

# 无人机多光谱数据反演叶面积指数方法研究

贾智乐<sup>1</sup>, 杨灿灿<sup>2</sup>

(1. 河南省水利勘测有限公司 河南 郑州 450003; 2. 滁州学院地理信息与旅游学院 安徽 滁州 239000 )

**摘要:** 叶面积指数(LAI)是生态系统、全球碳循环和气候变化等研究的关键参数,而且可用于反映植被冠层结构变化和植被生长过程。本文利用顾及敏感性分析的 PROSAIL 模型和植被指数模型,以青岛地区玉米作物为研究对象,对无人机多光谱影像的叶面积指数反演进行了研究。反演结果显示顾及敏感性分析 PROSAIL 模型的 R2 为 0.79, GNDVI 植被指数的反演结果的 R2 为 0.82。实验表明利用无人机多光谱数据可进行玉米叶面积指数的反演,且效果较好。

**关键词:** 叶面积指数; PROSAIL; 植被指数; 无人机

## Research on Leaf Area Index Quantitative Inversion Based on UAV

### Data

Jia Zhile<sup>1</sup>, YANG Cancan<sup>2</sup>

(1. Henan Water Survey Co.,LTD, University,Henan Zhengzhou 450003,China;2. School of Geography Information and Tourism, Chuzhou University, Chuzhou 239000, China)

**Abstract:** Leaf area index (LAI) is the key parameters of ecological system, the global carbon cycle and climate change research, and can be used to reflect the vegetation canopy structure change and vegetation growth process. The paper takes corn in Qingdao area as the research object, and study on the leaf area index inversion of UAV multispectral image, by PROSAIL model and vegetation index model. Inversion results show R2 of PROSAIL model is 0.79, and inversion results of GNDVI model is 0.82. Experiments indicate that using unmanned aerial vehicle (UAV) multi-spectral data of corn leaf area index inversion can be performed.

**Key words:** Leaf area index; PROSAIL; Vegetation index; UAV

## 1 引言

无论是精准农业,还是植被定量信息获取都与植被叶面积指数息息相关,作为叶面积指数信息获取的关键技术,遥感技术可提供大面积农田作物生长环境、空间变异和生长状况等信息。目前利用卫星进行植被叶面积指数反演的技术比较成熟,随着无人机技术的快速发展,无人机遥感方便、快捷、实时性强的特点,使得利用航空遥感进行叶面指数反演得到了迅猛发展,如 J.A.J. Berni 利用航拍数据联合叶子水平辐射传输模型 (PROSPECT),灌顶盖水平森林 FLIGHT 交互模

---

基金项目: 高校优秀青年人才支持计划一般项目 (gxyq2019093);

作者简介: 贾智乐 (1989—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事摄影测量与遥感方面的研究。

E-Mail: [593031499@qq.com](mailto:593031499@qq.com)

型 (FLIGHT) 和 SAIL 模型获取了橄榄树的叶绿素浓度<sup>[1-2]</sup>。E. Raymond Hunt, Jr 将种植区分为不同的条带, 在不同的条带、不同的时间和不同地域以不同的组合选择施或者不施氮肥, 并对生物量和 LAI 进行了不同的测试研究<sup>[3]</sup>。虽然无人机遥感的应用已成为研究的热点之一, 但因其成像特点, 大量数据的快速处理成为航拍影像应用的阻碍, 所以在国内无人机遥感中主要研究领域是无人机影像的拼接镶嵌融合等图像处理技术以及应急灾害处理, 对植被生化量的定量信息提取对象停留在卫星影像并向无人机影像发展<sup>[4-5]</sup>。原因之一可能是目前卫星遥感是主要技术手段, 而无人机遥感则是处在军用向民用方面普及的转型状态, 另外则是因为目前国内的无人机影像大都是相机获取的高分辨率普通彩色相片, 而具有多光谱或者高光谱的影像设备有所欠缺, 获取的影像质量也有待考究。鉴于此, 本文利用无人机获取的多光谱影像, 以玉米为研究对象, 利用估计敏感性分析的 prosail 模型和统计模型进行玉米叶面积指数反演的研究, 为无人机作为植被评估和抽样调查的技术手段提供支撑和依据。

## 2 数据获取平台及实验区介绍

本文所使用的无人机是飞马 D200 四旋翼无人机, 它具有操作简单, 飞行速度稳定, 转弯半径小, 飞行高度稳定, 飞机姿态稳定等独特优势。此次飞行搭载带有两轴增稳云台的 D-MSPC100 五波段 (蓝、绿、红、红边、近红外) 多光谱相机 (如图 1 所示), 通过可更换的滤光窗口, 得到多波段的光谱数据, 从而可在水文、环保、大气监测、农业等领域得到广泛应用, 卫星遥感或有人飞机遥感相比, 可以更加机动、灵活、及时、方便的获取分辨率更高的多光谱影像。

本次试验位于青岛平度市。平度市位于山东省东部, 胶莱河东岸。试验选择平度市王庄村附近的玉米地为研究对象。王庄村位于平度市区东部的城关街道, 耕地面积 624 亩, 居民 132 户, 共 397 人。主要经济来源是林地和农作物。影像获取时间为 2019 年 9 月 10 日, 玉米处在乳熟期到完熟期之间。



图 1 D-MSPC100 相机  
Fig.1 Picture of D-MSPC100



图 2 裁剪前实验区无人机影像  
Fig.2 The original experimental area UAV image

因影像获取时已经将载荷在实验室内定标, 所以本次实验区航空影像的处理包括几何纠正, 和影像的叠加与裁剪。几何纠正采用 ENVI 与实测地面点进行纠正, 纠正精度 RMS 为 2.1 满足

本次定量反演的要求。将四个已经纠正后的单波段影像进行叠加和融合，处理结果如图 2。图像的边缘位置，因为原始的四个波段的影像大小不一，所以会在边界产生错位的现象从而导致颜色偏差。为了消除影像边界不一的影响，将影像进行裁剪去除边界保留植被区域。

### 3 无人机多光谱数据玉米 LAI 反演

玉米的生长发育期可以分为出苗，拔节，抽雄，乳熟和成熟五个节点，很多学者证明不同发育时期的玉米的叶绿素和 LAI 均有所变化，叶面积指数从出苗到乳熟期逐渐升高，然后随着玉米的成熟、叶绿素的减少，叶面积指数也随之减小。图 4-17 为玉米不同时期的反射率变化图。由图 4-17 可知，在不同的生长期内，玉米冠层光谱反射率在总体趋势上保持一致，局部波段区域有差异，同时也具有绿色植物特有的“绿峰，红光低谷，近红外高原区”的现象。

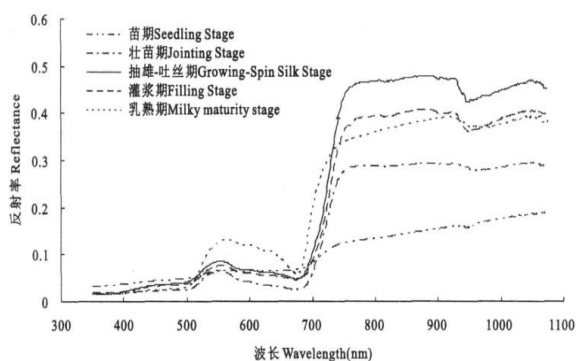


图 4-17 玉米在不同时期的反射率图

Fig.4-17 Corn spectral reflectance indifferent periods

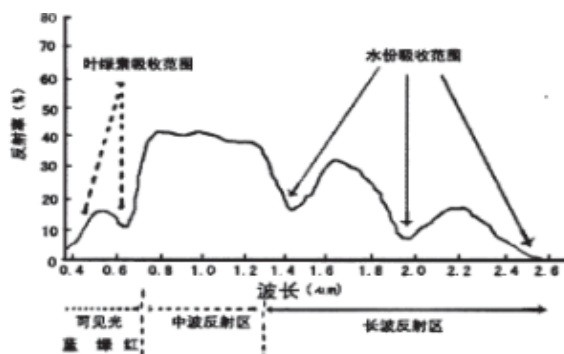


图 3-13 植被波谱曲线

Fig. 3-13 Curve of vegetation spectral

### 3.1 顾及敏感性的 PROSAIL 模型模拟

PROSAIL 模型是 PROSPECT 模型和 SAIL 模型在叶片尺度上的耦合模型，它是在 SAIL 模型的基础上，建立包含化学组分含量的叶片散射和吸收模型，从而将叶片模型耦合到冠层模型中反演整个冠层的生化组分含量。本文使用的 PROSAIL 模型是在法国巴黎大学编制的基础上进行改进的，该模型输出为冠层反射率。

标准波谱库中植被的波谱曲线如图 3-13, 在 0.35um-0.49um 范围内的反射波谱响应在开头比较平缓、数值 较低，在 0.55um 波长处是叶绿素的绿色强反射区，在此处是植被吸收率的谷值，而透射率则为一个波峰。在 0.60um-0.70um 波长处植被的反射光谱曲线具有波谷的形态。0.70um-0.750um 之间植被的反射率急剧上升。反射率在 0.75um-1.30um 波段期间具有波状起伏的形式和高反射率的数值，这种现象可以看成是植物为防止过度增热的一种适应手段。由于水和二氧化碳的强吸收导致了 1.47um, 1.83um-2.08um 之间波段呈波谷状。从 PROSAIL 模型模拟的光谱曲线如下节敏感性分析图 3-14(a), 将两个图相比，植被的特性可从二者的曲线图中完全对应，说明此模型完全可以正确模拟草地的反射率。

## (1) 敏感性分析

模型参数的敏感性分析对模型反演时选择合适的自由参数有着重要的意义,选择一些对模型反演比较敏感的参数才有可能最大程度地提高模型反演的精度。PROSAIL 模型的输入参数有:叶绿素含量 (Cab)、类胡萝卜素含量 (Car)、叶片结构参数 (N)、叶片水含量 (Cw)、干物质质量 (Cm)、叶面积指数 (LAI)、叶倾角 (LAD) 以及太阳天顶角、观测天顶角(Oza)和方位角(Azi)等。本文通过选择一个参数设其为可变,固定其他参数不变的情况下进行敏感性分析,分析结果参见图 3-14。

- 1)叶绿素含量 Cab 变化,其他参数不变,模拟得到的反射率曲线如图 a;
- 2)类胡萝卜素含量 Car 变化,其他参数不变,模拟得到的反射率曲线如图 b;
- 3)叶片水含量 Cw 变化,其他参数不变,模拟得到的反射率曲线如图 c;
- 4)干物质质量 Cm 变化,其他参数不变,模拟得到的反射率曲线如图 d;
- 5)叶肉结构参数 N 变化,其他参数不变,模拟得到的反射率曲线如图 e;
- 6)观测角 Oza 变化,其他参数不变,模拟得到的反射率曲线如图 f;
- 7)方位角 Azi 变化,其他参数不变,模拟得到的反射率曲线如图 g;
- 8)叶面积指数 LAI 变化,其他参数不变,模拟得到的反射率曲线如图 h。

由图 3-14 可知,当叶绿素含量变化时,模拟的冠层反射率在可见光的绿色和红色波段有些变化,其他波段几乎没有影响;当类胡萝卜素 Car 和叶片结构参数 N 变化时反射率曲线几乎不变;水含量,干物质质量变化时对红外影响较大,但是对本文的可见光和近红外波段几乎没有影响,所以本文中的这些参数取固定值;叶面积指数 LAI 和观测角 Oza 的变化对光谱曲线的影响很大,从而可以利用此模型进行 LAI 的定量反演。

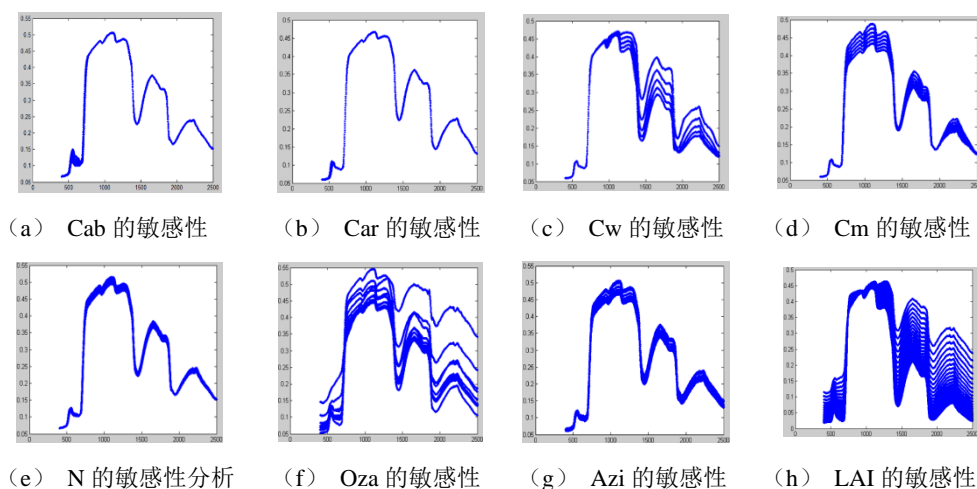


图 3-14 敏感性分析

Fig. 3-14 Sensitivity analysis

## (2) 模型反演

因为玉米属于水平型比较均一的植被,所以本文采用 PROSAIL 模型进行叶面积指数的反演。简单来说,本文研究中,PROSAIL 模型中设置的生化参数及土壤背景为试验同步实验室分析结果,并在参数设置时参考了 LOPEX93(Leaf Optical Properties Experiment)数据库以及我国典型地物波谱知识库。结构参数 N 是模型的一个假设参数,参考以往的经验,将 N 设为 1.5。除此之外,叶倾角分布(LAD)是 PROSAIL 模型中的一个重要参数,也是相对较难测量获得的输入参数,我们根据以往研究者的经验并结合在实验,将叶倾角分布选择为球形分布(Spherical)。模型部分参数设置如下表 1。反演结果如图 3。

表 2 PROSAIL 的部分输入参数

Tab.2 Partial input parameters of PROSAIL

参数符号	物理意义	取值范围	参数符号	物理意义	取值范围
LAI	叶面积指数	0-6.0	Cw	水分含量	0.012 g/cm <sup>2</sup>
N	叶片结构参数	1.5	Cm	干物质含量	0.005 g/cm <sup>2</sup>
Cab	叶绿素含量	40ug/cm <sup>2</sup>	LAD	平均叶倾角	45.0
Car	类胡萝卜素	11	SZA	太阳天顶角	53°

### 3.2 绿色归一化植被指数 GNDVI

影像的 DN 值会被太阳光照辐射和相机设定的曝光所影响,所以同一个像素在不同的影像上也许会有不同的 DN 值,特别是对于自动曝光的相机获取影像。植被指数在一定的程度上可以消除或者减弱辐射和曝光的影响,并且可以增强植被与土壤之间的关系 (Rouse et al.1974; Gitelson et al.,1996),依据归一化植被指数并在 Gitelson 等研究者的基础上定义了绿色归一化植被指数

$$GNDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_G}{\rho_{NIR} + \rho_G} \quad (1)$$

式中,  $\rho_{NIR}$ 、 $\rho_G$  分别为近红外和绿色波段的反射率或者 DN 值。式(1)利用绿色波段代替原来的红色波段,希望能够在凸显植被特征的同时,减少辐射和光谱定标的影响,绿色植被指数的值范围为[-1, 1]。本文利用了 GNDVI 进行植被指数模型的反演,反演结果如图 4。

为了避免非植被(房屋,水体和道路)对反演结果的应影响,本次试验将非植被的叶面积指数设置为 0,但是非植被(房子)的阴影没有去除,由反演结果图可知,两次反演的结果都有房屋边界的阴影或者较暗区域被当成植被并计算了叶面积指数。从植被区域来看,玉米的叶面积指数主要集中在 2.2—3.5 之间,趋向完熟期的玉米在图 3、图 4 中分别表现为淡青色和青黄色,由于玉米的长势不完全统一,叶绿素含量较多、相对健壮的玉米在两图中的表现分别为深黄色加红色斑点和橙红色。此结果与刘照言在 7 月和 8 月份乳熟期及之前获得的平均叶面积指数 4.5 相比本



次试验值较小<sup>[6]</sup>，李秀凤，孙琳丽和邵田田等人<sup>[7-9]</sup>均对玉米做过研究，证实了随玉米生长过程的不同，叶面积指数将会有所变化，而在乳熟期到完熟期，也就是本文所研究的生长期限之间，叶面积指数较低，在 2-3.5 左右。

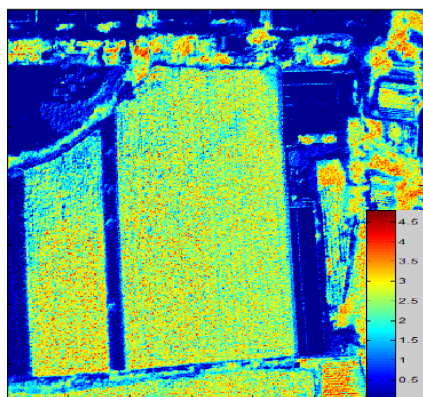


图3 无人机影像 PROSIL 模型反演 LAI 结果  
Fig.3 LAI image based on PROSAIL model

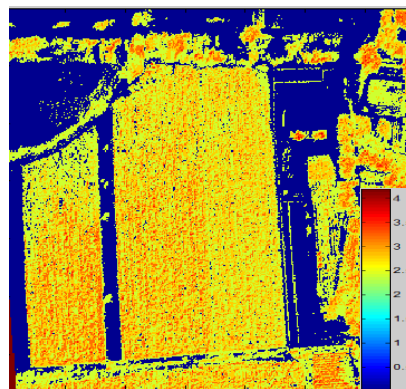
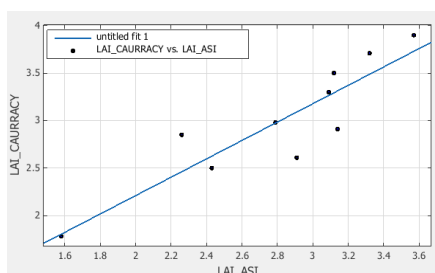


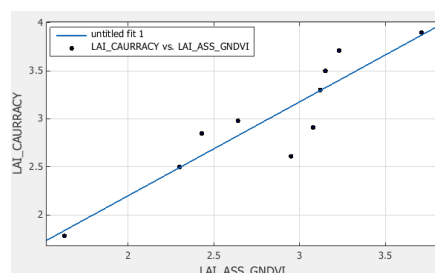
图4 PROSIL 模型反演 LAI 结果图  
Fig.4 LAI image based on GNDVI model

#### 4 精度验证与讨论

本次试验选用 10 个检验点将模拟得到的叶面积指数进行回归，进行精度验证，PROSAIL 模型模拟的叶面积指数与实测结果的相关度  $R^2=0.79$ ， $RMSE=0.30$ ，而利用 GNDVI 进行的经验统计模型进行反演的结果也较佳， $R^2=0.821$ ， $RMSE=0.276$ 。利用 GNDVI 进行反演的结果比模型反演的结果稍好，这与 E.Raymond Hunt 的研究结果在一定的程度上相一致<sup>[3]</sup>，GNDVI 能够有效的减弱相机曝光的问题。从精度验证图 5(a)和 5(b)可以看出，检验结果与模拟结果相比要高，这也与很多研究者的在玉米生长成熟后期利用 PROSAIL 估测叶面积指数的结果要低于实测值的结论是一致的，从反演结果来看两种反演方法的精度完全满足反演要求。



(a) PROSAIL 模型精度验证



(b) GNDVI 模型反演结果精度验证

模型类型	$R^2$	RMSE
PROSAIL	0.79	0.3
GNDVI	0.821	0.276

图5 无人机影像反演 LAI 结果验证图及精度表

Fig.5 LAI Accuracy verification of UAV image and precision table

## 5. 总结

研究叶面积指数对于监测作物长势, 评估农作物的产量等方面具有重要的意义。本文以无人机获取的实验区高分辨多光谱数据为数据源, 以玉米为研究对象, 选择了 PROSAIL 物理模型和植被指数模型对叶面积指数反演进行了研究与探讨, 并给出了反演的技术流程。验证了利用此类影像反演 LAI 的可行性, 为进行植被评估的抽样调查提供了新的技术手段。但是由于无人机影像的数据和研究区内实测数据点不足, 研究区空间分布的代表性不全, 也使得本文的研究结果有一定的局限性。

### 参考文献:

- [1] Zarco-Tejada P J, Berni J A, Suárez L, et al. Imaging chlorophyll fluorescence with an airborne narrow-band multispectral camera for vegetation stress detection[J]. Remote Sensing of Environment. 2009, 113(6): 1262-1275.
- [2] Berni J, Zarco-Tejada P J, Surez L, et al. Remote sensing of vegetation from uav platforms using lightweight multispectral and thermal imaging sensors[J]. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXXVII. 2008.
- [3] Hunt Jr E R, Hively W D, Daughtry C S, et al. Remote sensing of crop leaf area index using unmanned airborne vehicles[C]. 2008.
- [4] 李冰, 刘镛源, 刘素红, 等. 基于低空无人机遥感的冬小麦覆盖度变化监测[J]. 农业工程学报, 2012, 28(13): 160-165.
- [5] 冷伟锋, 王海光, 等. 无人机遥感监测小麦条锈病初探[J]. ACTA PHYTOPATHOLOGICA SINICA, 2012, 42(2): 202-205.
- [6] 刘照言, 马灵玲, 等. 基于 SAIL 模型的多角度多光谱遥感叶面积指数反演[J]. 干旱区地理, 2010, 33 (1): 93-98.
- [7] 刘轲, 周清波, 吴文斌, 陈仲新, 唐华俊. 基于多光谱与高光谱遥感数据的冬小麦叶面积指数反演比较. 农业工程学报, 2016, 32 (3): 155-162.
- [8] 田明璐. 西北地区冬小麦生长状况高光谱遥感监测研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- [9] 邵田田. 玉米叶绿素和 LAI 的高光谱遥感模型研究[D]. 北京: 中科院研究生院, 2012.