

上海城市森林叶生物量遥感监测

王紫君¹ 申广荣^{1,3*} 朱 贇¹ 韩玉洁⁴ 刘春江^{2,3} 薛春燕⁴

(¹上海交通大学农业与生物学院, 低碳农业研究中心, 上海 200240; ²国家林业局上海城市森林生态系统国家定位观测研究站, 上海 200240; ³农业部都市农业(南方)重点实验室, 上海 200240; ⁴上海林业总站, 上海 200072)

摘要 区域尺度城市森林叶生物量的估测对了解植物长势、碳同化过程和森林生态系统具有显著作用。本研究基于2011年6月—2012年6月样地实测叶生物量数据以及同期遥感信息,采用回归分析与空间分析相结合的方法,估测了上海城市森林叶生物量的空间分布,探讨了区域尺度森林叶生物量的遥感估测方法。结果表明:(1)上海城市森林叶生物量密度总体呈现出中心城区(静安区、黄浦区等)高,郊区县(松江区、金山区等)低的空间分布特征,其生物量密度分别介于4~10和1~6 t·hm⁻²。(2)研究区森林叶的平均生物量密度和生物量总量分别为2.55 t·hm⁻²和300.81×10³ t,郊区县与中心城区森林叶生物量分别占总量的94.16%和5.84%。在所有区县中,以林地面积最大的崇明县和浦东新区具有最高的森林叶生物量值,两者总量达到研究区总量的34.82%;以林地面积最小的静安区为最低,仅占总量的0.1%。(3)通过残差计算并引入空间分析的森林叶生物量遥感估算方法,其标准误差RMSE、平均绝对误差MAE、平均相对误差MRE较回归模型分别降低了58.46%、48.76%和48.71%,较空间插值的结果分别降低了47.74%、38%和49.24%。结合空间分析和回归分析的城市森林叶生物量研究方法为快速、便捷、客观、高效的区域生物量遥感监测提供了可能。

关键词 生物量估测; 遥感信息; 回归分析; 反距离加权插值; 残差

Remote-sensing monitoring of urban forest leaf biomass in Shanghai. WANG Zi-Jun¹, SHEN Guang-Rong^{1,3*}, ZHU Yun¹, HAN Yu-Jie⁴, LIU Chun-Jiang^{2,3}, XUE Chun-Yan⁴ (¹Centre for Low Carbon Agriculture, School of Agriculture and Biology Research, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; ²Shanghai Urban Forest Ecosystem Research Station of National Positioning and Observation, State Forestry Administration, Shanghai 200240, China; ³Key Laboratory of Urban Agriculture (South), Ministry of Agriculture, Shanghai 200240, China; ⁴Shanghai Forestry Station, Shanghai 200072, China).

Abstract: Estimation of urban forest leaf biomass at regional scale plays a significant role in understanding plant growth, carbon assimilation processes and forest ecosystems. In this study, an urban forest leaf biomass estimation method which combined regression analysis and spatial analysis in Shanghai, China was explored. Based on the measured data of leaf biomass from June 2011 to June 2012 and a variety of remote sensing data, an analysis of the distribution characteristics of urban forest leaf biomass was also carried out. The results showed that (1) The higher leaf biomass densities concentrated mainly in the urban areas like Jing'an District and the Huangpu District, while suburban localities like Songjiang District and Jinshan District presented lower biomass densities, which were around 4 to 10 and 1 to 6 t·hm⁻², respectively. (2) The density and the amount of urban forest leaf biomass in Shanghai were 2.55 t·hm⁻² and 300.81×10³ t, respectively. The overall leaf biomass was also found to be distributed mainly in the suburban areas with a fraction of 94.16%, whereas the urban areas shared a little fraction of 5.84%. Among the administrative districts of Shanghai, Chongming County and Pudong New District owned

中国科学院战略性先导科技专项专题(XDA0505020401)、上海市农委(沪农科攻2010-6-4)和上海交大农工交叉项目(Agri-X2015004)资助。

收稿日期: 2015-09-06 接受日期: 2016-02-26

* 通讯作者 E-mail: sgrong@sjtu.edu.cn

the highest and second highest leaf biomass ,altogether reaching 34.82% of the total ,however ,Jing'an District occupied only 0.11% ,which was in accordance with its area proportion. (3) The root-mean-square error (*RMSE*) , mean absolute error (*MAE*) and mean relative error (*MRE*) of the regression-IDW model for urban forest leaf biomass in this study were respectively 0.81% ,0.62% and 29.33% ,which were decreased by 58.46% ,48.76% and 48.71% respectively than those of the original simple regression model and by 47.74% ,38% and 49.24% respectively than those of the spatial analysis method. The combination of spatial analysis and regression analysis provided a quick ,convenient and efficient method for estimating the urban forest leaf biomass and monitoring upscaled forest inventory data at a regional scale.

Key words: biomass estimation; remote sensing information; regression analysis; inverse distance weighting (IDW); residual.

叶作为森林树木最基本的能量获取器官,在时间和空间上的生存状态与分布特征是树木碳获取策略中的核心元素(Kikuzawa,1995),对理解森林碳同化、水分关系和能量平衡有重要的作用(Ackerly *et al.* 2002)。作为森林树木进行光合作用和蒸腾作用的主要器官(景侠等,2005),叶是树木发挥城市森林生态系统中碳氧平衡、能量传递作用的关键因素,是推动城市生态平衡和展现森林生态效益的重要保障(张丽杰等,2009)。在大气污染修复过程中,森林树木的叶对调节城市环境气候、净化空气、吸滞粉尘和吸收与同化大气污染物等方面均有巨大的贡献,为营造宜居城市起着至关重要的推动作用(连喜,2002; Nowak *et al.* 2013; 张志丹等,2014; 骆永明等,2015; 王兵等,2015)。约占森林植株总生物量5%的叶生物量与树木的长势、林龄、生长特征等紧密相关(罗天祥,1996; 姚迎九等,2003; 肖复明等,2007; 王哲等,2012),是森林生态系统在长期生产与代谢过程中积累的结果(程秋生,2013),其空间分布特征能有效地反映森林随生态环境变化所形成的不同生长趋势与分布规律,决定着森林生态系统运作的功能(Chown *et al.* ,2004; Diaz *et al.* ,2004; Wright *et al.* 2004)。城市森林叶生物量及其空间分布格局的精准、快速、高效监测与估算,不仅是了解森林碳循环和能量流动的基础,还是衡量城市森林发挥生态调节、环境保护和资源修复作用的依据,同时也是研究森林覆盖状况与城市生态建设的基础。

对于城市森林叶生物量的估测,基于样地清查法和模型模拟法进行单一树种或小尺度的研究仍占主要地位(王哲等,2014)。比如通过对样地树木的树高、胸径等易测因子进行每木检尺,采用平均标准木法(柳新红等,2009)或径阶标准木法选取标准木,结合“分层切割法”或“标准枝法”测定叶鲜重,

并取样烘干获得干物质质量,进而建立相对生长模型估算叶的生物量总量(Sarker *et al.* ,2013; 王哲等,2014);或根据已有的相对生长经验模型(罗天祥,1996; 肖复明等,2007; Camacho *et al.* 2011; Kumar *et al.* 2014);或基于森林清查资料,应用材积源生物量法和生物量与蓄积量模型(方精云等,1996)进行森林叶部分的生物量监测(魏文俊等,2008)等。采用3S技术或空间分析的方法通过森林覆盖的调查进而估算森林叶生物量的研究还鲜见报道。因此,本文探讨基于遥感和GIS以及空间分析技术的区域尺度城市森林叶生物量监测研究的方法,为高效快速估测森林及其叶生物量,进而为实现城市森林的合理规划经营提供科学参考。

本研究以上海城市森林为对象,基于样地调查实测数据,结合遥感信息和空间分析对城市森林叶的生物量及其空间分布特征进行估测分析,通过比较回归统计法、空间分析法,以及二者相结合的回归反距离分析法的估测结果,探讨上海城市森林叶生物量的有效监测手段。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

上海位于太平洋西岸,地理坐标为120°52' E—122°12' E, 30°40' N—31°53' N,是中国南北弧形海岸线的中点,长江三角洲东南缘。年平均气温15.8°、年降雨量1100 mm、平均海拔4 m。土壤以渍潜型和淋溶-淀积型水成和半水成系列土壤为主(沈烈英,2008)。土地总面积为63.4万hm²,森林覆盖率为14%(2014年)。上海属亚热带常绿落叶阔叶林带,常绿阔叶与落叶阔叶林并存(高峻,1997; 王哲,2012; 王美霞等,2013)。上海城市森林分布特点为郊区县森林面积大、中心城区面积小(2009年城

区森林面积只占总林地面积的4%) ,人工幼龄林占比重大(85%) ,且以块状(生态片林、森林公园)和带状分布(环城绿带、黄浦江上游水源涵养林)为主(王哲 2012)。这种个体斑块面积小、分散度高、分布不匀,普遍为稀疏种植的林地或小面积的人工绿化群落的上海城市森林具有与自然森林明显不同的特点(沈烈英 2008),为基于遥感信息生物量估测增加了较多复杂性(徐飞等 2010)。

1.2 数据采样调查与分析

2011年6月—2012年6月,依据土壤、人工林分布和经营状况等特点,首先将上海林地进行类型的划分,选出具有代表性、易到达、生长良好、林分密度均匀的单一林分样地,涵盖了上海主要林分类型(表1)。其次对每种林分设置固定样地并进行调查,本研究共设77个固定林分样地(图1),样地大小为20 m × 30 m 或 20 m × 50 m,其地理位置由GPS仪实测获得。

根据样地林分的生长情况,进行了胸径、树高、活枝下高、冠幅的调查和群落学调查。采用“径阶标准木法”,每2 cm 为径阶,统计各林分内各径阶株数,在各径阶内选取1~2株作为标准木,一般每个树种选择5~8株标准木。对每株标准木的叶部分测定鲜重,并取鲜样约500 g 带回实验室,在80 °C 的条件下烘干称重,获得干物质重量。以胸径作为自变量、叶部分生物量为因变量,构建了主要树种叶的生物量方程,其决定系数均>0.9($P < 0.01$) (王哲 2012)。根据各树种叶的生物量方程估算得到各样地叶的生物量。

上海城市森林叶生物量回归模型的构建,是基

表1 不同林分样地信息

Table 1 Information of sampling plots of different forest types

林分类型	样地数 (个)	平均胸径 (cm)	平均树高 (m)	林龄 (a)
香樟 <i>Cinnamomum camphora</i>	15	7.8~21	5.4~13.6	12~18
水杉 <i>Metasequoia glyptostroboides</i>	18	8.5~28.7	8.5~28.54	11~50
枫香 <i>Liquidambar formosana</i>	1	12.8	10.3	30
池杉 <i>Taxodium ascendens</i>	4	9.4~17.3	8~14.6	12~30
女贞 <i>Ligustrum lucidum</i>	3	10~10.9	7.7~8.6	12
杜英 <i>Elaeocarpus sylvestri</i>	6	10.7~13.6	6.6~8.4	11
广玉兰 <i>Magnolia grandiflora</i>	6	7.5~10.2	4.4~5.7	8~12
毛竹 <i>Phyllostachys heterocycla</i>	3	8~9.3	11.2~11.8	2
杨树 <i>Populus euramericana</i>	3	14.9~17.7	11.6~14.5	12
阔叶混交林	18	6.7~17.4	4.1~17.2	10~15
总计	77	5.7~28.7	2.6~28.4	2~50

于样地林分类型及其空间分布,选择调查样地中的2/3 实测数据作为建模集,1/3 作为验证集(图1)。

1.3 遥感数据的获取与分析处理

基于样地实测时间,并考虑遥感数据的空间分辨率、时间分辨率及数据的可获得性,本研究选用了2011年9月1日,空间分辨率为30 m 的两景 Landsat 陆地卫星 ETM+ 影像(条带号/行编号:118/38 和 118/39)为信息源(<http://www.gscloud.cn/>)。经过一系列条带修复、几何校正、辐射校正和大气校正等预处理,提取了各样地的6个波段反射率值(分别为:TM1、TM2、TM3、TM4、TM5、TM7; TM6 由于分辨率低,因此未使用)。为了获得更合适的估测模型,计算分析了归一化植被指数 NDVI、差值植被指数 DVI、比值植被指数 RVI 以及土壤调整植被指数 SAVI 与修改型土壤调整植被指数 MSAVI(Vicente-Serrano *et al.*, 2008; 张慧芳, 2008; Gómez *et al.*, 2014) 这5种植被指数将与6个波段反射率值一同作为备选的辅助变量。通过相关性分析筛选出与实测生物量值在双侧置信区间为95% 水平上的相关显著变量作为反演模型的最佳辅助变量。

另外,结合实测的不同林分光谱信息(采用 AvaField-2 便携式高光谱地物波谱仪)以及已有历史数据和森林分布专题图等相关辅助信息,采用监督分类法对所获得的遥感图像进行分类、解译获得研究区森林覆盖信息。

1.4 基于回归反距离插值法的叶生物量估测

首先,利用基于相关分析选定的最佳辅助变量,通过回归分析建立最优的生物量回归模型。其次,计算各样地实测值与回归模型估测值间的残差值。然后,利用空间插值方法对估测和实测值的残差值进行反距离加权插值(Burrough *et al.*, 1998)。最后,将回归估测的趋势项与残差的反距离加权估计值相加,获得基于遥感和空间分析的区域森林叶生物量的估测模型以及生物量的最终估测值(简称为“回归反距离插值法(regression-IDW)”)。

采用52个样地实测数据建立森林叶生物量最优回归模型。以最佳辅助变量 TM5 为自变量(X)的城市森林叶的生物量(Y) 遥感估测模型为 $Y = 78.865 \exp(-0.047X)$, 其 R^2 、Adj- R^2 分别为 0.35 与 0.33; 进一步通过残差计算和空间分析,得到了基于回归反距离插值法的上海城市森林叶生物量分布状况(图2a)。

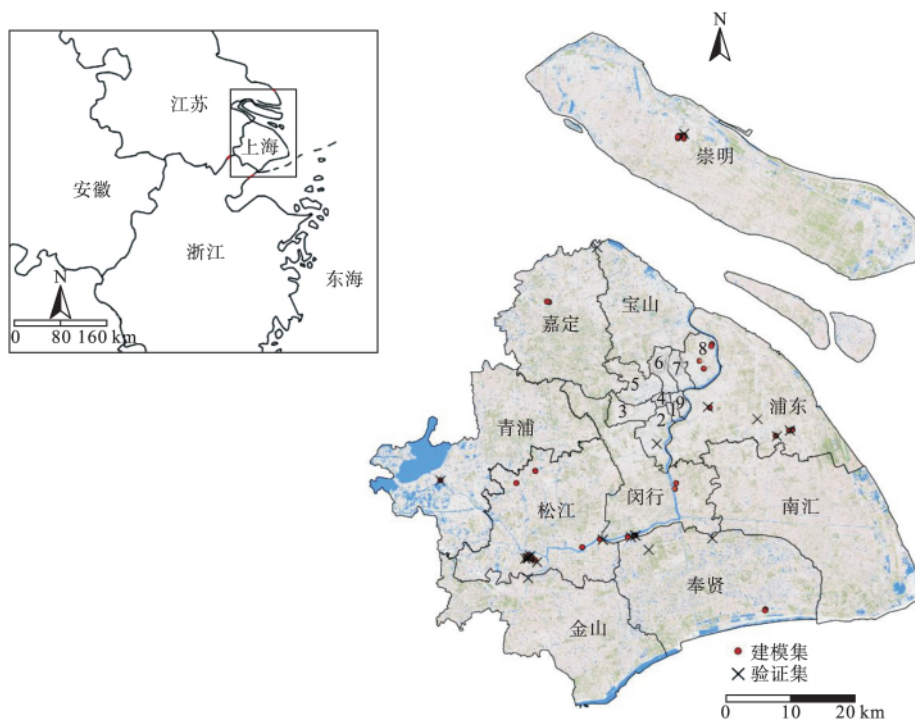


图1 上海地理位置及研究区样地分布示意图

Fig.1 Location of Shanghai and the distribution map of sample plots

图中的1~9为上海中心城区,分别代表卢湾、徐汇、长宁、静安、普陀、闸北、虹口、杨浦和黄浦区。

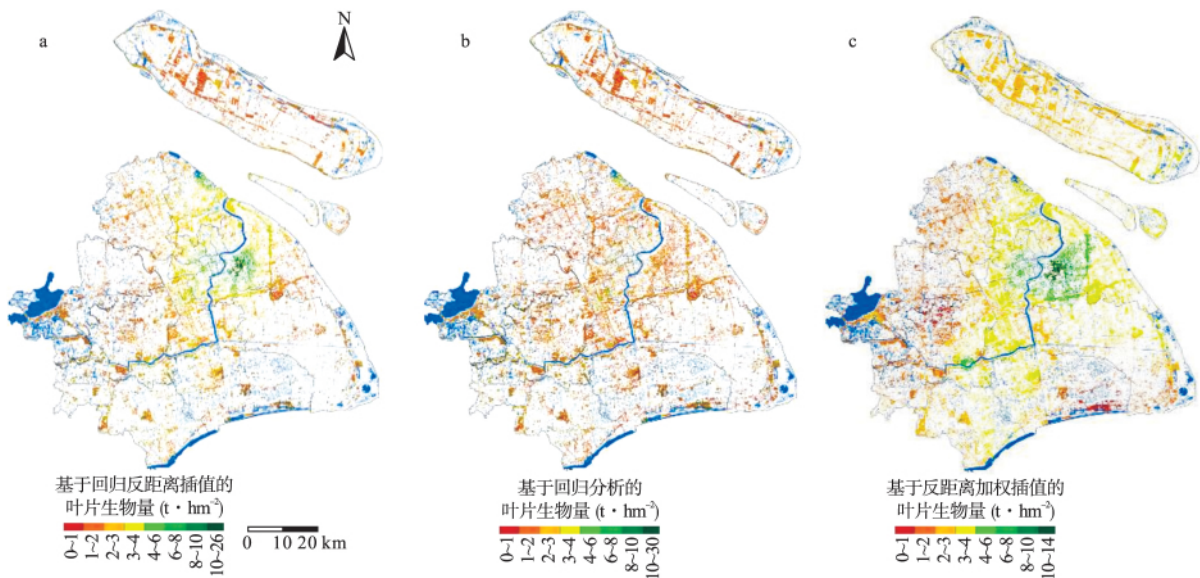


图2 上海城市森林叶片生物量的空间分布示意图

Fig.2 Spatial distribution of urban forest leaf biomass in Shanghai obtained by regression-IDW (a) , regression analysis (b) , and IDW (c)

a. 回归反距离插值; b. 回归分析; c. 反距离加权插值。

1.5 模型的精度评价

为分析验证城市森林叶的回归反距离插值(回归反距离插值模型)估测方法,本研究对结合遥感

信息建立回归模型(传统的回归模型)的回归统计法、以及基于样地实测值的空间插值法(反距离插值模型)进行了森林叶生物量的估测与比较。同

时,通过对3类模型验证集进行估测值的提取,对比分析了3类模型估测值与实测数据间的标准误差 $RMSE$ (Lloyd, 2010)、平均相对误差 MRE (李启权等, 2013)、平均绝对误差 MAE (Pereira *et al.*, 2010),进而对利用回归反距离插值法的城市森林叶生物量模型进行了评价。

1.6 森林叶生物量总量的估算

基于遥感解译获得上海森林覆盖分布图,通过对森林相应林信息进行提取,获得了上海城市森林叶生物量的空间分布图(图2),并计算分析了研究区有林地部分叶生物量总量与生物量密度。

2 结果与分析

2.1 上海城市森林叶生物量空间分布特征

基于回归反距离插值的上海城市森林叶生物量密度主要集中在 $1 \sim 10 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (图2a),中心城区森林叶生物量密度普遍高于郊区县,其平均生物量密度分别为 3.4 和 $2.52 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。上海城市森林叶生物量密度较高 ($4 \sim 10 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) 区域主要位于静安区、黄浦区、卢湾区等中心城区;生物量密度相对较低 ($1 \sim 6 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) 的区域主要位于金山区、青浦区、崇明县等郊区县。并且,在郊区县中,离中心城区距离越近的区域其森林叶生物量密度也越高,例如:宝山区南部、闵行区东部等。基于回归反距离插值法的森林叶生物量的整体分布特征与张庆费等(2001)对上海各区县公园分布及其面积与密度的研究结果、史利江(2009)对上海林地面积变化与空间动态分布情况的论述基本吻合。

2.2 上海城市森林叶生物量总量

结合回归反距离插值法估测与上海城市森林覆

盖遥感图像的解译结果,计算得到了研究区森林叶平均生物量密度和生物量总量的估测结果,分别为 $2.55 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $300.81 \times 10^3 \text{ t}$ (图3)。

在所有区县中,郊区县与中心城区森林叶生物量分别占总量的 94.16% 和 5.84% 。其中,以林地面积最大的崇明县和浦东新区(分别占总林地面积的 26.36% 和 19.24%) 具有最高的森林叶生物量值,两者的生物量总量占研究区总量的 34.82% ,分别为 14.51% 和 20.31% ;在所有区县中,以林地面积最小的静安区(占总林地面积的 0.07%) 森林叶生物量值最低,仅占总量的 0.1% 。此外,各郊区县森林叶生物量均远高于中心城区中的各区。

2.3 模型的精度评价

基于25个验证点的估测值与实测值,采用 $RMSE$ 、 MAE 和 MRE 对本研究的回归反距离插值模型与回归模型和反距离插值模型的估测结果进行精度以及优越性评价。3种指标数值越小,估测精度就越高,模型的拟合值与真实值也越接近。

模型的精度分析结果显示(表2),结合回归分析和残差空间分析的回归反距离插值法(regression-IDW)明显优于仅基于样地实测值进行的反距离加权插值法(IDW)以及基于样地实测值和遥感相关辅助变量建立模型的回归分析法(regression analysis)。从验证点的估测精度来看,相比回归模型,回归反距离插值模型的 $RMSE$ 、 MAE 、 MRE 分别降低了 58.46% 、 48.76% 和 48.71% ;相比反距离加权插值模型,回归反距离插值模型的 $RMSE$ 、 MAE 、 MRE 分别降低了 47.74% 、 38% 和 49.24% 。与回归模型相比,反距离加权插值模型的 $RMSE$ 、 MAE 分别降低了 20.51% 和 17.36% , MRE 仅升高 1.03% 。

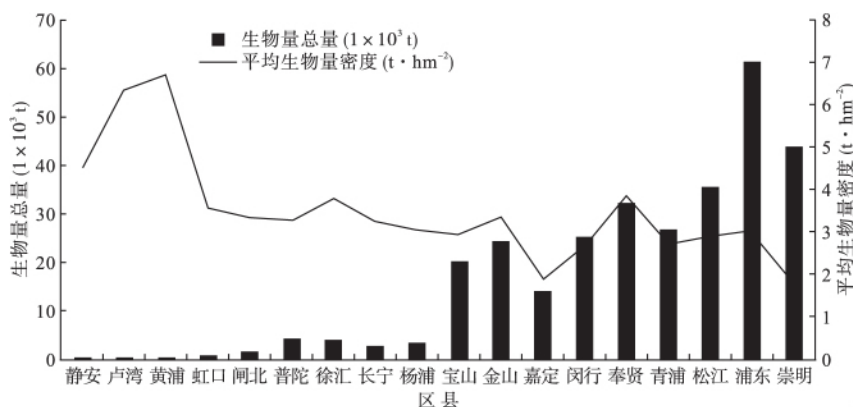


图3 基于回归反距离插值法的上海各区县城市森林叶的平均生物量密度和生物量总量

Fig.3 Mean and total values of urban forest leaf biomass in different districts and counties of Shanghai based on regression-IDW

表 2 上海城市森林叶的生物量估测结果的精度评价
Table 2 Evaluation results of urban forest leaf biomass from validation sites in Shanghai

模型	RMSE	MAE	MRE(%)
回归分析	1.95	1.21	57.19
反距离加权插值	1.55	1	57.78
回归反距离插值	0.81	0.62	29.33

另外,比较不同方法生成的上海森林叶生物量分布图可看出(图 2),基于回归分析的森林叶生物量空间分布情况(图 2b)较为均匀,中心城区和郊区总体区别不大;基于反距离加权插值的生物量估测结果(图 2c),其空间分布呈现出实测值较高区域附近的生物量估测结果较高、实测值较低区域附近的生物量估测结果较低分布特征。研究表明,单一利用遥感信息进行回归建模的结果会得到“平滑”,导致空间估测结果不精准;而利用实测值进行简单的空间插值法,其结果直接受到采样点数值、数量及距离的影响,忽视了城市森林的复杂性及其内在的不确定性因素(Burrough *et al.*, 1998)。此外,基于回归反距离插值模型的森林叶生物量密度主要范围在 $1 \sim 10 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 平均值为 $2.55 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 标准差为 3.51, 相比基于传统回归模型的估测值(范围在 $1 \sim 6 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 平均值 $1.98 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 标准差 2.25) 以及基于实测数据简单空间插值的估测值(范围在 $1 \sim 14 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 平均值 $2.74 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 标准差 3.46), 更接近样地实测结果(范围在 $0.4 \sim 12.75 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 平均值 $2.57 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 标准差 3.56)。

由此可见,3 种模型中估测效果最好的是回归反距离插值法,反距离插值法其次,而回归分析法则不理想。本研究所用的基于回归分析并结合残差空间插值的回归反距离插值法,不仅充分利用遥感信息,使森林叶的调查实测采样点信息提升为区域尺度的信息,而且考虑森林分布的空间差异,借助空间分析技术,通过残差的计算与分析对回归估测的结果进行有效的信息补充,进而提高了估测精度。

3 结论与讨论

本研究基于上海城市森林分布特征和实地调查采样数据以及遥感信息,利用回归分析建立了森林叶生物量的遥感回归模型。在对估测残差进行空间分析的基础上,通过空间加法运算实现了研究区城市森林叶生物量回归反距离插值的遥感估测。

(1) 上海城市森林叶的平均生物量密度空间上

呈现出中心城区高,郊区县低的分布格局,其平均生物量密度分别为 3.4 和 $2.52 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。在所有区县中,黄浦区具有最高的森林叶生物量密度,崇明县最低,分别为 6.7 和 $1.78 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。在森林叶生物量总量的研究过程中,以林地面积最大的崇明县、浦东新区拥有较高的森林叶生物量而自身占地面积与林地面积最小的静安区叶生物量最低,上海城市森林叶生物量值总体呈现出郊区县明显高于中心城区的分布特点。

(2) 上海城市森林叶生物量密度总体呈现出中心城区较高,郊区县较低的分布特征与上海特殊的自然情况、城市建设与人口分布等紧密相关。就自然情况而言,中心城区具有较多林龄长、密度大的城市公园与公益涵养林,林木的栽植时间长、成长空间大、发育状况好,且大径阶树木所占比例高,因此,具有较高的森林叶生物量空间分布。而如青浦、松江、崇明等郊区县,其林地普遍为近年原有农业与工业用地转化而成的(王瑞静等, 2011),尚处于幼龄林快速生长阶段。并且,由于人口密度的提高,中心城区生态休憩空间严重缺乏,大量居住人口向郊区县进行转移,促使郊区县内进行了大量斑块面积小、分散程度高、生态功能多的小面积人工带状绿化群落或区域生态块状林地的建设(沈烈英, 2008),森林面积持续上升。但由于普遍为 2003 年后才进行造林的,植被林龄短、密度小,叶的发育情况较慢,因此郊区县森林叶生物量密度总体低于中心城区。

另外,在中心城区,虽然林木栽植时间长、生长速度快、叶生物量密度高,但随着城市的综合快速发展,土地的过度开发与利用,建筑用地占据了较大的土地面积,有限的中心城区范围内森林面积明显小于郊县区的森林面积(分别占总量的 3.82% 和 96.18% (王哲, 2012))。因而,中心城区森林叶生物量仅占总量的 5.84% , 郊区县森林叶生物量占到 94.16% 。

(3) 上海属于亚热带常绿落叶阔叶林带、常绿阔叶与落叶阔叶林并存(高峻, 1997; 王哲, 2012; 王美霞等, 2013)。研究表明,叶生物量为乔木立木生物量的 5% (柳新红等, 2009; 王哲等, 2012),通过将森林生物量与森林叶生物量进行换算,进而对本研究的上海城市森林叶生物量估测结果与已有的上海城市森林生物量研究结果进行比较。对赵敏(2010)估测的 2012 年上海城市森林生物量(约为 $5280 \times 10^3 \text{ t}$) 结果进行换算,其森林叶的生物量为

$264 \times 10^3 \text{ t}$, 与本研究的 $300.81 \times 10^3 \text{ t}$ 基本一致。另外, 根据王瑞静(2011)估算的崇明县森林植被的生物量总量 $982 \times 10^3 \text{ t}$, 得到崇明森林叶生物量为 $49.1 \times 10^3 \text{ t}$, 与本文 $43.65 \times 10^3 \text{ t}$ 的估测结果基本一致。因此, 本研究估算的上海城市森林叶生物量结果与已有研究结果具有较好的一致性, 研究结果具有较高的可接受性。

(4) 上海城市森林主要以块状和带状分布的人工幼龄林为主, 区域栽植时间较为统一, 且普遍选用林分、林龄、长势相近的纯林或混交林, 因而, 区域空间内具有相似的林木生长特点(沈烈英 2008)。并且在城市森林系统的建设中, 为了满足系统功能得到充分的发挥, 林分结构会构成统一、合理的整体, 因此森林各区域间的相互作用较协调、其空间自相关性也较强(沈烈英 2008; 刘晓梅等 2011)。研究表明, 空间插值法对空间分布不匀、采样点有限、林分结构复杂等情况具有较好的解译能力, 对直观地了解和反映研究区现状与空间分布规律, 具有十分重要的现实意义(Maselli *et al.* 2006; Sales *et al.* 2007), 而综合集成光谱和空间信息是提高遥感估测森林叶生物量可靠性和精度的有效途径之一(Lu 2006)。因此, 本研究在回归分析基础上, 引入残差及其空间分析的上海城市森林叶生物量的回归反距离插值估测方法。分析表明, 相比单纯的回归分析或反距离插值法较为准确地估测了叶生物量的空间分布状况。残差的计算和分析能在一定程度上对回归建模结果进行必要的信息补充、有效地提高模型估测精度, 从而对生物量的分布情况做出更为客观的解释。本方法的应用有赖于更多且在森林类型和地理位置上分布较好的野外调查实测数据, 特别是结合资源清查信息的上海城市森林覆盖的遥感解译信息。如果采用高分和/或多光谱遥感信息, 本研究方法可获得进一步的改进。

参考文献

程秋生. 2013. NDVI 协同下森林生物量定量估算研究(博士学位论文). 北京: 北京林业大学.
方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 1996. 我国森林植被的生物量和净生产量. 生态学报, **16**(5): 497-508.
高峻. 1997. 上海自然植被的特征、分区与保护. 地理研究, **16**(3): 82-88.
景侠, 永祥. 2005. 观赏植物学. 北京: 中国林业出版社.
李启权, 王昌全, 张文江, 等. 2013. 基于神经网络模型和地统计学方法的土壤养分空间分布预测. 应用生态学报, **24**(2): 459-466.

连喜. 2002. 环境生态学导论. 北京: 高等教育出版社.
刘晓梅, 布仁仓, 邓华卫, 等. 2011. 基于地统计学丰林自然保护区森林生物量估测及空间格局分析. 生态学报, **31**(16): 4783-4790.
柳新红, 吴林森, 王军峰, 等. 2009. 不同密度山地速生工业原料林生物量的研究. 浙江林业科技, **29**(3): 14-18.
罗天祥. 1996. 中国主要森林类型生物生产力格局及其数学模型(博士学位论文). 北京: 中国科学院地理科学与资源研究所.
骆永明, 查宏光, 宋静, 等. 2015. 大气污染的植物修复. 土壤, **34**(3): 2-8.
沈烈英. 2008. 上海城市森林的植被特征与综合评价研究(博士学位论文). 南京: 南京林业大学.
史利江. 2009. 基于遥感和GIS的上海土地利用变化与土壤碳库研究(博士学位论文). 上海: 华东师范大学.
王兵, 张维康, 牛香, 等. 2015. 北京10个常绿树种颗粒物吸附能力研究. 环境科学, **36**(2): 408-414.
王美霞, 刘玲, 吕文利. 2013. 上海乔木林分碳储量比较分析研究. 环境科学与管理, **38**(5): 174-177.
王瑞静, 赵敏, 高峻. 2011. 城市森林主要植被类型碳储量研究——以崇明岛为例. 地理科学, **31**(4): 490-494.
王哲. 2012. 上海城市森林碳储量研究(博士学位论文). 上海: 上海交通大学.
王哲, 杜宝明, 韩玉洁, 等. 2014. 上海外环线带女贞人工林生态系统碳储量. 生态学杂志, **33**(4): 910-914.
王哲, 韩玉洁, 康宏樟. 2012. 黄浦江上游主要树种水源涵养林生态系统碳储量. 生态学杂志, **31**(8): 1930-1935.
魏文俊, 王兵, 白秀兰. 2008. 杉木人工林碳密度特征与分配规律研究. 江西农业大学学报, **30**(1): 73-80.
肖复明, 范少辉, 汪思龙, 等. 2007. 毛竹(*Phyllostachy pubescens*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)人工林生态系统碳储量及其分配特征. 生态学报, **27**(7): 2794-2801.
徐飞, 刘为华, 任文玲, 等. 2010. 上海城市森林群落结构对固碳能力的影响. 生态学杂志, **29**(3): 439-447.
姚迎九, 康文星, 田大伦. 2003. 18年生樟树人工林生物量的结构与分布. 中南林业学院学报, **23**(1): 1-5.
张慧芳. 2008. 北京地区森林植被生物量遥感反演及时空动态格局分析(硕士学位论文). 北京: 北京林业大学.
张丽杰, 高聪慧, 冯千凤. 2009. 城市森林在城市生态建设中的作用. 现代农业科学, **16**(1): 92-93.
张庆费, 夏楠, 乔平, 等. 2001. 上海公园的发展动态, 分布格局与规模特征分析. 中国园林, **17**(1): 58-61.
张志丹, 席本野, 曹治国, 等. 2014. 植物叶片吸滞PM_{2.5}等大气颗粒物定量研究方法初探——以毛白杨为例. 应用生态学报, **25**(8): 2238-2242.
赵敏. 2010. 上海碳源碳汇结构变化及其驱动机制研究(博士学位论文). 上海: 华东师范大学.
Ackerly D, Knight C, Weiss S, *et al.* 2002. Leaf size, specific leaf area and microhabitat distribution of chaparral woody plants: Contrasting patterns in species level and community level analyses. *Oecologia*, **130**: 449-457.

- Burrough PA , McDonnell R , Burrough PA , *et al.* 1998. Principles of Geographical Information Systems. Oxford: Oxford university press.
- Camacho LD , Gevaña DT , Carandang AP , *et al.* 2011. Tree biomass and carbon stock of a community-managed mangrove forest in bohól , philippines. *Forest Science and Technology* , **7**: 161 – 167.
- Chown S , Gaston K , Robinson D. 2004. Macrophysiology: Large-scale patterns in physiological traits and their ecological implications. *Functional Ecology* , **18**: 159 – 167.
- Diaz S , Hodgson J , Thompson K , *et al.* 2004. The plant traits that drive ecosystems: Evidence from three continents. *Journal of Vegetation Science* , **15**: 295 – 304.
- Gómez C , White JC , Wulder MA , *et al.* 2014. Historical forest biomass dynamics modelled with landsat spectral trajectories. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* , **93**: 14 – 28.
- Kikuzawa K. 1995. Leaf phenology as an optimal strategy for carbon gain in plants. *Canadian Journal of Botany* , **73**: 158 – 163.
- Kumar M , Sheikh MA , Saleem S. 2014. Carbon stock in submergence forest of Srinagar hydroelectric project , Uttarakhand , India. *Forest Science and Technology* , **10**: 61 – 66.
- Lloyd CD. 2010. Local models for spatial analysis. Florida: CRC Press.
- Lu D. 2006. The potential and challenge of remote sensing-based biomass estimation. *International Journal of Remote Sensing* , **27**: 1297 – 1328.
- Maselli F , Chiesi M. 2006. Evaluation of statistical methods to estimate forest volume in a mediterranean region. *Geoscience and Remote Sensing* , **44**: 2239 – 2250.
- Nowak DJ , Hirabayashi S , Bodine A , *et al.* 2013. Modeled PM_{2.5} removal by trees in ten U. S. cities and associated health effects. *Environmental Pollution* , **178**: 395 – 402.
- Pereira P , Oliva M , Baltreinaite E. 2010. Modelling extreme precipitation in hazardous mountainous areas. Contribution to landscape planning and environmental management. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management* , **18**: 329 – 342.
- Sales MH , Souza CM , Kyriakidis PC , *et al.* 2007. Improving spatial distribution estimation of forest biomass with geostatistics: A case study for Rondônia , Brazil. *Ecological Modelling* , **205**: 221 – 230.
- Sarker SK , Das N , Chowdhury MQ , *et al.* 2013. Developing allometric equations for estimating leaf area and leaf biomass of Artocarpus chaplasha in Raghunandan Hill Reserve , Bangladesh. *Southern Forests: A Journal of Forest Science* , **75**: 51 – 57.
- Vicente-Serrano SM , Pérez-Cabello F , Lasanta T. 2008. Assessment of radiometric correction techniques in analyzing vegetation variability and change using time series of Landsat images. *Remote Sensing of Environment* , **112**: 3916 – 3934.
- Wright IJ , Reich PB , Westoby M , *et al.* 2004. The worldwide leaf economics spectrum. *Nature* , **428**: 821 – 827.
-
- 作者简介 王紫君 ,女 ,1991 年生 硕士 ,主要从事森林生态学方面的研究。E-mail: catherineia@sjtu.edu.cn
责任编辑 张 敏
-