

马鞍山市城市森林碳储量及分布格局研究

吴 飞, 吴泽民*, 吴文友

(安徽农业大学林学与园林学院, 合肥 230036)

摘 要: 应用遥感技术结合样地调查的方法, 估算马鞍山市城市森林斑块的储碳及其分布的格局, 研究区面积为 340 km²。结果表明, 城市森林生物量与从 Landsat5 TM (2010 年 7 月) 图像中提取归一化植被指数 (NDVI) 之间有很好的相关性, 可用回归方程 $y = 123.02x^{1.0761}$ 来描述, 同时分别建立了不同类型城市森林生物量与 NDVI 的关系, 应用这些方程计算得出研究区中 11 477.07 hm² 的城市森林斑块的生物量计 5.748 × 10⁵t, 碳储量 2.874 × 10⁵t; 其中郊区水源涵养林和建成区市郊风景林总储碳 1.496 × 10⁵t, 占全部储碳的 52.0%; 城市公园的树林储碳 2.567 × 10³t, 占 0.9%; 行道树储碳 3.530 × 10³t, 占 1.2%; 其他类储碳量 1.317 × 10⁵t, 占 45.8%。另外, 从马鞍山市的 NDVI 分布推导出生物量的分布特点。

关键词: 生物量; 归一化植被指数; 碳储量; 城市森林; 马鞍山市

中图分类号: S731.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2012)04-0519-08

Appraisal of carbon storage in urban forest patches and its distribution pattern in Maanshan city

WU Fei, WU Ze-min, WU Wen-you

(School of Forestry & Landscape Architecture, Anhui Agricultural University, Hefei 230036)

Abstract: In this paper, GIS technology combined with sample investigation in the field was employed to investigate carbon (C) storage of urban forest patches in Maanshan city, well-known as an iron and steel industrial city, and the distribution pattern of carbon storage was mapped as well. The study area covered 340 km². The results showed that there was a significant relationship ($y = 123.02x^{1.0761}$) between the biomass of urban forest stand and NDVI (normalized difference vegetation index) drawn from TM image of LandSat5 (July of 2010). In the urban forest with area of 11 477.07 hm², the forest C storage was 2.874 × 10⁵ t, of which 52% (1.496 × 10⁵ t) was stored in the water conservation forest located in suburban and hill areas in the building-up areas, 0.9% (2.567 × 10³ t) in the parks, 1.2% (3.530 × 10³ t) in the street trees, and 45.8% (1.317 × 10⁵ t) in the other land types. The distribution pattern diagram of carbon storage of urban forest in the city was inferred.

Key words: biomass; NDVI; carbon storage; urban forest; Maanshan city

人类在进化过程中不断地对自然生态系统产生干扰, 这样的干扰自工业革命开始变得越来越严重, 大气中 CO₂ 浓度的持续增加以及其造成的全球气候变化正是一个典型的例子。近年来, 以气候变暖为标志的全球气候变化不仅是一个科学问题, 而已成为国际社会普遍关注的政治问题、经济问题^[1], 它对人类的活动造成了深远的影响。温家宝总理在 2009 年 12 月的哥本哈根气候峰会上承诺, 到 2020

年我国单位国内生产总值二氧化碳排放要比 2005 年下降 40%~45%^[2]。对于大气中 CO₂ 量的控制, 不仅要减少其排放, 还应增加对 CO₂ 的吸收, 植物通过光合作用吸收大气中的 CO₂, 并把多余的碳转化为生物量^[3], 形成一个碳汇, 在全球碳平衡中起着重要的作用。

陆地生态系统是全球碳循环的一个重要碳库, 而陆地生态系统中绝大部分的碳都储存在森林中,

收稿日期: 2012-02-13

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划 (2011BAD38B03) 资助。

作者简介: 吴 飞, 女, 硕士研究生。E-mail: wufei52777@163.com

* 通讯作者: 吴泽民, 男, 教授, 博士生导师。E-mail: zeminwu@gmail.com

可见森林是维持生态系统平衡的重要调节器，它在吸收、储存 CO₂ 等温室气体、维持大气 CO₂ 平衡方面发挥着重要的作用^[4]，因此加强森林的建设是一项重要的措施。城市森林尤其与人类的日常生活息息相关，是创造人与自然和谐相处的环境、实现低碳城市目标不可或缺的手段，同时引发了关于城市森林碳汇功能估算的众多研究。从国内外研究表明，目前对自然森林的碳汇估算一般采用：样地调查，通过计算生物量估算碳储量；涡度相关法，应用相关仪器定点观测；使用遥感技术，采用模型模拟法在较大尺度上估算森林碳汇。上述方法同样应用于城市森林的观测，但 3 种方法各有优点和局限性，样地清查法精度较高，但是工作量大，而且受时间和空间的局限；涡度清查法可以实现连续、长期的观测，但是成本较高而且精度有待提高；3S 技术的应用为碳储量的研究提供了快捷、经济、方便的方法，使研究突破了空间和时间的限制，为模拟和估算长时间、大尺度上的区域碳储量提供了有效技术支持，但是在精度方面还存在不确定性，所以可以根据实际情况，采用一种或几种方法相结合来估算城市森林的碳汇。

北美国家较早认识城市森林的碳汇功能的重要性，并开发了相关的计算机软件，如 UFORE 及 City-green 等估算城市森林的储碳及吸收 CO₂ 的作用。UFORE 模型的应用需通过大量的样地调查，获得城市森林的树种组成、种群结构、树木胸径及叶面积数据，并与相关的气象数据、大气污染状况等环境因素结合后运算获得，但由于城市环境的复杂性、样地设置工作量大，需要很大的投入；City-green 是基于遥感技术的一个工具使用比较方便，但在城市尺度上只考虑林地面积而忽略树种组成的差异，同时采用一般林地的碳汇功能为基础，故影响估算的精度。近年来，Nowak 总结对于城市森林的研究成果，应用遥感技术通过建立归一化植被指数 (NDVI) 与林地生物量的关系模型。NDVI 是一项反映植被覆盖状况的一种遥感指标，定义为近红外通道与可见光通道反射率之差与之和的商^[5]。生物量是指一个有机体或群落在一定时间内积累的有机质总量^[6]。这个方法不仅可用较少的样地的数量，同时还能勾绘出生物量的分布，对于城市这个较为复杂的立地环境此法有其独特的优点。结合 UFORE 模型与遥感技术的运用，Nowank 等估算了全美以及各个州的城市森林效益，包括其碳汇功能，这是世界上首次在国家层面上对城市森林功能的测算。美国几个主要城市的城市森林储碳量从 Jersey 的

19 300 t 到纽约市的 120 万 t 不等，估计全美城市树木的储碳量约为 7 亿 t，折合 143 亿美元^[3]。

近年来，我国的研究者开始关注城市森林在实现低碳城市中的重要作用，分别采用不同的技术估算城市森林储碳及吸收 CO₂ 的效益，但还未曾涉及不同功能区城市森林储碳功能及储碳量的分布格局。本文选择重要的钢铁工业城市马鞍山为研究对象，采用遥感技术在提取城市森林斑块的基础上全面分析城市森林的储碳功能及其分布的格局，为城市森林建设及功能测算提供科学的方法。

1 研究区概况

马鞍山市位于安徽省东部，地理位置处于北纬 31°46'42"~31°17'26" 与东经 118°21'38"~118°52'44" 之间。该市西临长江，东接丘陵，低丘与长江之间是狭长的阶地与河漫滩，平均海拔在 10 m 左右；最高峰是马鞍山，海拔 154.7 m。全市土地面积 1 686 km²，规划区 340 km²，建成区 67.58 km² (2011 年前)。

马鞍山市属北亚热带季风型湿润气候，四季分明，梅雨集中；年平均气温 15.8℃，无霜期为 234 d；年均降水量 1 023 mm。植被属中亚热带常绿阔叶与落叶阔叶混交林地带，但原生自然植被已不复存在，目前常见木本植物种类有：黑松(*Pinus thunbergii*)、马尾松(*P. massoniana*)、火炬松(*P. taeda*)、麻栎(*Quercus acutissima*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、黄檀(*Dalbergia hupeana*)，君迁子(*Diospyros lotus*)、竹类(*Phyllostachys* spp.)、杜鹃(*Rhododendron* spp.)、蔷薇(*Rosa multiflora*)、野山楂(*Crataegus cuneata*)、金银花(*Lonicera japonica*)、菝葜(*Smilax china*) 等；草本植物白芒(*Miscanthus sinensis*)、蒿类(*Artemisia* spp.)、狗尾草(*Setaria viridis*)、狼尾草(*Pennisetum alopecuroides*) 等。

马鞍山市是我国十大钢铁工业基地之一，安徽省重要的工业和港口城市，城市人口 62 万。主城区规划采取“一城四团式”的空间结构，建成区内间断分布着一些山丘，形成了“九峰环一湖，翠螺出大江”的秀丽自然景观，是一座具体典型的江南风韵的山水园林城市。目前绿化覆盖率达 42.57%，人均公共绿地面积达 12 m²，1996 年被评选为国家园林城市。本文研究区面积为城市规划区范围，面积 340 km²，占马鞍山市全市总面积的 20.17%。

2 研究方法

2.1 城市森林生物量测算

采用样方调查林分结构、选用相应的生物量回

归模型计算样地乔木层生物量。

表 1 树种生物量模型
Table 1 Biomass equations for tree species

序号 No.	树种 Tree species	生物量回归模型 Regression equation of biomass	作者 Author
1	化香 <i>P. strobilacea</i>	$W=2.0340D^{2.6349}$	Brenneman, et al, 1978
2	紫叶李 <i>P. cerasifera Ehrhart f.atropurpurea</i>	$\log W=-0.6657+1.7041\log D$ $W=W_s+W_b+W_l$	Maclena & Wein, 1976
3	三角枫 <i>A. buergerianum</i>	$W_s=0.3274(D^2H)^{0.7218}, r=0.87$ $W_b=0.01347(D^2H)^{0.7198}, r=0.94$ $W_l=0.02347(D^2H)^{0.6929}, r=0.86$	冯宗炜,等 ^[6]
4	二球悬铃木 <i>P. acerifolia</i>	$W=-2.7018+2.5751\ln(D)$	Zianis, et al ^[7]
5	香樟 <i>C. camphora</i>	$W=0.175374(D^2H)^{0.819874}, r=0.993255;$ $W=0.308995D^{2.247148}, r=0.969503$ $W=W_s+W_b+W_l$	姚迎九,康文星,田大伦 ^[15]
6	圆柏 <i>S. chinensis</i>	$W_s=131.37(D^2H)^{4.5968}$ $W_l=37.87(D^2H)^{0.5975}$ $W_b=27.40(D^2H)^{0.5975}$	常学向,车克钧,宋彩福 ^[14]
7	木荷 <i>S. superba</i>	$W=0.1711D^{2.6101}$	程煜,洪伟,吴承祯 ^[16]
8	南洋楹 <i>A. chinensis</i>	$W=0.03621 \times D^{2.3146} \times H^{0.3600}$ $W=W_s+W_b+W_l$	DeBell, et al ^[23]
9	刺槐 <i>R. pseudoacacia</i>	$\ln W_s=-2.895531+0.86764\ln(D^2H)$ $\ln W_b=-3.71916+0.79079\ln(D^2H)$ $\ln W_l=-2.90872+0.45739\ln(D^2H)$	毕君,黄则舟,王振亮 ^[17]
10	毛竹 <i>P. pubescens</i>	$W=66.91964878D^{2.5500409}H^{0.0437037}$ $W=W_s+W_b+W_l$	黎曦,鲍雪芳,王福升 ^[18]
11	青冈栎 <i>C. glauca</i>	$\log W_s=0.75995\log(D^2H)-0.75237$ $\log W_b=0.69997\log(D^2H)-0.93934$ $\log W_l=0.53231\log(D^2H)-0.96854$	邓仕坚 ^[19]
12	白栎 <i>Q. fabric</i>	$W=1.5647(D^{2.6887})$ $W=W_s+W_b+W_l$	Brenneman, et al
13	麻栎 <i>Q. acutissima</i>	$W_s=0.56310(D^2H)^{0.6180}$ $W_b=0.00681(D^2H)^{0.9481}$ $W_l=0.01823(D^2H)^{0.6241}$	杨涛 ^[20]
14	枫香 <i>L. formosana</i>	$W=0.5256(D)^{1.6}$	Davis, Trettin ^[9]
15	杉木 <i>C. lanceolata</i>	$\lg(W)=0.755946-2.648391\lg(D)+2.010117$ $\lg^2(D)+3.010832\lg(H)-1.531259\lg^2(H)$	唐坤银,唐代生 ^[21]
16	盐肤木 <i>R. chinensis</i>	$\ln W=4.1444+2.5175\ln D$	Jing L, et al ^[24]
17	火炬松 <i>P. taeda</i>	$\ln W=-2.77631+2.52444\ln D$	林良琪 ^[13]
18	马尾松 <i>P. massoniana</i>	$\log W_{\text{全}}=2.7751\log D-1.3855, r=0.9664$	曾伟生,肖前辉,胡觉 ^[11]
19	黑松 <i>P. thunbergii</i>	$W=0.1425(D^2H)^{0.9181}$	许景伟,卫东,王月海 ^[12]
20	泡桐 <i>P. fortunei</i>	$\lg W=0.9689\lg D^2H-1.6329$	陆新育,陈绍信,李淼泉 ^[22]
21	水杉 <i>M. glyptostrobooides</i>	$W=0.0546389(D^2H)^{0.86351}$ $W=W_s+W_b+W_l$	李志辉,何立新,周育平 ^[10]
22	檫木 <i>S. tzumn</i>	$W_s=0.01868(D^2H)^{0.98893}$ $W_{br}=0.00464(D^2H)^{1.05194}$ $W_l=0.00284(D^2H)^{0.90525}$	田大伦,等 ^[27]
23	枫杨 <i>P. stenoptera</i>	$W=0.04974(D^{2.01833} \times H^{0.7444})$ $W=W_s+W_b+W_l$	Tritton, et al ^[8]
24	其它针叶树 Other coniferous tree	$W_s=0.0254(D^2H)^{0.948}$ $W_{br}=0.0055(D^2H)^{0.924}$ $W_l=(W_s+W_{br})/7.5+0.0125(W_s+W_{br})$ $W=W_s+W_b+W_l$	方精云,孙世州 ^[25]
25	其它阔叶树 Other broad-leaved tree	$W_s=0.0396(D^2H)^{0.933}$ $W_{br}=0.0055(D^2H)^{1.027}$ $W_l=(W_s+W_{br})/23.8+0.0333(W_s+W_{br})$	刘国华,方精云,等 ^[26]

注: W-地上部分生物量; Ws-主干生物量; Wbr-枝干生物; Wl-叶子生物量; D-胸径(in, mm 或 cm); H-树高(ft 或 m)。

Note: W-whole tree biomass(all above ground components); Ws-stem biomass; Wbr-branch biomass; Wl-leaf biomass; D-diameter at breast height (1.37 m) measured in inches(in), millimeters(mm), or centimeters(cm); H-tree height measured in feet(ft) or in meters (m) .

2.1.1 样方调查 2010年5月在马鞍山市进行实地样地调查,样地面积 30 m×30 m,共调查样地 73 个,分别为:市郊风景林 25 个,公园 26 个,行道树 16 个,其他 6 个。样地中心位置用 GPS 定位、在遥感影像中找到相应的位置;样地采用每木调查法,记录样地内所有乔木的树种、株数、胸径、树高。

2.1.2 选用生物量模型 根据样地调查记录的树种,选择相应的生物量模型(表 1),分别树种计算生物量,得出不同类型城市森林样地的平均生物量,再乘以各类城市森林面积,得出不同类型城市森林及研究区总生物量,然后以生物量的平均含碳率 0.5 换算碳储量^[3]。

生物量模型的地区性比较强,在选用时尽量选择与马鞍山市地理位置相近或者立地条件相似的模型。此外,城市森林树种组成多样,有一部分树种没有相应的生物量模型可参考,据 Nowak 等研究可选用同属、同科的其他树种或针叶树、阔叶树的统一模型代替。本文采用方精云等在估算中国森林碳库时提出分别针、阔树种的统一模型,生物量模型^[10-27]整理如表 1。另外, Nowak 认为大部分树种的生物量模型是根据森林的立地环境估算的,城市中的树木生长不同于森林,因此选用森林立地中树木的生物量模型时要加以调整,本文即采用其建议的调整系数 0.8(本文中涵养林、市郊风景林可不用调整,仅对公园、行道树调整)。

本文样地调查中共出现 52 个树种,已报道有生物量模型的 23 种、占树种的 39.5%,但这些树种的数量大、占了全部树木株数的 65.0%,其中公园中占比例最大的是香樟、三角枫、雪松,市郊风景林中比例最大的是麻栎、杉木、马尾松、构树等。因此,可以认为已有的树种模型估算了大部分的树木生物量。

2.2 归一化植被指数 (NDVI) 的提取

2.2.1 遥感影像的预处理 采用马鞍山市 2010 年的 TM 遥感影像数据。首先,根据遥感影像资料中的头文件对 TM 数据进行格式转化,利用 ERDAS 软件分别将第一、第二、第三、第四、第五和第七波段转化的 img 格式,并使用 Layer stack 模块对其进行波段组合。其次,将 2010 年的数据,以 2004 年 5 月的马鞍山市遥感影像图为参考对象,进行配准,并裁剪出马鞍山市的范围。

2.2.2 归一化植被指数 (NDVI) 的提取 将配准好的影像在 ERDAS 中打开,选择 Spectral Enhancement 菜单中的 indices 子模块,选择 NDVI 模板,计算公式: band4-band3/band4+band3。由此得到马鞍山市

NDVI 分布图。将 NDVI 图导入 ArcGIS 中可以查找到某一经纬度的具体 NDVI 数值。

2.3 城市森林斑块的提取

在 ArcGIS 中利用 ArcCatalog 建立个人数据库和要素类,以经过合成的 2010 年马鞍山市 TM 图像为底图,描绘出公园、行道树、水源涵养林-市郊风景林和其他四个类型的图层,并从数据库中读取每个类型的面积,因受 TM 的分辨率的限制,本文仅能提取面积大于 900 m² 的城市森林斑块。

2.4 建立生物量和归一化植被指数 (NDVI) 的数学模型

将样方生物量和 NDVI 值按经纬度一一对应起来,利用 SAS 软件分析其相关性。根据散点图趋势选择相应的数学模型来模拟生物量和 NDVI 的关系,选择模型如下:

- (1) $Y=aX+b$
- (2) $Y=a+bX+cX^2$
- (3) $Y= aX^b$
- (4) $Y= aLn(X) +b$
- (5) $Y= ac^{bX}$

其中: X 是 NDVI; Y 是生物量; a、b、c 是参数。

在 SAS 分析软件中,根据相关系数最大和剩余标准差最小的原则选择最优模型作为模拟生物量和 NDVI 关系的回归模型。

2.5 NDVI 至生物量分布图的推导

打开 2010 年的 NDVI 分布图,利用 ArcGIS 中 raster calculator 工具,输入 NDVI 和生物量的回归方程,就可得出 2010 年的生物量分布图。



图 1 2010 马鞍山市不同城市森林类型分布图
Figure 1 The distribution pattern of urban forest in entire research area

3 结果与分析

3.1 城市森林面积及分布

提取的城市森林斑块总面积为 11 477.07 hm²、占研究区面积的 33.76%，其中：市郊风景林为 5 874.105 hm²，17.28%，公园为 215.78 hm²，占 0.63%，；主要行道树覆盖面积为 288.38 hm²，占研究区的 0.85%；另外其它类 5 215.44 hm²，占 15.34%。各类型城市森林的分布如图 1。

3.2 生物量和 NDVI 的相关模型

所用有样地应用 GPS 定位、在 2010 年的遥感图上确定相对应的点，分别计算与各样地对应的 NDVI 值，得到各样地生物量及 NDVI 与生物量的

对应关系（表 2）。由表得出马鞍山市不同类型城市森林生物量和 NDVI 的散点图和趋势线（图 2），并建立相关模型。

比较多种回归结果，综合考虑模型的相关性和拟合效果，采用乘幂回归模型：

马鞍山市城市森林生物量的回归方程， $y = 123.02x^{1.0761}$ ，决定系数 $R^2 = 0.6565$ ；

风景林， $y = 262.84x^{2.349}$ ， $R^2 = 0.6967$ ；

公园林， $y = 153.28x^{1.0718}$ ， $R^2 = 0.6392$ ；

行道树， $y = 189.72x^{1.4098}$ ， $R^2 = 0.8130$ 。

上述各模型作为生物量和 NDVI 关系的最终回归模型。

表 2 2010 年的生物量和 NDVI 值统计

Table 2 The biomass and NDVI in 2010

t·hm⁻²

涵养林-风景林 Conservation forest—ornamental forest		公园 Park		行道树 Border tree		其他 Other	
NDVI	生物量 Biomass	NDVI	生物量 Biomass	NDVI	生物量 Biomass	NDVI	生物量 Biomass
0.407	46.711	0.500	70.322	0.239	45.111	0.468	77.344
0.393	44.222	0.121	24.044	0.134	12.400	0.255	29.967
0.373	25.467	0.260	31.933	0.113	8.800	0.341	28.856
0.532	48.033	0.277	58.878	0.140	8.144	0.042	6.000
0.500	46.911	0.264	43.167	0.258	24.056	0.583	77.211
0.523	51.833	0.219	21.911	0.122	9.689	0.509	83.678
0.639	145.811	0.139	20.133	0.340	30.444		
0.370	46.333	0.103	9.656	0.175	16.689		
0.542	69.178	0.122	15.067	0.173	12.556		
0.648	63.189	0.548	61.167	0.347	58.989		
0.318	15.189	0.442	50.778	0.275	44.311		
0.582	60.744	0.465	53.878	0.224	27.500		
0.487	44.733	0.271	42.322	0.149	12.189		
0.521	44.589	0.179	20.489	0.183	20.267		
0.447	24.967	0.448	56.544	0.193	15.478		
0.439	27.444	0.500	156.889	0.480	45.089		
0.491	26.711	0.325	84.489				
0.304	12.544	0.239	29.700				
0.352	25.033	0.464	35.144				
0.608	107.444	0.434	32.844				
0.500	71.256	0.371	150.211				
0.485	66.233	0.472	107.378				
0.472	37.344	0.201	20.678				
0.540	101.078	0.378	48.478				
0.348	20.256	0.480	55.867				
		0.390	48.644				
		0.337	48.100				

3.3 城市森林的生物量及储碳特点

由上述 NDVI 和生物量的统计结果，研究区全

部城市森林斑块的总生物量 5.748×10^5 t、平均生物量 $50.082 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，总碳储量为 2.874×10^5 t，平均碳储

量为 25.041 t·hm⁻²；研究区的平均储碳量 8.453 t·hm⁻²；其中涵养林-风景林平均生物量 50.93 t·hm⁻²、总生物量 2.992×10⁵ t，总储碳 1.496×10⁵ t；公园绿地平均生物量为 51.80 t·hm⁻²、总生物量 5.136×10³ t，总储碳量 2.567×10³ t，公园整体平均碳储量 11.900

t·hm⁻²；主要道路的行道树平均生物量为 24.48 t·hm⁻²，总生物量 7.059×10³ t、总储碳量 3.530×10³ t；其他类平均生物量 50.51 t·hm⁻²、总生物量 2.634×10⁵ t，总碳储量 1.317×10⁵ t（表 3）。

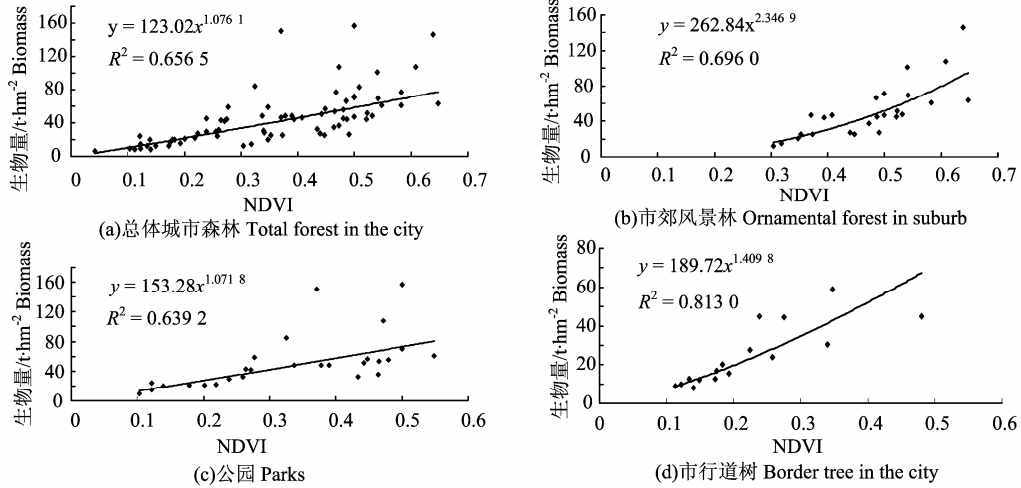


图 2 马鞍山市生物量和 NDVI 散点图及拟合曲线
Figure 2 Fitting curves of biomass and NDVI for urban forest



图 3 马鞍山市 2010 年 NDVI 分布图
Figure 3 The NDVI distribution pattern of urban forest in entire research area

公园中的城市森林斑块和的城市森林斑块平均生物量相差不大，但按占地面积计算公园的平均生物量比水源涵养林-风景林低，且各个公园的平均生物量差别很大，城市森林斑块平均生物量高的公园平均生物量不一定高，主要取决于树林所占的公园面积比。该市的主要公园如雨山湖、南湖和北湖公园，历史悠久，树种丰富，且树龄长、大树比例高，加之公园的经营维护好，树木健康度高故生物量大、

碳储量较高；而其它一些市政公园大多为近年新建，一般采用单一树种用大树成片种植、大树因过度修剪影响健康，有的栽植密度低、且缺少养护，树木生长状态不佳，所以平均生物量低。市郊风景林接近自然生长条件，平均生物量高于公园及其它林地，而其中尤以翠螺山的林分最高，主要与其树种组成、林分结构及树木年龄有关，其是著名的采石矶风景区林地，主要为乡土树种栎类、槭类、榆类等大乔木组成的阔叶林，树龄长、生物量较大；市内市郊风景林多为上世纪 80 年代人工营造的杉木、马尾松林，因立地条件较差且疏于管理林分衰退，后补植一些阔叶树种如朴树、樟树等，但树龄较短故平均生物量不高；行道树主要是香樟、悬铃木，以及少量的栾树、无患子、马褂木、广玉兰等，因树种及树龄原因，其中以香樟及悬铃木的行道树的道路要高于其它。

3.4 NDVI 及生物量分布

NDVI 的取值范围为-1 到 1，负值说明该地区无植被覆盖，从 0~1 值越高说明植被覆盖度越高。从图 3 和图 4 中分析得出：NDVI 为负值(-0.61~0)的地区占整个研究区的 16.38%，NDVI 值范围是 0~0.1、0.1~0.2、0.2~0.3、0.3~0.4、0.4~0.5、0.5~0.6、0.6~0.71 的地区占整个研究区的比例分别为 10.3%、10.55%、8.76%、9.22%、15.52%、26.28%

和 2.99%, 从这部分数据得出整个研究区, 除了最高值部分, NDVI 的分布呈现两头高中间平均的态势。整个研究区的生物量范围是 $0 \sim 84.951 \text{ t/hm}^2$, 各取值范围 0 t/hm^2 、 $0 \sim 20 \text{ t/hm}^2$ 、 $20 \sim 40 \text{ t/hm}^2$ 、 $40 \sim 60 \text{ t/hm}^2$ 、 $60 \sim 84.951 \text{ t/hm}^2$ 占整个研究区的比例分别为 1.18%、22.70%、17.71%、27.03% 和 31.38%。由此可得, 马鞍山市规划区生物量大部分处于 $40 \sim 84.951 \text{ t/hm}^2$ 之间, 而这部分生物量多分布于市郊。建成区城区的除市郊风景林和公园外 NDVI 的范围大部分处于 $0 \sim 2$ 之间, 城市中其他地区还可以加强植被建设。而郊区除了大面积的森林外可能还有成片的农田, 所以 NDVI 普遍较高。从生物量分布图看出, 城区生物量普遍较低, 只有各个山体和城中的大小公园生物量较高。

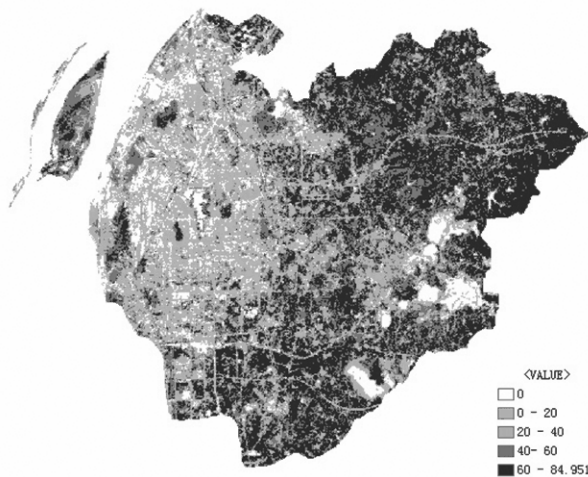


图 4 马鞍山市 2010 年生物量分布图

Figure 4 The biomass distribution pattern of urban forest in entire research area

4 结论

采用样地调查及卫星数据提取植被覆盖指数, 建立了城市森林的生物量和 NDVI 值的相关关系, 获得了回归模型: $y = 11.071x^{1.0762}$, 且有较高的相关系数 ($R^2=0.6$)。据此估算研究区全部城市森林斑块总碳储量为 $2.874 \times 10^5 \text{ t}$, 平均碳储量为 25.041 t/hm^2 , 研究区的平均碳储量 8.453 t/hm^2 。

整个研究区碳储量的分布特点表现为, 大部分集中在水源涵养林-风景林, 不同类型城市森林碳储量的比较, 市郊风景林总储碳 $1.496 \times 10^5 \text{ t}$, 占马鞍山总碳储量的 52.0%、贡献率最高; 公园总储碳量 $2.567 \times 10^3 \text{ t}$, 占总碳储量的 0.9%; 主要道路的行道树总储碳量 $3.530 \times 10^3 \text{ t}$ 占总碳储量的 1.2%; 其他类总碳储量 $1.317 \times 10^5 \text{ t}$, 占总碳储量的 45.8%。而公

园和行道树占研究区的面积比重小贡献率也小。

在建成区, 对碳储量贡献率较高的主要是涵养林-风景林及公园的树林, 涵养林-风景林是马鞍山城市的特色, 在改善城市生态环境方面起着重要的作用, 目前因经营管理等众多原因林分质量不高、森林生产力较低, 因此在增加生物生产提高储碳及固碳的功能方面还有较大的空间, 应通过采用适当的林分改造措施提升其生产力; 市内的几个公园虽有较大的面积, 但总体上因树林占地比例较低、林分密度偏低而影响其储碳的功能, 尤其是一些新建的公园绿地, 今后应适当减少公园的硬质地面比例, 尽量选用生产力高的大乔木, 设计适当的密度保证树木的生长空间, 以维持健康生长、更好的发挥生态效益。

本文采在实地调查的基础上结合遥感技术能较好的全面分析城市森林的储碳功能及其分布的格局, 为城市森林规划、建设及功能测算提供科学的方法。城市森林碳储量的估算误差主要取决于生物量模型的建立和 TM 图像分辨率, 本文因受遥感影像分辨率的影响只估算面积大于 900 m^2 的城市森林斑块, 作者建议在有条件的情况下可采用高分辨率的遥感影像, 另外尽量增加调查样地的数量建立更客观的数学模型以获得更精确的数据。

参考文献:

- [1] 王磊, 丁晶晶, 季永华. 江苏省森林碳储量动态变化及其经济价值评价[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2010, 34(2): 1-5.
- [2] 温家宝总理在哥本哈根气候变化会议领导人会议上的讲话(全文)[EB/OL]. [2009-12-19]. http://news.xinhuanet.com/world/2009-12/19/content_12668033_1.htm.
- [3] Nowak D J, Crane D E. Carbon storage and sequestration by urban trees in the USA[J]. Environmental Pollution, 2002, 116: 381-389.
- [4] 王兵, 魏文俊. 江西省森林碳储量与碳密度研究[J]. 江西科学, 2007, 25(6): 681-687.
- [5] Walton J T, Nowak D J, Greenfield E J. Assessing urban forest canopy cover using airborne or satellite imagery[J]. Arboriculture & Urban Forestry, 2008, 34(6): 334-340.
- [6] 冯宗炜. 中国森林生态系统的生物量和生产力[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 63.
- [7] Zianis D, Muukkonen P, Makipaa R. Biomass and stem volume equation for tree species in Europe. [J]. Silva Fennica, 2005(4): 1-63.
- [8] Tritton L M, Hornbeck J W. Biomass equations for major tree species of the Northeast[R]. Northeastern Forest Experiment Station, General Technical Report, NE-69.
- [9] Davis A A, Trettin C C. Sycamore and sweetgum plantation productivity on former agricultural land in South

- Carolina [J]. *Biomass and Bioenergy*, 2006(30): 769-777.
- [10] 李志辉, 何立新. 水杉人工林生物产量及生产力的研究[J]. 中南林学院学报, 1996, 16(2): 47-51.
- [11] 曾伟生, 肖前辉, 胡觉. 中国南方马尾松立木生物量模型研建[J]. 中南林业科技大学学报, 2010, 30(5): 50-56.
- [12] 许景伟, 卫东, 王月海, 等. 海沙质岸黑松人工林生物量的估测数学模型[J]. 山东林业科技, 2004(5): 47-49.
- [13] 林良琪. 不同年龄火炬松生物量与叶面积指数模型的研究[J]. 林业勘察设计, 2008(2): 80-83.
- [14] 常学向, 车克钧, 宋彩福, 等. 祁连圆柏群落生物量及营养元素累积量[J]. 西北林学院学报, 1997, 12(1): 23-28.
- [15] 姚迎九, 康文星, 田大伦. 18年生樟树人工林生物量的结构与分别[J]. 中南林学院学报, 2003, 23(1): 1-5.
- [16] 程煜, 洪伟, 吴承帧, 等. 木荷地上部分生物量分布特征与生产力[J]. 应用与环境生物学报, 2009, 15(3): 318-322.
- [17] 毕君, 黄则舟, 王振亮. 刺槐单株生物量动态研究[J]. 河北林学院学报, 1993, 8(4): 278-282.
- [18] 黎曦, 鲍雪芳, 王福升. 赣南毛竹生物量研究[J]. 安徽林业科技, 2007, 131(1/2): 9-1.
- [19] 邓仕坚. 湖南会同红栲-青冈-刨花楠群落生物量生产力的研究[J]. 应用生态学报, 2000, 11(5): 651-654.
- [20] 杨涛, 麻栎马尾松天然此生混交林生物量结构及分析分布特征调查研究[J]. 信阳农业高等专科学校学报, 2004, 14(4): 4-9.
- [21] 唐坤银, 唐代生. 生物量优化模型研究[J]. 林业调查规划, 2010, 35(1): 47-52.
- [22] 陆新育, 陈绍信, 李淼泉, 等. 泡桐生物量的研究[J]. 林业科学研究, 1990, 3(5): 421-426.
- [23] DeBell D S, Cole T G, Whitesell C D. 桉树与南洋楹的纯林和混交林的种植、生长及产量[J]. 桉树科技, 2000(2): 52-60.
- [24] Li J, Li H M, Cheng G X. A study on the biomass of the young plantation of *Rhus chinensis* and *R.punjabensis*[J]. *Journal of Jishou University*, 2000, 21(1): 1-5.
- [25] 方精云, 孙世州. 藏南几种植物群落的生物量及其与环境因子关系的初步研究[M]//王如松, 方精云, 高林, 冯宗炜. 现代生态学的热点问题研究. 北京: 中国科学技术出版社, 1996: 356-361.
- [26] 刘国华, 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.
- [27] 田大伦, 张昌胡, 罗中甫, 等. 天然撩木混交林的生物量及营养元素分布 I. 生物生产量及生产力[J]. 中南林学院学报, 1990, 10(2): 121-128.