

文章编号: 1001-7380(2015)03-0028-04

# 杨农复合经营系统碳储量及其分布特征研究

江浩, 季永华\*, 王磊, 张亚楠

(江苏省林业科学研究院, 江苏 南京 211153)

**摘要:** 以杨树纯林和杨农复合林2种生态系统为研究对象, 对林木、农作物(林下植被)、土壤、凋落物各组分的碳储量进行比较研究。结果表明, 杨树纯林和杨农复合林的碳储量分别为 $(101.59 \pm 8.1)$ 、 $(116.65 \pm 10.3)$  t/hm<sup>2</sup>。在2个生态系统中林木及土壤碳储量均占总量的90%以上。杨农复合林凋落物和林下植被碳储量所占比例约为6%, 是杨树纯林的2倍。林木碳储量、农作物(林下植被)碳储量均为杨农复合林较高; 杨农复合林土壤碳储量仅在中间层(10~25、25~50 cm)显著高于杨树纯林; 凋落物碳储量2者之间差异不显著。相对纯林, 农林复合系统具有较高的吸收和固碳能力。

**关键词:** 杨树; 杨农复合生态系统; 土壤; 碳储量; 分布特征

中图分类号: S792.11 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1001-7380.2015.03.007

## Carbon storage and distribution in poplar and poplar-crop intercropping forests

JIANG Hao, JI Yong-hua\*, WANG Lei, ZHANG Ya-nan

(Jiangsu Academy of Forestry, Nanjing, 211153, China)

**Abstract:** Carbon storage and distribution in poplar and poplar-crop intercropping forests were studied in Dafeng Farm, north of Jiangsu Province. We concluded that the carbon storages of poplar and poplar-crop agro-forestry ecosystem were  $(101.59 \pm 8.1)$  and  $(116.65 \pm 10.3)$  t/hm<sup>2</sup> respectively. And the soil and wood carbon storage were more than 90% of the total in both ecosystems. The carbon storage of undergrowth vegetations and litter-fall was about 6% in poplar-crop agro-forestry ecosystem, twice of that in poplar forest. There was significant difference in soil carbon storage between poplar and poplar-crop agro-forestry ecosystem within the soil layers 10~25 and 50~100 cm. Carbon storages in the harvested parts (woods and undergrowth vegetations) of poplar forest were significantly lower than that in poplar-crop agro-forestry ecosystem. The carbon return in litter-fall showed no differences between two ecosystems. The results showed the agro-forestry ecosystem had relatively a high potential in carbon absorption and sequestration.

**Key words:** Poplar; Agro-forestry ecosystem; Soil; Carbon storage; Distribution

陆地植被具有强大的固碳功能, 是目前应对全球气候变化最经济、最有效的途径。森林生态系统植被碳储量约占全球植被碳库的86%以上, 林下土壤碳储量占全球碳库的73%左右<sup>[1]</sup>。

林农复合生态系统是通过空间布局或时间安排, 将多年生木本植物精心地用于农作物和(或)家畜所用的土地类型经营单元内, 使其形成各组分间

在生态上和经济上具有相互作用的土地利用系统和技术系统的集合<sup>[2]</sup>。林农复合经营可使土地及其空间的光、热、水得到更加充分的利用。近年来, 关于农林复合经营系统在固碳以及减缓温室效应中的作用已经越来越多地引起人们的重视<sup>[3-6]</sup>。有研究指出, 农林复合经营比单一作物经营的固碳能力更强。据估计, 农林复合经营系统中地上部分的碳储

收稿日期: 2015-03-19; 修回日期: 2015-04-02

基金项目: 江苏省林业三新工程项目“江苏杨树农田林网更新改造技术集成示范与推广”(LYSX[2015]04); 江苏省林业科学研究院青年基金项目“杨树纯林及杨农复合生态学碳汇功能研究”(JAF-2012-3)

作者简介: 江浩(1983-), 男, 江苏扬州人, 博士, 主要从事森林生态研究。

\* 通信作者: 季永华(1966-), 男, 江苏如东人, 研究员, 学士, 从事生态系统研究。E-mail: 327955393@qq.com。

量平均在 40 ~ 150 t/hm<sup>2</sup> 之间<sup>[7]</sup>。杨树(*Populus sp*) 作为一类分布广泛、适应性强、生长迅速的树种,具有耐水、耐寒、成活率高、速生、用途广、经济效益高的特点,在农田林网、农林间作等农林复合经营中起着重要的作用。江苏省苏北地区杨树得到了大面积的推广,杨农复合生态系统也成为了苏北平原区广泛存在的经营模式。

目前,国内研究主要集中在不同林农复合经营模式的水土保持功能、养分循环、光照和水分竞争、立地生产力和经济效益等方面<sup>[8-9]</sup>,而对其固碳方面的研究相对较少。这就使得对其碳储量及分布特征的研究显得十分重要。本研究选择江苏北部已有大面积栽植的杨树纯林和典型杨农复合林为研究对象,以生态系统为整体对其碳储量及动态进行研究,并相互对比,为我国碳储量的估算及全球碳循环研究提供参考。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究地概况

研究区域位于江苏省盐城市境内的大丰林场内。大丰林场地处大丰市东南部,建于 1959 年,有林地 2 467 hm<sup>2</sup>,属于亚热带与暖温带的过渡地带,季风显著,雨热同期,常年平均气温 14.5 °C,无霜期 299 d,常年降水量 751.0 mm,日照 2 325.4 h。土壤为脱盐草甸土,土壤质地为沙质土壤,土壤 pH 偏碱性。

本研究选择立地条件和林分密度基本一致的 5 年生杨树纯林和杨农复合林(套种棉花)为研究对象,样地坐标为 N32°59'52"; E120°48'29"。每种林型选择 3 个重复样地,每个样地大小为 25 m × 25 m。试验材料均为 35 杨(*Populus deltoides* CL '35/66'),株行距 7 m × 5 m。

### 1.2 测定内容及方法

1.2.1 杨树生物量及碳储量测定 于 2013 年 9 月采用每木调查法,测量胸径、树高后计算杨树各器官生物量<sup>[10-11]</sup>:

$$W_S = 0.074\ 046 (D^2 H)^{1.065\ 9}$$

$$W_B = 0.004\ 177\ 3 (D^2 H)^{0.991\ 1}$$

$$W_L = 0.071\ 532 (D^2 H)^{0.448\ 9}$$

$$W_R = 0.055\ 106 (D^2 H)^{0.706\ 1}$$

$$W_T = W_S + W_B + W_L + W_R$$

式中  $D$  为胸径  $H$  为树高。 $W_S$  为干生物量, $W_B$  为枝生物量, $W_L$  为叶生物量, $W_R$  为根生物量, $W_T$  为

全树生物量。

根据生物量计算单株杨树固碳量:

$$D_T = W_T \times 0.446^{[12]}$$

1.2.2 农作物生物量及碳储量测定 以样地单位面积生物量估算农作物生物量,设置 1 m × 1 m 小样方,每个样地选取 5 个点,全收割采样后带回实验室处理,烘干至恒重,推算农作物生物量,并于实验室采用重铬酸钾氧化法测算含碳量。杨树纯林同期同样选取样方,采集地表林下植株,同农作物进行相同处理测算。

1.2.3 土壤碳储量的测定 于 2013 年 9 月采用常规土钻法取样测算。每个样地内随机选取 3 个点取样,分别为 0 ~ 10, 10 ~ 25, 25 ~ 50, 50 ~ 100 cm 分层取样,带回实验室按照国家标准 GB7830 - 87 进行风干、研磨、过筛和混合分样,重铬酸钾氧化法测算土壤碳含量。同时在采样地点附近挖取剖面,按照上述分层用环刀法测算土壤容重及密度。

土壤层碳储量按照下式计算:

$$S_i = C_i \times d_i \times D_i \times 100$$

其中  $i$  为土壤层次, $S_i$  为第  $i$  层次土壤碳储量, $C_i$  为第  $i$  层的土壤碳含量, $d_i$  为第  $i$  层的土壤密度, $D_i$  为第  $i$  层的土壤厚度。

1.2.4 凋落物生物量及含碳量的测定 于 2013 年 3 月开始采用常规采集法取样测算。在每个样地中设置 5 个 1 m × 1 m 的凋落物收集网,每月收集 1 次凋落物,称量并带回实验室处理,烘干至恒重,推算凋落物生物量,重铬酸钾氧化法测算含碳量。

1.2.5 数据处理 采用 SPSS13.0 统计分析软件对测定数据进行方差分析及回归分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 杨树生物量及碳储量

林木碳储量与林木生物量密切相关。根据测算,杨树纯林和杨农复合林的林木生物量分别为 (113.3 ± 14.2), (127.0 ± 13.3) t/hm<sup>2</sup>,折算为碳储量分别为 (52.7 ± 6.6), (59.1 ± 6.2) t/hm<sup>2</sup> (见表 1)。杨农复合林林木生物量和碳储量高于杨树纯林,但并未表现出显著差异 ( $P > 0.05$ )。2 种模式各器官生物量大小顺序均为干 > 枝 > 根 > 叶,树干部分生物量占杨树总生物量的比例最大,约占总生物量的一半多。碳储量在杨树不同器官中的分配比例与生物量成正比,亦为树干所占比例最高。

表1 不同模式杨树不同器官生物量及碳储量估算 t/hm<sup>2</sup>

器官	杨树纯林		杨农复合林	
	生物量	碳储量	生物量	碳储量
叶	12.6 ± 1.3	5.9 ± 0.5	14.1 ± 1.2	6.6 ± 0.3
枝	20.3 ± 1.9	9.4 ± 0.8	22.8 ± 2.5	10.6 ± 1.3
干	63.4 ± 5.8	29.5 ± 2.3	71.1 ± 6.9	33.1 ± 3.0
根	17.0 ± 1.3	7.9 ± 1.0	19.0 ± 2.0	8.8 ± 1.0
总计	113.3 ± 14.2	52.7 ± 6.6	127.0 ± 13.3	59.1 ± 6.2

## 2.2 农作物生物量及碳储量

在秋季对杨农复合模式林下进行农作物收割,测算得出其生物量为(3.56 ± 0.41) t/hm<sup>2</sup>,碳储量为(1.85 ± 0.05) t/hm<sup>2</sup>。杨树纯林林下植被较少,经测算生物量仅为(0.63 ± 0.09) t/hm<sup>2</sup>,碳储量为(0.35 ± 0.05) t/hm<sup>2</sup>。杨农复合模式下林下植被碳储量为杨树纯林的6~7倍。

## 2.3 土壤碳含量及碳储量

土壤碳库在整个生态系统碳库中占有非常重要

的地位,主要来源于动植物残体和枯枝落叶等微生物分解转化和化学淋溶的长期过程。杨树纯林和杨农复合生态系统整个土壤层碳含量及储量均表现出表层土较高,且随土壤深度的增加而降低的趋势(见表2)。杨树纯林土壤碳储量由表层0~10 cm的(18.72 ± 0.22) t/hm<sup>2</sup>降低至50~100 cm层的(5.97 ± 0.06) t/hm<sup>2</sup>;杨农复合林的土壤碳储量则由0~10 cm层的(21.11 ± 0.32) t/hm<sup>2</sup>降低至50~100 cm层的(6.18 ± 0.06) t/hm<sup>2</sup>。2种模式同一层次间碳含量和碳储量差异随层次变化而变化(见表2)。在表层(0~10 cm)及深层(50~100 cm)的土壤层间,杨树纯林和杨农复合林的土壤碳含量和碳储量并未表现出显著差异( $P > 0.05$ );而在中间层(10~25 cm和25~50 cm)杨树纯林土壤碳含量和碳储量则显著低于杨农复合林( $P < 0.05$ )。

表2 不同模式土壤碳含量和碳储量

土壤深度/cm	杨树纯林		杨农复合林	
	碳含量/%	碳储量/(t/hm <sup>2</sup> )	碳含量/%	碳储量/(t/hm <sup>2</sup> )
0~10	13.28 ± 0.16 a	18.72 ± 0.22 A	14.97 ± 0.27 a	21.11 ± 0.32 A
10~25	10.15 ± 0.11 a	14.60 ± 0.18 A	11.88 ± 0.15 b	16.45 ± 0.21 B
25~50	5.10 ± 0.11 a	7.22 ± 0.14 A	6.55 ± 0.08 b	8.44 ± 0.10 B
50~100	4.19 ± 0.07 a	5.97 ± 0.06 A	4.25 ± 0.03 a	6.18 ± 0.06 A

字母A(a)、B(b)表示同一土壤层间在0.05水平下差异显著。

## 2.4 凋落物碳储量

杨树凋落物四季均有,主要有落叶、小枝及其他物质,其中以落叶为主。以全年来看,生长期初期(4~6月)凋落较少,处于生长旺季的7月开始,凋落物明显增多,并且凋落物掉落主要集中在9~11月的杨树落叶期。凋落物的碳储量与其生物量密切相关。经测定,杨树纯林和杨农复合林调查样地内凋落物碳含量分别为(48.0 ± 0.12)%和(48.2 ± 0.15)% ,并未表现出显著差异;凋落物碳储量分别为(1.75 ± 0.11) ,(1.81 ± 0.11) t/(a · hm<sup>2</sup>) ,差异不显著。

## 2.5 杨树纯林及杨农复合生态系统碳储量

本研究的杨树纯林及杨农复合生态系统碳储量主要包括土壤(0~100 cm)、林木、林间农作物(林下植被)、凋落物4个部分。杨树纯林和杨农复合林的碳储量分别为(101.59 ± 8.1) ,(116.65 ±

10.3) t/hm<sup>2</sup>。杨树纯林中杨树和土壤的碳储量占其总储量的95%以上,凋落物和林下植被仅占3%左右。杨农复合生态系统中杨树碳储量约占其总量的50%,土壤碳储量占其总量的44%左右,其中凋落物和农作物约占其总量的6%,该比例是杨树纯林的2倍。

## 3 讨论与结论

当前杨农复合生态系统的大量研究集中在复合经营模式的三维空间配置、潜在生产力、资源利用效率、稳定性和经济效益等方面,主要探讨杨农复合经营的结构设计及其设计原理<sup>[8,13-14]</sup>。本文以杨树纯林和杨农复合林2种生态系统为研究对象,初步探讨了生态系统内部各组分的碳储量及分布比例。

农林复合系统对地上部分植被碳储量的影响随时间的推移而变化。农林复合生态系统在一定程度

上影响了农作物的产量及碳储量,但就整个复合经营系统而言,生物生产力将大大提高<sup>[15]</sup>。在本研究中,杨农复合经营生态系统中农作物(林下植被)和凋落物碳储量显著增高,是杨树纯林的2倍。有研究指出,农林复合生态系统中的物质循环和能量循环显著区别于纯林生态系统,农林复合生态系统具有更高的光截获率<sup>[16]</sup>、更低的蒸腾需水量及耗水量<sup>[17]</sup>。与杨树纯林生态系统相比,农林复合生态系统中能量和物质输入增加,消耗减少,碳循环周期也由原来的1 a变为多年,碳截获能力明显增强<sup>[18]</sup>,碳储量显著增高。

土壤是陆地生态系统碳储量的重要组成部分。本研究中土壤碳储量表现出表层较高,随土壤深度的增加而降低的趋势,与他人研究成果一致<sup>[19]</sup>。鉴于杨农复合林和杨树纯林相比,中间土壤层间(10~25, 25~50 cm)碳储量显著增加,表层(0~10 cm)及深层(50~100 cm)的差异都不显著,故认为土壤碳主要来源为动植物、微生物残体及其排泄物和分泌物并处在一种不断分解和合成的动态过程中<sup>[20]</sup>。地表枯落物、土壤动物和微生物及植物根系对其形成有着重要的影响。当林木与农作物复合时,根系相互影响,对土壤中水分和养分的利用发生改变<sup>[21]</sup>。林木通过细根周转向作物输送氮素和有机质,同时根系对水分的吸收也会降低排水,从而影响养分的淋溶率<sup>[22]</sup>,导致杨农复合林土壤中间层碳储量增加。也有研究指出,农林复合经营后土壤碳储量虽然增加,但农作物有可能发生减产。在银桦-玉米复合系统中,银桦和玉米根系生长发生了竞争,导致玉米的产量减少了近40%<sup>[23]</sup>。农林复合经营的物种选择需要考虑到多方面的作用。

#### 参考文献:

- [1] 刘国华,傅博杰,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.
- [2] 娄安如. 农林复合生态系统简介[J]. 生物学通报, 1995, 30(5): 9-10.
- [3] Makundi W R, Sathaye J A. GHCG mitigation potential and cost in tropical forestry—relative role for agroforestry systems [J]. Environment, Development and Sustainability, 2004, 6(1): 235-260.
- [4] Sharrow S H, Ismail S. Carbon and nitrogen storage in agroforests, tree plantations, and pastures in Western Oregon, USA [J]. Agroforestry System, 2004, 60(2): 123-130.
- [5] Takimoto A, Nair P K R, Nair V D. Carbon stock and sequestration potential of traditional and improved agroforestry systems in the

- West African Sahel [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2008, 125(1): 159-166.
- [6] Schoeneberger M M. Agroforestry: working trees for sequestering carbon on agricultural lands [J]. Agroforestry System, 2009, 75(1): 27-37.
- [7] IPCC. IPCC Guidelines for National Greenhouses Gas Inventories. 2007.
- [8] 方升佐,徐锡增,余相. 杨-小麦复合经营模式的立地生产力及经济效益评价[J]. 林业科学, 2004, 40(3): 88-95.
- [9] 许翠,隋鹏,谢光辉. 杨农复合种植模式土壤水分效应及生产力分析[J]. 中国农业科学, 2006, 39(4): 758-763.
- [10] 冯宗伟,王效科,吴刚. 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.
- [11] 唐罗忠,生原喜久雄,黄宝龙. 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.
- [12] 田勇燕,秦飞,言华. 我国常见木本植物的含碳率[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(26): 16166-16169.
- [13] Fang S, Xu X, Yu X, et al. Poplar in wetland agroforestry: A case study of ecological benefit, site productivity, and economics [J]. Wetland Ecology and Management, 2005, 13(13): 93-104.
- [14] 戴晓琴,郭兴强,李鹏. 平原农区幼龄杨树间作农作物的产量表现[J]. 生态学杂志, 2006, 25(12): 1515-1519.
- [15] 李庆云,樊魏,余新晓. 豫东平原农区杨树-农作物复合经营生态系统的碳储量[J]. 应用生态学报, 2010, 21(3): 613-618.
- [16] 彭方仁,李杰,黄宝龙. 海岸带复合农林系统植物种群光环境特征研究[J]. 生态科学, 2002, 21(1): 11-15.
- [17] 张劲松. 农林复合系统水分运移模型与水分生态特征的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2001.
- [18] Kaur B, Gupta S R, Singh G. Soil carbon, microbial activity and nitrogen availability in agroforestry system on moderately alkaline soils in northern India [J]. Applied Soil Ecology, 2000, 15(3): 283-294.
- [19] 李海玲,王万江,方升佐. 不同杨农复合经营模式对土壤活性碳组分及其分布特征的影响[J]. 金陵科技学院学报, 2013, 22(2): 79-84.
- [20] 方焱,田大伦,项文化. 杉木人工林土壤有机碳的垂直分布特征[J]. 浙江林学院学报, 2004, 21(4): 418-423.
- [21] 程鹏,曹福亮,汪贵斌. 农林复合经营的研究进展[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2010, 34(3): 151-156.
- [22] Allen S C, Jose S, Nair P K R, et al. Safety-net role of tree roots: evidence from a pecan (*Carya illinoensis* K. Koch) -cotton (*Gossypium hirsutum* L.) alley cropping system in the southern United States [J]. Forest Ecology and Management, 2004, 192(2): 395-407.
- [23] Odhiambo H O, Ong C K, Deans J D, et al. Roots, soil water and crop yield: tree crop interactions in a semi-arid agroforestry system in Kenya [J]. Plant and soil, 2001, 235(2): 221-233.