

基于 PROSAIL 模型的毛竹林冠层含水量反演研究

张仓皓^{1,3}, 刘小杰^{1,3}, 王瑞璠^{1,3}, 魏倪彬^{1,3}, 刘健^{1,3}, 余坤勇^{1,3}, 郭孝玉², 王帆^{1,3*}

(1. 福建农林大学 林学院, 福建 福州 350002; 2. 福建省资源环境监测与可持续经营利用重点实验室(三明学院), 福建 三明 365004;
3. 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:冠层含水量(canopy water content, CWC)的定量反演有助于毛竹林干旱胁迫状况的监测, 对其生产管理具有重要意义。以永安天宝岩的毛竹林为研究对象, 采用 PROSAIL 模型, 通过全局敏感性分析结合实地调查和相关文献确定模型的参数设置, 然后建立含水量与冠层反射率的查找表(LUT), 进而利用查找表联合反演等效水厚度(EWT)与叶面积指数(LAI)得到冠层含水量(CWC), 最后基于 Sentinel-2B 影像实现区域冠层含水量的空间量化。结果表明, 1) EWT 主要影响 1 100 nm 以后的冠层反射率, 对可见光区域冠层反射率几乎无影响; 2) 基于 PROSAIL 模型可有效反演毛竹林冠层含水量, 其 $R^2=0.536$, RMSE 为 0.059 kg/m^2 ; 3) 研究区域毛竹林 7 月的冠层含水量主要分布于 $0.12\sim0.41 \text{ kg/m}^2$ 。研究为冠层含水量反演提供一种有效的反演方法, 有助于毛竹林的野火预防和病虫害防治。

关键词:冠层含水量; PROSAIL; 毛竹; Sentinel-2B; 定量反演

中图分类号: S771.8

文献标志码: A

文章编号: 1001-7461(2023)04-0224-09

A Study on Canopy Water Content Inversion of *Phyllostachys edulis* Forest Based on PROSAIL Model

ZHANG Cang-hao^{1,3}, LIU Xiao-jie^{1,3}, WANG Rui-fan^{1,3}, WEI Ni-bin^{1,3}, LIU Jian^{1,3}, YU Kun-yong^{1,3},
GUO Xiao-yu², WANG Fan^{1,3*}

(1. College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, Fujian, China; 2. Fujian Provincial Key Laboratory of Resources and Environment Monitoring and Sustainable Management and Utilization, Sanming University, Sanming 365004, Fujian, China;
3. Fujian Province Key Laboratory of 3S Technology and Optimal Utilization of Resources, Fuzhou 350002, Fujian, China)

Abstract: The quantitative inversion of canopy water content (CWC) is useful for monitoring the drought stress condition of *Phyllostachys edulis* forest and is important for its production management. This study used the PROSAIL model to determine the parameters of the model through global sensitivity analysis combined with field surveys and retrieving related literatures. Finally, the spatial quantification of regional canopy water content was achieved based on Sentinel-2B images. The results showed that 1) the equivalent water thickness mainly affected the canopy reflectance over 1100 nm, and had almost no effect on the canopy reflectance in the visible region. 2) The canopy water content of *P. edulis* forest could be effectively inverted based on the PROSAIL model, with R^2 of 0.536 and RMSE of 0.059 kg/m^2 . 3) The canopy water content of *P. edulis* forests in the study area in July was mainly distributed in the range of $0.12\sim0.41 \text{ kg/m}^2$. The study provides an effective inversion method for canopy water content inversion, which is helpful for wildfire prevention and pest control in *P. edulis* forests.

收稿日期: 2022-05-11 修回日期: 2022-06-07

基金项目: 国家青年科学基金(41901387); 福建省教育厅省中青年骨干教师教育科研项目(JT180132); 福建省资源环境监测与可持续经营利用重点实验室开放基金(ZD202104、B15011708); 资源环境监测与可持续经营福建省高校创新团队发展计划(KC190002)。

第一作者: 张仓皓。研究方向: 资源与环境遥感监测。E-mail: 2974275670@qq.com

* 通信作者: 王帆, 讲师, 硕士生导师。研究方向: 资源监测和 3S 技术应用。E-mail: pipi870408@163.com

Key words: canopy water content; PROSAIL; *Phyllostachys edulis*; Sentinel-2B; quantitative inversion

植被含水量直接反映了植被生理状况及其生长趋势,是模拟干旱影响、植被生产力和水分通量的重要变量^[1-2]。传统的植被含水量地面调查耗时耗力,且缺乏连续的空间覆盖。遥感具有及时、同步和低成本观测大面积区域的优点,为植被含水量监测提供了方便快捷的方法。植被含水量遥感定量反演,不仅可以实时监测和诊断植被和农业干旱胁迫状况,而且有助于估计作物产量和指导植被灌溉,也是野火敏感性预测中的重要研究内容^[2-6]。冠层含水量(canopy water content, CWC)是监测陆地生态系统状况非常重要的植被含水量指标,在植物生理学以及火灾风险和行为的建模中发挥着重要作用^[7]。目前,研究者已通过经验模型^[8-9]或物理模型^[10]的方法从不同尺度上收集的反射率数据中估算植被含水量。相比于经验模型,使用物理模型例如辐射传输模型反演含水量具有较强的理论依据,鲁棒性和迁移性强。在辐射传输模型(radiative transfer model, RTM)中,通常使用单位叶面积的水量,即所谓的等效水厚度(equivalent water thickness, EWT),通过将 EWT 乘以单位地面面积的叶面积(即叶面积指数 LAI),得到冠层含水量(CWC)^[7]。PROSAIL 作为常见的辐射传输模型,已广泛应用于植被的含水量反演研究中^[11-16]。例如郑兴明等^[15]利用 PROSAIL 模型模拟玉米(*Zea mays*)冠层光谱,并利用 Landsat OLI 影像计算 12 种植被水分指数,发现水分胁迫指数 2(moisture stress index 2, MSI2)与植被含水量拟合效果最好;冯超^[16]利用 PROSAIL 模型结合归一化红外指数(normalized difference infrared index, NDII)反演路域植被的含水量,发现该反演方法具有较好的准确性和适应性。

毛竹(*Phyllostachys edulis*)作为我国南方低山丘陵地区重要的经济竹种,具备生长快、成材早、用途广等优良特性,集经济、生态和社会效益于一体,在促进就业增收、改善人居环境、发展绿色经济等方面发挥着积极的作用^[17-19]。监测毛竹的冠层含水量有助于了解毛竹林的干旱胁迫状况,对于毛竹经营管理具有重要意义。当前,已有研究将 PROSAIL 模型应用在毛竹冠层参数的反演研究中,例如谷成燕等^[20]利用 PROSAIL 辐射传输模型构建毛竹林叶面积指数-冠层反射率查找表,并基于 Landsat TM 影像数据,定量反演出毛竹林的叶面积指数。但目前鲜有研究利用辐射传输模型反演毛竹林冠层含水量。

鉴于此,本研究以福建永安天宝岩的毛竹林为

研究对象,基于地面调查和 Sentinel-2B 影像数据,通过模型敏感性分析,对 PROSAIL 模型进行参数化,利用 ARTMO(automated radiative transfer models operator)^[21]软件(<https://artmotoolbox.com>)建立反射率查找表,进而使用查找表联合反演等效水厚度(EWT)与叶面积指数(LAI)得到冠层含水量(CWC),并利用 Sentinel-2B 影像实现区域冠层含水量的空间量化,为实现毛竹林健康状况的大范围同步监测提供参考和依据。

1 材料与方法

1.1 研究地点和野外数据

研究区位于福建省永安市天宝岩国家级自然保护区,地理坐标为 117°28′03″—117°35′2″E, 25°50′51″—26°01′20″N,处在上坪、西洋和青水 3 个乡镇交界处(图 1 左)。保护区系戴云山余脉,属中低山地貌,海拔高度为 580.0~1 604.8 m,土壤类型主要为红壤。气候类型为中亚热带季风气候,温和多雨,年均温为 19.3℃,年平均降水量为 2 039 mm,年平均湿度为 80%。保护区植被类型丰富,包括常绿阔叶林、针叶林、针阔叶混交林和毛竹林等,其中毛竹林的面积达到 5.85 万 hm²^[22-23]。

于 2021 年 7 月在天宝岩自然保护区的试验区随机布设 30 个 20 m×20 m 的纯毛竹样地(图 1 右)并同步进行野外试验数据的采集。

样地 LAI 的测量采用 LAI-2200 植物冠层分析仪。测量时尽量选择在阴天,避免阳光直射引起的误差。采用 90°遮盖罩,避免测量者进入镜头范围对测量结果造成干扰。具体测量方法为“1A4B”法:首先在样地外的空旷处测定 1 个天空背景值,记作 A 值;然后进入样地中选取 4 处代表性区域测定 4 个 B 值;测定后冠层分析仪将自动记录 LAI 值。每个样地重复进行 4 次测量,取其均值作为该样地的 LAI 实测值。

通过每木检尺确定各样地标准竹,将标准竹冠层按照上、中、下分为 3 层,每层各取 6~8 片叶片作为样本。使用智能叶面积测量系统 YMJ-C 扫描各叶片样本,自动获取每片叶片的周长、宽度、面积等数据,并将采集的叶片样本送往实验室,通过烘干法测定含水量。

$$E_{WT} = \frac{M_1 - M_2}{S} \quad (1)$$

$$C_{WC} = E_{WT} \times LAI \quad (2)$$

式中: E_{WT} 指叶片等效水厚度, C_{WC} 指冠层含水量,

M_1 指叶片鲜重, M_2 指叶片干重, S 指叶片面积。

1.2 遥感数据与预处理

通过 Copernicus Open Access Hub 网站(<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>) 免费

获取与野外数据采集时间相近的哨兵-2B 遥感影像(S2B_MSIL1C_20210705T024549_N0301_R132_T50RNP_20210705T045607.SAFE)。哨兵-2 号的波段设置具体情况如表 2。

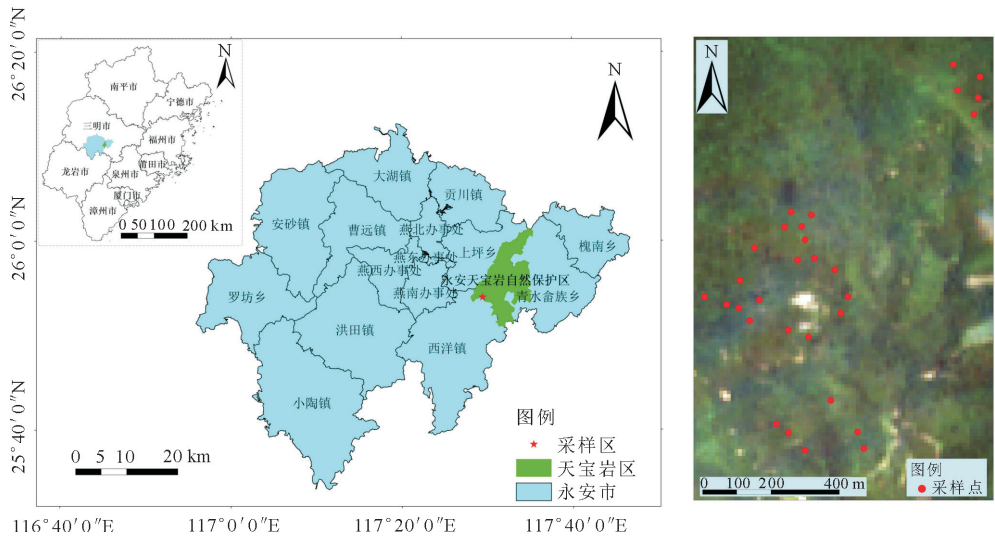


图 1 研究区位置和样地分布

Fig. 1 Location and plot distribution map of the study area

表 1 样地调查统计

Table 1 Statistical table of survey of sample plots

参数	最大值	最小值	平均值	标准差
$L_{AI}/(m^2 \cdot m^{-2})$	5.62	2.00	4.12	0.92
$E_{WT}/(mg \cdot cm^{-2})$	7.60	5.10	6.20	0.69
$C_{WC}/(kg \cdot m^{-2})$	0.36	0.13	0.26	0.06

表 2 哨兵 2 号的波段设置

Table 2 Band settings for Sentinel 2

波段名称	中心波长/nm	分辨率/m
B1-气溶胶波段	443	60
B2-蓝波段	490	10
B3-绿波段	560	10
B4-红波段	665	10
B5-植被红边波段 1	705	20
B6-植被红边波段 2	740	20
B7-植被红边波段 3	783	20
B8-近红外波段	842	10
B8A-近红外波段	865	20
B9-水汽波段	945	60
B10-卷云波段	1 375	60
B11-短波红外波段 1	1 610	20
B12-短波红外波段 2	2 190	20

研究获取的 Sentinel-2B 影像为经过几何精校正的 L1C 级数据。首先利用 Sen2cor 插件进行预处理,包括辐射定标和大气校正,生成 L2A 级数据。然后使用哨兵影像处理软件 SNAP,将影像分辨率重采样至 10 m,并转换为 ENVI 格式。最终在 ENVI 软件中实现波段融合,并通过 ArcGIS 软件掩膜

提取得到研究区影像。

归一化红外指数(normalized difference infrared index,NDII)^[24]作为度量植被冠层含水量的植被指数,对含水量的变化极为敏感,其数值越大,代表含水量越高,在森林冠层监测与植被胁迫性探测中得到广泛应用^[25]。故本研究选择 NDII 指数(公式中用 N_{DII} 表示)作为冠层含水量反演精度的一种佐证。

$$N_{DII} = (B_8 - B_{11}) / (B_8 + B_{11}) \tag{3}$$

式中: B_8 、 B_{11} 分别指 Sentinel-2B 数据的近红外波段 B_8 和短波红外波段 B_{11} 。

1.3 PROSAIL 辐射传输模型

PROSAIL 是用于生物物理性状反演的最常见辐射传输模型(RTM),实际上是 PROSPECT^[26] 和 SAIL^[27] 2 个核心模型的耦合。PROSPECT 使用成熟的光物质相互作用原理来模拟光与单片叶子的相互作用^[28]。SAIL 代表任意倾斜叶片的散射,基于 Suits 最初提出的单板模型。SAIL 的基本原理是植被冠层可以由与定向入射辐射相互作用的“板”表示。PROSAIL 通过使用 SAIL 表征植被冠层和使用 PROSPECT 表征叶片来整合这 2 种模型^[29]。本研究使用的 PROSPECT 模型为 PROSPECT-DyN,由 Wang 等^[30] 在 2018 年提出,该模型加入了叶片蛋白(Ccp)和纤维素+木质素(Ccl)对叶片反射率和透光率的影响。研究将 4SAIL 模型与 PROSPECT-DyN 模型耦合,得到 PROSAIL-DyN 模型,

其表达式如下

$$R = f_{\text{PROSAIL-DyN}}(N, C_{ab}, C_{ar}, C_w, C_{cp}, C_{cl}, S_{cde}, L_{AI}, A_{LA}, h_{opt}, t_{etas}, t_{etao}, p_{hi}, s_{kyl}, r_{soil}) \quad (4)$$

式中: R 代表样地反射率; N 为叶片结构参数; C_{ab} 为叶片叶绿素含量; C_{ar} 为叶片类胡萝卜素含量; C_w 为叶片水分含量, 即等效水厚度 EWT ; C_{cp} 为叶片蛋白质含量; C_{cl} 为叶片纤维素和木质素含量; S_{cde} 代表土壤反射率因子; L_{AI} 为林分叶面积指数; A_{LA} 为平均叶倾角; h_{opt} 为热点参数; t_{etas} 为太阳天顶角; t_{etao} 为观测天顶角; p_{hi} 为方位角; s_{kyl} 为天空漫辐射参量; r_{soil} 为土壤反射率。

1.4 模型参数敏感性分析

敏感性分析可以准确分析各输入参数对冠层反射率的敏感性, 对于分析和改进模型结构, 模型的构建优化, 以及模型参数反演等方面都有着非常重要的意义^[31]。本研究采用一种基于方差的改进 Sobol 算法进行模型参数敏感性分析^[32-33]。其原理如下

模型表达式为 $Y = f(x)$, Y 为模型输出的结果, $X = (X_1, X_2, \dots, X_k)$ 为模型输入的参数向量, 模型的总方差可表示如下

$$V(Y) = \sum_{i=1}^k V_i + \sum_{i=1}^k \sum_{j=i+1}^k (V_{ij} + \dots + V_{i, \dots, k}) \quad (5)$$

式中: V_i 即参数 X_i 的方差, $V(Y)$ 即总方差; V_{ij} 即参数 X_i 和 X_j 相互作用的方差, 则模型参数 X_i 的一阶敏感度 S_i 和总敏感度 S_{Ti} 可表示如下

$$S_i = V_i / V(Y) = V(E(Y|X_i)) / V(Y) \quad (6)$$

$$S_{Ti} = S_1 + \sum_{j \neq i} S_{ij} + \dots = E(V(Y|X_{\sim i})) / V(Y) \quad (7)$$

通过构建 2 个独立的 (N, k) 大小的采样矩阵 \mathbf{P} 和 \mathbf{Q} 来计算参数 X_i 的一阶敏感度 S_i 和总敏感度 S_{Ti} , 其中 N 代表采样数, k 代表模型变量数。矩阵 \mathbf{P} 和 \mathbf{Q} 中的各行与模型的一个输入参数向量 \mathbf{X} 对应。则利用蒙特卡洛方法求解 $V(Y)$ 、 S_i 和 S_{Ti} 的近似表达式为

$$\hat{f}_0 = 1/N \sum_{j=1}^N f(\mathbf{P})_j \quad (8)$$

$$\hat{V}(Y) = 1/N \sum_{j=1}^N (f(\mathbf{P})_j)^2 - \hat{f}_0^2 \quad (9)$$

$$\hat{S}_i = 1/N \sum_{j=1}^N (f(\mathbf{Q})_j (f(\mathbf{P}_Q^{(i)})_j - f(\mathbf{P})_j) / \hat{V}(Y) \quad (10)$$

$$\hat{S}_{Ti} = 1/2N \sum_{j=1}^N (f(\mathbf{P})_j - f(\mathbf{P}_Q^{(i)})_j)^2 / \hat{V}(Y) \quad (11)$$

式中: \hat{f}_0 即模型输出的均值; $\mathbf{P}_Q^{(i)}$ 是将矩阵 \mathbf{Q} 第 i 列的数据替换矩阵 \mathbf{P} 中第 i 列数据而形成的新矩阵。 $N(k+2)$ 即模型的模拟次数。对 S_{Ti} 归一化处理以避免因交互作用影响导致 S_{Ti} 之和 > 1 , 进而对模型各参数的总敏感度进行评价^[14]。

表 3 为 PROSAIL-DyN 模型敏感性分析的参数配置, 其中 N 、 C_{ab} 、 C_{ar} 、 C_{cp} 、 C_{cl} 、 EWT 、 LAI 和 ALA 的取值范围是实测数据及相关文献来设定的。在 ARTMO 软件的全局敏感性分析 (GSA, global sensitivity analysis) 模块, 将样本数设置为 4 000, 根据参数配置利用 PROSAIL-DyN 模型正向模拟出光谱分辨率为 1 nm 的冠层光谱, 再利用改进 Sobol 算法计算各模型参数的总敏感度。

表 3 敏感性分析中 PROSAIL-DyN 参数设置

Table 3 PROSAIL parameter setting in sensitivity analysis

参数	范围
叶片结构参数(N)	1~1.5
叶绿素含量(Cab)/(μg·cm ⁻²)	20~70
类胡萝卜素含量(Car)/(μg·cm ⁻²)	1~5
叶片蛋白质含量(Ccp)/(g·cm ⁻²)	0.000 5~0.001
叶片纤维素和木质素含量(Ccl)/(g·cm ⁻²)	0.003~0.006
等效水厚度(EWT)/(g·cm ⁻²)	0.005~0.008
叶面积指数(LAI)/(m ² ·m ⁻²)	2~6
平均叶倾角(ALA)/(°)	30~50

1.5 查找表反演

查找表 (LUT) 反演方法是一种概念简单的技术, 可以很容易地实现, 并产生与迭代方法相似的结果。在反演之前, 可在模型规定的变化范围内, 通过使用不同的输入参数组合进行正演模拟建立 LUT, 反演时采样线性或非线性内插的方法求解各参数值^[10]。结合实地调查数据和相关文献, 并基于 PROSAIL-DyN 模型全局敏感性分析结果, 得到含水量与冠层反射率的查找表。在 ARTMO 的 LUT 反演工具箱内, 选取 RMSE 作为代价函数 (cost function, CF) 并引入 5% 的高斯噪声, 筛选 RMSE (公式中用 R_{MSE} 表示) 数值最小的前 5% 参数值的均值作为选取参数的反演最优值。

$$R_{MSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (R_{\text{model}} - R_{S2B})^2} \quad (12)$$

式中: n 为参与反演的影像波段数, R_{model} 为模型模拟反射率值; R_{S2B} 为 Sentinel-2B 影像反射率值。

1.6 模型精度评价

结合样地实测数据, 通过决定系数 R^2 和均方根误差 RMSE 对 PROSAIL 模型的反演精度进行评价。

(1) 决定系数

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (13)$$

(2) 均方根误差

$$R_{MSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (14)$$

式中: y_i 为样地实测值, \hat{y}_i 为模型反演值, \bar{y}_i 为样地实测的均值, n 表示样本数。

2 结果与分析

2.1 全局敏感性分析

基于改进 Sobel 算法的 PROSAIL-DyN 模型的全局敏感性分析结果如图 2 所示。由图 2 可知, 各输入参数在不同波段范围具有不同的总敏感度。其中, 叶片结构参数 N 主要影响 450~2 500 nm 的冠层反射率, 其总敏感度整体低于 20%; 叶绿素含量 Cab 主要影响 450~780 nm 的冠层反射率, 在 580 nm 附近存在一个敏感峰; 等效水厚度 EWT 主要影响 1 100 nm 以后的冠层反射率, 对可见光区域冠层反射率无影响, 其中在 1 400、1 885、1 945 nm 附近各出现 1 个较高的敏感峰; 类胡萝卜素 Car 主要影响 450~530 nm 的冠层反射率; 蛋白质含量 Ccp 主要影响 700 nm 以后的冠层反射率, 总体敏感度 < 15%; 纤维素含量和木质素含量 Ccl 主要影响 500~600 nm 以及 700 nm 以后的冠层反射率, 特别是 750~1 310 nm, 此处总敏感度均在 60% 以上; 叶面积指数 LAI 几乎影响全部范围的冠层反射率, 尤其是在 400~700 nm 和 1 350~2 500 nm, 总敏感度较高; 平均叶倾角 ALA 同 LAI 类似几乎影响全部范围的光谱反射率, 影响较大区域为 400~500 nm。

2.2 查找表的建立

基于模型参数的敏感性分析结果, 并结合样地

实测和相关文献, 建立适用于毛竹林含水量反演的 PROSAIL-DyN 模型参数设置表(表 4)。其中, N 为描述叶片内部细胞结构的参数, 和植物的种类和生长状态关系较为密切, 通常单子叶植物 N 的取值范围为 1~1.5, 双子叶植物 N 的取值范围为 1.5~2.5, 老化叶的 N 取值高于 2.5^[34]。本研究参考前人文献^[20], 将 N 设置为 1.04。基于参数设置, 利用 ARTMO 软件正向模拟得到匹配 Sentinel-2B 传感器的 LAI-EWT 的光谱反射率查找表, 共 12 864 种组合(图 3)。

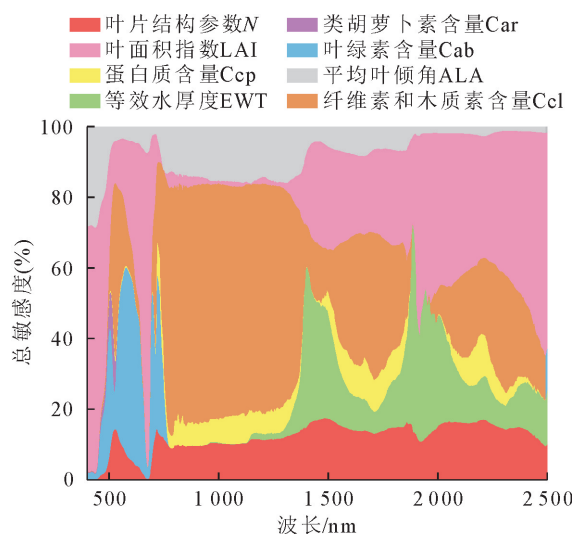


图 2 PROSAIL-DyN 模型全局敏感性分析结果

Fig. 2 Global Sensitivity Analysis Results of PROSAIL-DyN Model

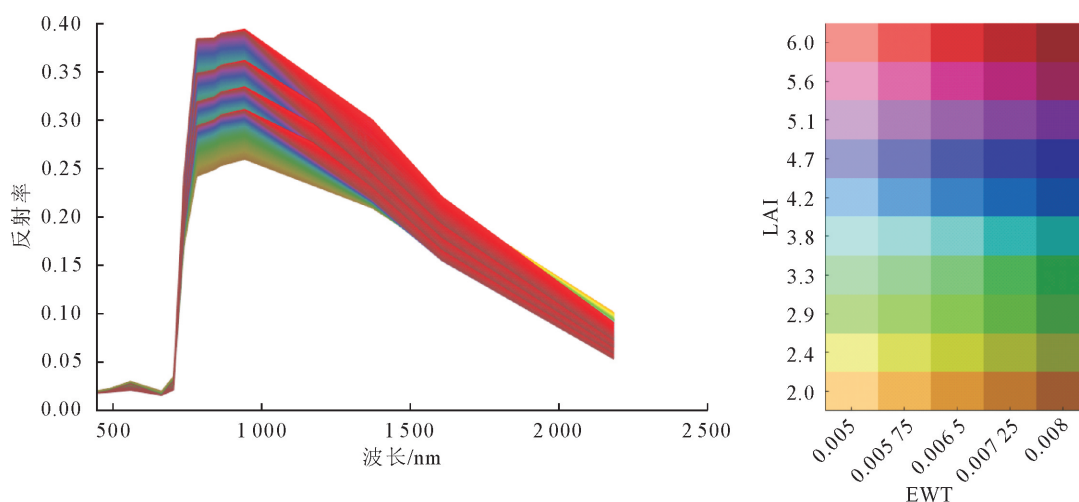


图 3 基于参数设置模拟的反射率(ARTMO 软件)

Fig. 3 Parameter-based setting of simulated reflectivity (ARTMO software)

2.3 反演结果

通过 ARTMO 查找表反演工具箱, 得到 PROSAIL-DyN 模型反演结果(图 4a—图 4c)。由模型反演结果可知, 叶面积指数 LAI 反演的 R^2 为 0.557, RMSE 为 1.188 m^2/m^2 , 且 $\text{LAI} > 3$ 时,

PROSAIL 模型反演值大部分低于实测值, 存在明显低估现象(图 4a)。叶片水分含量 EWT 反演的 R^2 为 0.321, RMSE 为 0.869 mg/cm^2 , 精度略低(图 4b)。冠层含水量 CWC 反演的 R^2 为 0.536, RMSE 为 0.059 kg/m^2 , 其反演精度要优于叶片水

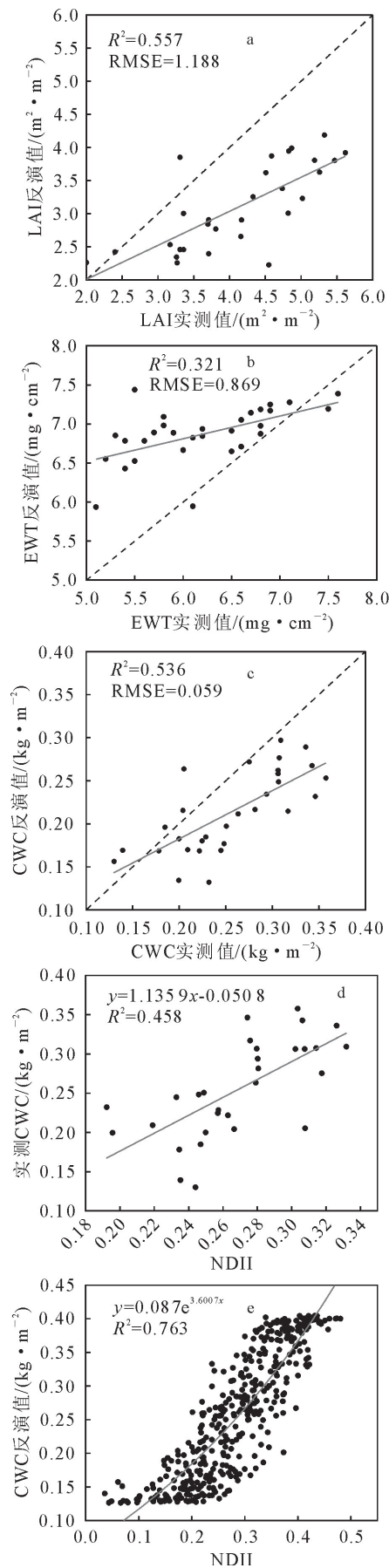


图 4 反演结果
Fig. 4 Inversion results

表 4 PROSAIL-DyN 模型参数设置

Table 4 PROSAIL-DyN model parameter setting table		
模型参数	取值范围	步长
叶片结构参数(N)	1.04 ^[20]	—
叶绿素含量(Cab)/(μg·cm ⁻²)	40	—
类胡萝卜素含量(Car)/(μg·cm ⁻²)	3	—
叶片蛋白质含量(Ccp)/(g·cm ⁻²)	0.000 7	—
叶片纤维素和木质素含量(Ccl)/(g·cm ⁻²)	0.003~0.006	0.001
等效水厚度(EWT)/(g·cm ⁻²)	0.005~0.008	0.000 2
叶面积指数(LAI)/(m ² ·m ⁻²)	2~6	0.02
平均叶倾角(ALA)/(°)	40	—
土壤亮度系数(psdil)	0.2	—
漫反射系数(Diff)	0.15 ^[20]	—
热点参数(hspot)	0.01	—
观测天顶角(tetao)/(°)	0	—
方位角(Az)/(°)	86.17	—
太阳天顶角(tetas)/(°)	20.73	—

分含量 EWT(图 4c)。实测的 CWC 与 NDII 呈现线性关系,其 R^2 为 0.458,精度低于 PROSAIL 模型(图 4d)。此外本研究还在研究区域随机选取 400 个像元点,计算其 NDII 并与 CWC 反演结果进行拟合,结果见图 4e。可以发现反演 CWC 与 NDII 整体上呈现指数关系,拟合 R^2 高达 0.763,也佐证了 CWC 反演结果的可靠性。

2.4 区域冠层水含量分布图绘制

基于 Sentinel-2B 影像和 PROSAIL 模型对 2021 年 7 月研究区毛竹林冠层含水量反演,得到区域冠层含水量空间分布图(图 5a),可知此区域毛竹林的冠层含水量主要分布于 1.25~4.09 g/m²。对比图 5b 发现,CWC 反演结果与 NDII 在空间分布上具有较好的一致性,在一定程度说明区域冠层含水量反演的有效性。图 6 详细显示其中一块采样区域反演的叶片含水量、LAI 和冠层含水量结果。基于相关关系建立的统计模型进行含水量反演,往往需要精准的实测值标定,稳定性相对较弱且普适性不够;而基于 PROSAIL 模型等物理模型反演含水量不需要标定,迁移性和鲁棒性更强,比较适合大范围的冠层含水量的反演^[10]。本研究基于物理模型实现冠层含水量空间分布图的绘制,有助于区域毛竹林干旱胁迫状况的监测,对于野火预防和病虫害防治也具有重要意义。

3 结论与讨论

冠层含水量是监测和评价毛竹林健康状况的重要指标。本研究基于 Sentinel-2B 影像和实地调查

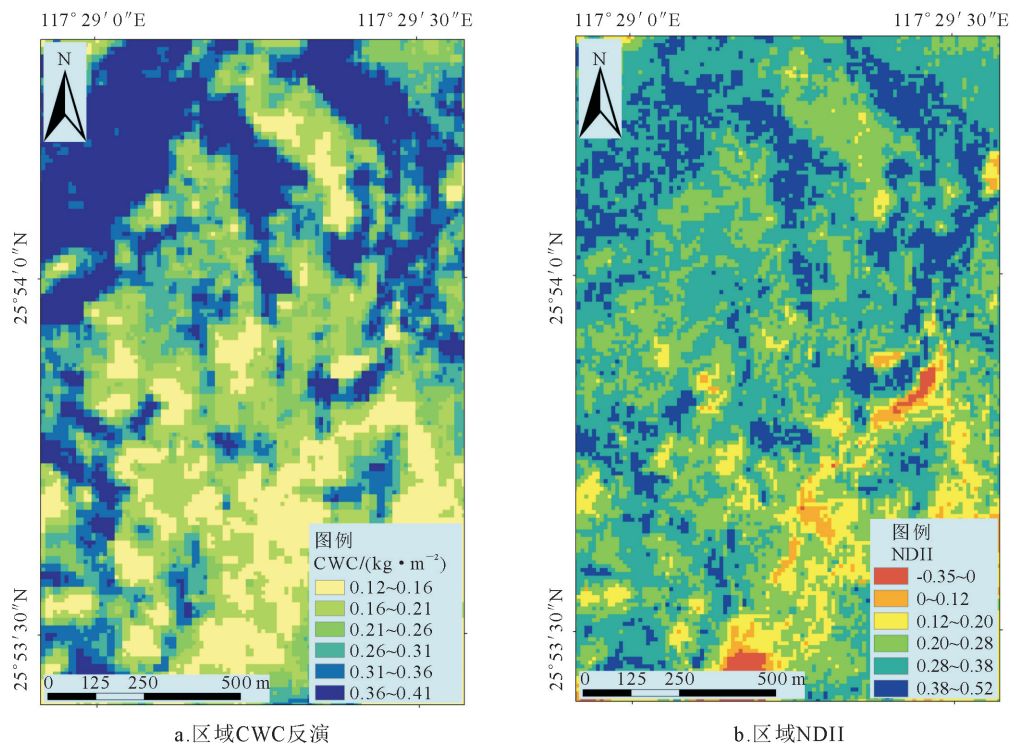


图5 研究区域 CWC 反演与 NDII 对比

Fig. 5 Comparison of CWC inversion maps with NDII in the study area

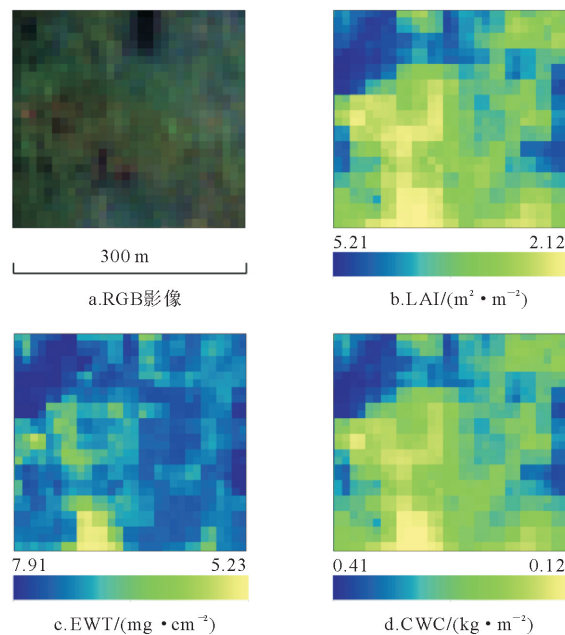


图6 区域 LAI、EWT 和 CWC 反演结果

Fig. 6 Plot of regional LAI, EWT, and CWC inversion results

数据,利用 PROSAIL 模型和查找表反演算法联合反演 EWT 和 LAI,进而得到 CWC,并利用 Sentinel-2B 影像实现了区域毛竹林冠层含水量的定量反演,为监测毛竹林干旱胁迫和健康状况提供新的技术和方法。

基于 PROSAIL 模型的全局敏感性分析结果可知,等效水厚度对于冠层反射率的影响区域主要分

布在 1 100 nm 以后,对于可见光区域几乎无影响。这与马建威等^[32]、Pietr 等^[35]学者的研究一致,短波红外(SWIR)和近红外(NIR)波长范围对于反演等效水厚度是必需的。

基于 PROSAIL 模型反演 LAI 和 CWC 的 R^2 分别为 0.557 和 0.536,该反演精度符合毛竹林地生长状况监测的要求。徐达松^[36]曾利用 PROSAIL

模型反演青海湖流域草原植被的冠层含水量,其 R^2 可达0.81,反演精度高于本研究。这与研究对象有关,相比与草原植被,毛竹林等森林植被的冠层结构更为复杂,受光照、观察几何、背景等混杂因素影响更大,其在冠层水平上的生化参数反演也较困难。

在本研究中,叶片水平 EWT 的反演精度较低,该结果与 Cheng 等^[3]的研究一致,使用 RTMs 反演 EWT 受到植被冠层结构的显著影响,导致估计过高或不足。叶片尺度生化参数反演的准确度低于冠层尺度生化参数,这与饶月明等^[10]、Liang 等^[37]、Omari 等^[38]学者的研究结果一致,LAI 的准确反演有助于提升冠层尺度生化参数的反演精度。

在本研究中还存在一些不足。基于物理模型的植被参数反演本质上是病态的,不同的输入参数组合可能会产生相似的光谱^[39]。为克服病态反演的影响,研究者探究了一系列的正则化原则,如数据融合、多反演算法集成等。机器学习算法具有出色的非线性数据拟合能力,被视为目前植被理化参数遥感监测和估算的最佳候选方法^[40]。而使用 PROSAIL 等 RTM 与机器学习方法相结合,可以产生混合反演过程,其兼具 RTM 提供的物理基础以及回归方法提供的计算效率和过程灵活的优势,已逐步应用到植被参数的反演研究中,例如 Aleixandre 等^[41]通过将 PROSAIL 与人工神经网络(artificial neural networks,ANN)相结合来反演叶面积指数;Daniel 等^[42]将 PROSAIL 与随机森林回归模型(random forest regression,RFR)相结合反演叶绿素含量。未来研究可将 PROSAIL 辐射传输模型与机器学习算法结合,进一步提升冠层含水量反演的精度和处理速度。此外,本研究采用的是多光谱影像数据,受波段数限制,无法选择对水含量最敏感的波长进行分析。随着高分五号等国产高光谱卫星的发射和应用,可以给毛竹林冠层含水量遥感监测提供更优质的数据源。

参考文献:

- [1] HOLZMAN M, RIVAS R, BAYALA M, *et al.* Measuring land surface temperature, near-infrared and short-wave infrared reflectance for estimation of water availability in vegetation[J]. *MethodsX*, 2021, 8.
- [2] 赵燕红, 侯鹏, 蒋金豹, 等. 植被生态遥感参数定量反演研究方法进展[J]. *遥感学报*, 2021, 25(11): 2173-2197.
ZHAO Y H, HOU P, JIANG J B, *et al.* Progress in quantitative inversion of vegetation ecological remote sensing parameters[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2021, 25(11): 2173-2197. (in Chinese)
- [3] YENBEN C, PABLO J Z, DAVID R, *et al.* Estimating vegetation water content with hyperspectral data for different canopy scenarios: relationships between AVIRIS and MODIS indexes[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 105(4): 354-366.
- [4] CHUVIECO E, COCERO D, AGUADO I, *et al.* Improving burning efficiency estimates through satellite assessment of fuel moisture content[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2004, 109(D14).
- [5] TARIN P, NICHOLAS R V, ROBERTA E M, *et al.* Landscape-scale variation in canopy water content of giant sequoias during drought[J]. *Forest Ecology and Management*, 2018: 419-420.
- [6] 张运林, 宋红, 胡海清. 云南 3 种乔木防火期内含水率变化及预测模型[J]. *西北林学院学报*, 2019, 34(1): 157-162.
ZHANG Y L, SONG H, HU H Q. Prediction model of moisture content of 3 trees species in Yunnan Province[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2019, 34(1): 157-162. (in Chinese)
- [7] CLEVERS J G P W, KOOISTRA L, SCHAEPMAN M E. Estimating canopy water content using hyperspectral remote sensing data[J]. *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*, 2010, 12(2): 119-125.
- [8] 王涛, 白铁成, 朱彩蝶, 等. 基于近红外光谱多种预处理的胡杨叶片含水量预测对比[J]. *西北林学院学报*, 2020, 35(5): 173-179.
WANG T, BAI T C, ZHU C D, *et al.* Prediction and comparison of leaf water content of *Populus euphratica* based on multiple pretreatment of near infrared spectrum[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2020, 35(5): 173-179. (in Chinese)
- [9] 刘二华, 周广胜, 周莉, 等. 夏玉米不同生育期叶片和冠层含水量的遥感反演[J]. *应用气象学报*, 2020, 31(1): 52-62.
LIU E H, ZHOU G S, ZHOU L, *et al.* Remote sensing inversion of leaf and canopy water content in different growth stages of summer maize[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2020, 31(1): 52-62. (in Chinese)
- [10] 饶月明, 刘凯军, 黄华国, 等. 基于 INFORM 模型与 GEE 的根河火烧迹地冠层含水量反演研究[J]. *中南林业科技大学学报*, 2021, 41(1): 80-91.
RAO Y M, LI K J, HUANG H G, *et al.* Inversion of canopy water content of fire scars in Genhe county based on INFORM model and Google Earth Engine[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2021, 41(1): 80-91. (in Chinese)
- [11] 江海英, 柴琳娜, 贾坤, 等. 联合 PROSAIL 模型和植被水分指数的低矮植被含水量估算[J]. *遥感学报*, 2021, 25(4): 1025-1036.
JIANG H Y, CHAI L N, JIA K, *et al.* Estimation of water content for short vegetation based on PROSAIL model and vegetation water indices[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2021, 25(4): 1025-1036. (in Chinese)
- [12] 项鑫. 基于 PROSAIL 模型的华北平原地区玉米冠层含水量遥感定向反演[J]. *河南城建学院学报*, 2019, 28(4): 72-79.
XIANG X. Quantitative retrieval of corn canopy water content in north China plain based on PROSAIL model[J]. *Journal of Henan University of Urban Construction*, 2019, 28(4): 72-79. (in Chinese)

- [13] 侯学会,王猛,刘思含,等. 基于 Prosail 模型和 Landsat 8 数据的小麦冠层含水量反演比较[J]. 麦类作物学报, 2018, 38(4): 493-497.
HOU X H, WANG M, LIU S H, *et al.* Comparison between Prosail model and Landsat 8 images in inversion of water content of wheat canopy[J]. Journal of Triticeae Crops, 2018, 38(4): 493-497. (in Chinese)
- [14] MARTIN D, KATJA B, MATTHIAS W, *et al.* Fitted PROSAIL parameterization of leaf inclinations, water content and brown pigment content for winter wheat and maize canopies[J]. Remote Sensing, 2019, 11(10): 1150.
- [15] 郑兴明, 丁艳玲, 赵凯, 等. 基于 Landsat 8 OLI 数据的玉米冠层含水量反演研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(12): 3385-3390.
ZHENG X M, DING Y L, ZHAO K, *et al.* Estimation of vegetation water content from Landsat 8 OLI data[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(12): 3385-3390. (in Chinese)
- [16] 冯超. 路域植被冠层含水量遥感定量反演及动态监测[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2016.
- [17] 严欣荣, 官凤英. 竹资源遥感监测研究进展[J]. 遥感技术与应用, 2020, 35(4): 731-740.
YAN X R, GUAN F Y. Overview of remote sensing monitoring of bamboo resources[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2020, 35(4): 731-740. (in Chinese)
- [18] 张佳奇, 余坤勇, 刘健, 等. 毛竹叶片重要营养元素的光谱敏感波段分析[J]. 西北林学院学报, 2019, 34(1): 77-82.
ZHANG J Q, YU K Y, LIU J, *et al.* Spectrally sensitive band analysis of important nutrient elements of *Phyllostachys pubescens* leaves[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2019, 34(1): 77-82. (in Chinese)
- [19] 俞欣妍, 刘健, 余坤勇, 等. 叶片—冠层尺度的毛竹林分光谱特征[J]. 西北林学院学报, 2017, 32(3): 7-13.
YU X Y, LIU J, YU K Y, *et al.* Spectral scale differences between leaf and canopy of spectral characteristics of *Phyllostachys pubescens* forest[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2017, 32(3): 7-13. (in Chinese)
- [20] 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 C Y, DU H Q, ZHOU G M, *et al.* 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. (in Chinese)
- [21] VERRELST J, ROMIJN E, KOOISTRA L. Mapping vegetation density in a Heterogeneous river floodplain ecosystem using pointable CHRIS/PROBA data[J]. Remote Sensing, 2012, 4: 2866-2889.
- [22] 张仓皓, 杨樟平, 谢巧雅, 等. 毛竹立竹度无人机遥感识别有效高度的研究[J]. 遥感技术与应用, 2020, 35(6): 1436-1446.
ZHANG C H, YANG Z P, XIE Q Y, *et al.* Study of effective height of the living bamboo density identification based on unmanned aerial vehicle (UAV) remote sensing[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2020, 35(6): 1436-1446. (in Chinese)
- [23] 罗天磊, 范少辉, 刘广路, 等. 闽中毛竹立地质量评价及分级研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2020, 40(7): 48-57.
LUO T L, FAN S H, LIU G L, *et al.* Study on site quality evaluation and classification of *Phyllostachys edulis* in central Fujian[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2020, 40(7): 48-57. (in Chinese)
- [24] JAN W V W, RALPH R R, CARL H K. Comparison of AVIRIS and Landsat ETM+ detection capabilities for burn severity[J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 92(3): 397-408.
- [25] 邓书斌. ENVI 遥感图像处理[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 386.
- [26] JACQUEMOUD S, BARET F. PROSPECT: a model of leaf optical properties spectra[J]. Remote Sensing of Environment, 1990, 34(2): 75-91.
- [27] VEROEF W. Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling: the SAIL model[J]. Remote Sensing of Environment, 1984, 16(2): 125-141.
- [28] DE SÁ NC, BARATCHI M, HAUSER L T, *et al.* Exploring the impact of noise on hybrid inversion of PROSAIL RTM on Sentinel-2 data[J]. Remote Sensing, 2021, 13(4): 648.
- [29] KATJA B, CLEMENT A, MARTIN D, *et al.* Evaluation of the PROSAIL model capabilities for future hyperspectral model environments: a review study[J]. Remote Sensing, 2018, 10: 85.
- [30] WANG Z H, ANDREW K S, ROSHANAK D, *et al.* Mapping forest canopy nitrogen content by inversion of coupled leaf-canopy radiative transfer models from airborne hyperspectral imagery[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2018, 253-254.
- [31] 王李娟, 牛铮. PROSAIL 模型的参数敏感性研究[J]. 遥感技术与应用, 2014, 29(2): 219-223.
WANG L J, NIU Z. Sensitivity analysis of vegetation parameters based on PROSAIL model[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2014, 29(2): 219-223. (in Chinese)
- [32] 马建威, 黄诗峰, 李纪人, 等. 改进 Sobol 算法支持下的 PROSAIL 模型参数全局敏感性分析[J]. 测绘通报, 2016(3): 33-35.
MA J W, HUANG S F, LI J R, *et al.* Global sensitivity analysis of parameters in the PROSAIL model based on modified Sobol's method[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2016(3): 33-35. (in Chinese)
- [33] ANDREA S, PAOLA A, IVANO A, *et al.* Variance based sensitivity analysis of model output design and estimator for the total sensitivity index[J]. Computer physics communications, 2010, 181(2): 259-270.
- [34] 蔡博峰, 绍霞. 基于 PROSPECT+SAIL 模型的遥感叶面积指数反演[J]. 国土资源遥感, 2007(2): 39-43.
CAI B F, SHAO X. Leaf area index retrieval based on remotely sensed data and PROSPECT + SAIL model[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2007(2): 39-43. (in Chinese)
- [35] PIETR C, STEPHANE F, STEFANO T, *et al.* Detecting vegetation leaf water content using reflectance in the optical domain[J]. Remote Sensing of Environment, 2001, 77(1): 22-33.

- 球科学进展,2013,28(7):774-782.
- JIA K, YAO Y J, WEI X Q. A review on fractional vegetation cover estimation using remote sensing[J]. *Advances in Earth Science*, 2013, 28(7): 774-782. (in Chinese)
- [23] 张熙川, 赵英时. 应用线性光谱混合模型快速评价土地退化的方法研究[J]. *中国科学院研究生院学报*, 1999, 16(2): 170-172.
- [24] 万军, 蔡运龙. 应用线性光谱分离技术研究喀斯特地区土地覆被变化—以贵州省关岭县为例[J]. *地理研究*, 2003, 22(4): 440-443.
- WAN J, CAI Y L. Applying linear spectral unmixing approach to the research of land cover change in Karst area: a case in Guanling county of Guizhou Province[J]. *Geographical Research*, 2003, 22(4): 440-443. (in Chinese)
- [25] 邓书斌. ENVI 遥感图像处理方法[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 347-349.
- [26] GREEN A A, CRAIG M D. Analysis of aircraft spectrometer data with logarithmic residuals: in proceedings[J]. *Environmental Science Mathematics*, 1985, 21(1): 111-119.
- [27] JOSEPH W. Automated spectral analysis: a geologic example using AVIRIS data, North Grapevine Mountains, Nevada[C]. Tenth Thematic Conference on Geologic Remote Sensing, Environmental Research Institute of Michigan, 1994.
- [28] 李慧, 陈建飞, 余明. 线性光谱混合模型的 ASTER 影像植被应用分析[J]. *地球信息科学*, 2005, 7(1): 103-106, 113-115.
- LI H, CHEN J F, YU M. Extracting vegetation coverage information from ASTER remote sensing data based on linear spectral immixture model [J]. *GEO-Information Science*, 2005, 7(1): 103-106, 113-115. (in Chinese)
- [29] 高云, 谢苗苗, 付梅臣, 等. 高原河谷城市植被时空变化及其影响因素——以青海省西宁市为例[J]. *生态学报*, 2014, 34(5): 1094-1104.
- CAO Y, XIE M M, FU M C, *et al.* Pattern dynamics of vegetation coverage plateau valley-city in the Western China: a case study Xining[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(5): 1094-1104. (in Chinese)
- [30] 徐珂, 邢艳秋, 常晓晴. 亚热带常绿针叶林光能利用率模型优化与总初级生产力估算[J]. *森林工程*, 2021, 37(5): 28-36.
- XU K, XING Y Q, CHANG X Q. Model optimization and GPP estimation of light energy utilization in subtropical evergreen coniferous forest[J]. *Forest Engineering*, 2021, 37(5): 28-36. (in Chinese)
- [31] JIAN P, LIU Y, HONG S, *et al.* Vegetation coverage change and associated driving forces in mountain areas of Northwestern Yunnan, China using RS and GIS[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2012, 184(8): 4787-4798.
- [32] 姚永慧, 张百平, 罗扬, 等. 格网算法在空间格局分析中的应用——以贵州景观空间格局分析为例[J]. *地球信息科学*, 2006, 8(1): 73-78.
- YAO Y H, ZHANG B P, LUO Y, *et al.* The application of grid computing method to the research of spatial pattern——an analysis of Karst landscape pattern in Guizhou[J]. *Geo-Information Science*, 2006, 8(1): 73-78. (in Chinese)
- [33] 国家林业和草原局. 国家森林城市评价指标: GB/T 37342—2019[S]. 北京: 中国国家标准化管理委员会, 2019.
- [34] 西安市自然资源和规划局(市林业局). 规划计划[EB/OL]. http://zygh.xa.gov.cn/ptl/def/def/index_954_6039.html.

(上接第 232 页)

- [36] 徐达松. 面向对象的草原植被参数反演方法及应用[D]. 成都: 电子科技大学, 2017.
- [37] LIANG L, ZHIHAO Q, SHUHE Z, *et al.* Estimating crop chlorophyll content with hyperspectral vegetation indices and the hybrid inversion method[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2016, 37(13/14): 2923-2949.
- [38] OMARI K, WHITE H P, STAENZ K, *et al.* Retrieval of forest canopy parameters by inversion of the PROFLAIR leaf-canopy reflectance model using the LUT approach[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2013, 6(2): 715-723.
- [39] 李小文. 定量遥感的发展与创新[J]. *河南大学学报: 自然科学版*, 2005, 35(4): 49-56.
- LI X W. Retrospect, prospect and innovation in quantitative remote sensing[J]. *Journal of Henan University: Natural Science*, 2005, 35(4): 49-56. (in Chinese)
- [40] 白丽. 基于高光谱数据的玉米 LAI 和叶绿素含量遥感反演方法的研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2020.
- [41] ALEIXANDRE V, BARET F, FERNANDO C. Optimal modalities for radiative transfer-neural network estimation of canopy biophysical characteristics: evaluation over an agricultural area with CHRIS/PROBA observations[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(2): 415-426.
- [42] DANIEL D, ANGELA L, DANIEL S, *et al.* Extraction of Plant physiological status from hyperspectral signatures using machine learning methods[J]. *Remote Sensing*, 2014, 6(12): 12247.