

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.03.033

基于优化 PROSAIL 叶倾角分布函数的玉米 LAI 反演方法

苏伟¹ 郭皓¹ 赵冬玲¹ 刘婷¹ 张明政^{1,2}

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 山东农业大学资源与环境学院, 泰安 271018)

摘要: 叶面积指数(LAI)是描述玉米冠层结构的重要参数之一,PROSAIL模型是常用于反演LAI的机理模型,能较为真实地反演植被冠层真实情况,但PROSAIL模型中使用的叶倾角分布函数假定区域内所有作物叶倾角分布是相同的,不能反映玉米植株真实的叶倾角分布情况。本研究以高分一号遥感影像和地基激光雷达点云数据作为数据源,充分利用地基激光雷达(TLS)在获取植被结构参数上的优势,通过体素化的方法对玉米叶片回波点云进行分割,获取每个拟合叶片单元的叶倾角,进而得到玉米植株真实的叶倾角分布,结合椭球分布函数得到玉米精确的叶倾角分布函数,实现对PROSAIL模型中叶倾角分布函数的优化。研究过程中分别基于未改进的PROSAIL模型和经过TLS优化后的PROSAIL模型反演黑龙江825农场主要玉米种植区的LAI。LAI反演结果表明:2种反演方法得到的LAI与实测LAI都具有较好的相关性,决定系数 R^2 分别为0.5576和0.8583,模型可信度较高;但基于PROSAIL模型反演所得LAI结果偏低,在利用TLS数据提取叶倾角对模型进行优化后,反演LAI的估算精度由26.53%提高到96.23%。由此可知,通过引入TLS点云数据改进农作物叶倾角分布函数能大幅度提高LAI反演的准确性。

关键词: 玉米; PROSAIL模型; 叶倾角分布函数; 叶面积指数; 地基激光雷达; 高分一号

中图分类号: P237 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)03-0234-08

Leaf Area Index Retrieval for Maize Canopy Using Optimized Leaf Angle Distribution Function of PROSAIL Model

Su Wei¹ Guo Hao¹ Zhao Dongling¹ Liu Ting¹ Zhang Mingzheng^{1,2}

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China)

Abstract: Leaf area index (LAI) is one of the important parameters to describe the corn canopy structure. PROSAIL model is a mechanism model for retrieving LAI, which can express canopy situation more truly. But the leaf angle distribution function used in PROSAIL model assumed that the leaf angle distribution is constant during whole crop growth period, and it can't reflect the actual leaf angle distribution of the corn plant. This paper studied the extracting method of the maize LAI based on the PROSAIL model, using GF-1 images and terrestrial LiDAR data. In order to get the leaf angle distribution of maize, the point cloud of maize was separated into small leaf units through voxel method, and then the surface was matched according to the point cloud in each voxel. The accurate leaf angle distribution function was acquired from statistics data of each leaf unit angle. Combining with the ellipsoid distribution function, the accurate leaf angle distribution function was got, which is used to optimize the PROSAIL model. In this research, the maize canopy LAI was retrieved in Farm No. 852, Heilongjiang Province, through traditional PROSAIL model and optimized PROSAIL model respectively. The main conclusion is as follows: all of the two methods of inversion of LAI have a good correlation with measured

收稿日期: 2015-09-22 修回日期: 2015-10-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(41371327)和北京高等学校青年英才计划项目(YETP0316)

作者简介: 苏伟(1979—),女,副教授,博士生导师,主要从事农业遥感应用研究,E-mail: suwei@cau.edu.cn

通信作者: 赵冬玲(1961—),女,副教授,主要从事工程测量研究,E-mail: zhaodongling@cau.edu.cn

LAI as coefficient is 0.5576 and 0.8583 respectively, which proved that this model is credible. But the result of inversed LAI based on unimproved model is low. After optimized model with TLS data, the inversion of LAI estimation accuracy was improved from 26.53% to 96.23%. Therefore, it can greatly improve the accuracy of LAI inversion by introducing the TLS point cloud data to improve crops leaf angle distribution function in PROSAIL model.

Key words: maize; PROSAIL model; leaf angle distribution function; LAI; TLS; GF-1

引言

叶片是植物进行光合作用等生理过程的重要载体,叶面积指数(Leaf area index, LAI)是对叶片进行定量描述的常用参数,准确获取叶面积指数对作物的长势监测、估产等都有重要意义。随着遥感技术的发展,通过遥感影像提取大面积农作物信息,进而反演大范围的 LAI 信息成为切实可行的方式^[1]。目前,基于遥感技术反演作物 LAI 的方法主要有 2 种:统计模型法和光学模型法^[2]。由于利用基于辐射传输方程的光学模型反演 LAI 的方式严格遵循物理原理,不依赖于植被类型,具有普适性因而得到广泛应用。PROSAIL 模型^[3]是常用的辐射传输模型,2002 年,BACOUR 将 PROSPECT 模型和 SAIL 模型耦合为 PROSAIL 模型,有效地将 SAIL 模型参数和叶片的生化组分参数相结合,提高了模型精度。该模型在遵循严格物理原理的基础上,综合考虑了植被对太阳辐射的吸收、二向反射、叶片结构参数等因素,能够比较真实地反映植被冠层的情况。因此,本文选用 PROSAIL 模型来实现 LAI 的反演。

然而,由于光学遥感穿透能力较差,只能获取植被冠层的水平信息,无法体现冠层内部叶片对 LAI 的贡献,其反演精度受到一定的影响。激光雷达(Light detecting and ranging, LiDAR)作为一种新兴的主动遥感技术,具有很强的穿透能力,能够直接、快速、精确地获取目标的结构参数^[4]。尤其是地基激光雷达(Terrestrial laser scanning, TLS),能够将扫

描精度误差控制在毫米级,提供从单株到区域尺度的植物高精度三维结构数据^[5]。目前,激光雷达已经成功应用于树高、生物量等作物参数^[6-9]的估算中,国内外也已经开展了一些基于 TLS 提取叶面积垂直分布的研究^[10-11]。将光学遥感技术与 TLS 结合,利用 TLS 在精确获取植被结构参数方面的优势,提高利用遥感影像提取大范围 LAI 的精度,可为作物的长势监测、估产等提供更准确的依据。

本文以高分一号遥感影像和 TLS 点云数据作为数据源,基于未改进的 PROSAIL 模型和经过 TLS 优化后的 PROSAIL 模型反演黑龙江省 852 农场主要玉米种植区的玉米 LAI。

1 研究区概况与数据源

1.1 研究区概况

本研究选取黑龙江 852 农场主要玉米种植区(第 4、5、8、11、12、13、19 大队)作为研究区(图 1)。852 农场位于黑龙江省双鸭山市宝清县东南部,属于温带大陆性气候,年平均温度 3.2℃,无霜期 145 d,年平均日照时数 2491 h,年降水量 400~600 mm,气候温和,适合多种作物生长。全场耕地面积 69833 hm²,主要作物有玉米、水稻、大豆等,本文以玉米作为研究对象,选取场区内主要玉米种植区域进行实验。玉米作为该农场的主要种植作物,播种期一般为 5 月中旬,6 月为夏玉米苗期,8 月上旬为灌浆期,9 月下旬成熟收割。本文于 8 月上旬进行野外实测,该时期研究区内玉米实际生育期为抽雄期。

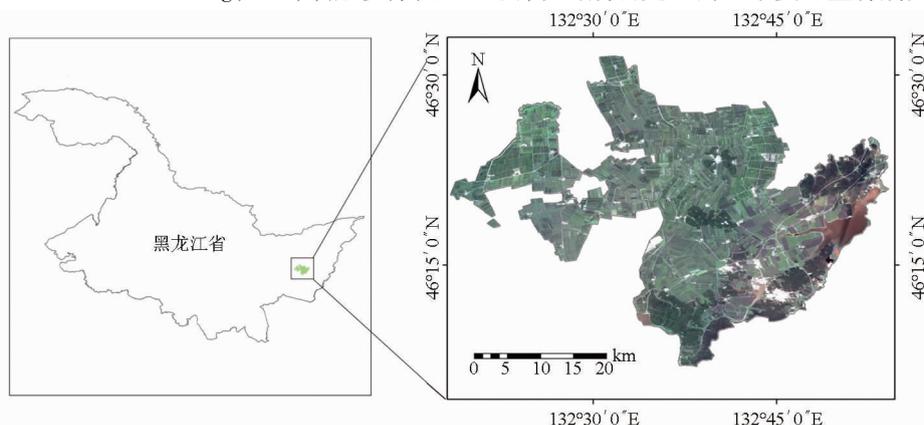


图 1 研究区位置及高分一号遥感影像

Fig. 1 Study area and GF-1 remote sensing images

1.2 数据源

1.2.1 高分一号遥感影像

本研究中使用的遥感数据为高分一号遥感影像,影像获取时间为2015年8月5日,影像空间分辨率为8 m,包括红、绿、蓝、近红外4个波段,原始影像经过辐射定标、大气校正、几何校正等预处理后用于LAI的反演。

玉米种植区数据由红兴隆农垦管理局提供。

1.2.2 地基激光点云数据

本研究中使用的激光雷达扫描仪型号为 FARO Fouse 3D X330,激光扫描时间为2015年8月5日,与影像获取时间一致,当日天气状况为无风、晴朗。从实测样点选取玉米地块,在其前方架设2个激光扫描基站进行扫描,以获取玉米冠层三维点云数据。对获取的点云数据进行配准、去噪等预处理,并分离地面点,从而获得玉米冠层点云数据。叶倾角是叶片表面法线方向与天顶角方向的夹角^[12],提取叶倾角前需要分离玉米叶片和茎秆,本研究中使用腐蚀算法,根据玉米叶片与茎秆的形态差异提取玉米叶片回波点云。

1.2.3 野外实测数据

野外实测数据主要用于 PROSAIL 模型的调参以及 LAI 反演精度的验证。在研究区域内选取均匀分布的8个样点,于2015年7月31日—8月6日进行野外实测,测量对象包括 LAI、株高、行距等,其中 LAI 的获取是通过 LAI2000 和 LAI2200c 同时对同样点进行测量。由于利用 LAI 仪器测量获取 LAI 的方法容易受到光线、测量方式等因素的影响,为保证测量数据的准确性,本文取2种仪器测得数据的均值作为实测 LAI 数据。

2 研究原理与方法

2.1 PROSAIL 模型

PROSAIL 模型是叶片光学模型 PROSPECT 与

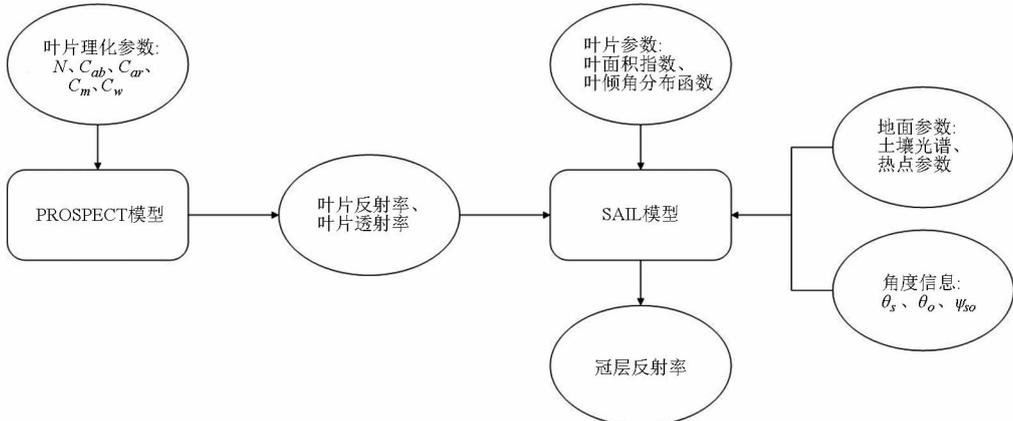


图2 PROSAIL 模型

Fig.2 PROSAIL model

冠层辐射传输模型 SAIL 模型的耦合模型,是目前使用最广泛的冠层辐射传输模型之一^[3]。PROSPECT 模型通过将叶片模拟成一个平板模型,利用叶绿素含量 C_{ab} ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)、叶片干物质含量 C_m ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)、叶片等效水厚度 C_w (cm)、叶片结构参数 N 等叶片理化参数模拟出叶片在波长 400 ~ 500 nm 之间的反射率和透射率^[13]。SAIL 模型是通过模拟植被冠层内部的多次反射、散射等辐射传输过程,利用叶倾角分布、叶片透射率、叶片反射率、背景土壤反射特性、太阳和冠层方位角、相对方位角等参数模拟出接近于真实场景的植被冠层在 400 ~ 2500 nm 之间的反射率光谱。

PROSPECT 模型与 SAIL 模型的耦合如图 2 所示,将 PROSPECT 模型输出的叶片反射率、透射率输入到 SAIL 模型模拟得到植被冠层反射率。PROSAIL 模型的正向模拟公式为

$$\rho(\lambda) = \text{PROSAIL}(N, C_{ab}, C_{ar}, C_w, C_m, V_{\text{LIDF}}, V_{\text{LAI}}, H, \theta_s, \theta_o, \psi_{so}, \rho_s(\lambda)) \quad (1)$$

式中 $\rho(\lambda)$ ——冠层光谱反射率

C_{ab} 、 C_{ar} 、 C_w 、 C_m ——叶片生化参数

V_{LIDF} ——叶片叶倾角分布函数

V_{LAI} ——叶面积指数

H ——热点效应参数

θ_s ——太阳天顶角

θ_o ——观测天顶角

ψ_{so} ——太阳-卫星相对方位角

$\rho_s(\lambda)$ ——土壤反射系数

2.2 叶倾角分布函数获取

2.2.1 Campbell 椭球分布模型

叶倾角的分布会改变植被冠层对太阳辐射的削弱作用,同时影响穿过植被冠层的太阳辐射的截获量,因此叶倾角的分布是定量遥感中的重点和难点。PROSAIL 模型中利用 Campbell 函数^[13]模拟得到植被的叶倾角分布。常见的叶倾角分布分为 5 种^[15]:

①水平叶倾角分布：叶倾角全部为 90° ，方位角随机。
 ②垂直叶倾角分布：叶倾角全部为 0° ，方位角随机。
 ③锥面叶倾角分布：叶倾角全部为 $0^\circ \sim 90^\circ$ 之间的某一固定角度，方位角随机。
 ④球面叶倾角分布：叶倾角呈连续随机分布，方位角随机。
 ⑤椭球叶倾角分布：叶倾角呈连续随机的椭球面分布，方位角随机。
 目前应用最广泛的分布为 Campbell 椭球分布函数^[12]，尤其在农业方面^[14, 16-18]，其表达式为

$$g(\alpha) = \frac{2\chi^3 \sin\alpha}{A(\cos^2\alpha + \chi^2 \sin^2\alpha)^2} \quad \left(0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2}\right) \quad (2)$$

其中

$$A = \begin{cases} \chi + \frac{\arcsin\varepsilon}{\varepsilon} & (\chi < 1, \varepsilon = (1 - \chi^2)^{\frac{1}{2}}) \\ 2 & (\chi = 1) \\ \chi + \frac{\ln \frac{1 + \varepsilon}{1 - \varepsilon}}{2\varepsilon\chi} & (\chi > 1, \varepsilon = (1 - \chi^{-2})^{-\frac{1}{2}}) \end{cases} \quad (3)$$

式中 α ——叶倾角 A ——与 χ 有关的参数

$g(\alpha)$ —— α 的概率密度

χ ——椭球分布参数，为椭球水平半轴和垂直半轴的比值^[18]

在椭球分布函数中， χ 是一个不确定的参数，计算式为

$$\chi^2 = \frac{1}{3 \sin^2 \alpha_{\max}} + 1 \quad (4)$$

式中 α_{\max} ——叶倾角分布中频率最大的角度^[19]

本研究利用 TLS 数据得到相应研究区的玉米叶倾角分布情况。

2.2.2 基于 TLS 点云数据的玉米叶倾角分布提取

本研究通过对点云数据体素化，根据最小二乘法原理，获取每个体素内拟合叶面的叶倾角并进行统计，从而获得玉米植株的叶倾角分布。不同于以往基于点的法向量提取方式，本文采用的是提取叶

片单元法向量获得叶倾角的方式，能够更加准确地表达真实叶片叶倾角的分布情况。

借鉴 HOSOI 和 OMASA 提出的基于体素的冠层分析方法，对经过预处理后的离散激光回波点云构建体素体，并确定每个体素的属性（即有点云、无点云）。体素是三维数组中最基本的单元，所有点云转换为体素坐标的计算式为^[20]

$$\begin{cases} i = \text{Int} \left(\frac{X - X_{\min}}{\Delta i} \right) + 1 \\ j = \text{Int} \left(\frac{Y - Y_{\min}}{\Delta j} \right) + 1 \\ k = \text{Int} \left(\frac{Z - Z_{\min}}{\Delta k} \right) + 1 \end{cases} \quad (5)$$

式中 (i, j, k) ——体素坐标

Int——取整函数

(X, Y, Z) ——配准后的点云坐标

$X_{\min}, Y_{\min}, Z_{\min}$ —— X, Y, Z 坐标的最小值

$\Delta i, \Delta j, \Delta k$ ——体素的长、宽、高

体素大小根据激光点云的获取精度而定。对所有具有回波点云的体素赋值属性为 1，即属性 1 表示在这个体素处激光光束被拦截，其余的体素属性为 0。

对有玉米叶片回波点云的体素，根据最小二乘法进行曲面拟合，并对拟合曲面求法向量，如图 3 所示。

图 3c 为玉米叶片体素化示意图，为便于理解，采用侧面叶片体素化及体素内拟合叶片法向量图进行说明，将激光雷达点云体素化后，在每个有玉米点云的体素内进行叶片拟合，如图 3d 所示，平面 S 为根据叶片点云拟合所得平面 $Ax + By + Cz + D = 0$ ，其中一个法向量 L 为 (A, B, C) ，与水平地面法向量 N 的夹角 α' ，根据角度关系可得，叶倾角 α 与 α' 相等。

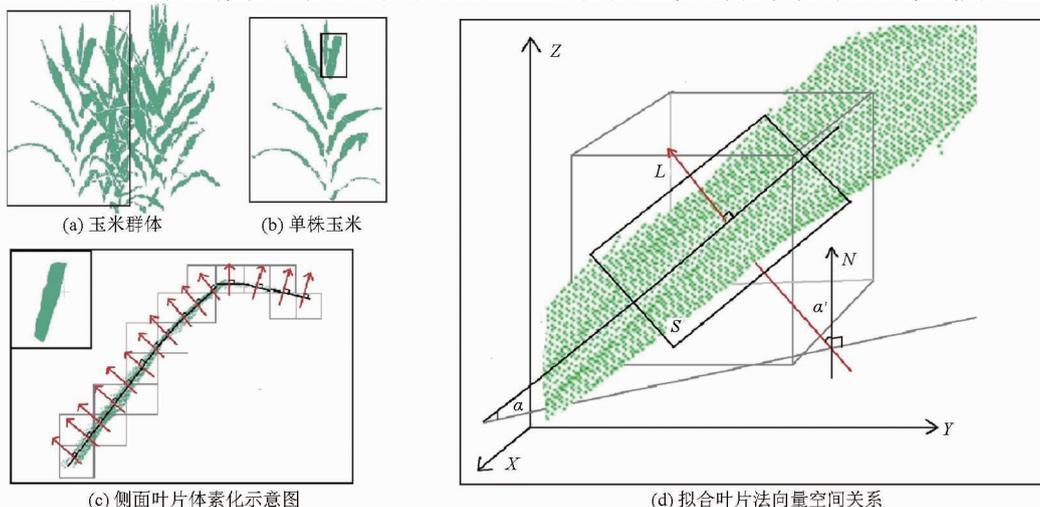


图 3 叶倾角提取示意图

Fig. 3 Diagram of leaf angle extraction

根据拟合叶片法向量与水平地面法向量求取其夹角 α' , 进而获得该叶片单元的叶倾角。对所有包含回波点云的体素基于叶片单元求取叶倾角并进行统计, 得到玉米冠层叶倾角分布频率函数。夹角计算公式为

$$\cos\alpha = \cos\alpha' = \frac{|L \cdot N|}{|L| \cdot |N|} \quad (6)$$

相比于传统的叶倾角手工测量, 基于激光雷达点云单点的叶倾角提取方法能更快速、准确地提取玉米植株叶倾角的真实分布情况。传统植物叶倾角手工测量方法, 费时、费力、且只能在有限样点上测量^[12]。基于激光点云单点的叶倾角提取方法主要是将单点在一定邻域内的点集拟合成面, 求取该平面的法向量作为该点的法向量进而获得叶倾角^[19]。虽然通过该方法可获得叶倾角的分布情况, 但存在以下缺点: ①由于每个点的邻域不同, 可能导致本处于同样空间走向的叶片点云提取出不同的叶倾角。②由于实际获取的点云不能保证处处密度相同, 这样基于点统计出的叶倾角分布会呈现出点密度较大处叶片的叶倾角频率偏高, 而点密度较小处叶片的叶倾角频率偏低, 造成误差。而本研究中基于拟合叶片单元法向量求取叶倾角分布情况的方法很好地避免了上述问题, 能够更加准确地反映玉米植株叶倾角的真实分布情况。

3 结果与分析

3.1 基于 PROSAIL 模型的 LAI 反演结果

由于 PROSAIL 模型中涉及到的参数比较多, 从正向模型可以看出该函数不能求出其反函数, 因此需要通过迭代反演得到需要的地表参数。本研究以遥感数据为基础进行反演, 利用查找表法反演 LAI, 然后构建代价函数确定最优解。主要分为 3 步: ①通过敏感性分析确定模型中的变量和常量。②通过先验和实测数据给模型变量一定阈值, 并设置步长, 代入正向模型, 得到不同参数值组合对应的一组输入-输出结果, 得到查找表。③通过最小化代价函数迭代计算出反演参数。

本研究所用波段的光谱反射率在 450 ~ 960 nm 之间, 在该波段范围内 LAI、叶片结构参数、叶绿素、等效水厚度以及干物质含量均为敏感参数, 将其确定为可变参数, 类胡萝卜素在模型中表现为不敏感, 设为固定值^[21], 叶倾角则通过 Campbell 函数模拟叶倾角分布函数得到。

反演参数主要通过野外实测、文献查阅、经验值以及 LOPEX93 数据库获得, 表 1、2 为参数设置。

表 1 PROSAIL 模型中的变量参数

Tab. 1 Variable parameters setting of PROSAIL model

可变参数	最小值	最大值	步长
叶面积指数 $V_{LAI}/(m^2 \cdot m^{-2})$	2	9	0.1
叶绿素含量 $C_{ab}/(\mu g \cdot cm^{-2})$	20	60	2
叶片结构参数 N	1	1.5	0.1

表 2 PROSAIL 模型中的常量参数

Tab. 2 Quantitative parameters setting of PROSAIL model

常量参数	数值
类胡萝卜素含量 $C_{ar}/(\mu g \cdot cm^{-2})$	8
叶片等效水厚度 C_w/cm	0.01 ~ 10.05
叶片干物质含量 $C_m/(\mu g \cdot cm^{-2})$	0.004 ~ 0.013
叶倾角分布函数 V_{LIDF}	椭球分布函数
太阳天顶角 $\theta_s/(\circ)$	29
观测天顶角 $\theta_o/(\circ)$	0
太阳-卫星相对方位角 $\psi_{so}/(\circ)$	0
热点效应参数 H	0.1
土壤反射系数 $\rho_s(\lambda)$	2

根据参数设置, PROSAIL 模型生成 8 949 组数据。PROSAIL 模拟得到的反射率为 400 ~ 2 500 nm 之间连续波长对应的反射率, 为了准确地与输入的高分一号影像各波段反射率匹配, 需要利用光谱响应函数得到各波段范围内的有效波长, 选取有效波长对应的反射率, 作为查找表里模型模拟得到的反射率, 由此构建查找表。将高分一号影像红 (630 ~ 690 nm)、绿 (520 ~ 590 nm)、蓝 (450 ~ 520 nm)、近红外 (770 ~ 890 nm) 4 个波段的反射率输入, 与查找表中的反射率进行匹配, 根据最小二乘法构建的代价函数找到最吻合的一组值, 从而得到反演的 LAI。由图 4 可得, 研究区内反演的 LAI 的取值范围为 1.8 ~ 3.5, 较真实值偏低。

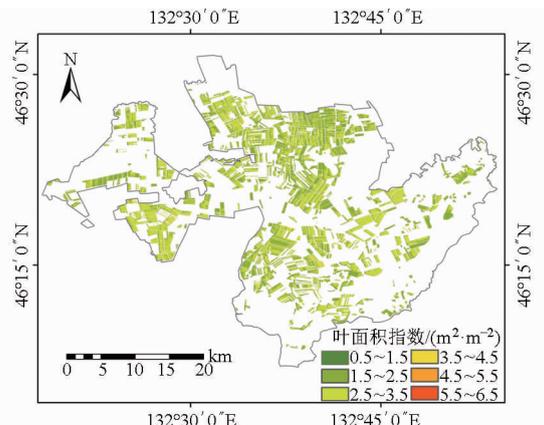


图 4 基于 PROSAIL 模型玉米 LAI 反演结果

Fig. 4 Inversion result of maize's LAI based on PROSAIL model

3.2 基于 TLS 改进叶倾角分布函数的 LAI 反演结果

3.2.1 叶倾角提取

从地基激光雷达扫描所获的各样点点云数据

中,选取其中一处玉米植株较完整、遮挡不严重的点云作为实验数据,进行玉米植株的提取、去噪等处理,在 CloudCompare 软件中手动分离地面点,并采用腐蚀算法将茎秆回波点云进行分离,从而得到玉米植株叶片点云(图 5)。

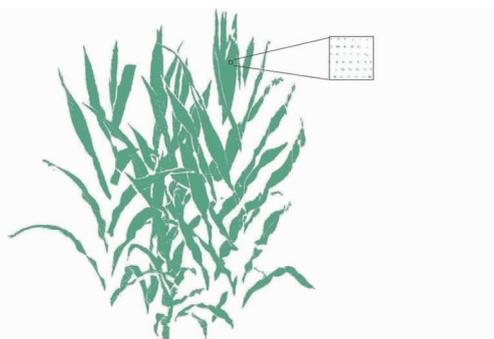


图 5 玉米叶片点云示意图

Fig. 5 Point cloud of maize's leaf

本文利用 TLS 数据进行玉米冠层叶倾角的提取。首先,对经过预处理后的点云数据体素化;然后,在每个体素内根据最小二乘法原理拟合叶面,对每个拟合面求取法线以获取每个拟合叶片单元的叶倾角;最后,对所有叶倾角出现概率进行统计,得到玉米植株的叶倾角分布。鉴于激光点云数据的精度为 1 mm,本文以 15 mm 为单位对点云数据进行体素化,既能保证单位体素内点云足够拟合面,又能使分割的叶片单元足够小,确保所求叶倾角的精度^[22]。

图 6 是实验样点玉米叶倾角统计直方图,可以看出叶倾角的分布主要集中在 85°~90°的范围内,其中叶倾角为 88°的单位叶片数量最多。该研究区内玉米品种叶片中脉粗壮,不易弯曲下垂,因此叶片多呈平直形态,叶倾角较大(图 5),所得叶倾角分布与植株实际形态比较吻合。利用式(5)可以计算出椭球分布参数 χ 为 1.334。

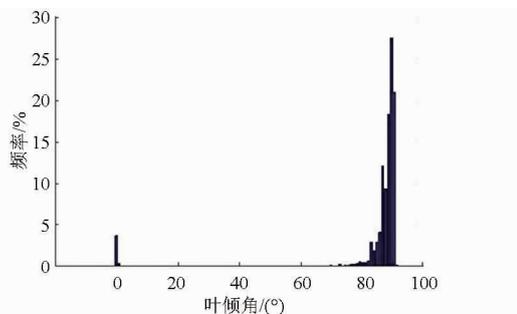


图 6 叶倾角频率分布直方图

Fig. 6 Frequency distribution histogram of LAD

3.2.2 LAI 反演结果

将基于 TLS 得到的玉米关键生育期叶倾角分布函数引入 PROSAIL 模型中,通过构建查找表的代价函数的反演得到研究区 LAI(图 7)。由图 7 可得

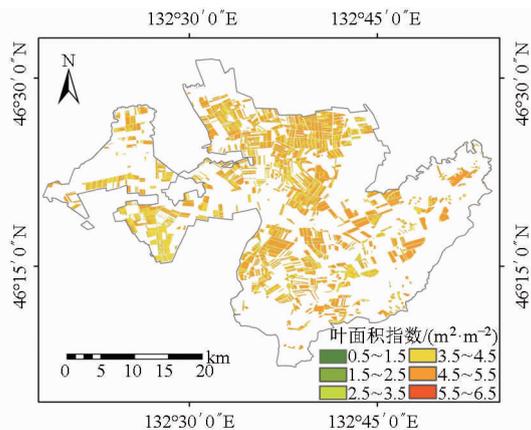


图 7 基于 TLS 优化的玉米 LAI 反演结果

Fig. 7 Inversion result of maize's LAI based on optimized model using TLS

LAI 范围主要集中在 4.0~5.2 之间。

3.3 精度评价

3.3.1 精度评价指标

本研究选取决定系数 R^2 、均方根误差 RMSE、偏差 BIAS、估算精度 EA 等参数作为评价指标,对基于 PROSAIL 模型反演得到的 LAI 结果和基于 TLS 优化后的 LAI 反演方法获得的 LAI 结果进行验证和精度评价。各指标计算式为

$$V_{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (L_i - L'_i)^2}{n}} \quad (7)$$

$$V_{BIAS} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (L_i - L'_i) \quad (8)$$

$$V_{EA} = \left(1 - \frac{V_{RMSE}}{V_{MEAN}}\right) \times 100\% \quad (9)$$

式中 L_i ——模型反演 LAI

L'_i ——野外实测 LAI

n ——样本点个数

V_{MEAN} ——实测 LAI 的平均值

3.3.2 精度验证

根据玉米实测 LAI 与反演 LAI 的数值统计表(表 3),可得玉米实测 LAI 和反演 LAI 分布图(图 8)。

从图 8 中可以看出,除样点 1 外,反演 LAI 与实测 LAI 具有大致相同的趋势,但基于 PROSAIL 模型反演得到的 LAI 结果偏低,基于 TLS 改进叶倾角分布函数的方法反演得到的 LAI 结果与实测 LAI 吻合度较高。可以看出引入 TLS 数据后,偏差变小,结果更加接近实测值。

图 9 为模型反演 LAI 与实测 LAI 的统计关系。其中,图 9a 和图 9b 是基于所有样本点的实测 LAI 与反演 LAI 的相关关系,可以看出,基于 TLS 改进叶倾角分布函数的方法反演得到的 LAI 与实测 LAI

表3 实测 LAI 和反演 LAI 数值统计

Tab.3 Value statistics of inversed LAI and measured LAI

样地编号	1	2	3	4	5	6	7	8
实测 LAI (LAI2000)	5.685	4.582	5.036	4.330	4.480	4.450	4.566	4.446
实测 LAI (LAI2200c)	5.148	4.754	5.096	4.568	4.612	4.382	4.350	4.072
实测 LAI 均值	5.417	4.668	5.066	4.449	4.546	4.416	4.458	4.259
反演 LAI-PROSAIL	2.38	2.70	2.80	2.50	2.60	2.50	2.70	2.60
反演 LAI-TLS	4.60	4.60	4.70	4.50	4.56	4.45	4.53	4.50

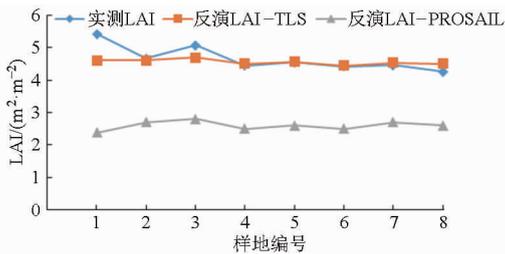
m²/m²

图8 反演 LAI 与实测 LAI 分布图

Fig.8 Distribution between inversed LAI and measured LAI

表现出较好的相关性,回归方程为 $y = 0.1487x + 3.862$, 决定系数 $R^2 = 0.5457$ 。但基于 PROSAIL 模型反演的 LAI 与实测 LAI 呈弱负相关 ($R^2 = 0.0258$), 回归方程为 $y = -0.056x + 2.8585$ 。可能原因是存在实测误差较大的样本点 1 (图 8), 将样本点 1 去除后重新对反演 LAI 与实测 LAI 进行相关性分析, 如图 9c 和图 9d 所示, 2 种反演得到的 LAI 与实测 LAI 的相关性都得到了显著的提高, 呈现强正相关性。其中基于 PROSAIL 模型反演得到的 LAI 与实测 LAI 的回归方程为 $y = 0.3212x + 1.1665$, 决定系数 R^2 由 0.0258 提高到 0.5576。基于 TLS 改进叶倾角分布函数的方法反演得到的 LAI 与实测 LAI 回归方程为 $y = 0.2942x + 3.2094$, 决定系数 $R^2 = 0.8583$, 表现为强正相关性。

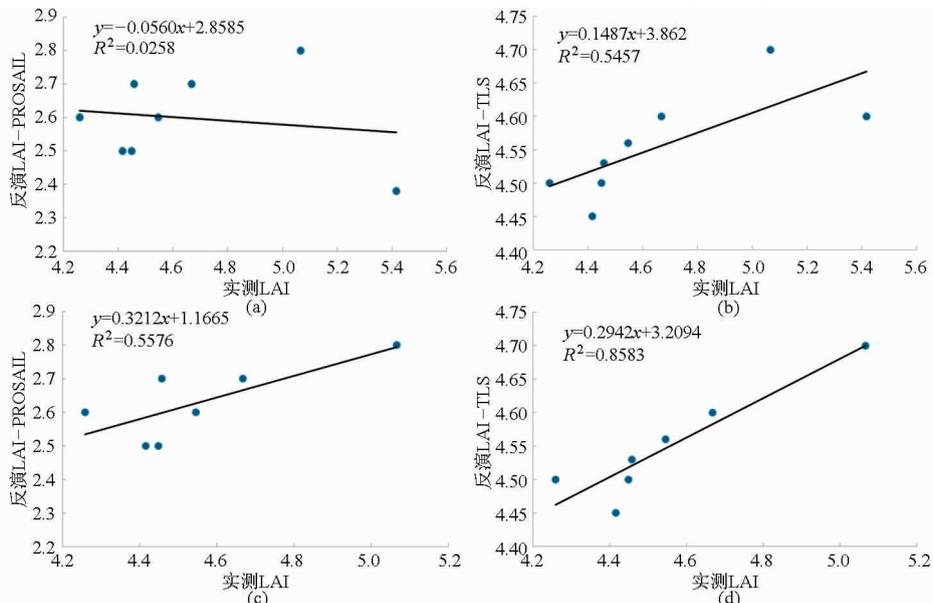


图9 反演 LAI 与实测 LAI 的相关关系

Fig.9 Statistical relations between inversed LAI and measured LAI

表 4 为 LAI 精度分析结果。鉴于样点 1 为可能为异常点, 误差比较大, 为了保证精度评价的准确性, 以下指标计算都是在排除样点 1 的前提下进行。2 种反演方法所得的 BIAS 为负值, 说明反演结果平均值均比实际平均值偏小。基于 TLS 改进叶倾角分布函数的方法得到的 LAI 与实测 LAI 的 RMSE 的绝对值远小于基于 PROSAIL 模型反演的结果, 其估算精度为 96.23%, 远高于基于 PROSAIL 模型的估算精度 26.53%, 总体而言, 基于 TLS 改进的叶倾角分布函数有效提高了玉米 LAI 的反演精度。

4 结论

(1) 以高分一号影像作为数据源, 经过辐射定标、大气校正、几何校正等预处理, 通过 PROSAIL 模型实现了研究区域 LAI 的反演, 验证了高分一号影像应用于 PROSAIL 模型的可行性。

(2) 2 种反演方法得到的 LAI 与实测 LAI 都具有较好的相关性, 决定系数 R^2 分别为 0.5576 和 0.8583。但基于 PROSAIL 模型反演所得 LAI 结果偏低, 在利用 TLS 数据提取叶倾角对模型进行优化后, 反演 LAI 的估算精度达到 96.23%。由此表明, 引入 TLS 数据能大幅度提高 LAI 反演的准确性。

表 4 LAI 反演精度评价结果

Tab. 4 Precision evaluation result of inversed LAI

项目	平均值/ $(\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2})$	决定系数 R^2	均方根误差 RMSE/ $(\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2})$	偏差 BIAS/ $(\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2})$	估算精度 EA/%
实测 LAI	4.552				
基于 PROSAIL 模型的 LAI 反演结果	2.629	0.557 6	1.934	-1.923	26.53
改进叶倾角模型的 LAI 反演结果	4.549	0.858 3	0.171	-0.003	96.23

(3) 采用体素法对叶片点云进行分割, 通过求每个体素内拟合叶片单元的法向量, 进一步获取玉米植株的叶倾角分布。不同于以往通过求点的法向

量获得叶倾角的方法, 基于叶片单元求取法向量能够更好地反映叶片分布倾向的真实情况。

参 考 文 献

- 1 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.
- 2 方秀琴, 张万昌. 叶面积指数 (LAI) 的遥感定量方法综述 [J]. *国土资源遥感*, 2003, 15(3): 58 - 62.
FANG Xiuqin, ZHANG Wanchang. The application of remotely sense data to the estimation of the leaf area index [J]. *Remote Sensing for Land & Resource*, 2003, 15(3): 58 - 62. (in Chinese)
- 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(Supp.): S56 - S66.
- 4 LEFSKY M A, HUDAK A T, COHEN W B, et al. Patterns of covariance between forest stand and canopy structure in the Pacific Northwest [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 95(4): 517 - 531.
- 5 李丹, 庞勇, 岳彩荣. 地基激光雷达在森林参数反演中的应用 [J]. *世界林业研究*, 2012, 25(6): 54 - 58.
LI Dan, PANG Yong, YUE Cairong. A review of TLS application in forest parameters retrieving [J]. *World Forest Reserch*, 2012, 25(6): 54 - 58. (in Chinese)
- 6 HARDING D J, LEFSKY M A, PARKER G G, et al. Laser altimeter canopy height profiles: methods and validation for closed-canopy, broadleaf forests [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2001, 76(3): 283 - 297.
- 7 SUN G, RANSON K J, GUO Z, et al. Forest biomass mapping from lidar and radar synergies [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(11): 2906 - 2916.
- 8 庞勇, 孙国清, 李增元. 林木空间格局对大光斑激光雷达波形的影响模拟 [J]. *遥感学报*, 2006, 10(1): 97 - 103.
PANG Yong, SUN Guoqing, LI Zengyuan. Large footprint Lidar waveform modeling of forest spatial patters [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2006, 10(1): 97 - 103. (in Chinese)
- 9 张卫正, 董寿银, 王国飞, 等. 基于机载 LiDAR 数据的林木冠层投影面积与体积测量 [J]. *农业机械学报*, 2016, 47(1): 304 - 309.
ZHANG Weizheng, DONG Shouyin, WANG Guofei, et al. Measurement of trees crown projection area and volume based on airborne LiDAR data [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(1): 304 - 309. (in Chinese)
- 10 HOSOI F, OMASA K. Voxel-based 3-D modeling of individual trees for estimating leaf area density using high-resolution portable scanning lidar [J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2006, 44(12): 3610 - 3618.
- 11 JUPP D L B, CULVENOR D S, LOVELL J L, et al. Estimating forest LAI profiles and structural parameters using a ground-based laser called 'Echidna' [J]. *Tree Physiology*, 2009, 29(2): 171 - 181.
- 12 王绪鹏, 范文义, 温一博. 基于 Campbell 椭球分布函数的大兴安岭地区主要树种叶倾角分布模拟 [J]. *应用生态学报*, 2013, 24(11): 3199 - 3206.
WANG Xupeng, FAN Wenyi, WEN Yibo. Simulation of leaf inclination angle distribution of main tree species in Daxing'an Mountains of China based on the Campbell ellipsoid distribution function [J]. *Chinese Journal of Application Ecology*, 2013, 24(11): 3199 - 3206. (in Chinese)
- 13 JACQUEMOUD S, BARET F. PROSPECT: a model of leaf optical properties spectra [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1990, 34(2): 75 - 91.
- 14 CAMPBELL G S. Extinction coefficients for radiation in plant canopies calculated using an ellipsoidal inclination angle distribution [J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 1986, 36(4): 317 - 321.
- 15 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, 12(4): 411 - 421.
ZHANG Xiaoquan, XU Deying, ZHAO Maosheng. Review on forest canopy structure, radiation transfer and canopy photosynthesis [J]. *Forest Research*, 1999, 12(4): 411 - 421. (in Chinese)
- 16 张军, 王一鸣, 赵燕东, 等. 基于椭球函数的棉花叶倾角分布动态模拟 [J]. *农业机械学报*, 2009, 40(4): 157 - 160.
ZHANG Jun, WANG Yiming, ZHAO Yandong, et al. Dynamic simulation of leaf inclination angle distribution based on ellipsoidal function [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009, 40(4): 157 - 160. (in Chinese)

- 17 靳华安,王锦地,柏延臣,等. 基于作物生长模型和遥感数据同化的区域玉米产量估算[J]. 农业工程学报, 2012, 28(6): 162-173.
JIN Huaan, WANG Jindi, BO Yanchen, et al. Estimation on regional maize yield based on assimilation of remote sensing data and crop growth model[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(6): 162-173. (in Chinese)
- 18 FANG Y. Forecasting combination and encompassing tests[J]. International Journal of Forecasting, 2003, 19(1): 87-94.
- 19 徐新刚,王纪华,黄文江,等. 基于权重最优组合和多时相遥感的作物估产[J]. 农业工程学报, 2009, 25(9): 137-142.
XU Xin'gang, WANG Jihua, HUANG Wenjiang, et al. Estimation of crop yield based on weight optimization combination and multi-temporal remote sensing data[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(9): 137-142. (in Chinese)
- 20 李俊霖,延军平,孙虎,等. 关中平原东、中、西部气候干旱化程度比较分析[J]. 干旱区资源与环境, 2005, 19(1): 131-134.
LI Junlin, YAN Junping, SUN Hu, et al. An analysis on climatic changes in east, middle and west areas of Guanzhong Plain [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2005, 19(1): 131-134. (in Chinese)
- 21 孙威,王鹏新,韩丽娟,等. 条件植被温度指数干旱监测方法的完善[J]. 农业工程学报, 2006, 22(2): 22-26.
SUN Wei, WANG Pengxin, HAN Lijuan, et al. Further improvement of the approach to monitoring drought using vegetation and temperature condition indexes from multi-years' remotely sensed data[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(2): 22-26. (in Chinese)
- 22 JONES J W, HOOGENBOOM G, PORTER C H, et al. The DSSAT cropping system model[J]. European Journal of Agronomy, 2003, 18(3-4): 235-265.
- 23 王维,刘翔舸,王鹏新,等. 条件植被温度指数的四维变分与集合卡尔曼同化方法[J]. 农业工程学报, 2011, 27(12): 184-190.
WANG Wei, LIU Xiangge, WANG Pengxin, et al. Application of 4DVAR and EnKF approaches for assimilating vegetation temperature condition index[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(12): 184-190. (in Chinese)
- 24 FAIRBAIRN D, PRING S R, LORENC A C, et al. A comparison of 4DVAR with ensemble data assimilation methods[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2014, 140(678): 281-294.
- 25 李艳,王鹏新,刘峻明,等. 基于条件植被温度指数的冬小麦主要生育时期干旱监测效果评价Ⅲ——干旱对冬小麦产量的影响评估[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(5): 218-222.
LI Yan, WANG Pengxin, LIU Junming, et al. Evaluation of drought monitoring effects in the main growth and development stages of winter wheat using vegetation temperature condition index Ⅲ—Impact evaluation of drought on wheat yield[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2014, 32(5): 218-222. (in Chinese)
- 26 苏涛,王鹏新,刘翔舸,等. 基于熵值组合预测和多时相遥感的春玉米估产[J]. 农业机械学报, 2011, 42(1): 186-192.
SU Tao, WANG Pengxin, LIU Xiangge, et al. Spring maize estimation based on combination of forecasting entropy method and multi-temporal remotely sensed data[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(1): 186-192. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 241 页)

- 17 李云梅,王人潮,王秀珍,等. 椭圆分布函数模拟水稻冠层叶倾角分布[J]. 生物数学学报, 2003, 18(1): 105-108.  
LI Yunmei, WANG Renchao, WANG Xiuzhen, et al. Simulating rice leaf angle inclination distribution by elliptical distribution function[J]. Journal of Biomathematics, 2003, 18(1): 105-108. (in Chinese)
- 18 CAMPBELL G S. Derivation of an angle density function for canopies with ellipsoidal leaf angle distributions[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 1990, 49(3): 173-176.
- 19 ZHENG G, MOSKAL L M. Leaf orientation retrieval from terrestrial laser scanning (TLS) data[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2012, 50(10): 3970-3979.
- 20 刘睿. 基于地基激光雷达的个体玉米叶面积垂直分布提取方法研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2013.
- 21 刘婷. 基于 PROSAIL 模型和多源数据关键生育期 LAI 反演方法研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2014.
- 22 HOSOI F, NAKAI Y, OMASA K. Estimating of leaf inclination angle distribution of the wheat canopy using a portable scanning LiDAR[J]. The Society of Agricultural Meteorology of Japan, 2009, 65(3): 297-302.