

重庆市森林植被生物量和碳储量的空间分布特征研究

刘倩楠^{1,2}, 欧阳志云³, 李爱农¹, 徐卫华³

(1. 中国科学院 水利部 成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院 生态环境研究中心, 北京 100085)

摘 要:重庆市森林植被是我国西南林区的主体,为探究其生物量和碳储量的空间分布特征,发挥其在西南地区的碳汇功能中的重要作用。以 2011 年生长季 Landsat TM 遥感影像为主要数据源,以大量样地实测数据为基础,借助 RS 和 GIS 技术,基于遥感统计模型法,利用生物量—遥感地学数据回归模型估算重庆市森林植被生物量,定量分析生物量的不同地形特征空间分异规律,探寻影响生物量分布的地理因素,揭示区域碳储量地理空间分布格局特征。结果表明:生物量遥感反演模型与理论值存在较好的相关关系($R^2=0.641$);重庆市地上生物量总量为 2.83 亿 t,森林生态系统生物量总量为 1.39 亿 t;生物量主要分布于渝东北和渝东南区域,整体呈现出东高西低的分布格局,中高海拔和坡度较陡的区域,是重庆市森林植被主要分布区和生物量集中分布地带,其空间分布格局体现了重庆市的山地森林特征;森林生态系统碳储量总量为 6.29×10^7 t,平均单位面积碳储量为 22.01 t/hm²,且各县森林碳汇分布格局在地域分布呈现出一定的不平衡性,总体呈相对极端的趋势。

关键词:生物量; 森林碳储量; 植被指数; 回归模型; 分布特征

中图分类号:S771.8

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2016)06-0221-06

Study on Spatial Differentiation Characteristics of Forest Vegetation Biomass and Carbon Stock in Chongqing City

LIU Qiannan^{1,2}, OUYANG Zhiyun³, LI Ainong¹, XU Weihua³

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences,

Chengdu 610041, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: Forest vegetation in Chongqing City is the main part of the Southwest Forest Area in China. To explore the spatial distribution features of its biomass and carbon reserve and exert its important role in carbon sink function in southwest forestry regions, we took Landsat TM remote-sensing images in growing season in 2011 as main data sources and measured data of numerous samples as basis. Based on RS and GIS technology and remote-sensing statistical model method, biomass-remote-sensing geological data regression model was used to estimate the biomass of Chongqing forest vegetation, the spatial differentiation laws of different topographic features of biomass were quantitatively analyzed, geographical influence factors of biomass distribution also were explored, and geospatial spatial distribution pattern features of regional carbon reserve were revealed. The results indicate that there is a good correlation between the biomass remote-sensing inversion model and theoretical value ($R^2=0.641$). Chongqing above-ground total biomass is 2.83×10^8 t and the total biomass of forest ecosystem is 1.39×10^8 t. Biomass mainly distributed in the northeast and southeast of Chongqing. On the whole, it shows a distribution pattern of high level in the east and low level in the west. The regions with middle-high elevation and steep slope are the main distribution areas of Chongqing forest vegetation and the concentrated biomass distribution areas. Its spatial distribution pattern manifests the mountain forest features in Chongqing. The total carbon reserve of forest ecosystem is 6.29×10^7 ton, with average unit carbon reserve of 22.01 t/hm². Also, forest carbon sink distribution pattern in each districts

收稿日期:2015-12-17

修回日期:2015-12-31

资助项目:中国科学院委托研究与专项咨询服务课题(KFJ-EW-STS-020-02);全国生态环境十年变化(2000-2010)遥感调查与评估项目课题(STSN-01-04);中国科学院战略性先导科技专项子课题(XDA05050105)

第一作者:刘倩楠(1986—),女,黑龙江省哈尔滨人,博士研究生,主要从事于山地遥感与地理信息系统及资源环境监测的研究。E-mail:qnliu@imde.ac.cn

通信作者:欧阳志云(1962年—),湖南攸县人,博士,研究员,博士生导师,主要从事于生态系统评价的研究。E-mail:zyouyang@rcees.ac.cn

and counties shows unbalancedness in geographical distribution and on the whole, which presents a relative extreme trend.

Keywords: biomass; forest carbon storage; vegetation index; regression model; spatial distribution characteristics

森林是陆地生态系统的主体,储存了陆地生态系统 72%~98% 有机碳^[1],森林固碳量占陆地植被总固碳量的 82.15%^[2-3],且约有 85% 的陆地生物量都集中于森林植被上^[4],表现出比其他陆地生态系统更高的生产力^[5]。可见,森林植被的生物量和生产力对全球气候变化和物质循环起着非常重要作用^[6-7],在维护区域生态环境和全球碳平衡方面起着极其重要和不可替代的作用^[8-10],在全球碳循环中扮演着源、库、汇的作用^[11]。森林碳储量作为反映森林生态系统功能的一个基本参数^[12],主要借助于准确估算植被生物量来推算^[13-14]。然而区域森林植被碳储量与全球气候变迁的关系成为生态学和环 境学研究热点^[15-16]。我国对森林生态系统生物量及碳储量方面也做过一些研究^[17-19],但多集中在国家尺度或局部典型森林生态系 统上^[20-22],而对中尺度或区域森林生态系统碳储量和碳汇功能的研究相对薄弱^[23],基于该尺度下研究西南林区森林生物量、碳储量和碳汇功能相对较少,且单独研究重庆市则更加稀少。

重庆市和四川省的森林植被是我国西南林区主体,地处世界第三极青藏高原东缘,是全球气候变化的敏感响应区^[24],且森林植被绝大部分分布于长江上游地区,具有 重要的水源涵养功能,是维系长江流域生态平衡的主要天然屏障^[25]。自重庆市直辖以来,随着长江绿化带和青山绿水等重大森林工程项目的相继开展,森林在面积不断增加的同时,森林植被在碳汇和碳平衡等方面也发挥着越重要的作用,然而目前基于森林植被生物量及碳汇能力等方面的研究较少,且探究继森林工程开展后未来碳汇潜力的则更少。基于此,本文以重庆市 2011 年 Landsat TM 为主要数据源,并辅助于大量野外调查数据和部分森林二类调查数据,从生物量—遥感地学数据多元回归模型出发,建立森林植被遥感生物量模型,在估算其森林植被生物量的基础上,依据 DEM 数据、土地利用现状和森林植被类型的含碳量等数据,基于 ArcGIS 空间分析模块,定量分析不同地形特征上森林植被生物量空间分异规律,从宏观角度探寻影响生物量地理分布的因素,探讨研究区域碳储量的地理分布特征。该研究结果不仅对评价森林植被碳汇功能、绿色 GDP 计算和今后森林碳生态效益补偿机制的建立有重要理论依据和实践意义,还能为今后重庆市各区县开展 CDM (Clean Development Mechanism, CDM) 造林及相关的碳汇项目提供科学决策服务和技术参考。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区概况

重庆市(105°17′—110°11′E, 28°10′—32°13′N)东邻湖北省和湖南省,南接贵州省,西面、北面与四川省相连,东北角与陕西省交界,幅员面积 8.24 万 km²是长江上游的经济中心、西南工业重镇和水陆交通枢纽,同样也是长江流域重要的生态屏障,地貌类型以山地丘陵为主,山地占该市总面积 75.8%,丘陵占 18.2%。气候属中亚热带湿润季风气候,雨热同季,热量丰富,降水充沛但季节分配不均,夏季受到副热带高压控制和地形影响,高温炎热,常出现严重伏旱。该市主要植被类型有针叶林、阔叶林、竹林、灌丛及草甸。山地多、坡度大,再加之降水季节分配不均,区域土壤侵蚀较为强烈^[26]。

1.2 遥感数据处理

本文以 1:5 万地形图地理基准,在遥感软件 ENVI 4.8 中,采用二次多项式及最邻近插值法完成 2011 年 Landsat TM 遥感数据影的几何校正,并把校正误差控制在 1 个像元内,投影方式为横轴墨卡托投影 UTM (Zone48 N),并采用 WGS84 坐标系统,利用该软件 FLASSH 模块完成对遥感影像大气校正,消除大气散射对图像辐射失真的影响,并基于 DEM 完成遥感影像的地形校正,以消除山体阴影对森林植被影响,并根据研究区行政边界,对图像进行掩膜裁剪处理。

在综合考虑土地分类体系基础上,结合 Landsat TM 数据源特点及研究区实际土地利用情况,在获取大量野外调查样本基础上,采用多步骤遥感分类法,基于 ERDAS IMAGE 9.3 完成对遥感影像分类处理,本次将重庆市土地利用共分 7 个一级类,包括:森林、灌木、草地、湿地、农田、城镇与裸地,采用随机抽样法完成分类结果精度验证,Kappa 系数为 0.893,该结果高于最低允许判别精度 0.7 的要求,基于 ArcGIS 9.3 完成最终分类结果修正和拓扑处理,生成土地利用分布专题图。

在软件 ERDAS IMAGE 9.3 Model 模块支持下,完成了比值植被指数(RVI)、归一化植被指数(NDVI)、大气抗阻植被指数(ARVI)、修正型土壤大气抗阻植被指数(MSAVI)和增强型植被指数(EVI)定量提取。同时基于缨帽变换获得亮度分量(KT1)、绿度分量(KT2)、湿度分量(KT3),基于主成分变换

(PCA)获取 PCA1,PCA2 和 PCA3 三个主成分变量。

1.3 样方设计

本次研究植物群落调查以传统样方法为主,调查时间为 2011 年 8—10 月。由于地面生物量数据源自野外样方调查,所以本文所选取代表样方主要有针叶林、针阔混交林、阔叶林等森林群落,本次共选取了 158 个森林植被样方,在考虑 Landsat TM 影像空间分辨率为 30 m 的基础上,将样方大小统一设置为 30 m×30 m,利用手持式 GPS 记录样地中心坐标,以便与遥感数据匹配建立地理信息系统数据库^[27],对乔木层植物进行每木调查,记录乔木树种、树高、胸径和冠幅等,森林样方内伴生灌木和草地样地面积分别设置为 4 m²(2 m×2 m)和 1 m²(1 m×1 m);灌木和草地样方的面积设置 25 m²(5 m×5 m)和 9 m²(3 m×3 m),灌木层记录其物种、高度、盖度和株数(丛数);草本植物记录其物种、高度和盖度。此外,对样地受干扰程度和植物死亡状况进行备注记载。

1.4 生物量估算

参照方精云等所建立生物量与蓄积量回归方程及 21 个优势树种的计算参数基础上,结合本研究区主要树种基本参数,采用方精云等^[17]建立回归方程对森林生物量进行估计,在查阅相关文献基础上,选择灌丛和草本盖度和高度乘积作为预测模型自变量,应用常用生物量回归模型获取单位面积草本层和灌木层的生物量^[28],进而通过获取整个样方生物量。

完成相应森林样本中 Landsat TM 影像各波段数据(1,2,3,4,5,7 波段)、植被指数数据(ARVI,RVI,NDVI,EVI,MSAVI)、缨帽变换数据(KT1,KT2,KT3)和主成分变换数据(PCA1,PCA2,PCA3)等各因子的定量计算及相关性分析,在获取相关性系数基础上(见表 1 和表 2),选择遥感地学数据与样本生物量在 0.05 水平以上显著相关因子,基于遥感统计模型逐步回归法,在 ERDAS IMAGE 9.3 Model 下建立森林植被生物量多元线性回归模型,用于估算研究区生物量,最后确定 110 个建模样点,48 个验证样点。

表 1 建模因子与地面调查生物量相关分析结果

| 参数 | Pearson 相关系数 | 参数 | Pearson 相关系数 |
|-----|--------------|------|--------------|
| TM1 | -0.105 | KT1 | 0.335 * |
| TM2 | -0.212 | KT2 | -0.497 ** |
| TM3 | 0.091 | KT3 | -0.227 |
| TM4 | 0.337 * | PCA1 | 0.318 * |
| TM5 | 0.248 | PCA2 | 0.464 ** |
| TM7 | 0.213 | PCA3 | 0.067 |

注: ** 表示 0.01 的显著度水平, * 表示 0.05 的显著度水平,下同。

表 2 植被指数与地面调查生物量相关分析结果

| 参数 | ARVI | EVI | MSAVI | NDVI | RVI |
|--------------|---------|----------|----------|----------|----------|
| Pearson 相关系数 | 0.323 * | -0.337 * | 0.847 ** | 0.558 ** | 0.524 ** |
| 显著性水平 | 0.546 | 0.574 | 0.000 | 0.002 | 0.022 |
| 样本数 | 110 | 110 | 110 | 110 | 110 |

1.5 模型构建及精度验证

1.5.1 森林生物量模型 根据分析结果和最优化原则,在探究生物量与各因子线性函数、指数函数、对数函数、幂函数和双曲线函数等模型基础上,按照“模型尽可能简单,相关系数最大,标准差最小,回归关系最显著和兼顾 F 检验最优”原则,完成基于建模样点森林地上生物量遥感估算模型构建(见式 1),以此定量反演其生物量。

$$y_{\text{BIO}} = -34.83 + 47.13X_{\text{TM4}} + 18.27X_{\text{KT1}} - 116.02X_{\text{KT2}} + 58.27X_{\text{PCA1}} + 152.59X_{\text{PCA2}} + 169.38X_{\text{ARVI}} - 215.38X_{\text{EVI}} + 1209.43X_{\text{MSAVI}} + 204.38X_{\text{NDVI}} + 256.34X_{\text{RVI}} \quad (R^2 = 0.523) \quad (1)$$

式中: y_{BIO} 为生物量(t/hm²); X 为显著相关指标因子。

1.5.2 灌丛、草地和农业生态系统生物量模型 对于研究区域的灌丛、草地和农业生态系统的生物量模型而言,主要选择相关性最高的指数 MSAVI 构建经验模型,基于建立的指数函数遥感模型定量反演灌丛、草地和农业生态系统生物量(见图 1)。

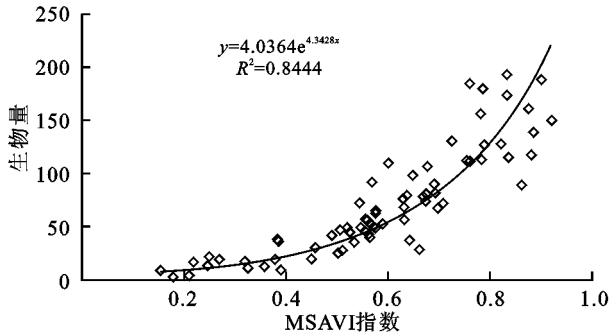


图 1 灌丛、草地、和农业生态系统生物量与指数关系

在此基础上,基于验证样点生物量数据检验遥感反演模型精度(见式 2),可见该生物量遥感反演模型与理论值存在较好的相关关系($R^2 = 0.641$)。

$$Y'_{\text{BIO}} = -316.48 + 4.38X' \quad R^2 = 0.641 \quad (2)$$

式中: Y'_{BIO} 为遥感模型估测生物量数据; X' 为样点理论生物量数值。

1.6 碳储量计算

根据重庆市主要森林植被生物量空间分布及生物量—碳转换系数,本研究选择 0.5 作为生物量—碳换算系数计算^[29],即生物量乘以 0.5 得到研究碳储量。同时本文中碳储量没有包括枯死木以及土壤层碳储量,主要涵盖森林植被、灌木层和草本层的碳储量。

1.7 地形特征因子提取

本文基于 ArcGIS 中空间分析模块,将研究区域生物量和地形特征因子进行叠加分析,从高程、坡度和坡向 3 方面对生物量空间分布特征进行定量分析。本研究高程以 100 m 为一个等级的等间距分级,坡度 5°为等间距,坡向以每间隔 45°划分一级。将坡向分为阳坡 (135°—225°)、阴坡 (315°—45°)、半阳坡 (90°—135° 和 225°—270°)、半阴坡 (45°—90° 和 270°—315°),且正北为 0°,正南为 180°。

2 结果与分析

2.1 生物量估算及空间分布

基于森林植被生物量多元线性回归模型定量反演可知,重庆市地上生物量总量为 2.83 亿 t,平均单位生物量为 34.22 t/hm²,其中森林生态系统生物量总量为 1.39 亿 t,占全部生物量的 49.12%,占据较大优势比例,其次是为农田生态系统、灌丛和草地等,分别占总生物量的 43.68%,6.73%和 0.47%,且森林生态系统平均单位面积生物量达到 45.59 t/hm²,远高于总平均单位生物量。研究区域植被生物量整体分布格局是东高西低,渝东北和渝东南明显高于渝中和渝西,渝东南地区最高,平均单位面积生物量为 222.29 t/hm²,渝中地区最低,仅为 17.11 t/hm² (附图 4)。渝东北和渝东南区域是研究区域生物量优势分布区,源于该地带海拔相对较高,坡度较陡,自然地理条件在一定程度上限定了人为开发活动,加之该区域人口数量较少,森林植被受人类活动干扰强度较小,致使大量天然林植被得以保存,基本处于原始森林植被状态,且主要以粗枝云杉、鳞皮云杉为主的暗针叶林优势顶极群落,自然生态系统保护较为完整,生物量较高,表明重庆市森林植被生物量主要存在于天然林中。可见天然林在西南林区森林植被碳汇功能中发挥着重要作用。渝中和渝西地区地势平坦,人口较多,为主要的农业和工业生产基地,经济发展较快,交通方便,在追求经济利益发展过程中,除了高山山脉地区保留部分自然生态系统外,其他的基本遭到破坏,致使人为干扰景观在基本上代替原始自然景观,森林植被生物量相对较小。可见,受人类活动影响较轻的边缘山地和高山地区分布着大量原生森林植被生态系统,具有较高的生物量。

基于 ArcGIS 空间分析工具,在完成对研究区各个区县森林生物量统计基础上,探究其空间分布特征 (见附图 5)。总体而言,森林生物量分布在空间上表现为南高北低,且酉阳县森林生物量最大,达到 9.58×10^6 t;其次为石柱县、奉节县、巫溪县等,生物量分别为 8.34×10^6 、 8.27×10^6 、 7.78×10^6 t,且酉阳森林

生物量密度最大,为 56.85 t/hm²,主要源于该区域存在着大面积冷杉林、云杉林、栎林及硬阔林等原始天然林,森林密度较高,且人为干扰活动少;森林生物量最少的县为荣昌县,仅为 0.37×10^6 t,森林生物量密度最小,仅为 21.11 t/hm²。对于森林生物量保存较高区域而言,应该继续实施封山育林、天然林保护和退耕还林等生态政策,进一步增强该区域森林质量,进一步提升其碳固定能力。森林生物量较低区域,在改进现有森林生物量同时,加大人工林的种植,逐步提高人工林碳储能力,促使人工林在重庆市中碳汇功能中扮演重要角色,在提高研究区整体地上生物量基础上,增强森林生态系统服务功能,同时也表明了人工林景观将是重庆市的一个潜在碳库。

2.2 碳储量估算与空间分布

本文根据量—碳换算系数完定量成碳储量估算得知,重庆森林生态系统碳储量总量为 6.29×10^7 t,其平均单位面积碳储量为 22.01 t/hm²。且针叶林碳储量最大,占重庆市碳储量 75%左右,远大于阔叶树种,但云冷杉林碳储量在整个森林生态系统中占据绝对优势地位。基于研究区域碳储量地理分布可知 (附图 6),北碚缙云山、江津四面山、南川金佛山、涪陵武陵山和渝东北大巴山等区域是森林生态系统碳储量主要分布地带,其碳储量明显高于其他地方,源于这些区域是整个重庆市森林植被资源的重要储存地,森林植被保存比较完整,且森林结构相对完善。江津南部四面山区域碳储量较小,但分布相对集中;渝东北大巴山区域碳储量分布分散,但碳储量密度较高,可能与当地长期森林保护有密切关系。此外,重庆市地形复杂、植被类型繁多和气候变化多样也是影响碳储量空间分异特征重要因素。此外,重庆市各区县森林碳汇分布格局在地域分布有一定的不平衡,西部各区县碳汇能力普遍都较低,与重庆两翼各区县碳汇能力相差甚远。因此,在今后重庆市的森林生态建设中,根据碳储量空间分异特征,结合天然林资源保护工程和退耕还林(草)工程等森林生态系统恢复工程,实现不同区域森林生态系统管理,协调整个市域森林碳汇格局分布,加强碳汇量大针叶林抚育管理,增大阔叶树种和人工林栽种面积,在增加研究区域森林植被碳汇功能基础上,重点发展重庆西部地区森林碳汇,并与其两翼地区森林碳汇发展相结合,更好更全面提高整个重庆市森林碳汇能力,以其为西南林区的碳储量研究和森林生态系统管理提供参考和基础数据。

2.3 生物量空间分布地形影响因素分析

重庆市一个多山城市,山地面积占据绝对优势地位,且森林植被多分布在山区,地形因子对该区域降雨和温度等环境因子的重新分配起重要作用,加之受到青藏高原隆升以及人类活动干扰及其叠加效应影

响^[30],研究区森林植被生物量在地形特征上表现出一定特殊性和复杂性。

由图 2 可知,研究区生物量随海拔分布特征明显,随海拔升高逐渐升高,在海拔 500 m 到 1 000 m 之间出现峰值,随后随着海拔的升高而降低。在低海拔区域,地势相对平坦,土壤肥沃,适宜人类开展工农业生产活动,致使该区域人口聚集,人口密度增大,在一定经济利益驱使之下,人类加大了对部分区域原生植被的干扰强度,致使地带性常绿阔叶林破坏严重,原始森林植被逐步演变为次生林植被或被人工林所替代^[31],生物量相对较小,在一定程度上反映人类干扰成为影响该区域生物量格局重要因素。在中高海拔区域,土壤条件、水分、热量等立地条件适合森林植被生长,主要分布着以天然起源、生物量较高的亚高山针叶林^[31]。此外,该区域人口密度减少,地形条件限制了人类对森林干扰强度,致使该区域生物量较高。高海拔地区由于水分和热量等条件有所下降,限制部分森林植被成长,主要形成低矮、稀疏的灌丛植被,生物量相对较低,自然条件成为影响该区域生物量重要因素。

生物量随坡度分布特征明显,在坡度 0°到 10°之间,土层相对深厚,交通较为便利,人口密度大,且人为干扰活动频繁,部分暗针叶林被破坏后,农田、居民点和残次疏林等占据了该区域大部分土地,栎林阔叶林是该区域次生林代表群落,生物量并不高;在坡度 10°到 35°之间,随坡度升高逐渐升高,生物量增加,在坡度 20°到 25°之间出现峰值,随后降低。对于该区域而言,森林植被受人为干扰机会和程度越小,大面积分布着以天然起源的冷、云杉原始林,森林植被生长时间较长且生物量大,其森林植被是重庆市的主要森林碳库。在坡度高于 35°区域,虽然坡度增大和人类活动同时减少,但受气温和降雨量等因素影响,土壤含水量越低,立地条件恶劣,在一定程度上也限制了森林植被成长,林地生产力较低,且生物量较小。

生物量在坡向上呈现一定曲线变化,但总体上是阴坡和半阴坡的生物量明显高于阳坡和半阳坡,主要源于阴坡区域受太阳辐射越少,蒸发量低,土壤水分条件好,植被恢复比阳坡快,易形成茂密的冷杉、云杉等乔木,阳坡区域主要分布着灌木林和油松、桦树、杨树等次生林种,多为暗针叶林遭受破坏后经自然或人为更新所形成^[32],也说明阴坡和半阴坡区域生物量比半阳坡和阳坡便于积累。

总的来说,中高海拔和坡度较陡区域,是重庆市森林植被和主要分布区和生物量集中分布地带,但该区域是典型生态环境脆弱带^[31],森林植被一旦遭到破坏,其生态恢复难度较大,所以尽可能的减少人为

干扰活动,要加大对森林植被的保护力度,促使生物量低的次生演替类型向生物量高的云冷杉顶级群落演替,从而稳定发挥重庆市森林植被碳汇功能。

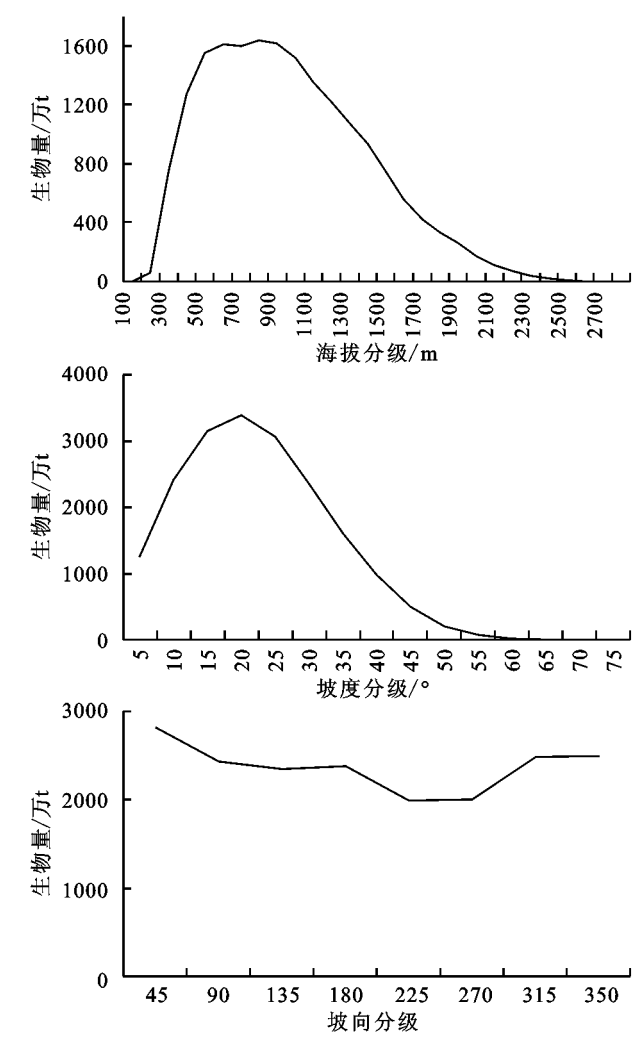


图 2 重庆市地上生物量地形特征分布

3 结论

(1) 重庆地上生物量总量为 2.83 亿 t,平均单位生物量为 34.22 t/hm²,森林生态系统生物量总量为 1.39 亿 t,占全部生物量 49.12%,在生物量总量中占据较大优势比例,其次是为农田生态系统、灌丛和草地等;研究区的生物量整体分布格局是东高西低,主要分布于渝东北和渝东南区域,但需要进一步说明的是,研究区域面积大而样点个数相对较小,今后通过采用更多样点数据和较高分辨率遥感数据,定量反演森林生物量可能会得到更为准确的数据。

(2) 研究区域森林地上生物量随海波分布特征明显,随海拔升高逐渐升高,在海拔 500 m 到 1 000 m 之间出现峰值,随后降低;生物量随坡度分布特征明显,随坡度升高逐渐升高,在坡度 20°到 25°之间出现峰值,随后降低。生物量在坡度 20°—25°地区出现峰值,阴坡和半阴坡的生物量要高于半阳坡和阳坡区

域,中高海拔和坡度较陡区域,是重庆市森林植被主要分布区和生物量的集中分布地带,其空间分布格局体现了重庆市的山地森林特征。

(3) 重庆市 2011 年森林生态系统碳储量总量为 $6.29 \times 10^7 \text{ t}$, 其平均单位面积碳储量为 $22.01/\text{hm}^2$ 。重庆市各区县森林碳汇分布格局在地域分布有一定不平衡,总体呈相对极端趋势,西部各区县碳汇能力普遍都比较低,与重庆两翼各区县的碳汇能力相差甚远,在准确掌握研究区域碳汇格局基础上,可为今后其森林资源的规划、保护和经营等生态措施提供理论依据。

参考文献:

- [1] 王效科,冯宗炜,欧阳志云. 中国森林生态系统的植物碳储量和碳密度研究[J]. 应用生态学报, 2001, 12(1): 13-16.
- [2] Sabine C L, Heimann M, Artaxo P, et al. Current status and past trends of the global carbon cycle[C]//Field C B, Raupach M R, MacKenzie S H. The Global Carbon Cycle: Integrating Humans, Climate and the Natural World. Washington: Island Press, 2004.
- [3] 钱逸凡,伊力塔,张超,等. 浙江省中部地区公益林生物量与碳储量[J]. 林业科学, 2013, 49(5): 17-23.
- [4] 方精云,陈安平,赵淑清,等. 中国森林生物量的估算: 对 Fang, 等 Science 一文(Science, 2001, 291: 2320-2322)的若干说明[J]. 植物生态学报, 2002, 26(2): 243-249.
- [5] Houghton R A. Balancing the global carbon budget[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2007, 35(1): 313-347.
- [6] Cramer W, Kicklighter D W, et al. Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): overview and key results[J]. Global Change Biology, 1999(5): 1-15.
- [7] Boyd D S, Foody G M. An overview of recent remote sensing and GIS based research in ecological informatics[J]. Ecological Informatics, 2011, 6(1): 25-36.
- [8] 刘国华,傅伯杰,方精云. 中国森林碳动态及其对全球碳平衡的贡献[J]. 生态学报, 2000, 20(5): 733-740.
- [9] Dixon R K, Solomon A M, Brown S, Houghton R A, et al. Carbon pools and flux of global forest ecosystems[J]. Science, 1994, 263(5144): 185-190.
- [10] 徐少君,曾波,苏晓磊,等. 基于 RS/GIS 的重庆缙云山自然保护区植被及碳储量密度空间分布研究[J]. 生态学报, 2012, 32(7): 2174-2184.
- [11] Fu B J, Niu D, Zhao S D. Study on global change and terrestrial ecosystems: history and prospect [J]. Advances in Earth Science, 2005, 20(5): 556-560.
- [12] 葛立雯,潘刚,任德智,等. 西藏林芝地区森林碳储量、碳密度及其分布[J]. 应用生态学报, 2013, 24(2): 319-325.
- [13] IPCC. Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry [EB/OL]. (2004-05-01) [2010-12-01]. <http://www.Ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gpglulucf/gpgluluc.f.html>.
- [14] IPCC. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventory [EB/OL]. (2006-12-15) [2010-12-01]. <http://www.Ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>
- [15] 张亮,林文欢,王正,等. 广东省森林植被碳储量空间分布格局[J]. 生态环境学报, 2010, 19(6): 1295-1299.
- [16] Du Y, Mi X, Liu X, et al. The effects of ice storm on seed rain and seed limitation in an evergreen broad-leaved forest in east China[J]. Acta Oecologica, 2012, 39(2): 87-93.
- [17] 周玉容,于振良,赵士洞. 我国主要森林生态系统碳贮量和碳平衡[J]. 植物生态学报, 2000, 24(5): 518-522.
- [18] 张萍. 北京森林碳储量研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2009.
- [19] 方精云,刘国华,徐嵩龄. 我国森林植被的生物量和净生产量[J]. 生态学报, 1996, 16(5): 497-508.
- [20] 方精云,陈安平. 中国森林植被碳库的动态变化及其意义[J]. 植物学报, 2001, 43(9): 967-973.
- [21] 王效科,冯宗炜,欧阳志云. 中国森林生态系统的植物碳储量和碳密度研究[J]. 应用生态学报, 2001, 12(1): 13-16.
- [22] 赵敏,周广胜. 中国森林生态系统的植物碳贮量及其影响因子分析[J]. 地理科学, 2004, 24(1): 50-54.
- [23] 王敏,李贵才,仲国庆,等. 区域尺度上森林生态系统碳储量的估算方法分析[J]. 林业资源管理, 2010, 02: 107-112.
- [24] 张新时,张奠安. 中国全球变化样带的设置与研究[J]. 第四纪研究, 1995(1): 43-52.
- [25] 黄从德,张健,杨万勤,等. 四川省及重庆地区森林植被碳储量动态[J]. 生态学报, 2008, 28(3): 966-975.
- [26] 张建国,范建容,等. 重庆市降雨侵蚀力的时空分布特征[J]. 水土保持研究, 2004, 11(1): 56-59.
- [27] 王淑君,管东生,黎夏. 广州森林碳储量时空演变及异质性分析[J]. 环境科学学报, 2008, 28(4): 778-785.
- [28] 刘国华,傅伯杰,方精云. 中国森林碳动态及其对全球碳平衡的贡献[J]. 生态学报, 2000, 20(5): 7333-7401.
- [29] Olson J S, Watts J A, Allison L J. Carbon in live vegetation of major world ecosystems[R]. Tenn (USA): Report ORNL-58620, Oak Ridge National Laboratory, 1983.
- [30] 刘纪远,岳天祥. 中国西部生态系统综合评估[M]. 北京: 气象出版社, 2006.
- [31] 黄从德,张健,杨万勤,等. 四川省森林植被碳储量的空间分异特征[J]. 生态学报, 2009, 29(9): 5115-5121.
- [32] 蓝振江,蔡红霞,曾涛,等. 九寨沟主要植物群落生物量的空间分布[J]. 应用与环境生物学报, 2004, 10(3): 299-306.