

基于 PROSAIL 模的 SPOT 影像 LAI 反演研究

闫文慧¹，周韦汝¹，杨东梅¹

1. 中国农业大学 土地科学与技术学院 北京 100083

摘 要：植被是陆地生态系统中能量流动和物质循环的核心组成部分，在维持区域生态平衡和全球生物地球化学循环中发挥着重要作用。叶面积指数（Leaf Area Index, LAI）作为表征植被冠层结构与生长状况的关键参数，对农业生产监测、生态环境评估以及气候变化研究具有重要意义。利用遥感手段实现 LAI 的快速、准确反演已成为当前植被遥感研究的重要方向。本研究以法国西南部 Sud-Ouest 农业区为研究对象，基于 SPOT 多光谱影像，采用 PROSAIL 辐射传输模型构建查找表（Look-Up Table, LUT），实现区域尺度 LAI 的反演。通过将物理模型模拟结果与遥感观测特征进行对齐，并引入偏差校正与空间一致性约束，有效缓解了由大气影响和模型简化带来的系统误差。反演结果利用独立获取的高精度 LAI 参考数据进行验证，结果表明，反演 LAI 与参考数据之间具有较好的一致性，决定系数（ R^2 ）为 0.811，均方根误差（RMSE）为 0.600。研究结果表明，PROSAIL 模型结合偏差校正策略的反演方法具有较好的适用性，为中分辨率遥感影像下植被结构参数反演提供了一种可行的物理建模思路。

关键词：LAI；遥感反演；PROSAIL 模型

1 引 言

植被作为陆地生态系统的重要组成部分，为地球上几乎所有生物的生存提供了物质基础和能量来源，在调节区域气候、维持水热平衡以及参与碳循环等方面发挥着关键作用。叶面积指数（Leaf Area Index, LAI）是描述植被冠层结构特征的重要生物物理参数，能够综合反映植被的生长状况、光合能力及其与环境之间的相互作用。因此，获取高精度 LAI 信息对于农业生产监测、生态系统评估以及全球变化研究具有重要的科学意义和应用价值。

随着遥感技术的发展，基于光学遥感影像反演 LAI 已成为植被遥感研究的热点方向。现有研究主要采用经验统计模型、半经验模型以及物理辐射传输模型等方法进行 LAI 估计。其中，经验统计方法依赖于植被指数与 LAI 之间的经验关系，具有实现简单、计算效率高的优点，但模型参数往往具有较强的区域依赖性，难以在不同时空尺度上保持稳定。半经验模型在一定程度上引入了物理约束，但仍难以全面刻画冠层内部的辐射传输过程。

相比之下，基于物理辐射传输模型的方法通过显式描述光在植被冠层中的传播与散射过程，具有较强的物理一致性和可解释性（Jacquemoud 等，1990；Verhoef，1984）。其中，PROSAIL 模型因其结构清晰、参数含义明确，被广泛应用于植被参数正演模拟与反演研究（Turner 等，1999）。然而，物理模型反演通常面临计算复杂度高、参数空间维度大以及同谱异物等问题，限制了其在大尺度遥感应应用中的推广。此外，大气影响、传感器特性差异以及模型假设简化等因素，也可能导致反演结果存在系统性偏差。

针对上述问题，本文以法国西南部典型农业区为研究对象，基于 SPOT 多光谱影像，构建 PROSAIL 模

型驱动的查找表 (Look-up Table, LUT) 反演框架, 并结合物理对齐与偏差校正策略, 提高了反演结果与实测数据之间的一致性, 实现区域尺度 LAI 的稳定反演。本研究旨在验证物理模型与偏差校正相结合的方法在中分辨率遥感影像下反演 LAI 的适用性, 为相关研究提供参考。

2 研究方法或原理

2.1 研究区概况

研究区位于法国西南部的 Sud-Ouest 地区。该区域地形平坦, 地表覆盖以大田作物为主, 包括玉米、小麦及向日葵等典型温带作物。区域气候属于温带海洋性气候, 降水分布均匀, 光照充足。由于农田空间分布规则且作物生长状态具有较好的代表性, 该区域被广泛用于光学遥感植被参数反演算法的验证与评估。

2.2 研究数据

2.2.1 遥感影像数据

研究采用 2002 年 7 月 20 日获取的 SPOT 卫星多光谱影像。影像空间分辨率 20 米, 包含红光 (Red) 和近红外 (NIR) 等关键波段。获取的数据为大气层顶 (TOA) 反射率, 计算得到的归一化植被指数 (NDVI) 范围分布在 0.138 至 0.749 之间。

2.2.2 验证数据

验证数据 (真值图) 来源于 2002 年 7 月 8 日获取的高精度 LAI 参考图。该数据通过地面实测样本与高空间分辨率影像外推获得, 其 LAI 值域范围主要分布在 0 至 6, 能够较好表征研究区内不同作物类型和生长状况。尽管该 LAI 参考图与 7 月 20 日获取的 SPOT 影像之间存在 12 天的时间差, 但在研究区所处的作物生长季中期 (7 月), 主要农作物的 LAI 变化速率相对平缓, 其空间分布格局在短时间尺度内保持较高稳定性。因此, 该 LAI 数据在空间分布层面上仍可作为评估 7 月 20 日影像反演结果合理性的参考基准。



图 1. 研究区 SPOT 卫星标准假彩色合成影像 (2002 年 7 月 20 日): 红色区域代表植被覆盖度较高的农田。

Fig.1 SPOT satellite standard false-color composite image of the study area (July 20, 2002): red areas represent cropland with high vegetation cover.

2.3 反演模型与方法

2.3.1 PROSAIL 5B 模型原理

PROSAIL 模型由叶片光学特性模型 PROSPECT 与冠层双向反射率模型 SAIL 耦合而成, 用以模拟均匀植被冠层在不同波段范围内的光谱反射特性。该模型通过将叶片尺度光学特性与冠层尺度辐射传输过程相结合, 实现从叶片到冠层的光谱模拟。

其中, PROSPECT 模型是在基于 Alen 平板模型发展的叶片光学模型, 假设叶片是由 N 层同性层叠加起来的, 中间层被 N-1 层空气间隔分割开来, 第一层上层即叶片表皮层存在非各向同性, 叶片内部, 光线为各向同性。PROSPECT 模型用以模拟叶片 400~2500nm 的光学特性, 包括 4 个结构和生化输入参数, 即叶片结构参数(N)、叶绿素含量(C_{ab})、干物质含量(C_m)和叶片等效厚度(C_w) (Jacquemoud 等, 2009)。PROSPECT 模型模拟计算得到的叶片光谱信息作为 SAIL 冠层辐射模型的输入参数。SAIL 模型是一种一维冠层辐射传输模型, 将植被冠层视为由叶片与空气组成的混合介质, 假设叶片方位角分布均匀, 并可考虑不同的叶片倾角分布形式, 用于模拟冠层的双向反射率特性, 包括 8 个输入参数, 分别为 LAI、平均叶倾角 (Average leaf inclination angle, ALA)、叶倾角分布函数 (Leaf inclination distribution function, LIDF)、土壤亮度参数 (Soil brightness parameter, psoil)、天空漫散射比例 (Fraction of diffuse skylight, skyl)、太阳天顶角 (Solar zenith angle, tts)、观测天顶角 (Viewing zenith angle, tto) 以及观测相对方位角 (Relative azimuth angle, psi)。

PROSAIL 5B 版本是 PROSPECT-5B 与 4SAIL 模型 (SAIL 模型通常采用其四流近似的数值实现形) 耦合形成的改进版本。其核心物理方程可表示为:

$$R_\lambda = f(LAI, LIDF, C_{ab}, C_w, C_m, N, Soil, Geometry)$$

2.3.2 查找表构建

为克服物理模型计算耗时长及同谱异物现象, 本研究通过构建查找表实现参数反演。通过 PROSAIL 5B 模型对不同参数组合进行正向模拟, 构建光谱参数对应关系库。LUT 采用等步长采样方式生成, 共包含约 15,000 组模拟样本。主要可变参数及其取值范围设置如下:

LAI: 在 0.01 至 8 范围内进行线性等步长采样;

C_{ab} : 取值范围设定在 20 至 80 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$, 以涵盖植被生长期的高叶绿素状态;

土壤背景: 通过两组基准土壤光谱线性组合模拟不同湿度的地表背景。

环境参数: 考虑到 SPOT 影像受大气散射影响较大, 将天空散射比 (Skyl) 设定为 0.25 以增强物理模拟的鲁棒性。

2.3.3 物理对齐与偏差校正

针对影像 NDVI 与物理模型模拟值之间的量级错位, 反演流程包括以下步骤:

特征归一化与增强: 利用影像实测 NDVI 的极值区间[0.14, 0.75], 通过非线性重缩放技术将其映射至 LUT 的物理响应区间;

查找表匹配: 基于最小距离准则, 在 LUT 中寻找与输入 NDVI 最匹配的 LAI 样本值;

系统误差校正: 引入均值增益修正因子 (Gain Correction), 旨在消除由于大气校正残留及传感器标定偏差导致的系统性低估现象; 其公式如下:

$$LAI_{final} = LAI_{inv} \left(\frac{\overline{LAI}_{ref}}{\overline{LAI}_{inv}} \right)$$

空间一致性约束: 应用高斯滤波算子 ($\sigma = 0.8$) 对反演结果进行空间平滑, 以降低由像元级光谱噪声引起的随机误差。

3 结果与讨论

3.1 精度评价

反演精度采用决定系数 (R^2) 与均方根误差 (RMSE) 进行定量评估。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (LAI_i^{ref} - LAI_i^{inv})^2}{\sum_{i=1}^n (LAI_i^{ref} - \overline{LAI_i^{ref}})^2}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (LAI_i^{inv} - LAI_i^{ref})^2}$$

其中, LAI_i^{ref} 表示第 i 个样本的参考 LAI 值, LAI_i^{inv} 表示对应的反演 LAI 值, $\overline{LAI_i^{ref}}$ 为参考 LAI 的平均值, n 为样本数量。

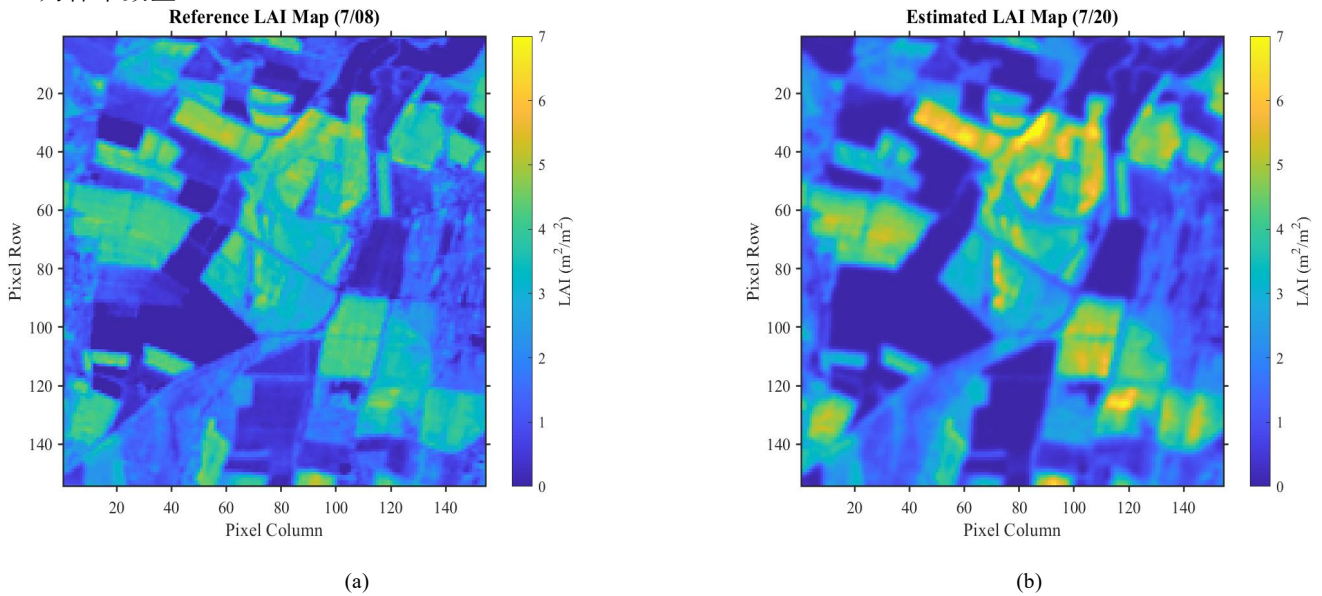


图 2. 研究区叶面积指数 (LAI) 空间分布参考值与物理反演结果对比: (a) 基于实测外推的参考真值图 (7 月 8 日); (b) 基于 PROSAIL 模型反演的估算结果图 (7 月 20 日)。

Fig.2 Comparison between reference values and physical inversion results of Leaf Area Index (LAI) spatial distribution in the study area. (a) Reference ground truth map based on measurement extrapolation (July 8); (b) Estimated LAI map inverted by the PROSAIL model (July 20).

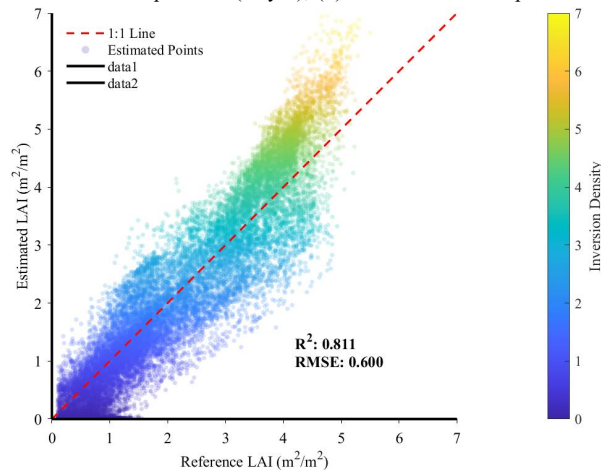


图 3. 基于 PROSAIL 模型反演的 LAI 估算值与参考真值统计验证散点图: R^2 达到 0.811, 显示出极佳的反演精度与模型稳定性。

Fig.3 Statistical validation scatter plot between PROSAIL-derived LAI estimates and reference ground truth. The R^2 of 0.811 demonstrates superior inversion accuracy and model robustness.

3.2 结果与讨论

在本研究的最终验证中, 反演结果与参考 LAI 之间的 R^2 达到 0.811, 表明反演结果能够较好地刻画研究

区 LAI 的空间分布特征,验证了基于 PROSAIL 物理模型并结合偏差校正策略的反演方法在复杂观测条件下的适用性。

4 结论

本文以法国西南部 Sud-Ouest 典型农业区为研究对象,基于 SPOT 多光谱遥感影像,构建了 PROSAIL 物理模型驱动的查找表反演框架,并结合物理对齐与偏差校正策略,实现了区域尺度 LAI 的反演与验证。

主要结论如下:

(1) 基于 PROSAIL 5B 模型构建的 LUT 方法能够有效描述植被冠层光谱响应与 LAI 之间的物理关系。在合理约束模型参数空间的前提下,该方法可用于中分辨率光学遥感影像下的 LAI 反演,为物理模型在区域尺度应用提供了可行路径。

(2) 通过引入观测特征重缩放和系统偏差校正,有效缓解了由大气影响、传感器特性差异及模型简化假设带来的系统性误差。反演结果与独立 LAI 参考数据之间具有较好的一致性,验证结果表明反演 LAI 的决定系数达到 0.811,均方根误差(RMSE)为 0.600,整体反演精度满足区域尺度植被监测的需求。

(3) 物理辐射传输模型与工程化校正策略相结合的方法,在一定程度上兼顾了物理一致性与实际遥感应用的稳定性,适用于作物类型相对单一、观测条件较为复杂的农业区域。

尽管本文方法在研究区内取得了较好的反演效果,但仍存在一定局限性。一方面,查找表构建过程中部分 PROSAIL 参数采用固定值处理,可能限制了模型对不同作物类型和生长阶段的适应能力;另一方面,验证数据与遥感影像之间存在一定时间差,可能对反演精度产生影响。未来研究可通过引入多时相遥感影像、扩展参数采样范围以及结合多角度或多源数据,进一步提升 LAI 反演的精度与适用性。

参考文献(References)

- [1] Jacquemoud S, Baret F. PROSPECT: A model of leaf optical properties spectra [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1990, 34(2): 75-91.
- [2] Verhoef 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.
- [3] Jacquemoud S, Verhoef W, Baret F, et al. PROSPECT + SAIL models: A review of use for vegetation characterization [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113: S56-S66.
- [4] Combal B, Baret F, Weiss M, et al. Retrieval of canopy biophysical variables from remote sensing data: Problems and a proposed solution [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 84(1): 1-15.
- [5] Chen J M, Pavlic G, Brown L, et al. Derivation and validation of Canada-wide coarse-resolution leaf area index maps using high-resolution satellite imagery and ground measurements [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 80(1): 165-184.
- [6] Turner D P, Cohen W B, Kennedy R E, et al. Relationships between leaf area index and Landsat TM spectral vegetation indices across three temperate zone sites [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1999, 70(1): 52-68.
- [7] Féret J B, François C, Asner G P, et al. PROSPECT-4 and 5: Advances in the leaf optical properties model separating photosynthetic pigments [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(6): 3030-3043.

Retrieval of Leaf Area Index from SPOT Imagery Based on the PROSAIL Radiative Transfer Model

Yan Wenhui¹, Zhou Weiru¹, Yang Dongmei¹

1. College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100083, China

Abstract: Vegetation is a core component of terrestrial ecosystems, playing a critical role in energy flow and matter cycling, and is essential for maintaining regional ecological balance and global biogeochemical cycles. The Leaf Area Index (LAI), a key parameter characterizing vegetation canopy structure and growth status, is of great importance for agricultural monitoring, ecological assessment, and climate change studies. Rapid and accurate retrieval of LAI using remote sensing techniques has therefore become a major focus in vegetation remote sensing research.

In this study, the Sud-Ouest agricultural region in southwestern France was selected as the study area. Based on SPOT multispectral imagery, a look-up table (LUT) was constructed using the PROSAIL radiative transfer model to retrieve LAI at the regional scale. By matching physically based model simulations with remote sensing observations and incorporating bias correction and spatial consistency constraints, systematic errors caused by atmospheric effects and model simplifications were effectively reduced.

The retrieved LAI was validated using independently acquired high-accuracy LAI reference data. The results indicate a strong agreement between the retrieved and reference LAI, with R^2 of 0.811 and a root mean square error (RMSE) of 0.600. These findings demonstrate that the PROSAIL-based retrieval approach combined with bias correction strategies is well suited for LAI estimation, providing a feasible physically based modeling framework for vegetation structural parameter retrieval from medium-resolution remote sensing imagery.

Key words: Leaf Area Index (LAI); remote sensing inversion; radiative transfer modeling; PROSAIL

附件一 正向模拟

PROSPECT (PROSPECT-D)、SIP-Leaf 模型模拟给定不同叶绿素、含水量、干物质含量的叶片反射率透过率，记录参数表格和图片。

表 1 不同叶绿素条件下模型参数设置

Table 1 Model parameter settings under different chlorophyll conditions

Parameter	Symbol	Unit	Min	Max	Default
Leaf structure coefficient	N	—	—	—	1.2
Chlorophyll a+b content	Cab	$\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$	0	100	—
Equivalent water thickness	Cw	$\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$	—	—	0.015
Dry matter content	Cm	$\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$	—	—	0.009
Carotenoid content	Car	$\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$	—	—	10
Anthocyanin content	Anth	$\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$	—	—	1
Brown pigments content	Cbrown	$\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$	—	—	0

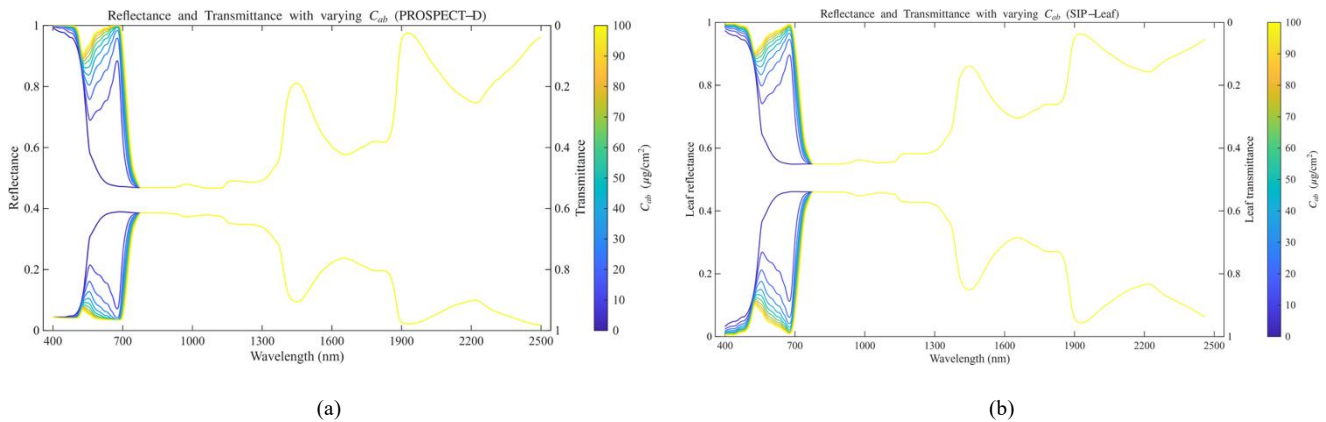


图 1. 不同叶绿素含量下叶片光学特性的模型模拟结果对比：(a) PROSPECT-D 模型模拟的叶片反射率与透过率光谱；(b) SIP-Leaf 模型模拟的叶片反射率与透过率光谱。

Fig.1 Comparison of model simulation results of leaf optical properties under different chlorophyll contents. (a) Reflectance and transmittance spectra simulated by the PROSPECT-D model; (b) Reflectance and transmittance spectra simulated by the SIP-Leaf model.

表 2 不同含水量条件下模型参数设置

Table 2 Model parameter settings under different Equivalent water thickness conditions

Parameter	Symbol	Unit	Min	Max	Default
Leaf structure coefficient	N	—	—	—	1.2
Chlorophyll a+b content	Cab	$\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$	—	—	60
Equivalent water thickness	Cw	$\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$	0.004	0.032	—
Dry matter content	Cm	$\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$	—	—	0.009
Carotenoid content	Car	$\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$	—	—	20
Anthocyanin content	Anth	$\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$	—	—	0
Brown pigments content	Cbrown	$\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$	—	—	0

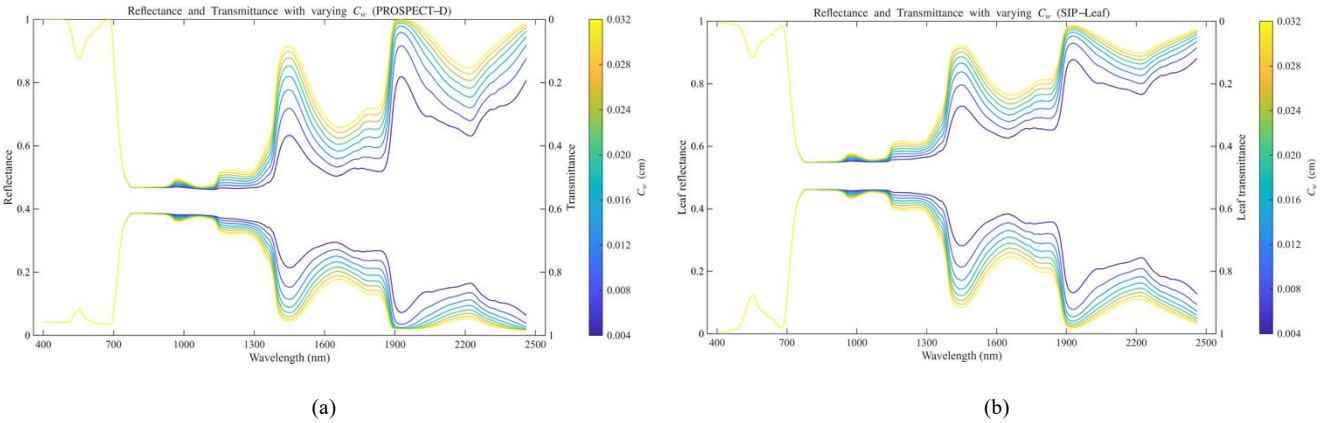


图 2. 不同含水量条件下叶片光学特性的模型模拟结果对比: (a) PROSPECT-D 模型模拟的叶片反射率与透过率光谱; (b) SIP-Leaf 模型模拟的叶片反射率与透过率光谱。

Fig.2 Comparison of model simulation results of leaf optical properties under different Equivalent water thickness contents. (a) Reflectance and transmittance spectra simulated by the PROSPECT-D model; (b) Reflectance and transmittance spectra simulated by the SIP-Leaf model.

表 3 不同干物质条件下模型参数设置

Table 3 Model parameter settings under different dry matter conditions

Parameter	Symbol	Unit	Min	Max	Default
Leaf structure coefficient	N	—	—	—	1.2
Chlorophyll a+b content	Cab	$\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$	—	—	60
Equivalent water thickness	Cw	$\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$	—	—	0.009
Dry matter content	Cm	$\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$	0.002	0.012	—
Carotenoid content	Car	$\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$	—	—	20
Anthocyanin content	Anth	$\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$	—	—	0
Brown pigments content	Cbrown	$\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$	—	—	0

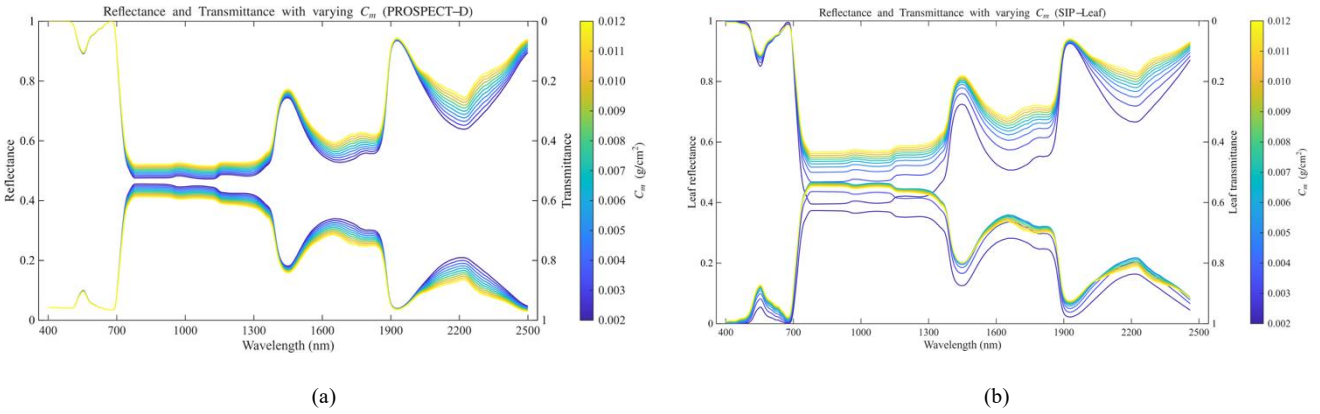


图 3. 不同干物质含量下叶片光学特性的模型模拟结果对比: (a) PROSPECT-D 模型模拟的叶片反射率与透过率光谱; (b) SIP-Leaf 模型模拟的叶片反射率与透过率光谱。

Fig.3 Comparison of model simulation results of leaf optical properties under different dry matter contents. (a) Reflectance and transmittance spectra simulated by the PROSPECT-D model; (b) Reflectance and transmittance spectra simulated by the SIP-Leaf model.

PROSAILL 模型模拟不同叶绿素、叶面积, 入射观测参数下的主平面、垂直主平面的反射率, 记录参数表格和图片。

表 4 不同叶绿素条件下 PROSAILL 模型参数设置

Table 4 PROSAIL model parameter settings under different chlorophyll conditions

Parameter	Symbol	Unit	Min	Max	Default
Leaf structure coefficient	N	–	–	–	1.5
Chlorophyll a+b content	Cab	$\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$	10	60	–
Equivalent water thickness	Cw	$\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$	–	–	0.01
Dry matter content	Cm	$\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$	–	–	0.009
Carotenoid content	Car	$\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$	–	–	8
Anthocyanin content	Ant	$\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$	–	–	0
Brown pigments content	Cbrown	$\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$	–	–	0
Leaf area index	LAI	–	–	–	2.0

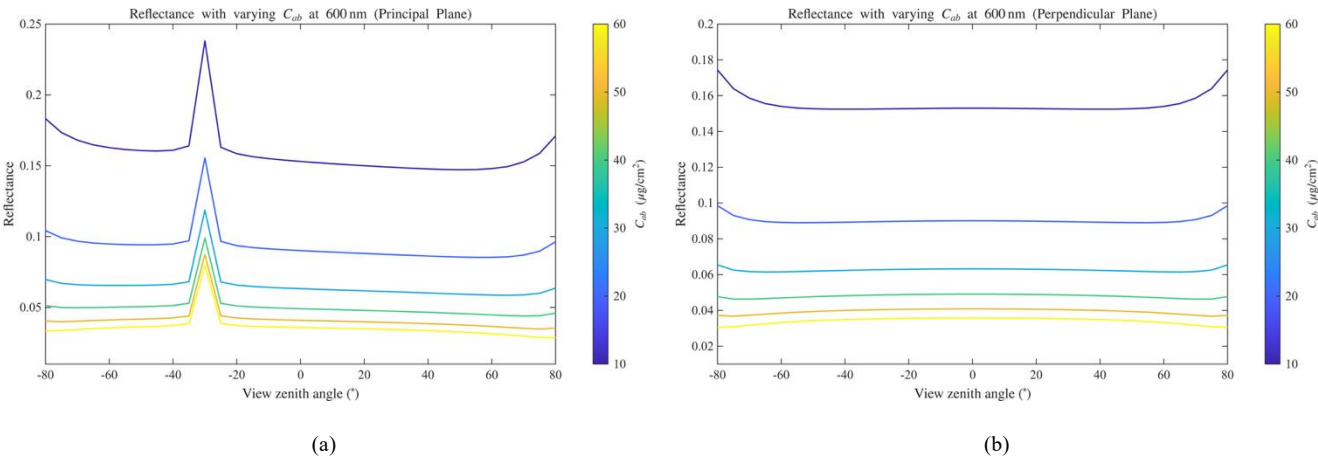


图 4. 不同叶绿素含量下 600 nm 波段冠层方向反射特性的模型模拟结果：(a) 主平面反射率；(b) 垂直主平面反射率。

Fig.4 Model-simulated canopy directional reflectance at 600 nm under different chlorophyll contents. (a) reflectance in the principal plane; (b) reflectance in the perpendicular plane.

表 5 不同叶面积指数条件下 PROSAILL 模型参数设置

Table 5 PROSAIL model parameter settings under different leaf area index conditions

Parameter	Symbol	Unit	Min	Max	Default
Leaf structure coefficient	N	–	–	–	1.5
Chlorophyll a+b content	Cab	$\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$	–	–	40
Equivalent water thickness	Cw	$\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$	–	–	0.01
Dry matter content	Cm	$\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$	–	–	0.009
Carotenoid content	Car	$\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$	–	–	8
Anthocyanin content	Ant	$\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$	–	–	0
Brown pigments content	Cbrown	$\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$	–	–	0
Leaf area index	LAI	–	0.5	3.0	–

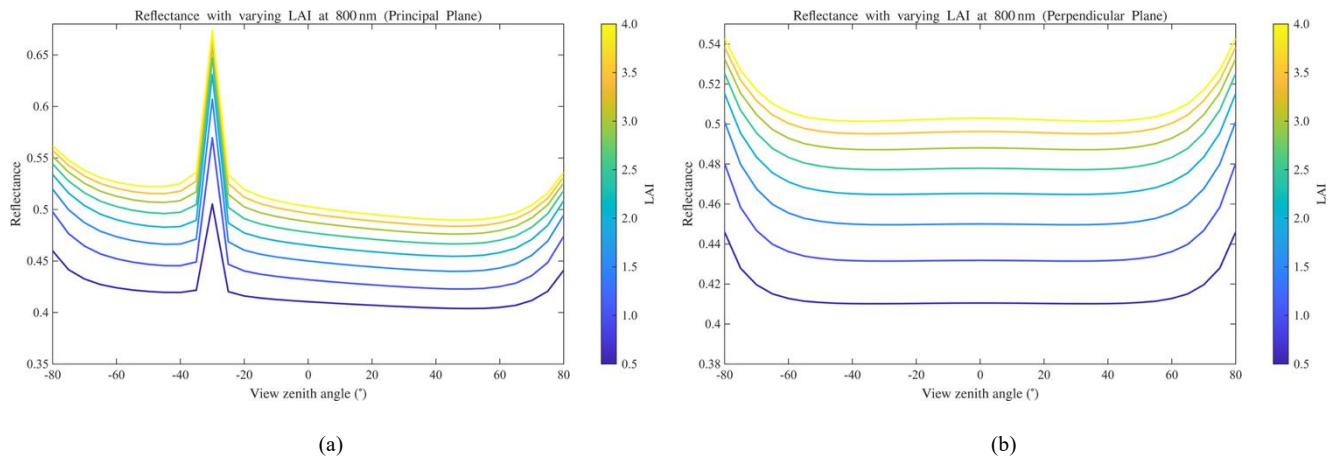


图 5. 不同叶面积指数条件下 800 nm 波段冠层方向反射特性的模型模拟结果：(a) 主平面反射率；(b) 垂直主平面反射率。

Fig.5 Model-simulated canopy directional reflectance at 800 nm under different Leaf area index. (a) reflectance in the principal plane; (b) reflectance in the perpendicular plane.

附件二 参数反演

基于 PROSPECT 模型的叶片尺度叶绿素参数反演；

fitted parameters (will appear AFTER running the model)					
Cab (ug cm ⁻²)	26. 91762	40. 94832	34. 99846	29. 82066	35. 51839
Cw (mg cm ⁻²)	0. 009	0. 009	0. 009	0. 009	0. 009
Cdm (mg cm ⁻²)	0. 012	0. 012	0. 012	0. 012	0. 012
Cs (fraction)	2. 22E-14	2. 22E-14	2. 22E-14	2. 22E-14	2. 22E-14
Cca (ug cm ⁻²)	5	5	5	5	5
N (dimensionless)	1. 4	1. 4	1. 4	1. 4	1. 4
RMSE (mod-meas spectra)	0. 029808	0. 021378	0. 017261	0. 017386	0. 033386

图 6. PROSPECT 模型叶片尺度叶绿素参数反演结果

Fig.6 Inversion results of leaf chlorophyll content based on the PROSPECT model at leaf scale.

基于 PROSAIL 模型的 Cab, Cw, Cdm 反演；

fitted parameters(will appear AFTER running the model)										
B	0. 5	0. 5	0. 5	0. 5	0. 5	0. 5	0. 5	0. 5	0. 5	0. 5
lat	43. 50638643	43. 50638643	43. 50638643	43. 50638643	43. 50638643	43. 50638643	43. 50638643	43. 50638643	43. 50638643	43. 50638643
lon	1. 237392698	1. 237392698	1. 237392698	1. 237392698	1. 237392698	1. 237392698	1. 237392698	1. 237392698	1. 237392698	1. 237392698
SMp	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Cab (ug cm ⁻²)	3. 15618469	3. 128762063	3. 128762063	3. 34794584	5. 591556369	9. 268671505	14. 56982561	13. 87069216	15. 69259806	18. 68679195
Cw (g cm ⁻²)	0. 0001	0. 0001	0. 0001	0. 0001	0. 0001	0. 0001	0. 0001	0. 0001	0. 0001	0. 0001
Cdm (g cm ⁻²)	0. 04128051	0. 042809172	0. 042809172	0. 043504562	0. 040447673	0. 039485219	0. 02797078	0. 032578214	0. 038991198	0. 041188859
Cs (a. u)	0. 1	0. 1	0. 1	0. 1	0. 1	0. 1	0. 1	0. 1	0. 1	0. 1
Cca (ug cm ⁻²)	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Cant	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N (dimensionless)	1. 5	1. 5	1. 5	1. 5	1. 5	1. 5	1. 5	1. 5	1. 5	1. 5
LAI	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
LIDFa	-0. 35	-0. 35	-0. 35	-0. 35	-0. 35	-0. 35	-0. 35	-0. 35	-0. 35	-0. 35
LIDFb	-0. 15	-0. 15	-0. 15	-0. 15	-0. 15	-0. 15	-0. 15	-0. 15	-0. 15	-0. 15
RMSE (mod-meas spectra)	0. 002552375	0. 002873291	0. 002873291	0. 002569622	0. 007147812	0. 009932129	0. 010978372	0. 010332366	0. 008234349	0. 005556711

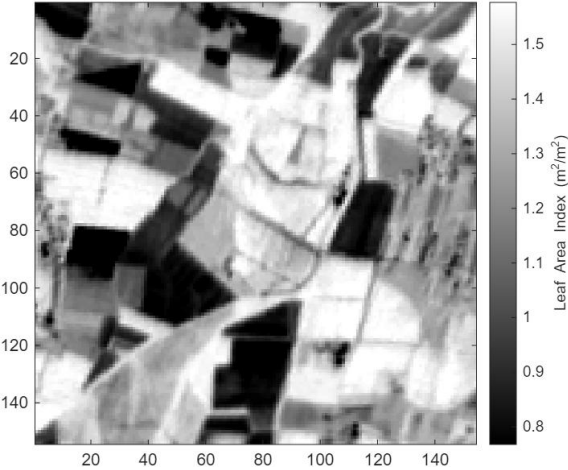
图 7. PROSAIL 模型冠层尺度叶绿素参数 (Cab, Cw, Cdm) 反演结果

Fig.7 Inversion results of canopy-scale chlorophyll parameters (Cab, Cw, Cdm) based on the PROSAIL model.

基于 PROSAIL 模型的 LAI 反演：

fitted parameters(will appear AFTER running the model)										
B	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
lat	43.50638643	43.50638643	43.50638643	43.50638643	43.50638643	43.5063864	43.5063864	43.5063864	43.5063864	43.5063864
lon	1.237392698	1.237392698	1.237392698	1.237392698	1.237392698	1.2373927	1.2373927	1.2373927	1.2373927	1.2373927
SMp	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Cab (ug cm-2)	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
Cw (g cm-2)	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Cdm (g cm-2)	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009
Cs (a.u)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Cca (ug cm-2)	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Cant	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N (dimensionless)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
LAI	0.76140111	0.77299225	0.77299225	0.7959809	0.94991785	1.14364242	1.27542376	1.27542566	1.35380579	1.43565886
LIDFa	-0.35	-0.35	-0.35	-0.35	-0.35	-0.35	-0.35	-0.35	-0.35	-0.35
LIDFb	-0.15	-0.15	-0.15	-0.15	-0.15	-0.15	-0.15	-0.15	-0.15	-0.15
RMSE (mod-meas spectra)	0.082699413	0.08505255	0.08505255	0.086090054	0.080168951	0.07852209	0.05668742	0.06651422	0.07879259	0.08301258

(a) Inversion results table



(b) Inversion results figure

图 8. SAIL 模型冠层尺度 LAI 参数反演结果

Fig.8 Inversion results of canopy-scale LAI based on the SAIL model.