

豫东平原农区杨树-农作物复合生态系统的碳贮量*

李庆云¹ 樊巍^{2**} 余新晓¹ 万猛³

(¹ 北京林业大学水土保持学院水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京 100083; ² 河南省林业科学研究院, 郑州 450008; ³ 河南省林业调查规划院, 郑州 450045)

摘要 将豫东平原农区 5 a、9 a、11 a 和 13 a 4 个林龄阶段的杨树-农作物复合系统分为林木、农作物、凋落物和土壤 4 个子系统, 分别研究其碳贮量。结果表明 5 a、9 a、11 a 和 13 a 杨树-农作物复合生态系统林木及凋落物的碳贮量分别为 7.86、42.07、44.31 和 60.71 t · hm⁻²; 间作作物平均每年可吸收 CO₂ 6.8 t · hm⁻²; 农田土壤碳贮量分别为 45.55、51.06、55.94 和 60.49 t · hm⁻²。杨树-农作物间作系统的总碳贮量分别达 60.81、100.09、106.76 和 127.34 t · hm⁻², 远高于单作农田(49.36 t · hm⁻²)。各年龄阶段杨树和土壤碳贮量占总碳贮量的比例最大, 在 87.1%~93.1%, 而农作物和凋落物碳贮量比例较小, 占总贮量的 6.9%~12.9%。说明农林复合生态系统具有很强的吸收和固定碳的能力。

关键词 农林复合生态系统 杨树-农作物 碳贮量 豫东平原

文章编号 1001-9332(2010)03-0613-06 中图分类号 S718.55⁺1.2 文献标识码 A

Carbon storage of poplar-crop ecosystem in Eastern Henan Plain. LI Qing-yun¹, FAN Wei², YU Xin-xiao¹, WAN Meng³(¹Ministry of Education Key Laboratory of Soil and Water Conservation & Desertification Combating, School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; ²Henan Academy of Forestry, Zhengzhou 450008, China; ³Henan Provincial Institute of Forest Inventory and Planning, Zhengzhou 450045, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2010 21(3):613-618.

Abstract: Aimed to understand the carbon storage of poplar-crop ecosystem in Eastern Henan Plain, the poplar-crop ecosystems with different ages (5, 9, 11, and 13 years old) of poplar were selected, and each of them was further divided into four subsystems, i.e., forest, crop, litterfall, and soil. In the poplar-crop ecosystems with 5, 9, 11, and 13 years old poplar, the carbon storage of the subsystems forest and litterfall was summed as 7.86, 42.07, 44.31, and 60.71 t · hm⁻², respectively. Subsystem crop averagely sequestered 6.8 t · hm⁻² of CO₂ per year, and the carbon storage of subsystem soil achieved 45.55, 51.06, 55.94, and 60.49 t · hm⁻², respectively. The total carbon storage of these four poplar-crop ecosystems reached 60.81, 100.09, 106.76, and 127.34 t · hm⁻², respectively, much higher than that in mono-cultured farmland (49.36 t · hm⁻²). For the test poplar-crop ecosystems, the carbon storage of subsystems forest and soil occupied a large proportion, accounting for 87.1%-93.1% of the total carbon storage, while that of subsystems crop and litterfall occupied a relatively small proportion, being 6.9%-12.9% of the total, illustrating that agro-forestry ecosystem had a high potential in carbon absorption and sequestration.

Key words: agro-forestry ecosystem; poplar-crop; carbon storage; Eastern Henan Plain.

在全球气候变化过程中,CO₂ 具有举足轻重的作用,碳循环研究也因此成为当前环境科学家关注的焦点之一。碳循环研究首先是对碳贮量和碳通量的研究,在陆地生态系统和海洋生态系统都已广泛

开展^[1-3],从国家、区域及全球尺度上,有关陆地生态系统中森林和土壤碳贮量及其对碳循环影响的研究多有报道^[4-7]。于建军等^[8]研究表明,河南省陆地土壤有机碳含量约 10.27 × 10⁸ t,占全国储量的 1.15%,土壤平均碳密度为 7.46 kg · m⁻²,低于全国平均水平(9.60 kg · m⁻²);吴鹏飞等^[9]分析了四川中部丘陵区不同林龄桉-柏混交林的碳储量及其分配规律,发现该类型混交林的碳贮量能力较低;

* 国家“十一五”科技支撑计划项目(2006BAD03A0506)、国家林业局重点科研项目(2006-69)和林业公益性行业科研专项基金项目(200704014)资助。
** 通讯作者。E-mail: fanw2004@163.com
2009-09-21 收稿, 2009-12-30 接受。

Lewis 等^[10]通过在 10 个国家建立长期样点监测网络,发现近几十年非洲原始热带森林的碳贮量呈不断增加的趋势,1968—2007 年地上植被碳贮量的增长量达 $0.63 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,且成熟林碳贮量也在不断增加;Phillips 等^[11]对亚马逊河流域的研究也有类似发现.在有关农林复合生态系统碳循环研究上,Oelbermann 等^[12-13]估算出热带和温带农林复合系统地上生物量的碳贮量分别达 2.1×10^9 和 $1.9 \times 10^9 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$,认为农林复合生态系统的有机质积累比单一农田生态系统更高,其固碳潜力不可忽视;Albrecht 等^[14]估测出热带农林复合生态系统碳贮量在 $12 \sim 228 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$.目前,我国相关研究还主要停留在农林复合生态系统较单一作业系统在改善区域小气候^[15]、保护水资源功能^[16]、减少土壤侵蚀及改善土壤理化性质等生态效益及经济效益的评价上^[17-19],对农林复合生态系统固碳能力的研究还较少.而该项研究是未来我国陆地生态系统碳循环研究的重要发展趋势之一.

本文以豫东平原农区杨树-农作物复合系统为研究对象,将其分为林木、农作物、凋落物和土壤 4 个子系统,分别定量研究林木碳贮量、间作农作物固碳能力及农田土壤碳库大小,旨在为区域农林复合生态系统碳循环研究提供基础数据,为复合农林业的发展提供理论支撑.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

本研究区设在地处黄河故道腹地的河南省商丘市民权县的民权国有林场($34^{\circ}18' \sim 34^{\circ}31' \text{ N}$, $114^{\circ} \sim 115^{\circ}28' \text{ E}$,海拔 60.9 m).素有“绿色长城”之称的“申甘林带”距民权县城 4 km ,申甘林带东西长 20 km 、南北宽 $2 \sim 4 \text{ km}$,人工林面积近 4000 hm^2 ,是全国四大平原人工防护林带之一.该地属大陆性季风气候,年均气温 $14.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$,绝对最低气温 $-16.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $\geq 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温 $4700 \text{ }^{\circ}\text{C}$,无霜期 213 d ,年均降水量 679 mm .研究区地形平坦,土层深厚,土壤为黄河冲积形成的潮土类细沙土,土壤质地以沙质和壤质为主, pH $7.5 \sim 9.0$,土壤中碳酸钙及可溶盐含量略偏高,呈中性至碱性反应,地下水位在 $1.5 \sim 4.0 \text{ m}$.

近年来,该区农林复合经营主要以林-农间作和果-农间作为主,主要树种有速生杨(*Populus* sp.),刺槐(*Robinia pseudoacacia*),楸树(*Catalpa bungei*),栾树(*Koelreuteria paniculata*)和椿树(*Ailanthus altissima*)等.本研究杨树品种为中林-46 杨(*Populus* \times

euramericana (Dode) Guiner CL. ‘ Zhonglin-46 ’),各龄级林分林相较整齐,林下无灌木,仅有少量狗尾巴草(*Setaria viridis*),羊胡子草(*Carex lanceolata*)和荇草(*Arthraxon hispidus*)等草本植物.间作模式主要有杨树-农作物、苹果(梨)-农作物和果树-西瓜等,间作农作物主要有小麦、花生、马铃薯和辣椒等.

1.2 样地设置及调查

根据林场自然条件和林带株行距的不同,在研究区内分别选取 5 a 、 9 a 、 11 a 和 13 a 4 个林龄的杨树-农作物间作类型,设置标准样地 25 块,其中 5 a 杨树 5 块, 9 a 和 11 a 杨树各 7 块, 13 a 杨树 6 块.样地面积根据林带株行距和杨树栽植密度确定, 5 a 、 9 a 、 11 a 和 13 a 4 个林龄杨树的株行距分别为 $9 \text{ m} \times 6 \text{ m}$ 、 $3 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 、 $8 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ 、 $3 \text{ m} \times 32 \text{ m}$,面积分别为 $12 \text{ m} \times 54 \text{ m}$ 、 $20 \text{ m} \times 33 \text{ m}$ 、 $64 \text{ m} \times 33 \text{ m}$ 、 $64 \text{ m} \times 33 \text{ m}$.对样地内杨树的树龄、胸径、树高、冠幅和株数等进行每木调查.同时,在各林龄样地内按“S”形随机设定 4 个土壤取样点,每个取样点按 $0 \sim 20$ 、 $20 \sim 40$ 和 $40 \sim 60 \text{ cm}$ 分 3 层采集土壤样品,带回室内分析,并设置凋落物收集器以估算样地年凋落物量.

1.3 碳贮量的估算

1.3.1 杨树碳贮量 采用生物量结合林木平均含碳率进行杨树碳贮量的估算^[20].根据杨树林分平均胸径和树高,每个龄级样地选取平均木 $2 \sim 3$ 株,伐倒后采用 2 m 分层切割法分段,分别称取树干、树枝和树叶鲜质量,并用挖掘法测定根系生物量,同时取各器官样品约 500 g ,带回实验室于 $85 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘干至恒量,计算干质量,由此推算单株各器官生物量及全株生物量.根据杨树干、枝、叶、根和凋落物层的生物量,以及相应的含碳率测定结果,计算其碳贮量.杨树林带碳贮量为林木各器官碳贮量之和.凋落物年净固碳量是年凋落量与其含碳率的乘积.

1.3.2 农作物碳贮量 按照李克让^[21]提出的农作物年碳贮量计算方法进行计算:

$$C_d = C_f \times D_M$$

(1)

式中: C_d 为作物全生育期吸收的碳; C_f 为作物光合作用合成 1 g 有机质(干质量)所需要吸收的碳,根据文献 [22 - 23],小麦的 C_f 值为 0.4583 ,花生的 C_f 值为 0.4500 ; D_M 为作物生物产量(总干物质质量).

1.3.3 土壤碳贮量 由于本次调查杨树-农作物间作系统土壤取样厚度在 60 cm 以内,因此对土壤碳贮量的估算限定在土层 60 cm 的深度范围内,不包括地面凋落物.

土壤有机碳贮量(POC , $t \cdot hm^{-2}$)算式如下：

$$POC = \sum_{i=1}^n SOC_i \times H_i \times R_i \times 10^{-1} \quad (2)$$

式中： SOC_i 为第 i 层土壤有机碳含量($g \cdot kg^{-1}$)； H_i 为第 i 层的土壤厚度(cm , $i = 1, 2, 3$)； R_i 为第 i 层的土壤容重($g \cdot cm^{-3}$)。

土壤有机含碳率采用重铬酸钾氧化法测定,土壤容重采用环刀法测定,含水率用烘干法测定^[9]。

1.4 数据处理

采用 Excel 2007 和 SPSS 13.0 软件对数据进行统计分析. 采用相关分析法分析杨树林龄与生物量和碳贮量的相关性,用双尾检验(two-tailed)法对结果进行显著性检验.

2 结果与分析

2.1 杨树-农作物复合生态系统中杨树与凋落物的碳贮量

2.1.1 杨树与凋落物生物量 豫东平原农区杨树-农作物间作系统中 5 a、9 a、11 a 和 13 a 4 个林龄阶段的杨树及凋落物生物量分别为 17.32、92.63、97.64 和 133.82 $t \cdot hm^{-2}$. 杨树林龄与其总生物量达到显著正相关水平($r = 0.979$, $P < 0.05$,表 1) ,但与根系生物量的相关关系不显著,随着林龄增加,杨树生物量增长迅速,干、枝、叶及凋落物生物量与林龄均呈显著相关关系($r > 0.956$, $P < 0.05$,表 1)。

调查中发现,林分生物量与林分年龄、密度和立地条件等因子有很大关系,11 a 杨树人工林平均胸径为 32.3 cm ,最大胸径可达 40.7 cm ,平均树高 26.7 m ,株行距为 8 $m \times 30 m$,栽植密度为 105 株 $\cdot hm^{-2}$,而 9 a 杨树林分株行距为 3 $m \times 10 m$,平均树高 22.9 m ,栽植密度达 303 株 $\cdot hm^{-2}$,这两种林龄林分生物量相差不大,并且 9 a 杨树根系生物量远大于 11 a 杨树。

2.1.2 杨树及凋落物碳贮量 由表 2 可以看出 5 a、9 a、11 a 和 13 a 杨树-农作物间作样地杨树(包括其年凋落物)的总碳贮量分别为 7.86、42.07、44.31 和 60.71 $t \cdot hm^{-2}$,5 a 杨树碳贮量较小,13 a 杨树碳贮量最大,稍高于周玉荣等^[24]估算的我国主要森林生态系统植被平均碳密度(57.07 $t \cdot hm^{-2}$) ;而 9 a 和 11 a 杨树碳贮量差异不大,主要是因为其栽植密度不同,导致生物量相差较小. 在杨树各组分中,树干碳贮量占其总贮量的 44.3% ~ 56.2% ,其次是枝、根,而叶和凋落物碳贮量较小,二者共占总量的 8.5% ~ 9.2% . 杨树总碳贮量与林龄和胸径呈显著正相关关系($r = 0.978$, $P < 0.05$) ,其余各组分也有类似结果。

2.2 杨树-农作物复合生态系统中农作物碳贮量

2.2.1 农作物生物量 由表 3 可以看出 5 a、9 a、11 a 和 13 a 杨树-农作物间作系统农作物(花生和小麦)总生物量分别是 15.95、15.36、14.35 和 13.55 $t \cdot hm^{-2}$,随着间作年限增加而有所下降,与单作农田(17.92 $t \cdot hm^{-2}$)相比,间作系统作物生物量均有一定程度下降,花生和小麦分别平均下降 11.2%、11.3% . 余相^[25]研究表明,林-农间作使农作物产量下降,其中小麦、黄豆和玉米分别平均下降 8.7%、11.9%、15.3% ,合理的间作年限和合理的间作行距可以有效地提高作物产量,在达到最佳经济效益同时,也兼顾到生态效益。

2.2.2 农作物碳贮量 5 a、9 a、11 a 和 13 a 杨树-农作物间作系统样地农作物的总碳贮量分别为 7.22、6.96、6.51 和 6.14 $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$,平均每年可吸收 CO_2 6.8 $t \cdot hm^{-2}$ (表 3) . 其中小麦年碳贮量低于花生,二者分别占总贮量的 35.5% ~ 38.2% 和 61.8% ~ 64.5% . 各间作系统作物碳贮量平均下降 11.0% ~ 24.3% ,略低于单作农田的作物碳贮量。

表 1 豫东平原农区杨树-农作物间作系统杨树及凋落物的生物量
Tab.1 Biomass of poplar and litterfall in the interplanting system in Eastern Henan Plain

林龄 Age (a)	平均胸径 Average DBH (cm)	平均树高 Average height (m)	各组分生物量 Biomass of different parts($t \cdot hm^{-2}$)					总计 Total
			树干 Trunk	树枝 Branch	树叶 Leaves	树根 Root	凋落物 Litterfall	
5	17.60	12.10	7.68	5.28	0.59	2.80	0.97	17.32
9	23.40	22.90	48.68	19.90	4.35	17.56	2.14	92.63
11	32.30	26.70	50.87	27.94	4.36	9.65	4.82	97.64
13	35.20	28.80	75.41	28.50	5.76	18.15	6.00	133.82
标准差 SD	8.10	7.43	28.07	10.82	2.22	7.28	2.33	48.93
变异系数 CV(%)	29.86	32.84	61.48	53.03	58.96	60.47	66.91	57.33
r	0.973 *	0.985 *	0.978 *	0.973 *	0.962 *	0.759	0.956 *	0.979 *

* $P < 0.05$; * * $P < 0.01$. 下同 The same below.

表 2 豫东平原农区杨树-农作物间作系统杨树及凋落物碳贮量
Tab.2 Carbon storage of poplar and litterfall in the interplanting system in Eastern Henan Plain

林龄 Age (a)	各组分碳贮量 Carbon storage of different parts(t · hm ⁻²)					
	树干 Trunk	树枝 Branch	树叶 Leaf	树根 Root	凋落物 Litterfall	总计 Total
5	3. 48	2. 42	0. 26	1. 28	0. 42	7. 86
9	21. 08	9. 10	1. 96	8. 05	1. 88	42. 07
11	23. 23	12. 78	1. 97	4. 23	2. 10	44. 31
13	34. 14	13. 04	2. 58	8. 33	2. 62	60. 71
标准差 SD	12. 70	4. 95	1. 00	3. 36	0. 94	22. 20
变异系数 CV(%)	62. 00	53. 03	59. 08	61. 40	53. 56	57. 31
r	0. 985 *	0. 974 *	0. 962 *	0. 746	0. 983 *	0. 978 *

表 3 豫东平原农区杨树-农作物间作系统农作物生物量和碳贮量
Tab.3 Crop production and carbon storage in the interplanting system in Eastern Henan Plain

间作类型 Interplanting type	生物量 Biomass (t · hm ⁻² · a ⁻¹)			碳贮量 Carbon storage(t · hm ⁻² · a ⁻¹)		
	花生 Peanut	小麦 Wheat	总计 Total	花生 Peanut	小麦 Wheat	总计 Total
I	9. 92	6. 03	15. 95	4. 46	2. 76	7. 22
II	9. 63	5. 73	15. 36	4. 33	2. 63	6. 96
III	9. 08	5. 27	14. 35	4. 09	2. 42	6. 51
IV	8. 59	4. 96	13. 55	3. 87	2. 27	6. 14
V	11. 72	6. 20	17. 92	5. 27	2. 84	8. 11
标准差 SD	1. 19	0. 52	1. 67	0. 53	0. 24	0. 75
变异系数 CV(%)	12. 21	9. 19	10. 84	12. 13	9. 17	10. 76
r	-0. 964 *	-0. 953 *	-0. 984 *	-0. 963 **	-0. 951 *	-0. 984 **

I : 5 a 杨树-农作物 5 years old poplar-crop ; II : 9 a 杨树-农作物 9 years old poplar-crop ; III : 11 a 杨树-农作物 11 years old poplar-crop ; IV : 13 a 杨树-农作物 13 years old poplar-crop ; V : 单作农田 Monoculture. 下同 The same below.

2.3 杨树-农作物复合生态系统中农田土壤碳贮量

由表 4 可以看出 ,在杨树-农作物复合生态系统中 ,随着林龄(即间作年限)增加 ,农田土壤碳贮量增加 ,且二者达到极显著正相关水平($r=0.985$, $P<0.01$) ;同一土层土壤碳贮量也呈增长趋势 ;5 a、9 a、11 a 和 13 a 杨树-农作物间作系统 0 ~ 60 cm 土壤碳贮量分别为 45. 55、51. 06、55. 94 和 60. 49 t · hm⁻² ,均高于单作农田土壤碳贮量(41. 25 t · hm⁻²) ,间作年限较短的幼龄林土壤较之单作农田变化不大 ,但随着间作年限延长 ,二者差异显著($P<0.05$) .

表 4 豫东平原杨树-农作物间作系统土壤碳贮量
Tab.4 Soil carbon storage in the interplanting system in Eastern Henan Plain

间作类型	土壤碳贮量				<i>r</i>
Interplanting type	Soil carbon storage (t · hm ⁻²)				
	0 ~ 20 cm	20 ~ 40 cm	40 ~ 60 cm	0 ~ 60 cm	
I	21. 33	14. 98	9. 24	45. 55	-1. 000 *
II	25. 65	16. 01	9. 40	51. 06	-0. 990 *
III	28. 15	17. 90	9. 89	55. 94	-0. 998 *
IV	31. 15	19. 31	10. 03	60. 49	-0. 996 *
V	18. 85	13. 26	9. 14	41. 25	-0. 996 *
标准差 SD	4. 99	2. 38	0. 40	7. 73	-
变异系数 CV(%)	19. 92	14. 62	4. 16	15. 20	-
<i>r</i>	0. 988 **	0. 976 **	0. 922 *	0. 985 **	-

随着土层深度增加 ,各间作系统土壤碳贮量下降 ,其中 0 ~ 40 cm 土层的土壤碳贮量分别占 5 a、9 a、11 a 和 13 a 杨树-农作物间作总贮量的 79. 7%、81. 6%、82. 3% 和 83. 4% ,说明不同林龄间作样地碳贮量的差异主要表现在 0 ~ 40 cm 土层 ,随着土层深度增加 ,这种差异逐渐减小 ,呈明显的梯度变化 ,这与土壤含碳率随土壤深度增加而下降的趋势相一致.

2.4 杨树-农作物复合生态系统总碳贮量及其分布特征

本研究调查的豫东平原农区杨树-农作物复合生态系统的碳贮量包括林木、间种作物、土壤、林带凋落物 4 个子系统. 由表 5 可以看出 ,5 a、9 a、11 a 和 13 a 杨树-农作物间作系统总碳贮量分别达到 60. 81、100. 09、106. 76 和 127. 34 t · hm⁻² ,远高于单作农田(49. 36 t · hm⁻²) . 各林龄阶段杨树和土壤碳贮量占其总贮量的 87. 1% ~ 93. 1% ,农作物和凋落物贮量仅占总贮量的 6. 9% ~ 12. 9% . 其中 4 种间作系统中杨树碳贮量占总贮量的 12. 2% ~ 45. 6% ,而土壤碳贮量则达 47. 5% ~ 74. 9% ,说明农林复合生态系统中林带植被和间作农田土壤具有巨大的碳积累能力 ,是农林复合系统碳贮量的两大主要组成部分.

表 5 豫东平原农区杨树-农作物间作系统总碳贮量及其分配
Tab.5 Total carbon storage and distribution in the interplanting system in Eastern Henan Plain

间作类型 Interplanting type	杨树 Poplar		土壤 Soil		农作物 Crop		凋落物 Litterfall		合计 Total	
	t · hm ⁻²	%	t · hm ⁻²	%	t · hm ⁻²	%	t · hm ⁻²	%	t · hm ⁻²	%
I	7.44	12.2	45.55	74.9	7.40	12.2	0.42	0.7	60.81	100
II	40.19	40.1	51.06	51.1	6.96	7.0	1.88	1.8	100.09	100
III	42.21	40.0	55.94	52.0	6.51	6.0	2.10	2.0	106.76	100
IV	58.09	45.6	60.49	47.5	6.14	4.8	2.62	2.1	127.34	100
V	—	—	41.25	83.6	8.11	16.4	—	—	49.36	100

虽然土壤是间作系统碳贮量的主体,但其在系统总贮量中的比重却表现为随着林龄增加而降低的趋势,而杨树碳贮量在总贮量中的比重则表现为增加趋势,这是因为随着间作年限的增加,杨树作为速生树种,其生物量积累较快,但其碳贮量依然低于土壤碳贮量。根据杨树-农作物间作系统各组分碳贮量及其分布可以看出,5 a 杨树幼龄林间作系统土壤碳贮量占较大比重(74.9%)。9 a、11 a、13 a 杨树中龄林间作系统中杨树、农田土壤、农作物、凋落物碳贮量所占比重相差不大,分别约占总贮量的41.9%、50.2%、6.0%、1.9%,其中土壤碳贮量所占比重是杨树贮量的1.2倍,略低于尉海东^[26]关于杉木中龄林土壤碳贮量比重是林木层1.8倍的研究结果。

3 讨 论

本研究结果表明,豫东平原农区5 a、9 a、11 a、13 a 杨树-农作物间作系统林带及凋落物碳贮量分别为7.86、42.07、44.31、60.71 t · hm⁻²。杨树作为一种速生树种,其生物量每年都会有很大差异,也导致不同生长阶段碳贮量变化很大。唐罗忠^[27]研究表明,杨树幼林碳贮量为12.56 t · hm⁻²,而江苏里下河10 a 杨树人工林分碳贮量可达65.8 t · hm⁻²,高于本研究13 a 杨树碳贮量。这是由于立地条件、栽植密度及抚育措施不同等所致。

通常认为,农林复合经营将影响农作物的产量,但就整个复合经营系统而言,生物生产力将大大提高^[28]。在杨树-农作物间作系统中,农作物产量与间作年限的关系呈抛物线形状,达到最高产量的年限与林木行距有关。本调查也发现,作物产量在间作行间分布的共同特征是中间高、两端低,反映了林木除对农作物有保护作用外,“胁地”现象也普遍存在,并且随着林龄的增加,作物减产明显,使碳固定能力有所降低。同时,对小麦秸秆、花生秧等直接焚烧也会引起CO₂大量的排放和流失。所以,采取秸秆还田等措施不但可以增加农田土壤有机质含量和土壤

肥力,还可以替代部分化肥,减少其投入量,具有良好的生态效益和经济效益。

土壤和植被是农林复合生态系统碳贮量两大主要组成部分。豫东平原杨树-农作物间作系统中,杨树幼龄林、中龄林林木层碳贮量各占其总贮量的12.2%、41.9%,土壤层碳贮量所占比重分别为74.9%和50.2%,总体上土壤碳贮量所占比重是杨树的1.2~6倍。尉海东^[26]对中亚热带几种人工林生态系统碳贮量的研究结果表明,杉木幼龄林、中龄林乔木层碳贮量约占系统总贮量的18.2%、35.1%,土壤层碳贮量所占比重分别达78.7%、62.4%,而马尾松幼龄林、中龄林相应分别为15.5%、32.9%和81.9%、64.5%,这两种人工林系统土壤碳贮量比重约是乔木层的1.8~5.3倍,与本研究结果基本一致,但树种及立地条件等差异引起的不确定性分析也是今后不可忽视的问题之一。

农林复合生态系统具有很高的碳吸收和固定能力,是陆地生态系统碳贮量研究不可忽视的重要方向,实施农林复合经营,改善农田土壤理化性质,提高土壤肥力,可以使其固碳能力更高。今后可在不同间作作物对农田土壤有机碳的影响程度以及修枝、间伐等复合农林业优化技术管理措施^[29]对作物有机质含量的影响等方面进行深入研究。

参考文献

[1] Davis MR, Allen RB, Clinton PW. Carbon storage along a stand development sequence in a New Zealand Nothofagus forest. *Forest Ecology and Management*, 2003, **177**: 313-321

[2] Houghton RA. Aboveground forest biomass and the global carbon balance. *Global Change Biology*, 2005, **11**: 945-958

[3] Wang P (王 萍). Forest carbon cycle model: A review. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2009, **20**(6): 1505-1510 (in Chinese)

[4] Zhou CY, Wei XH, Zhou GY, et al. Impacts of a large-scale reforestation program on carbon storage dynamics in Guangdong, China. *Forest Ecology and Management*,

- 2008, **255**: 847–854
- [5] Wu HB, Guo ZG, Gao Q, *et al.* Distribution of soil inorganic carbon storage and its changes due to agricultural land use activity in China. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2009, **129**: 413–421
- [6] Thomas H, Schiettecatte LS, Suykens K, *et al.* Enhanced ocean carbon storage from anaerobic alkalinity generation in coastal sediments. *Biogeosciences*, 2009, **6**: 267–274
- [7] Huang C-D (黄从德), Zhang J (张健), Yang W-Q (杨万勤), *et al.* Spatiotemporal variation of carbon storage in forest vegetation in Sichuan Province. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2007, **18** (12): 2687–2692 (in Chinese)
- [8] Yu J-J (于建军), Yang F (杨锋), Wu K-N (吴克宁), *et al.* Soil organic carbon storage and its spatial distribution in Henan Province. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2008, **19** (5): 1058–1063 (in Chinese)
- [9] Wu P-F (吴鹏飞), Zhu B (朱波), Liu S-R (刘世荣), *et al.* Carbon storage and its allocation in mixed alder-cypress plantations at different age stages. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2008, **19** (7): 1419–1424 (in Chinese)
- [10] Lewis SL, Lopez-Gonzalez G, Sonke B, *et al.* Increasing carbon storage in intact African tropical forests. *Nature*, 2009, **457**: 1003–1006
- [11] Phillips OL, Lewis SL, Baker TR, *et al.* The changing Amazon forest. *Biological Sciences*, 2008, **363**: 1819–1827
- [12] Oelbermann M, Voroney RP, Thevathasan NV, *et al.* Soil carbon dynamics and residue stabilization in a Costa Rican and southern Canadian alley cropping system. *Agroforestry Systems*, 2006, **66**: 27–36
- [13] Oelbermann M, Voroney RP, Gordon AM. Carbon sequestration in tropical and temperate agroforestry systems: A review with examples from Costa Rica and southern Canada. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2004, **104**: 359–377
- [14] Albrecht A, Kandji ST. Carbon sequestration in tropical agroforestry systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2003, **99**: 15–27
- [15] Li J-X (李俊祥), Wan Z-H (宛志沪). Microclimatic effect and soil moisture change of poplar-wheat intercropping systems in Huaibei Plain. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2002, **13** (4): 390–394 (in Chinese)
- [16] Fan W (樊巍). A study on water use efficiency of wheat in agroforestry system. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 2000, **36** (4): 16–20 (in Chinese)
- [17] Wu G (吴钢), Wei J (魏晶), Zhang P (张萍), *et al.* Benefit assessment of agroforestry ecosystems in the Three Gorges Reservoir Area. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2002, **22** (2): 233–239 (in Chinese)
- [18] Wang S-Z (王世忠), Guo H (郭浩), Li S-M (李树民), *et al.* Study on construction patterns of soil and water conservation vegetation with agroforestry in the west of Liaoning. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 2003, **39** (3): 163–168 (in Chinese)
- [19] Xia Q (夏青), He B-H (何丙辉), Xie Z (谢洲), *et al.* Study on soil physical and chemical properties of agroforestry of purple soil. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2006, **20** (2): 86–89 (in Chinese)
- [20] Wu X-S (吴小山), Huang C-D (黄从德). Carbon density, storage and distribution in birch forest ecosystem on the forestland converted from farmland. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2007, **26** (3): 323–326 (in Chinese)
- [21] Li K-R (李克让). Land Use Changes, Greenhouse Gas Emission and Carbon Cycling in the Terrestrial Ecosystem. Beijing: China Meteorological Press, 2002 (in Chinese)
- [22] IPCC. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Reference Manual. Geneva, Switzerland: IPCC, WMO, UNEP, 1995
- [23] Wang X-L (王修兰). CO₂, Climate Change and Agriculture. Beijing: China Meteorological Press, 1996 (in Chinese)
- [24] Zhou Y-R (周玉荣), Yu Z-L (于振良), Zhao S-D (赵士洞). Carbon storage and budget of major Chinese forest types. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2000, **24** (5): 518–522 (in Chinese)
- [25] Yu X (余相). Research on New Planting Patterns in the Intercropping System of Poplar. PhD Thesis. Nanjing: Nanjing Forestry University, 1996 (in Chinese)
- [26] Wei H-D (尉海东). Study on the Carbon Storage and Soil Respiration of Three Forest Ecosystems in the Mid-subtropical Zone, China. PhD Thesis. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2005 (in Chinese)
- [27] Tang L-Z (唐罗忠). Storage and dynamics of carbon in a poplar plantation in Lixiahe region, Jiangsu Province. *Journal of Nanjing Forestry University* (Natural Sciences) (南京林业大学学报·自然科学版), 2004, **28** (2): 1–6 (in Chinese)
- [28] Mi F-Q (米方秋). A Study on the Interplanting Patterns and Effects of Agroforestry. PhD Thesis. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2005 (in Chinese)
- [29] Sun S-W (孙尚伟), Xia X-L (夏新莉), Yin W-L (尹伟伦). Effects of different pruning intensity on photosynthetic characters, growth and yield of crops in agroforestry. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2008, **28** (7): 3185–3192 (in Chinese)

作者简介 李庆云,女,1983年生,博士研究生.主要从事生态学、生态水文学研究,发表论文3篇. E-mail: qingyunlyjs@163.com

责任编辑 李凤琴