

DOI:10.11913/PSJ.2095-0837.2017.50699

曾琪, 余坤勇, 姚雄, 郑文英, 张今朝, 艾婧文, 刘健. 基于 PROSAIL 辐射传输模型的毛竹林分冠层反射率模拟研究[J]. 植物科学学报, 2017, 35(5): 699-707

Zeng Q, Yu KY, Yao X, Zheng WY, Zhang JZ, Ai JW, Liu J. Research on canopy reflectance modeling of *Phyllostachys pubescens* forest based on the PROSAIL canopy radiative transfer model[J]. *Plant Science Journal*, 2017, 35(5): 699-707

基于 PROSAIL 辐射传输模型的毛竹林分冠层反射率模拟研究

曾琪^{1,2}, 余坤勇^{1,2}, 姚雄^{1,2}, 郑文英^{1,2}, 张今朝^{1,2}, 艾婧文¹, 刘健^{1,2*}

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

摘要: 冠层光谱反射率直接关系到毛竹 (*Phyllostachys pubescens* Mazel) 林冠层参数的反演, 对毛竹林地土壤肥力间接估测具有重要意义。以 PROSPECT5、PROSAIL 模型为基础, 从叶片尺度和冠层尺度分析模型参数对叶片和冠层反射率的影响, 构建毛竹林冠层叶面积指数 (LAI)-冠层反射率查找表并通过代价函数选取最优冠层反射率, 从而实现毛竹林分冠层反射率的准确模拟。结果表明, 在叶片尺度, PROSPECT 模型参数敏感性从高到低依次为叶肉结构参数 (N) > 叶绿素含量 (C_{ab}) > 等效水厚度 (EWT) > 干物质含量 (C_m) > 类胡萝卜素含量 (C_{ar}); 在冠层尺度, PROSAIL 模型参数敏感性从高到低依次为 $LAI > C_{ab} > EWT > C_m > N > C_{ar} > ALA$ (平均叶倾角); 叶片尺度反射率整体大于冠层尺度反射率; 在 400~900 nm 波长范围内, PROSAIL 模型模拟的冠层光谱反射率与实测光谱反射率拟合效果较好, 相对误差为 6.71%。

关键词: 毛竹; PROSAIL 模型; 尺度效应; 冠层反射率

中图分类号: Q948

文献标识码: A

文章编号: 2095-0837(2017)05-0699-09

Research on canopy reflectance modeling of *Phyllostachys pubescens* forest based on the PROSAIL canopy radiative transfer model

Zeng Qi^{1,2}, Yu Kun-Yong^{1,2}, Yao Xiong^{1,2}, Zheng Wen-Ying^{1,2}, Zhang Jin-Zhao^{1,2},
Ai Jing-Wen¹, Liu Jian^{1,2*}

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

Abstract: Canopy spectral reflectance is directly related to inversion of *Phyllostachys pubescens* Mazel canopy parameters, which is of great significance in the indirect estimation of *P. pubescens* forest soil fertility. The effects of model parameters on leaf and canopy reflectance at the leaf and canopy scales were analyzed based on PROSPECT and PROSAIL models. PROSAIL canopy radiative transfer was used to establish the leaf area index (LAI) and a canopy reflectance lookup table for *P. pubescens* forest, with optimum canopy reflectance then determined by the cost function to achieve accurate simulation of *P. pubescens* forest canopy reflectance. Results showed that at the leaf scale, the sensitivity of the input parameters in the PROSPECT model decreased in the order of leaf structure parameters (N) > chlorophyll content (C_{ab}) > equivalent water thickness (EWT) > dry matter content (C_m) > carotenoid content (C_{ar}). At the canopy scale, the sensitivity of the input

收稿日期: 2017-03-31, 退修日期: 2017-05-02。

基金项目: 福建省科技计划项目 (2016N003); 国家自然科学基金资助项目 (41401385); 福建省高校产学研合作项目 (2015N5010)。

This work was supported by grants from the Science and Technology Plan Project of Fujian (2016N003), National Natural Science Foundation of China (41401385), and University Research Cooperation Project of Fujian (2015N5010).

作者简介: 曾琪 (1991-), 女, 硕士研究生, 研究方向为 3S 技术应用及资源监测 (E-mail: 976426265@qq.com)。

* 通讯作者 (Author for correspondence. E-mail: fjliujian@126.com)。

parameters in the PROSAIL model decreased in the order of $LAI > C_{ab} > EWT > C_m > N > C_{ar} > ALA$ (average leaf angle). Leaf reflectance was greater than canopy reflectance. In the 400 to 900 wavelength range, canopy spectral reflectance of the PROSAIL model exhibited better fitting than the measured reflectance, with a relative error of 6.71%.

Key words: *Phyllostachys pubescens*; PROSAIL model; Spectral scale effect; Canopy reflectance

高光谱反射率以其光谱分辨率高、光谱信息量大等特点和优势，对植被的生长变化具有高度的敏感性^[1, 2]，常被用作反演植被生化参数。实测的光谱反射率易受到土壤背景、天气、其他凋落物等外界因素的影响而存在各种噪声，尽管对其进行平滑、去噪等处理，但对植被参数反演精度的影响不可避免。植物光谱反射率分为叶片尺度光谱反射率和冠层尺度光谱反射率，无论是遥感观测数据还是地面实测数据，植被生化参数反演过程往往存在尺度效应问题，这种叶片尺度向冠层尺度提升过程所存在不一致的空间尺度效应是当前植被生化参数遥感估测与反演面临的难点^[3-5]。PROSAIL 辐射传输模型能够实现叶片尺度反射率到冠层反射率的有效转换，可实现大范围植被生化参数的估测，大大提高光谱指数定量反演植被参数的可行性和精度^[6]。程晓娟等^[7]利用 PROSAIL 模拟冬小麦冠层光谱数据和实测数据，结合水分光谱指数建立了冠层植被水分的估算模型，取得了较好的效果；杨曦光^[8]结合 PROSPECT+SAIL 模型分别模拟叶片尺度与冠层尺度反射率，实现了森林叶片尺度叶绿素和氮素到冠层尺度的反演。

毛竹 (*Phyllostachys pubescens* Mazel) 广泛分布于我国南方低山丘陵区，具有生长快、产量高、用途广等特点，其经营强度大且易引发土壤肥力变化，传统的人工样地土壤肥力测定方法投入大、测定困难、周期长，难以有效地快速测定，而植被分光光谱特征变化与植被土壤养分、植被生化参数息息相关^[9]，借助于植被光谱反射率特征与植被生化参数的关系，可为遥感间接估测植被土壤养分提供理论参考和技术支撑。当前，毛竹林冠层叶绿素、养分等参数的遥感估测已取得良好进展，其方法可归为遥感统计方法^[10]、物理模型反演方法^[11, 12]、混合模型^[13]（统计方法与物理模型反演）。梁亮等^[14]通过筛选可敏感表征叶绿素含量的高光谱指数，利用地面光谱数据为样本集，以最小

二乘支持向量机模型实现了小麦冠层叶绿素含量的准确估测，表明此方法可用于小麦叶绿素含量的快速无损估测；方圣辉等^[15]通过连续小波分析，基于 PROSPECT、PROSAIL 物理模型分别从叶片尺度、冠层尺度和小波尺度 3 个尺度分析小波系数与叶绿素含量之间的相关性，建立模拟光谱数据集、实测光谱数据值与叶绿素之间的植被指数模型，表明连续小波分析法可用于叶绿素的反演；陈瀚阅等^[16]用 4-scale 模型反演叶面积指数 (LAI) 算法，其反演结果优于 NDVI 经验模型，且模型应用普适性较强。可见，无论是统计模型还是物理模型，植被冠层参数的反演均与植被冠层反射率有关。我们以福建省顺昌县大干镇为研究区，通过采集毛竹叶绿素、叶面积指数等参数，采用 PROSAIL 辐射传输模型，建立查找表模拟最优毛竹林分冠层反射率，以期为毛竹林分冠层参数的反演、土壤肥力间接估测奠定基础。

1 数据与方法

1.1 研究区域

实验点位于福建省顺昌县大干镇的富屯溪中段 (26°51'~26°58'N, 117°34'~117°46'E) (图 1)，该地区属于中亚热带季风气候，年均气温 16.3℃，无霜期 286 d，年均日照时数 1709.9 h，

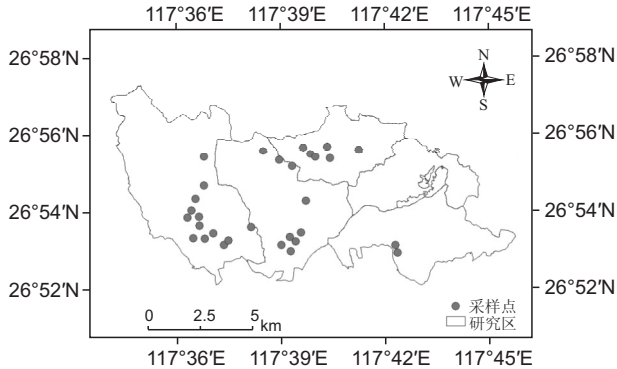


图 1 研究区地理位置及采样点
Fig. 1 Geographic locations and sampling points of the study area

年均降水量 1752 mm, 气候温和, 土壤肥沃, 适合亚热带及温带各种植物生长。大干镇总面积 20 942 hm², 森林覆盖率达 78.8%, 其中毛竹面积 3533.33 hm², 占林业用地面积的 21.41%。

1.2 数据采集

1.2.1 样地冠层叶面积指数 (LAI) 测量

于 2016 年 6 月 29 日至 7 月 8 日, 选择 30 个半径为 3.26 m 的样圆串作为样地 (图 1), 采用麦哲伦海王星手持 GPS 采集各样地坐标, 通过目视综合判定、选取样地中典型的一株毛竹作为样地代表样本, 测量其株高、枝下高, 并使用 LAI-2200 冠层分析仪测量每个样圆串的 LAI, 每个样圆重复测 3 次 LAI, 即每个样地测量 6 次 LAI, 取平均值作为该样地实测的 LAI 数据。

1.2.2 叶片和冠层反射率、土壤反射率测量

样地土壤反射率同样多次测量; 将样本树砍下, 在空旷且阳光充足处模拟毛竹冠层, 测量样地冠层反射率, 使用 ISI921VF-256 野外地物光谱辐射计测量, 光谱范围为可见-近红外 (380 ~ 1080 nm), 光谱分辨率为 4 nm。各测定点的光谱数据测量均重复 10 次, 取平均值作为该样本的光谱反射率。

1.2.3 叶绿素含量的获取

将每个样地样本树分上、中、下 3 层, 每层采集叶片 6 ~ 10 片, 使用 ISI921VF-256 野外地物光谱辐射计测量其光谱反射率, 然后将其装入自封袋并放入保温箱中, 带回实验室采用 UV-3000 型分光光度计提取叶绿素含量^[17]。

1.3 实测光谱反射率预处理

1.3.1 光谱数据的平滑处理

光谱数据的采集易受到天气、水分、人为测量、仪器自身等因素影响, 光谱样本难免会出现异常值, 尤其是 380 ~ 400 nm 和 900 ~ 1080 nm 噪声比较大, 信噪比很低, 为避免影响后期的数据分析和建模, 对这部分数据进行剔除。另外, 对光谱曲线上存在许多“毛刺”的噪声进行平滑滤波处理, 以消除与数据无关的信息。常用光谱去噪方法有小波 (WD)、移动平均 (MA)、Savitzky Golay (SG) 和低通滤波 (LP)。采用 Origin 9.0 数据分析软件对采集的光谱数据采用低通滤波进行平滑处理。

1.3.2 高光谱数据插值处理

由于地物光谱采样间隔 (380 ~ 1080 nm) 与

PROSAIL 模型模拟冠层反射率 (400 ~ 2500 nm) 的光谱采样间隔不一致, 为保证数据的一致性、方便数据分析, 需要对光谱数据进行插值处理。采用 Origin 9.0 数据分析软件中的线性插值法, 插值后的光谱曲线为原始光谱^[18]。

1.4 原理与方法

1.4.1 PROSAIL 模型

PROSAIL 模型是 PROSPECT + SAIL 的简称, 是由叶片光学模型 PROSPECT^[19] 与 SAIL^[20] 冠层辐射传输模型组合而成, 即利用 PROSPECT 模型模拟叶片光学特性、用 SAIL 模型模拟冠层反射率的辐射传输模型^[9], 这两个模型均是目前使用最广泛的辐射传输模型之一^[21]。PROSPECT 模型描述了叶片尺度上植物叶片 400 ~ 2500 nm 的光学特性, 可通过叶片结构参数 N 、叶绿素含量 C_{ab} (Chl a+b) ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)、类胡萝卜素含量 C_{ar} ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)、褐色素 C_{br} ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)、等效水厚度 EWT (cm)、干物质含量 C_m (g/cm^2) (包括蛋白质含量、木质素纤维素含量)。SAIL 模型是对 Suits 模型的改进, 该模型假设冠层是水平且无限延伸, 冠层组分只考虑叶片且叶片是小而水平的, 能够模拟冠层内的多次散射和辐射传输过程, 利用 PROSPECT 模型输出的叶片反射率 ρ_1 和透射率 τ_1 、叶面积指数 LAI、平均叶倾角 ALA、土壤反射率 ρ_s 、热点参数 H 、太阳天顶角 θ_s 、观测天顶角 θ_o 、太阳与观测方位角 φ_{so} 等参数模拟出植被冠层 400 ~ 2500 nm 间的反射率。本文使用的 PROSAIL 模型是由 PROSPECT5 叶片光学模型和 4SAIL 冠层辐射传输模型耦合而成, 模型如下:

$$\rho_\lambda = \text{PROSAIL}(N, C_{ab}, C_{ar}, C_{br}, EWT, C_m, ALA, LAI, H, \theta_s, \theta_o, \varphi_{so}, \rho_s) \quad (1)$$

1.4.2 模型敏感性分析

敏感性分析广泛运用于物理模型参数敏感性分析^[22], 它可定性或者定量分析评价模型参数对模型结果产生的影响程度^[23]。为确保查找表反演精度, 本研究采用传统的 OTA (one factor at time) 参数敏感性分析方法对 PROSAIL 模型的参数在各波段的敏感性, 即通过变化一个参数的值, 其他参数值固定, 定性分析参数变化对模型输出结果的影响。定量分析采用敏感性 (S) 计算公式^[21]:

$$S = \frac{\sum_{j=1}^n (\rho_{X+\Delta X}^j + \rho_X^j)^2}{\rho_X^1} \quad (2)$$

式中， X 为模型参数， ΔX 为参数的步长， $\rho_{X+\Delta X}^i$ 为增加步长 ΔX 后模拟的冠层反射率值， ρ_X^i 为模型在某个参数下的原始冠层反射率， n 为模型参数增加步长的次数。

1.4.3 冠层反射率的模拟

通过设置不同参数步长实现 PROSAIL 模型进行冠层反射率的模拟，将实测冠层反射率与模拟冠层反射率相比较，查找代价函数最小时的最优参数（公式 3），最终实现冠层反射率的模拟。

$$Cost(X) = \sum (R_{mes} - R(P, X))^2 \tag{3}$$

式中， R_{mes} 为实测冠层反射率； R 为模型模拟值； P 为模型的已知参数； X 为模型的未知参数。

2 结果与分析

2.1 毛竹林冠层光谱分析

研究区 30 块样地的原始冠层光谱曲线见图 2。与健康绿色植被的光谱特征^[24]相比，顺昌县大干镇毛竹林冠层原始光谱曲线具有明显健康绿色植物的光谱特征。毛竹林冠层在 400~700 nm 波段由于叶绿素吸收辐射能的强度不同，在 520~600 nm 之间有一绿色反射峰，对应波长为 550 nm，在 690~700 nm 之间有一红光吸收谷，红光吸收谷位于 690 nm；在 690~760 nm 间，由于毛竹林在红光波段的强烈吸收和近红外波段叶片细胞壁、细胞间隙的折射率不同，导致反射率急剧上升，之后趋于平缓。

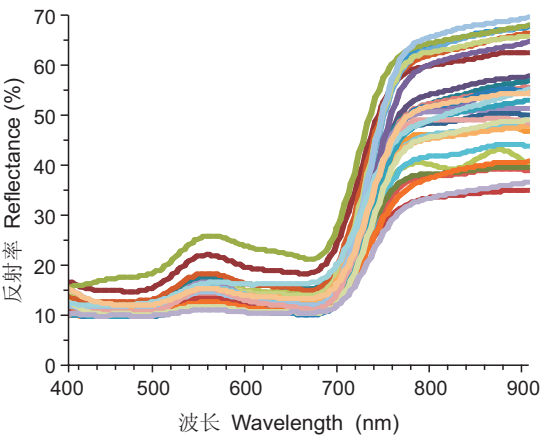


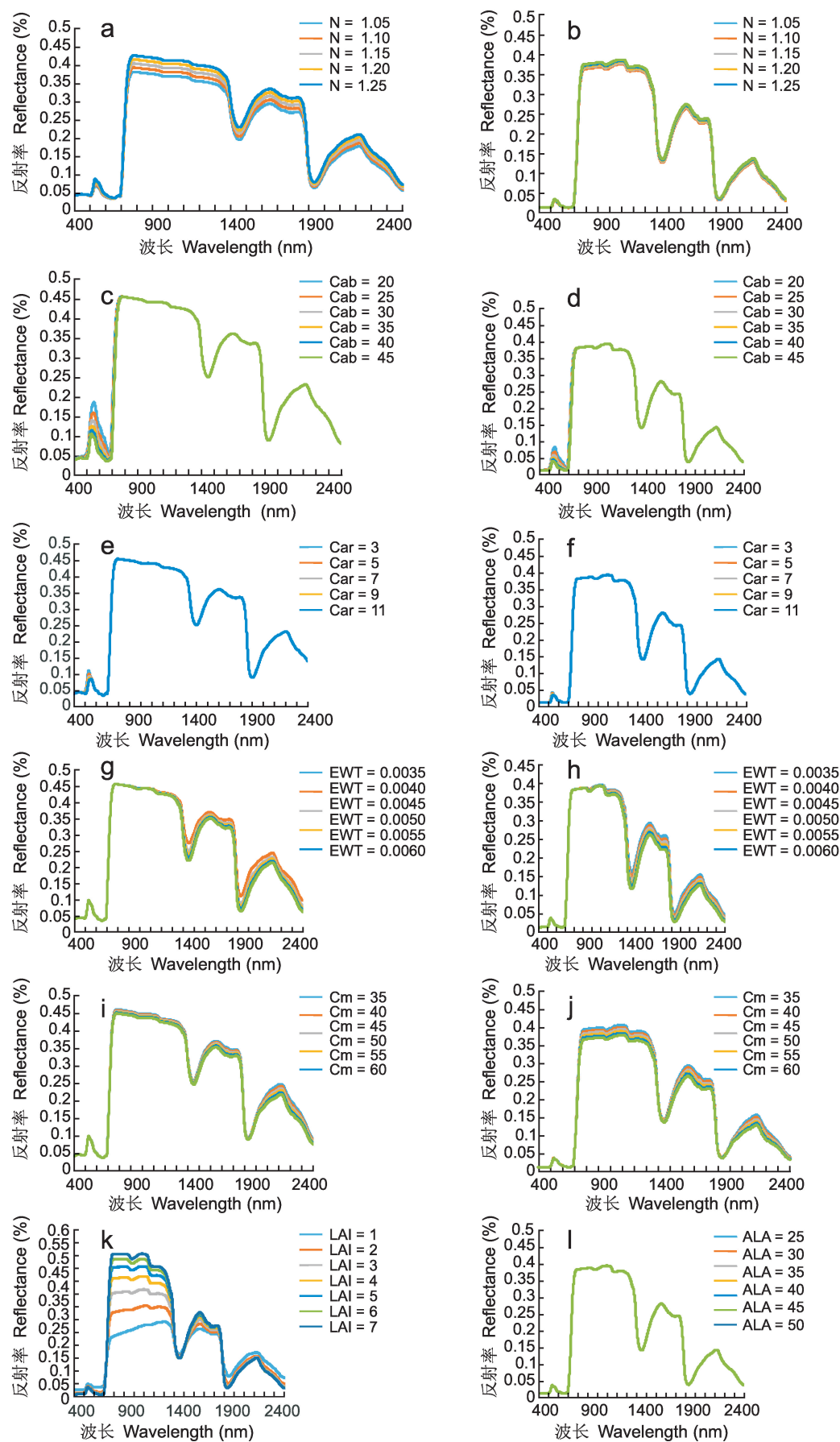
图 2 研究区原始冠层光谱曲线
Fig. 2 Original canopy spectral reflectance curve in the study area

2.2 敏感性分析及尺度效应分析

PROSPECT5 和 PROSAIL 模型参数在不同步

长下分别模拟的叶片光谱反射率和冠层光谱反射率的变化情况见图 3。在叶片尺度，叶肉结构参数 N 主要影响 800~2500 nm 的光谱反射率，随着 N 不断增加，反射率随之增加，且变化明显，在可见光波段（400~760 nm），反射率变化很小，而在冠层尺度，其反射率变化趋势虽一致，但变化趋势不明显，尤其在可见光波段，反射率趋于重合；在 550~700 nm 的可见光波段，随着叶绿素 C_{ab} 含量的增加，反射率显著下降，之后反射率趋于一致重合，相对叶片尺度，冠层尺度变化幅度较小，类胡萝卜素 C_{ar} 主要影响 500~550 nm 的绿光波段，并且反射率随其增加而减少，但其变化不明显，之后变化趋势与叶绿素相似，反射率一致重合；在 1400 nm 以后的红外波段，叶片和冠层反射率随等效水厚度 EWT 增加而减小，但对冠层尺度反射率影响显著、变化明显；干物质含量 C_m 不影响可见光波段，但在近红外波段处，冠层反射率显著降低，而在叶片尺度，其反射率缓慢减小。从以上分析可知，在叶片尺度，各参数敏感性由高到低依次为 $N > C_{ab} > EWT > C_m > C_{ar}$ ，而在冠层尺度，相同参数敏感性由高到低依次为 $C_{ab} > EWT > C_m > N > C_{ar}$ ，其原因在于影响植被整个冠层反射率除了以上参数，还包括叶面积指数（ LAI ）和平均叶倾角（ ALA ）等参数（图 3），在 700~1850 nm 波段，冠层反射率随 LAI 增加而增大，在 800~1300 nm 波段反射率规律变化非常明显，而在 400~700 nm 和 1850~2500 nm 处，随着 LAI 的增加，冠层反射率减小；在 400~2500 nm 波段范围，冠层反射率重合， ALA 变化敏感性非常低，因此，冠层参数敏感性高低依次为 $LAI > C_{ab} > EWT > C_m > N > C_{ar} > ALA$ ；此外，由于阴影的影响，叶片尺度光谱反射率普遍高于冠层尺度光谱反射率。

通过公式(2)计算冠层各参数对冠层反射率的敏感性可知，在 400~2500 nm 范围内，各参数敏感性由高到低依次为 $LAI > C_{ab} > EWT > C_m > N > C_{ar} > ALA$ （图 4：a）；但处理后实测的光谱数据范围在 400~900 nm 之间，因而模拟的冠层光谱波长范围在 400~900 nm，其参数敏感性由高到低依次为 $LAI > C_{ab} > C_{ar} > C_m > N > ALA > EWT$ （图 4：b），此结果与定性分析结果（图 3）一致。



a, c, e, g, i 分别为叶片尺度各参数对叶片反射率的定性分析；b, d, f, h, j, k, l 分别为冠层尺度各参数对冠层反射率的定性分析。
a, c, e, g, and i are the qualitative analyses of various parameters for leaf reflectance at the leaf scale; b, d, f, h, j, k, and l are the qualitative analyses of various parameters for canopy reflectance at the canopy scale.

图3 PROSPECT 和 PROSAIL 模型输入参数分别对叶片和冠层反射率的影响
Fig. 3 Impacts of input parameters in the PROSPECT and PROSAIL models on leaf and canopy reflectance

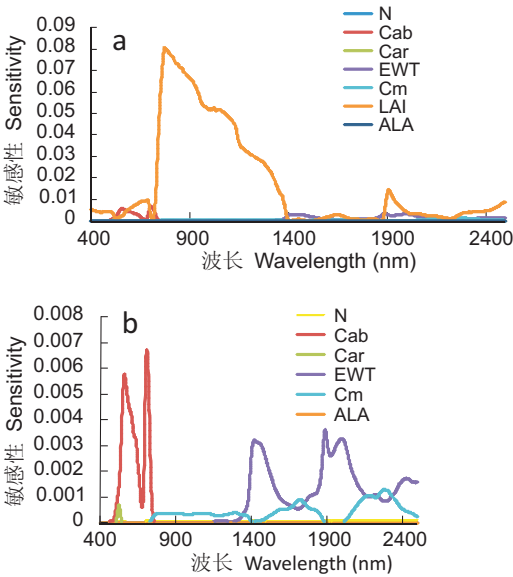


图 4 PROSAIL 参数敏感性分析
Fig. 4 Sensitivity analysis of the input parameters in the PROSAIL model

2.3 模型查找表的建立

根据冠层模型敏感性分析可知，在波长 400 ~ 900 nm 范围内，*LAI* 和 *C_{ab}* 的敏感度高，因而这两个参数根据实际测量值设置一定的范围及步长；而叶肉结构参数 (*N*)、等效水厚度 (*EWT*)、干物质含量 (*C_m*) 和平均叶倾角 (*ALA*) 对冠层反射率几乎没有影响，因而取叶肉结构参数 (*N*) 为 1.4^[19]、热点参数 (*H*，叶片平均大小与冠高之比^[8]) 为 0.011、漫反射系数 (*Diff*) 为 0.15、观测天顶角 (θ_o) 和相对天顶角 (φ_{so}) 为 0、太阳天顶角 (θ_s) 为 26.47°，其他参数根据实测数据取均值 (表 1)。通过上述参数

表 1 PROSAIL 模型参数的设置
Table 1 Input parameters of the PROSAIL model

参数 Parameter	范围 Range	步长 Step
叶肉结构参数 <i>N</i> Mesophyll structure	1.4	—
叶绿素含量 <i>C_{ab}</i> (μg/cm ²) Chlorophyll content	(25~90)	5
类胡萝卜素含量 <i>C_{ar}</i> (μg/cm ²) Carotenoid content	7	—
褐色素 <i>C_{br}</i> (μg/cm ²) Brown pigment	0	—
等效水厚度 <i>EWT</i> (cm) Water content	0.0044	—
干物质含量 <i>C_m</i> (g/cm ²) Dry matter content	0.0047	—
叶面积指数 <i>LAI</i> Leaf area index	(0.75~5)	0.05
热点参数 <i>H</i> Hot parameter	0.011	—
平均叶倾角 <i>ALA</i> Average leaf angle	38.05°	—
漫反射系数 <i>Diff</i> Diffuse reflection coefficient	0.15	—
土壤反射系数 ρ_s Soil reflection coefficient	0.2	—
太阳天顶角 θ_s Sun zenith angle	26.47°	—
观测天顶角 θ_o View angle	0	—
太阳与观测相对天顶角 φ_{so} Sun and view relative azimuth	0	—

的设置，将其代入 PROSAIL 模型中模拟冠层反射率，构建 *LAI*-冠层反射率查找表。

2.4 冠层反射率的模拟结果

利用 PROSAIL 模型根据敏感参数范围构建的 *LAI*-冠层反射率查找表，结合实际测量的光谱数据，通过计算代价函数 (公式 3) 的最小值来确定最优模拟的平均冠层反射率 (图 5)，同时这条最优模拟的平均冠层反射率对应的 *LAI* 为 3.90；PROSAIL 模型模拟的光谱反射率与实测光谱反射率拟合效果很好，相关系数 $R^2 = 0.9936$ ，相对误差为 6.71% (图 6)。从图 5 中可见，模拟的冠层反射率与 30 个样地实测的平均冠层光谱反射率整体特征比较接近；在 400 ~ 750 nm 处，实测冠层反射率高于模拟反射率，但在 750 ~ 800 nm 处实测的冠层反射率低于模拟冠层反射率；此外，从模拟冠层反射率与平均实测冠层反射率可看出，模拟的冠层反射率波峰左移，波谷右移，实测冠层反射率

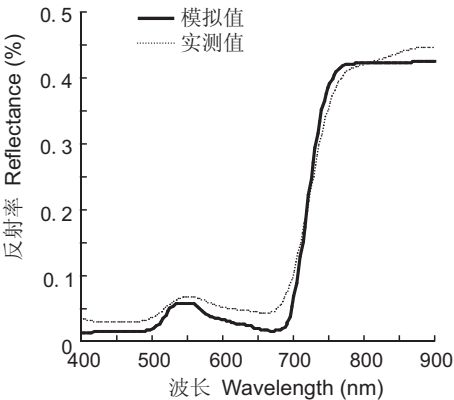


图 5 毛竹林冠层光谱模拟与实际光谱的比较
Fig. 5 Comparison between simulation and measurement of *Phyllostachys pubescens* forest

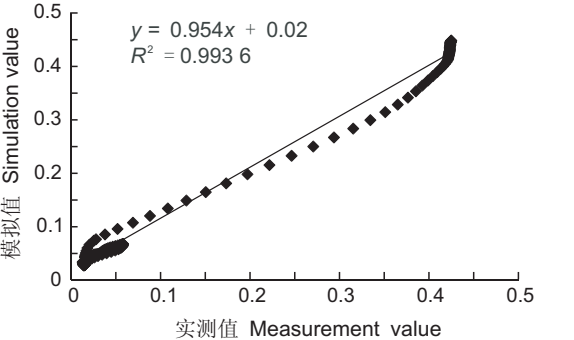


图 6 PROSAIL 模型模拟的冠层反射率与实测冠层反射率的关系
Fig. 6 Relationship between simulated canopy reflectance using the PROSAIL model and measured canopy reflectance

在 800 nm 后的近红外波段反射率高于模拟值。

3 讨论

毛竹林是一种特殊的植被类型, 具有大小年之分, 而植被因季相、生长特点等具有不同的光谱反射特征, 本研究毛竹林夏季光谱特征与官凤英等^[24]研究的夏季大年毛竹的光谱反射率特点相似, 说明本研究实测毛竹光谱实用性较好, 能够进一步用于模拟毛竹林冠层反射率。赵英时^[25]在研究植被冠层反射率时指出, 叶片尺度的反射光谱行为对植被冠层反射光谱是重要的, 但不能完全解释植被冠层的光谱反射, 由于植被冠层是由多重叶层组成, 受到阴影、叶片形状、叶片大小、叶倾角等影响, 冠层反射率往往低于叶片实验室测量的反射率, 本研究中叶片尺度和冠层尺度反射率之间的规律与赵英时阐述的规律一致。在叶片尺度, 由定性分析得到各参数对叶片光谱反射率的影响范围不同, 并且表明叶肉结构参数、叶绿素含量及等效水厚度是控制植物叶片反射率的主要因素, 基本符合植被叶片的反射率特征, 可以用来区分土壤、水体、岩石等。在冠层尺度, 叶肉结构参数不是植物冠层反射率的主要因素, 而冠层参数叶面积指数和叶绿素含量是影响冠层反射率的重要参数, 这与谷成燕等^[26]研究的毛竹林冠层参数敏感性一致, 与其不同的是, 本研究在模型参数中, 考虑到类胡萝卜素对植被反射率也存在影响, 以及地物生长与经营方式的差异, 研究区毛竹林冠层呈“勾梢”形状, 因而冠层反射率模拟模型的各参数敏感程度存在一些差异。影响植被冠层的因素很多, 除了受植被冠层自身组分, 即叶片光学特性的影响外, 还受冠层的形状结构、观测方向、土壤光谱等的影响。

本研究中采用的 PROSAIL 物理辐射传输模型虽然本身是一种病态反演, 但其在植被冠层光谱辐射传输模拟方面得到了广泛应用^[2]。PROSAIL 模型是 PROSPECT 和 SAIL 模型的耦合模型, 是直接从冠层数据进行模拟, 比基于 PROSPECT 模型模拟更为复杂, 而且物理模型模拟是非线性过程, 其结果存在非唯一性, 因而结果优化十分重要, 本研究采用代价函数进行迭代优化, 代价函数最小时即为最优结果, 实测冠层反射率与模拟冠层反射率存在明显的相关性, 相关系数 $R^2 = 0.9936$, 相对误差为 6.71%, 代价函数是传统反演算法中常用

的一种, 因而本研究结果可信度较高。

4 结论

本研究通过分析顺昌县大干镇毛竹林实测光谱反射率特征, 采用 PROSAIL 辐射传输模型建立毛竹林冠层反射率查找表, 并与实测光谱反射率进行比较, 从而模拟最优的毛竹林冠层反射率。研究得出, 毛竹林具有健康植被的光谱反射特征, 叶片光谱反射率普遍高于冠层光谱反射率, 不同参数在叶片尺度和冠层尺度对光谱反射率的影响程度不同, 叶肉结构参数、叶绿素及等效水厚度是影响叶片光谱的主要因素, 而叶面积指数、叶绿素是影响冠层的主要因素, 并且还受土壤背景、毛竹冠层阴影、叶片状况、自身生长及经营方式的影响。此外, 从模型模拟的结果可以看出, 采用 PROSAIL 辐射传输模型模拟的毛竹林冠层反射率与实测拟合效果非常好, 相关系数 R^2 高达 0.9936, 相对误差为 6.71%, 因此可确定调整模型参数, 为下一步 LAI 和叶绿素的反演奠定基础。

参考文献:

- [1] 肖珍珍, 李毅, 冯浩. 西北盐碱土壤理化性质的高光谱建模及预测[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(5): 1615–1622.
Xiao ZZ, Li Y, Feng H. Hyperspectral models and forecasting of physico-chemical properties for salinized soils in northwest China[J]. *Spectroscopy & Spectral Analysis*, 2016, 36(5): 1615–1622.
- [2] 王磊, 白由路, 卢艳丽, 王贺. 光谱数据变换对玉米氮素含量反演精度的影响[J]. 遥感技术与应用, 2011, 26(2): 220–225.
Wang L, Bai YL, Lu YL, Wang H. Effect on retrieval precision for corn N content by spectrum data transformation[J]. *Remote Sensing Technology & Application*, 2011, 26(2): 220–225.
- [3] 黄彦, 田庆久, 耿君, 王磊, 栾海军. 遥感反演植被理化参数的光谱和空间尺度效应[J]. 生态学报, 2016, 36(3): 883–891.
Huang Y, Tian QJ, Geng J, Wang L, Luan HJ. Review of spectral and spatial scale effects of remotely sensed biophysical and biochemical vegetation parameters[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(3): 883–891.
- [4] 肖艳芳. 植被理化参数反演的尺度效应与敏感性分析[D]. 北京: 首都师范大学, 2013.
- [5] 刘良云. 植被定量遥感反演与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [6] 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[J]. 生态学杂志, 2006, 25(5): 591–595.
- Shi RH, Zhuang DF, Niu Z, Wang W. Quantitative inversion of chlorophyll content based on radiative transfer model[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(5): 591–595.
- [7] 程晓娟, 杨贵军, 徐新刚, 陈天恩, 李振海, 冯海宽, 王冬. 新植被水分指数的冬小麦冠层水分遥感估算[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(12): 3391–3396.
- Cheng XJ, Yang GJ, Xu XG, Chen TE, Li ZH, Feng HK, Wang D. Estimating canopy water content in wheat based on new vegetation water index[J]. *Spectroscopy & Spectral Analysis*, 2014, 34(12): 3391–3396.
- [8] 杨晓光. 高光谱数据提取森林冠层叶绿素及氮含量的研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2010.
- [9] Nouri H, Beecham S, Anderson S, Hassanli AM, Kazemi F. Remote sensing techniques for predicting evapo transpiration from mixed vegetated surfaces[J]. *Urban Water J*, 2015, 12(5): 380–393.
- [10] 夏天, 吴文斌, 周清波, 周勇. 冬小麦叶面积指数高光谱遥感反演方法对比[J]. 农业工程学报, 2013, 29(3): 139–147.
- Xia T, Wu WB, Zhou QB, Zhou Y. Comparison of two inversion methods for winter wheat leaf area index based on hyperspectral remote sensing[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(3): 139–147.
- [11] 叶舒, 范文义, 孟庆岩. 基于高分一号数据的 PROSAIL 模型叶面积指数反演[J]. 森林工程, 2016, 32(4): 18–21.
- Ye S, Fan WY, Meng QY. Leaf area index retrieval of GF-1 using PROSAIL[J]. *Forest Engineering*, 2016, 32(4): 18–21.
- [12] 陈艳华, 张万昌, 雍斌. 基于 TM 的辐射传输模型反演叶面积指数可行性研究[J]. 国土资源遥感, 2007, 19(2): 44–49.
- Chen YH, Zhang WC, Yong B. A feasibility study of leaf area index inversion using radiative transfer model based on TM data[J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2007, 19(2): 44–49.
- [13] 刘轲, 周清波, 吴文斌, 陈仲新, 唐华俊. 基于多光谱与高光谱遥感数据的冬小麦叶面积指数反演比较[J]. 农业工程学报, 2016, 32(3): 155–162.
- Liu K, Zhou QB, Wu WB, Chen ZX, Tang HJ. Comparison between multispectral and hyperspectral remote sensing for LAI estimation[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(3): 155–162.
- [14] 梁亮, 杨敏华, 张连蓬, 林卉, 周兴东. 基于 SVR 算法的小麦冠层叶绿素含量高光谱反演[J]. 农业工程学报, 2012, 28(20): 162–171.
- Liang L, Yang MH, Zhang LP, Lin H, Zhou XD. Chlorophyll content inversion with hyperspectral technology for wheat canopy based on support vector regression algorithm[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(20): 162–171.
- [15] 方圣辉, 乐源, 梁琦. 基于连续小波分析的混合植被叶绿素反演[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2015, 40(3): 296–302.
- Fang SH, Le Y, Liang Q. Retrieval of chlorophyll content using continuous wavelet analysis across a range of vegetation species[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(3): 296–302.
- [16] 陈瀚阅, 黄文江, 牛铮, 高帅. 基于几何光学模型的人工林叶面积指数遥感反演[J]. 地球信息科学学报, 2012, 14(3): 358–365.
- Chen HY, Huang WJ, Niu Z, Gao S. Estimation of forest leaf area index from remote sensing data using the algorithm based on geometric-optical model[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2012, 14(3): 358–365.
- [17] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 134–135.
- [18] 高金龙, 侯尧宸, 白彦福, 孟宝平, 杨淑霞, 胡远宁, 冯琦胜, 崔霞, 梁天刚. 基于高光谱数据的高寒草甸氮磷钾含量估测方法研究——以青海省贵南县及玛沁县高寒草甸为例[J]. 草业学报, 2016, 25(3): 9–21.
- Gao JL, Hou YC, Bai YF, Meng BP, Yang SX, Hu YN, Feng QS, Cui X, Huo TG. Methods for estimating nitrogen, phosphorus and potassium content based on hyperspectral data from alpine meadows in Guinan and Maqin counties, Qinghai province[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2016, 25(3): 9–21.
- [19] Jacquemoud S, Baret F. PROSPECT: A model of leaf optical properties spectra[J]. *Remote Sens Environ*, 1990, 34(2): 75–91.
- [20] Kuusk A. The Hot Spot Effect in Plant Canopy Reflectance[M]. Berlin: Springer, 1991, 107(6): 139–159.
- [21] Jacquemoud S, Verhoef W, Baret F, Bacour C, Zarco-Tejada PJ. PROSPECT + SAIL models: A review of use for vegetation characterization[J]. *Remote Sens Environ*, 2009, 113(2009): S56–66.
- [22] Bacour C, Jacquemoud S, Leroy M, Hauteceur O, Weiss M, et al. Reliability of the estimation of vegetation characteristics by inversion of three canopy reflectance models on airborne POLDER data[J]. *Agronomie*, 2002, 22(6): 555–566.
- [23] Crosetto M, Tarantola S. Uncertainty and sensitivity analysis; tools for GIS-based model implementation[J]. *Int J Geogr Inf Sci*, 2001, 15(5): 415–437.
- [24] 官凤英, 邓旺华, 范少辉. 毛竹林光谱特征及其与典型植被

- 光谱差异分析[J]. 北京林业大学学报, 2012, 34(3): 31–35.
- Guan FY, Deng WH, Fan SH. Spectral characteristics of *Phyllostachys pubescens* stand and its differential analysis with typical vegetation [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2012, 34(3): 31–35.
- [25] 赵英时. 遥感应用分析原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [26] 谷成燕, 杜华强, 周国模, 韩凝, 徐小军, 赵晓, 孙晓艳. 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 CY, Du HQ, Zhou GM, Han N, Xu XJ, Zhao X, Sun XY. Retrieval of leaf area index of *Moso bamboo* forest with Landsat Thematic Mapper image based on PROSAIL canopy radiative transfer model [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(8): 2248–2256.

(责任编辑: 张 平)

欢迎订阅 2018 年《植物遗传资源学报》

《植物遗传资源学报》是中国农业科学院作物科学研究所和中国农学会主办的学术期刊, 中国科技核心期刊、全国中文核心期刊、中国科学引文数据库(CSCD)核心期刊, 被国内多家数据库收录, 被 CA 化学文摘(美)(2014)收录, 荣获 2015 年度中国自然资源学会高影响力十佳期刊。据《中国科技期刊引证报告》(核心版)统计: 2016 年影响因子 1.181, 在农艺学类期刊中排名第 3。据 CNKI《中国学术期刊影响因子年报》统计: 2016 年复合影响因子 1.495, 在 48 种农艺学类期刊排名第 4, 期刊综合影响因子 1.256。

报道内容为有关植物遗传资源基础理论研究、应用研究方面的研究成果、创新性学术论文和高水平综述或评论。如种质资源的考察、收集、保存、评价、利用、创新, 信息学、管理学等; 起源、演化、分类等系统学; 基因发掘、鉴定、克隆、基因文库建立、遗传多样性研究。

双月刊, A4 开本, 216 页, 彩色铜版纸印刷。定价 68 元, 全年 408 元。各地邮局发行。邮发代号: 82-643。国内连续出版物号 CN11-4996/S, 国际连续出版物号 ISSN1672-1810。本刊编辑部常年办理订阅手续, 如需邮挂每期另加 3 元。

地 址: 北京市中关村南大街 12 号《植物遗传资源学报》编辑部

邮 编: 100081 电 话: 010-82105794, 010-82109494

网 址: www.zwyczy.cn

E-mail: zwyczyxb2003@163.com, zwyczyxb2003@caas.cn, zwyczyxb2003@sina.com

微信 ID: 植物遗传资源学报 作者 QQ 群: 372958240