

# 基于机载 LiDAR 数据的农作物叶面积指数估算方法研究

苏伟<sup>1</sup> 展郡鸽<sup>1</sup> 张明政<sup>2</sup> 吴代英<sup>1</sup> 张蕊<sup>1</sup>

(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)是农作物长势监测及估产的重要参数,激光雷达能够提供精确的农作物冠层结构信息,可弥补光学遥感在提取冠层结构信息方面的不足。因此,本文旨在挖掘激光雷达所能提取的农作物垂直结构信息,并研究冠层结构参数与农作物叶面积指数之间的关系,从而估算整个研究区的叶面积指数。首先,基于机载激光雷达数据提取平均高度( $H_{\text{mean}}$ )、最大高度( $H_{\text{max}}$ )、最小高度( $H_{\text{min}}$ )、高度百分位数( $H_{25\text{th}}$ 、 $H_{50\text{th}}$ 、 $H_{75\text{th}}$ 、 $H_{90\text{th}}$ )、激光穿透力指数(LPI)、回波点云密度、孔隙率( $f_{\text{gap}}$ )、叶倾角(MTA)等结构参数;然后,利用 Pearson 相关性分析法对以上参数与地面实测 LAI 进行相关性分析,并选择与 LAI 相关性高的参数;最后,对选择的敏感性参数进行回归分析,构建激光雷达参数与实测 LAI 的 LiDAR-LAI 估算模型,估算整个研究区的农作物冠层 LAI。精度评价结果表明:预测 LAI 与实测 LAI 之间的相关系数为 0.79,均方根误差为 0.47,说明激光雷达所提取的农作物冠层结构参数可用于估算空间上连续、大面积的农作物 LAI。

**关键词:** 农作物; 机载激光雷达; 叶面积指数; Pearson 相关性分析法; 空间化

**中图分类号:** TN959.3      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1298(2016)03-0272-06

## Estimation Method of Crop Leaf Area Index Based on Airborne LiDAR Data

Su Wei<sup>1</sup> Zhan Junge<sup>1</sup> Zhang Mingzheng<sup>2</sup> Wu Daiying<sup>1</sup> Zhang Rui<sup>1</sup>

(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 an important parameter in crop growth monitoring and crop yield estimation. However, optical remote sensing cannot extract the structural information. Light detection and ranging (LIDAR) can provide accurate crop structural information, so LiDAR can make up the shortage of optical remote sensing. Therefore, the purpose of this research is to study the vertical structure information of crops which can be extracted by LiDAR, analyze the correlation of LiDAR vertical metrics and LAI of crop, and estimate LAI of the whole study area. First, the metrics were extracted based on LiDAR data, including mean height above ground of all first returns ( $H_{\text{mean}}$ ), maximum height above ground of all first returns ( $H_{\text{max}}$ ), minimum height above ground of all first returns ( $H_{\text{min}}$ ), the percentiles of the canopy height distributions ( $H_{25\text{th}}$ ,  $H_{50\text{th}}$ ,  $H_{75\text{th}}$ ,  $H_{90\text{th}}$ ), laser penetration index (LPI), density of points, porosity and leaf angle. Then, Pearson correlation analysis was used to filter LiDAR metrics which are better related to LAI measured data. Last, regression analysis of selected sensitive parameters was carried out on setting up LiDAR-LAI estimation model, and the LAI estimated result of the whole study area was calculated. The result shows that correlation coefficient between estimated LAI and field measured LAI is 0.79, and RMSE is 0.47. It shows that crop canopy structure parameters extracted by LiDAR can be used to estimate the spatial continuous and large area of LAI of crops.

**Key words:** crop; airborne LiDAR; leaf are index; Pearson correlation analysis; spatialization

收稿日期: 2015-09-25 修回日期: 2015-10-27

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

## 引言

激光雷达(Light detection and ranging, LiDAR)作为主动遥感技术,其运行不受时间限制,可昼夜扫描,对于茂密植被具有一定的穿透性<sup>[1]</sup>。因此,近年来国内外诸多学者对提取森林结构参数,如树高、冠幅、单木分割、林分密度、地上生物量<sup>[2-5]</sup>、叶面积指数<sup>[6-9]</sup>等进行了深入研究。但是,目前基于激光雷达提取森林结构参数的方法不适用于农作物结构参数提取,原因是农作物较矮<sup>[10]</sup>,且叶片聚集方式多是以株为中心的,因此离散回波激光雷达很难记录到冠层顶部信息,而全波形激光雷达的作物与土壤回波信号会受到垂直分辨率的影响产生叠加<sup>[11]</sup>。

农作物叶面积指数(Leaf area index, LAI)是描述农作物冠层结构的一种参数,定义为单位水平地面面积上绿色植物叶(单面)面积总和<sup>[12]</sup>,是描述土壤-农作物-大气连续系统的物质、能量交换传输的关键参数之一<sup>[13-14]</sup>,因而是多种作物模型的重要输入参数之一。激光雷达能够有效获取高精度的水平和垂直植被冠层结构参数<sup>[8]</sup>,是精确提取农作物冠层叶面积指数的有效技术手段。目前,国内外基于激光雷达技术提取农作物叶面积指数的研究较少。周梦维等<sup>[9]</sup>基于机载波形激光雷达数据,通过引入Kuusk的多层均匀冠层方向反射模型反演农作物叶面积体密度和叶面积指数。但是,该方法受到散射次数和植被叶片数量的影响较大,且不适用于反演大范围区域的LAI。LI等<sup>[15]</sup>基于小光斑机载激光雷达数据提供的强度信息和高度信息估算了玉

米冠层的LAI,LAI反演精度为0.78,均方根误差为0.48,其研究结果表明机载激光雷达数据可用于玉米冠层LAI指数估算。本研究在上述2个基于激光雷达数据提取农作物LAI研究的基础上,进一步挖掘激光雷达数据的潜力与优势,构建多种基于激光雷达所提供的结构信息的特征参数,反演农作物叶面积指数,具体目标为:基于离散激光雷达点云数据,构建多种表达农作物冠层结构的参数;确定与农作物冠层LAI相关度高的最优参数;基于优选的农作物冠层结构参数,建立LAI估算模型,从而估算整个研究区的农作物冠层LAI,并进行估算精度验证。

## 1 研究区和数据源

### 1.1 研究区概况

研究区位于甘肃省张掖市西南部盈科气象站附近(38°28'51.6"~39°8'49.2"N、100°7'8.4"~100°59'2.4"E),激光雷达数据基本覆盖了该地区部分城区与农田种植区域,作物类型包括玉米、小麦<sup>[16]</sup>,扫描范围呈条带状。图1为研究区地理位置分布及典型地物点云剖面图。

### 1.2 机载激光雷达数据获取及处理

激光雷达数据获取时间为2008年6月20日,飞行区域为张掖试验区盈科气象站附近,采用的LiDAR系统为LiteMapper 5600,其中激光扫描仪为Rigel LMS-Q560型,波长1550 nm,激光脉冲长度3.0 ns,激光光束发散角为0.5 mrad,回波垂直分辨率约为0.15 m。飞行平台为“运-12”飞机,相对航高约为700 m。选取本次试验飞行中的所有航线进

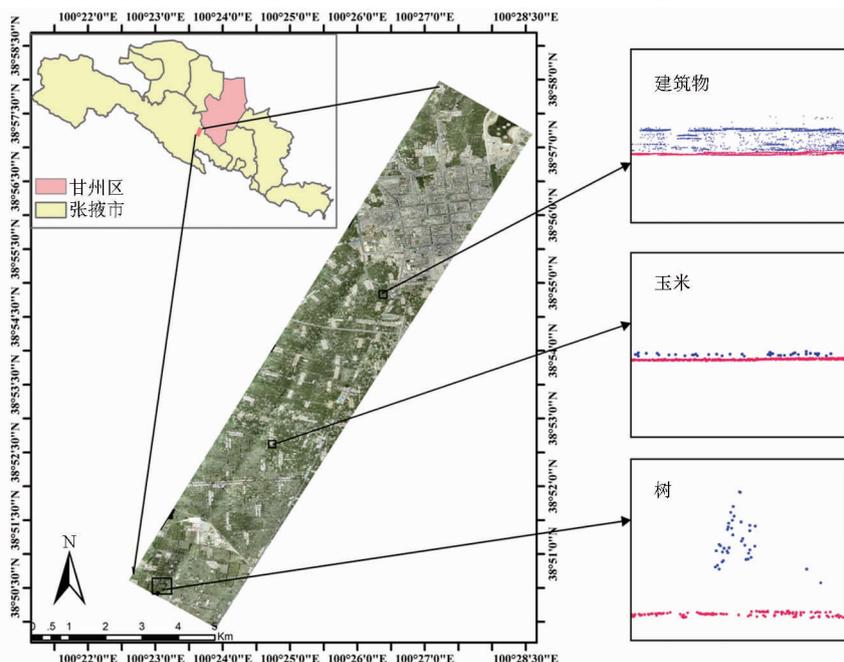


图1 研究区地理位置分布及典型地物点云剖面图

Fig. 1 Map of study site and profiles of typical features

行数据处理,坐标系统采用 WGS84,投影方式为 UTM,激光点密度约为 3 点/m<sup>2</sup>。机载点云以 LAS 文件存储,数据中包括点云三维坐标、强度、回波数、扫描角度、航线边界、分类、GPS 时间、波宽、振幅等信息<sup>[17]</sup>。

为去除其他地物的影响、详细描述农作冠层结构信息,首先需要将点云进行分类提取,分离其他地物与地面点回波点云。利用 AXELSSON 提出的不规则三角网(Triangular irregular network, TIN)加密算法<sup>[18]</sup>提取地面回波点云。首先选择位于地面上的一些局部低点,通过选取的低点建立初始模型,并在初始模型基础上反复加入新的激光点,每个新加入的激光点使模型更加接近地表,通过设定迭代参数筛选加入的新点是否能够参与构建三角平面。小于迭代距离的点被归为地面点,逐渐使三角网加密,直到没有新的点被加入,由此分类出地面点。对分离出的地面点进行克里金插值,生成空间分辨率为 1m 的数字高程模型(Digital elevation model, DEM);利用点云高度进行低、中、高植被点以及建筑物提取;数字地表模型(Digital surface model, DSM)的构建则是选取高程最高的点进行迭代和三角网的构建;求取 DEM 和 DSM 的差值,从而计算得到植被冠层高度模型(Canopy height model, CHM),并基于 CHM 模型提取出作物、林木以及建筑物等地物信息。

基于点云和冠层高度模型(CHM)得到 LiDAR 特征变量,特征变量包括样本的平均高度( $H_{mean}$ )、最大高度( $H_{max}$ )、最小高度( $H_{min}$ )、高度百分位数( $H_{25th}$ 、 $H_{50th}$ 、 $H_{75th}$ 、 $H_{90th}$ )、激光穿透力指数(Laser penetration index, LPI)、回波点云密度( $D$ )、孔隙率( $f_{gap}$ )、叶倾角(MTA)等 11 个参数,各参数描述见表 1。

表 1 激光雷达参数

Tab. 1 Parameters of LiDAR metrics

参数	描述
平均高度/m	激光雷达树高的平均值
最大高度/m	激光雷达树高的最大值
最小高度/m	激光雷达树高的最小值
高度百分位数	激光雷达植被第 1 回波返回点的百分位数高度
激光穿透力指数	地面点数与地面点数、冠层点数之和的比值
回波点云密度/(点·m <sup>-2</sup> )	激光雷达单位面积点数
孔隙率	单位面积内地面点回波数与回波总数的比值
叶倾角/rad	叶片表面的法线与天顶轴的夹角

### 1.3 地面实测数据

地面实测数据用于 LiDAR-LAI 估算模型的构建与验证。采用的地面实测数据为黑河流域遥感地面观测同步试验与综合模拟平台建设(WATER)项目中的 LAI 与叶倾角实测数据,LAI 的采集时间为 2008 年 6 月 18 日—7 月 1 日,采样实测数据共 20 个,实测点分布于张掖市盈科气象站附近,LAI 的测量分别采用 2 种仪器:LI-COR LAI-2000 型冠层分析仪和 LI-COR LI-3000 型叶面积仪,所测量的玉米处于苗期和拔节期之间,小麦处于成熟期,本文所使用数据均为实测 LAI 数据。

## 2 LiDAR-LAI 估算模型构建

### 2.1 参数的优化提取及模型构建

为了建立最优的 LiDAR-LAI 预测模型,需要筛选出与 LAI 相关性较高的 LiDAR 参数,并提取同一位置的 LiDAR 垂直结构参数与实测 LAI 值进行 Pearson 相关性分析,选取相关系数绝对值大于 0.2 的作为构建模型的输入参数,各参数与 LAI 的 Pearson 相关性结果如表 2 所示。

表 2 LiDAR 参数与实测 LAI 值相关性分析结果

Tab. 2 Correlation result between LiDAR parameters and field measured LAI

	LAI	MTA	$H_{50th}$	$H_{75th}$	$H_{90th}$	$H_{mean}$	$H_{max}$	$f_{gap}$	LPI	$D$
LAI	1									
MTA	-0.22	1								
$H_{50th}$	-0.02	0.18	1							
$H_{75th}$	-0.10	-0.41	0.57	1						
$H_{90th}$	-0.13	-0.37	0.53	0.98	1					
$H_{mean}$	-0.18	-0.23	0.52	0.91	0.97	1				
$H_{max}$	-0.14	-0.33	0.55	0.98	1	0.98	1			
$f_{gap}$	-0.40	0.39	0.24	0.05	0.09	0.18	0.11	1		
LPI	-0.45	0.08	0.60	0.12	0.03	-0.04	0.04	-0.08	1	
$D$	0.41	0.15	0.15	-0.34	-0.39	-0.39	-0.38	0.06	0.73	1

注:因最小高度与 25th 高度百分位数采样值  $H_{25th}$  均为零,对相关性分析无参考价值,在此处相关性分析结果中未列出。

根据表 2 的相关性分析结果,选择回波点云密度、激光穿透力指数(LPI)、孔隙率、叶倾角 4 个参数作为构建 LiDAR-LAI 估算模型的输入参数。由先验知识可知,叶倾角与 LAI 呈反比,即叶倾角越大,叶面积指数越小;激光穿透力指数可以间接表示植被覆盖情况,根据激光穿透力指数公式,植被冠层回波较多时,表示所测量作物冠层结构复杂,LPI 越小,LAI 越大,因此 LPI 结果与 LAI 呈负相关;植被的孔隙率越大,覆盖度越低,LAI 越小;而在植被孔隙率较大的区域,回波点云密度相比高 LAI 区域小,即点云密度与 LAI 呈正相关。

随机选取 20 个实测样本中的 10 个样本作为构建模型的输入数据,其余 10 个作为模型精度的验证数据,将地面实测采集的 LAI 数据作为因变量,4 个经过筛选的 LiDAR 参数作为自变量,建立多元回归模型。经回归分析,通过以上 4 个 LiDAR 参数所构建估算模型的回归模型公式为

$$V_{LAI} = 3.77 + 6.95D - 0.04M - 0.65f_{gap} - 2.77L$$

式中  $V_{LAI}$ ——LiDAR-LAI 模型估算值

$M$ ——叶倾角

$L$ ——激光穿透力指数

该模型拟合精度为 0.78,拟合结果比较理想。

## 2.2 激光雷达数据的空间化

为了得到整个研究区的 LAI 估算结果,将估算

模型中 4 个参数分别空间化,利用 Matlab 软件,根据点云分类信息,创建  $5\text{ m} \times 5\text{ m}$  的窗格,遍历该窗格内包含的点云,并统计窗格内首次冠层回波点云数量、地面点云数量、点云回波总数量,根据以上统计结果对孔隙率、激光穿透力指数以及回波点云密度进行计算,基于  $1\text{ m}$  分辨率的 CHM 结果,对每一像素以半径为  $15\text{ m}$  进行高度统计,得到高度统计量 ( $H_{\text{mean}}$ 、 $H_{\text{max}}$ 、 $H_{\text{min}}$ 、 $H_{25\text{th}}$ 、 $H_{50\text{th}}$ 、 $H_{75\text{th}}$ 、 $H_{90\text{th}}$ ),并将计算结果生成  $5\text{ m}$  分辨率的空间化影像。受到机载激光雷达精度的限制,无法基于点云直接提取叶倾角,因此,为了将叶倾角空间化,首先对叶倾角实测数据与其他 10 个参数进行相关性分析,选择相关性较高的  $H_{75\text{th}}$  (相关系数  $-0.41$ )、 $H_{90\text{th}}$  (相关系数  $-0.37$ ) 2 个参数对叶倾角进行表达,从而得到叶倾角空间化结果。

## 3 结果与分析

### 3.1 LAI 估算结果

将空间化后的回波点云密度、激光穿透力指数、孔隙率、叶倾角 4 个参数输入所构建的 LiDAR-LAI 估算模型中,得到 4 个参与构建模型的参数空间化结果(图 2)及 LAI 空间化结果(图 3)。

由参数空间化结果(图 2)可知,因植被的结构复杂,激光雷达接收到的植被点云回波数量较多,点

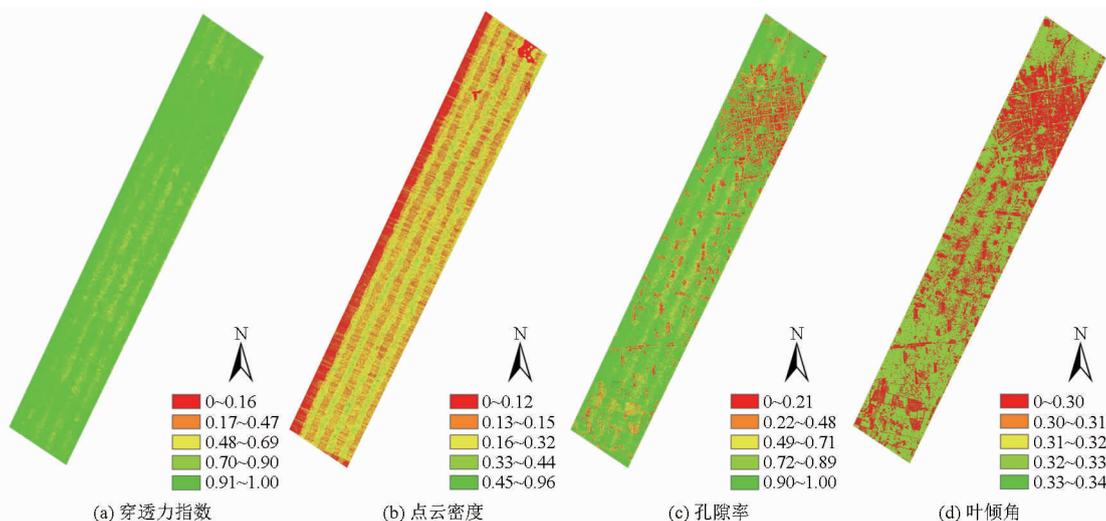


图 2 参数空间化结果

Fig. 2 Spatialization result of parameters

云密度较大,为  $0.16 \sim 0.44$  点/ $\text{m}^2$ ,但部分地区受机载激光雷达扫描方式的影响,扫描角度较大的区域点云密度偏小,点云密度为  $0 \sim 0.13$  点/ $\text{m}^2$ 。在数据采集时期,研究区内玉米作物处于苗期与拔节期之间,因此回波点云多数为地面点,LPI 结果较大,为  $0.7 \sim 1.0$ 。根据先验知识,孔隙率与 LAI 结果呈负相关,同时受到作物的田间种植结构影响,分析

LAI 空间化结果以及孔隙率空间化结果可知,LAI 较高 ( $3.1 \sim 4.6$ ) 区域的孔隙率较低 ( $0.22 \sim 0.48$ ),该结果与先验知识相符。研究区在 6 月 20 日左右玉米叶倾角分布在  $55^\circ \sim 59^\circ$ ,估算 LAI 结果分布于  $2.2 \sim 3.0$ ,该结果与 LAI 地面实测结果基本相符,树木 LAI 值较大,为  $4.7 \sim 7.0$ ,田块中间 LAI 值较田块四周偏小,其原因主要是受到附近树木的影响。

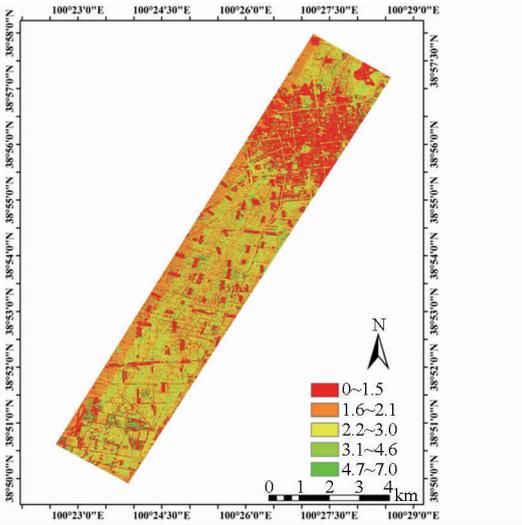


图3 模型估算 LAI 空间化结果

Fig. 3 LAI spatialization result estimated by model

### 3.2 精度评价

为了验证模型的精度,用另外 10 个野外实测的 LAI 与模型估算的 LAI 结果进行分析,结果如表 3 所示。

表 3 精度验证结果

Tab. 3 Accuracy assessment of LAI inversion

实测 LAI	预测 LAI	误差
3.33	3.31	-0.02
2.72	2.89	0.17
2.76	3.17	0.41
2.57	2.70	0.13
2.04	2.32	0.28
2.53	2.16	-0.37
2.13	2.45	0.32
2.12	2.38	0.26
2.47	2.57	0.10
1.63	1.80	0.17

将该模型的 LAI 估算结果与实测结果进行对比分析(图 4),从模型的验证精度结果来看,相关系数为 0.79,均方根误差为 0.47,绝对误差均值为 0.22,对于作物的 LAI 估算结果,因其行播的种植方式和均一的结构,估算的 LAI 结果分布比较集中,在 1.6~3.0 范围内。但有些 LAI 预测值比实测值偏大,出现这种情况的原因有 2 个,一是进行野外实测 LAI 所采用的仪器会受到操作者操作方式、测量时间等因素的影响,导致实测 LAI 值偏小;二是在对实

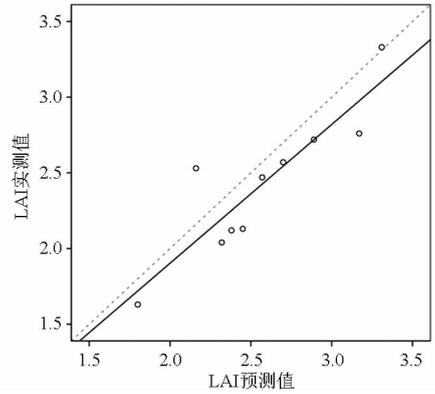


图 4 LAI 估算模型预测值与实测值对比散点图

Fig. 4 Scatterplot of predicted and measured results from LAI estimation model

测数据进行图斑提取时会受到田埂上树木的影响,导致模型估算的 LAI 值偏大,但总体来说,模型估算的结果比较理想。

另外,因玉米处于苗期,激光点云受到地面的影响较大,从点云的分类结果来看,地面点较多,且在分类过程中部分高度较低的玉米叶片点云会被归类为地面点,因此基于 CHM 提取高度的参数结果会有少许误差,这些误差对模型的拟合精度有所影响。

## 4 结论

(1) 利用机载激光雷达对植被垂直结构信息提取的优势,通过提取激光雷达高度、叶倾角、孔隙率等参数构建估算模型,预测 LAI 与实测 LAI 之间的相关系数为 0.79, RMSE 为 0.47,结果表明该方法具有一定的可行性。

(2) 与以往研究森林 LiDAR 参数与 LAI 关系不同的是,农作物具有其特殊的植株结构,本文将研究区设定为农作物种植区,综合利用机载数据所能提取的植被垂直结构、植被分布结构等信息,降低了因玉米作物冠层高度较低导致机载激光雷达回波脉冲接收减少对 LAI 估算结果的影响。

(3) 提出了一种估算空间上连续 LAI 反演结果的方法,将离散的实测采样数据应用于模型,得到大面积农作物 LAI 计算结果。与基于机载激光雷达波形数据反演 LAI 方法相比,本文在保证估算精度的前提下,能够将模型应用于大面积区域 LAI 估算,具有普适性。

## 参 考 文 献

- 焦义涛,邢艳秋,霍达,等. 机载全波形 LiDAR 数据处理及林业应用研究综述[J]. 世界林业研究, 2015, 28(3): 42-46. JIAO Yitao, XING Yanqiu, HUO Da, et al. A review on full-waveform airborne LiDAR data processing and its application to forestry[J]. World Forestry Research, 2015, 28(3): 42-46. (in Chinese)
- 尤哥田,邢艳秋,王铮,等. 点云密度对激光雷达估计森林样方平均树高的影响[J]. 东北林业大学学报, 2014, 42(5): 143-148.

- YOU Haotian, XING Yanqiu, WANG Zheng, et al. Effects of LiDAR point density on tree height estimation in plots level[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2014, 42(5): 143 – 148. (in Chinese)
- 3 KOCH B, HEYDER U, WEINACKER H. Detection of individual tree crowns in airborne lidar data [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2006, 72(4): 357 – 363.
- 4 KOUKOULAS S, BLACKBURN G A. Quantifying the spatial properties of forest canopy gaps using LiDAR imagery and GIS [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25(15): 3049 – 3072.
- 5 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)
- 6 MA H, SONG J, WANG J. Forest canopy LAI and vertical FAVD profile inversion from airborne full-waveform lidar data based on a radiative transfer model[J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(2): 1897 – 1914.
- 7 刘鲁霞. 机载和地基激光雷达森林垂直结构参数提取研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2014.
- LIU Luxia. Retrieving vertical structural parameters of forest using terrestrial and airborne laser scanning data [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2014. (in Chinese)
- 8 骆社周, 王成, 张贵宾, 等. 机载激光雷达森林叶面积指数反演研究[J]. *地球物理学报*, 2013, 56(5): 1467 – 1475.
- LUO Shezhou, WANG Cheng, ZHANG Guibin, et al. Forest leaf area index (LAI) inversion using airborne LiDAR data[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(5): 1467 – 1475. (in Chinese)
- 9 周梦维, 柳钦火, 刘强, 等. 机载激光雷达的作物叶面积指数定量反演[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(4): 207 – 213.
- ZHOU Mengwei, LIU Qinhuo, LIU Qiang, et al. Inversion of leaf area index based on small-footprint waveform airborne LIDAR [J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(4): 207 – 213. (in Chinese)
- 10 崔要奎, 赵开广, 范闻捷, 等. 基于机载 Lidar 数据的农作物覆盖度反演[J]. *遥感学报*, 2011, 15(6): 1276 – 1288.
- CUI Yaokui, ZHAO Kaiguang, FAN Wenjie, et al. Retrieving crop fractional cover and LAI based on airborne Lidar data[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2011, 15(6): 1276 – 1288. (in Chinese)
- 11 周梦维, 柳钦火, 刘强, 等. 基于机载小光斑全波形 LIDAR 的作物高度反演[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(8): 183 – 188.
- ZHOU Mengwei, LIU Qinhuo, LIU Qiang, et al. Inversion for crop height by small-footprint-waveform airborne LIDAR [J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(8): 183 – 188. (in Chinese)
- 12 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(3): 58 – 62.
- FANG Xiuqin, ZHANG Wanchang. The application of remotely sensed data to the estimation of the leaf area index[J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2003(3): 58 – 62. (in Chinese)
- 13 刘晓臣, 范闻捷, 田庆久, 等. 不同叶面积指数反演方法比较研究[J]. *北京大学学报: 自然科学版*, 2008, 44(5): 827 – 834.
- LIU Xiaochen, FAN Wenjie, TIAN Qingjiu, et al. Comparative analysis among different methods of leaf area index inversion[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2008, 44(5): 827 – 834. (in Chinese)
- 14 ROSELL J R, SANZ R. A review of methods and applications of the geometric characterization of tree crops in agricultural activities[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2012, 81: 124 – 141.
- 15 LI Wang, NIU Zheng, HUANG Ni, et al. Airborne LiDAR technique for estimating biomass components of maize: A case study in Zhangye City, Northwest China[J]. *Ecological Indicators*, 2015, 57: 486 – 496.
- 16 刘强, 庞勇, 陈尔学, 等. 黑河综合遥感联合试验: 张掖-盈科飞行区机载 LiDAR 数据集 [DB/OL]. (2008-06-20). <http://westdc.westgis.ac.cn/data/f39f64dc-5815-494e-9bf3-35074a87cb7a>.
- 17 刘春, 姚银银, 吴杭彬. 机载激光扫描(LIDAR)标准数据格式(LAS)的分析与数据提取[J]. *遥感信息*, 2009(4): 38 – 42.
- LIU Chun, YAO Yinyin, WU Hangbin. Analysis of LIDAR standard data format (LAS) and data extraction[J]. *Information of Remote Sensing*, 2009(4): 38 – 42. (in Chinese)
- 18 AXELSSON P. DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models [J]. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXIII, 2000, 33: 110 – 117.