

黄土高原油松人工林幼林生态系统碳汇研究

王晓芳¹, 张景群^{1*}, 王 蕾¹, 张婷婷²

(1. 西北农林科技大学 林学院, 陕西 杨陵 712100; 2. 西北农林科技大学 园艺学院, 陕西 杨陵 712100)

摘 要:为定量评价黄土高原人工林的固碳能力,采用固定样地方法以油松人工林幼林(6 a)和对照荒地作为研究对象,比较两种地类生态系统中土壤、植物各部分和凋落物层的有机碳密度和碳储量变化。结果表明:荒地在 0~80 cm 土层土壤有机碳密度为 5.086 kg·m⁻²,油松林为 5.840 kg·m⁻²,与荒地相比增加了 14.83%;油松人工林地植物地上部分、根系有机碳密度与荒地相比分别增加了 123.31%、4.93%;凋落物有机碳密度无明显变化;油松人工林生态系统有机碳密度平均每年增加 22.94%,说明黄土高原营造油松人工林具有明显的碳增汇效应。

关键词:碳汇;生态系统;油松人工林;黄土高原

中图分类号:S791.254.02 文献标志码:A 文章编号:1001-7461(2010)05-0029-04

Analysis of Carbon Sink in Artificial Forest Ecosystem of Young *Pinus tabulaeformis* Plantation in Loess Plateau

WANG Xiao-fang¹, ZHANG Jing-qun^{1*}, WANG Lei¹, ZHANG Ting-ting²

(1. College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;
2. College of Horticulture, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: To quantitatively evaluate the carbon sequestration of artificial forest in the Loess Plateau, a comparative study was conducted on the organic carbon density of soil, litter and plant organs in an 6-year-old *Pinus tabulaeformis* plantation and nearby barren land using fixed plot method for sampling. The results indicated that the value of soil organic carbon density was 5.086 kg·m⁻² in the depth of 0~80 cm in wasteland, whereas that of 6-year-old *P. tabulaeformis* was 5.840 kg·m⁻², which increased by 14.83 % compared to the wasteland. Comparing with the barren land, the organic carbon density in its aboveground organs, root system increased by 123.31% and 4.93%, respectively. Litter layers of the young *P. tabulaeformis* had no significant change. A total organic carbon density increased by 22.94% annually. All these results demonstrated that remarkable carbon sink effects had performed in artificial forest of *P. tabulaeformis* in the Loess Plateau.

Key words: carbon sink; ecosystem; *Pinus tabulaeformis* plantation; Loess Plateau

森林是陆地生物圈的主体,它不仅在维护区域生态环境上起着重要作用,而且在全球碳平衡中也作出了巨大贡献。中国森林面积截止到 2003 年为 1.75×10⁸ hm²,森林覆盖率 18.21%,随着植树造林步伐的加快和森林经营管理的提高,预计到 2010 年中国的森林覆盖率将达到 20.3%,到 2050 年提高到 26%^[1]。因此,研究人工林生态系统的有机碳

密度和碳储量问题,对人工林生态效益定量评价具有重要意义。近几年来,国内学者围绕森林生态系统的碳密度、碳储量做了大量的研究工作,并取得了显著的成就^[2-3],如对四川省人工生态林系统^[2]、黄土高原刺槐人工林生态系统^[5-6]、云南省退耕还林还草生态系统^[7]、科尔沁沙地造林后的生态系统^[8]等研究,为森林碳汇评估提供了依据。本研究以黄土

收稿日期:2009-12-24 修回日期:2010-03-10

基金项目:中日合作陕西省日元贷款造林项目“生态环境监测研究资助”(14220302)。

作者简介:王晓芳,女,在读硕士,研究方向:景观生态。E-mail:wang860123@126.com

* 通讯作者:张景群,男,教授,主要从事景观生态学教学与研究。E-mail:zjqml@126.com

高原地区油松(*Pinus tabulaeformis*)人工幼林为研究对象,分析油松人工林生态系统各组成部分有机碳密度、碳储量及有机碳分配特征,为我国西部生态环境建设中人工造林面积最大区域的不同林分、不同林龄阶段的幼林生态系统碳汇能力评价奠定基础,并为其他类型人工生态林碳汇研究提供参考。

1 研究区概况

研究区位于陕西省中西部的永寿县境内,渭北黄土高原南缘,34°42′ 247″N、108°05′556″E,属暖温带大陆性季风气候,年平均气温 10.8℃,极端高温 38℃,极端低温-18.0℃,无霜期 210 d。年平均日照 2 166 h,年平均降水量 578 mm,降雨集中在 8—9 月。土壤为粘性黄壤。根据 2008 年调查,自 2000 年以来,该流域在日元贷款造林项目的支持下,对荒山和部分低产农田实行“退耕灭荒”造林,造

林林种以生态林为主,造林树种以刺槐、油松为主,研究区森林覆被率由 2000 年前的不足 10%提高到 65%以上。

2 研究方法

2.1 样地选择

研究设样地 4 块,其中荒山样地 2 块,油松样地 2 块,面积均为 400 m²(表 1)。经 2008 年调查,荒山样地主要植物有:胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、龙芽草(*Agrimonia pilosa*)、细叶苔草(*Carex duriuscula*)、白蒿(*Artemisia frigida*)、小白酒草(*Conyza canadensis*)、缬草(*Salvia officinalis*)等;油松样地主要植物有:胡枝子、油葫芦、细叶苔草、地丁草(*Corydalis bungeana*)、甘菊(*Cancriniae discoidene*)、毛莲蒿(*Artemisia vestita*)、小白酒草(*Conyza canadensis*)等。

表 1 调查样地概况
Table 1 Survey of the sample plots

样地类型		密度 /(株·hm ⁻²)	平均胸径 /cm	平均高 /m	郁被度 /%	灌木盖度 /%	草本盖度 /%
荒地	固定样地					40	80
	造林前					25	70
油松幼龄林	固定样地	104	1.51	1.69	85	15	65
	临时样地	100	1.56	1.65	85	15	70

2.2 调查方法

2.2.1 乔木生物量调查 乔木生物量按照测树学方法调查,即每个样地选择标准木 1 株,测定单株叶、果、枝、干、皮、根等生物量;根系采用分层(每 10 cm 为 1 层)、分级(<0.5 mm,0.5~1 mm,>1 mm)全面取根调查法测定鲜重。单位面积乔木总生物量以标准木单株生物量为标准计算。

2.2.2 灌木草本生物量调查 在标准地内采用对角线调查法布设小样方 3 个,灌木调查样方面积为 5 m×5 m,在灌木调查样方内设草本调查小样方,面积为 1 m×1 m。灌木调查采取不分级方法分别对样地内灌木地上部分和根系的生物量进行全面调查,草本仅调查样方内地上部分生物量。

2.2.3 凋落物生物量调查 在草本调查小样方内,采用不分类全面调查法调查凋落物总重,并选取一定量的混合样品作为分析样品。

2.2.4 土壤调查 土壤取样在草本调查样方内进行,采用直径为 9 cm 的管型钻分层采样,取土深度为 0~80 cm,每层取 10 cm 的土体样品,每个剖面获取 8 个土样调查数据。

2.3 有机碳含量测定

植物样品在 104℃下烘干至恒重、粉碎,土壤样品风干、磨碎并过 0.25 mm 筛用于测定有机碳含量。有机碳含量采用重铬酸钾-硫酸氧化法进行测定^[9-10]。

2.4 数据处理

对于不同生态系统的不同层次、不同类型的有机碳含量测定结果,应用 SPSS11.0 统计软件,采用双因素方差分析(Two-factor ANOVA),在 ANOVA 结果显著($P<0.05$)的基础上进行 3 组数据比较。

3 结果与分析

3.1 造林对土壤有机碳密度的影响

对 4 块样地土壤调查表明(表 2),荒地土壤容重在 1.241~1.459 g·cm⁻³之间,平均土壤容重 1.338 g·cm⁻³。油松林的土壤容重在 1.412~1.687 g·cm⁻³之间,平均土壤容重 1.594 g·cm⁻³。对不同地类土壤有机含碳率测定得出,荒地土壤的含碳率介于 0.37%~0.75%之间,平均含碳

率为 0.47%。油松林地的含碳率介于 0.37%~0.90% 之间,平均含碳率为 0.46%^[10]。

表 2 各调查样地基本数据测定与计算

Table 2 Basic data of determination and calculation from the sample plots				
土壤深度 /cm	荒 地		油松林地	
	土壤容重	有机 C 含量	土壤容重	有机 C 含量
	/(g·cm ⁻³)	/(g·kg ⁻¹)	/(g·cm ⁻³)	/(g·kg ⁻¹)
0~10	1.459	7.510	1.588	9.010
10~20	1.412	5.340	1.687	4.150
20~30	1.331	4.590	1.579	3.830
30~40	1.377	4.150	1.412	3.770
40~50	1.241	4.340	1.565	4.460
50~60	1.307	3.730	1.602	3.870
60~70	1.277	3.710	1.634	3.810
70~80	1.302	4.250	1.687	3.740
平均值	1.338	4.703	1.594	4.580

根据调查与测定结果,荒地和油松林在 0~80 cm 平均土壤有机碳密度分别为 5.086 kg·m⁻² 和 5.840 kg·m⁻²。图 1 结果表明,荒地和油松样地间差异显著($P<0.05$),其中 0~30 cm 差异最为显著,说明 2 组样地不同土壤层间的有机碳密度有所变化,其中 0~10 cm 土层油松林的土壤有机碳密度比相邻荒地增加了 30.57%;10~40 cm 土层有机碳密度比相邻荒地增加了 2.38%;而在 40~80 cm 油松林和相邻荒地的有机碳密度分别为 1.874、1.514 kg·m⁻²。油松林与相邻荒地相比土壤有机碳密度增加了 14.83%,平均每年增加 2.47%,说明黄土高

原油松造林有利于土壤有机碳密度的增加^[11-15]。

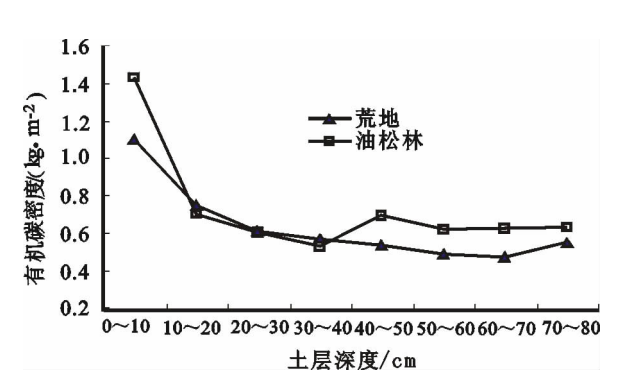


图 1 荒地与油松林土壤有机碳密度垂直分布

Fig. 1 Comparison of vertical variation of organic carbon storage of barren land and *P. tabulaeformis* plantation

3.2 根系对有机碳密度的影响

图 1 表明,荒地灌木根系有机碳密度为 0.142 kg·m⁻²,油松林乔木层根系有机碳密度为 0.149 kg·m⁻²,灌木层根系有机碳密度为 0.096 kg·m⁻²,总有机碳密度为 0.245 kg·m⁻²。结果表明,油松林植物根系总有机碳密度与对照荒地相比增加 0.103 kg·m⁻²,总碳增汇率为 72.5%,平均每年为 12.1%。

3.3 地上部分对有机碳密度的影响

2 种地类的生物量测定见表 3。其中有有机碳测定结果表明,灌木及草本的有机碳含量分别为 496、473 g·kg⁻¹,油松叶、1 a 生枝、2 a 生枝、≥3 a 生枝及干、皮各部分有机碳含量分别为 574、573、545、546、571 g·kg⁻¹ 和 565 g·kg⁻¹。

表 3 油松林地与荒地地上部分生物量

Table 3 Above-ground biomass of <i>P. tabulaeformis</i> plantation and barren land			
荒地生物量			刺槐林地生物量
枯落物/(g·m ⁻²)	灌木/(g·m ⁻²)	草本/(g·m ⁻²)	枯落物/(g·m ⁻²) 灌木/(g·m ⁻²) 草本/(g·m ⁻²) 乔木/(g·株 ⁻¹)
59	226	326	266 195 475 叶 580
—	—	—	— — — 1 a 枝 181
—	—	—	— — — 2 a 枝 180
—	—	—	— — — ≥3 a 枝 174
—	—	—	— — — 干 604
—	—	—	— — — 皮 129

荒地灌木地上部分和草本有机碳密度分别为 0.112 kg·m⁻² 和 0.154 kg·m⁻²,合计为 0.266 kg·m⁻²。油松林地灌木地上部分、草本、乔木地上部分的有机碳密度分别为 0.097、0.225 kg·m⁻² 和 0.272 kg·m⁻²,合计为 0.594 kg·m⁻²。结果表明,油松林地植物地上部分有机碳密度比对照荒地增加 0.328 kg·m⁻²,与对照荒地相比,有机碳增汇率为 123.31%,平均每年 20.55%,表现出极为明显

的碳增汇效应。

3.4 凋落物层对有机碳密度的影响

灌木、草本等林下植被以及凋落物不但可以储存碳,而且也是土壤-植被系统碳循环的重要联结库。同时有研究指出,森林凋落物现存量的变化对土壤碳储量影响很大^[16]。对油松林与荒地的凋落物调查与测定表明,两者的凋落物层有机碳含量分别为 4.81、3.54 g·kg⁻¹,有机碳密度分别为 0.019

$\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $0.021 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,碳储量分别为 $0.019 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $0.021 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。与荒地相比,油松林地凋落物有机碳密度变化并不明显,与同一区域的刺槐林人工幼林明显增加^[5]相比,没有表现出对生态系统的碳增汇效应,这主要是因为油松林郁闭度小、年凋落物回归少所致。

3.5 生态系统碳储量及分布

经计算(图 2),荒地总碳储量为 $51.29 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,其中灌木层、草本层、凋落物层、土壤层分别占总碳储量的 0.50%、0.30%、0.04%、99.16%,各层碳储量的大小顺序为土壤层>灌木层>草本层>凋落物层。油松林的总碳储量为 $63.05 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,其中乔木层、灌木层、草本层、凋落物层、土壤层分别占总碳储量的 6.68%、0.31%、0.36%、0.03%、92.63%,各层碳储量的大小顺序为土壤层>乔木层>草本层>灌木层>凋落物层。计算表明,黄土高原荒地 6 a 生油松人工林较荒地有机碳储量增加 $11.76 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,其生态系统碳增汇率为 22.93%,平均每年碳增汇比荒地增加 3.82%。

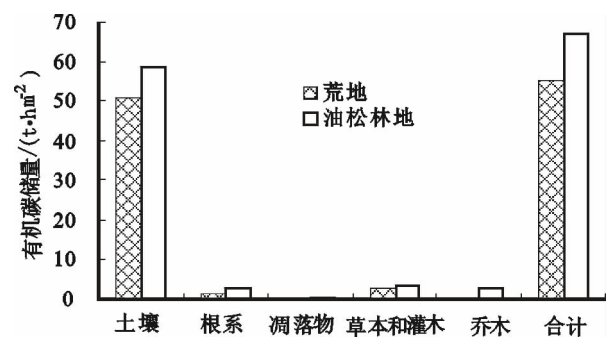


图 2 荒地与油松林地有机碳储量对比
Fig. 2 Comparison of organic carbon storage of barren land and *P. tabulaeformis* plantation

4 结论与讨论

油松人工林中有有机碳分配次序表现为土壤层>乔木层>草本层>灌木层>凋落物层,在乔木中的分配表现为干>枝>根>叶;油松林与相邻荒地相比土壤有机碳密度增加 14.83%,其中 0~10 cm 土层增加 30.57%,油松林植物部分与对照荒地相比增加 104.41%;油松林凋落物层碳密度比荒地降低了 9.52%。对 2 种生态系统总体比较说明,黄土高原油松造林具有较高的碳汇能力。

本研究采用固定样地、直接测定灌木、草本等林下植被及凋落物生物量与有机碳含量、土壤有机碳含量的基础上,计算了 2 种土地利用方式下的有机碳储量,这对于准确估算黄土高原地区人工造林的碳储量,正确评价黄土高原人工造林的生态效益具

有重要的指导意义。考虑到由于造林密度、保存率等对于幼林的碳汇估算准确性有一定影响,因此应对不同结构、不同林龄油松林与本研究之间的换算关系应进行进一步研究,以提高黄土高原人工林生态效益在各阶段评价的准确性。

参考文献:

[1] 康慧宁,马钦彦. 中国森林 C 汇功能基本估计[J]. 应用生态学报,1996,7(3):230-234.

KANG H N, MA Q Y. Estimation of carbon sink function of forests in China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1996, 7(3):230-234. (in Chinese)

[2] 黄从德,张健,杨万勤,等. 四川人工生态系统碳储量特征[J]. 应用生态学报. 2008, 19(8): 1644-1650.

HUANG C D, ZHANG J, YANG W Q, *et al.* Characteristics of carbon stock in artificial forest ecosystem in Sichuan Province of China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19 (8): 1644-1650. (in Chinese)

[3] 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.

WANG X K, FENG Z W, OUYANG Z Y. Vegetation carbon storage and density of forest ecosystems in China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2001, 12(1):13-16. (in Chinese)

[4] 王兵,魏文俊. 江西省森林碳储量与碳密度研究[J]. 江西科学,2007,25(6):681-687.

WANG B, WEI W J. Carbon storage and density of forests in Jiangxi Province[J]. Jiangxi Science, 2007, 25(6):681-687. (in Chinese)

[5] 张景群,苏印泉,康永祥,等. 黄土高原刺槐人工林幼林生态系统碳吸存[J]. 应用生态学报, 2009, 20(12):2911-2916.

ZHANG J Q, SU Y Q, KANG Y X, *et al.* Carbon sequestration of young *Robinia pseudoacacia* plantation in Loess Plateau[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(12):2911-2916. (in Chinese)

[6] 张景群,苏印泉,徐喜明,等. 黄土高原人工刺槐林土壤有机碳动态监测研究[J]. 西北林学院学报,2009,24(5): 21-25.

ZHANG J Q, SU Y Q, XU X M, *et al.* Study on dynamic monitoring of organic carbon of the black locust plantation in Loess Plateau[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2009, 24 (5): 21-25. (in Chinese)

[7] CHEN X G, ZHANG X Q, ZHANG Y P, *et al.* Carbon sequestration potential of the stands under the grain for green program in Yunnan Province, China[J]. Forest Ecology and Management, 2009, 258(3): 199-206.

[8] HU Y L, ZENG D H, FAN Z P, *et al.* Changes in ecosystem carbon stocks following grassland afforestation of semiarid sandy soil in the southeastern Keerqin Sandy Lands, China[J]. Journal of Arid Environments, 2008, 72: 2193- 2200.

[9] 刘光菴. 土壤理化分析与剖面描述[M]. 北京:中国标准出版社,1996:38-39.

LIU G S. Analysis of Physo-chemistry Properties and Description Profile of Soil[M]. Beijing: China Standard Press, 1996: 38- 39. (in Chinese)

of *Prunus salicina* and *Lagerstroemia indica* [J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 1995, 120: 1.

[5] 贾慧君, 郑槐明, 黄士昆. 盆栽紫薇花芽分化中内源激素的变化 [J]. 植物生理学通讯, 1993, 29(1): 39-41.
JIA H J, ZHENG H M, HUANG S K. Changes of endogenous hormones in shoot terminal of pot-planted Crape myrtle during bud differentiation [J]. Plant Physiology Communications, 1993, 29(1): 39-41. (in Chinese)

[6] LIBERATO J R, BARRETO R W. Anamorphic stage of *errisiphe australiana* causing powdery mildew on *Lagerstroemia indica* in Brazile [J]. Plant Pathology, 2004, 53(6): 808.

[7] 朱爱萍, 刘振宇, 周晓明, 等. 紫薇白粉病的研究 [J]. 山东林业科技, 2001(5): 28-29.
ZHU A P, LIU Z Y, ZHOU X M, *et al.* Study on powdery mildew of grand myrtle [J]. Shandong Forestry Science and Technology, 2001(5): 28-29. (in Chinese)

[8] EGOLF D R. 'Choctaw' *Lagerstroemia* [J]. Hort Science, 1990, 25(8): 992-993.

[9] 贾文庆, 刘会超, 姚连芳. 紫薇花粉萌发特性研究 [J]. 西北林学院学报, 2007, 22(6): 18-20.
JIA W Q, LIU H C, YAO L F. Pollen viability of *Lagerstroemia indica* [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2007, 22(6): 18-20. (in Chinese)

[10] SAREEN T S, KAUR J. Self-incompatibility system in *Lagerstroemia parviflora* Roxb. and *L. indica* Linn [J]. Plant cell Incompatibility Newsletter, 1991, 23: 58-62.

[11] 沈年华, 万志洲, 汤庚国, 等. 紫金山栓皮栎群落结构及物种多样性 [J]. 浙江林学院学报, 2009, 25(5): 696-700.
SHEN N H, WAN Z Z, TANG G G, *et al.* Community structure and species diversity of a *Quercus variabilis* forest on Mount Zijingshan [J]. Journal of Zhejiang Forestry College, 2009, 25(5): 696-700. (in Chinese)

[12] 段而军, 刘增文, 冯顺煜, 等. 陕北半湿润黄土丘陵区不同森林群落林下植物多样性比较分析 [J]. 西北林学院学报, 2009, 24(2): 1-6.
DUAN E J, LIU Z W, FENG S Y, *et al.* Comparison of plants diversity undergrowth in different forests in semi-humid rolling loess region of northern Shaanxi [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2009, 24(2): 1-6. (in Chinese)

[13] 袁建国, 梅盛龙, 刘胜龙, 等. 浙江凤阳山自然保护区福建柏群落物种多样性 [J]. 浙江林学院学报, 2006, 23(1): 41-45.
AI J G, MEI S L, LIU S L, *et al.* Species diversity of *Fokienia hodginsii* community in Nature Reserve of Mount Fengyang in Zhejiang Province [J]. Journal of Zhejiang Forestry College, 2006, 23(1): 41-45. (in Chinese)

[14] 吴征镒. 中国种子植物属的分布区类型 [J]. 云南植物研究, 1991(增刊IV): 1-139.
WU Z Y. The areal-types of Chinese genera of seed plants [J]. Acta Botanica Yunnanica, 1991 (supp IV): 1-139. (in Chinese)

[15] KERSHAW K A. Quantitative and dynamic ecology [M]. London: Edward Arnold, 1973: 72-142.

(上接第 32 页)

[10] 赵林, 殷鸣放, 陈晓非, 等. 森林碳汇研究的计量方法及研究现状综述 [J]. 西北林学院学报, 2008, 23(1): 59-63.
ZHAO L, YIN M F, CHEN X F, *et al.* Summary of the research methods of forest carbon sink accounting [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2008, 23(1): 59-63. (in Chinese)

[11] 徐香兰, 张科利, 徐宪立, 等. 黄土高原地区土壤有机碳估算及其分布规律分析 [J]. 水土保持学报, 2003, 17(3): 40-41, 51.
XU X L, ZHANG K L, XU X L, *et al.* Spatial distribution and estimating of soil organic carbon on Loess Plateau [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2003, 17(3): 40-41, 51. (in Chinese)

[12] GROENENDIJK FM, CONDRON L M, RIJKSE W C. Effects of afforestation on organic carbon, nitrogen and sulfur concentrations in New Zealand hill country soils [J]. Geoderma, 2002, 108: 91-100.

[13] ZINN Y L, DIMAS V S, RESCK J E, *et al.* Soil organic carbon as affected by afforestation with *Eucalyptus* and *Pinus* in the cerrado region of Brazil [J]. Forest Ecology and Management, 2002, 166: 285-294.

[14] SPECHT A, WEST P W. Estimation of biomass and sequestered carbon on farm forest plantations in northern New South Wales [J]. Biomass Bioenergy, 2003, 25(4): 363-379.

[15] PAUL K I, POLGLASE PJ, NYAKUENGAMA J, *et al.* Change in soil carbon following afforestation [J]. Forest Ecology and Management, 2002, 168: 241-257.

[16] 黄从德, 张国庆. 人工林碳储量影响因素 [J]. 世界林业研究, 2009, 22(2): 34-38.
HUANG C D, ZHANG G Q. Impact factors of carbon sequestration in artificial forest carbon stock and its impact factors [J]. World Forestry Research, 2009, 22(2): 34-38. (in Chinese)