

文章编号: 1007-7588(2011)10-1863-07

基于遥感的湄公河次区域森林地上生物量分析

庞勇¹, 黄克标², 李增元¹, 覃先林¹, 陈尔学¹

(1. 中国林业科学研究院资源信息研究所, 北京 100091;

2. 亚太森林恢复与可持续管理网络, 北京 100013)

摘要: 森林对维护区域生态环境及全球碳平衡、缓解全球气候变化发挥着不可替代的作用, 对森林地上生物量进行精确估测能够大大减小陆地生态系统碳储量的不确定性。本文结合机载激光雷达、星载激光雷达和成像光学遥感等数据进行大湄公河次区域的森林地上生物量估测, 生成连续的森林地上生物量图。结果表明: 基于星地协同观测数据可以有效地估测森林地上生物量, 模型总体平均误差为 $34\text{t}/\text{hm}^2$, 相关系数为 0.7; 估测结果与 FAO FRA 2010 报告以及其它报告公布的结果相比, 一致性较好, 平均差异为 13.3%; 根据本文的遥感反演结果, 大湄公河次区域森林生物量总量为 62.72 亿 t, 其中常绿阔叶林占 71%, 落叶阔叶林占 10%, 常绿针叶林占 16%, 混交林占 3%; 从各国(地区)的生物量总量来看, 缅甸森林地上生物量总量最大, 占 22%, 其次是中国云南省、老挝、泰国、越南、中国广西壮族自治区和柬埔寨。

关键词: 大湄公河次区域, 森林地上生物量, 激光雷达, 光学遥感

1 引言

陆地生态系统是全球碳循环的重要组成部分, 在陆地生态系统中约 80% 的地上碳储量和 40% 的地下碳储量发生在森林生态系统。森林通过光合作用将大气中的二氧化碳固定在植被和土壤中, 有效地缓解了人类活动排放到大气中的二氧化碳增量。因此, 对森林生态系统的碳计量成为研究森林碳汇功能的重要手段。森林生物量不仅是估测森林碳储量和评价森林碳循环贡献的基础, 也是森林生态功能评价的重要参数。大湄公河次区域(GMS)拥有丰富的森林资源, 是世界上热带雨林和热带季雨林的主要分布区之一, 在区域乃至全球的气候环境中具有极其深远的影响。但该区域的森林受采伐、火灾、病虫害和工业用材林等因素的影响, 森林面积整体上呈减少的趋势, 尤其是天然林的年均森林面积减少量正逐年增大。因此, 对该区域进行森林生物量定量反演不仅可以为森林碳汇价值提供必要的评价依据, 也可为相关利益方提供区域性森林资源信息并为制定中长期的林业可持

续发展规划起到决策支持作用。

区域尺度的森林生物量反演是研究碳循环的重要组成部分, 也是现代林业科研的热点和难点之一。传统的森林生物量测定需要外业实地调查, 仅能获得一些点上的数据, 很难及时地获取区域或大范围有空间分布信息的森林参数。激光雷达遥感获得的高精度三维测量数据, 能够大大提高森林生物量的估测精度, 从而更好地计算森林的碳储量。第一颗星载激光雷达卫星 ICESat 发射于 2003 年 1 月 12 日, 其上搭载的 GLAS 传感器的光斑直径约为 70m, 点间距约 170m^[1]。GLAS 数据被成功用于很多区域的森林参数反演研究。Lefsky 等将 ICESat 的 GLAS 波形数据联合 SRTM-DEM 数据成功地在三个不同的森林类型区进行了森林高度的反演^[2]。Lefsky 等改进了早期通过 DEM 消除地形起伏较大地区的 GLAS 波形的树高反演算法, 利用机载 LiDAR 测量和地面采集的树高数据集发展了一种改进算法^[3], 该算法在没有 DEM 数据的支持下, 对植被冠层高度的估计达到了比较好的结果(RMSE=

收稿日期: 2011-07-03; 修订日期: 2011-09-08

基金项目: 国家 973 项目(编号: 2007CB714404); 国家自然科学基金课题(编号: 41071272); 亚太森林恢复与可持续管理网络项目(编号: 2011PA004)。

作者简介: 庞勇, 男, 安徽太和人, 博士, 副研究员, 主要从事合成孔径雷达和激光雷达对地观测机理和森林参数定量反演等方面的研究。

E-mail: caf.pang@gmail.com

5m)。Boudreau等根据已有机载LiDAR与地面生物量的回归方程反演出GLAS轨道地面生物量,通过建立GLAS数据与估测生物量的回归方程对魁北克的主要植被区进行生物量估测,结果证实星载激光雷达在空间大尺度的植被分布和生物量估测上是有效的^[4]。在区域尺度的生物量反演模型研究中,Baccini等利用MODIS和GLAS数据对非洲热带森林地区进行生物量反演,并制成首张非洲热带林生物量图^[5]。Nelson等利用GLAS数据结合Landsat土地类型图和植被分布图估测魁北克的森林生物量和碳资源^[6]。Huang等将GLAS与光学遥感数据结合在我国西南地区进行了森林生物量反演试验^[7]。Lefsky利用GLAS数据反演了全球的森林高度,并与MODIS数据的分割产品相结合进行了空间的扩展,第一次生成了全球的森林树高图^[8]。Saatchi等将GLAS数据与MODIS、QuikSCAT等数据相结合,对全球热带国家和地区进行了森林生物量估测,并给出了生物量反演的不确定性分析图^[9]。

本文首先使用星地协同观测的数据,将地面实测样地尺度的森林生物量推广到机载激光雷达,进而得到星载ICESat GLAS脚印点的森林地上生物量估测模型,对整个大湄公河次区域的GLAS数据进行了森林生物量估计,然后利用光学遥感数据MERIS和其它辅助数据将GLAS估测结果推广生成GMS森林地上生物量的连续分布图,并对该区域的森林地上生物量分布格局等进行分析。

2 研究区概况与研究方法

2.1 大湄公河次区域概况

大湄公河次区域(the Greater Mekong Subregion,简称GMS)是指湄公河流域的6个国家共7个地区,包括柬埔寨、越南、老挝、缅甸、泰国和我国的云南省及广西壮族自治区。大湄公河次区域位于东经92.2°-112.0°,北纬5.6°-29.2°,是连接中国和东南亚、南亚地区的陆路桥梁(图1)。该区域总面积256.86万km²,总人口约3.2亿。

大湄公河次区域涵盖了多种地理特征,气候类型多样,仅中国云南省和广西壮族自治区就兼具北热带、南亚热带、中亚热带、北亚热带、南温带、中温带和高原气候区等7个气候类型。中南部地区

则以亚热带、热带季风气候为主,平均温度较高,如缅甸平均气温20℃以上,部分地区极端最高气温逾40℃。分为雨季和旱季,降雨量因地而异。联合国粮农组织(FAO)2010年发布的森林资源评估报告显示该区域森林总面积为1 2767 2000hm²^[10](其中云南、广西引用的是第七次全国森林清查数据^[11]),其中柬埔寨、越南、老挝、缅甸、泰国的森林覆盖率分别为57%、44%、68%、48%和37%,云南省、广西壮族自治区的森林覆盖率分别为40.8%和41.4%。

2.2 数据获取

2.2.1 遥感数据获取

(1)星载激光雷达数据。本研究采用了美国2003年1月发射的科学试验卫星ICESat上的GLAS传感器的数据。GLAS是第一个能连续获取大气、地面回波数据的星载激光雷达,为观察大气中的云、气溶胶和地面植被垂直结构提供了全新的视角。其设计目标是所提供的云的高度和厚度信息可以大大提高短期天气预报的精度;提供的植被垂直结构信息将能更好地评价全球的植被分布和生物量^[1]。本研究中以2005年、2006年Laser 3的6个观测周期数据(L3B-L3G)作为星载LiDAR数据源,采用1064nm从陆地的回波信号,其中每个波形包含544帧数据。该6期数据是三号激光器运行早期获取,激光器发射能量较大,数据质量较高。

(2)机载激光雷达数据。机载激光雷达飞行试验区位于云南省中部,包括昆明市西山区林场和玉

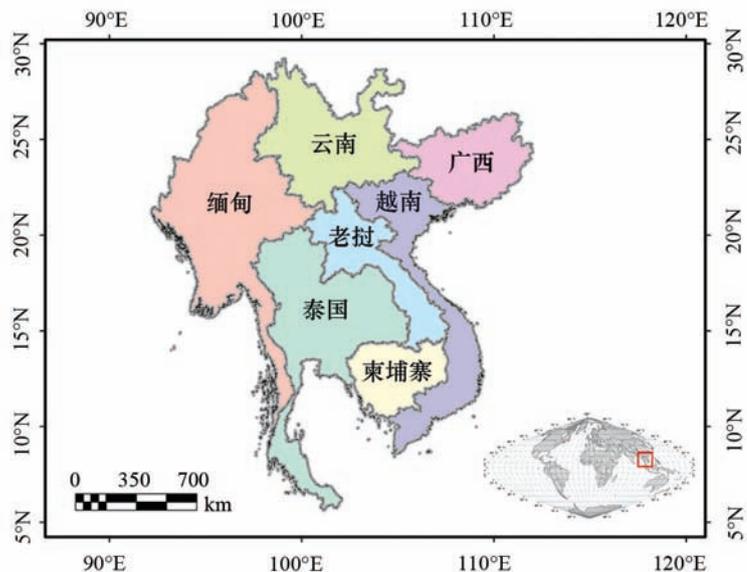


图1 大湄公河次区域(GMS)示意图

Fig.1 The map of the Greater Mekong Subregion (GMS)

2011年10月

溪市红塔区林场。地形复杂,起伏较大,地势南高北低,其海拔高度范围1750~2641m。该地区属于低纬度高海拔亚热带半湿季风性气候,区内小气候明显。植被类型多样,主要针叶树种有云南松(*Pinus yunnanensis*)、华山松(*Pinus armandii*)、云南油杉(*Keteleeria evelyniana* Mast)等;主要阔叶树种为旱冬瓜(*Alnus nepalensis*)、滇石栎(*Lithocarpus dealbatus*)、黄毛青冈(*Cyclobalanopsis delavayi*)等;其他伴生树种包括滇青冈(*Cyclobalanopsis glaucoides*)、山杨(*Populus davidiana*)等。林区内主要森林类型为幼龄到老龄天然针叶林,优势树种为云南松和华山松;还有少量中龄到过熟天然阔叶林,优势树种为旱冬瓜和滇石栎。激光雷达数据是由LiteMapper-5600获取,数据获取时间是2007年12月。航飞相对高度为650m,激光扫描角度为60°,激光发射频率为50kHz;激光扫描频率为48线/秒;激光点间距为1m左右。

(3)星载成像光学遥感数据。MERIS(中等分辨率成像光谱仪)是搭载在欧空局(ESA)环境卫星(ENVISAT)上的传感器。MERIS属于宽视场推扫式成像光谱仪,空间分辨率为300m,共有15个波段,涵盖可见光到近红外(412.5~900nm)的波谱范围。本研究使用2004年-2006年间MERIS合成的反射率产品。ESA在GlobCover项目中提供了10期双月合成反射率产品(2004年12月-2006年6月),该合成产品包含13个波段,去除了用于大气校正的11波段(氧气吸收波段)和15波段(气溶胶吸收波段)^[12]。本研究在此基础上对该10期数据进行多时相合成,消除了部分地区的云遮挡的影响,并合成了归一化植被指数(NDVI)和MERIS陆地叶绿素指数(MTCI)。

2.2.2 地面实测数据获取 根据机载数据覆盖情况,选取试验区的代表树种,分别树高和郁闭度等级进行了外业样地选择。2008年7月16日至8月4日在云南省昆明市西山区林业局、玉溪市红塔区林业局开展了外业测量,地理范围为北纬24°9′~25°28′;东经102°23′~102°36′,总共设置了78块圆形样地(半径为7.5m或15m)。对每块样地都进行了每木检尺调查,起测胸径为5cm,对检尺树木逐一测定树种、胸高直径和树高等测树因子。单株木的胸径使用围尺进行测量,树高使用激光测高仪进行测

量。样地中心位置使用差分GPS(DGPS)进行定位,定位精度优于1m。然后对地面实测数据用对应树种的生长方程计算每木的地上生物量,进而换算到单位面积的地上生物量。

2.2.3 其它辅助数据

(1)土地覆盖数据。研究使用的土地覆盖数据来源于欧空局GlobCover项目的全球土地覆盖产品。该分类产品使用的是基于联合国土地覆盖分类系统(LCCS)定义的分类体系,分为全球产品和区域产品,是目前分辨率最高的全球土地覆盖产品^[12]。本文使用的是基于2004年12月至2006年6月的MERIS 300m全分辨率数据分类生成的GlobCover 2005土地覆盖产品。

(2)WWF全球生态区数据。“全球200重点生态保护区”(Global 200)是由世界自然基金会(WWF)发起制作的全球生态地理分区,该分区基于生物圈及植被地理区划而来的,反映了主要土地利用变化以前的状况,出发点是为了定义生物多样性保护的优先区域,全球划分了233个生态区作为全球生物多样性优先保护区^[13]。不同生态区之间生态环境的不同,决定了不同区域的森林类型及森林生长条件也有所区别。本研究使用Global 200中划分的全球生态区作为条件变量引入到不同区域森林生物量的估测模型中。

(3)土壤类型数据。世界粮农组织(FAO)的发布的世界土壤图也是本研究中生物量建模的条件变量之一。该土壤类型图主要依据土壤剖面的发育程度和特征,土壤的水分状况、成土母质、风化壳类型以及有机质分解状态,并以土壤微形态作为土壤分类的重要依据^[14]。

(4)DEM数据。本研究使用SRTM数据辅助GLAS生物量反演时的地形影响纠正。该计划于2000年2月实施,通过航天飞机合成孔径雷达干涉测量技术获取了北纬60°至南纬56°之间的DEM数据,空间分辨率为90m。

2.3 大湄公河次区域森林地上生物量遥感反演方法

本研究利用机载试验数据和地面实测数据训练星载激光雷达(ICESat GLAS)的森林生物量估测模型,得到GMS范围内星载激光雷达光斑尺度的森林生物量估测数据。然后利用光学遥感成像观测数据及其派生的遥感产品,对整个区域进行空间扩

展,得到大湄公河次区域连续覆盖的森林生物量产品。主要研究步骤为:

(1)通过建立试验区机载激光雷达(ALS)估测森林生物量模型,获取高精度的机载激光雷达估测森林生物量信息;

(2)建立机载激光雷达估测森林生物量与星载激光雷达(ICESat GLAS)波形参数相关回归方程;

(3)通过GLAS反演研究区各离散光斑森林生物量;

(4)结合ENVISAT MERIS及其它辅助数据反演出研究区连续的森林生物量图。

沿着ICESat GLAS的轨迹获取了云南省峨山县至昆明西山区的高密度机载波形LiDAR数据。经过对机载Lidar数据的处理,计算了机载Lidar的高度和密度分位数变量组,与地面的实测数据相结合,建立不同森林类型下Lidar数据与森林结构参数之间的关系,用于反演机载Lidar所覆盖区域的生物量^[15]。然后根据GLAS光斑的实际覆盖范围,裁切出对应的机载Lidar点云数据^[16],并利用所建立的机载Lidar生物量估测模型估计这些点云数据对应的森林生物量,与GLAS的波形指数^[17,3]联合建立光斑尺度上森林地上生物量估测模型。利用GLAS波形指数的生物量反演模型对整个大湄公河次区域的GLAS数据进行森林生物量估计。

利用GLAS森林地上生物量估测结果结合MERIS进行区域连续制图,首先建立GLAS估测结果与MERIS的像元光谱值及其它植被指数等数据的相关关系。由于在区域外推过程中涉及了较多的森林类型和生态区范围,利用决策树回归方法以更好地将样本数据进行分类建模并获得拟合度较高的估测模型。本研究采用的决策树方法为Cubist回归决策树,该方法可依据变量属性进行分类,终端节点是参数的统计回归模型。一般来说,用于决策树分类的变量为离散型变量,而用于决策树统计回归的变量为连续型变量。分类回归树的因变量即为GLAS光斑内的森林地上生物量值,自变量为MERIS像元光谱值、NDVI、MTCI、WWF生态区和土壤类型等数据,样本数共计40 3789个。

3 结果与分析

3.1 大湄公河次区域森林地上生物量连续制图

对地面测量样地的森林生物量进行计算以后,利用多元统计回归方法建立实测森林地上生物量与激光雷达测树因子的相关方程。试验区森林地上生物量与激光雷达植被回波点云30%分位数高度和植被点云密度的相关系数高于0.8,可解释的变异占总变异的比例均在68%以上。通过对396个ICESat GLAS波形数据及对应的机载Lidar数据估测的生物量进行统计回归分析结果表明,GLAS波形指数与机载估计森林生物量的相关性 R^2 达0.54,均方根误差为28t/hm²。进而通过多元统计回归得到了GLAS估测森林地上生物量的估测模型。为了避免无效数据对估测结果的影响,对研究区GLAS点进行了过滤,去除了非森林覆盖区域的和受云等干扰的无效观测的GLAS点。然后对所有森林覆盖区域的GLAS光斑进行森林地上生物量的估测,得到了大湄公河次区域范围内所有GLAS光斑上的森林地上生物量。估测结果显示,研究区GLAS光斑的最高森林地上生物量为427t/hm²。

利用Cubist决策树回归统计软件建立了GLAS估测森林地上生物量与MERIS等光学数据的分段式线性回归方程,共建立了10条规则的线性回归方程。随机选取了1/10的样本(4 0056个)进行模型验证,验证结果显示,森林地上生物量总体模型平均误差在34t/hm²,模型总体的相关系数为0.7。图2

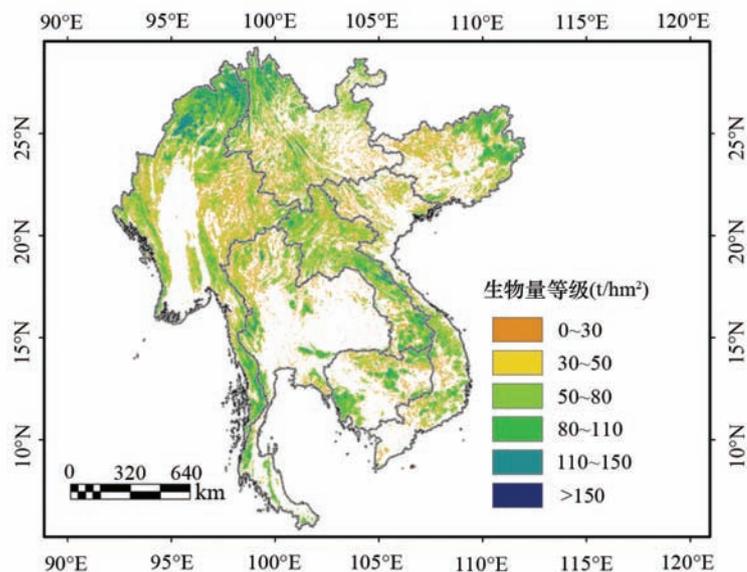


图2 大湄公河次区域森林地上生物量评估结果

Fig.2 Estimated forest aboveground biomass in study area

2011年10月

表1 各国(地区)的森林地上生物量与FAO FRA 2010 报告的比较

Table 1 Forest aboveground biomass comparison of our estimation and FAO FRA 2010 report

国家/地区	FAO 报告值 (亿万t)	本文估计值 (亿万t)	本文估计的平均值 (t/hm ²)
柬埔寨	4.6400	4.4877	92
老挝	10.7400	10.4553	102
缅甸	16.5400	14.0123	55
泰国	8.8000	8.0458	91
越南	9.9200	6.7199	90
中国云南	17.3459	12.7159	94
中国广西	6.5618	6.2839	81
合计	74.5477	62.7208	

注:云南、广西数据来源于2004年-2008年清查资料。

为研究区连续森林生物量制图结果。

从生物量等级分布来看,估测的结果与研究区各国的森林资源分布情况一致,高生物量水平的森林主要分布在各国/地区的自然保护区和国家公园范围内。

3.2 大湄公河次区域森林地上生物量验证

对于大区域森林地上生物量估测结果的验证,目前还没有比较可靠的可直接验证的数据源。因此,为了分析研究结果的可靠性,本文采用与FAO FRA 2010 报告、其它学者研究的结果进行交叉比较的方法进行验证。比较结果如表1所示,其中中国云南、广西的参考数据是李海奎等根据中国第七次全国森林清查资料进行的中国森林植被生物量和碳储量的评估结果^[18]。本文估计的森林生物量与FAO 报告中的最大差异为越南(32.2%),最小差异为广西(4.2%),平均差异为13.3%。

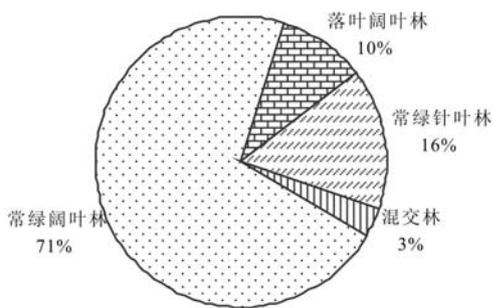


图3 大湄公河次区域不同类型森林生物量概况

Fig.3 Forest aboveground biomass in different forest types in GMS

3.3 大湄公河次区域森林地上生物量分析

根据本文的遥感监测反演结果,大湄公河次区域森林地上生物量总量为62.72 亿 t。结合GlobCover 产品中不同的森林类型进行森林生物量分析表明:常绿阔叶林44.7 亿 t,占71%;落叶阔叶林6.15 亿 t,占10%;常绿针叶林9.92 亿 t,占16%;混交林1.94 亿 t,占3%(图3)。常绿阔叶林地上生物量占研究区总地上生物量的3/4,与研究区大量的常绿阔叶分布有关,符合该区域的森林类型分布特征。由于气候影响,东南亚等国的常绿针叶林较少,该类型总地上生物量最高的地区为我国云南和广西。另外,GMS内混交林地上生物量总量最高地区也是这两个省。

根据本研究估测的大湄公河次区域森林地上生物量,本文统计出了各个国家/地区的森林地上生物量结果。从平均地上生物量看,大部分国家/地区处于90t/hm²的水平上,与FAO 2006 年报告的亚洲地区森林平均地上生物量水平一致^[19]。

从各国(地区)的生物量总量来看,缅甸森林地上生物量总量最大,占22%,其次是云南省、老挝、泰国、越南、广西壮族自治区和柬埔寨(图4)。

4 结论与讨论

本文以大湄公河次区域为研究区,利用机载激光雷达、星载激光雷达ICESat GLAS 数据进行该区域森林地上生物量的反演,结合光学遥感数据全覆盖的特点,将ICESat GLAS 估测的结果与MERIS 等数据结合进行连续森林地上生物量制图。主要结论如下:

(1)基于星机地协同观测数据,利用回归决策树方法,可以有效地实现森林地上生物量从地面实

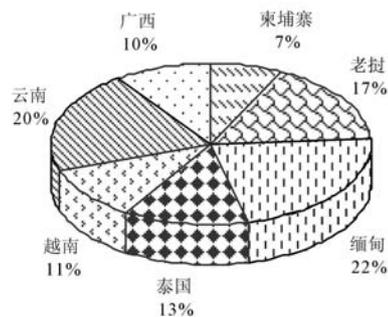


图4 大湄公河次区域各国(地区)森林地上生物量比例

Fig.4 The distribution of forest aboveground biomass in the economies of GMS

测样地到机载激光雷达覆盖范围、星载激光雷达光斑和成像遥感数据等多尺度上的转换。结果表明: GLAS波形指数与机载Lidar估计的森林生物量的决定系数 R^2 达0.54,均方根误差为28t/hm²;连续覆盖森林地上生物量估计的总体模型误差为34t/hm²,相关系数为0.7。

(2)本文的估测结果与FAO FRA 2010报告等其它公布的结果一致性较好,平均差异为13.3%。

(3)根据本文的遥感监测反演结果,大湄公河次区域森林生物量总量为62.72亿t,其中常绿阔叶林占71%,落叶阔叶林占10%,常绿针叶林占16%,混交林,占3%。

(4)从各国(地区)的生物量总量来看,缅甸森林地上生物量总量最大,占22%,其次是云南省、老挝、泰国、越南、广西壮族自治区和柬埔寨。

需要指出的是,本文使用云南中部星机地协同观测数据建立的整个大湄公河次区域(GMS)的星载激光雷达森林生物量估测模型,对于GMS区域中热带林的生物量估测会存在一定偏差。如果能利用更多的地面或机载遥感数据建立星载激光雷达的生物量估测模型,将可以进一步提高大区域的森林生物量估测精度,更客观可靠地分析GMS区域的森林地上生物量分布格局。

致谢:本文作者感谢美国国家冰雪数据中心提供研究所需的ICESat GLAS数据,美国科罗拉多州立大学的Michael Lefsky博士在GLAS波形数据处理上给予的指导和讨论,美国马里兰大学孙国清研究员、中国林业科学研究院谭炳香研究员在技术路线方面进行的讨论和对文章的修改。

参考文献 (References):

[1] Zwally H J, Schutz B, Abdalati W, et al. Icesat's laser measurements of polar ice, atmosphere, ocean, and land[J]. *Journal of Geodynamics*, 2001, 34(3-4): 405-445.

[2] Lefsky M. A., Harding D. J., Keller M., et al. Estimates of forest canopy height and aboveground biomass using ICESat [J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(22): L22S02, doi: 10.1029/2005GL023971.

[3] Lefsky M.A., Michm2el Keller, Yong Pang. Revised method for forest canopy height estimation from Geoscience Laser Altimeter System waveforms[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2007, 1: 0133537.

[4] Boudreau J., R Nelson, H Margolis, et al. Regional aboveground forest biomass using airborne and spaceborne LiDAR in Québec [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(10): 3876-3890.

[5] Baccini N.L., S J Goetz, M sun, et al. A first map of tropical Africa's above-ground biomass derived from satellite imagery[J]. *Environmental Research Letters*, 2008, 3(4), doi:10.1088/1748-9326/3/4/045011

[6] Nelson R., Boudreau J., Gregoire T., et al. Estimating Quebec provincial forest resources using ICESat/GLAS[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2009, 39(4): 862-881.

[7] Huang K, Pang Y, Shu Q, et al. Regional Aboveground Forest Biomass Estimation Using Airborne and Spaceborne Lidar Fusion with Optical Data in the Southwest of China[A]. Proceedings of the 18th International Conference on Geoinformatics[C]. Beijing, China: IEEE, 2010.

[8] Lefsky M.A. A global forest canopy height map from the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer and the Geoscience Laser Altimeter System[J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37: L15401, doi: 10.1029/2010GL043622.

[9] Saatchi Sassan S., Nancy L. Harris, Sandra Brown, et al. Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, 108(24): 9899-9904.

[10] FAO. 2010年森林资源评估[R].世界粮农组织, 2011.

[11] 国家林业局. 中国森林资源报告[R].北京: 中国林业出版社, 2005.

[12] Defourny P, Vancutsem C, Bicheron P, et al. Globcover: A 300 M Global Land Cover Product for 2005 Using Envisat Meris Time Series[A]. Proceedings of the ISPRS Commission VII mid-term symposium, Remote sensing: from pixels to processes[C]. Enschede, the Netherlands, 2006.

[13] Olson D. M., Dinerstein E. The global 200: Priority ecoregions for global conservation[J]. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 2002, 89:199-224.

[14] Batjes N H. Effects of mapped variation in soil conditions on estimates of soil carbon and nitrogen stocks for South America[J]. *Geoderma*, 2000, 97(1-2):135-144.

[15] 付甜,庞勇,黄庆丰,等.亚热带森林参数的机载激光雷达估测[J]. *遥感学报*,2011, 15(5):1092-1104.

[16] Pang Y, Lefsky M, Andersen H, et al. Validation of the icesat vegetation product using crown-area-weighted mean height derived using crown delineation with discrete return lidar data[J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2008, 34: 471-484.

[17] 庞勇,于信芳,李增元,等.星载激光雷达波形长度提取与林业应用潜力分析[J]. *林业科学*,2006,42(7):137-140.

[18] 李海奎,雷渊才. 中国森林植被生物量和碳储量评估[M].北京: 中国林业出版社,2010.

[19] 林俊成. 世界森林资源碳汇估算结果分析[J]. *台湾林业*,2007, 33(4):67-71.

Forest Aboveground Biomass Analysis Using Remote Sensing in the Greater Mekong Subregion

PANG Yong¹, HUANG Kebiao², LI Zengyuan¹, QIN Xianlin¹, CHEN Erxue¹

(1. Institute of Forest Resource Information Technique, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;

2. Asia-Pacific Network for Sustainable Forest Management and Rehabilitation, Beijing 100013, China)

Abstract: Forests play a key role in maintaining the regional environment and global carbon balance and mitigating global climate change. Forest aboveground biomass (AGB) is an important indicator of forest carbon stocks. Accurately estimating forest aboveground biomass can significantly reduce uncertainties in investigating the terrestrial ecosystem carbon cycle. The Greater Mekong Subregion (GMS) is rich in forest resources; changes in forest resources can affect regional and even global climate change. It is therefore important to estimate forest AGB in this region. Remote sensing is an efficient way to estimate forest parameters over large areas, especially at regional scales where field data are scarce. Light Detection And Ranging (LIDAR) provides accurate information on the vertical structure of forests. Combining airborne LIDAR with spaceborne LIDAR for regional forest biomass estimation could provide a more reliable and quantitative information regarding regional forest biomass. In this study, the vertical structure of forest parameters of two forest farms in Yunnan Province, China, was derived using airborne LIDAR system (ALS). Regression models were built using field data of forest AGB and percentiles of canopy height and canopy density derived from ALS point cloud data. Forest AGB estimated from ALS with high accuracy were used as training data for building a forest AGB estimation model with ICESat GLAS waveform indices. Then the forest AGB was estimated at ICESat GLAS footprint levels in GMS. In terms of different types of ecological zones, a set of categorical regression models was built between ICESat GLAS estimates and MERIS spectral variables. Then, a forest aboveground biomass map with continuous biomass values was generated. Results show that: 1) integrating field measurements with airborne and spaceborne LiDAR data can be useful in effectively estimating forest aboveground biomass. Ten estimation equations were built using the regression decision tree method. The overall average error of the estimation models is 34 t/hm², with a correlation coefficient of 0.7. 2) The estimation agrees well with the FAO FRA 2010 report and other published results, and the average difference is 13.3%. 3) The total forest aboveground biomass in GMS estimated from remote sensing data is 6.27 billion tons, consisting of 71% evergreen broadleaf forest, 10% deciduous broadleaf forest, 16% evergreen coniferous forest, and 3% mixed forest. 4) According to the total aboveground biomass map, Myanmar has the largest AGB in the region which account for 22% of the total regional biomass, followed by Yunnan Province in China, Laos, Thailand, Vietnam, Guangxi Zhuang Nationality Autonomous Region in China, and Cambodia.

Key word: Greater Mekong Subregion (GMS); Forest aboveground biomass; LiDAR; Optical remote sensing