

基于 Landsat TM 数据估算山东菏泽区域杨树人工林碳储量

刘诗琦¹ 贾黎明¹ 杨 军² 辛建华³

(1 北京林业大学林学院 2 清华大学地球系统科学研究中心 3 菏泽市林业局)

摘要:利用 Landsat TM5 数据,结合地面调查,对我国鲁西黄泛平原典型地区菏泽市的杨树人工林碳储量进行测算。结果表明:单木生物量模型 $\ln B = 2.486 \ln D - 2.415$ ($R^2 = 0.879, P < 0.05$),拟合效果较好;基于 TM5 影像提取的包括 6 个原始波段(TM1 ~ TM5、TM7)的光谱反射率、归一化植被指数 NDVI、差值植被指数 DVI、比值植被指数 RVI、主成分变换得到的 3 个主分量及缨帽变换得到的亮度、绿度和湿度等在内的 15 个参数,及单波段反射率线性或非线性变换后产生的 11 个新参数,通过多元回归分析建立生物量遥感回归模型 $B = 1\,765.412 + 7\,378.884 \ln \rho_4 + 2\,113.781 \times 1/\rho_4 + 14.541 \times 1/\rho_1$ ($R^2 = 0.754, P < 0.01$),检验结果表明模拟值与实测值平均相对误差为 7.65%,预测精度较高。据该生物量遥感回归模型估算得出菏泽市杨树人工林碳储量为 13.93 Tg,占山东省森林植被总碳储量的 25.39%;林木碳密度为 43.82 t/hm²,比全国杨树林平均碳密度高 21.82%。菏泽市 73.22% 的杨树人工林碳密度小于 57 t/hm²,固碳增汇潜力巨大。

关键词:TM 数据;生物量模型;碳密度;碳汇

中图分类号:S718.55 文献标志码:A 文章编号:1000-1522(2013)06-0036-06

LIU Shi-qi¹; JIA Li-ming¹; YANG Jun²; XIN Jian-hua³. **Estimation of carbon storage of regional poplar plantations based on Landsat thematic mapper image in Heze of Shandong Province, eastern China.** *Journal of Beijing Forestry University* (2013)**35**(6)36-41 [Ch,31 ref.]

- 1 College of Forestry, Beijing Forestry University, 100083, P. R. China;
2 Center for Earth System Science, Tsinghua University, Beijing, 100084, P. R. China;
3 Heze Forestry Administration, Shandong, 274000, P. R. China.

In this study, the carbon storage of poplar plantations in Heze, Shandong Province was estimated based on Landsat TM5 data. Firstly, based on field survey data, the tree biomass estimation model was built before calculating biomass in plot level with DBH as an input variable. Then, on the basis of correlations between forest biomass and remote sensing data, a multiple regression model was built. The derived model for tree biomass estimation was $\ln B = 2.486 \ln D - 2.415$, and its multiple correlation coefficient was 0.879 ($P < 0.05$). Model $B = 1\,765.412 + 7\,378.884 \ln \rho_4 + 2\,113.781 \times 1/\rho_4 + 14.541 \times 1/\rho_1$ was appropriate for estimating biomass of poplars in the target area, with its multiple correlation coefficient was 0.754 ($P < 0.01$). Carbon storage of poplar plantations was 13.93 Tg, which accounted for 25.39% of carbon storage of forest vegetation in Shandong Province. The carbon density was 43.82 t/hm², as much as 21.82% more than the national average level. The area of poplar plantations had reached 3.179×10^5 hm². In addition, 73.22% of poplar carbon density was lower than 57 t/hm², and it presented a homogeneity in spatial distribution. In sum, poplar plays an important role in carbon sequestration for Heze City of Shandong Province, eastern China.

Key words TM data; biomass model; carbon density; carbon sink

杨树(*Populus*)因生长快、易繁殖、成材早、产量高、适应性强等特点成为我国北方地区主要造

收稿日期:2012-12-17 修回日期:2013-05-28
基金项目:“十一五”国家科技支撑计划课题(2008BAD95B07)、林业公益性行业科研专项(2010044004)。
第一作者:刘诗琦。主要研究方向:速生丰产林碳汇。Email: lsq5330121@163.com 地址:100083 北京市清华东路35号北京林业大学林学院。
责任作者:贾黎明,博士,教授。主要研究方向:速生丰产林培育理论与技术。Email: jlm@bjfu.edu.cn 地址:同上。
本刊网址: <http://journal.bjfu.edu.cn>

林树种。我国杨树人工林总面积和总蓄积量已分别达到 757.23 万 hm^2 和 3.4 亿 m^3 , 占全国人工乔木林总量的 18.9% 和 17.4%, 栽培面积已居世界首位^[1]。据研究, 一般植物只利用太阳能的 0.2%, 而杨树则达 3%~4%, 是一般树种固碳能力的 20 倍^[2]; 因此, 杨树人工林的迅速发展不仅可以保证木材资源安全, 还可减缓温室效应, 使森林营造和环境建设相互促进, 协调发展^[3]。目前, 我国对杨树林生物量及碳汇功能的研究主要包括两方面: 一是全国杨树林生物量及碳储量的估算, 多出现在全国森林植被生物量及碳储量的研究中^[4-6], 并无单独详细的研究; 二是试验示范区或林场等小尺度范围的研究, 且多为单一的品种和年龄^[7-12]。然而, 在区域尺度上测算杨树人工林碳储量的研究尚未见报道。

目前, 区域尺度森林生物量估算主要有两种方法: 一是基于森林资源清查的方法; 二是基于遥感估测的方法^[13]。遥感数据因其可快速定量获取区域尺度森林生物量及其变化的特点, 目前已被广泛应用于各类森林碳储量的研究中, 尤其在宏观尺度上, 遥感技术已成为国内外森林生物量估算的有效手段^[14-15]。目前, 研究采用的遥感数据源种类颇多, 应用较广泛的有 TM、AVHRR、SPOT 等数据^[16-18]。数据源不同, 相应的分析方法也不同, 常用的有多元回归分析法、主成分分析法、人工神经网络模型和数学模型等^[15]。山东省菏泽市是我国杨树人工林的重要发展地区, 也是我国杨树用材林生产力最高的栽培区之一, “白天不见庄, 夜晚不见光”正是当地遍植杨树的最好写照。本文基于 Landsat TM5 影像, 以山东菏泽为例, 通过建立杨树人工林生物量遥感估算模型, 测算当地杨树人工林的碳储量, 并分析其固碳增汇潜力。

1 研究区概况

研究区为山东省菏泽市, 该地区位于山东省西南部(114°48′~116°24′ E, 30°39′~35°52′ N), 为黄河下游近代黄河泛滥后的冲积平原, 主要土壤类型是黄泛冲积母质上发育的潮土。该地区地势平坦, 土层深厚, 属暖温带大陆性气候。无霜期年平均 213 d, 年均降雨量 650 mm, 年均气温 18℃。菏泽市辖八县一区, 总面积 12 238.62 km^2 , 共有 13 个国有林场, 主要栽培的杨树品系为欧美杨(*P. euramericana*)、美洲黑杨(*P. deltoides*)等黑杨派品种, 如欧美 107 杨、中林 46 杨、中荷 1 号(2010)、中荷 2 号(2035)等。此外, 各区县农田林网、道路林网、河岸林网及村庄片林也均栽植杨树。

2 研究方法

2.1 样地数据采集及处理

在对菏泽市杨树人工林进行充分踏查的基础上, 采用典型抽样和随机抽样法选取样地, 共选择并调查 42 个不同年龄、不同经营类型的样地(图 1), 调查时间为 2011 年 5 月中旬至 6 月下旬。样地面积 30 m×30 m, 达到 TM 影像一个像元的大小, 各样地中心点用麦哲伦海王星 500 E 手持 GPS 进行定位。对样地内所有杨树进行每木检尺, 并测定树高, 称量伐倒木鲜质量。随机选取其中 29 个样地数据作为建模样本, 保留 13 个作为独立检验样本。

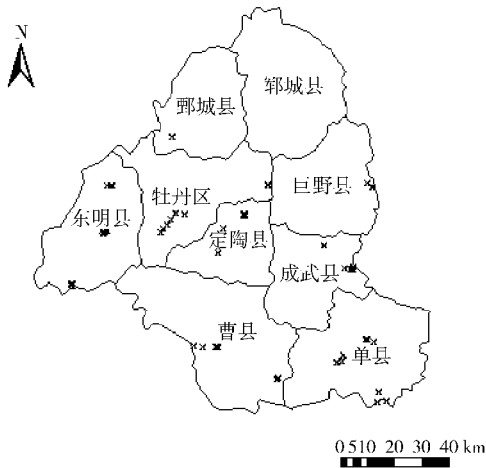


图1 研究区样地分布图
Fig. 1 Distribution of sample plots in the study region

在尽量包含不同径阶的前提下, 于 42 个样地中选取 31 株标准木, 伐倒后实测各标准木的胸径、树高, 并分别测定干、枝、叶、根等各器官的鲜质量。同时取一定质量的各部分鲜样, 在 80℃恒温箱中烘至恒质量, 推算各部分及标准木生物量。随机选取 20 株标准木的生物量(B)作为因变量, 分别选取胸径(D)、树高(H)、胸径平方乘以树高(D^2H)作为自变量, 建立菏泽地区杨树单木生物量模型。其余 11 株的生物量用于模型精度检验, 并用该模型估算样地林木生物量, 乘以杨树含碳率得林木碳储量。采用总有机碳分析仪(TOC, Elementar, Germany)测定样木各器官的含碳率。

2.2 遥感数据采集及处理

选用 Landsat TM5 影像, 该影像共分 7 个波段, 地面分辨率 30 m。为保持影像信息尽量一致, 选取 2011 年 6 月 1 日、2011 年 6 月 8 日(Path/row: 122/36, 123/35, 123/36)共 3 景 TM 影像, 与地面调查时间相近。

采用 ENVI 4.7 对 3 景影像分别进行大气校正, 将影像灰度值转换为地物光谱反射率; 采用 1:5 万地形图对 TM5 影像进行几何校正, 每幅图选取 50

个明显地物点,采用二次方进行校正,校正后的误差在 0.5 个像元内,满足精度要求,并采用最近邻差值方法重采样。将校正过的 3 景影像进行拼接,利用菏泽市行政区划图对拼接后的影像进行剪切得到菏泽市影像。采用最大似然法,基于实地调查数据和菏泽市最新一期二类清查资料选取训练样本共 200 个,建立分类模板,对 TM 影像进行分类,从中提取杨树林信息。

为尽可能多地采集遥感信息,利用 ERDAS 9.1 对影像进行主成分变换,使用 TM 影像的 6 个波段(第 6 波段除外)产生 PCA1、PCA2、PCA3 共 3 个主分量。此外,对影像进行缨帽变换,产生亮度(BRIGHT)、绿度(GREEN)和湿度(WET)3 个因子^[19-20]。利用 ArcGIS 9.3 将样地坐标与 TM5 影像进行叠加,提取各参数,包括各波段光谱反射率($\rho_1 \sim \rho_5, \rho_7$)、主分量因子、缨帽变换因子、差值植被指数 DVI、比值植被指数 RVI、归一化植被指数 NDVI 等 15 个参数。此外,对 $\rho_1 \sim \rho_4$ 进行线性或非线性变化得到 11 个新的参数。

2.3 生物量模型建立

根据遥感指示因子与生物量间的相关性分析,筛选出重要因子,并采用多元回归方法建立生物量线性和非线性模型,综合考虑方程的各项指标值,遴选出适合估算菏泽市杨树人工林生物量的最优模型。

3 结果与分析

3.1 单木生物量模型

由表 1 可看出,3 个模型中以 D 为自变量的单木生物量模型 II 的拟合精度最高, R^2 达到 0.879;其次是以 D^2H 为自变量的模型 I;以 H 为自变量的模型 III 的拟合精度最低。

表 1 杨树单木生物量模型

Tab.1 Tree biomass model of poplar

序号	生物量模型	r	R^2	F	Sig
I	$\ln B = 0.827 \ln(D^2 H) - 2.318$	0.932	0.868	190.982	<0.05
II	$\ln B = 2.486 \ln D - 2.415$	0.938	0.879	210.589	<0.05
III	$\ln B = 2.053 \ln H - 1.016$	0.839	0.704	69.003	<0.05

注:自变量适用区间: D 为 6.0~25.0 cm; H 为 7.0~25.0 m。

利用模型 II 对其余 11 株标准木的生物量进行模拟计算,结果显示,模拟值与实测值的平均相对误差为 7.39%,模拟效果较好(图 2);因此, $\ln B = 2.486 \ln D - 2.415$ (式中: B 为单株生物量,kg; D 为胸径,cm)可用来估算菏泽地区杨树单木生物量。

3.2 菏泽市杨树人工林面积及分布

由影像分类结果的混淆矩阵得出,遥感分类总体精度达 85.56%,Kappa 系数为 0.821 0,分类效果

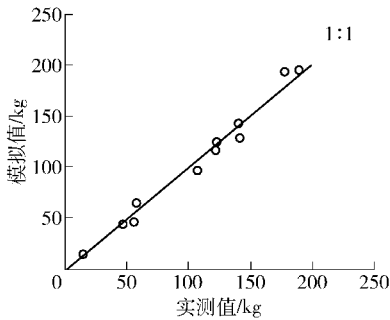


图 2 单木生物量模型拟合值及实测值

Fig.2 Comparison between the simulated and measured data of single tree biomass

较好。杨树广泛分布于整个菏泽市(图 3),除各县的国有林场杨树林呈规模状分布外,其他零散分布的房前屋后小片林及路旁片林占了较大部分;此外,还有呈带状分布的杨树农田林网、道路林网及河岸林网等。杨树人工林总面积达 31.79 万 hm^2 。据菏泽市森林资源统计,该市 2011 年杨树林总面积为 33.33 万 hm^2 ,遥感提取杨树林面积的精度达 95.38%。

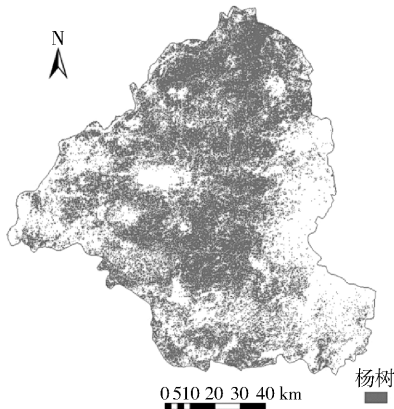


图 3 菏泽市杨树林分布

Fig.3 Distribution of poplar plantations in Heze City of Shandong Province

3.3 菏泽市杨树人工林生物量模型的建立

3.3.1 生物量与遥感指示因子的相关性

当所选遥感指示因子较多时,部分因子对模型来说可能是冗余信息,对模型的贡献不大,甚至会降低模型的预测精度,因此需要对所选因子进行筛选^[21]。表 2 反映了菏泽市杨树人工林生物量与各遥感指示因子间的相关性。各原始波段中, TM1、TM2、TM4 的光谱反射率 ρ_1, ρ_2, ρ_4 与生物量间呈极显著负相关($P < 0.01$),波段 TM3 的光谱反射率 ρ_3 与生物量呈显著负相关($P < 0.05$)。其中, TM4 为近红外波段,其反射率与杨树生物量的相关性最强,在该波段,杨树叶片的反射率迅速增加。利用原始波段产生的 3 个主分量中,只有 PCA1 与生物量间呈显著负相关;影像缨帽变换后也只有亮度

(BRIGHT)与生物量间呈极显著负相关($P < 0.01$)。此外, TM1、TM2 和 TM4 波段反射率经线性或非线性变换后, $1/\rho_1$ 、 $1/\rho_4$ 、 $1/\rho_2$ 与生物量间呈极显著正相关, 其余均与生物量呈极显著负相关。

所有自变量中, 与生物量相关性最强的是 $\rho_1 + \rho_4$, 为 -0.708 , 其次为 $\rho_3 + \rho_4$, 为 -0.692 。此外, ρ_1 、 ρ_2 、 ρ_4 在经过非线性变换后, 与生物量的相关性均有所增强。由此可见, 杨树人工林生物量与单波段的反射率间并非简单的直线相关关系。

表 2 各自变量与生物量的相关性
Tab. 2 Correlation of variables with biomass

自变量	相关系数	显著水平	自变量	相关系数	显著水平
ρ_1	-0.513 **	0.004	GREEN	-0.002	0.992
ρ_2	-0.501 **	0.006	WET	0.117	0.546
ρ_3	-0.429 *	0.020	ρ_1^2	-0.498 **	0.006
ρ_4	-0.600 **	0.001	ρ_2^2	-0.473 **	0.006
ρ_5	-0.351	0.062	ρ_4^2	-0.573 **	0.001
ρ_7	-0.295	0.121	$1/\rho_1$	0.534 **	0.000
NDVI	0.279	0.143	$1/\rho_2$	0.538 **	0.003
RVI	0.286	0.133	$1/\rho_4$	0.654 **	0.003
DVI	-0.129	0.506	$\ln\rho_1$	-0.525 **	0.003
PCA1	-0.441 *	0.017	$\ln\rho_2$	-0.523 **	0.004
PCA2	0.245	0.200	$\ln\rho_4$	-0.627 **	0.000
PCA3	-0.308	0.104	$\rho_1 + \rho_4$	-0.708 **	0.000
BRIGHT	-0.555 **	0.002	$\rho_3 + \rho_4$	-0.692 **	0.000

注: ** 为 0.01 水平上极显著相关; * 为 0.05 水平上显著相关。

3.3.2 生物量模型的建立及最优模型的选取

根据上述生物量与遥感指示因子间的相关性分

表 3 不同遥感因子生物量估算模型

Tab. 3 Models of biomass estimation with different remote sensing factors

编号	模 型	R^2	调整 R^2	F	Sig
(1)	$B = 739.852 - 1483.880\rho_4 - 2282.630\rho_1$	0.515	0.477	13.780	0.000
(2)	$B = 773.893 - 1311.943\rho_4 - 365.514 \text{ BRIGHT} - 3137.935\rho_1 + 1365.240\rho_2$	0.523	0.444	6.589	0.000
(3)	$B = 762.624 + 148.286\rho_4 - 4867.001 \text{ BRIGHT} - 1077.724\rho_1 + 2320.306\rho_2 + 2919.549 \text{ PCA1} - 12.700\rho_3$	0.544	0.420	4.374	0.000
(4)	$B = -924.050 - 163.723\ln\rho_1 - 45.847 \ln\rho_2 - 415.802 \ln\rho_4$	0.542	0.487	9.867	0.000
(5)	$B = -8745.950 - 5029.807 \ln\rho_4 + 30594.279\rho_4^2$	0.695	0.671	29.564	0.000
(6)	$B = 58118.216\rho_4^2 - 33300.239\rho_4 - 296.309 \text{ BRIGHT} + 4925.730$	0.721	0.688	21.544	0.000
(7)	$B = 56069.807\rho_4^2 - 32267.557\rho_4 - 1363.944\rho_1 + 4842.450$	0.739	0.707	23.543	0.000
(8)	$B = -7909.980 - 4375.193 \ln\rho_4 + 26493.252\rho_4^2 - 143.411 \ln\rho_1$	0.745	0.714	24.336	0.000
(9)	$B = 13614.032\rho_4 + 14.659 \times 1/\rho_1 + 1119.102 \times 1/\rho_4 - 7888.632$	0.752	0.722	25.270	0.000
(10)	$B = 1765.412 + 7378.884 \ln\rho_4 + 2113.781 \times 1/\rho_4 + 14.541 \times 1/\rho_1$	0.754	0.724	25.513	0.000

3.4 菏泽市杨树人工林碳储量

利用分类后的专题图及原始影像, 得到各波段灰度值, 通过模型(10) 计算得到菏泽市杨树人工林总生物量为 29.02 Tg, 单位面积生物量为 91.29 t/

析, 选取部分相关性显著的因子, 建立生物量遥感线性和非线性模型(表 3)。在拟合生物量回归模型的过程中发现: 利用单个自变量建立的生物量模型中, 一元线性模型、对数模型、指数模型和幂函数曲线模型的决定系数(R^2) 在 0.197 ~ 0.394 间, 拟合效果较差; 而利用 TM4 的反射率 ρ_4 和 BRIGHT 分别建立的二次曲线方程效果相对较好, 其 R^2 值分别为 0.689 和 0.511。表 3 所列的生物量多元线性或非线性估算模型中, 模型(1) ~ (3) 为线性方程, 其 R^2 值在 0.515 ~ 0.544 间, 拟合效果一般; 剩下 7 个模型均为非线性方程, 除模型(4) ~ (5) 的 R^2 值相对较低, 其余的均在 0.7 以上。由此可见, 一般的线性模型或单因子方程不适合用于估算菏泽市杨树人工林生物量。

综合考虑方程的相关系数、复相关系数、调整相关系数、显著水平及模型独立性检验指标值等, 遴选出模型(10) $B = 1765.412 + 7378.884\ln\rho_4 + 2113.781 \times 1/\rho_4 + 14.541 \times 1/\rho_1$ ($R^2 = 0.754$) 为菏泽市杨树人工林生物量遥感估算最优模型。该模型的 $F = 25.513$, $F > F_{0.01} = 4.68$, 则拟合方程极显著, 方程拟合效果较好, 可用于估算菏泽杨树人工林生物量。

用预留的 13 个样地生物量, 对反演模型的精度进行检验(图 4)。利用已建立的生物量模型, 计算 13 个独立样本的拟合值, 其生物量拟合均值为 90.19 t/hm², 与实测均值 83.78 t/hm² 进行比较, 绝对误差为 6.41 t/hm², 相对误差为 7.65%, 估测结果较为理想。

hm², 乘以实测的菏泽地区杨树平均含碳率 0.48, 得总碳储量为 13.93 Tg, 碳密度为 43.82 t/hm²。图 5 为菏泽杨树人工林生物量空间分布特征, 即碳密度空间分布特征。73.22% 的杨树人工林碳密度小于

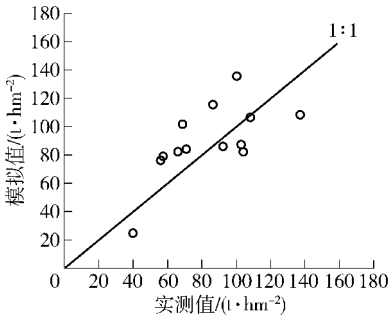


图 4 回归预测值与实际值比较

Fig. 4 Comparison of the simulated values and measured ones of plot biomass

57 t/hm², 且较均匀地分布在 整个 菏泽 地区; 24.62% 的 杨 树 林 碳 密 度 介 于 57 ~ 97 t/hm² 之 间, 集 中 分 布 在 荷 泽 市 北 部、中 南 部 和 东 南 部, 主 要 为 鄆 城 县、郓 城 县, 及 定 陶 县 和 曹 县 交 界 的 地 方, 单 县 南 部 地 区 有 少 量 分 布; 碳 密 度 大 于 97 t/hm² 的 杨 树 林 极 少, 主 要 分 布 在 鄆 城 县 和 巨 野 县, 仅 占 总 面 积 的 2.16%。

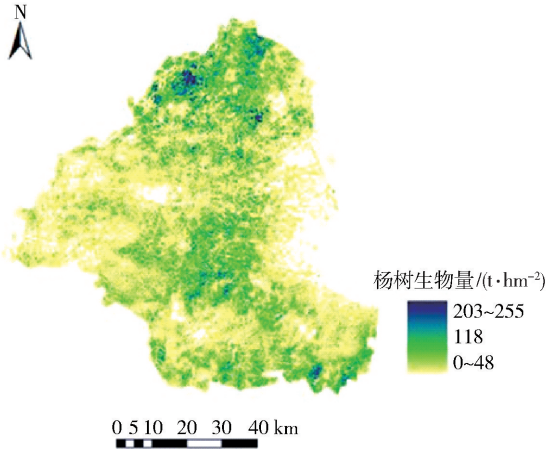


图 5 菏泽市杨树人工林生物量

Fig. 5 Spatial pattern of biomass for poplar plantations in Heze City of Shandong Province

4 结 论 与 讨 论

4.1 结 论

1) 模型 $\ln B = 2.486 \ln D - 2.415$ ($R^2 = 0.879, P < 0.05$) 适用于估算菏泽地区杨树单木生物量, 该模型仅包含胸径一个自变量; 因此, 在后期调查菏泽市杨树人工林生物量时, 可只测量胸径一个指标, 减少外业工作量, 节省时间。

2) 生物量遥感估算多元回归模型 $B = 1765.412 + 7378.884 \ln \rho_4 + 2113.781 \times 1/\rho_4 + 14.541 \times 1/\rho_1$ ($R^2 = 0.754, P < 0.01$) 能较好地估算菏泽市杨树人工林生物量。菏泽市杨树人工林总面积达 31.79 万 hm², 碳储量为 13.93 Tg, 占山东森林

植被总碳储量的 25.39%; 林木碳密度为 43.82 t/hm², 超出全国杨树林平均碳密度 21.82%^[22]; 因此, 菏泽市杨树人工林固碳增汇水平在全国杨树林平均水平之上, 其不仅是该市森林碳汇的主体, 也是山东省森林植被碳汇的重要组成部分。

3) 菏泽市 73.22% 的杨树人工林碳密度小于 57 t/hm², 且较均匀地分布在 整个 菏泽 地区。该部分杨树人工幼林是当地利用杨树固碳增汇的主体, 未来将发挥更大的碳汇作用, 提高菏泽市森林总体碳汇水平。

4.2 讨 论

前人曾分别在江苏、内蒙古和北京等地对小面积集约化经营的杨树人工林的碳储量进行研究, 表明杨树人工林具有较高的固碳水平^[8-11, 23]。本文以鲁西黄泛平原地区典型代表山东省菏泽市为例, 在更大的区域尺度上对杨树人工林的碳储量及其空间分布情况进行研究, 不仅填补了我国区域杨树人工林碳储量研究的空白, 测算结果也充分证明了我国区域杨树人工林固碳增汇的强大能力。Pan 等^[24]利用森林资源清查资料对全球森林碳汇重新进行了评估, 结果表明, 1990—2007 年, 我国森林碳汇增加了 34%, 其中生物碳汇增加近一倍, 其主要原因是国家造林再造林项目下人工造林面积的大幅增加。作为我国人工造林的主要树种之一, 杨树在我国人工林碳汇中占据了重要地位。在全球气候变化备受关注的今天, 继续大力发展杨树速生丰产林, 对提高我国森林总体固碳增汇水平, 增强我国国际竞争力作用巨大。

本文基于遥感技术, 结合地面调查, 采用多元回归分析法, 通过建立生物量非线性回归模型估算菏泽市杨树人工林碳储量。该模型自变量少, 仅含第 1、4 波段光谱反射率 ρ_1 和 ρ_4 , 运算简便, 预测精度相对较高。然而, 本研究也存在若干缺点和需要改进的地方, 具体如下: 1) 样地数量偏少。因外业调查期间菏泽市森林资源二类清查工作正在进行中, 难以获取小班具体数据, 导致未能充分利用二类清查数据。在此后的研究中, 可通过随机抽样调查若干小班目前的生物量和蓄积量, 建立相关方程, 采用生物量转换因子法测算之前的杨树林生物量, 并将两种方法得到的结果进行比较。2) 考虑的遥感指示因子不够全面。后期应结合与森林碳储量相关的气象或土壤等环境因子^[21]进行分析, 有效提高杨树人工林生物量遥感估测模型的精度。3) 应尝试更多不同的研究方法, 并进行对比分析, 选取估算菏泽市杨树人工林碳储量的最优方法。基于遥感估测森林碳储量的方法颇多, 除本研究采用的多元回归分析

法外,人工神经网络法也被国内外学者普遍用于森林碳储量的估算。汪少华等^[16]、张超等^[18]、王立海等^[25]和 Douglas 等^[26]分别采用人工神经网络模拟森林碳储量,拟合精度和预测精度均在 90% 以上。此外,通过数学建模来估算森林碳储量的方法也被广泛采用^[27-28]。4)在提取杨树林信息时,可采用多源数据融合的方法^[29],或在利用中低分辨率影像的同时,购买区域内小范围的多幅高分辨率影像,如 QuickBird、IKONOS 等^[30],对分类进行验证和补充,提高信息提取的准确性。

研究显示,我国杨树人工林年平均生长量可达 $10 \sim 30 \text{ m}^3/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ^[31]。由此可知,杨树人工林的碳储量及碳密度的年动态变化十分明显,且意义重大;因此,在后续的研究中,可对区域杨树人工林碳储量及碳密度的时空动态变化进行深入分析,为在提供大量优质木材、不断促进杨树产业发展的同时,更好地发挥固碳增汇作用奠定良好基础。

参 考 文 献

[1] 国家林业局森林资源管理司. 全国森林资源统计; 第七次全国森林资源清查[G]. 北京: 国家林业局森林资源管理司, 2010:130-218.

[2] 刘文国,张旭东,黄玲玲,等. 我国杨树生理生态研究进展[J]. 世界林业研究,2010,23(1):50-55.

[3] PAUL E H. Planted forests: Poplars[J]. New Forests,1999,17(1):89-93.

[4] 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.

[5] 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.

[6] PIAO S L, FANG J Y, CIAIS P, et al. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China[J]. Nature, 2009, 458: 1009-1013.

[7] LIANG W J, HU H Q, LIU F J, et al. Research advance of biomass and carbon storage of poplar in China[J]. Journal of Forestry Research,2006,17(1):75-79.

[8] 丁杨. 苏北杨树人工林生物量与碳贮量的研究[D]. 南京: 南京林业大学,2008.

[9] 司婧,贾黎明,韦艳葵,等. 地下滴灌对杨树速生丰产林碳储量的影响[J]. 北京林业大学学报,2012,34(1):14-18.

[10] 唐罗忠,生原喜久雄,黄宝龙,等. 江苏省里下河地区杨树人工林的碳储量及其动态[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2004,28(2):1-6.

[11] FANG S Z, LI H L, SUN Q X, et al. Biomass production and carbon stocks in poplar-crop intercropping systems: A case study in northwestern Jiangsu, China[J]. Agroforest System,2010,79(2):213-222.

[12] ZHANG J B, SHANGGUAN T L, MENG Z Q. Changes in soil carbon flux and carbon stock over a rotation of poplar plantations in northwest China[J]. Ecology Research,2011,26(1):153-161.

[13] 张志,田昕,陈尔学,等. 森林地上生物量估测方法研究综述

[J]. 北京林业大学学报,2011,33(5):144-150.

[14] 徐天蜀. 基于遥感信息的森林生物量、碳储量估测技术研究[J]. 林业调查规划, 2008,33(3):11-13.

[15] 何红艳,郭志华,肖文发. 遥感在森林地上生物量估算中的应用[J]. 生态学杂志,2007,26(8):1317-1322.

[16] 汪少华,张茂震,赵平安,等. 基于 TM 影像、森林资源清查数据和人工神经网络的森林碳空间分布模拟[J]. 生态学报, 2011,31(4):998-1008.

[17] 李俊祥,达良俊,王玉洁,等. 基于 NOAA-AVHRR 数据的中国东部地区植被遥感分类研究[J]. 植物生态学报,2005,29(3):436-443.

[18] 张超,彭道黎. 基于 PCA-RBF 神经网络的森林碳储量遥感反演模型研究[J]. 中国农业大学学报,2012,17(4):148-153.

[19] 杨存建,刘纪元,骆剑承. 不同龄组的热带森林植被生物量与遥感地学数据之间的相关性分析[J]. 植物生态学报,2004,8(6):862-867.

[20] 马泽清,刘琪璟,徐雯佳,等. 基于 TM 遥感影像的湿地松林生物量研究[J]. 自然资源学报,2008,23(3):467-478.

[21] 徐小军,周国模,杜华强,等. 基于 Landsat TM 数据估算雷竹林地上生物量[J]. 林业科学,2011,47(9):1-6.

[22] 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,2010:46-50.

[23] 白雪爽,胡亚林,曾德慧,等. 半干旱沙区退耕还林对碳储量和分配格局的影响[J]. 生态学杂志,2008,27(10):1647-1652.

[24] PAN Y, BIRDSEY R A, FANG J Y, et al. A large and persistent carbon sink in the world's forests[J]. Science, 2011(333): 988-993.

[25] 王立海,邢艳秋. 基于人工神经网络的天然林生物量遥感估测[J]. 应用生态学报,2008,19(2):261-266.

[26] DOUGLAS A S, WENDELL P C. Application of remote sensing, an artificial neural network leaf area model, and a process-based simulation model to estimate carbon storage in Florida slash pine plantations[J]. Journal of Forestry Research, 2010,21(2):171-176.

[27] HAME T, SALLI A, ANDERSSON K, et al. A new methodology for the estimation of biomass of conifer-dominated boreal forest using NOAA AVHRR data[J]. International Journal of Remote Sensing,1997,18(15):3211-3243.

[28] SANTOS J R, FREITAS C C, ARAUJO L S, et al. Airborne P-band SAR applied to the aboveground biomass studies in the Brazilian tropical rainforest[J]. Remote Sensing of Environment,2003,87(4):482-493.

[29] 游先祥. 遥感原理及在资源环境中的应用[M]. 北京: 中国林业出版社,2003:322.

[30] SUCHENWIRTH L, FÖRSTER M, CIERJACKS A, et al. Knowledge-based classification of remote sensing data for the estimation of below- and above-ground organic carbon stocks in riparian forests[J]. Wetlands Ecology and Management,2012,20(2):151-163.

[31] 方升佐. 中国杨树人工林培育技术研究进展[J]. 应用生态学报,2008,19(10):2308-2316.