应用生态学报 2017年12月 第28卷 第12期 http://www.cjae.net
Chinese Journal of Applied Ecology, Dec. 2017, **28**(12): 3976-3984 DOI: 10.13287/j.1001-9332.201712.016

基于 PROSAIL 模型的水稻田缨帽三角-叶面积指数模型及其应用

李亚妮 鲁 蕾* 刘 勇
(兰州大学资源环境学院, 兰州 730000)

摘 要 缨帽三角(tasseled cap triangle,TCT)-叶面积指数(leaf area index,LAI)等值线模型是一种反映植被叶面积指数等值线在红光(Red)-近红外(NIR)波段反射率组成的光谱空间中分布规律的模型,在此基础上建立 LAI 遥感反演模型比常用的统计关系模型更加精确.本文利用水稻田实测数据,验证了 PROSAIL 模型对水稻冠层反射率模拟的适用性,并对模型的输入参数进行率定,最终确定了 PROSAIL 模型模拟水稻冠层反射率的输入参数的取值范围.在此基础上构建了水稻田 TCT-LAI 等值线模型,建立了 LAI 遥感反演所需的查找表,将其分别用于 Landsat 8 和 WorldView 3 数据进行水稻田 LAI 反演.结果表明:利用基于 TCT-LAI 等值线模型建立查找表反演的 LAI 与实测 LAI 具有良好的线性相关关系,$R^2 = 0.76$,RMSE = 0.47;与 Landsat 8 的 LAI 反演结果相比,WorldView 3 反演的 LAI 值域范围更大,数据分布更离散.将 Landsat 8、WorldView 3 反射率数据重采样至 1 km 后进行 LAI 反演,MODIS LAI 产品的反演结果存在明显低估现象.

关键词 缨帽三角;植被等值线;PROSAIL 模型;叶面积指数;WorldView 3

Tasseled cap triangle (TCT)-leaf area index (LAI) model of rice fields based on PROSAIL model and its application.

LI Ya-ni, LU Lei*, LIU Yong (*College of Earth Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou* 730000, *China*).

Abstract: The tasseled cap triangle (TCT)-leaf area index (LAI) isoline is a model that reflects the distribution of LAI isoline in the spectral space constituted by reflectance of red and near-infrared (NIR) bands, and the LAI retrieval model developed on the basis of this is more accurate than the commonly used statistical relationship models. This study used ground-based measurements of the rice field, validated the applicability of PROSAIL model in simulating canopy reflectance of rice field, and calibrated the input parameters of the model. The ranges of values of PROSAIL input parameters for simulating rice canopy reflectance were determined. Based on this, the TCT-LAI isoline model of rice field was established, and a look-up table (LUT) required in remote sensing retrieval of LAI was developed. Then, the LUT was used for Landsat 8 and WorldView 3 data to retrieve LAI of rice field, respectively. The results showed that the LAI retrieved using the LUT developed from TCT-LAI isoline model had a good linear relationship with the measured LAI $R^2 = 0.76$, RMSE = 0.47. Compared with the LAI retrieved from Landsat 8, LAI values retrieved from WorldView 3 varied with wider range, and data distribution was more scattered. Resampling the Landsat 8 and WorldView 3 reflectance data to 1 km to retrieve LAI, the result of MODIS LAI product was significantly underestimated compared to that of retrieved LAI.

Key words: tasseled cap triangle; vegetation isoline; PROSAIL model; leaf area index; WorldView 3.

本文由国家自然科学基金项目(41401372,41271360)资助 This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41401372, 41271360).
2017-05-10 Received, 2017-09-19 Accepted.
* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lulei@lzu.edu.cn

叶面积指数(leaf area index,LAI)指单位水平地表上方绿色植物叶片单面面积的总和或总表面面积的一半[1],反映了地表植被生长状况和绿色植物生产力水平,是描述土壤-植被-大气之间物质和能量交换的关键参数[2].遥感反演为区域和全球尺度上的 LAI 估算提供了一种经济可行的方法.近年来,基于中等分辨率卫星观测数据已生产了 CYCLOPES、ECOCLIMAP、MODIS LAI 等多种全球或区域性 LAI 数据产品,其中,MODIS LAI 数据已经得到广泛的应用[3-4].

常用的 LAI 估算方法是基于遥感影像计算得到的植被指数(vegetation index,VI)与地面实测 LAI 之间的经验统计关系.然而,在红光-近红外波段反射率组成的光谱空间中,很多常用 VI 等值线与 LAI 等值线之间并不存在良好的线性耦合关系[5],因此 VI-LAI 经验统计关系并不可靠.植被冠层辐射传输模型以物理光学为基础,适用的植被类型和空间范围更广,但其本质上描述了一个病态反演过程,即存在解的不唯一性[6-7].目前,大多数研究基于辐射传输模型建立 LAI 与光谱反射率的查找表,之后根据最小目标函数判别准则进行叶面积指数反演[8-10].基于这种方法得到的查找表中,不同 LAI 值在红光-近红外(Red-NIR)波段光谱空间中呈交叉分布,且存在不合理的参数组合形式.如何基于辐射传输模型建立光谱反射率与 LAI 之间保持一一对应关系的查找表,仍然有待探讨.

水稻是一种水生作物,其生长背景是由水体、土壤混合而成的水稻土.目前,对水稻 LAI 的遥感反演以经验关系法为主[11-13].这种方法需要根据水稻的不同生长阶段、生长环境等差异分别设置不同的输入参数,普适性差.通过引入辐射传输模型,可以较好地避免这一问题.如 Nguyen 等[14]利用土壤-叶片-冠层(soil-leaf-canopy,SLC)模型对水稻田的 MOD09A1 反射率数据进行了季节性反演.Campos-Taberner 等[15]采用 PROSAIL 模型与人工神经网络相结合的方法对地中海区域的水稻 LAI 进行反演.然而,基于辐射传输模型对水稻田 LAI 的反演研究目前相对较少,并且这些研究大都基于中等分辨率遥感影像,没有考虑到水稻生长背景对 LAI 反演的影响.基于我国西北干旱地区水稻产区特殊的水热条件,本文结合实测数据给出了适用于水稻田遥感反演的 PROSAIL 模型参数组合模式,建立了基于 Red-NIR 波段反射率与 LAI 的 TCT-LAI 等值线数值模式,据此利用高分辨率遥感影像 Landsat 8 和 WorldView 3 数据对宁夏中卫绿洲水稻种植区 LAI 进行反演,并与 MODIS LAI 数据产品进行对比.

1　研究地区与研究方法

1.1　研究区概况

中卫绿洲位于宁夏中西部.该区域深居内陆,具有典型的大陆性季风和干旱沙漠气候的特点,海拔在 1100~1300 m,年平均气温 8.8 ℃,年平均降水量 180 mm,黄河自西向东穿过绿洲,水资源相对丰沛.土地利用/土地覆被类型主要为水浇地、水稻田、居民地、休耕地、坑塘、河流等.本研究涉及的水稻田位于中卫市区西南部约 10 km 处,几何位置严格对应 MODIS LAI(1 km 分辨率)产品的 3×3 个像元(图 1).

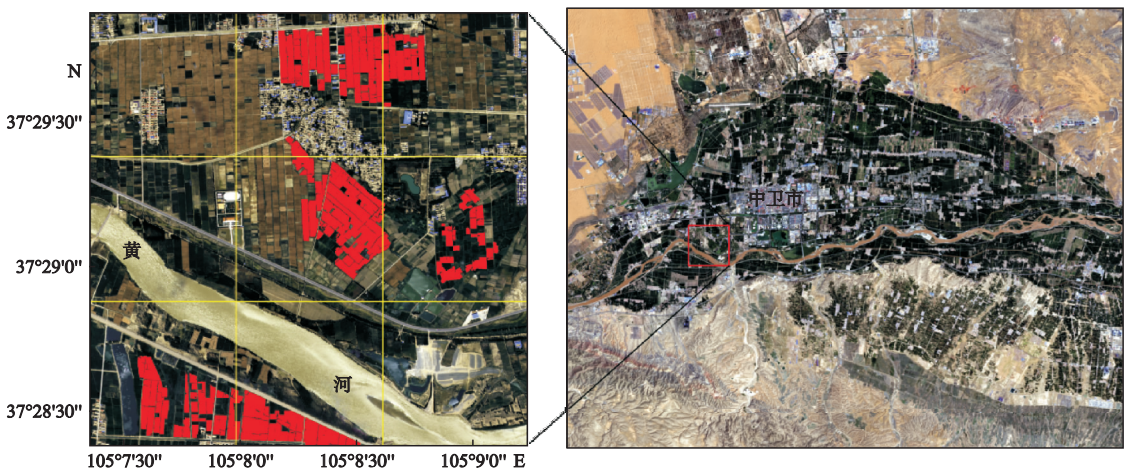


图 1　研究区概况

Fig.1　Sketch of study area.

黄色格网表示 MODIS LAI 像元(1 km),红色表示水稻种植区 The yellow grid denoted the 1 km MODIS LAI pixel, and the rice growing area was in red color.

1.2 缨帽三角-叶面积指数模式

对于一幅包含红、近红外波段的遥感影像,将其所有像元置于 Red(横轴)-NIR(纵轴)波段反射率组成的光谱空间中,大多数像元位于斜率为 45°的土壤线上方(与水体有关的像元除外),呈三角形分布模式,即缨帽三角模式[5,16].在特定的 LAI 和平均叶倾角组合条件下,LAI 以等值线的形式在 Red-NIR 反射率特征空间中有序分布(图 2),表现为既不相交于原点,也不平行于土壤线[5].土壤线附近的点代表裸土,其 LAI 为 0;由土壤线向缨帽三角顶端移动,像元所对应的地面植被盖度逐渐增加,LAI 等值线呈放射状递增形式,且近红外波段反射率越大,LAI 的递增幅度越大;当 LAI 达到最大时,红光波段反射率趋于最小,LAI 等值线近乎与纵坐标垂直.根据 LAI 在缨帽三角中有规律的分布模式建立查找表,进而完成 LAI 的反演,比经验关系法具有更好的理论基础.

PROSAIL 模型是由植物叶片模型 PROSPECT 结合植被冠层模型 SAIL 而形成的耦合模型,适用于冠层连续分布的植被冠层反射率模拟[17-18].PROSPECT 模型是一种基于 Allen“平板模型”的叶片光学模型,用来模拟叶片在 400~2500 nm 波段范围内的方向半球反射率和透射率[18].模型通过叶片结构参数(N)和叶片生物化学参数[包括叶绿素含量(Cab)、类胡萝卜素含量(Car)、褐色素含量(Cbrown)、叶片含水量(Cw)、干物质含量(Cm)]来描述叶片对光的吸收、散射等作用.SAIL 模型是对一维模型 Suits 的扩展[17,19].它将植被冠层当作混浊介质,在一定的叶片分布模式下,通过 4 个偏微分方程定量描述植被冠层的吸收和散射辐射通量,模拟得到植被冠层的双向反射率因子[17,19-20].SAIL模型

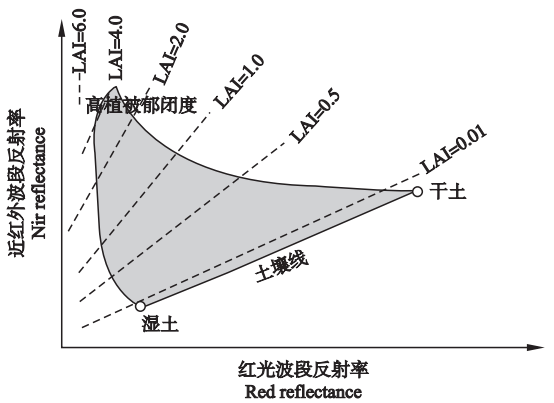


图 2 缨帽三角与 LAI 等值线分布模式[16]

Fig.2 Tasseled cap triangle and distribution pattern of LAI isoline[16].

的输入参数包括平均叶倾角(ALA)、LAI、土壤因子(psoil)、热点因子(hspot)、太阳天顶角(tts)、观测天顶角(tto)、相对方位角(psi).

本文利用野外观测数据对 PROSAIL 模型模拟水稻冠层反射率的有效性进行验证,同时对模型参数进行率定.基于实测数据,固定非敏感参数,根据水稻生长特性,在不同 LAI 值域范围内对模型敏感参数分别设置不同取值,改变背景光谱信息,模拟水稻冠层反射率,进而获得叶面积指数-冠层反射率模拟数据集,建立缨帽三角-叶面积指数数值模式.在水稻冠层反射率模拟时,PROSAIL 模型输入参数中的 LAI、Cab、tts、ALA 取值采用实测数据,水稻背景光谱曲线则利用 ASTER 光谱库[21]中的水体和土壤光谱曲线模拟生成.模型中的其他参数,Car、Cw、Cm、hspot、Cbrown、N、tto、psi、psoil 的取值范围参考 LOPEX 93 数据库[22].LOPEX 93 植物生化参数数据库由欧盟委员会联合研究中心(Joint Research Centre of the European Commission)的空间应用研究所(Space Applications Institute)建立.该数据库包含 50 种木本和草本植物的 70 个叶片样本的生物物理和生化参数实测值,体现了叶片内部结构、色素含量、水分含量和其他组分含量的多样性.通过设置特定的步长模拟不同参数取值时的水稻冠层反射率,将其与水稻实测光谱曲线进行匹配.在此过程中,采用均方根误差(RMSE)来量化模拟光谱曲线与实测光谱曲线在蓝(483 nm)、绿(563 nm)、红(655 nm)、近红外波段(865 nm)、短波红外 1(1610 nm)、短波红外 2(2200 nm)之间的差异.

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (\rho_{i,\mathrm{mea}} - \rho_{i,\mathrm{sim}})^2 / n}$$

式中:n 为波段数;ρ_{mea} 和 ρ_{sim} 分别为实测光谱曲线和模拟光谱曲线对应 Landsat 8 各通道中心波长的反射率.

1.3 遥感数据

遥感数据包括 Landsat 8、WorldView 3 和 MODIS LAI 产品 MOD15A2(行列编号 h26v05),获取时间均为 2016 年 8 月(表 1).采用 ENVI 中的 FLAASH

表 1 遥感数据

Table 1 Remote sensing data

数据类型 Date type	获取日期 Date acquired	空间分辨率 Spatial resolution (m)	投影坐标系 Projection coordinate system	数据等级 Data level
Landsat 8	2016-08-09	30	UTM_WGS 84	L1T
WorldView 3	2016-08-07	2	UTM_WGS 84	LV2A
MOD15A2	2016-08-12	1000	球面正弦函数	L3T

模块分别对 Landsat 8、WorldView 3 数据进行大气辐射校正，获取地表反射率.

利用 MRT 工具将 MODIS LAI 数据从球面正弦投影转换为通用横轴墨卡托投影，与 Landsat 8、WorldView 3 数据坐标系保持一致，并将 MODIS LAI 产品数据乘以转换因子(0.1)将其转换为 LAI 真值.

利用 eCognition 对研究区 Landsat 8、WorldView 3 影像进行分割分类，根据水稻田的光谱特征建立分类规则集，将所有分割对象单元分为水稻田和非水稻田两类，最终得到水稻田的矢量数据及其红光、近红外波段反射率.

1.4　实测数据

宁夏中卫市水稻多为中熟水稻，9 月中下旬收割.野外数据采集时间为 2011—2016 年 7 月下旬至 8 月中旬(水稻的拔节期、抽穗期).观测一般选在晴朗的天气条件进行，观测时间为 10:00—13:00，观测要素主要包括水稻田各个样点的冠层反射率、LAI、ALA、Cab 等，具体观测方法如下：

1) 采用 ASD FieldSpec Pro FR 地物光谱仪对太阳入射辐射、水稻冠层顶部和土壤背景的光谱进行测量.每个样点取 10 次测量的平均值作为最终光谱数据.

2) 采用 Li-Cor 公司植物冠层分析仪 LAI 2000 测量 LAI、ALA 等参数.观测时，测量人员背对太阳光入射方向等间距进行数据采集，每组读数由 1 次冠层顶部辐射测量值和 4 次冠层底部辐射测量值生成，每个样点采集 3~5 组读数，并对多组数据求平均值作为观测样点的 LAI、ALA.

3) 采用 CCM 300 叶绿素仪在每个样点选取 3 个叶片，每个叶片重复测量 5 次，并以多次测量的平均值作为该样点植物叶片 Cab 的值.

采用 Trimble GPS 进行定位，获取地理坐标和高程信息，同时记录观测期间的天气状况、土壤类型、植被类型、植株行距、株距、株高、植被覆盖度、以及观测时刻的太阳高度角和方位角等相关信息.

2　结果与分析

2.1　PROSAIL 模型适用性

利用 PROSAIL 模型模拟 7 个样点的冠层反射率，模型输入参数 LAI、Cab、tts、ALA 取值采用实测数据.由于 2015 年以前未对叶绿素含量进行测量(表 2)，参考其他时期 Cab 的测量值，将相应样点 Cab 设置为以 5 为步长在[5,55]之间的变化.参考 LOPEX 93 数据库，将参数 Car、Cbrown 、tto、psi 分别设置为固定值 8、0、0、0；参数 Cw、Cm、hspot、N、psoil 设置为在某一取值范围内变化，依次为 [0.018, 0.03]、[0.001,0.01]、[0,0.9]、[1,2]、[0,1]，变化步长分别设为 0.004、0.003、0.3、0.5、0.1.将模拟的水稻冠层光谱曲线和实测光谱曲线进行匹配，由图 3 可以看出，模拟光谱与实测光谱在整个波长范围内基本吻合，表明在模型中采用水体和土壤光谱模拟水稻生长背景的方法效果良好，PROSAIL 模型的参数值域组合亦由此率定.由于各个样点植被覆盖度不同，使得部分模拟光谱曲线(如样点 a、b、c)在波长 900~1400 nm 范围内与实测光谱曲线有偏离，但偏离程度不大.

当模拟光谱与实测光谱的 RMSE 值最小时，对应的PROSAIL模型中各参数的取值如表2所示.由

表 2　模拟光谱与实测光谱的 RMSE 最小时 PROSAIL 模型各参数范围的率定结果

Table 2　Calibrated results of the range of the PROSAIL parameters when the RMSE between the simulated and measured spectrums was minimum

样点编号 Sample No.	采集日期 Acquisition date	N	等效水厚度 Cw (cm)	Cm (g·cm^{-2})	Cbrown (μg·cm^{-2})	类胡萝卜素含量 Car (μg·cm^{-2})	热点因子 hspot	叶面积指数 LAI *	叶绿素含量 Cab * (μg·cm^{-2})	太阳天顶角 tts *	平均叶倾角 ALA *	土壤因子 psoil	均方根误差 RMSE
a	2011-08-21	1.0	0.02	0.010	0	8	0	2.75	25.0	31.0	55	0.1	0.0162
b	2012-07-28	2.0	0.03	0.001	0	8	0	4.70	50.0	38.1	57	0.8	0.0030
c	2013-08-14	1.0	0.03	0.007	0	8	0.6	3.43	25.0	33.0	55	0.8	0.0078
d	2015-07-24	1.5	0.02	0.001	0	8	0	3.65	31.0	38.5	53	0.5	0.0061
e	2015-07-27	1.5	0.03	0.001	0	8	0	2.20	51.0	33.1	61	0.7	0.0058
f	2016-07-20	2.0	0.03	0.004	0	8	0.3	3.17	41.2	13.2	59	0.5	0.0048
g	2016-07-20	2.0	0.03	0.001	0	8	0	3.16	44.5	13.2	63	0.3	0.0072

psoil：土壤因子 Soil parameter；Cw：叶片含水量 Leaf water content；N：叶片结构参数 Leaf structural parameter；Cab：叶绿素含量 Chlorophyll content；LAI：叶面积指数 Leaf area index；hspot：热点因子 Hot-spot parameter；Cm：干物质含量 Dry matter content；ALA：平均叶倾角 Average leaf angle inclination. 下同 The same below. * 表示参数取值来自实测数据，其中样点 d~g 的 Cab 为实测数据，样点 a~c 的 Cab 为模型率定值 * indicated the parameter value came from the measured data；values of Cab in samples d-g were ground-based measurements，and the values of the samples a-c were determined by the model.

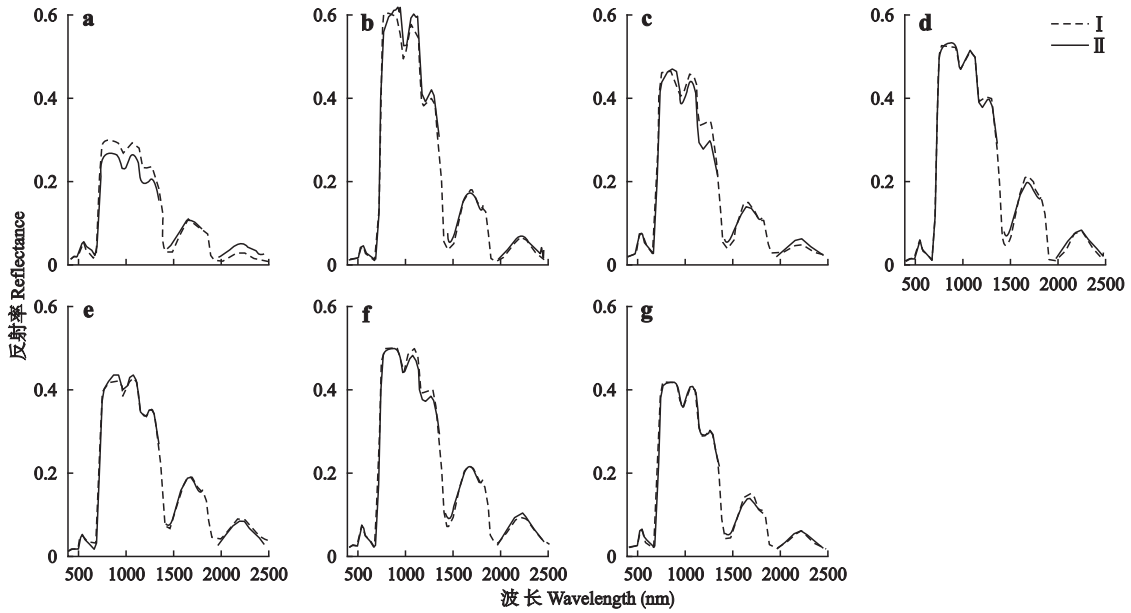


图 3 PROSAIL 模型模拟光谱与水稻冠层实测光谱的对比

Fig.3 Comparison of the PROSAIL simulated spectra with the ground-truth spectra of rice canopy.

Ⅰ: 模拟光谱曲线 Simulated spectral curve; Ⅱ: 实测光谱曲线 Ground-truth spcctral curve. a~g 对应 7 个水稻光谱观测样点 a-g corresponded to 7 spectral observation samples.

于样点 a 的植被覆盖度较低(约 60%),背景水体对水稻冠层的光谱影响较大,因此, RMSE 值较大(RMSE=0.0162),在图 3 中表现为模拟光谱曲线在近红外波段偏离实测光谱曲线.除样点 a 外,其余样点的 RMSE 值均小于 0.01.说明 PROSAIL 模型适用于水稻冠层光谱的模拟.

2.2 缨帽三角-LAI 模式及查找表的建立

利用 sobol 算法[23]对 PROSAIL 模型参数进行敏感性分析(图 4),结果表明,Cab 对可见光波段冠层反射率的影响最大,ALA 和 LAI 是影响冠层近红外波段反射率的主要因素.对于 PROSAIL 模型中冠层反射率的非敏感参数,可将其设为模拟光谱与实测光谱的 RMSE 最小时相应取值范围的均值.据表 2 可将 N、Car、Cw、Cm、Cbrown、hspot、psi、tto 分别设为 1.6、8、0.03、0.003、0、0.13、0 和 0.参数 tts 取值为所用影像 Landsat 8 过境时的太阳天顶角,根据所记录的元数据计算得到该值为 29.12°.在水稻整个生长期,LAI、Cab、ALA 的变化规律基本一致,即先升高后降低,在抽穗灌浆期达到最大[24-25].据此,在不同 LAI 取值区间 (步长为 0.1) Cab、ALA 分别设置不同的值域范围,最终得到用于水稻田冠层反射率模拟的 PROSAIL 模型输入参数范围(表 3).

根据表 3 的参数设置,改变土壤背景光谱,利用 PROSAIL 模型模拟得到 4941 条不同 LAI、Cab、ALA 组合下的水稻冠层光谱.以模拟数据集中波长为 660 nm(Red)、830 nm(NIR)对应的反射率分别为横坐标和纵坐标建立红光-近红外光谱空间(图 5),并选取 LAI 值分别为 0.05、0.3、0.5、0.7、1.0、1.5、2.0、3.0、4.0、6.0 时 x 对应的 660、830 nm 波长处的反射率值,将其绘制在红光-近红外光谱空间中即得到相应的 LAI 等值线.同时,将野外观测样点的光谱数据和 WorldView 3、Landsat 8 影像中水稻种植区各个像元的 Red-NIR 反射率一并绘制在该光谱空间.

由图 5 可知,模拟数据集中的 Red、NIR 波段反射率值域范围分别为(0.02,0.3)、(0.02,0.7).野外观测样点的 Red、NIR 波段反射率值域为(0.01,0.04)、(0.2,0.6),模拟数据集中包含了野外观测样点的信息.Landsat 8 数据的 Red(Band 4)、NIR(Band 5)反射率值域分别为(0.02,0.08)、(0.3,0.5),WorldView 3 Red(Band 5)、NIR(Band 6)反射率值

表 3 PROSAIL 模型变量取值

Table 3 Values of PROSAIL model variables

LAI	Cab ($\mu m \cdot cm^{-2}$)	ALA
0.05	8	38
0.1~1	23	45
1.1~2	25	47
2.1~3	27	48
3.1~4	30	49
4.1~5	35	50
5.1~6	38	51

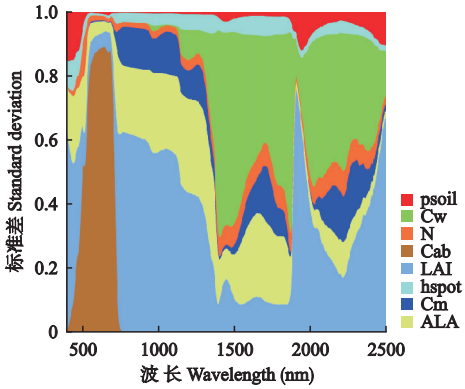


图 4　PROSAIL 各参数全局敏感性分析

Fig.4　Global sensitivity analysis of parameters in PROSAIL.

psoil：土壤因子 Soil parameter；Cw：叶片含水量 Leaf water content；N：叶片结构参数 Leaf structural parameter；Cab：叶绿素含量 Chlorophyll content；LAI：叶面积指数 Leaf area index；hspot：热点因子 Hotspot parameter；Cm：干物质含量 Dry matter content；ALA：平均叶倾角 Average leaf angle inclination.

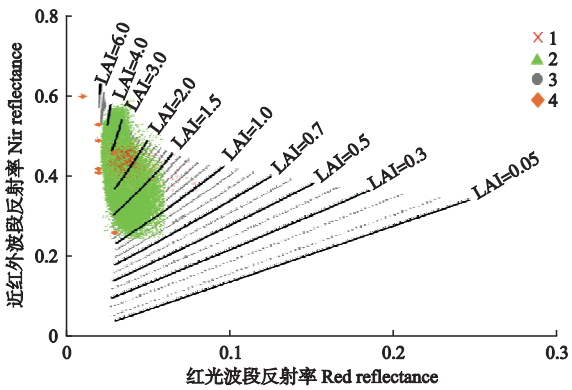


图 5　水稻田缨帽三角-叶面积指数分布模式

Fig.5　Distribution pattern of tasseled cap triangle-leaf area index of rice.

1）Landsat 8；2）WorldView 3；3）模拟数据集 Simulated data sets；4）观测样点 Osservation sampling points.

域分别为(0.02,0.08)、(0.2,0.6)，影像的 Red、NIR 波段反射率均分布在模拟数据集的范围内，并且在 Red-NIR 光谱空间中的分布与缨帽三角特征基本一致.

按照上述值域范围，利用离散点插值法[26]将红光反射率、近红外反射率以 0.01 为步长进行插值，得到每组红光-近红外反射率对应的叶面积指数，由此建立由(红光反射率、近红外反射率、叶面积指数)构成的查找表.利用该查找表对样点实测光谱进行 LAI 反演，由反演结果与实测 LAI 的散点图可以看出，LAI 反演值与实测值的偏离程度较大，R^2 = 0.69，RMSE = 0.73，其中，样点 a 的反演结果与实测值偏离最大(图 6A).分析样点 a 的光谱观测记录可知，在该样点进行观测时天空有云，会对地表反射

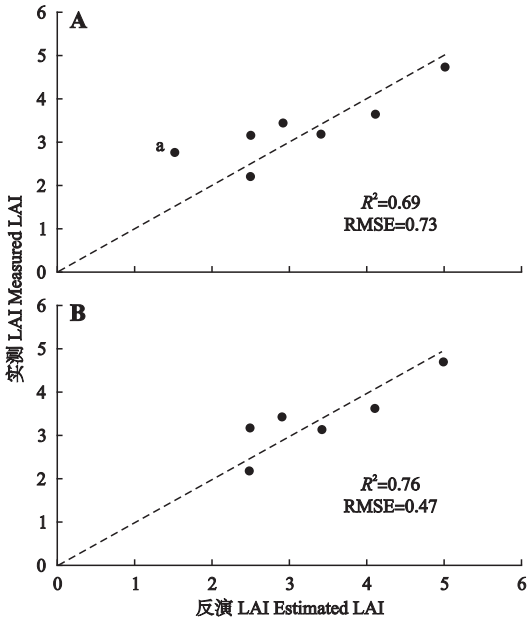


图 6　LAI 反演值与实测值的比较

Fig.6　Comparison between estimated LAI and measured LAI.

A：样点 a 数据 Data of sample point a；B：剔除样点 a 的数据 Data excluding sampling point a.

率的测量造成影响，从而使得 LAI 的反演精度降低.此外，该样点的植被覆盖度较低(约 60%).研究表明，植被等值线在红光-近红外光谱空间中的斜率和截距受到植被覆盖度的影响[27]，而本文建立 TCT-LAI 等值线模型时将植被盖度默认为 100%，这是样点 a 反演结果精度较低的另一原因.若剔除样点 a 的数据，R^2 = 0.76，RMSE = 0.47，则反演精度较高(图 6B).分析误差产生的原因可能为：1）观测误差，测量时由于天气、仪器等因素所产生的误差.2）算法误差，固定非敏感参数和建立查找表时的插值过程所产生的误差.

2.3　高分辨率叶面积指数参考图

利用基于 TCT-LAI 模式建立的水稻田红光-近红外波段反射率与 LAI 查找表，对 Landsat 8 和 WorldView 3 影像中水稻田进行 LAI 反演，并对反演结果进行统计分析.由图 7 和图 8 可以看出，由于 WorldView 3 数据分辨率更高(2 m)，对地物细节描述能力更强，因此，WorldView 3 反演的 LAI 值域范围较 Landsat 8 反演结果的值域范围更大，LAI 值分布更离散(标准差为 0.51).Landsat 8 和 WorldView 3 反演的 LAI 在整个值域范围内近似正态分布.Landsat 8 反演的 LAI 值主要介于[1.5,3.0)，占水稻田总面积的 97.7%.WorldView 3 反演的 LAI 值主要介于[1.5,3.5)，占水稻田总面积的 95.3%.实测 LAI 值介于(2.0,4.7)，Landsat 8、WorldView 3反演的LAI值

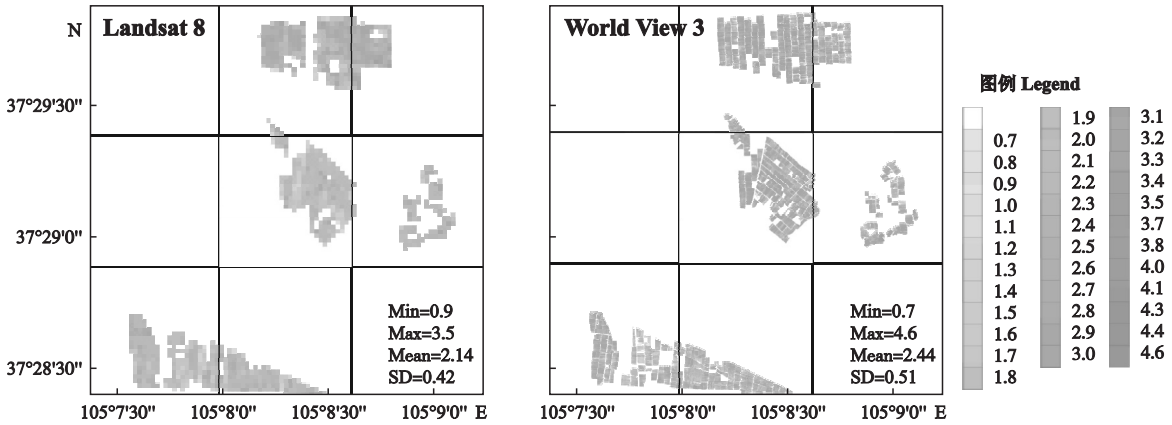


图 7 基于 Landsat 8 和 WorldView 3 数据反演的水稻 LAI
Fig.7 LAI of rice estimated from Landsat 8 and WorldView 3 images.

在该取值范围的像元数分别占水稻田总像元数的 71.6%、82.9%.因为,PROSAIL 模型假设植被冠层连续、覆盖均一,WorldView 3 像元尺度与该假设条件更接近,而 Landsat 8 存在混合像元,地表的空间异质性对反演结果影响较大,所以,Landsat 8 在实测值域范围内的水稻田像元总数较 WorldView 3 低.

2.4 基于高分辨率叶面积指数参考图的 MODIS 产品质量评价

将 WorldView 3 和 Landsat 8 反射率数据利用最近邻法重采样到 1 km 空间分辨率,根据建立的查找表进行 LAI 反演.将反演的 1 km 空间分辨率的 LAI 数据与 MODIS LAI 产品逐像元对比分析,其中,水稻田分布在像元 2、3、5、6、7、8 中(表 4).

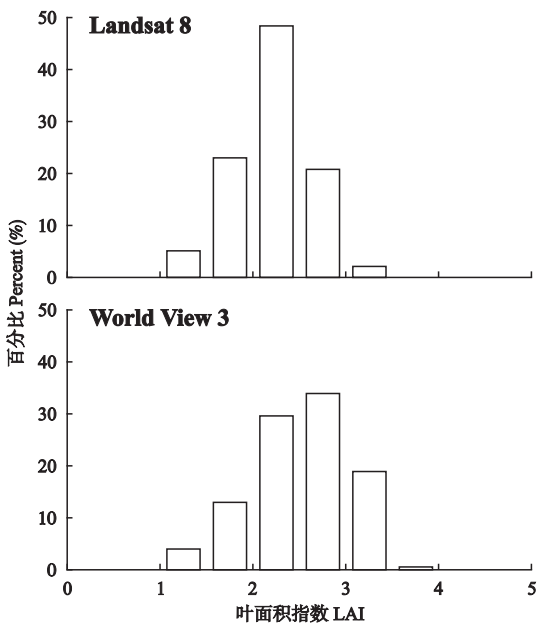


图 8 基于 Landsat 8 和 WorldView 3 反演的 LAI 直方图
Fig.8 Histogram of retrieved LAI from Landsat 8 and WorldView 3 images.

由 MODIS LAI 质量控制信息可知,除像元 4 为内陆淡水填充值(254)外,其他像元的 LAI 值由主算法反演得到,其值域范围为[0.7,0.8].升尺度后研究区 Landsat 8、WorldView 3 反演的 LAI 值域范围分别为 [0.05,2.4]、[0.05,3.1].对于水稻田所在的像元 2、3、5、6、7,MODIS 产品中的 LAI 值为 0.7 或 0.8,低于 Landsat 8、WorldView 3 的反演值,表明在水稻种植区,MODIS LAI 产品存在低估现象.这与 Cheng[28] 对中国南方水稻 MODIS LAI 产品的验证结果一致,在像元编号为 5、6、7 时,Worldview 3 反演 LAI 值小于 Landsat 8 反演 LAI 值,结合单个像元内水稻田的面积比与影像数据分析可知,由于 WorldView 3 的分辨率较高,且像元编号为 5 时水稻田周围多为休耕地,像元编号为 6、7 时,像元内多为水体,水稻田所占面积比较低,这些因素均会对像元光谱的重采样过程产生影响,进而影响水稻田 LAI 的反演.即产生这种现象的原因可能是影像数据的分辨率和地表的空间异质性.

3 结 论

本文利用实测数据,在验证辐射传输模型 PROSAIL 对水稻冠层反射率模拟有效性的基础上率定模型中的参数取值.结果表明,PROSAIL 模型适用于水稻成熟期的冠层光谱模拟,模拟的水稻冠层光谱与实测光谱曲线形态一致.根据率定的 PROSAIL 模型输入参数范围,模拟了不同 LAI、Cab、ALA 条件下的水稻冠层反射率,在模拟数据的基础上获得水稻田缨帽三角-叶面积指数分布模式,建立了水稻田 LAI 反演的查找表.利用实测光谱反演 LAI 的结果表明,LAI 反演值与实测值之间具有良好的线性相关关系,$R^2=0.76$,RMSE=0.47.之后,将本文建立的

表 4　WorldView 3、Landsat 8 反演的 LAI 与 MODIS LAI 产品的对比
Table 4　Comparison of LAI retrieved from WorldView 3 and Landsat 8 images with MODIS LAI products

像元编号* Pixel number	MODIS LAI 产品				Landsat 8 LAI	World View3 LAI
	质量控制信息 Quality control information	主要覆被类型 Main cover type	单个像元水稻田面积比** Single cell area ratio of paddy field (%)	叶面积指数 LAI		
1	10	休耕地、居民地	0	0.6	–	–
2	18	水稻田、居民地、休耕地	25	0.7	1.7	2.8
3	10	休耕地、水稻田、居民地	11	0.7	0.7	1.1
4	157	林地、休耕地、河流	0	0	–	–
5	10	休耕地、水稻田、居民地、河流	27	0.7	2.1	1.6
6	10	休耕地、水稻田、坑塘	10	0.7	2.0	1.0
7	10	水稻田、休耕地、坑塘、河流	23	0.8	2.4	2.2
8	18	河流、湿地、水稻田	15	0.7	0.05	0.05
9	10	河流、湿地	0	0.5	–	–

*像元编号表示对 MODIS LAI 9 个像元从左至右、从上到下逐像元编号 The pixel number denoted the 9 pixels in MODIS LAI product from left to right and form top to bottom. **单个像元水稻田面积比表示 WorldView 3 影像中水稻田的像元总数所对应的面积占 MODIS 1 km 分辨率像元的面积比例 Single cell area ratio of rice field denoted the area ratio of pixel of rice field in the WorldView 3 images to a MODIS 1 km pixel.

查找表用于 Landsat 8、WorldView 3 高分辨率遥感数据的水稻 LAI 反演，WorldView 3 数据反演的 LAI 值域范围比 Landsat 8 数据反演的 LAI 值域范围大，且 WorldView 3 的反演值分布更离散；WorldView 3 反演的 LAI 值介于实测 LAI 值域范围的像元数占水稻田总像元数的 82.9%，反演精度更高.最后，将 Landsat 8、WorldView 3 反射率数据重采样至 1 km 后反演的 LAI 与 MODIS LAI 产品对比可知，MODIS LAI 产品中水稻田所在像元对应的 LAI 值存在明显的低估现象.

本文从植被冠层反射率在红光-近红外光谱空间中的缨帽三角及叶面积指数等值线分布模式出发，初步探讨了基于 TCT-LAI 等值线模式建立查找表的水稻 LAI 反演方法，反演结果也证明了这一方法的有效性及可靠性.研究表明，植被等值线在红光-近红外光谱空间中的分布（斜率、截距）受到植被覆盖度的影响，而水稻在不同生长阶段的植被覆盖度不同.本研究中所用的观测数据及影像数据的获取时间为水稻拔节期、抽穗期，其植被覆盖度较高，在冠层反射率模拟及 TCT-LAI 等值线分布模式的分析中，未考虑植被覆盖度的影响.因此，如何构建适用于水稻整个生长期的 TCT-LAI 等值线模式来反演时间序列的水稻叶面积指数是今后仍需探讨的问题.

参考文献

[1] Chen JM, Black T. Defining leaf area index for non-flat leaves. *Plant, Cell & Environment*, 1992, **15**: 421-429

[2] Ganopolski A, Kubatzki C, Claussen M, *et al*. The influence of vegetation-atmosphere-ocean interaction on climate during the mid-holocene. *Science*, 1998, **280**: 1916-1919

[3] Xiang Y (向　阳), Xiao Z-Q (肖志强), Liang S-L (梁顺林), *et al*. Validation of global land surface satellite (GLASS) leaf area index product. *Journal of Remote Sensing* (遥感学报), 2014, **18**(3): 573-596 (in Chinese)

[4] Weiss M, Baret F, Garrigues S, *et al*. LAI and fAPAR CYCLOPES global products derived from VEGETATION. Part 2: Validation and comparison with MODIS collection 4 products. *Remote Sensing of Environment*, 2007, **110**: 317-331

[5] Yoshioka H, Huete AR, Miura T. Derivation of vegetation isoline equations in red-NIR reflectance space. *Geoscience & Remote Sensing IEEE Transactions on*, 2000, **38**: 838-848

[6] Chen Y-H (陈艳华), Zhang W-C (张万昌), Yong B (雍　斌). A feasibility study of leaf area index inversion using radiative transfer model based on TM data. *Remote Sensing for Land & Resources* (国土资源遥感), 2007, **19**(2): 44-49 (in Chinese)

[7] Liu X-C (刘晓臣), Fan W-J (范闻捷), Tian Q-J (田庆久), *et al*. Comparative analysis among different methods of leaf area index inversion. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis* (北京大学学报：自然科学版), 2008, **44**(5): 827-834 (in Chinese)

[8] Gu C-Y (谷成燕), Du H-Q (杜华强), Zhou G-M (周国模), *et al*. Retrieval of leaf area index of moso bamboo forest with Landsat thematic mapper image based on prosail canopy radiative transfer model. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2013, **24**(8): 2248-2256 (in Chinese)

[9] Yang F (杨　飞), Sun J-L (孙九林), Zhang B (张柏), *et al*. Assessment of MODIS LAI product accuracy based on the prosail model, TM and field measurements. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2010, **26**(4): 192-197 (in Chinese)

[10] Du Y-Z (杜育璋), Jiang X-G (姜小光), Zhang Y-Z (张雨泽), *et al*. Retrieving leaf area index using prosail radiative transfer model based on Landsat 8 image. *Arid Land Geography* (干旱区地理), 2016, **39**(5): 1096-1103 (in Chinese)

[11] Qin Z-F (秦占飞), Shen J (申 健), Xie B-N (谢宝妮), *et al*. Hyperspectral estimation model for predicting LAI of rice in Ningxia irrigation zone. *Geomatics and Information Science of Wuhan University* (武汉大学学报:信息科学版), 2017, **42**(8): 1159-1166 (in Chinese)

[12] Xin M-Y (辛明月), Yin H (殷 红), Chen L (陈龙), *et al*. Estimation of rice canopy LAI with different growth stages based on hyperspectral remote sensing data. *Chinese Journal of Agrometeorology* (中国农业气象), 2015, **36**(6): 762-768 (in Chinese)

[13] Yang Y-J (杨闫君), Tian Q-J (田庆久), Huang Y (黄 彦), *et al*. Validation of leaf area index inversion on GF-1 satellite remote sensing imagery. *Remote Sensing Information* (遥感信息), 2015, **30**(5): 62-68 (in Chinese)

[14] Nguyen TTH, Verhoef W, Bie DCAJM. Seasonal LAI estimation of irrigated rice using soil-leaf-canopy, SLC, radiative transfer model. 32nd Asian Conference on Remote Sensing 2011, Taipei, 2011: 327-332

[15] Campos-Taberner M, García-Haro FJ, Camps-Valls G, *et al*. Multitemporal and multiresolution leaf area index retrieval for operational local rice crop monitoring. *Remote Sensing of Environment*, 2016, **187**: 102-118

[16] Huete A, Miura T, Yoshioka H, *et al*. Indices of Vegetation Activity. Berlin: Springer, 2014

[17] Verhoef W. Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling: The SAIL model. *Remote Sensing of Environment*, 1984, **16**: 125-141

[18] Jacquemoud S, Baret F. PROSPECT: A model of leaf optical properties spectra. *Remote Sensing of Environment*, 1990, **34**: 75-91

[19] Verhoef W. Earth observation modeling based on layer scattering matrices. *Remote Sensing of Environment*, 1985, **17**: 165-178

[20] Schaepman-Strub G, Schaepman ME, Painter TH, *et al*. Reflectance quantities in optical remote sensing-definitions and case studies. *Remote Sensing of Environment*, 2006, **103**: 27-42

[21] Bai J-W (白继伟). The Study on the Spectral Mapping Technique based on the Hyperspectral Database. PhD Thesis. Beijing: Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, 2002 (in Chinese)

[22] Hosgood B, Jacquemoud S, Andreoli G, *et al*. Leaf Optical Properties Experiment 93 (LOPEX93). European Commission Joint Research Centre Institute for Remote Sensing Applications, Report EUR 16095 EN, 1994

[23] Sobol IM. On sensitivity estimation for nonlinear mathematical models. *Keldysh Applied Mathematics Institute*, 1990, **2**: 112-118

[24] Zhang X-C (张晓翠), Lv C-G (吕川根), Hu N (胡凝), *et al*. Simulation of leaf inclination angle distribution for rice with different plant types. *Chinese Journal of Rice Science* (中国水稻科学), 2012, **26**(2): 205-210 (in Chinese)

[25] Yang F (杨 峰), Fan Y-M (范亚民), Li J-L (李建龙), *et al*. Estimating LAI and CCD of rice and wheat using hyperspectral remote sensing data. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2010, **26**(2): 237-243 (in Chinese)

[26] Grazvydas. Using TriScatteredInterp with an Image [EB/OL]. (2012-11-27) [2017-03-04]. https://cn.mathworks.com/help/matlab/ref/triscatteredinterp.html?s_tid=srchtitle

[27] Yoshioka H, Miura T, Huete AR, *et al*. Analysis of vegetation isoclines in red-NIR reflectance space. *Remote Sensing of Environment*, 2000, **74**: 313-326

[28] Cheng Q. Validation and correction of MOD15-LAI using *in situ* rice LAI in southern China. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2008, **39**: 1658-1669

作者简介 李亚妮,女,1992 年生,硕士研究生.主要从事干旱半干旱地区植被叶面积指数反演研究. E-mail: ynli15@lzu.edu.cn

责任编辑 杨 弘

李亚妮, 鲁蕾, 刘勇. 基于 PROSAIL 模型的水稻田缨帽三角-叶面积指数模型及其应用. 应用生态学报, 2017, **28**(12): 3976-3984

Li Y-N, LU L, Liu Y. Tasseled cap triangle (TCT)-leaf area index (LAI) model of rice fields based on PROSAIL model and application. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, **28**(12): 3976-3984 (in Chinese)