

不同密度杨农复合系统碳贮量研究

韩冰冰¹, 肖正东², 傅松玲^{1*}, 王陆军²

(1. 安徽农业大学林学与园林学院, 合肥 230036; 2. 安徽省林业科学研究所, 合肥 230031)

摘要: 通过皖北地区不同栽植密度的杨树与小麦、大豆等农作物复合的对比试验, 对杨树材积生长量、碳贮量、固碳量及林下作物经济效益等方面综合评价。结果表明, 杨树碳贮量、固碳量及材积生长量之间具有紧密的相关性。杨树总碳贮量增多, 并不意味着单株林木的碳贮量也增大。在试验密度范围内(4 m×6 m、3 m×8 m和2 m×6 m), 以杨树株行距为3 m×8 m的模式综合效益最高, 其单株杨树碳贮量较其他3种模式均有较大提升。

关键词: 碳贮量; 杨农复合系统; 株行距; 综合效益

中图分类号: S758.5

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X(2014)01-0130-06

Research on carbon storage of poplar-crop agroforestry ecosystem with different planting densities

HAN Bingbing¹, XIAO Zhengdong², FU Songling¹, WANG Lujun²

(1. School of Forestry and Landscape Architecture, Anhui Agricultural University, Hefei 230036;

2. Forestry Research Institute of Anhui Province, Hefei 230031)

Abstract: This paper comprehensively studied volume growth, carbon storage, and carbon fixation of poplar. Also the author researched economic benefit of crops on the poplar-crop agroforestry system with three different planting densities in northern Anhui Province. The result showed that relationships among volume growth rate, carbon storage and carbon fixation were significant. However, the increase of total Carbon storage had no significant relationship with the increase in individual poplar. Over three different planting spacing such as 4m×6m, 3m×8m, 2m×6m of poplar, the planting spacing of 3m×8m gained the highest comprehensive benefit and made a great improvement on carbon storage of individual poplar than other two patterns.

Key words: carbon storage; poplar-crop agroforestry ecosystem; planting spacing; comprehensive benefit

森林作为陆地生态系统的主体, 拥有最高的生物量和生产量, 同时也是陆地生态系统的最大碳库, 约80%的地上碳贮量和40%的地下碳贮量发生在森林生态系统中^[1]。随着城市化进程的加快和绿化水平的不断提高, 对群落植被碳贮量的研究受到越来越多的关注。李海玲^[2]和王义祥^[3]等研究了复合生态系统中土壤的固碳潜力。贾小容^[4]等对广州白云山改造后的9种林分的光合固碳和放氧价值进行了评估。管东生^[5]、谢军飞^[6]和吴珊珊^[7]等对城市绿地、城市公园不同群落类型及城市园林树木等碳贮量及固碳潜力进行了估算, 为定量评价植被群落在城市

碳氧平衡中所起的作用提供了数据支持。

近年来, 以杨树-农作物为主的复合生态系统在皖北地区发展十分迅猛, 为当地农民的生产和生活带来了新的契机。本研究通过对不同栽植密度的杨树与小麦、大豆等农作物复合的对比试验, 从杨树材积生长量、碳贮量、固碳量及林下作物经济效益等方面比较分析, 以期为合理确定杨农复合经营模式的栽植密度, 建立高产、优质、高效的复合生态系统提供依据。

收稿日期: 2012-12-20

基金项目: “十二五”农村领域国家科技计划课题“黄淮海平原农区高效可持续农林复合系统调控研究”(2011BAD38B0205)资助。

作者简介: 韩冰冰, 硕士研究生。E-mail: hanbingb12@163.com

* 通信作者: 傅松玲, 博士, 教授, 博士生导师。E-mail: fusongling@ahau.edu.cn

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

试验地设在安徽省砀山县的薛楼工业园 (34°22'N、116°37'E), 地处苏、鲁、豫、皖四省七县交界处, 黄淮海平原的南部。气候界于暖温带和北亚热带之间, 属于季风半湿润气候区。年平均温度 14.1℃, 极端最高温度 41.6℃, 极端最低温度 -19.9℃, 年均降水量 743.3 mm, 年日照时数 2219.1 h, 年无霜期 201 d。境内土壤为黄河泛滥沉积母质所发育的潮土。土层深厚, 水热资源较丰富, 但旱涝灾害时有发生, 且有盐碱危害。

1.2 试验材料

试验材料选用 2025 杨(*Populus deltoides* cv.

'2025')和 I-69 杨(*Populus deltoides* cv. 'Lus')。中林 2025 杨属黑杨派组间杂交种, 树干通直圆满, 顶端优势明显, 具有速生性、抗病性、抗虫性, 是优良的杨树无性系^[8]。I-69 杨又名鲁克斯杨, 其生长快, 轮伐期短^[9], 适应性强, 材质适合做胶合板, 经济效益显著。林下间作农作物春季为小麦 (*Triticum aestivum*), 秋季为大豆 (*Glycine max*)。

1.3 试验设计

试验于 2010 年开始, 选取 4 种不同的杨农复合经营模式, 每种模式下各设 3 个重复。间种期间不再单独对林地进行管理。其中除模式 3 栽种 I-69 杨外, 其余 3 种模式均栽种 2025 杨。4 种模式具体情况见表 1。

表 1 杨农复合经营模式设计简况

Table 1 Plot design of poplar-crop agroforestry pattern

模式 Pattern	树龄/a Tree age	株行距/m×m Planting spacing	杨树品种 Poplar variety	间种作物 Interplanting crop
1	3	4×6	2025	小麦、大豆 Wheat and soybean
2	3	3×8	2025	小麦、大豆 Wheat and soybean
3	3	4×6	I-69	小麦、大豆 Wheat and soybean
4	3	2×6	2025	小麦、大豆 Wheat and soybean

1.4 试验方法

1.4.1 材积生长量 于 2012 年 1 月, 对每种模式的杨树进行每木检尺, 测得平均胸径、树高、冠幅, 计算出杨树单株立木材积、667 m² 材积连年生长量、年均材积生长量。

单株立木材积的计算方法很多, 本研究采用实验形数法计算树木的材积(V)^[10]。公式如下:

$$V = g_{1.3}(H+3)f_{\varepsilon} \quad (1)$$

实验形数 f_{ε} 是根据大量资料的分析而得出的一个经验系数, 它随树高的变化要比胸高形数稳定的多, 大部分树种的 f_{ε} 集中在 0.40~0.44 (为计算方便, 本研究中 f_{ε} 均取 0.40), $g_{1.3}$ 为树高 1.3 m 处的断面积, H 为树高。

1.4.2 碳贮量及固碳量 在参考森林生态系统植物碳贮量估算等方法的基础上^[11], 通过样地分析和遥感调查, 采用如下方程对树木的碳贮量进行估算:

$$Tc = \sum_{i=1}^n V_i \times Di \times Ri \times Ci \times N_i \quad (2)$$

式中, i 为树木类型 (分为乔木、灌木、其他), Tc 为树木总碳贮量(t), N_i 为 i 类型树木数量, V_i 为 i 类型树干材积量 (m³), Di 为树干密度 (t·m⁻³), Ri 为生物量扩展系数 (即树干生物量占树木总生物量

的比例) (见表 2), Ci 为植物中 C 含量 (该值在不同植物间变化不大, 为方便起见, 本研究采用 IPCC 缺省值 0.50^[12])。

在得到树木总碳贮量的基础上, 根据碳贮量与固碳量之间的相互关系^[14-15], 采用方程(3)对树木固碳量进行计算:

$$Ts = 7.785 \times 10^{-3} \times Tc \quad (3)$$

式中, Ts 为树木固碳量, Tc 为树木碳贮量。

表 2 计算碳贮量所用的树木参数^[6]

Table 2 Parameters of tree for computation of carbon storage

树木类型 Tree type	平均树干材积 密度/t·m ⁻³ Average density of trunk volume	平均生物量扩展 系数 R Average biomass extensive coefficient
乔木 Tree	0.440	2.01
灌木 Shrub	0.515	1.75
其他 Else	0.472	1.98

注: 平均树干材积密度来源于中国主要树种中的木材密度^[13], 生物量扩展系数值参考“气候公约谈判对策研究”课题的相关结果。

Note: The average density of trunk volume takes root in the chief species' density of wood in China, and the average biomass extensive coefficient refers to the related result.

1.4.3 经济效益 由于人工造林的年限较短, 没有

产生木材的直接收益,故本次评价各模式的单位面积经济效益时,均不包含林木采伐后的木材收益,仅计算当年能够产生经济收益的农产品的产值。

1.5 数据处理

试验数据由 Excel 2003 进行统计,用 SPSS17.0 统计软件进行 Pearson 相关性分析及 ANOVA 差异显著性分析。利用模糊数学隶属函数法对不同密度杨农复合模式进行综合评估,公式如下:

$$X(u) = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (4)$$

式中, X: 某种模式某一指标测定值; X_{\max} : 所有模式某一指标测定值的最大值; X_{\min} : 所有模式某一指标测定值的最小值。

2 结果与分析

2.1 不同密度复合模式对杨树材积生长量的影响

在森林经理工作中,材积生长量既是预测森林资源消长规律的主要因子,又是评价林地生产力和

经营措施效果的重要指标。由表 3 可知,株行距为 3 m × 8 m 的模式 2 测得杨树的胸径和树高值均最高,与其他 3 种模式的杨树相比,差异显著,但其单位面积杨树的年均材积生长量并非最高,落后于株行距为 2 m × 6 m 的模式 4,但二者差异不显著(见图 1)。4 种模式单位面积杨树的年均材积生长量排列顺序依次为: 2 m × 6 m (2025 杨) > 3 m × 8 m (2025 杨) > 4 m × 6 m (I-69 杨) > 4 m × 6 m (2025 杨)。

与其他 3 种模式相比,模式 4 的杨树林分密度最大,尽管杨树的胸径、树高值最低,但以多取胜,使得单位面积内杨树的年均材积生长量最高。此外,2 m × 6 m 的株行距可以充分发挥边行杨树的生长优势,科学合理地利用光能,达到较好的通风透光作用^[16]。模式 1 和模式 3 的杨树株行距相同,均为 4 m × 6 m,但由于杨树的品种不同,材积生长量也有差异。其中,模式 1 的杨树年均材积生长量最低,较模式 4 降低了 78%,差异显著。相比 2025 杨,I-69 杨的速生性更强,短期内能创造更多的效益。

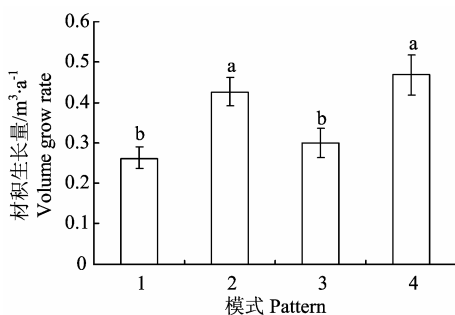
表 3 不同密度复合模式杨树生长量调查

Table 3 Growth rates of poplar in agroforestry ecosystem with different densities

模式 Pattern	杨树品种 Poplar variety	株行距/m×m Planting spacing	胸径/cm Mean DBH	树高/m Mean height	东西冠幅/m Canopy diameter in east west direction	南北冠幅/m Canopy diameter in south north direction
1	2025	4×6	7.67±1.09 ^b	7.52±0.87 ^b	3.1±0.25 ^a	3.0±0.10 ^a
2	2025	3×8	9.76±1.32 ^a	8.56±0.94 ^a	3.1±0.25 ^a	3.0±0.10 ^a
3	I-69	4×6	7.86±0.97 ^b	7.46±0.81 ^b	3.1±0.25 ^a	3.0±0.10 ^a
4	2025	2×6	7.27±0.73 ^b	7.35±0.52 ^b	3.1±0.25 ^a	3.0±0.10 ^a

注:表中数据为平均值±标准误差,具有相同字母的处理没有达到显著性检验($P<0.05$)。

Note: Data of the table represent average value ± standard error, and those with the same letters are not significantly different ($P<0.05$).



具有相同字母的处理没有达到显著性检验($P<0.05$)。下同
The same letters are not significantly different ($P<0.05$).

The same below

图 1 不同密度复合模式对杨树材积生长量影响

Figure 1 Effects of agroforestry pattern with different densities on poplar volume growth rate

2.2 不同密度复合模式对杨树碳贮量及固碳量的影响

森林作为全球陆地生态系统中的最大有机碳

库,树木在其中扮演了重要的碳汇角色,通过光合作用对 C 的固定,一定程度上能有效减缓大气中 CO₂ 浓度的增加^[7]。因此,对林木碳贮量及固碳量的研究,是环境质量改善的重要措施。由图 2 可以看出,株行距为 2 m × 6 m 的模式 4 单位面积杨树的总碳贮量及固碳量均最高,较小的株行距使得单位面积杨树林分密度增加,植物的总碳贮量及固碳量也随之增大。4 种模式的杨树总碳贮量及固碳量排列顺序依次为: 2 m × 6 m (2025 杨) > 3 m × 8 m (2025 杨) > 4 m × 6 m (I-69 杨) > 4 m × 6 m (2025 杨),且各模式之间差异显著。

单位面积的碳贮量增多,并不意味着单株林木的碳贮量也增大(见图 3)。这主要与林分密度有关。杨树属于速生树种,生长较快,较小的株行距在一定程度上会阻碍杨树的正常发展。模式 2 (株行距为 3 m × 8 m) 杨树的总碳贮量及固碳量虽略低于模

式 4 (株行距为 $2\text{ m} \times 6\text{ m}$), 但其单株杨树的碳贮量较模式 4 提高了 102.5%, 较模式 3 和模式 1 也分别提高了 44.7% 和 71.7%, 具有较大的发展潜力。

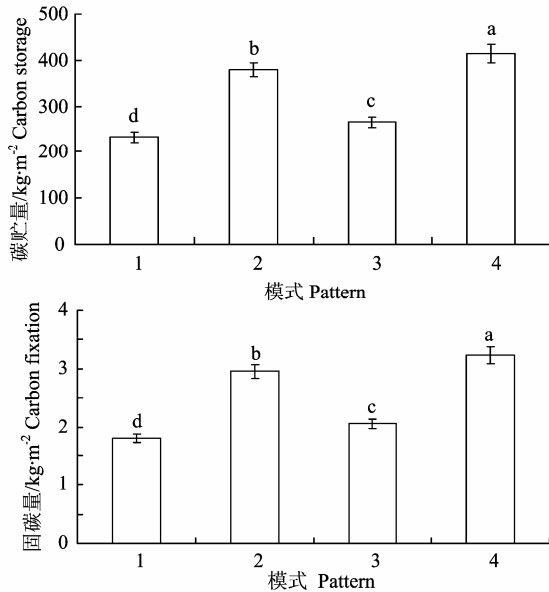


图 2 不同密度复合模式对杨树碳贮量及固碳量的影响
Figure 2 Effects of agroforestry pattern with different densities on poplar carbon storage and carbon fixation

2.3 不同密度复合模式对林下作物经济效益影响

经济效益的大小直接影响着人们生产劳动积极性, 也是衡量杨农复合经营生产方式好坏优劣最直观、最有效的价值尺度。本研究通过对 4 种模式下各样地的抽样调查, 发现间种作物对杨树的生长没有造成明显的不利影响, 林分生长正常。由图 4 可知, 4 种模式中, 产投比最高的是模式 2, 杨树株行距为 $3\text{ m} \times 8\text{ m}$ 。较低的年均成本和较高的林下作物产值, 带来年均纯收入的显著增长。4 种模式的年均产值和年均纯收入呈显著性差异, 产投比的排列顺序依次为: $3\text{ m} \times 8\text{ m}$ (2025 杨) $>$ $4\text{ m} \times 6\text{ m}$ (2025 杨) $>$ $4\text{ m} \times 6\text{ m}$ (I-69 杨) $>$ $2\text{ m} \times 6\text{ m}$ (2025 杨)。

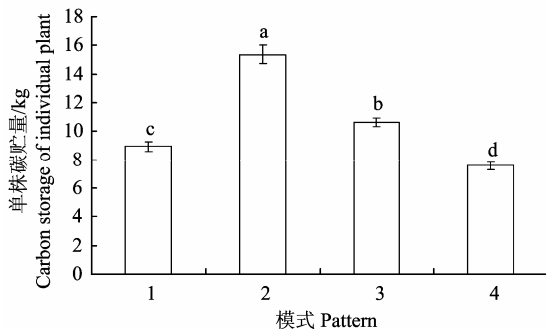


图 3 不同密度复合模式对杨树单株碳贮量影响
Figure 3 Effects of agroforestry pattern with different densities on poplar carbon storage of individual plant

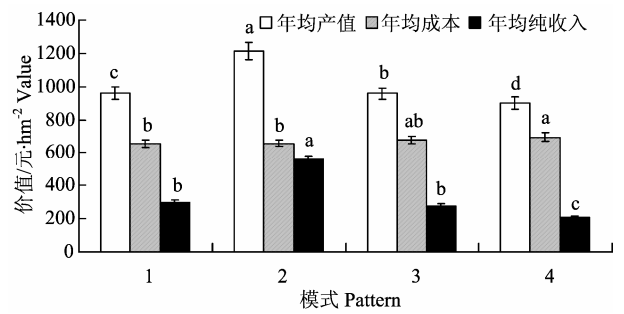


图 4 不同密度杨农复合系统经济效益比较
Figure 4 The comparisons of economic benefit in poplar-crop agroforestry ecosystem with different densities

林下作物产值与杨树的株行距有很大的关系。随着杨树株行距增大, 林下作物的年均产值增加。由于杨树属于速生树种, 生长较快, 树冠对阳光的遮挡一定程度上影响了农作物的生长和产量。这种情况下, 株行距较大的林下作物将有可能获得更多的光照, 对作物产量的增加起到一定的促进作用。

相同的林分密度下, 杨树的品种不同, 产投比也不尽相同。模式 1 和模式 3 杨树的林分密度相同, 林下作物的年均产量相差不多, 但模式 3 的年均成本高于模式 1, 故年均纯收入也低于模式 1。这可能是因为模式 3 种植的 I-69 杨具有高速生长的优势, 在林木生长期间较之 2025 杨需要更多的成本投入。但 I-69 杨的速生性更强, 且材质适合做胶合板, 经济效益显著, 在后期也许会给经营者带来一笔不小的收入。

2.4 杨农复合系统碳贮量与固碳量、材积生长量、经济效益等的关系

相关分析结果表明 (见表 4), 胸径、树高作为林木最基本的生长指标, 两者之间存在极显著的正相关 ($P < 0.01$), 且与单株林木碳贮量、年均产值、年均纯收入之间均存在极显著的正相关关系 ($P < 0.01$), 相关程度依次为: 年均纯收入 $>$ 年均产值 $>$ 单株碳贮量, 与碳贮量、固碳量、材积生长量之间不存在显著的相关性。胸径、树高与年均成本之间存在负相关的关系, 但不显著。碳贮量与固碳量、材积生长量之间也达到了极显著的正相关关系 ($P < 0.01$)。单株碳贮量与年均产值、年均纯收入之间均存在极显著正相关 ($P < 0.01$)。其他指标之间不存在显著的相关性。

2.5 不同密度杨农复合系统综合比较

采用隶属函数法对每种模式各指标的隶属函数值进行计算、排序, 结果如图 5 所示。4 种模式中, 隶属函数平均值最高的是模式 2 (0.8124), 其株行

距为 3 m×8 m，与其他 3 种模式差异显著。4 种模式的排列顺序分别为：3 m×8 m（2025 杨）>2 m×6 m（2025 杨）>4 m×6 m（I-69 杨）>4 m×6 m（2025 杨）。可见，同等条件下，杨树株行距为 3m×8m 的复合模式经济、生态效益最高，能为经营

者带来更多的福利。此外，复合模式下的 I-69 杨潜力更大，在杨树材积生长量、碳贮量、固碳量等方面相较 2025 杨都有所提升，虽然林下作物的经济效益略低于 2025 杨，但林木本身的经济价值同样值得期待。

表 4 杨农复合系统碳贮量与固碳量等指标间的相关性分析结果

Table 4 The result of correlation analysis between carbon storage with carbon fixation and other parameters in poplar-crop agroforestry ecosystem

指标 Parameter	胸径 DBH	树高 Height	碳贮量 Carbon storage	固碳量 Carbon fixation	单株碳贮量 Carbon storage of individual plant
胸径 DBH	1				
树高 Height	0.947**	1			
碳贮量 Carbon storage	0.182	0.281	1		
固碳量 Carbon fixation	0.175	0.299	0.989**	1	
单株碳贮量 Carbon storage of individual plant	0.932**	0.936**	0.143	0.135	1
材积生长量 Volume growth rate	0.209	0.239	0.952**	0.932**	0.143
年均产值 Average production value per year	0.953**	0.952**	0.222	0.220	0.957**
年均成本 Average cost per year	-0.453	-0.546	0.410	0.325	-0.463
年均纯收入 Average net income per year	0.958**	0.954**	0.148	0.155	0.949**

指标 Parameter	材积生长量 Volume growth rate	年均产值 Average production value per year	年均成本 Average cost per year	年均纯收入 Average net income per year
胸径 DBH				
树高 Height				
碳贮量 Carbon storage				
固碳量 Carbon fixation				
单株碳贮量 Carbon storage of individual plant				
材积生长量 Volume growth rate	1			
年均产值 Average production value per year	0.256	1		
年均成本 Average cost per year	0.499	-0.454	1	
年均纯收入 Average net income per year	0.185	0.984**	-0.491	1

注：**相关显著性水平：P<0.01。Note: ** means significant difference at P<0.01.

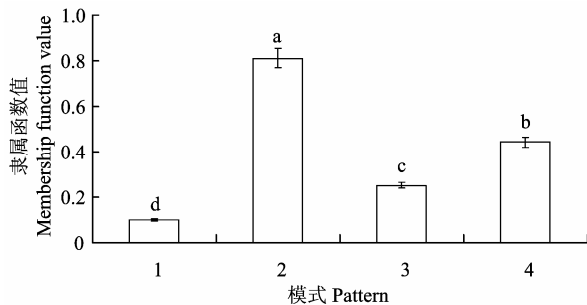


图 5 不同密度杨农复合系统隶属函数值

Figure 5 Membership function value of poplar-crop agroforestry ecosystem with different densities

3 小结与讨论

作为一种有效的土地利用方式，农林复合经营模式能够有效提高单位面积土地、资源利用率，创

造出比纯林经营更高的生产力。但若林分密度选择不当，将直接影响到林分的生产力和功能的发挥。本文通过对不同密度杨农复合系统经济效益、生态效益等各项指标的研究发现，杨树碳贮量、固碳量及材积生长量之间具有紧密的相关性，随着杨树株行距的减小，林分密度增加，单位面积杨树的碳贮量、固碳量及材积生长量也随之增大。本研究中，3 年生的杨树总碳贮量在 232.63~414.98 kg·m⁻² 之间，低于同为复合生态系统里 6 年生的杨树碳贮量（4.45~7.62 t·hm⁻²）^[2]。原因可能是农林复合系统对地上部分植被碳贮量的影响，随着时间的推移碳截获能力明显增强，碳循环周期由原来的 1 年变为多年^[17]。

单位面积的碳贮量增多，并不意味着单株林木

的碳贮量也增大。株行距为 $3\text{ m} \times 8\text{ m}$ 的复合模式中杨树的碳贮量及固碳量虽略低于株行距为 $2\text{ m} \times 6\text{ m}$ 的模式, 但其单株杨树的碳贮量较之提高了 102.5%, 适合长久发展。在相对一致的管理水平下, 不同的林分密度造成复合模式产投比的差异。即使是相同的林分密度, 产投比也不尽相同, 主要与杨树的品种差异有关。

本研究中以株行距为 $3\text{ m} \times 8\text{ m}$ 的杨农复合模式碳贮量及综合效益最高, 这种宽窄行的株行距可以充分发挥边行杨树的生长优势, 便于杨树生长期的各项管理(如施肥、锄草、喷施农药等)^[16], 有利于提高生态系统的总体效果, 保持复合结构的稳定性和系统的良性循环^[18]。

参考文献:

- [1] 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, 2009.
- [2] 李海玲, 陈乐蓓, 方升佐, 等. 不同杨-农间作模式碳储量及分布的比较[J]. 林业科学, 2009, 45(11): 9-14.
- [3] 王义祥, 王峰, 翁伯琦, 等. 果园生草模式土壤固碳潜力—以福建省为例[J]. 亚热带农业研究, 2010, 6(3): 189-192.
- [4] 贾小容, 曾曙才, 苏志尧. 广州白云山 9 种林分光合固碳放氧价值核算[J]. 广东林业科技, 2006, 22(2): 19-21.
- [5] 管东生, 陈玉娟, 黄芬芬. 广东城市绿地系统碳的贮存、分布及其在碳氧平衡中的作用[J]. 中国环境科学, 1998, 18(5): 437-441.
- [6] 谢军飞, 李玉娥, 李延明, 等. 北京城市园林树木碳贮量与固碳量的研究[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(3): 5-7.
- [7] 吴珊珊, 张赧齐, 王陆军, 等. 合肥环城公园不同群落类型碳储量[J]. 南方农业学报, 2010, 4(8): 44-48.
- [8] 张晓婷, 胡飞, 张玲丽. 2025 杨树伐根萌芽更新与植苗造林的效果研究[J]. 现代农业科技, 2011, 2: 237-239.
- [9] 杨世桦, 杨承栋, 董玉红, 等. 1-69 杨人工林养分循环的研究[J]. 林业科学研究, 2013, 26(1): 1-7.
- [10] 白净, 杨华, 白书玮. 单株立木材积测定方法研究综述[J]. 科技博览, 2009(11): 98-99.
- [11] 王效科, 冯宗炜. 中国森林生态系统中植物固定大气碳的潜力[J]. 生态学杂志, 2000, 19(4): 72-74.
- [12] IPCC. Land-use change and forestry[C]//Revised 1996 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Workbook, 1996: 53.
- [13] 中国林业科学研究院木材工业研究所. 中国主要树种的木材物理力学性质[M]. 北京: 中国林业出版社, 1982.
- [14] Whitford V, Ennos A R, Handley J F. "City form and natural process"—indicators for the ecological performance of urban areas and their application to Merseyside[M]. UK: Landscape and Urban Planning, 2001, 57: 91-103.
- [15] Rowntree R A, Nowak D. Quantifying the role of urban forests in removing atmospheric carbon dioxide[J]. Arbor, 1991, 17: 269-275.
- [16] 齐忠武. 杨树林分密度对材积生长量的影响[J]. 林业科技开发, 2004, 18(2): 34-35.
- [17] Kaur B, Gupta S R, Singh G. Soil carbon, microbial activity and nitrogen availability in agroforestry systems on moderately alkaline soils in northern India[J]. Applied Soil Ecology, 2000, 15(3): 283-294.
- [18] 方升佐, 黄宝龙, 徐锡增. 高效杨树人工林复合经营体系的构建与应用[J]. 西南林学院学报, 2005, 15(4): 36-41.