

钱春花, 李明阳, 郑超. 苏南丘陵山区森林生物量时空变化驱动因素分析[J]. 江苏农业学报, 2021, 37(2): 382-388.
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2021.02.014

苏南丘陵山区森林生物量时空变化驱动因素分析

钱春花^{1,2}, 李明阳¹, 郑超³

(1. 南京林业大学林学院, 江苏 南京 210037; 2. 苏州农业职业技术学院, 江苏 苏州 215008; 3. 句容市委办公室, 江苏 句容 212400)

摘要: 森林生物量是反映自然生态环境的重要指标, 分析苏南经济发达区域森林生物量的时空变化, 并探讨其驱动因素, 对于经济发达地区的森林经营规划和生态保护具有重要意义。本研究以江苏省的重点林区句容市为研究对象, 以 2007 年、2014 年森林资源规划设计调查数据和林地变化调查数据为主要数据源, 分别采用克里金、反距离权重、样条函数 3 种插值模型进行森林生物量估测运算, 在此基础上进行时空变化、驱动因素分析。研究结果表明, 在 3 种插值模型中, 克里金模型的性能最高, 反距离权重模型次之, 样条函数模型的性能最低。2007–2014 年, 研究区高森林生物量和中森林生物量的林分面积比例呈下降趋势, 低森林生物量林分面积比例呈增加趋势。空间聚类分析结果表明, 2007–2014 年, 研究区森林生物量高的林分主要分布在句容市北部、东南部边缘地带以及东北部地区, 而森林生物量低的林分主要分布在中南部平原农业区。2007–2014 年, 研究区大部分乡镇森林生物量呈小幅度下降趋势, 森林生物量的空间聚集程度呈增强趋势。句容市森林生物量时空变化的主要原因是森林干扰指数的增加以及城镇化进程引起的林地变化。

关键词: 森林生物量; 时空变化; 驱动因素; 苏南丘陵山区

中图分类号: S757.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2021)02-0382-07

Analysis on driving factors of spatiotemporal changes of forest biomass in hilly areas of southern Jiangsu

QIAN Chun-hua^{1,2}, LI Ming-yang¹, ZHENG Chao³

(1. College of Forestry, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 2. Suzhou Polytechnic Institute of Agriculture, Suzhou 215008, China; 3. Office of Jurong Municipal Party Committee, Jurong 212400, China)

Abstract: Forest biomass is an important indicator to reflect the natural ecological environment. It is of great significance to analyze the spatiotemporal changes of forest biomass in economically developed areas of southern Jiangsu and explore the driving factors for forest management planning and ecological protection in economically developed areas. Jurong City of the key forest region in Jiangsu province was chosen as the study object, forest resource planning data and survey data of forest land change in 2007 and 2014 were collected as the main information source. Three forest biological interpolation models of Kriging, inverse distance weighting and spline function were applied to estimate the forest biomass, followed by

the analysis of spatiotemporal changes and driving factors. The research results showed that, among the three interpolation models, the Kriging model showed the highest performance, followed by the inverse distance weighting model, and the spline function showed the lowest performance. From 2007 to 2014, the proportion of forest stands area with high and medium biomass in the study area de-

收稿日期: 2020-09-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(31770679); 江苏省高等学校自然科学基金面上项目(18KJB220010)

作者简介: 钱春花(1982-), 女, 江苏南通人, 博士研究生, 副教授, 主要从事森林资源动态变化监测与分析研究。(E-mail) qch_suai@sina.com

通讯作者: 李明阳, (E-mail) lmy196727@126.com

creased, and the proportion of forest stands area with low biomass increased. Results of the spatial cluster analysis showed that from 2007 to 2014, the forest stands with high forest biomass in the study area were mainly distributed in the north, southeast edge and northeast of Jurong City, while forest stands with low biomass were mainly distributed in the agricultural areas of the central and southern plains. From 2007 to 2014, the forest biomass of most townships in the study area showed a slight decreasing trend, and the spatial aggregation of forest biomass showed a strengthened trend. The main reasons for the spatiotemporal change of forest biomass in Jurong City are the increase of forest disturbance index and the change of forest land type caused by the process of urbanization.

Key words: forest biomass; spatiotemporal changes; driving factors; hilly and mountainous areas in southern Jiangsu

21 世纪以后,中国长江三角洲各大城市郊区纷纷撤县设市,大量人口从经济落后的偏远乡村向城市中心聚集,引起了城市土地利用、土地覆盖方式的巨大变化^[1]。随着城市化、工业化的迅速发展,长三角许多县级市的能源利用方式和结构也发生了重大变化,生态系统向远离自然的方向发展,区域生态系统变得愈加脆弱^[2]。在江苏省苏南丘陵山区,森林作为区域唯一的绿色基础设施,为当地居民提供了水源涵养、水土保持、气候调节、环境净化、生物多样性保护等多种服务功能^[3]。森林具有高效、稳定的自净能力以及持续、完善的生态服务功能,在改善区域人居环境方面发挥着极其重要的作用。

森林生物量的估测是进行森林生态系统物质循环研究的基础。森林生物量的大小与森林生产力水平的高低呈正相关关系,因此森林生物量经常被用作衡量森林生态系统功能的重要参数^[4]。森林资源规划设计调查、林地变化调查包含了与森林生物量密切相关的蓄积量因子^[5]。

1978 年改革开放后,苏南丘陵山区经济得到迅速发展,城市化、工业化进程对区域森林生物量的时空分布格局产生了深远的影响。与东北、南方集体林区相比,对经济发达的长三角地区进行森林生物量时空变化规律的研究较少。本研究拟以江苏省句容市为研究对象,以 2007 年和 2014 年森林资源规划设计调查数据和林地变化调查数据为基础,通过对克里金、反距离权重、样条函数 3 种森林生物量插值模型进行精度比较分析以及生物量时空变化驱动因素分析,探索出一种基于 GIS 和森林资源调查数据的苏南丘陵山区森林地上部分的生物量动态监测方法,以期对长三角经济发达地区的森林经营规划和生态保护提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

句容市地处苏南长江经济带,东连镇江,西接南京,是一座集港口、工业、商贸、旅游为一体的新兴县级市,地理坐标为:东经 118°5′~119°22′,北纬 31°37′~32°12′,土地总面积 1 385 km²。句容市境内山川纵横交错,土地利用类型呈现“五山一水四分田地”的分布格局。除丘陵山区外,句容市境内大部分乡镇海拔相对高度差较小,坡度不大,地势较为平缓。

1995 年 4 月经国务院批准,句容撤县设市,成为国务院最早公布的对外开放地区之一。2018 年 10 月句容入选“全国综合实力百强县市”、“投资潜力百强县市”、“全国新型城镇化质量百强县市”。句容市属于北亚热带季风气候,具有四季分明、气候温和、雨量充沛、阳光充足等气候特征。

由于自然资源条件优越,句容市的森林植被生长良好。到 2009 年底,该市林业用地达 31 656.17 hm²,乔木林蓄积量约 5×10⁵ m³。用材林有杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、马尾松(*Pinus massoniana*)等,经济林有油桐(*Vernicia fordii*)、板栗(*Castanea mollissima*)、青梅(*Vatica mangachapoi* Blanco)、葡萄(*Vitis vinifera*)、柿(*Diospyros kaki*)、桃(*Prunus persica*)等,句容市是江苏省林业生产重点市。句容市宝华山的宝华玉兰(*Magnolia zenii* Cheng),是中国罕见的古老树种,被称为活化石。

1.2 数据来源

本研究所采用的主要数据源有:①2007 年句容市森林资源规划设计调查数据,全市共划分为 11 838 个森林小班,除道路、居民点等社会条件外,每个小班的调查因子还包括地理位置、立地条件、林分生长状况、森林结构等近 60 个调查因子;②句容

市 2014 年林地变化调查数据,全市共划分 14 047 个森林小班,调查因子、技术标准、调查精度与森林资源规划设计调查相同;③来自美国地质调查局(USGS)的 2007 年 8 月 7 日、2014 年 8 月 7 日的 Landsat TM/OLI 数据(<http://glovis.usgs.gov/>),轨道号为 120/038,数据级别为 L1T;④从北京大地图科技有限公司(<http://www.bigemao.com>)购买的研究区空间分辨率为 30 m 的数字高程模型(DEM)以及 2007 年、2014 年居民点和交通干线(国道、省道)的矢量文件;⑤2014 年美国国防气象卫星计划发射的线性扫描系统传感器拍摄的句容市夜间灯数据(DMSP/OLS 数据,简称灯光亮度值)。国内外研究结果表明,夜间的灯光亮度值与区域经济发展水平、区域人口密度呈正相关^[6]。

1.3 数据处理

在坡度、海拔、坡位等地形因子存在较为明显变化的地区,胸径、树高、蓄积量等森林结构参数与森林生长状况、林木立地条件存在着密切联系,同时这些森林参数又受到经济发展水平、人为干扰等因素的影响^[7]。因此,为实现分析森林生物量时空变化及驱动因素的研究目的,有必要从植被生长状况、地形条件、自然和人为干扰因子等方面选择影响森林生物量变化的生态环境因素。

对 2007 年、2014 年 Landsat TM/OLI 遥感图像进行几何精校正、辐射校正、地形校正的基础上,通过提取归一化植被指数(NDVI)、植被覆盖度(FVC)反映植被生长状况,自然及人为干扰因子通过森林干扰指数(DI)反映,地形条件则通过 DEM 中的海拔、坡度来反映。借鉴李苗苗^[8]提出的方法,采用归一化的植被指数来计算植被覆盖度。借鉴 Masek 等^[9]的方法,采用公式(1)来计算森林干扰指数。

$$DI_p = \frac{b_p - \bar{b}}{SD_p} - \frac{g_p - \bar{g}}{SD_g} - \frac{w_p - \bar{w}}{SD_w} \quad (1)$$

式中, DI_p 表示森林干扰指数; \bar{b} 、 \bar{g} 、 \bar{w} 分别表示遥感图像中纯森林训练样本像素的亮度平均值、绿度平均值、湿度平均值; SD_p 、 SD_g 、 SD_w 分别表示遥感图像纯森林训练样本像素亮度、绿度、湿度的变化; g_p 、 w_p 、 b_p 分别表示研究区遥感图像中像素的亮度、绿度、湿度。

以 ArcGIS 软件中的空间分析工具为平台,根据句容市 DEM 生成坡度栅格图层以及 2007 年、2014

年居民点、交通干线矢量文件,分别生成 2007 年、2014 年距居民点距离、距交通干线距离 2 个栅格图层。

1.4 研究方法

1.4.1 蓄积量与生物量的转换 采用蓄积量与生物量转换因子的连续函数法估计句容市森林地上部生物量(简称为森林生物量),其森林生物量估计的异速方程为: $B=a \times V+b$,式中 B 表示每 1 hm^2 森林生物量; V 表示每 1 hm^2 蓄积量; a 和 b 为生物量转换参数^[10]。句容市森林资源规划设计调查和林地变化调查中 12 个优势树种(组)的参数是基于文献[11]的研究成果。

1.4.2 生物量插值及精度评价 由于森林资源规划设计调查和林地变化调查生成的矢量小班数量众多,且覆盖了整个研究区的各种地类,通常采用小班森林生物量数据插值方法估测区域森林生物量。随着地理信息科学的发展,国内外学者相继提出了 10 多种空间数据插值方法。本研究采用克里金、反距离权重、样条函数 3 种模型进行区域森林生物量的空间插值估测。其中,参照刘菲^[12]的研究成果,克里金内插法选用普通克里金的球状模型。

采用国际上模型验证通用的 10 折交叉验证法,将 2007 年和 2014 年的 11 838 个和 14 047 个区划小班数据各分为 10 组,轮流将其中的 9 组用于训练模型,1 组用于验证模型精度。选用相关系数(COR)、均方根误差(RMSE)、相对误差(RAE)3 个指标进行插值模型精度验证^[13]。

1.4.3 异常值空间分析 采用 ArcGIS 空间统计工具箱中的空间聚类和异常分析工具对森林生物量的异常高点(热点)、异常低点(冷点)进行空间分析^[14]。基本原理是:通过计算局部区域的莫兰指数值、统计得分值和显著性对要素进行空间聚类分析,聚类类型分 4 种:高值组(HH)、低值组(LL)、低值围绕高值组(LH)、高值包围低值组(HL)^[15]。本研究仅对比较突出的高值组(HH,热点)、低值组(LL,冷点)进行空间分布及环境因素比较分析。

2 结果与分析

2.1 空间插值模型精度评价

在计算相关系数、均方根误差、相对误差 3 个指标的基础上,采取 10 折交叉验证法对 3 种森林生物量插值模型的精度进行评价。表 1 显示,在句容市

2007 年 3 种森林生物量插值模型中,克里金模型相关系数最高,均方根误差、相对误差最低,插值精度最高,反距离权重模型插值精度次之,样条函数模型的插值精度最低。2014 年 3 种空间插值模型的插值性能排名情况与 2007 年一致。

表 1 2007 年和 2014 年森林生物量插值模型精度比较分析
Table 1 Comparison of the accuracy of forest biomass interpolation models in 2007 and 2014

评价指标	克里金模型		反距离权重模型		样条函数模型	
	2007 年	2014 年	2007 年	2014 年	2007 年	2014 年
相关系数	0.780	0.730	0.685	0.625	0.530	0.315
均方根误差	20.028	22.230	25.127	27.877	32.230	33.503
相对误差	37.974	42.418	46.129	48.639	52.418	58.729

2.2 森林生物量动态变化分析

基于插值精度评价分析,在 3 种插值模型中,插值精度最高的克里金模型被分别用于句容市 2007 年和 2014 年的森林生物量插值估测。图 1 显示,2007 年森林生物量高的林分主要集中在两大区域:(1)北部的宝华镇、下蜀镇以及南林大林场、宝华林场;(2)东进林场、磨盘山林场。2007 年森林生物量中等的林分主要集中在黄梅镇、边城镇,其他乡镇主要以农田、建筑用地为主,森林生物量较低。图 2 显示,2014 年句容市的森林生物量具有与 2007 年基本相似的空间分布格局,即北部及东南部边缘的森林生物量高,黄梅镇、边城镇的森林生物量中等,其他乡镇森林生物量较低。图 1 和图 2 对比分析后发现,2014 年森林生物量空间分布格局虽然与 2007 年基本相似,但森林生物量的峰值明显降低。

以均值-1 个标准差、均值、均值+1 个标准差的划分标准,将研究区的森林生物量分为高(>40 t/hm²)、中(20~40 t/hm²)、低(<20 t/hm²)3 级。使用 ArcGIS 空间分析工具对 2007 年、2014 年森林生物量栅格图层进行重分类运算,在此基础上,分析句容市 2007 年、2014 年森林生物量动态变化情况。表 2 显示,与 2007 年相比,2014 年句容市研究区高森林生物量、中森林生物量的林分面积比例呈下降趋势,占比分别下降 3.50 个百分点和 6.06 个百分点,低森林生物量的林分面积比例呈现增加趋势,占比增加 9.36 个百分点。2007-2014 年,研究区森林面积虽然从34 694.83 hm²增加到35 330.29 hm²,但

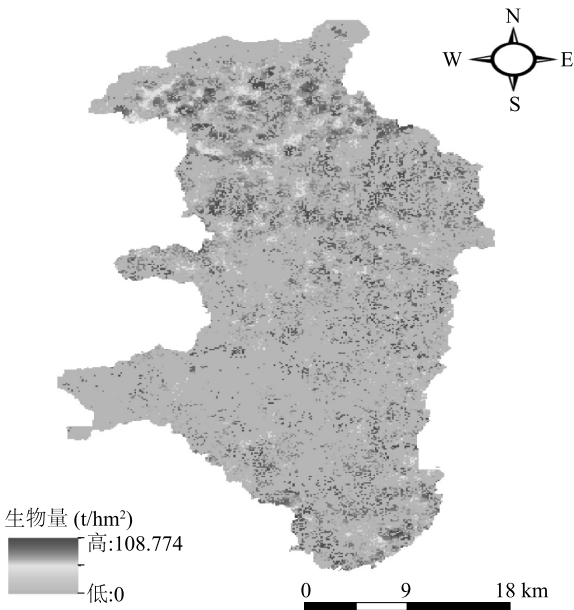


图 1 2007 年森林生物量空间分布图
Fig.1 Distribution map of forest biomass in 2007

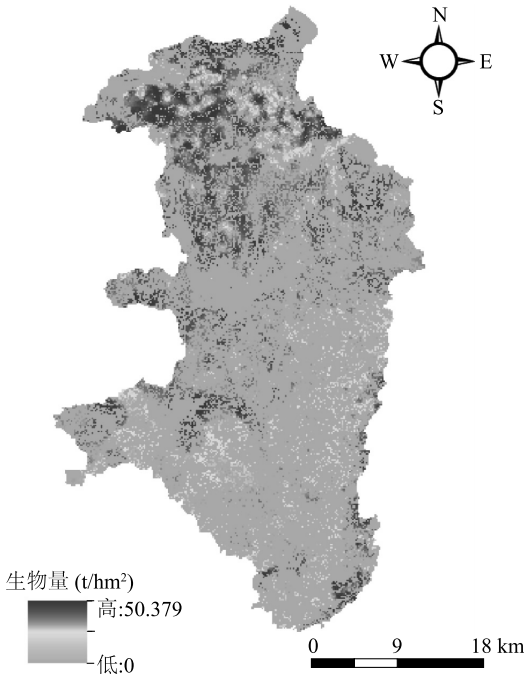


图 2 2014 年森林生物量空间分布图
Fig.2 Distribution map of forest biomass in 2014

单位面积森林生物量却从 37.67 t/hm²下降到 27.22 t/hm²,下降了 10.45 t/hm²,导致研究区森林总生物量从 2007 年的 1 306 954 t 下降到 2014 年的 961 690 t,平均每年下降49 323 t。

表 2 句容市 2007–2014 年森林生物量动态分析

Table 2 Analysis on dynamic changes of forest biomass in Jurong from 2007 to 2014

年份	森林生物量分级占比 (%)			单位面积森林生物量 (t/hm ²)	森林面积 (hm ²)	总森林生物量 (t)
	<20 t/hm ²	20~40 t/hm ²	>40 t/hm ²			
2007 年	65.74	30.57	3.89	37.67	34 694.83	1 306 954
2014 年	75.10	24.51	0.39	27.22	35 330.29	961 690

2.3 冷热点生态环境变化分析

为进一步分析森林生物量冷热点分布的生态环境条件差异,分别从植被生长状况、地形条件、人为干扰因子 3 个方面,选择归一化植被指数、植被覆盖度、海拔、坡度、距居民点距离、距交通干线距离共 6 个环境因子。表 3 显示,2014 年句容市森林高生物量林分(热点)和低生物量林分(冷点)的空间分布规律与 2007 年基本相同:森林高生物量林分主要位于海拔较高,坡度较陡,植被生长较好的北部丘陵山区,这些地区主要集中在交通发达、人口密度较大的宝华、下蜀等乡镇,因而靠近道路和居民点;森林生

物量低的地段主要位于中部和南部平原农业区,这些地段海拔较低,坡度较平缓,植被生长较差,这些平原乡镇的交通网络和人口密度均较低,森林生物量低的地段往往远离道路和居民点。值得注意的是,与 2007 年相比,2014 年林分热点与冷点距交通干线距离的差异有所减小,距居民点距离进一步扩大。原因在于,2007–2014 年,在村村通工程驱动下,平原农区乡镇的交通建设有了较大的发展,与丘陵区乡镇相比,交通状况的差距进一步减小;距居民点距离的差距扩大,则与平原农区撤乡并镇、农村拆迁等引发的农村大量居民点消失有关。

表 3 2007–2014 年森林生物量冷热点环境因子对比分析

Table 3 Comparison of cold/hot spots of environmental factors of forest biomass from 2007 to 2014

年份	类型	地形条件		植被生长状况		人为干扰因子	
		海拔 (m)	坡度 (°)	NDVI	FVC	距交通干线距离 (m)	距居民点距离 (m)
2007 年	热点	71.496	5.732	0.327	0.546	2 275.431	1 051.173
	冷点	45.945	2.364	0.302	0.528	5 201.989	1 239.152
2014 年	热点	68.241	5.649	0.359	0.548	2 132.442	619.847
	冷点	34.389	2.299	0.320	0.337	2 770.253	1 063.022

NDVI:归一化植被指数;FVC:植被覆盖度。

2.4 乡镇尺度森林生物量变化幅度分析

分别将 2014 年、2007 年森林生物量栅格图层导入 ArcGIS 10.2 中,采用栅格算数运算。在此基础上,逐像元计算每个乡镇(包括林场、农场和茶园)森林生物量的平均变化值。在提取每个像元变化值的前提下,按照均值-1 个标准差、均值、均值+1 个标准差的划分标准,将运算后的栅格图层进行重分类,分为大幅下降、小幅下降、基本不变、显著增加 4 个等级,制作出 2007–2014 年句容市以乡镇为单位的森林生物量变化图。图 3 显示,2007–2014 年,句容市森林生物量小幅下降的区域占比最大(70.77%);基本不变的区域占 14.91%,主要集中在桥头农场、郭庄镇、宝华镇北部;森林生物量显著增加的区域主要集中在后白镇,占 11.43%;大幅下降的区域主要

集中在南林大林场、句容林场 2 大林场以及宝华镇南部。

2.5 森林生物量格局变化驱动因素分析

本文利用莫兰指数值、统计得分值分析森林生物量的空间格局,利用平均森林干扰指数、平均灯光亮度值分析森林生物量的时空变化驱动因素。表 4 显示,2007–2014 年表示森林生物量空间自相关程度的莫兰指数值从 0.12 增加到 0.22,测量森林生物量标准偏差的统计得分值从 14.96 增加到 22.09,这表明句容市森林生物量空间格局中的聚集程度呈增强趋势。结合图 1~图 3 可以看出,2007–2014 年,研究区森林生物量高的林分面积缩小,空间分布范围集中至研究区北部(宝华镇、下蜀镇)、东南部边缘地带(东进林场、磨盘山林场)、东北部

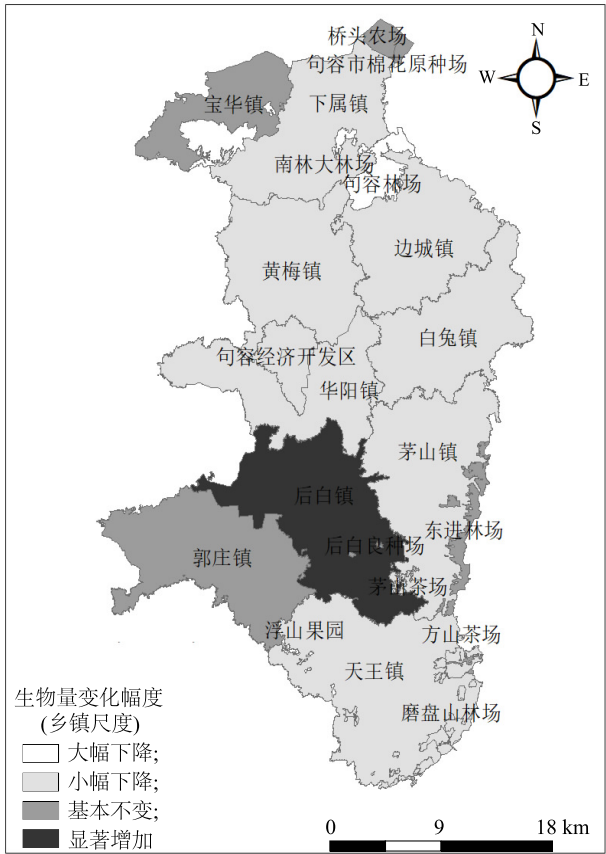


图3 2007-2014年森林生物量变化图
Fig.3 Spatial change map of forest biomass from 2007 to 2014

地区(句容林场、南林大林场);而森林生物量低的林分则集中分布在研究区中南部的平原农区。从表4可以看出,2007-2014年,研究区的平均森林干扰指数从0.12增加至0.47,增加了0.35,平均灯光亮度值从3.86增加至10.02,增加了6.16。

表4 2007-2014年森林生物量空间格局变化及驱动因素分析
Table 4 Change and driving factors of spatial pattern of forest biomass from 2007 to 2014

年份	空间格局		驱动因素	
	莫兰指数值	统计得分值	平均森林干扰指数	平均灯光亮度值
2007年	0.12	14.96	0.12	3.86
2014年	0.22	22.09	0.47	10.02

3 讨论

本研究结果表明,引发研究区森林生物量时空变化的原因主要是森林干扰指数的增加,经济发展引发的城镇化进程及其引起的林地变更、森林病虫害

扩散等导致森林质量下降,这会造成句容市森林单位面积生物量下降,高生物量的森林面积比例降低,中、低生物量的森林面积比例上升。在空间分布格局上,森林生物量空间分布的聚集程度有所增加。

2007年句容市森林生物量为36.67 t/hm²,2014年下降至27.22 t/hm²。通过线性回归模型估测得到句容市2009年的森林生物量为33.97 t/hm²^[16]。国内森林生物量研究结果显示,2009年全国平均森林生物量为76.10 t/hm²,湖南省为36.98 t/hm²,安徽省为42.05 t/hm²,广东省为46.22 t/hm²,江西省为50.76 t/hm²^[17-20]。数据对比分析结果表明,句容市森林生物量不仅明显低于同期全国平均水平,还低于南方许多省份。

句容市平均森林生物量较低的主要原因是句容市森林树种单一,经营管理粗放,造成森林病虫害大面积发生,森林单位面积蓄积量较低。句容市作为国务院公布的中国综合实力百强县(市)之一的经济对外开放区域,城镇化背景下经济迅猛发展引发的林地占用和林地生产力退化等问题也对森林质量产生了负面影响。加强林地保护力度,调整区域林种和树种结构,增加中幼林抚育面积,进而精准提升森林经营管理水平,是增加区域森林生物量,增强区域森林综合生态服务功能的必由之路^[21-22]。

参考文献:

[1] 王洋,王少剑,秦静.中国城市土地城市化水平与进程的空间评价[J].地理研究,2014,33(12):2228-2238.
[2] PAZUR R, FERANEC J, STYCH P, et al. Changes of urbanized landscape identified and assessed by the urban atlas data: Case study of Prague and Bratislava[J]. Land Use Policy, 2017, 61: 135-146.
[3] 傅伯杰,刘世梁,马克明.生态系统综合评价的内容与方法[J].生态学报,2001,21(11):1885-1892.
[4] 蒋云姣,胡曼,李明阳,等.县域尺度森林地上生物量遥感估测方法研究[J].西南林业大学学报,2015,35(6):53-59.
[5] 时宇,李明阳,杨玉峰,等.南京紫金山风景林碳密度空间动态变化分析[J].中南林业科技大学学报,2014,34(11):145-149.
[6] SUTTON P. Modeling population density with night-time satellite imagery and GIS[J]. Computers Environment & Urban Systems, 1997, 21(3/4):227-244.
[7] 徐萍,徐天蜀.云南高黎贡山自然保护区森林碳储量估测方法的研究[J].林业资源管理,2008(1):69-73.
[8] 李苗苗.植被覆盖度的遥感估测[D].北京:中国科学院遥感应用研究所,2003.

- [9] MASEK J G, HUANG C, WOLFE R, et al. North American forest disturbance mapped from a decadal Landsat record [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112 (6): 2914-2926.
- [10] 张茂震, 王广兴, 刘安兴. 基于森林资源连续清查资料估算的浙江省森林生物量及生产力 [J]. *林业科学*, 2009, 45 (9): 13-17.
- [11] 杨加猛. 江苏省森林碳储量的影响因素研究: 基于社会经济视角 [J]. *生态经济*, 2017, 33 (8): 201-204.
- [12] 刘 菲. 森林资源抽样调查缺失数据填充方法研究 [D]. 南京: 南京林业大学, 2019.
- [13] 陈尔学, 李增元, 武红敢, 等. 基于 k-NN 和 Landsat 数据的小面积统计单元森林蓄积估测方法 [J]. *林业科学研究*, 2008, 21 (6): 745-750.
- [14] GETIS A, ORD J K. The analysis of spatial association by use of distance statistics [J]. *Geographical Analysis*, 1992, 24 (3): 189-206.
- [15] BESAG J, NEWELL J. The detection of clusters in rare diseases [J]. *Journal of the Royal Statistical Society*, 1991, 154 (1): 143-155.
- [16] 荣 媛. 基于情景分析与多准则决策的森林经营规划方法研究 [D]. 南京: 南京林业大学, 2018.
- [17] 安天宇. 湖南省森林碳储量的研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2017.
- [18] 余 超, 王 斌, 刘 华, 等. 1994-2013 年安徽省森林生物量与生产力动态变化分析 [J]. *长江流域资源与环境*, 2015, 24 (增刊 1): 53-61.
- [19] 季碧勇, 陶吉兴, 张国江, 等. 高精度保证下的浙江省森林植被生物量评估 [J]. *浙江农林大学学报*, 2012, 29 (3): 328-334.
- [20] 刘 双, 阮宏华. 基于地统计学的广东省和广西省森林生物量和 NPP 空间格局分析 [J]. *生态学杂志*, 2013, 32 (9): 2502-2509.
- [21] 孙 敏, 周春国. 小班尺度森林资源质量评价——以南京市老山林场为例 [J]. *江苏农业科学*, 2019, 47 (2): 101-104.
- [22] 吴 敏, 韦存瑞, 廖鋈章, 等. 黄果厚壳桂人工林生长规律与林分更新特征分析 [J]. *南方农业学报*, 2020, 51 (9): 2199-2204.

(责任编辑: 王 妮)