

间伐对人工水源涵养林碳储量及其垂直分布的影响

刘娜娜¹,张希金²,达良俊^{2,3}

(1.常州工学院 土木建筑工程学院,江苏 常州 213022;2.华东师范大学 生态与环境科学学院,上海 200241;

3.浙江天童森林生态系统国家野外科学观测研究站,浙江 宁波 315114)

摘 要:探讨有利于人工水源涵养林碳汇功能与水源涵养功能协同发挥的最佳间伐强度,为黄浦江水源涵养林经营管理提供科学依据,选择上海市奉贤区杜英林和香樟×重阳木混交林 2 种人工水源涵养林进行不同强度间伐处理,对其恢复 4 a 后的碳储量及其垂直分布进行了研究。结果表明:1)间伐 4 a 后,各间伐强度样地的乔木层地上部分及其根系碳储量均未超过对照样地;2)对于林下层碳储量而言,无论地上部分还是根系,杜英林和香樟×重阳木混交林均在中等强度间伐样地中最大,且大于对照样地;3)各间伐处理均显著地增加了杜英林和香樟×重阳木混交林的凋落物碳储量及其在植物碳储量中所占的比例;4)间伐处理显著地改变了 2 种林分的土壤碳储量的垂直分布,相较于对照样地中土壤碳储量随深度分布较为均匀,间伐样地中土壤碳储量更为集中于土壤表层,且随深度增加逐渐减少。经过 4 a 的短期恢复,47%和 24%的间伐强度可能分别最有利于杜英林和香樟×重阳木混交林的碳汇功能和水源涵养功能的协同发挥。

关键词:水源涵养林;间伐强度;碳储量

中图分类号:S753.5

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2016)05-0029-08

Effects of Ehinning on Carbon Storage and Its Vertical Distribution in Water Conservation Forests

LIU Na-na¹,ZHANG Xi-jin²,DA Liang-jun^{2,3}

(1. School of Civil Engineering & Architecture, Changzhou Institute of Technology, Changzhou, Jiangsu 213022, China;

2. School of Ecological and Environmental Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241, China;

3. Tiantong National Forest Ecosystem Observation and Research Station, Ningbo, Zhejiang 315114, China)

Abstract: *Elaeocarpus decipiens* plantations and *Cinnamomum camphora* × *Bischofia polycarpa* mixed plantations, two common water conservation forests for Huangpu River in Shanghai, were thinned with three thinning intensities. The effects of thinning on carbon storage and the distribution among vertical layers were compared after 4-year recovery. The results showed that: 1) After 4-year recovery, carbon storage of tree layers of all thinned stands were lower than that of control stands for both aboveground parts and roots in each plantation type. 2) The carbon storage of understory layer was the highest in stands with moderate thinning intensity and even greater than the control stand, for both aboveground parts and roots in each plantation type. 3) Comparing to the control stand, thinning management increased the carbon storage of litter layer for each plantation type, as well as its percentage of the whole plant carbon storage. 4) Comparing to the control stand, thinning management also altered the vertical distribution of soil carbon storage in depth, from a relatively uniform distribution pattern to a decreasing tendency pattern with more aggregation in topsoil. In conclusion, 47% and 24% of thinning intensity were suggested to be the most suitable for *Elaeocarpus decipiens* plantations and *Cinnamomum camphora* × *Bischofia polycarpa* mixed plantations, respectively, which could have the biggest potential to maximize their eco-services of carbon

收稿日期:2016-03-21 修回日期:2016-04-10

基金项目:上海市科学技术委员会科研计划项目(08DZ1203102);上海市科技兴农重点攻关项目[沪农科攻字(2011)第 1-6 号]。

作者简介:刘娜娜,女,副教授,硕士,研究方向:城市生态学。E-mail:liunn@czu.cn

sink and water conservation synchronously.

Key words: water conservation forest; thinning intensity; carbon storage

森林在调节全球气候、维持全球碳平衡中发挥着重要作用。森林固定的碳约占整个陆地生态系统的 2/3 以上^[1],其作为一个重要的“碳汇”已经得到了广泛的认同和证实^[2-6]。森林生物量及碳储量的研究通常与森林碳汇功能紧密相关^[7]。目前我国学者对森林生态系统生物量及碳储量方面的研究多集中在国家尺度或局部典型的森林生态系统中,但大尺度上研究结果之间存在较大的差异^[8-9],因而进一步加强小尺度上的森林碳储量研究,可以减少我国或区域碳平衡估算中的不确定性^[10]。

水源涵养林系以调节、改善水源流量和水质为主导功能的一种防护林^[11]。植被层、枯枝落叶层和土壤层的持水量是影响其水源涵养功能的重要因素^[12],其中前两者的持水量在很大程度上取决于生物量,通常植被地上生物量和枯枝落叶层生物量越大,其持水量也越大^[13]。此外,森林垂直结构分层越多、各层生物量分配相对越均匀,截水能力也越大^[14]。由此可见,水源涵养林的生物量(碳储量)与水源涵养功能之间存在紧密联系。目前对水源涵养林的研究主要集中在水源涵养林的营造、水文功能及功能量化等方面^[15-16],有关水源涵养林碳储量及其垂直分布的研究尚不多见,需要进一步加强对水源涵养林碳储量及其垂直分布的研究。

黄浦江上游是上海进行重点保护的水源地。截至 2009 年,黄浦江上游两岸已建成 200~500 m 宽的水源涵养林,总面积达 0.33 万 hm^2 ,实现森林全覆盖^[17]。黄浦江水源涵养林现多为幼龄林分,碳汇潜力巨大^[16]。但群落结构简单、树种密度较高,树木生长势差,病虫害严重,不利于黄浦江水源涵养林生态功能的发挥^[18]。通过人工抚育改善水源涵养林树种生长状况、密度及群落结构,有利于其生态功能的发挥。间伐作为幼林抚育的常用措施,可通过改变林分密度和林内环境^[19],影响群落结构、促进碳汇功能^[20],间伐强度、树种、间伐模式和立地条件等影响间伐效果^[21]。因此,本研究以黄浦江上游人工水源涵养林中 2 种最为常见的林型为对象,分析其碳储量及垂直分布对不同间伐强度的响应,探讨有利于碳汇功能与水源涵养功能协同发挥的最佳间伐强度,为黄浦江水源涵养林经营管理提供科学依据。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区域概况

研究区域位于上海市($31^{\circ}14'N$ 、 $121^{\circ}29'E$),属

于亚热带湿润季风气候,光照充足,雨量充沛,平均气温 15.5°C ,最高温度 39.0°C ,最低 -8.5°C ,年平均降水量 1 062 mm,无霜期 200 d。试验选择的人工水源涵养林位于上海市奉贤区庄行镇浦秀村,是黄浦江上游水源涵养林的一部分,林带于 2003—2004 年营造,所选样地土壤条件基本一致,林分为杜英(*Elaeocarpus decipiens*)纯林和香樟(*Cinnamomum camphora*)×重阳木(*Bischofia polycarpa*)混交林,其林下灌木主要分别是蚊母(*Distylium racemosum*)和海桐(*Pittosporum tobira*)^[18,22]。

1.2 样地设置

于 2009 年 12 月设置 8 块 $20\text{ m}\times 20\text{ m}$ 样地进行间伐,其中,杜英纯林样地、香樟×重阳木混交林样地各 4 块,每块样地原有乔木数量基本一致(表 1)。杜英纯林样地间伐强度依次为 36%、47%、64%;香樟×重阳木混交林样地间伐强度分别是 17%、19%、24%(混交林主要存在的问题是重阳木长势差,因而间伐木主要是重阳木)。每种林分除对照样地外,均依照优胜劣汰的原则进行间伐,且尽量保证保留木分布均匀。由此,每种林分各自形成了相对的未间伐、弱度间伐、中度间伐、强度间伐样地。由于本研究间伐处理试验对象为黄浦江水源涵养林,是上海林业重点保护对象,因而难以实施大面积间伐处理,制约了重复样地的设置。

1.3 乔木层碳储量估算

于 2013 年 4 月对样地内乔木进行调查,包括每木胸径、树高、枝下高、叶下高和冠幅。同年 11 月,采用径阶标准木法构建乔木生物量方程,标准木采集于样地周边相同林型中。以 2 cm 划分 1 个径阶,每个径阶各伐 1 棵标准木,标准木根系采用全挖法,现场测定枝、叶、树干、树皮、树根鲜重,然后各组分分别带回 20% 样品烘干至恒重,测定含水率,计算出干重。用方程分别拟合胸径 DBH 与乔木各组分生物量关系:

$$BM=a(DBH)^b \quad (1)$$

式中, BM 是乔木各组分生物量(kg), DBH 是胸径(cm), a 和 b 为可变系数。

本文中重阳木生物量方程系数为试验获得,杜英和香樟的乔木生物量方程系数引自王哲^[17]等(研究区域位于黄浦江上游青浦区和松江区黄浦江两岸 500 m 范围的水源涵养林林带内,与本研究区域气候和地理条件一致),乔木生物量与碳储量转换因子采用国际上常用的转换因子 0.5^[23-24]。

表 1 样地概况

Table 1 Basic information of sampling plots

林分类型	样地	原有株数	2013 年株数	实伐强度/%	同种林分 相对间伐强度
杜英林	DY-CK	89	89	0	对照
	DY-L	92	59	36	弱度
	DY-M	93	49	47	中度
	DY-H	90	32	64	强度
香樟×重阳木混交林	HJ-CK	44/49 *	38/37 *	0	对照
	HJ-L	38/50 *	31/40 *	17	弱度
	HJ-M	39/49 *	38/31 *	19	中度
	HJ-H	42/38 *	35/21 *	24	强度

注：* 香樟/重阳木的个体数。

表 2 3 种乔木生物量方程

Table 2 Allometric biomass equations of different organs for three dominant trees

树种	器官	生物量方程系数		径阶/cm	标准株	R ²	P 值
		a	b				
重阳木	立木	0.030 98	2.746 23	4~15	6	0.97	<0.001
	树根	0.010 01	2.811 78			0.99	0.001
	干材	0.022 62	2.854 32			0.99	<0.001
	树枝	0.004 75	3.100 20			0.97	0.002
	树皮	0.000 05	4.038 46			0.97	0.003
	树叶	0.000 03	4.176 61			0.97	<0.001
杜英*	立木	0.188 33	2.141 25	5~17	6	0.93	0.002
	树根	0.126 84	1.613 75			0.93	0.002
	干材	0.104 63	2.090 00			0.90	0.004
	树枝	0.012 02	2.669 37			0.86	0.008
	树皮	0.003 73	2.372 50			0.72	0.032
	树叶	0.002 57	2.589 46			0.95	0.004
香樟*	立木	0.103 87	2.535 00	7~17	5	0.99	<0.001
	树根	0.033 45	2.436 92			0.96	0.003
	干材	0.070 86	2.278 85			0.97	0.002
	树枝	0.011 41	2.858 85			0.94	0.006
	树皮	0.023 02	1.934 23			0.81	0.037
	树叶	0.001 39	3.232 31			0.79	0.042

注：* 杜英、香樟生物量模型引自王哲^[17]等。

1.4 林下层碳储量测定

于 2013 年 11 月,在各样地的四个角和中心位置设置 5 个 2 m×2 m 的样方,采集样方内所有植株。其中灌木植物分枝、叶、茎、根采集,草本植物分地上、地下部分采集,烘干测定生物量后采用重铬酸钾法测定有机碳含量,以此计算碳储量。

1.5 凋落物碳储量测定

于 2013 年 11 月,在各样地的四个角和中心位置设置 5 个 1 m×1 m 样方,收集样方地表所有枯枝落叶带回实验室,烘干测定生物量后采用重铬酸钾法测定有机碳含量,并换算为碳储量。

1.6 土壤碳储量测定

于 2013 年 11 月,在各样地随机挖取 3 个土壤剖面,以 10 cm 划分为 1 个土层,0~80 cm 内分层取样,测定各层土壤容重(GB/T 7835-198);风干

后,采用重铬酸钾法测定有机碳含量。

$$D_i=\sum C_i \cdot B_i \cdot H_i/10$$

(2)

式中, D_i 是土壤有机碳密度($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$), C_i 是土壤容重($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$), B_i 是土壤有机碳含量($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), H_i 是土层厚度(cm)。

1.7 数据处理

使用 Excel2007 进行数据整理和作图,通过 Fisher 精确检验对不同间伐强度样地植物碳储量的垂直分布比例和土壤碳储量的垂直分布比例差异进行显著性检验,显著性检验在 R 软件中完成。

2 结果与分析

2.1 植物碳储量垂直分布的差异

间伐 4 a 后,各间伐样地乔木层地上及其根系碳储量均未超过对照样地(表 3)。但 2 种林分的乔

木层碳储量与间伐强度的关系截然相反,其中杜英林随着间伐强度增大乔木层碳储量递减,而香樟×重阳木混交林则呈现相反趋势。

Fisher 精确检验结果表明,杜英林和香樟×重阳木混交林不同间伐强度样地植物碳储量垂直分布比例均与各自对照样地差异显著($P<0.01$);对于

杜英林各间伐样地,除中度间伐和强度间伐样地之间差异性不显著外,其他各间伐强度样地植物碳储量垂直分布比例差异显著($P<0.01$);对于香樟×重阳木混交林各间伐强度样地,弱度间伐样地与其他间伐强度样地之间差异性不显著,中度间伐样地与强度间伐样地差异显著($P<0.01$)(表 4)。

表 3 不同间伐处理植物碳储量垂直分布

		Table 3 Plant carbon storage in different vertical layers for each thinning intensity (t·hm ⁻²)							
		DY-CK	DY-L	DY-M	DY-H	HJ-CK	HJ-L	HJ-M	HJ-H
地上部分	乔木层地上	47.30	38.30	33.00	25.30	75.60	57.50	60.70	68.90
	林下层地上	0.63	0.27	0.68	0.61	0.29	0.35	0.52	0.23
	小计	47.93	38.57	33.68	25.91	75.89	57.85	61.22	69.13
凋落物	凋落物	0.62	0.65	1.59	0.92	2.90	3.47	3.21	3.99
地下部分	乔木层根系	8.41	6.41	5.45	4.01	17.99	13.43	14.28	16.46
	林下层根系	0.37	0.15	0.39	0.23	0.05	0.06	0.09	0.04
	小计	17.19	12.96	11.05	8.25	36.03	26.62	28.64	32.96
总计		65.74	52.17	46.32	35.08	114.82	87.93	93.06	106.09

表 4 不同样地间植物碳储量垂直分布比例 Fisher 精确检验结果

Table 4 Results of Fisher's exact test for verticaldistribution ratio of plant carbon storage between different plots

P 值	DY-CK	DY-L	DY-M	P 值	HJ-CK	HJ-L	HJ-M
DY-L	0.002 86	—		HJ-L	0.000 01	—	
DY-M	0.000 01	0.000 01	—	HJ-M	0.000 01	0.212 1	—
DY-H	0.000 01	0.000 01	0.164 20	HJ-H	0.000 02	0.150 4	0.000 58

对于林下层碳储量而言,无论是地上部分还是根系,杜英林和香樟×重阳木混交林均在中等强度间伐样地最大,且高于对照样地(表 3)。杜英林中,林下层碳储量在植物碳储量所占比例在中度、强度间伐样地较大,且大于对照(图 1);香樟×重阳木混交林中,林下层碳储量在植物碳储量所占比例在弱度、中度间伐样地较大,且高于对照(表 3、图 2)。

间伐处理显著地增加了凋落物碳储量及其在植

物碳储量中所占的比例(表 3、图 1、图 2)。无论是杜英林还是香樟×重阳木混交林,3 种间伐强度样地的凋落物碳储量及其在植物碳储量中所占比例均大于对照样地;其中杜英林在中等强度间伐样地,凋落物碳储量及其所占比例均达到最大,香樟×重阳木混交林凋落物碳储量在强度间伐样地最大,其在植物碳储量所占比例在 3 种间伐强度样地比例相当(图 1、图 2)。

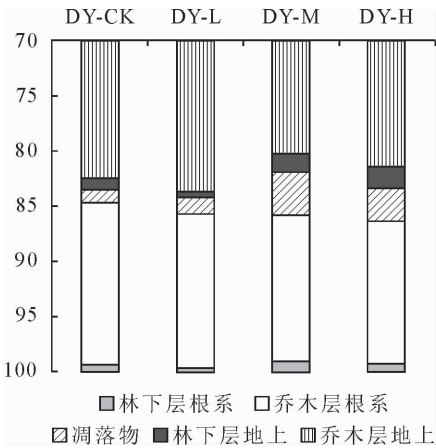


图 1 不同间伐强度下杜英林植物碳储量垂直分布比例

Fig. 1 Percentage of plant carbon storage in different vertical layers for *E. decipiens* plantation under different thinning intensities

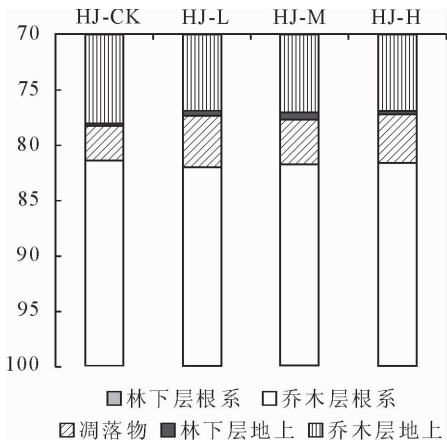


图 2 不同间伐强度下香樟×重阳木混交林植物碳储量垂直分布比例

Fig. 2 Percentage of plant carbon storage in different vertical layers for *C. camphora* × *B. polycarpa* mixed forest under different thinning intensities

2.2 土壤碳储量垂直分布的差异

间伐 4 a 后,所有样地的土壤碳储量总量差异不大,均在 62.48~71.67 t·hm⁻²之间。杜英林在

弱度、中度间伐样地中稍大于对照;香樟×重阳木混交林间伐样地均未超过对照,但随间伐强度增大而增大(表 5)。

表 5 土壤碳储量垂直分布

Table 5 The vertical distribution of soil carbon storage									(t·hm ⁻²)
土层/cm	DY-CK	DY-L	DY-M	DY-H	HJ-CK	HJ-L	HJ-M	HJ-H	
0—10	9.01	15.26	15.48	9.38	13.28	12.41	17.86	18.80	
10—20	8.17	10.54	7.39	10.76	8.32	8.97	8.87	10.03	
20—30	4.64	8.52	9.15	9.09	7.88	8.25	9.59	6.81	
30—40	9.21	10.60	8.09	9.32	8.29	7.33	7.47	7.88	
40—50	9.94	9.73	12.49	6.82	7.51	7.74	6.10	7.76	
50—60	9.55	7.04	6.31	5.26	8.75	5.56	6.28	8.96	
60—70	8.71	4.14	5.94	5.74	8.80	5.77	4.34	5.93	
70—80	8.58	3.20	6.51	6.37	8.84	6.44	4.61	3.83	
总计	67.82	69.03	71.36	62.73	71.67	62.48	65.12	70.01	

表 6 不同样地间土壤碳储量垂直分布比例 Fisher 精确检验结果

Table 6 Results of Fisher's exact test for vertical distribution ratio of soil carbon storage between different plots							
P 值	DY-CK	DY-L	DY-M	P 值	HJ-CK	HJ-L	HJ-M
DY-L	0.000 01	—		HJ-L	0.000 01	—	
DY-M	0.000 01	0.000 01	—	HJ-M	0.000 01	0.000 01	—
DY-H	0.000 01	0.000 01	0.000 01	HJ-H	0.000 01	0.000 01	0.000 01

间伐处理显著地改变了 2 种林分土壤碳储量的垂直分布。Fisher 精确检验结果表明,杜英林和香樟×重阳木混交林各间伐强度样地均与各自对照样地土壤碳储量垂直分布比例差异显著($P<0.01$),两种林分各间伐强度样地之间差异性显著($P<0.01$)(表 6)。

在对照样地中,2 种林分的土壤碳储量随深度增加呈较均匀分布。而在间伐样地中,土壤碳储量随深度增加逐渐减少,土壤碳储量更为集中于地表;其中杜英林在弱度间伐样地中尤为明显,香樟×重阳木混交林在中度间伐样地中较为明显(图 3、图 4)。

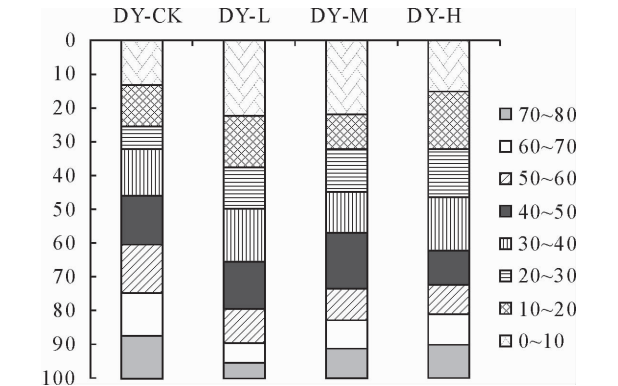


图 3 不同间伐强度下杜英林土壤碳储量垂直分布比例

Fig. 3 Percentage of soil carbon storage in different vertical layers for *E. decipiens* plantation under different thinning intensities

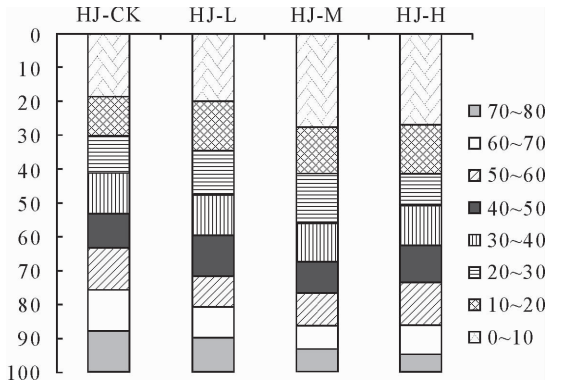


图 4 不同间伐强度下香樟×重阳木混交林土壤碳储量垂直分布比例

Fig. 4 Percentage of soil carbon storage in different vertical layers for *C. camphora*×*B. polycarpa* mixed forest under different thinning intensities

3 结论与讨论

3.1 间伐对林分碳储量的影响

本研究中各间伐样地林分碳储量均小于对照样地,说明间伐带走的碳储量在短时间内无法恢复,这与一些研究结果一致。如陕西桥山林区油松(*Pinus tabulaeformis*)林间伐林分的林分碳储量在 12 a 后仍低于未间伐林分^[25];间伐降低了美国黄松(*Pinus ponderosa*)的林分生物量,16 a 后依然小于未间伐样地^[26];间伐也降低了人工长白落叶松(*Larix olgensis*)林林分生物量,但随着恢复时间延长,间伐

林分的生物量趋近未间伐林分^[27]，其碳储量也发生相应变化。也有研究表明间伐增加了林分碳储量，例如对麻栎(*Quercus acutissima*)林进行不同强度间伐的研究显示，5 a 后间伐样地林分总碳密度高于对照样地^[21]；对木麻黄(*Casuarina equisetifolia*)林的间伐研究表明间伐 3 a 后林分生物量高于对照^[28]。间伐对林分碳储量的影响目前尚无一致结论。

此外，本研究也表明，适当的间伐强度可以提高林下植物碳储量所占比例。这是因为，一方面由于间伐带走了大量林木层碳储量，导致林下层所占比例上升；另一方面，林下层碳储量的绝对值也有所增加，如中度间伐样地的林下层碳储量明显高于对照。这与方海波^[29]等的研究结论基本一致。研究表明适当间伐人工林后，会显著改变林下环境，增强光照，促进林下灌草层的生长，对于间伐损失的林分碳储量有弥补的作用。对于杜英林，间伐强度越大，林木层生物量越小(表 3)，林冠郁闭度越低，林下层发育越良好，致使中度和强度间伐中林下层碳储量占比大于弱间伐强度(图 1)；对于香樟×重阳木混交林，由于间伐木为重阳木，间伐强度越大，香樟长势越好^[22]，因而林木层生物量越大(表 3)、林冠郁闭度越低，因而在重间伐强度下林下层的发育最差(图 2)，占比最小。这亦是导致各间伐强度之间植物碳储量垂直分布比例存在差异的主要原因。

3.2 间伐对凋落物及土壤碳储量的影响

本研究中，所有间伐强度使得两种林型的凋落物碳储量增加，这与间伐处理下的杉木(*Cunninghamia lanceolata*)林^[30]和蒙古栎(*Quercus mongolica*)林^[31]凋落物碳储量增加的研究结果一致。丁磊^[31]等认为间伐提高了林木胸径，丰富了冠层及下木的枝叶量，因而凋落物层的蓄积量也相应增加。但更多研究表明间伐使林下凋落物碳储量减少，如间伐处理下的白云杉(*Picea glauca*)林^[32]、杨树(*Populus* spp)人工林^[33]、华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)林^[34]、红松(*Pinus koraiensis*)林^[35]凋落物总储量或碳储量减小。其原因主要归结为两方面：间伐后短期内，枝叶总量减少导致凋落量减少^[34]；林冠郁闭度降低使地表增温显著，加速了凋落物分解^[36]。此外，间伐还可以通过改变凋落物性质，如氮和粗灰分含量，影响凋落物碳分解^[37]，导致其碳储量发生变化。这也是导致本研究凋落物碳储量增加的一个重要因素。在同一杜英纯林中的研究表明，杜英叶氮含量随间伐强度加大而减小，且强度间伐样地叶氮含量与对照达到显著性差异^[18]；对于香樟×重阳木混交林，因间伐处理主要去除了

落叶阔叶物种重阳木，导致间伐样地中凋落物主要由香樟枝叶组成，而常绿阔叶树种的叶氮含量通常低于落叶阔叶树种^[38]。研究表明，含氮量高的凋落物分解速率高于含氮量低的^[39]。因此 2 种林分在间伐处理后，凋落物的氮含量均有所降低，限制了凋落物的分解，有利于凋落物积累，其他原因有待于进一步研究。

间伐也改变了杜英林和香樟×重阳木混交林土壤碳储量的垂直分布格局。2 种林型的对照样地土壤碳储量在垂直分布上相对均匀，而间伐样地则呈现出从上到下土壤碳储量减小的趋势。相关研究表明土壤有机碳库的输入主要来源于凋落物分解、根系输入和淋溶作用^[40]。本研究中，间伐增加了凋落物量，其分解进入土壤表层的有机碳量相应增加；加之，间伐增加了林下层(即灌木层和草本层)的根系生物量，使得土壤浅层根系密度提高，增加了土壤表层碳输入量。相反，间伐导致林木层个体的根系生物量减少，致使通过根系向深层土壤分配的碳减少；间伐样地中较厚的凋落物层，也起到了减缓雨水淋溶的作用，以可溶性有机碳向深层土壤的输入量相应减少。

3.3 结论

经间伐短期恢复，黄浦江 2 种林型的水源涵养林(杜英林、香樟×重阳木混交林)碳储量总量均未完全恢复，但间伐显著增加了凋落物和林下层碳储量，使土壤碳储量更为集中于地表。经过 4 a 的短期恢复，对于杜英林的 3 个间伐强度，47%的间伐强度可能为最佳，不仅具有较大的植物碳储量和最大的土壤碳储量，同时其凋落物与林下层生物量最大，林分垂直结构上生物量分配相对均匀，具有良好的潜在截水和蓄水功能；对于香樟×重阳木混交林的 3 个间伐强度，24%的间伐强度可能为最佳，不仅具有较大的植被碳储量和土壤碳储量(两者均接近对照样地)，并具较大的凋落物量，有助于提高截水和蓄水能力。

致谢：本研究受到上海市科学技术委员会科研计划项目(08DZ1203102)、上海市科技兴农重点攻关项目[沪农科攻字(2011)第 1—6 号]资助。感谢华东师范大学王倩玲、荆贝贝、李晓旭、潘应骥在野外调查、采样和室内样品分析过程中提供的帮助。感谢上海市林业总站人员给予的支持和帮助。感谢华东师范大学宋坤对于论文修改提出的宝贵意见。

参考文献：

[1] BROWN S, HALL CAS, KNABE W, et al. Tropical forests:

their past, present, and potential future role in the terrestrial carbon budget[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 1993, 70(1-4): 71-94.

[2] PHILLIPS O L, MALHI Y, HIGUCHI N, *et al.* Changes in the Carbon balance of tropical forests: evidence from long-term plots[J]. Science, 1998, 282(5388): 439-442.

[3] 胡会峰, 刘国华. 森林管理在全球 CO₂ 减排中的作用[J]. 应用生态学报, 2006, 17(4): 709-714.

HU H F, LIU G H. Roles of forest management in global carbon dioxide mitigation[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(4): 709-714. (in Chinese)

[4] 周晓宇, 张称意, 郭广芬. 气候变化对森林土壤有机碳贮藏影响的研究进展[J]. 应用生态学报, 2010, 21(7): 1867-1874.

ZHOU X Y, ZHANG C Y, GUO G F. Effects of climate change on forest soil organic carbon storage: a review[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(7): 1867-1874. (in Chinese)

[5] MCGARVEY J C, THOMPSON J R, EPSTEIN H E, *et al.* Carbon storage in old-growth forests of the mid-atlantic: toward better understanding the eastern forest carbon sink[J]. Ecology, 2015, 96(2): 311-317.

[6] 杨玉盛, 陈光水, 谢锦升, 等. 中国森林碳汇经营策略探讨[J]. 森林与环境学报, 2015, 35(4): 297-303.

YANG Y S, CHEN G S, XIE J S, *et al.* Strategy for carbon management in China's forests[J]. Journal of Forest and Environment, 2015, 35(4): 297-303. (in Chinese)

[7] 史山丹, 赵鹏武, 周梅, 等. 大兴安岭南部长白山杨天然次生林不同生长阶段生物量及碳储量[J]. 生态环境学报, 2012, 21(3): 428-433.

SHI S D, ZHAO P W, ZHOU M, *et al.* Biomass and carbon storage of the secondary forest (*Populus davidiana*) at different stand growing stages in southern Daxinganling temperature zone[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2012, 21(3): 428-433. (in Chinese)

[8] 王敏, 李贵才, 仲国庆, 等. 区域尺度上森林生态系统碳储量的估算方法分析[J]. 林业资源管理, 2010, (2): 107-112.

WANG M, LI G C, ZHONG G Q, *et al.* Integrating ecosystem process models, remote sensing and ground-based observations for regional-scale analysis of the carbon storage[J]. Forest Resources Management, 2010, (2): 107-112. (in Chinese)

[9] 杨晓菲, 鲁绍伟, 饶良懿, 等. 中国森林生态系统碳储量及其影响因素研究进展[J]. 西北林学院学报, 2011, 26(3): 73-78.

YANG X F, LU S W, RAO L Y, *et al.* Advances in the research of carbon storage of forest ecology and related factors in China[J]. Journal of Northwest Forestry, 2011, 26(3): 73-78. (in Chinese)

[10] FANG J Y, CHEN A, PENG C, *et al.* Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998[J]. Science, 2001, 292(5525): 2320-2322.

[11] 顾宇书. 水源涵养林耗水, 水文过程及其结构[J]. 水土保持应用技术, 2010(4): 6-7.

[12] 蔡婷, 李阿瑾, 宋坤, 等. 黄浦江上游近自然混交林和人工纯林水源涵养功能评价[J]. 水土保持研究, 2015, 22(2): 36-40.

CAI T, LI A J, SONG K, *et al.* Study on water conservation of near-natural forest and pure forest in upper reaches of the Huangpu river[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015, 22(2): 36-40. (in Chinese)

[13] 蒋秋怡. 林地地上部分的持水性能及其对林地水文学性质的影响[J]. 浙江林学院学报, 1989, 6(2): 176-181.

JIANG Q Y. Water capacity of aerial part biomass and its effects on hydrological characters in the forest land[J]. Journal of Zhejiang Forestry College, 1989, 6(2): 176-181. (in Chinese)

[14] 郭军庭, 张志强, 唐丽霞. 晋西黄土区小流域典型植被水文功能优化研究[J]. 水土保持通报, 2010(3): 36-40.

GUO J T, ZHANG Z Q, TANG L X. Improving hydrological functions of a small watershed in hilly and gully loess area by vegetation type optimization[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2010(3): 36-40. (in Chinese)

[15] 高成德, 余新晓. 水源涵养林研究综述[J]. 北京林业大学学报, 2000, 22(5): 78-82.

GAO C D, YU X X. Review on research of water conservation forests[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2000, 22(5): 78-82. (in Chinese)

[16] 寇韬, 李春燕, 官照红, 等. 水源涵养林现状研究综述[J]. 防护林科技, 2009(5): 59-62.

[17] 王哲, 韩玉洁, 康宏樟, 等. 黄浦江上游主要树种水源涵养林生态系统碳储量[J]. 生态学杂志, 2012, 31(8): 1930-1935.

WANG Z, HAN Y J, KANG H Z, *et al.* Carbon storage of main tree species plantations for water resources conservation in upper reaches of Huangpu river, Shanghai[J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(8): 1930-1935. (in Chinese)

[18] 张净. 间伐对城市人工林群落结构和生态功能的影响及其近自然经营管理[D]. 上海: 华东师范大学, 2012.

[19] 胡建伟, 朱成秋. 抚育间伐对森林环境的影响[J]. 东北林业大学学报, 1999, 27(3): 65-67.

HU J W, ZHU C Q. The impacts of intermediate felling on forest environment[J]. Journal of Northeast Forestry University, 1999, 27(3): 65-67. (in Chinese)

[20] SILVANO F, GIUSEPPE S M, PIERMARIA C, *et al.* Five steps for managing Europe's forests[J]. Nature, 2015, 519(7544): 26.

[21] 成向荣, 虞木奎, 葛乐, 等. 不同间伐强度下麻栎人工林碳密度及其空间分布[J]. 应用生态学报, 2012, 23(5): 1175-1180.

CHENG X R, YU M K, GE L, *et al.* Carbon density and its spatial distribution in *Quercus acutissima* plantations under different thinning intensities[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(5): 1175-1180. (in Chinese)

[22] 王倩玲. 不同间伐强度对人工林碳储量分布格局的影响——以上海奉贤区水源涵养林为例[D]. 上海: 华东师范大学, 2014.

[23] JOHNSON W C, SHARPE D M. The ratio of total to merchantable forest biomass and its application to the global carbon budget[J]. Canadian Journal of Forest Research, 1983, 13(3): 372-383.

[24] FANG J Y, WANG G G, LIU G H, *et al.* Forest biomass of China: an estimate based on the biomass-volume relationship[J]. Ecological Applications, 1998, 8(4): 1084-1091.

[25] 韩福利, 田相林, 党坤良, 等. 抚育间伐对桥山林区油松林乔木层碳储量的影响[J]. 西北林学院学报, 2015, 30(4): 184-191.

HAN F L, TIAN X L, DANG K L, *et al.* Impact of thinning on carbon storage for *Pinus tabulaeformis* stands in Shaanxi Qiaoshan[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2015, 30(4): 184-191. (in Chinese)

[26] CAMPBELL J, ALBERTI G, MARTIN J, *et al.* Carbon dynamics of a ponderosa pine plantation following a thinning treatment in the northern Sierra Nevada[J]. Forest Ecology and Management, 2009, 257(2): 453-463.

[27] 李春明, 杜纪山, 张会儒. 间伐对长白落叶松林分生物量的影响[J]. 西北林学院学报, 2008, 23(6): 69-73.

LI C M, DU J S, ZHANG H R. Influence of thinning on the biomass of *Larix olgensis* plantation[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2008, 23(6): 69-73. (in Chinese)

[28] 叶功富, 隆学武, 黄传英, 等. 木麻黄林生物产量的间伐效应[J]. 防护林科技, 1996(s1): 86-89.

[29] 方海波, 田大伦, 康文星. 间伐后杉木人工林生态系统生物产量的动态变化[J]. 中南林学院学报, 1999, 19(1): 16-19.

FANG H B, TIAN D L, KANG W X. Biomass dynamics of a thinned Chinese fir plantation ecosystem[J]. Journal of Central South Forestry University, 1999, 19(1): 16-19. (in Chinese)

[30] 方晰, 田大伦, 项文化. 间伐对杉木人工林生态系统碳贮量及其空间分配格局的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2010, 30(11): 47-53.

FANG X, TIAN D L, XIANG W H. Effects of thinning on carbon storage and its spatial distributions in Chinese fir plantation ecosystem[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2010, 30(11): 47-53. (in Chinese)

[31] 丁磊, 谭学仁, 亢新刚, 等. 辽东山区生态公益林抚育间伐效果[J]. 东北林业大学学报, 2010, 38(1): 37-39.

DING L, TAN X R, KANG X G, *et al.* Effects of thinning on non-commercial forest in eastern mountainous region of Liaoning Province[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2010, 38(1): 37-39. (in Chinese)

[32] PIENE H, CLEVE K V. Weight loss of litter and cellulose bags in a thinned white spruce forest in interior Alaska[J]. Canadian Journal of Forest Research, 1978, 8(1): 42-46.

[33] CHUONG D N, 崔光彩, 洪森先, 等. 间伐对杨树人工林凋落物及养分归还量的影响[J]. 林业科技开发, 2015, 29(3): 48-51.

CHUONG D N, CUI G G, HONG S X, *et al.* Effects of thinning on litter fall dynamics and nutrient return in poplar plantations[J]. Journal of Forestry Engineering, 2015, 29(3): 48-51. (in Chinese)

[34] 田国恒. 不同间伐抚育强度对华北落叶松人工林林下凋落物的影响研究[J]. 山东林业科技, 2014, 44(3): 70-72.

[35] 许丽娟, 王庆成, 梁晶, 等. 间伐强度对长白山西坡中幼龄过伐林凋落物养分和碳密度的影响[J]. 东北林业大学学报, 2013, 41(10): 10-13.

XU L J, WANG Q C, LIANG J, *et al.* Effects of thinning intensities on nutrient and carbon density on forestry litter in overcut forest with two different ages in western Changbai Mountains[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2013, 41(10): 10-13. (in Chinese)

[36] 王祖华, 刘红梅, 王晓杰, 等. 经营措施对森林生态系统碳储量影响的研究进展[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2011, 39(1): 83-88.

WANG Z H, LIU H M, WANG X J, *et al.* Progress of management on carbon storage of forest ecosystems[J]. Journal of Northwest A & F University: Nat. Sci. Ed., 2011, 39(1): 83-88. (in Chinese)

[37] 李国雷, 刘勇, 李瑞生, 等. 油松叶凋落物分解速率, 养分归还及组分对间伐强度的响应[J]. 北京林业大学学报, 2008, 30(5): 52-57.

LI G L, LIU Y, LI R S, *et al.* Responses of decomposition rate, nutrient return and composition of leaf litter to thinning intensities in *Pinus tabulaeformis* plantation[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2008, 30(5): 52-57. (in Chinese)

[38] 刘微. 天童主要落叶和常绿树种叶片 N、P 化学计量学及分配特征研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2014.

[39] 王希华, 黄建军, 闫恩荣. 天童国家森林公园常见植物凋落物分解的研究[J]. 植物生态学报, 2004, 28(4): 457-467.

WANG X H, HUANG J J, YAN E R. Leaf litter decomposition of common trees in Tiantong[J]. Acta Phytocologica Sinica, 2004, 28(4): 457-467. (in Chinese)

[40] JOBBÁGY E G, JACKSON R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation[J]. Ecological Applications, 2000, 10(2): 423-436.