

# 基于机理模型人工针叶林叶面积指数反演

智育博<sup>1</sup>, 智献坡<sup>2</sup>, 刘长海<sup>2</sup>

(1. 北京工业大学理学部, 北京 100124; 2. 吉林省林业调查规划院, 吉林长春 130022)

**摘要:** 以内蒙古赤峰市旺业甸实验林场人工针叶林为研究区域, 以哨兵 2A(Sentinel-2A) 多光谱遥感影像和外业测量的 LAI 为基础, 探讨了 5-scale+Liberty 机理耦合模型和经验统计模型反演人工针叶林 LAI 的规律。结果表明: 基于一元线性模型估测的 LAI 精度较低,  $R^2=0.619$ ,  $RMSE=1.6107$ ; 基于机理模型反演的 LAI 较高,  $R^2=0.8222$ ,  $RMSE=0.9414$ , 并进一步分析了不同步长情况下, 5-scale+Liberty 模型反演的 LAI 与实测的 LAI 之间的关系, 步长的大小一定程度上影响 LAI 反演精度。

**关键词:** LAI; Liberty 模型; 5-scale 模型; 查找表

## LAI inversion of artificial coniferous forest Based on mechanism model

ZHI Yubo<sup>1</sup>, ZHI Xianpo<sup>2</sup>, LIU Changhai<sup>2</sup>

(1. Faculty of Science, Beijing University of Technology, Beijing 100124; 2. Jilin Provincial Forest Investigation and Planning Institute, Changchun 130022)

**Abstract:** Using 5-scale+Liberty mechanism model and empirical statistical model, the law of LAI inversion of artificial coniferous forest is discussed based on the data of Sentinel-2A and measured LAI in Wangyedian Experimental Forest Farm in Chifeng city of Inner Mongolia. The results show that the precision ( $R^2=0.619$ ,  $RMSE=1.6107$ ) estimated by univariate linear model is lower, but the precision ( $R^2=0.8222$ ,  $RMSE=0.9414$ ) estimated by 5-scale+Liberty mechanism model is higher, and the relationship between 5-scale inversion LAI at different paces and measured LAI is further analyzed, the step length affects the LAI inversion accuracy to some extent.

**Key words:** LAI; liberty model; 5-scale model; lookup table

叶面积指数 (leaf area index, LAI) 是单位地表面积上方植物单面叶面积之和, 是个无量纲的量<sup>[1]</sup>。在研究地表植被生长状况时, LAI 不仅是重要的关键物理量, 也可以作为描述植物的叶片密度与几何结构的重要参数之一。植物的叶片不仅是植物与外界物质交换、能量交换的主要器官之一, 植物的光合作用和蒸腾作用大部分也是通过叶片来完成<sup>[2-3]</sup>。由以上知, 以叶片的面积为衡量 LAI 指标, 用于对植被的光合作用、呼吸作用及蒸腾作用等研究有着深远的意义与影响<sup>[4]</sup>。准确的测量 LAI 不仅能更好的研究冠层的光合作用、蒸腾作用

及呼吸作用, 而且对冠层反射率的研究起关键作用。

辐射传输模型的快速发展使得植被冠层参数与冠层光合生产力的研究得到了飞速的发展<sup>[5]</sup>。遥感技术其特有的重复测量性、稳定性以及全面覆盖性等优点, 使得利用遥感技术来定量反演植被冠层参数, 广泛应用于地面以及大气的研究中<sup>[6]</sup>。随着遥感定量反演植被参数的发展, 机理模型应用而生。众多机理模型中具有代表性的模型主要有: Li-Strahler 几何光学模型<sup>[7]</sup>、4-scale 几何光学模型<sup>[8]</sup>、5-scale 几何光学模型<sup>[9]</sup>、PROSPECT<sup>[10]</sup>、SAIL<sup>[11]</sup>、LIBERTY<sup>[12]</sup>等物理模型相继发展出来。

收稿日期: 2022-08-26

作者简介: 智育博, 男, 在读学士, 主要从事数学建模和遥感数据分析。

通讯作者: 智献坡, 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事森林资源调查监测。

李海洋等<sup>[13]</sup>以 Prospect, Liberty 和 Geosail 模型为基础, 首先用 Prospect 模拟阔叶树种的反射率和透射率, 用 Liberty 模型模拟针叶的反射率和透射率, 用这两个模型的输出结果作为参数输入到 Geosail 模型得到冠层反射率, 并建立查找表, 利用 TM 影像反演出叶面积指数。陈瀚阅等<sup>[14]</sup>基于 4-scale 模型实现研究区人工林 LAI 反演。基于模型反演结果与 NDVI 经验模型进行对比得出以下结论: (1) 4-scale 模型反演 LAI 结果优于 NDVI 经验模型; (2) LAI 大于 2 时, 4-scale 模型反演的得到 LAI 误差小于 NDVI 经验模型; (3) 敏感性分析显示,  $\rho_{red}$  减小时 LAI 反演结果对  $\rho_{red}$  的敏感性大于对  $\rho_{mir}$  的敏感性。高凯旋<sup>[15]</sup>以 4-scale 几何光学模型为基础, 通过计算、分析和比较基于两种数据源的多种植被指数与样地森林叶面积指数的相关性; 分析对比不同建模下的植被指数和地形参数与森林叶面积指数的相关性; 对比了不同坡度区间基于多元逐步回归、偏最小二乘回归和随机森林模型的拟合精度和验证精度。潘颖等<sup>[16]</sup>应用 PROSAIL 模型和随机森林模型反演森林叶面积指数, 得出最佳 LAI 反演模型为基于 3 角度组合的随机森林 LAI 反演模型。随机森林 LAI 反演模型精度高于非线性回归模型, 随机森林模型能明显提高 LAI 反演精度, 适用于区域植被 LAI 反演。谷成燕等<sup>[17]</sup>基于 PROSAIL 模型结合 TM 遥感影像对毛竹林冠层参数定量反演, 得出以下结论: 以 TM 遥感影像的 3、4、5 波段作为毛竹林 LAI 反演与叶绿素含量反演的敏感波段, 以此建立查找表, 反演精度与实测具有很好的一致性。

综上, 利用机理模型进行森林参数反演成为一种新的手段。基于 5-scale+Liberty 模型耦合, 基于 Sentinel-2A 遥感数据对区域的 LAI 进行反演, 为运用 5-scale 模型与 Liberty 模型耦合建立查找表的方法结合遥感数据反演针叶林 LAI 的提供参考。

### 1 研究区域概况

旺业甸实验林场位于内蒙古自治区赤峰市喀喇沁旗西南部区域。该地区地处于燕山山脉的七老图山支脉, 地理位置经纬度为东经 118°09′—118°30′, 北纬 41°21′—41°39′。该林场的地形地貌多为中山, 海拔在 800—1890m 之间。该地区为大陆性季风气候, 年降雨主要集中在七月与八月, 年平均降雨量 500mm 左右。该林场经营面积积达 42 万亩, 有林地面积达到 35 万亩, 其中人工林面积为 17.6

万亩, 天然林面积为 17.4 万亩。该地区人工林优势树种主要为落叶松、黑皮油松、华北落叶松等为代表的针叶林与混交林, 天然林优势树种主要为白桦、山杨与蒙古栎。

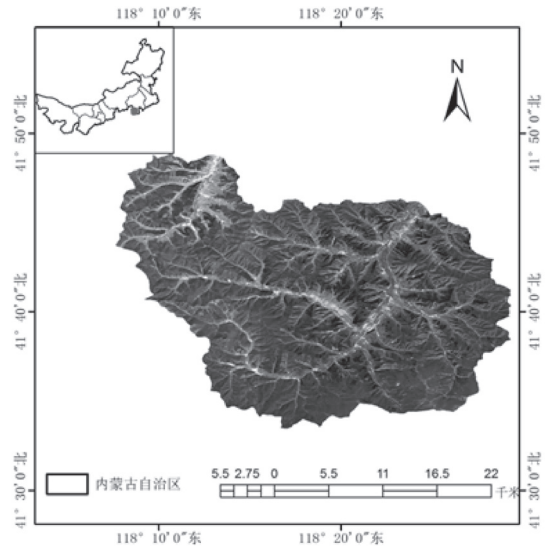


图 1 研究区域位置图

Fig.1 Location Map of the Study Area

### 2 数据与方法

#### 2.1 遥感数据获取及预处理

##### 2.1.1 遥感数据获取

使用的遥感数据为两景哨兵 2A(Sentinel-2A) 多光谱数据, 成像时间为 2017 年 9 月 22 日, 下载网站: <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>。该网址为欧洲航空局的数据共享网站。哨兵 2A(Sentinel-2A) 多光谱遥感影像经过几何校正处理, 本研究只需要对遥感影像进行辐射定标与大气校正即可。

##### 2.1.2 遥感数据预处理

辐射定标的目的是实现 DN 值与物理量的转换。本研究采用绝对定标法来进行遥感影像的处理。一般的传感器可以用一个线性表达式来完成如公式 1 所示, 以此来完成数字化与辐射值之间的转换。

$$L = Gain * DN + Bias \quad (1)$$

式中,  $L$  为辐射亮度值,  $Bias$  为对应波段的增益值,  $Offset$  为对应波段的偏移量。

大气校正的目的是获得真实的物理模型参数, 如地物的反射率和辐射率。运用 ENVI 中的 FLAASH 大气校正功能, 通过遥感影像的光谱特征来估测大气特征, 此方法优点在于遥感成像过程中不依赖于同步测量的大气数据, 同时, 该方法也可

以减弱水汽和气溶胶的散射,由于此方法校正的级别高,因此可以解决目标像元与相邻像元交叉的邻近效应,从而得到处理后的遥感影像。

## 2.2 样地数据

本文采用的样地数据为2017年9月在内蒙古赤峰市旺业甸实验林场调查得到,调查时间与遥感数据成像时间接近,一共设置了43个临时样地(图2)。样地类型为人工针叶林,样地形状为正方形,样地大小为25m×25m。对其每块样地进行因子调查与每木检尺,样地内对胸径大于5cm的树木进行每木检尺。样地因子调查主要包括以下几项:样地经纬度、树高、冠幅、郁闭度、第一枝下高、海拔、叶面积指数与鱼眼照片等。LAI通过光学仪器TRAC-II叶面积指数检测仪(Tracing Radiation and Architecture of Canopies)和鱼眼相机获取,TRAC-II叶面积指数检测仪为主要测量,鱼眼相机为辅助测量。使用TRAC-II叶面积指数检测仪获取LAI,首先在样地内设置路线,在匀速行走每5米纪录一次。在使用仪器获取LAI时不能为阴雨天,同时还要有充足的阳光。在通过电脑使用TRACwin软件进行数据处理得到样地中每个点的LAI。利用鱼眼相机分别在样地四个角以及中心位置获取五张鱼眼照片作为辅助,来计算出样地的LAI,通过两种方法得到样地LAI平均值。

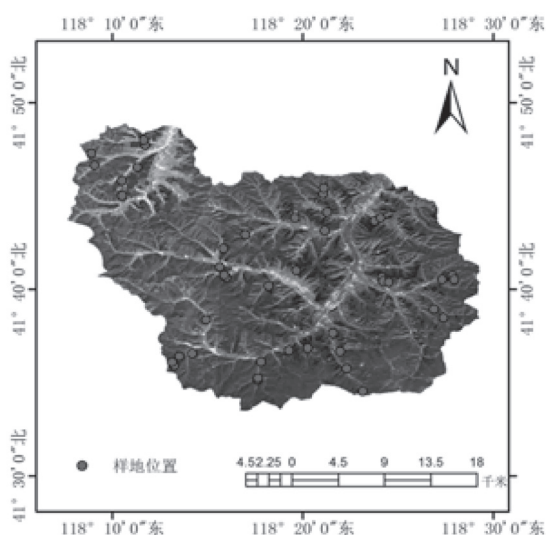


图2 样地点分布图

## 2.3 经验统计模型估计叶面积指数

### 2.3.1 植被指数构建

根据研究,植被指数被与LAI之间存在一定的

相关性<sup>[18]</sup>。其中,比值植被指数(SR)与LAI相关性更明显<sup>[19]</sup>。因此,SR也被广泛应用于研究LAI的统计模型中,比值植被指数计算公式如(2)所示。

$$SR = \frac{\rho_{nir}}{\rho_{red}} \quad (2)$$

式中,SR为比值植被指数, $\rho_{nir}$ 为近红外波段反射率, $\rho_{red}$ 为红光波段反射率。

### 2.3.2 经验统计模型

利用哨兵2A(Sentinel-2A)遥感影像,通过ENVI中的波段计算得到植被指数,结合样地实测LAI数据建立经验统计模型。遥感影像中植被的光谱特征具有“红边效应”,当LAI增大,植被特征红光波段的吸收率与近红外波段的反射率也会随着LAI的增大而增大。因此,在研究LAI时,经常选取由红光波段与近红外波段所构成的SR作为建模参数。经验统计模型包含很多,选用以下三种经验统计模型(表1)即:一元线性模型、幂函数曲线模型以及指数曲线模型。

表1 经验统计模型及公式  
Tab.1 Empirical statistical model and formulas

模型	公式
一元线性模型	$LAI = a + b \times SR$
幂函数曲线模型	$LAI = a \times SR^b$
指数曲线模型	$LAI = a \times e^{b \times SR}$

## 2.4 机理模型与查找表的建立

### 2.4.1 叶片水平辐射传输模型

对应的树种为针叶树种,因此叶片水平的辐射传输模型为针叶Liberty模型。Liberty模型是1998年Dawson提出来的,已广泛运用到叶片水平生物量的研究当中。Liberty模型是针对针叶树无明显栅栏组织,细胞多呈球形的特点开发的<sup>[12]</sup>。Liberty模型模拟针叶树丛或单叶的光谱。Liberty模型需要输入9个参数,包括:细胞间隙、细胞直径、白化吸收、针叶厚度、叶绿素含量、水分含量、基吸收、纤维素和木质素含量以及氮含量<sup>[18]</sup>。

### 2.4.2 冠层水平辐射传输模型

在冠层水平上,国内外学者建立了多种辐射传输模型。结合研究对象,选用5-scale模型。5-scale模型由陈镜明1997年提出,是在4-scale模型的基础上进行改进,增加了叶片尺度参数<sup>[19]</sup>。在模型中,用圆锥体模拟针叶树种树冠以上部分,用圆柱体来模拟针叶树树干部分,同时5-scale模

型也考虑了枝的空间位置与叶的空间位置，以及它们对反射率和透光性的影响。5-scale 模型就是利用概率计算出不同的入射光线在不同的观测角度上得到四个分量的反射率与样地树木结构参数、叶片反射率等有关。

### 2.4.3 建立查找表

首先了解模型的输入参数，然后根据先知经验确定输入参数在模型中范围，通过不同的输入参数得到与其相对应的叶片反射率，在将其输入到模型当中，进而模拟得到冠层反射率值，以此建立查找表。在叶片层，使用针叶树 Liberty 模型模拟叶子的反射率，然后利用 Liberty 模型得到的叶片反射率在输入到冠层面的 5-scale 模型中，利用 5-scale 模型模拟冠层面反射率，从而得到不同输入参数下的冠层反射率，并建立一一对应的查找表。

模型输入参数如下(表2)。其中 LAI 步长为 0.1，叶片厚度步长为 0.5，空气间隙步长为 0.02，叶绿素含量步长为 100。本实验的 SR 根据遥感影像中的红光波段和近红外波段计算得到，不考虑 1000nm 后的反射率产生影响的参数，因此以下几个因子可以取固定值，即：氮含量、基吸收、纤维素含量等<sup>[20]</sup>。太阳顶角、观测天顶角与相对天顶角的值，是根据遥感影像获取时太阳当时的位置所定。

表 2 5-scale 模型 + Liberty 模型部分输入参数  
Tab.2 Partial input parameters of 5-scale +liberty model

模型输入参数	数值	步长
模拟像元大小 (m)	10000	
冠层高度 (m)	10	
冠层半径 (m)	1.65	
太阳天顶角 (°)	40°	
观测天顶角 (°)	0°	
相对天顶角 (°)	180°	
聚集度指数	0.65	
纽曼分布	5	
叶片反射率	Liberty 模型输出参数	
LAI	[ 1,10 ]	0.1
叶片厚度 (h)	[ 2.5,3.5 ]	0.5
水分含量 (dw)	100	
空气间隙 (Xu)	[ 0.02,0.1 ]	0.02
叶绿素含量 (Ch)	[ 50,550 ]	100
细胞直径 (d)	50	
基吸收 (Cb)	0.005	
白化吸收 (Ca)	2	
纤维素和木质素含量 (Cl)	40	
氮含量 (Cn)	1	

## 2.5 叶面积反演及检验数据

### 2.5.1 查找表反演叶面积指数

通过 5-scale 模型和 Liberty 模型耦合得到不同输入参数与冠层反射率相对应的查找表。再利用 MATLAB 编程读取建立的查找表以及处理后的遥感影像，通过对比遥感影像中红光波段和近红外波段反射率与查找表中红光波段和近红外波段的反射率最接近的值所对应的 LAI 值，记为该像元的 LAI 值，最后实现出人工林针叶林冠层 LAI 反演。

### 2.5.2 检验数据

检验数据为光学仪器 TRAC-II 叶面积指数检测仪与鱼眼相机获得的照片结合测得的 LAI。对利用 5-scale 模型与 Liberty 模型耦合建立查找表法反演得到的 LAI 结果与实测 LAI 进行验证，评价指标为 R<sup>2</sup> 和 RMSE。

## 3 结果分析

### 3.1 经验统计模型估算叶面指数

利用处理过的遥感影像，通过计算得到比值植被指数，由表 1 的公式可以得到表 3 的结果。评价指标用决定系数 R<sup>2</sup> 和均方根误差 RMSE 来表示，由表 3 可以得出一元线性模型的 R<sup>2</sup>=0.6742 (p<0.01)，RMSE=1.0911；幂函数曲线模型的 R<sup>2</sup>=0.5937 (p<0.01)，RMSE=1.6387；指数曲线模型的 R<sup>2</sup>=0.5692 (p<0.01)，RMSE=1.7324。

表 3 经验统计模型拟合结果  
Tab.3 The fitting results of empirical statistical model

模型	公式	R <sup>2</sup>	RMSE
一元线性模型	LAI = 1.2078 + 0.4126 × SR	0.6742	1.0911
幂函数曲线模型	LAI = 0.3689 × SR <sup>1.2075</sup>	0.5937	1.6387
指数曲线模型	LAI = 7.1081 × e <sup>0.1124×SR</sup>	0.5692	1.7324

由表 3 可知，三种经验统计模型中一元线性模型的精度是最高的，因此选用一元线性模型估算 LAI。对一元线性模型估算得出的 LAI 值与实测 LAI 值的关系进行分析，图 3 所示。两者的相关系数 R<sup>2</sup>=0.619，RMSE=1.6107。

### 3.2 5-scale 模型反演叶面积指数

采用 5-scale 模型建立查找表反演得出的 LAI 与实测 LAI 进行比较如下(图 4)。

从图 4 中可以看出，基于 5-scale 模型与 Liberty 模型耦合建立查找表法反演得到的 LAI 与实测 LAI 之间具有良好的相关性，R<sup>2</sup>=0.8222，RMSE=0.9414。

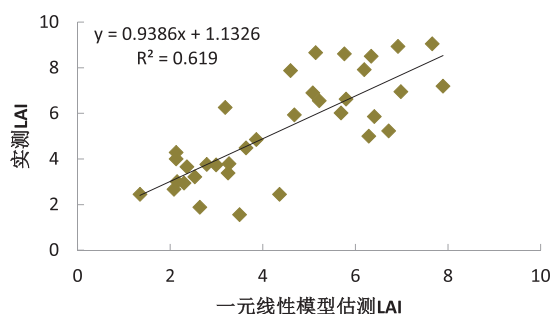


图 3 一元线性模型估测 LAI 与实测 LAI 关系  
Fig.3 The relationship between univariate linear model inversion LAI and measured LAI

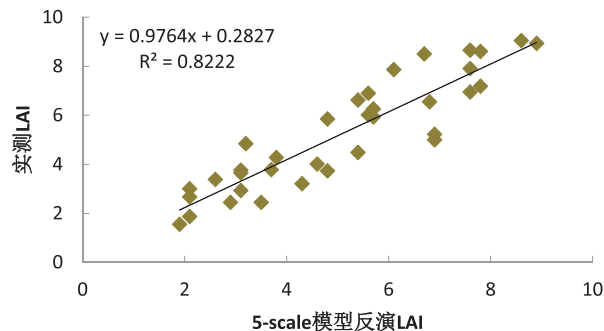


图 4 5-scale 模型反演 LAI 与实测 LAI 对比分析  
Fig.4 The relationship between 5-scale inversion LAI and measured LAI

### 3.3 偏差分析

为了进一步分析一元线性模型、5-scale 模型反演 LAI 与实测 LAI 之间的关系, 从平均值、标准差、最大值与最小值方面进行比较分析 (表 5)。

表 5 偏差分析  
Tab.5 LAI difference analysis

LAI 获取方法	样地数	平均值	标准差	最小值	最大值
样地实测 LAI	43	5.26	2.1961	1.55	9.05
一元线性模型反演 LAI	43	4.4	1.8408	1.35	7.89
5-scale 模型反演 LAI	43	5.1	2.0394	1.9	8.9

较大; 5-scale 模型反演 LAI 的标准差 (2.0394) 与样地实测 LAI 的标准差 (2.1961) 最接近, 一元线性模型计算 LAI 的标准差 (1.8408) 与样地实测 LAI 的标准差相差较大; 5-scale 模型反演 LAI 的最小值、最大值 (1.9、8.9) 与样地实测 LAI 的最小值、最大值 (1.55、9.05) 最为接近, 一元线性模型反演 LAI 的最小值、最大值 (1.35、7.89) 与样地实测 LAI 相差较大。从以上分析可以得出基于 5-scale 模型反演 LAI 的精度要优于一元线性模型。

由表 5 可知, 分别从几个误差特征进行分析: 5-scale 模型反演 LAI 的平均值 (5.1) 与样地实测 LAI 的平均值 (5.26) 最接近, 一元线性模型反演 LAI 的平均值 (4.4) 与样地实测 LAI 的平均值相差

基于 5-scale 模型建立查找表反演森林冠层生物量, 模型输入参数的步长会影响反演的精度。

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

利用机理模型结合遥感影像反演森林生物量是可行的。对于机理模型来说, 输入参数是关键, 参数的选取很大程度上决定了反演的精度。利用 5-scale 模型建立查找表的主要变化参数是叶面积指数, 为了进一步分析不同步长所建立的查找表反演得出的 LAI 与实测 LAI 之间的关系, 分别建立了步长为 0.5 与 1 的两个查找表, 通过与实测 LAI 对比得出结果如下图 5 所示。由图 4、5 知, 步长为 0.5、1 建立的查找表与步长为 0.1 建立的查找表在精度上有所下降,  $R^2$  由 0.8222 降到 0.732、0.6928, RMSE 由 0.9414 增至 1.2166、1.2266。综上所述,

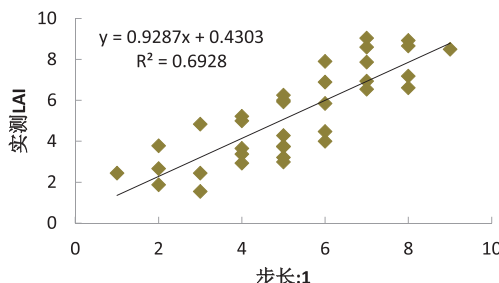
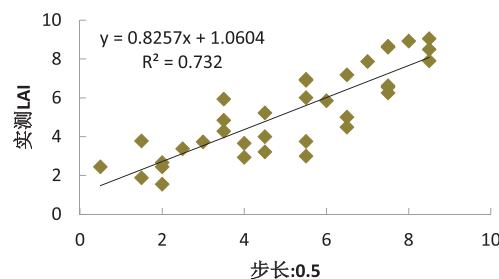


图 5 不同步长建立的 5-scale 模型反演 LAI 与实测 LAI 对比分析  
Fig.5 Comparative analysis of 5-scale model inversion LAI at different paces inverts and measured LAI

### 4.2 结论

采用机理模型在反演森林生物量上得到了广泛的应用,通过 5-scale 模型与 Liberty 模型结合查找表的方法反演了内蒙古赤峰市旺业甸实验林场的人工针叶林叶面积指数。对两种方法反演得到的叶面积指数进行分析,研究得出:一元线性模型可以估测叶面积指数,但其精度较低  $R^2=0.619$ ,  $RMSE=1.6107$ ; 基于机理模型建立查找表反演叶面积指数  $R^2=0.8222$ ,  $RMSE=0.9414$ 。进一步分析了不同步长情况下,5-scale+Liberty 模型反演的 LAI 与实测的 LAI 之间的关系,步长的大小一定程度上影响 LAI 反演精度。综上,基于机理模型结合遥感影像数据能较好的满足区域内 LAI 的反演。

### 参考文献

- [1] 赵英时,等. 遥感应用分析原理与方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [2] 王希群, 马履一, 贾忠奎等. 叶面积指数的研究和应用进展 [J]. 生态学杂志, 2005 (05): 537-541.
- [3] 朱迪恩, 徐小军, 杜华强等. 基于 MODIS 时间序列反射率数据的雷竹林 LAI 反演 [J]. 应用生态学报, 2018, 29 (07): 2391-2400.
- [4] Ryu Youngryel, Verfaillie Joseph, Macfarlane Craig et al. Continuous observation of tree leaf area index at ecosystem scale using upward-pointing digital cameras [J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 126: 116-125.
- [5] 张小全, 徐德应, 赵茂盛. 林冠结构、辐射传输与冠层光合作用研究综述 [J]. 林业科学研究, 1999 (04): 411-421.
- [6] 范闻捷, 闫彬彦, 徐希孺. 尺度转换规律与同步反演作物播种面积和叶面积指数 [J]. 中国科学: 地球科学, 2010, 40 (12): 1725-1732.
- [7] Xiaowen Li, Alan H. Strahler. Geometric-Optical Modeling of a Conifer Forest Canopy [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1985, GE-23 (5) .
- [8] Chen J.M, Leblanc S.G. A four-scale bidirectional reflectance model based on canopy architecture [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1997, 35 (5).
- [9] Derek R Peddle, Ryan L Johnson, Josef Cihlar, Rasim Latifovic. Large area forest classification and biophysical parameter estimation using the 5-Scale canopy reflectance model in Multiple-Forward-Mode [J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 89 (2).
- [10] Jacquemoud S, Baret F. PROSPECT: A model of leaf optical properties spectra [J]. Remote Sensing of Environment, 1990, 34 (2) .
- [11] K .F .Huemrich, The GeoSail model: a simple addition to the SAIL model to describe discontinuous canopy reflectance [J]. Remote Sensing of Environment, 2001, 75 (3) .
- [12] Dawson Terence P, Curran Paul J, Plummer Stephen E. LIBERTY—Modeling the Effects of Leaf Biochemical Concentration on Reflectance Spectra [J]. Remote Sensing of Environment, 1998, 65 (1): 50-60.
- [13] 李海洋, 范文义, 于颖等. 基于 Prospect, Liberty 和 Geosail 模型的森林叶面积指数的反演 [J]. 林业科学, 2011, 47 (09): 75-81.
- [14] 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 (03): 358-365.
- [15] 高凯旋. 基于几何光学模型的森林叶面积指数遥感反演研究 [D]. 河南理工大学, 2020. DOI: 10.27116/d.cnki.gjzgc.2020.000183.
- [16] 潘颖, 丁鸣鸣, 林杰, 代侨, 郭赓, 崔琳琳. 基于 PROSAIL 模型和多角度遥感数据的森林叶面积指数反演 [J]. 林业科学, 2021, 57 (04): 90-106.
- [17] 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 (08): 2248-2256. DOI: 10.13287/j.1001-9332.2013.0383.
- [18] 刘洋, 刘荣高, 刘斯亮. 基于物理模型训练神经网络的作物叶面积指数遥感反演研究 [J]. 地球信息科学学报, 2010, 12 (3): 426-435.
- [19] Chen J M, Pavlic G, Brown L. 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.
- [20] 蔡博峰, 绍霞. 基于 PROSAIL + SAIL 模型的遥感叶面积指数反演 [J]. 国土资源遥感, 2007, 2: 39-43.