明 2 个变量之间具有较好的相关性, 因此, 表 2 中叶绿素与植被指数之间的相关关系小于 0.6 的均以空白表示。分析表 2 发现: 第 2 类植被指数中的绿度指数(GM)和红边指数(Vog3), 第 2 类植被指数中的双重差值指数数(DD), 第 3 类植被指数中的修正型归一化指数(mND₇₀₅)和修正型比值指数(mSR₇₀₅)以及第 5 类指数中的红边拐点指数(REP)等 6 个植被指数在所有 14 次观测时间里, 均与雷竹叶绿素有较好的相关关系, 相关系数为 0.64~0.97。

分析表 1 这 6 个植被指数发现: 除红边指数(Vog3)外, 它们均利用 750 nm 和 700 nm 附近的反射率, 而修正型归一化指数(mND₇₀₅)和修正型比值指数 mSR₇₀₅ 增加了 445 nm 处的反射率。750 nm 处于近红外反射肩, 反射率高, 主要是由叶片散射属性引起的, 不同生长阶段叶片叶绿素变化对该区域反射率影响较小^[40]。雷竹反射率对叶绿素的敏感性分析也表明(图 2), 在 750 nm 以后, 雷竹反射率对叶绿素的敏感性几乎为 0; 700 nm 附近处于反射率对叶绿素的高度敏感区域, 而且在红光吸收谷以及红边位置附近, 反射率较低(图 2)。因此, 通过 750 nm 与 700 nm 反射率的比值或差分运算所得到的植被指数如绿度指数(GM), 双重差值指数(DD), 修正型归一化指数(mND₇₀₅)和修正型比值指数(mSR₇₀₅)等, 增强了对叶绿素的解译能力, 从而能够直观的反映出叶绿素的变化。

修正型归一化指数(mND₇₀₅)与修正型比值指数(mSR₇₀₅)是在传统归一化指数(NDVI)和简单化指数(SR)指数的基础上, 增加了对叶绿素敏感度较高的 705 nm 处的反射率, 并结合 445 nm 处的叶绿素吸收特征, 以及 750 nm 近红外强反射而发展的一个植被指数^[45,22]。Sims 等^[22]研究发现: 705 nm 处的反射率与植被叶绿素之间具有较好的相关关系, 而 445 nm 处因类胡萝卜素的吸收, 其反射率比 680 nm 处更

表2 2011年不同测量日期叶绿素与植被指数相关性

Table 2 Correlations between chlorophyll content and hyper-spectral vegetation indices in 2011

指数类型	指数缩写	不同日期(月-日)的相关系数													
		04-05	04-12	04-21	04-29	05-08	05-15	05-21	05-29	06-08	06-17	06-25	07-02	07-11	07-18
1	SR					0.63								0.79	0.73
	G			0.64	0.77		0.74	0.61							0.64
	lic3													0.65	
	SRPI			0.84				0.79	0.61		0.66				0.84
	PSSRa					0.75					0.71			0.82	0.82
	PSSRb					0.81					0.68			0.85	0.80
	GM	0.67	0.77	0.94	0.87	0.96	0.65	0.92	0.84	0.70	0.82	0.85	0.64	0.92	0.96
	Vog3	0.73	0.77	0.97	0.87	0.94	0.69	0.91	0.85	0.71	0.79	0.87	0.66	0.92	0.95
	Carter1			0.90	0.71	0.67	0.71	0.72			0.69			0.74	0.92
	Carter2	0.61	0.76	0.92	0.86	0.96		0.88	0.82	0.70	0.84		0.64	0.91	0.95
PSSR													0.73	0.68	
2	DD	0.69	0.78	0.95	0.89	0.91	0.82	0.79	0.79	0.67	0.74	0.79	0.76	0.92	0.95
	RVSI													0.70	
	NDVI1													0.78	0.71
	NDVI2													0.71	
	mND705	0.70	0.76	0.97	0.88	0.91	0.82	0.90	0.87	0.72	0.81	0.82	0.71	0.91	0.96
	mSR705	0.71	0.77	0.97	0.88	0.91	0.82	0.92	0.87	0.71	0.81	0.82	0.71	0.91	0.96
	D715/D705			0.90	0.75	0.77	0.62	0.87	0.66		0.64	0.86		0.93	0.94
	NPQI														0.62
	NPCI			0.83				0.77	0.61		0.66				0.84
	PRI1					0.65								0.63	0.77
3	PRI2			0.79											0.82
	PRI3													0.64	0.75
	lic2					0.74				0.71				0.82	0.81
	SIPI													0.75	
	Vog1	0.80	0.83	0.99	0.92	0.96	0.70	0.87	0.84			0.79		0.91	0.93
	Vog2		0.84	0.92	0.71	0.81		0.66					0.61	0.70	0.77
	PSND													0.73	0.64
	RENDVI					0.66					0.70			0.80	0.81
	mCAI														0.66
	CARI		0.71	0.86	0.63	0.84		0.73	0.82	0.67	0.70	0.81	0.81	0.89	0.89
4	MCARI			0.73	0.79		0.73	0.61						0.77	0.86
	TCARI			0.66	0.75	0.73	0.75	0.64						0.84	0.88
	TCARI/OSAVI		0.69	0.87	0.81	0.83	0.81	0.70			0.62		0.62	0.89	0.92
	MCARI/OSAVI			0.80	0.79	0.76	0.77	0.65						0.85	0.89
	REP	0.76	0.79	0.96	0.89	0.93	0.81	0.82	0.85	0.73	0.77	0.81	0.75	0.90	0.94
5	HG			0.76	0.75	0.70	0.73	0.71						0.65	0.79
	HR													0.64	
	AR			0.72		0.85		0.71	0.78	0.77	0.74	0.71		0.88	0.78
	AD													0.73	

低且稳定(尽管图2表明680 nm处于叶绿素高敏感区),因此该处反射率可以作为比较可靠的参考基准,改进后的植被指数能消弱光谱散射及吸收的不稳定性对叶绿素估算的影响,从而得到了理想的结果。这可能就是归一化植被指数(NDVI1, NDVI2)以及红边归一化植被指数(REDEDVI)等3个常用的植被指数

与叶绿素之间的相关性都比较差(个别日期除外), 而修正型归一化指数(mND_{705})与修正型比值指数(mSR_{705})指数在所有的观测时间里均与叶绿素具有较好的相关性的原因。这也从另一个侧面印证了 Sims 等^[22]的研究结果。

红边拐点指数(REP)随叶绿素相对含量、叶面积指数、生物量、年龄、植被的健康程度、季节而变化, 即当植被健康并有高的叶绿素相对含量时, 红边位置将会往长波方向移动, 当遭受病虫害或得萎黄病时, 红边位置将向短波方向移动^[1]。本研究选择健康的雷竹样本, 且各样本在整个观测期生长良好, 因此雷竹叶绿素红边拐点指数(REP)与叶绿素具有较好的相关关系就不言而喻。

2.2 雷竹叶绿素动态反演模型

2.2.1 一元线性模型 如上所述, 在整个观测期绿度指数(GM), 红边指数($Vog3$), 双重差值指数(DD), 修正型归一化指数(mND_{705}), 修正型比值指数(mSR_{705})和红边拐点指数(REP)与雷竹叶绿素有较好的相关性, 因此, 选用这 6 个植被指数反演雷竹叶绿素及其动态变化。既然这 6 个指数在不同时期均与雷竹叶绿素具有较好的关系, 为减少不同时期不同指数均单独计算的麻烦, 我们用每株雷竹 14 次观测的平均值构建相应的模型反演叶绿素。图 3 是平均叶绿素相对含量(RCC)与 6 个植被指数之间的关系模型。由图 3 可见, 它们的相关系数均在 0.85 以上, 在 0.01 显著水平上线性关系线性极为显著。因此, 对于上述 6 个植被指数, 用多次观测的平均值反演雷竹叶绿素及其动态变化是可行的。

2.2.2 多元线性模型 方案一: 以 20 株雷竹为样本, 14 次观测的平均叶绿素和 6 个植被指数为样本值, 建立多元线性模型 A; 方案二, 以 14 次观测为样本, 每次观测的 20 株样竹平均叶绿素和植被指数为样本值, 建立多元线性模型 B。式(3)和式(4)分别是 2 个方案所建立的估算雷竹叶绿素的多元线性模型:

$$A=1\ 152.688\ 9+1.150\ 4I_{GM}+56.340\ 9I_{Vog3}+87.884\ 4I_{DD}+98.277\ 5I_{mND705}-10.939\ 2I_{mSR705}-1.717\ 9I_{REP}; \quad (3)$$

$$A=-544\ 6.818\ 1-2.570\ 5I_{GM}-77.046\ 2I_{Vog3}-299.430\ 6I_{DD}-903.143\ 9I_{mND705}+152.362\ 3I_{mSR705}+7.821\ 79I_{REP}。 \quad (4)$$

图 4 是模型预测叶绿素与实测叶绿素之间的相关关系。由图 4 可见: 2 个方案所建立的模型叶绿素反演精度都比较高, 但相比较而言, 方案一模型雷竹叶绿素相对含量反演精度高于方案二, 相关系数 R 达到 0.978 6, 均方根误差也较小为 0.244 5, 仅为方案二的一半左右。但方案一将样本的时间变化进行了平均, 因此, 方案一模型 A 主要反映样本之间的差异; 相比之下, 方案二对样本进行平均, 以不同时间的观测值作为样本, 体现了时间动态变化, 符合雷竹快速生长的特点, 因此, 模型 B 的反演结果能更好地刻画雷竹叶绿素的动态变化。

3 讨论与结论

3.1 讨论

研究表明: 绿度指数(GM), 红边指数($Vog3$), 双重差值指数(DD), 修正的归一化指数(mND_{705}), 修正的比值指数(mSR_{705})和红边拐点指数(REP)在整个观测期均与雷竹的相对叶绿素具有较好的相关关系。除以上 6 个植被指数外, 其他植被指数在部分时间或时间段与叶绿素具有较好的相关关系, 而且在观测后期的 7 月 11 日和 7 月 18 日, 几乎所有植被指数均与叶绿素相关关系良好。出现这种情况可能有 2 个方面的原因: 一方面可能与该植被指数的特征有关, 如第 1 类植被中的 Carter1 和 Carter2 对植被缺水、干燥的环境、衰老等胁迫因子敏感^[20], 当植被受到胁迫时, 植被叶绿素减少, 而光谱反射率的吸收谷如 Carter1 和 Carter2 指数中的 695 nm 处反射率增加, 在对雷竹不同观测样本及不同观察时间, 可能受到的胁迫因子不同而使得某些时间(如 4 月 5 日、5 月 29 日、6 月 25 日等)的指数与叶绿素之间关系

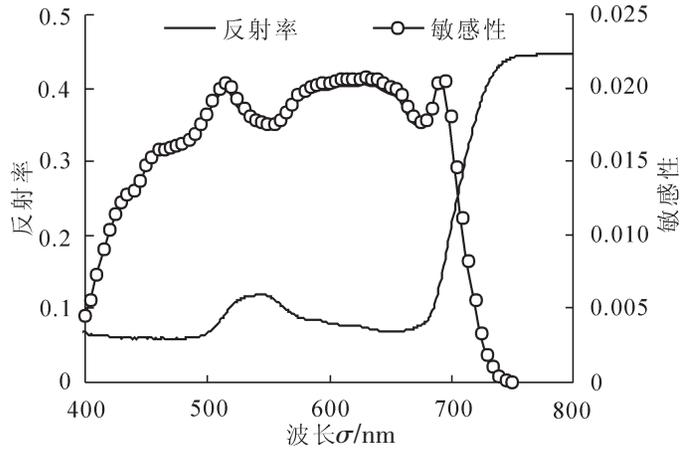


图 2 雷竹叶片反射率光谱曲线及反射率对叶绿素的敏感性分析

Figure 2 Leaf reflectance of *Phyllostachys violascens* and sensitivity of reflectance to chlorophyll contents

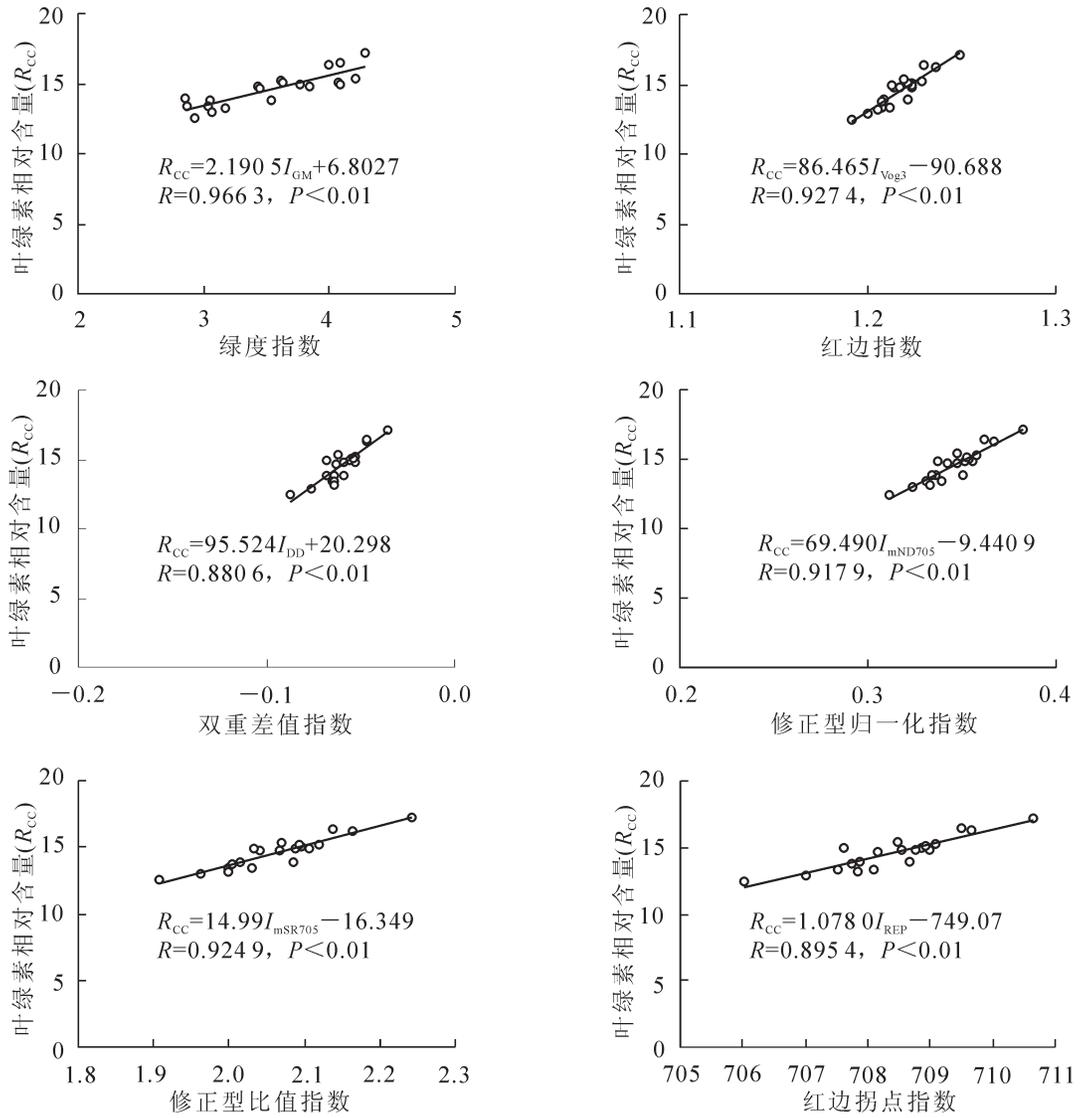


图3 基于所选择6个植被指数的一元线性模型

Figure 3 Univariate linear models between hyper-spectral vegetation indices and six chlorophyll contents

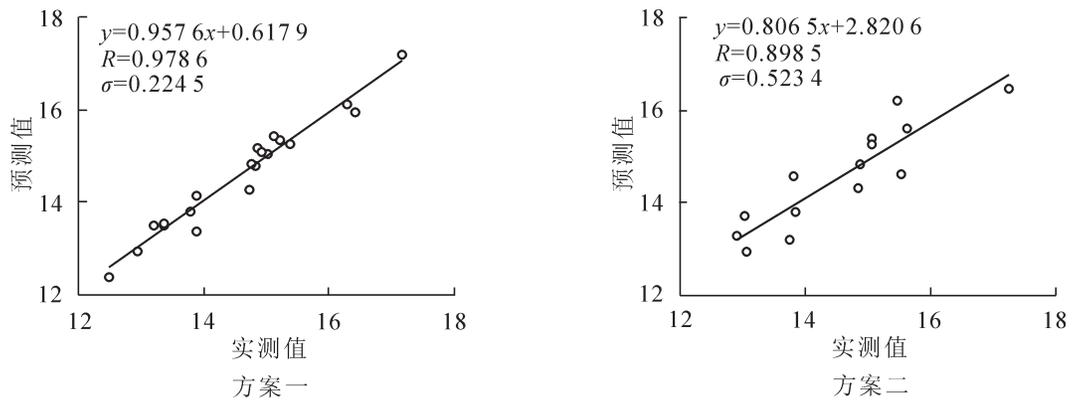


图4 多元线性模型预测叶绿素与实测叶绿素之间的相关关系

Figure 4 Relationships between predicted and measured chlorophyll content using multivariate linear models

不理想。第3类指数中的叶绿素吸收比值指数(CARI)主要利用670 nm处红光的叶绿素吸收特征来反映叶绿素的变化,除4月5日和5月15日外,该指数与雷竹叶绿素都具有较好的相关性,但如前Sims等^[22]研究所述,红光吸收区没有445 nm蓝光吸收区稳定,这可能是导致该指数与叶绿素之间的关系不稳定的原因,而改进型指数MCARI对叶面积指数变化的敏感性高于叶绿素^[41],因而与叶绿素之间的关系更

不理想。其他几个转换性指数如 TCARI 和 TCARI/OSAVI 等, 主要为了降低叶面积指数或背景影响, 其与雷竹叶绿素的关系整体上没有得到改善。另一方面, 竹笋生长迅速, 在内外环境相同的情况下, 母竹及其鞭根系统为其快速生长提供重要养分来源, 到后期, 竹笋展枝放叶, 自我光合提供养分, 母竹和新竹处于动态平衡状态, 林分趋于稳定。雷竹的这种生长特点可能解释了从 4 月 5 日到 7 月 18 日, 植被指数与叶绿素的关系处于动态变化的实际情况(表 2)。而这种母竹和新竹的动态平衡状态可能是后期植被指数与叶绿素关系均比较好的原因。

通过研究, 选择了适用于雷竹叶绿素反演的高光谱植被指数, 为卫星遥感数据反演叶绿素奠定了基础, 但研究是基于叶片尺度的光谱反射率数据进行分析, 因此在卫星遥感反演时, 需要考虑叶片和冠层(像元)之间的尺度差异, 而将叶片尺度反射率通过辐射传输模型转换到冠层尺度是解决该问题的重要途径之一。我们也将进一步开展相关研究。

3.2 结论

在雷竹快速生长过程中, 通过对固定样竹相对叶绿素及反射光谱进行连续观测, 构建了雷竹叶绿素动态估算反演模型。研究表明: ①绿度指数(GM), 红边指数(Vog3), 双重差值指数(DD), 修正型归一化指数(mND₇₀₅), 修正型比值指数(mSR₇₀₅)和红边拐点指数(REP)等 6 个高光谱植被指数在整个生长过程均与雷竹叶绿素有较好的相关关系, 这几个植被指数包括广泛应用于反映植被生长状况的特征参数如红边拐点批数(REP), 也有根据植被反射光谱对叶绿素的色素的吸收以及光谱的强反射等特征进行构建或改进的如修正型归一化指数(mND₇₀₅)和修正型比值指数(mSR₇₀₅)。本研究进一步表明这些植被指数也适用于雷竹快速生长过程中叶绿素的反演。②采用以上 6 个植被指数所建立的一元线性模型的相关系数均在 0.85 以上, 而 2 种方案建立的多元线性模型也具有较好的预测能力, 预测与实测叶绿素之间的相关系数均在 0.89 以上。

4 参考文献

- [1] 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 Huaqiang, GE Hongli, FAN Wenyi, *et al.* Study on relationship between total chlorophyll with hyperspectral features for leaves of *Pinus massoniana* [J]. *Spectrosc Spectr Anal*, 2009, **29**(11): 3033 - 3037.
- [2] 浦瑞良, 宫鹏. 高光谱遥感及其应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- [3] ZARCO-TEJADA P J, MILLER J R, MORALES A, *et al.* Hyperspectral indices and model simulation for chlorophyll estimation in open-canopy tree crops [J]. *Remote Sens Environ*, 2004, **90**(4): 463 - 476.
- [4] 牛铮, 王长耀. 碳循环遥感基础与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [5] BLACKBURN G A, FERWERDA J G. Retrieval of chlorophyll concentration from leaf reflectance spectra using wavelet analysis [J]. *Remote Sens Environ*, 2008, **112**(4): 1614 - 1632.
- [6] ZOU Xiaobo, SHI Jiyong, HAO Limin, *et al.* In vivo noninvasive detection of chlorophyll distribution in cucumber (*Cucumis sativus*) leaves by indices based on hyperspectral imaging [J]. *Anal Chim Acta*, 2011, **706**(1): 105 - 112.
- [7] 李明泽, 赵晓红, 卢伟, 等. 基于机载高光谱影像的植被冠层叶绿素反演[J]. 应用生态学报, 2013, **24**(1): 177 - 182.
LI Mingze, ZHAO Xiaohong, LU Wei, *et al.* Inversion of vegetation canopy's chlorophyll content based on airborne hyperspectral image [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2013, **24**(1): 177 - 182.
- [8] PU Ruiliang, GONG Peng, BIGING G S, *et al.* Extraction of red edge optical parameters from Hyperion data for estimation of forest leaf area index [J]. *IEEE Trans Geosc Remote Sens*, 2003, **41**(4): 916 - 921.
- [9] MERTON R N. Monitoring community hysteresis using spectral shift analysis and the red-edge vegetation stress index [C]//NASA. *Proceedings of the Seventh Annual JPL Airborne Earth Science Workshop*. Pasadena: Jet Propulsion Laboratory, 1998: 12 - 16.
- [10] BROGE N H, LEBLANC E. Comparing prediction power and stability of broadband and hyper spectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density [J]. *Remote Sens Environ*, 2000, **76**(2): 156 - 172.
- [11] 张金恒, 王珂, 王人潮, 等. 高光谱评价植被叶绿素含量的研究进展[J]. 上海交通大学学报: 农业科学版,

- 2003, **21**(1): 74 – 79.
- ZHANG Jinheng, WANG Ke, WANG Renchao, *et al.* Study on hyperspectral remote sensing in estimate vegetation leaf chlorophyll content [J]. *J Shanghai Jiaotong Univ Agric Sci*, 2003, **21**(1): 74 – 79.
- [12] 黄文江, 王纪华, 刘良云, 等. 冬小麦红边参数变化规律及其营养诊断[J]. 遥感技术与应用, 2003, **18**(4): 206 – 211.
- HUANG Wenjiang, WANG Jihua, LIU Liangyun, *et al.* The red edge parameters diersification disciplinarian and its application for nutrition diagnosis [J]. *Remote Sens Technol Appl*, 2003, **18**(4): 206 – 211.
- [13] HABOUDANE D, MILLER J R, PATTEY E, *et al.* Hyperspectral vegetation Indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture [J]. *Remote Sens Environ*, 2004, **90**(3): 337 – 352.
- [14] 张风丽, 尹球, 匡定波, 等. 环青海湖地区天然草地时序光谱特征参量分析[J]. 生态学报, 2005, **25**(12): 3155 – 3160.
- ZHANG Fengli, YIN Qiu, KUANG Dingbo, *et al.* Analysis of time series spectrum feature parameters derired form-dominant natural grassland in the region around Qinghai Lake [J]. *Acta Ecol Sin*, 2005, **25**(12): 3155 – 3160.
- [15] 黄敬峰, 王渊, 王福民, 等. 油菜红边特征及其叶面积指数的高光谱估算模型[J]. 农业工程学报, 2006, **22**(8): 22 – 26.
- HUANG Jingfeng, WANG Yuan, WANG Fumin, *et al.* Red edge characteristics and leaf area index on estimation model using hyperspercetral data for rape [J]. *Transac Chin Soc Agric Eng*, 2006, **22**(8): 22 – 26.
- [16] 吴彤, 倪绍祥, 李云梅, 等. 基于地面高光谱数据的东亚飞蝗危害程度监测[J]. 遥感学报, 2007, **11**(1): 103 – 108.
- WU Tong, NI Shaoxiang, LI Yunmei, *et al.* Monitoring of the damage intensity extent by oriental migratory locust using of hyperspectra data measured of ground surface [J]. *Remote Sens*, 2007, **11**(1): 103 – 108.
- [17] 代辉, 胡春胜, 程一松. 冬小麦冠层光谱红边特征分析[J]. 中国生态农业学报, 2007, **15**(5): 80 – 83.
- DAI Hui, HU Chunsheng, CHENG Yisong. Red-edge characteristics of winter wheat canopy spectra [J]. *Chin J Eco-Agric*, 2007, **15**(5): 80 – 83.
- [18] 蒋金豹, 陈云浩, 黄文江. 用高光谱微分指数监测冬小麦病害的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2007, **27**(12): 2475 – 2479.
- JIANG Jinbao, CHEN Yunhao, HUANG Wenjiang. Using hyperspectral diverivative index to monitor wheat disease [J]. *Spectrosc Spectr Anal*, 2007, **27**(12): 2475 – 2479.
- [19] 李向阳, 刘国顺, 史舟, 等. 利用室内光谱红边参数估测烤烟叶片成熟度[J]. 遥感学报, 2007, **11**(2): 269 – 275.
- LI Xiangyang, LIU Guoshun, SHI Zhou, *et al.* Predicting leaf maturity of flue-cured tobacco using red edge characteristics of laboratory spectrometry [J]. *J Remote Sens*, 2007, **11**(2): 269 – 275.
- [20] CARTER G A. Ratios of leaf reflectances in narrow wavebands as indicators of plant stress [J]. *Int J Remote Sens*, 1994, **15**(3): 697 – 703.
- [21] ZARCO-TEJADA P J, BERJÓN B A, LÓPEZ-LOZANO R, *et al.* Assessing vineyard condition with hyper spectral indices: Leaf and canopy reflectance simulation in a row-structured discontinuous canopy [J]. *Remote Sens Environ*, 2005, **99**(3): 271 – 287.
- [22] 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 [J]. *Remote Sens Environ*, 2002, **81**(2): 337 – 354.
- [23] MAIN R, CHO M A, MATHIEU R, *et al.* An investigation into robust spectral indices for leaf chlorophyll estimation [J]. *ISPRS J Photogramm Remote Sens*, 2011, **66**(6): 751 – 761.
- [24] 谭昌伟, 王纪华, 郭文善. 利用遥感红边参数估算夏玉米农学参数的可行性分析[J]. 福建农林大学学报: 自然科学版, 2006, **35**(2): 123 – 128.
- TAN Changwei, WANG Jihua, GUO Wenshan. Agronomy parameters of summer maize diagnosed by red edge parameters obtainable form remotely sensing data [J]. *J Fujian Agric For Univ Nat Sci*, 2006, **35**(2): 123 – 128.
- [25] 陆国富. 毛竹林冠层参数动态变化及高光谱遥感反演研究[D]. 临安: 浙江农林大学, 2012.
- LU Guofu. *Dynamic Change of Moso Bamboo Forest Canopy Parameters and Its Retrieval Based on Hyperspectral Remote Sensing* [D]. Lin'an: Zhejiang A & F University, 2012.

- [26] 董德进, 周国模, 杜华强, 等. 6 种地形校正方法对雷竹林地上生物量遥感估算的影响[J]. 林业科学, 2011, **47**(12): 1 – 8.
DONG Dejin, ZHOU Guomo, DU Huaqiang, *et al.* Effect of topographic correction with 6 correction modes on *Phyllostachys praecox* forest aboveground biomass estimation [J]. *Sci Silv Sin*, 2011, **47**(12): 1 – 8.
- [27] 赵英时. 遥感应用分析原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [28] ZARCO-TEJADA P J, MILLER J R, MOHAMMED G H, *et al.* Canopy optical indices from infinite reflectance and canopy reflectance models for forest condition monitoring: applications to hyperspectral CASI data [C]// *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Hamburg: IEEE 1999 International, GARSS 1999 Proceedings, 1999: 1878 – 1881.
- [29] SMITH R C G, ADAMS J, STEPHENS D J, *et al.* Forecasting wheat yield in a mediterranean-type environment from the NOAA satellite [J]. *Crop Pasture Sci*, 1995, **46**(1): 113 – 125.
- [30] PENUELAS J, BARET F, FILELLA I. Semi-empirical indices to assess carotenoids /chlorophyll a ratio from leaf spectral reflectance [J]. *Photosynthetica*, 1995, **31**(2): 221 – 230.
- [31] BLACKBURN G A. Quantifying chlorophylls and carotenoids at leaf and canopy scales: an evaluation of some hyperspectral approaches [J]. *Remote Sens Environ*, 1998, **66**(3): 273 – 285.
- [32] GITELSON A A, MERZYLAC M N. Remote estimation of chlorophyll content in higher plant leaves [J]. *Int J Remote Sens*, 1997, **18**(12): 2691 – 2697.
- [33] VOGELMAN J E, ROCK B N, MOSS D M. Red edge spectral measurements from sugar maple leaves [J]. *Int J Remote Sens*, 1993, **14**(8): 1563 – 1575.
- [34] Le MAIRE G, FRANCOIS C, DUFRENE E. Towards universal broad leaf chlorophyll indices using PROSPECT simulated database and hyperspectral reflectance measurements [J]. *Remote Sens Environ*, 2004, **89**(1): 1 – 28.
- [35] ROUSE J W, HAAS R H, SCHELL J A, *et al.* Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS [C]// NASA. *Third Earth Resource Technology Satellite (ERTS) Symposium*. Washington D C: NASA, Third Earth Resource Technology Satellite (ERTS) Symposium, 1974: 148 – 162.
- [36] BARNES J D, BALAGUER L, MANRIQUE E, *et al.* A reappraisal of the use of DMSO for the extraction and determination of chlorophylls a and b in lichens and higher plants [J]. *Environ Exp Bot*, 1992, **32**(2): 85 – 100.
- [37] FILELLA I, PENUELAS J. The red edge position and shape as indicators of plant chlorophyll content, biomass and hydric status [J]. *Int J Remote Sens*, 1994, **15**(7): 1459 – 1470.
- [38] GAMON J A, PENUELAS J, FIELD C B. A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency [J]. *Remote Sens Environ*, 1992, **41**(1): 35 – 44.
- [39] ZARCO-TEJADA P J, MILLER, J R, NOLAND T L, *et al.* Scaling up and model inversion methods with narrow-band optical indices for chlorophyll content estimation in closed forest canopies with hyperspectral data [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2001, **39**(7): 1491 – 1501.
- [40] RAINER L, GEORG B, REINER D. *Analysis of Hyperspectral Field Data for Detection of Sugar Beet Diseases* [R]. Debrecen: Proceedings of the EFITA Conference, 2003: 375 – 381.
- [41] DAUGHTRY C S T, WALTHALL C L, KIM M S. *et al.* Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance [J]. *Remote Sens Environ*, 2000, **74**(2): 229 – 239.
- [42] HABOUDANE D, MILLER J R, TREMBLAY N, *et al.* Integrating narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture [J]. *Remote Sens Environ*, 2002, **81**(2): 416 – 426.
- [43] MILLER J R, HARE E W, WU J. Quantitative characterization of the vegetation red edge reflectance [J]. *Int J Remote Sens*, 1990, **11**(10): 1755 – 1773.
- [44] 谷成燕, 杜华强, 周国模, 等. 基于 PROSAIL 辐射传输模型的毛竹林叶面积指数遥感反演[J]. 应用生态学报, 2013, **24**(8): 2248 – 2256.
GU Chengyan, DU Huaqiang, ZHOU Guomo, *et al.* Retrieval of leaf area index of moso forest with Landsat Thematic Mapper image based on PROSAIL canopy radiative transfer model [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2013, **24**(8): 2248 – 2256.
- [45] GITELSON A, MERZYLAC M N. Spectral reflectance changes associate with autumn senescence of *Aesculus hippocastanum* L. and *Acer platanoides* L. leaves: spectral features and relation to chlorophyll estimation [J]. *J Plant Physiol*, 1994, **143**(3): 286 – 292.