

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. 地球物理学报, 2013, 56(5): 1467-1475, doi: 10. 6038/cjg20130505.

Luo S Z, Wang C, Zhang G B, et al. Forest leaf area index (LAI) inversion using airborne LiDAR data. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2013, 56(5): 1467-1475, doi: 10. 6038/cjg20130505.

机载激光雷达森林叶面积指数反演研究

骆社周^{1,2}, 王 成^{1*}, 张贵宾³, 习晓环¹, 李贵才⁴

1 中国科学院对地观测与数字地球科学中心, 北京 100094

2 北京城市学院, 北京 100083

3 中国地质大学, 北京 100083

4 国家气象局卫星气象中心, 北京 100081

摘 要 叶面积指数(LAI)是分析冠层结构最常用的参数之一,它控制着植被的生物物理过程,如光合、呼吸、蒸腾、碳循环和降水截获等,因此快速、可靠和客观地评价 LAI 非常重要. 本文发展了激光穿透指数(LPI)的简化计算方法,首次利用校正后的回波强度计算出 LPI,以 LPI 为变量基于 Beer-Lambert 定律实现了甘肃大野口研究区森林 LAI 反演,并且与原始回波强度和回波数反演 LAI 的精度进行对比,结果发现通过距离和角度校正后的回波强度值能提高 LAI 反演精度. 为了评价模型的可靠性和泛化性能,用留一法交叉验证程序(LOOCV)对最佳反演模型进行了验证,表明该模型没有过度拟合,具有很好的泛化能力. 最后,用没有参加建模的 16 个实测 LAI 对预测值进行精度验证($R^2=0.810$, $RMSE=0.198$),发现校正后的回波强度反演山区森林 LAI 精度较高. 本文还对激光雷达 LAI 反演结果与传统光学 TM 影像的反演结果进行了对比分析,结果表明机载激光雷达反演 LAI 精度($R^2=0.825$, $RMSE=0.165$)高于光学 TM 遥感数据($R^2=0.605$, $RMSE=0.257$),因此,可用激光雷达数据实现研究区的高精度 LAI 反演,为生态环境研究提供可靠的基础数据.

关键词 激光雷达, 叶面积指数, 穿透指数, 回波强度, 森林植被

doi: 10. 6038/cjg20130505

中图分类号 P237

收稿日期 2012-09-04, 2012-11-01 收修定稿

Forest leaf area index (LAI) inversion using airborne LiDAR data

LUO She-Zhou^{1,2}, WANG Cheng^{1*}, ZHANG Gui-Bin³, XI Xiao-Huan¹, LI Gui-Cai⁴

1 Center for Earth Observation and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

2 Beijing City University, Beijing 100083, China

3 China University of Geosciences, Beijing 100083, China

4 National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, China

Abstract Leaf Area Index (LAI) is one of the most important parameters, which controls biological and physical processes associated with vegetation on the Earth's surface, such as photosynthesis, respiration, transpiration, carbon and nutrient cycle, and rainfall interception. Therefore, rapid, reliable and objective estimations of LAI are essential. In this study, we developed a new approach for laser penetration index (LPI) estimation from LiDAR data, and first computed LPI based on corrected echoes intensity. Using the variable of LPI, we built LAI

基金项目 国家重点基础研究发展计划项目(973)项目(2010CB951701, 2010CB950701), 国家自然科学基金(41271428, 41171279), 中国科学院“百人计划专项”共同资助.

作者简介 骆社周, 男, 1979 年生, 博士, 研究方向为激光雷达植被遥感. E-mail: luoshezhou@163.com

* **通讯作者** 王成, 男, 1975 年生, 研究员, 2005 年获法国斯特拉斯堡大学博士学位, 2009 年入选中国科学院“百人计划”, 研究方向为激光雷达遥感. E-mail: chengwang@ceode.ac.cn

estimation model based on Beer-Lambert law. This approach was applied on a forest area in Dayakou, Gansu Province. The accuracy of the corrected intensity-derived LAI inversion model was compared with that of uncorrected intensity-derived and echoes counts-derived model. The study found that corrected echoes intensity can improve the accuracy of LAI inversion. To assess validity and generalization of the model, we validated the optimum model via the Leave-One-Out Cross-Validation (LOOCV) procedure, and the result showed that the model had no overfitting and was more general. Finally, we validated the accuracy of predicted LAIs with 16 field-measured LAIs which were not involved in the modeling process and found that LAI estimation accuracy is high in mountains area by corrected echoes intensity. The LiDAR-derived LAI ($R^2 = 0.825, RMSE = 0.165$) was compared with the LAI from Landsat TM images ($R^2 = 0.605, RMSE = 0.257$), the accuracy of the former is far higher than that of the latter. This study indicates that airborne LiDAR data can be used to obtain high-accuracy LAI estimation and can provide reliable data for ecological environment research.

Keywords LiDAR, LAI, Laser penetration index, Echoes intensity, Forest vegetation

1 引言

全球气候变化是当今人类面临的最重大挑战之一,是当前非常热门的研究领域.植被在全球和区域气候变化中起到重要作用,地球物理学家、气候与生态学家已经开始密切关注全球变化条件下地表植被与气候相互作用的物理机制,而叶面积指数(Leaf Area Index, LAI)是植被冠层对全球环境变化响应过程模型的关键参数,因此快速、可靠和客观地评价 LAI 非常必要^[1]. LAI 是一个无量纲参数,Chen 等(2001)将 LAI 定义为单位地表面积上所有叶片表面积的一半^[2],其大小与植被种类、生长期、叶片倾角、叶簇和非叶生物量等因素有关,还受 LAI 定义和测定方法的影响. LAI 是陆面过程中非常重要的结构参数,是表征植被冠层结构最基本参量之一,它控制着植被的生物物理过程,如光合、呼吸、蒸腾、碳循环和降水截获等^[3].叶面积指数作为进行植物群体和群落生长分析的重要参数,已在林业、农业、生物学及生态学等领域得到广泛应用^[4].

直接测量 LAI 是经典、成熟、相对精度较高的方法,也是间接 LAI 测量的重要校正方法,但其缺点是对植物本身具有一定破坏性,劳动强度比较大,而且采样不一定具有代表性,不适用于大面积 LAI 测量,可作为间接测量方法的有效验证^[5].

间接测量方法是用一些测量参数或用光学仪器得到 LAI,测量方便快捷,如 LAI-2000^[6],但仍然需要直接方法对测量值进行校正^[7].随着对 LAI 空间模式兴趣的增长及科学研究的需要,实地测量 LAI

不仅需要高昂的费用和大量的时间,而且在偏远地区一般是行不通的,因此用遥感数据估算 LAI 成为最有吸引力的方法^[6],为大区域 LAI 估算提供了最有效的途径^[2,6].目前国内外开展了诸多遥感估算 LAI 的研究工作^[8-9].

植被指数(Vegetation Index, VI)是光学遥感影像评价地表植被覆盖状况最有价值的参数,最常用的植被指数是归一化植被指数(NDVI).光学影像提取 LAI 的主要问题是 LAI 较高的情况下,VI 达到饱和^[10-12].也就是说被动光学遥感只能探测植被的水平结构,在较高的 LAI 地区,与其相关的 VI 达到饱和,VI 与 LAI 不再线性增加,会引起 LAI 的低估.所以,通过光学遥感数据提取 LAI 具有一定的局限性,其反演精度受到一定的影响.如何提高 LAI 反演精度,并且同时能够使反演方法简单易用,是国内外研究的一个重要课题.

激光雷达(Light Detection And Ranging, LiDAR)是一种使用激光作为光源,对目标进行探测、测距的主动遥感技术^[13],可有效地获取高精度的森林垂直结构参数,已经应用于树高、冠层郁闭度和地上生物量的高精度估算^[14-15].激光雷达脉冲通过冠层的穿透率可以用来描述冠层孔隙度,并可通过 Beer-Lambert 定律转换成叶面积指数^[16].很多研究者已经开始利用激光雷达数据反演森林的孔隙度和 LAI,研究表明用 LiDAR 数据反演 LAI 没有发现极大值或饱和现象^[13,17-19],因此 LiDAR 数据能克服光学遥感植被指数的饱和问题^[15,20],可以提高 LAI 的反演精度^[19],为生态系统研究提供更可靠的基础数据,但是这些研究者只用激光回波数实现了森林

LAI 的反演. 而 Solberg(2010)、Peduzzi 等(2012)用回波数和回波强度分别对森林 LAI 进行了估算^[13,16],但是他们都没有对回波强度值进行校正而直接应用.

大部分先前的研究主要集中在回波数和原始激光雷达强度值进行 LAI 的估算,而没有研究者用距离和角度校正后的回波强度值进行 LAI 反演. 同种地物返回的激光雷达强度与入射角以及传感器和物体之间的距离有关. 因此入射角或传感器与地物之间距离的不同会导致研究区内同一种地物得到的激光强度值大小不等,这影响了激光强度数据的使用范围和精度. 为减少这些因素的影响,实现数据的标准化,使研究区内的激光强度数据具有可比性,对其进行距离和角度的校正是非常有必要的. 本文直接对原始激光点云进行地面和植被点的分类,基于回波数和校正前后回波强度计算出三种激光穿透指数(Laser Penetration Index, LPI),并基于 Beer-Lambert 定律建立以 LPI 为变量的森林 LAI 反演模型. 本研究将实现以下四个目标:(1)对原始激光强度值实现距离和角度的校正;(2)建立激光雷达森林 LAI 反演模型;(3)验证激光穿透指数反演森林 LAI 的可靠性;(4)激光雷达 LAI 指数制图及与传统光学遥感 TM 数据反演 LAI 进行对比分析.

2 研究区与数据

2.1 研究区

本研究用到的机载 LiDAR 数据和 LAI 实测数据来源于“黑河综合遥感联合试验”,研究区位于甘肃省张掖市大野口(100°24'E—100°31'E; 38°52'N—38°56'N),海拔在 2600~3300 m 之间,研究区主要树种为青海云杉, LAI 实测区域及样本位置分布如图 1 所示.

2.2 LAI 数据获取

冠层分析仪 LAI-2000 是地面测量 LAI 的最常用仪器,也是公认测量森林叶面积指数精度较高的仪器. 本文所用 LAI 数据于 2008 年 6 月 2 日至 6 月 13 日在甘肃省张掖市测量获得,样地的大小为 20 m×20 m,每块样地用 DGPS 精确定位,采用 LAI-2000 冠层分析仪(测量时仪器的高度约为 1.2 m)对大野口试验区 46 块样地的 LAI 进行测量,得到每块样地 LAI 的平均值,图 1 红色“+”点表示实测 LAI 时的中心坐标位置.

2.3 遥感数据获取

大野口森林试验区机载 LiDAR 数据由 LiteMapper5600 机载激光雷达系统获取,获取时间是 2008 年 6 月,激光波束发散角度为 0.5 mrad,激光波长为 1550 nm,脉冲宽度为 3.5 ns,高程精度是 0.02 m. 飞机相对航高约 800 m,地面光斑平均直径约为 38 cm,研究区点云平均密度为 3.4 个/m².

LANDSAT 是美国陆地探测卫星系统,轨道高度为 705 km,倾角为 99.22°,重复周期是 16 天,扫描带宽 185 km. TM(Thematic Mapper)是 LANDSAT 卫星上安装的成像设备,以获取地球表层丰富的信息. 本研究选取的光学遥感数据为 2008 年 6 月份的 TM 影像,分辨率为 30 m,其 4 个波段分别为蓝光波段(0.45~0.52 μm)、绿光波段(0.52~0.60 μm)、红光波段(0.63~0.69 μm)、近红外波段(0.76~0.90 μm),分辨率为 30 m,使用前对图像进行了辐射校正和几何校正.

3 研究方法

本研究采用 Terrascan(TerraSolid Ltd., Finland)激光雷达数据后处理软件进行点云数据的分类,以分离出地面点和植被点. 由于实测 LAI 时仪器的高度约为 1.2 m,因此为了减少 LAI 测量仪器和地面低矮植被(如灌丛、杂草)对 LAI 反演结果的影响,把植被激光点按高程分为大于和小于 1.2 m 两类. 本研究把高程大于 1.2 m 植被作为高植被即乔木植被,小于 1.2 m 植被作为低矮植被,并把低矮植被和地面回波信号合并为地面回波^[21].

3.1 基于回波数的激光穿透指数计算

Morsdorf 等^[21]对挪威东南部的松树进行了研究,用半径范围为 2~25 m、间隔 1 m 系列空间尺度的激光穿透率与 LAI 进行相关性分析,发现半径为 15 m 时反演精度最高($R^2=0.69$). 以此为参考,为了得到大野口研究区 LiDAR 数据反演 LAI 的最佳空间尺度,本研究对处理后的 LiDAR 数据进行 5 个不同空间尺度的采样,采样半径分别为 5 m、10 m、15 m、20 m 和 25 m,采样中心为实测 LAI 的中心坐标,样本数为 46. 图 2 是采样半径为 25 m 的点云数据三维显示效果,红色点是地面和低于 1.2 m 植被的激光点,绿色点为高于 1.2 m 植被的激光点. 对采样后的数据,分别计算每种尺度下各样本的 LPI,计算方法见公式(1).

$$LPI = \frac{N_g}{N_g + N_v} \quad (1)$$

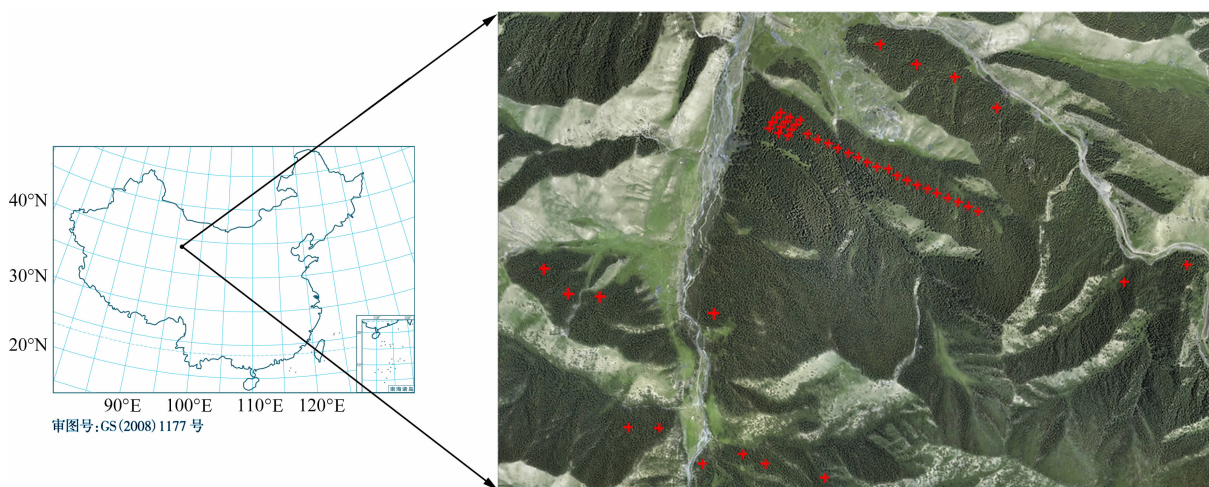


图1 研究区位置及采样点的分布(红色“+”点表示实测 LAI 的中心坐标位置)

Fig.1 Location of study area and distribution of sampling sites

(Red “+” points are the sites of center coordinates of LAI observation)

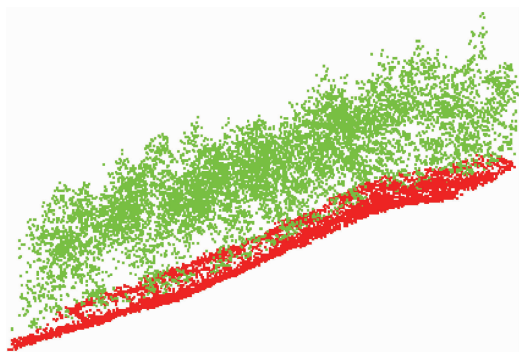


图2 点云分类图像三维显示(红色点为地面激光点, 绿色点为高于 1.2 m 植被的激光点)

Fig.2 The three-dimensional image of laser point cloud classification(Red points are the ground-reflected laser points, green points are the vegetation-reflected laser points which are higher than 1.2 m)

LPI 是激光穿透指数, N_g 是地面的激光点数或回波强度, 包括激光打到地面的回波与低于 1.2 m 植被回波, N_v 是高于 1.2 m 植被的激光点数或回波强度。

3.2 基于回波强度的激光穿透指数计算

激光雷达强度值是对物体后向散射的定量描述, 与激光器发射的能量、物体的反射率、大气及传感器与目标的距离有关, 其公式见(2)^[22]。因此, 回波强度值在使用之前必须进行校正, 使其标准化, 减少以上因素的影响。

$$P_r = \rho \frac{\eta^2 A_r}{\pi R^2} P_t, \quad (2)$$

P_r 是接收能量, P_t 是发射能量, ρ 是目标的反射率, η 为大气透过率, R 为激光器到目标的距离, A_r 接

收面积。由于本研究区域是在地势复杂的山区, 需同时考虑距离和入射角对回波强度的影响, 因此需要用公式(3)^[23-24]对其进行校正。

$$I_{\text{normalized}} = I \frac{R^2}{R_s^2 \cos \alpha}, \quad (3)$$

$I_{\text{normalized}}$ 是标准化的回波强度, I 是原始回波强度, R 是地物与传感器之间的距离, R_s 是参考距离, α 是入射角, 当地势比较平坦时扫描角与入射角相等。本研究用平均飞行高度代替 R_s , 用每个点的高度与 R_s 的差值作为 R ^[23,25], 地面的坡度可以通过各样本的数字高程模型(DEM)提取, 然后与激光器扫描角的关系求出入射角 α 。

经过距离与角度校正以后的强度值主要与地面物体的面积与反射率有关。对于相似的冠层和地面, 强度值主要描述地面物体的面积, 因此强度 I 与物体的面积 A 成正比(公式 4)^[16]。

$$A = \frac{I}{\rho}, \quad (4)$$

ρ 是物体的反射率。由于在近红外冠层与地面的反射率不同, 需要对其进行校正^[26]。假设 ρ_c 和 ρ_g 分别是冠层和地面的反射率, 则二者反射率的比值 n 等于 ρ_g/ρ_c , 基于 Lefsky 等(1999)^[26] 的研究结果, 本研究 n 值取 0.5。用校正前后的回波强度, 通过地面与总回波强度的比计算各样本的激光穿透指数^[16,26], 计算方法见公式(5)。

$$\begin{aligned} \text{LPI}_i &= \frac{A_g}{A_g + A_c} = \frac{\rho_g^{-1} I_g}{\rho_g^{-1} I_g + \rho_c^{-1} I_c} \\ &= \frac{I_g}{I_g + n I_c} = \frac{I_g}{I_g + 0.5 I_c}, \end{aligned} \quad (5)$$

LPI_i 为基于激光雷达强度的激光穿透指数, A_g 和 A_c 分别为激光打到地面和冠层上的面积, I_g 和 I_c 分别为地面和冠层的回波强度值。

3.3 机载 LiDAR 数据反演 LAI

LAI 间接测量方法通常是基于冠层孔隙度的 Beer-Lambert 定律(公式 6)来实现的, 如半球影像方法、TRAC 和 LAI-2000 测量仪器^[17]。

$$I = I_0 e^{-kL}, \quad (6)$$

其中 L 是叶面积指数, I 是冠层下面的光, I_0 是冠层上面的光, k 是消光系数, 取决于叶倾角和光束方向。可以看出, 假如 k 已知, LAI 可以通过 I/I_0 (冠层孔隙度) 来计算(见公式 7)^[11,17], 其中 I/I_0 可以用 LPI 代替, 因此激光在冠层中的衰减也可采用基于消光系数与 LAI 的 Beer-Lambert 定律来描述^[16,18]。

$$L = -\frac{1}{k} \ln(I/I_0) = -\frac{1}{k} \ln(LPI), \quad (7)$$

本文用半径分别为 5 m、10 m、15 m、20 m 和 25 m 的圆形采样窗口对激光点云数据进行了重采样, 计算 5 种空间尺度的 LPI 并分别与 30 个实测 LAI 进行了回归分析, 其结果见表 1、2。表 1 为基于回波数的 5 种空间尺度下 LAI 预测模型精度, 表 2 为回波强度校正前后的 LAI 预测模型精度。

从表 1、2 可以看出, 在该研究区内, 激光雷达反演森林 LAI 的最佳模型采样半径是 10 m, 基于回波数的 LAI 反演精度 ($R^2=0.803$, $RMSE=0.220$) 高于原始回波强度的反演精度 ($R^2=0.726$, $RMSE=0.258$), 但低于校正后强度值的反演精度 ($R^2=0.825$, $RMSE=0.165$), 可知通过对回波强度值进行距离与角度校正, 可以提高 LAI 反演精度, 这可

表 1 基于回波数的 5 种空间尺度下 LAI 预测模型精度
Table 1 The accuracy of LAI forecast model with five spatial scales based on echoes counts

半径	5 m	10 m	15 m	20 m	25 m
R^2	0.781	0.803	0.754	0.707	0.760
Adj R^2	0.773	0.795	0.744	0.700	0.750
RMSE	0.233	0.220	0.246	0.268	0.244
P-value	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

注: R^2 为决定系数, Adj R^2 为调整 R^2 , RMSE 为均方根误差。

表 2 回波强度校正前后的 5 种空间尺度下 LAI 预测模型精度 (括号内为校正后的精度)

Table 2 The accuracies of LAI forecast models with five spatial scales based on corrected- and uncorrected-intensity datasets (The accuracies in brackets are from the corrected intensity dataset)

半径	5 m	10 m	15 m	20 m	25 m
R^2	0.702 (0.786)	0.726 (0.825)	0.693 (0.758)	0.639 (0.710)	0.659 (0.739)
Adj R^2	0.692 (0.777)	0.718 (0.818)	0.683 (0.748)	0.627 (0.699)	0.648 (0.729)
RMSE	0.272 (0.230)	0.258 (0.165)	0.276 (0.243)	0.301 (0.267)	0.292 (0.253)
P-value	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

能是因为大野口研究位置在山区, 回波强度受到地形起伏的影响较大。由表 1、2 可知通过回波数与校正后回波强度两种数据求出的 $-\ln(LPI)$ 与实测 LAI 都有较强的相关性 (R^2 都大于 0.8) (图 3), 但由于用校正后的回波强度反演 LAI 有更高的精度, 因此在该研究区用校正后的回波强度值实现基于激光雷达的森林 LAI 反演。

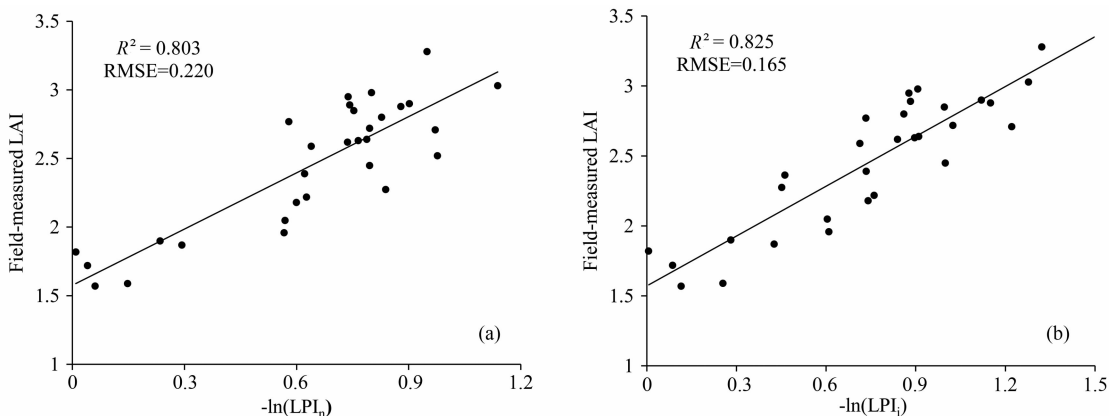


图 3 实测 LAI 与 $-\ln(LPI)$ 的回归关系

(a) 与 (b) 分别为基于回波数和校正后回波强度计算的 LPI_n 和 LPI_i , 样本数为 30)

Fig. 3 The scatterplot of the field-measured LAI against the log-transformed inverse of the LPI

(The LPI_n and LPI_i of (a) and (b) are based on echoes counts and intensity, respectively. The number of samples is 30)

3.4 光学遥感叶面积指数反演

植被指数(VI)是两个或多个波长范围内的地物反射率进行线性或非线性组合运算,产生某些对植被长势、生物量等有一定指示意义的专题数值,常用的植被指数如表3所示.公式中 ρ_{NIR} 、 ρ_{RED} 、 ρ_{BLUE} 分别表示近红外、红光和蓝光波段的反射率, L 是冠层背景调整系数,研究中取0.5, γ 校正系数取1.0.

表3 各类植被指数及公式

Table 3 Vegetation indices and formulas

植被指数	公式	参考文献
NDVI	$\text{NDVI} = \frac{\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{RED}}}{\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{RED}}}$	[27]
SRVI	$\text{SRVI} = \frac{\rho_{\text{NIR}}}{\rho_{\text{RED}}}$	[28]
ARVI	$\text{ARVI} = \frac{\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{RB}}}{\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{RB}}} \quad \rho_{\text{RB}} = \rho_{\text{RED}} - \gamma(\rho_{\text{BLUE}} - \rho_{\text{RED}})$	[29]
SAVI	$\text{SAVI} = (1 + L) \frac{\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{RED}}}{\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{RED}} + L}$	[30]

对经过辐射校正和几何校正后的TM影像,根据表3的各类植被指数公式算出相应的植被指数,然后根据实测LAI样本的中心坐标提取影像对应位置上的各种植被指数值,并分别与30个实测LAI值进行线性与非线性回归分析,建立基于光学数据的LAI反演模型,其反演模型精度如表4所示.可以看出研究区域内光学TM数据反演LAI最佳模型的精度($R^2=0.605$, $\text{RMSE}=0.257$),明显低于激光雷达数据反演LAI的精度($R^2=0.825$, $\text{RMSE}=0.165$).这可能是由于光学遥感在高LAI林区植被指数达到饱和所致,因此LiDAR数据在一定程度上减弱了光学遥感植被指数的饱和问题^[15,20],提高了LAI的反演精度^[19].

表4 植被指数估算LAI模型精度

Table 4 The accuracy of LAI estimation from different vegetation indices

模型	LAI-NDVI	LAI-SRVI	LAI-ARVI	LAI-SAVI
R^2	0.604	0.598	0.270	0.605
Adj R^2	0.595	0.589	0.253	0.595
RMSE	0.258	0.259	0.349	0.257
P-value	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01

4 LAI反演模型精度验证及应用

为了评价LAI激光雷达反演模型的可靠性,用

留一法交叉验证方法(Leave-One-Out Cross-Validation, LOOCV)计算出了预测残差平方和(Predicted Residual Sums of Squares, PRESS statistic).留一法交叉验证是假设有 n 个样本,每次用 $n-1$ 个样本作为训练样本,剩下的一个作为模型的验证数据,该方法是评价回归模型泛化能力的一个有效方法,尤其在样本数量相对较少的情况下非常有效^[21].本研究对参加建模的30个样本,采用交叉验证方法得到PRESS的均方根是0.167,而最佳模型(基于校正后回波强度建立的模型)的RMSE是0.165,两者比较接近,表明回归模型没有过度拟合,具有很好的泛化能力.为了得到最佳模型的反演精度,用没有参加建模的16个实测LAI对预测的LAI进行了评价,实测与预测值的决定系数为0.810,均方根误差为0.198,从图4可以看出实测LAI与预测值非常接近,表明基于校正后的回波强度值反演森林LAI精度较高.

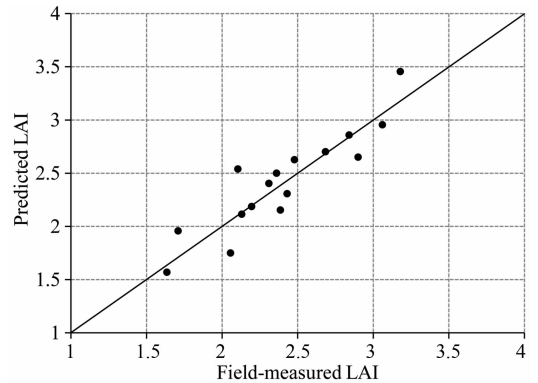


图4 实测LAI与回波强度预测LAI的关系($R^2=0.810$, $n=16$)

Fig. 4 The relationships of the field-measured versus predicted LAIs based on echoes intensity ($R^2=0.810$, $n=16$)

按照上述数据处理步骤,本文利用最优LAI激光雷达反演模型对研究区进行了LAI制图.首先对整个研究区的激光点云进行滤波分类,分成高植被和地面激光点;采用最优采样半径(10 m)对激光点云数据进行栅格化(栅格大小20 m);统计每个栅格中地面激光点强度与总激光点强度,根据公式(1)计算每个栅格的LPI;最后利用基于校正后回波强度的LAI反演模型得到整个研究区的LAI分布图(图5),图中白色部分表示植被小于1.2 m或者没有激光点云.

5 结论与讨论

本文发展了基于原始激光点云激光穿透指数

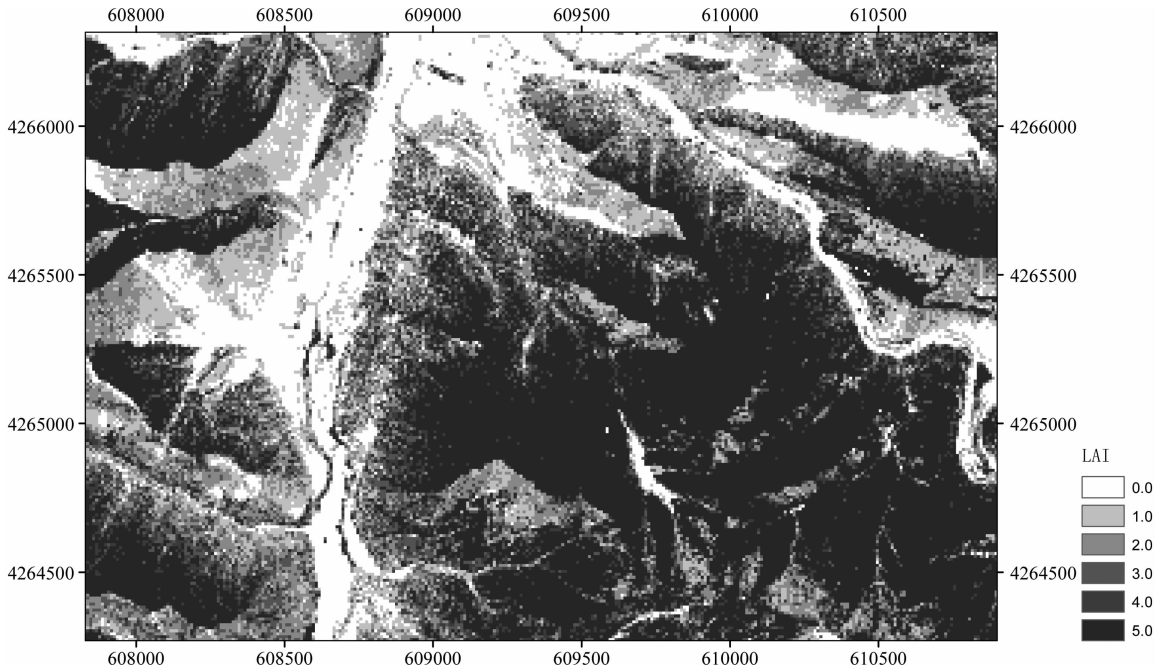


图 5 基于激光雷达数据的 LAI 制图

Fig. 5 Map of leaf area index from LiDAR data

(LPI)的简化计算方法,并基于 Beer-Lambert 原理,用实测 LAI 数据与 $-\ln(\text{LPI})$ 进行回归分析,建立了基于 LiDAR 数据的森林 LAI 反演模型.首先对研究区机载 LiDAR 数据进行点云滤波分类,分离出高植被及地面激光点,并对分类后的激光点云数据进行了不同空间尺度的采样,采样半径分别为 5 m、10 m、15 m、20 m 和 25 m,然后用回波数与校正前后的回波强度计算出各空间尺度下的 LPI,通过实测 LAI 数据与 $-\ln(\text{LPI})$ 进行回归分析,得到最优的 LAI 反演模型是基于校正后的回波强度建立的模型(采样半径为 10 m, $R^2=0.825$, $\text{RMSE}=0.165$),并用留一法交叉验证程序对该模型进行验证,结果表明该模型概化性能较好,可靠性较强.

本文为了减少距离和入射角对激光强度的影响,对原始强度值进行了校正,研究表明校正后的强度数据反演森林 LAI 的精度($R^2=0.825$, $\text{RMSE}=0.165$)高于校正前的反演精度($R^2=0.726$, $\text{RMSE}=0.258$),这可能是由于研究位置在山区,原始回波强度值受到距离和角度的影响.从表 1、2 可知基于校正后强度值的 LAI 反演模型也高于用回波数反演 LAI 的精度($R^2=0.803$, $\text{RMSE}=0.220$).本文同时对机载 LiDAR 反演 LAI 的精度与传统光学遥感 TM 反演精度进行了对比,结果表明前者明显高于后者,体现出 LiDAR 数据反演 LAI 的优势.总之,机载 LiDAR 数据可以反演森林 LAI,特别是基于校

正后回波强度的 LAI 反演精度高于基于回波数的 LAI 反演精度,能实现高精度的 LAI 估算,为生态环境研究提供了新的途径和可靠的数据.激光雷达强度值能定量地描述地表物体的特性,与激光雷达回波数相比应用范围及研究者较少,但随着激光雷达技术研究的深入和应用领域的拓展,回波强度值将会应用到更多的领域,有很大的发展潜力.

影响激光雷达叶面积指数反演精度的因素主要有以下几个方面:(1)激光雷达的分类.只有准确地分离出地面与植被,才能估算出更精确的 LAI;(2)采样半径的大小.本文的最佳采样半径为 10 m,这与 Morsdorf 等^[21]获得的 15 m 不一致,这是由于该模型是经验模型,对于不同的研究区域和植被类型,必须针对实际情况对 LiDAR 数据进行分析与建模,以获取适合当地的最佳反演模型;(3)激光点云密度.在生长极其茂盛的林区,可能会出现没有地面反射回波或地面回波数量非常少的情况,导致反演模型无法使用或 LAI 估算产生很大误差.因此,在这些区域激光雷达点云密度是影响反演精度的关键;(4)地形条件.在地势复杂的区域会降低 LAI 反演精度,因此要采取适当的方法减少地形的影响.本文对回波强度进行距离和角度的校正,实现了 LAI 反演精度的提高;(5)实测 LAI 的精度.由于机载 LiDAR 数据不能直接估算 LAI,需要地面实测 LAI 构建 LAI 反演模型,因此实测 LAI 样本的数量和精

度也是影响反演精度的重要原因。

致 谢 感谢黑河综合遥感联合试验提供激光雷达数据和 LAI 实测数据,感谢评审专家提出的宝贵修改意见!

参考文献(References)

- [1] 张佳华, 符淙斌, 延晓冬等. 全球植被叶面积指数对温度和降水的响应研究. 地球物理学报, 2002, 45(5): 631-637.
Zhang J H, Fu C B, Yan X D, et al. Global response analysis of LAI versus surface air temperature and precipitation variations. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2002, 45(5): 631-637.
- [2] Chen J M, Pavlic G, Brown L, et al. Derivation and validation of Canada-wide coarse-resolution leaf area index maps using high-resolution satellite imagery and ground measurements. *Remote Sens. Environ.*, 2001, 80(1): 165-184.
- [3] Chen J M, Cihlar J. Retrieving leaf area index of boreal conifer forests using Landsat TM images. *Remote Sens. Environ.*, 1996, 55(2): 153-162.
- [4] 王希群, 马履一, 贾忠奎等. 叶面积指数的研究和应用进展. 生态学杂志, 2005, 24(5): 537-541.
Wang X Q, Ma L Y, Jia Z K, et al. Research and application advances in leaf area index (LAI). *Chinese J. Ecol.* (in Chinese), 2005, 24(5): 537-541.
- [5] 谭一波, 赵仲辉. 叶面积指数的主要测定方法. 林业调查规划, 2008, 33(3): 45-48.
Tan Y B, Zhao Z H. The main methods for determining leaf area index. *Forest Inventory and Planning* (in Chinese), 2008, 33(3): 45-48.
- [6] Wang Q, Adiku S, Tenhunen J, et al. On the relationship of NDVI with leaf area index in a deciduous forest site. *Remote Sens. Environ.*, 2005, 94(2): 244-255.
- [7] 常学向, 赵文智, 赵爱芬. 黑河中游二白杨叶面积指数动态变化及其与耗水量的关系. 冰川冻土, 2006, 28(1): 85-901.
Chang X X, Zhao W Z, Zhao A F. Variation of leaf area index of Gansu Poplar and its relation to water consumption during growing season in the middle reaches of Heihe river. *J. Glaciol. Geocryol.* (in Chinese), 2006, 28(1): 85-901.
- [8] 蒙继华, 吴炳方, 李强子. 全国农作物叶面积指数遥感估算方法. 农业工程报, 2007, 23(2): 161-167.
Meng J H, Wu B F, Li Q Z. Method for estimating crop leaf area index of China using remote sensing. *Trans. CSAE* (in Chinese), 2007, 23(2): 161-167.
- [9] Gray J, Song C G. Mapping leaf area index using spatial, spectral, and temporal information from multiple sensors. *Remote Sens. Environ.*, 2012, 119: 173-183.
- [10] Colombo R, Bellingeri D, Fasolini D, et al. Retrieval of leaf area index in different vegetation types using high resolution satellite data. *Remote Sens. Environ.*, 2003, 86(1): 120-131.
- [11] Koetz B, Baret F, Poilvé H, et al. Use of coupled canopy structure dynamic and radiative transfer models to estimate biophysical canopy characteristics. *Remote Sens. Environ.*, 2005, 95(1): 115-124.
- [12] Eriksson H M, Eklundh L, Kuusk A, et al. Impact of understory vegetation on forest canopy reflectance and remotely sensed LAI estimates. *Remote Sens. Environ.*, 2006, 103(4): 408-418.
- [13] Peduzzi A, Wynne R H, Fox T R, et al. Estimating leaf area index in intensively managed pine plantations using airborne laser scanner data. *Forest Ecol. Manag.*, 2012, 270: 54-65.
- [14] 庞勇, 赵峰, 李增元等. 机载激光雷达平均树高提取研究. 遥感学报, 2008, 12(1): 152-158.
Pang Y, Zhao F, Li Z Y, et al. Forest height inversion using airborne Lidar technology. *J. Remote Sens.* (in Chinese), 2008, 12(1): 152-158.
- [15] Lefsky M A, Hudak A T, Cohen W B, et al. Geographic variability in LiDAR predictions of forest stand structure in the Pacific Northwest. *Remote Sens. Environ.*, 2005, 95(4): 532-548.
- [16] Solberg S. Mapping gap fraction, LAI and defoliation using various ALS penetration variables. *Int. J. Remote Sens.*, 2010, 31(5): 1227-1244.
- [17] Richardson J J, Moskal L M, Kim S H, et al. Modeling approaches to estimate effective leaf area index from aerial discrete-return LIDAR. *AGR Forest Meteorol.*, 2009, 149(6-7): 1152-1160.
- [18] Riaño D, Valladares F, Condés S, et al. Estimation of leaf area index and covered ground from airborne laser scanner (Lidar) in two contrasting forests. *AGR Forest Meteorol.*, 2004, 124(3-4): 269-275.
- [19] Zhao K G, Popescu S. Lidar-based mapping of leaf area index and its use for validating GLOBCARBON satellite LAI product in a temperate forest of the southern USA. *Remote Sens. Environ.*, 2009, 113(8): 1628-1645.
- [20] Koch B. Status and future of laser scanning, synthetic aperture radar and hyperspectral remote sensing data for forest biomass assessment. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, 2010, 65(6): 581-590.
- [21] Morsdorf F, Koetz B, Meier E, et al. Estimation of LAI and fractional cover from small footprint airborne laser scanning data based on gap fraction. *Remote Sens. Environ.*, 2006, 104(1): 50-61.
- [22] Baltsavias E P. Airborne laser scanning: Basic relations and formulas. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, 1999, 54(2-3): 199-214.
- [23] Mesas-Carrascosa F J, Castillejo-González I L, Orden M S, et al. Combining LiDAR intensity with aerial camera data to discriminate agricultural land uses. *Comput. Electron. Agr.*, 2012, 84: 36-46.
- [24] Höfle B, Pfeifer N. Correction of laser scanning intensity data: data and model-driven approaches. *ISPRS J.*

- Photogramm. Remote Sens.*, 2007, 62 (6): 415-433.
- [25] García M, Riaño D, Chuvieco E, et al. Estimating biomass carbon stocks for a Mediterranean forest in central Spain using LiDAR height and intensity data. *Remote Sens. Environ.*, 2010, 114(4): 816-830.
- [26] Lefsky M A, Cohen W B, Acker S A, et al. Lidar remote sensing of the canopy structure and biophysical properties of douglas-fir western hemlock forests. *Remote Sens. Environ.*, 1999, 70(3): 339-361.
- [27] Stenberg P, Rautiainen M, Manninen T, et al. Boreal forest leaf area index from optical satellite images: model simulations and empirical analyses using data from central Finland. *Boreal. Environ. Res.*, 2008, 13: 433-443.
- [28] Soudani K, Francois C, Le Maire G, et al. Comparative analysis of IKONOS, SPOT, and ETM+ data for leaf area index estimation in temperate coniferous and deciduous forest stands. *Remote Sens. Environ.*, 2006, 102(1-2): 161-175.
- [29] Kaufman Y J, Tanré D. Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS. *IEEE T. Geosci. Remote.*, 1992, 30(2): 261-270.
- [30] Sasaki T, Imanishi J, Ioki K, et al. Estimation of leaf area index and canopy openness in broad-leaved forest using an airborne laser scanner in comparison with high-resolution near-infrared digital photography. *Landsc. Ecol. Eng.*, 2008, 4 (1): 47-55.

(本文编辑 胡素芳)