

# 云南干热河谷不同密度麻疯树人工林土壤活性有机碳特征

谷丽萍<sup>1</sup>, 郭永清<sup>1\*</sup>, 泽桑梓<sup>1</sup>, 杨旭<sup>1</sup>, 李江<sup>1</sup>, 陈伟<sup>1</sup>, 阮宏华<sup>2</sup>

(1. 云南省林业科学院, 云南 昆明 650201; 2. 南京林业大学, 江苏 南京 210037)

**摘要:** 采用田间试验与室内实验相结合的方法, 研究云南省红河流域干热河谷区 3 种不同密度(低密度 1 112 株/hm<sup>2</sup>、中密度 1 668 株/hm<sup>2</sup> 和高密度 3 335 株/hm<sup>2</sup>) 麻疯树人工林 0~40 cm 土壤总有机碳、微生物生物量碳、水溶性有机碳和易氧化碳的分布特征及差异。结果表明: 土壤总有机碳与 3 种活性有机碳含量均随着土层深度的增加而逐渐降低。在 0~40 cm 土层, 土壤总有机碳含量的分布范围为 10.57~20.51 g/kg; 土壤微生物生物量碳含量的分布范围为 856.10~159.41 mg/kg; 水溶性有机碳含量的分布范围为 259.55~736.92 mg/kg; 易氧化碳含量的分布范围为 3.56~1.63 mg/g。在 0~40 cm 土层, 高密度人工林土壤总有机碳、水溶性有机碳和易氧化碳含量最高, 而低密度人工林土壤微生物生物量碳含量最高。土壤水溶性有机碳是土壤有机碳的重要组成部分, 所占比例均超过了 10%, 而微生物生物量碳和易氧化碳所占的比例较低。在本研究的范围内, 从土壤固碳增汇能力弱的角度考虑, 建议采用高密度方式种植麻疯树人工林。

**关键词:** 干热河谷; 麻疯树; 土壤有机碳; 林分密度

**中图分类号:** S718.56

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1001-7461(2014)-02-0026-06

## Characteristics of Soil Active Organic Carbon in *Jatropha curcas* Plantations with Different Densities in Dry-hot Valley Area of Yunnan Province

GU Li-ping<sup>1</sup>, GUO Yong-qing<sup>1\*</sup>, ZE Sang-zi<sup>1</sup>, YANG Xu<sup>1</sup>, LI Jiang<sup>1</sup>, CHEN Wei<sup>1</sup>, RUAN Hong-hua<sup>2</sup>

(1. (1. Yunnan Academy of Forestry, Kunming, Yunnan 650201, China; 2. Nanjing Forestry University, Nanjing, Jiangsu 210037, China)

**Abstract:** Field and indoor experiments were carried out to analyze the soil active organic carbon of *Jatropha curcas* plantations with 3 densities (1 112, 1 668, and 3 335 trees/hm<sup>2</sup>) in dry-hot valley area of Yunnan Province, China. The distribution and difference of soil total organic carbon (TOC), microbial biomass carbon (MBC), dissolved organic carbon (DOC) and readily oxidized carbon (ROC) in 0—40 cm of soil layer were tested. The results showed that the contents of TOC and 3 active organic carbons decreased with the increase of soil layer. The distribution of TOC with 3 different densities ranged from 10.569±0.115 to 20.513±0.381 g/kg, those of SMBC, DOC and ROC were 856.10±65.796—159.41±8.947 mg/kg, 259.55±11.645—736.92±19.102 mg/kg and 3.56±0.13—1.63±0.11 mg/g, respectively. The maximum values of TOC, DOC and ROC were observed in the plantation with the density of 3 335 trees/hm<sup>2</sup>, while that of MBC was in the density of 1 112 trees/hm<sup>2</sup>. The proportion of DOC in 3 densities was more than 10 percent of total which was the important part of soil active organic carbon, while the proportions of MBC and ROC were relatively low. In the context of this study, high density (3 335 trees/hm<sup>2</sup>) should be taken in the field from the point of fixing carbon sink.

**Key words:** dry-hot valley; *Jatropha curcas*; soil organic carbon; stand density

收稿日期: 2013-09-23 修回日期: 2013-10-29

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2007BAD32B02-01)。

作者简介: 谷丽萍, 女, 硕士, 助理研究员, 研究方向: 森林生态和森林培育。E-mail: glpsxsc@163.com

\* 通信作者: 郭永清, 男, 博士, 研究方向: 森林生态和森林碳汇。E-mail: gyq2001@163.com

由于受人类活动的影响,大气中 CO<sub>2</sub> 浓度不断升高,导致全球气候发生显著变化,引起了气候学、地学和生态学界对陆地生态系统中碳平衡、碳分布和储量的关注<sup>[1]</sup>。土壤碳库是陆地生态系统最大的碳库,通过土壤呼吸释放的 CO<sub>2</sub> 约占陆地生态系统与大气间碳交换总量的 2/3<sup>[2-3]</sup>。因此,土壤碳库较小幅度的变化就可能会影响到有机碳向大气的排放,进而影响到全球气候变化。土壤活性有机碳是土壤中活跃的化学组分,虽然只占土壤总有机碳的较小部分,却是土壤生态系统中最重要能量来源之一,能指示土壤有机质的早期变化<sup>[4]</sup>,同时,土壤活性有机碳含量的高低直接影响土壤微生物的活性,进而影响温室气体的排放<sup>[5]</sup>。

现已证明通过人工造林是有效减少大气 CO<sub>2</sub> 浓度的重要途径,加强人工林的营造和抚育管理,能增加固碳能力,是减缓和阻止全球变暖的有效措施<sup>[6-8]</sup>,人工林碳汇在全球碳循环及温室气体减排中发挥着越来越重要的作用。我国是世界上人工林种植规模最大的国家,且我国的森林碳汇主要来自于人工林的贡献<sup>[9]</sup>,特别是其土壤已成为重要的碳汇<sup>[10-11]</sup>,随着人工林的不断生长和成熟,未来在固碳增汇方面具有很大的潜力。目前国内外对人工林固碳能力的研究主要集中在土地利用历史、树种组成、整地、采伐和施肥等森林经营和管理措施对土壤有机碳的固定储存和排放产生的影响<sup>[12-13]</sup>和种植密度对人工林土壤有机碳含量的影响研究等方面<sup>[14-15]</sup>。影响人工林土壤有机碳含量高低的因子除气候和土壤性质外,还受林分密度的影响<sup>[16-17]</sup>,如何合理控制造林密度成为决定人工林固碳能力强弱的一个关键因素,造林密度过大或者过小都会影响到土壤温度、

湿度、枯落物输入量等因子,进而影响到输入和输出土壤的有机碳的量。

麻疯树(*Jatropha curcas*)为大戟科麻疯树属落叶灌木或小乔木,又名膏桐、小桐子、青桐木等,耐干旱和瘠薄,在云南省金沙江、怒江、红河等流域海拔 1 600~1 800 m 以下的干热河谷地区广泛分布<sup>[18]</sup>,是一种较好的水土保持树种,在生态恢复方面发挥了积极的作用,同时,在替代化石能源方面具有很大的发展潜力。目前,关于麻疯树人工林造林密度对土壤活性有机碳含量变化特征的研究鲜见报道,本文以云南省红河流域干热河谷区 3 种不同密度麻疯树人工林为研究对象,对其林分土壤总有机碳、微生物生物量碳、易氧化碳和水溶性有机碳的含量变化特征方面进行研究,一方面可以从理论上探索造林密度对土壤活性有机碳含量变化的影响,另一方面可以筛选出固碳增汇效果较好的造林密度。

### 1 研究区概况

研究区位于云南省元阳县南沙镇水塘村(E102°27′—103°13′,N22°49′—23°19′),海拔 310 m,属亚热带山地季风气候,焚风效应明显,年均气温 21.4℃,年均降雨量 800~1 000 mm,年均蒸发量约 2 750 mm,有明显的干季(11 月—次年 4 月)和雨季(5—10 月)之分,属于红河流域干热河谷区。土壤为红壤,植被呈现典型的“稀树草原”特征。研究区麻疯树人工林定植于 2005 年,有高密度(3 335 株/hm<sup>2</sup>)、中密度(1 668 株/hm<sup>2</sup>)和低密度(1 112 株/hm<sup>2</sup>)3 种模式。3 种不同密度麻疯树人工林定植在经机械平整后的荒山上,林分内的立地条件基本一致,林下仅有少量灌木和草本植物(表 1)。

表 1 3 种不同种植模式麻疯树人工林林分基本特征  
Table 1 Basic characteristics of *J. curcas* plantation under 3 planting modes

林分密度 (株·hm <sup>-2</sup> )	坡度/(°)	坡位	有机质 (g·kg <sup>-1</sup> )	土壤容重 (g·cm <sup>-3</sup> )	土壤平均 温度/℃	土壤平均 湿度/%	林地植物
低密度	15	上	31.20±2.16	0.98±0.02	25.4	14.4	扭黄茅( <i>H. contortus</i> ) 孔颖草( <i>B. pertusa</i> ) 印楝( <i>A. indica</i> )
中密度	15	上	22.45±5.47	0.95±0.03	24.9	11.7	扭黄茅( <i>H. contortus</i> ) 孔颖草( <i>B. pertusa</i> ) 拟金茅( <i>E. binata</i> ) 牛角瓜( <i>C. gigantea</i> )
高密度	16	中	35.14±0.32	0.99±0.02	24.3	8.9	扭黄茅( <i>H. contortus</i> ) 孔颖草( <i>B. pertusa</i> ) 拟金茅( <i>E. binata</i> )

## 2 研究方法

### 2.1 样地设置与样品采集

2011 年 11 月下旬在研究区内 3 种不同密度麻

疯树人工林中,分别设置有代表性的样地(10 m×10 m)4 块,共 12 块样地。在 12 块样地内用直径为 2 cm 的土壤取样器采集 0~10、10~25 cm 和 25~40 cm 的样品各 1 份,每 1 份土壤样品由同一样地

内以“S”形随机布设的 20 个土芯混合而成,每个样品重复 3 次,共计 36 份土样。将土样带回实验室内充分混匀并分成 2 份,一份过 2 mm 筛,挑去根系、石砾、动物等杂物,放在 4℃ 冰箱中备用,用于微生物生物量碳和水溶性碳的测定。另一份自然风干,去杂后过 100 目筛供测定土壤易氧化碳、总有机碳和其它理化性质。

### 2.2 土壤样品的测定方法

土壤理化性质的测定采用常规分析方法<sup>[19]</sup>,土壤总有机碳(TOC)含量采用重铬酸钾外加热法测定;土壤水溶性有机碳(WSOC)测定采用韩成卫<sup>[20]</sup>方法测定;土壤微生物生物量碳(MBC)采用氯仿熏蒸法<sup>[21]</sup>;土壤易氧化碳(ROC)测定采用 333 mmol/L 高锰酸钾氧化法<sup>[22]</sup>。

### 2.3 数据处理与统计分析

采用 Excel2003 和 SPSS17.0 进行数据的统计分析与检验。不同林分密度对土壤活性有机碳含量的影响采用单因素方差分析(ANOVA)。

## 3 结果与分析

### 3.1 不同密度麻疯树人工林土壤总有机碳含量(TOC)的特征

由于种植密度不同,人工林在经营过程中会引起土壤温度、湿度和土壤养分等生态因子的差异,造成土壤有机物质的输入与输出之间的不平衡,这种不平衡就决定了土壤有机碳的含量<sup>[23]</sup>。

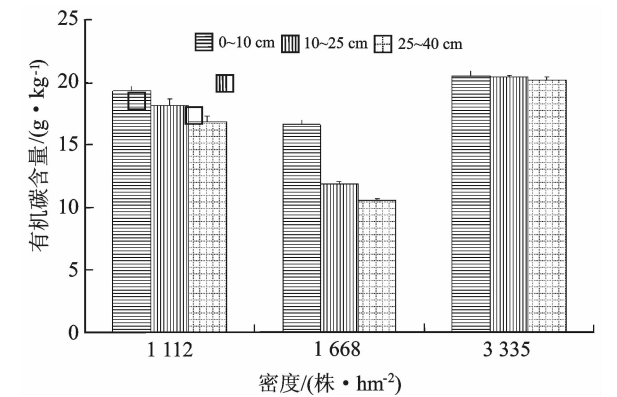


图 1 不同密度麻疯树人工林土壤总有机碳含量

Fig. 1 Soil organic carbon contents of *J. curcas* plantation with different planting densities

在 0~40 cm 土层中,3 种不同密度麻疯树人工林土壤总有机碳含量分布范围为 10.569~20.513 g/kg。当林分由低密度增加到中密度时,土壤总有机碳含量呈现减小的趋势,而当林分由中密度增加到高密度时,土壤总有机碳含量又明显升高(图 1)。方差分析表明,3 种不同密度麻疯树人工林土壤总有机碳含量差异达极显著水平( $p<0.01$ )。在垂直

方向上,即在 0~40 cm 土层中,3 种不同密度林分土壤总有机碳含量均随着土层深度增加而逐渐降低,中密度林分不同土层之间含量差异达极显著水平( $p<0.01$ ),低密度林分和高密度林分在垂直方向上不同土层之间含量差异不显著( $p>0.05$ )。

### 3.2 不同密度麻疯树人工林土壤微生物生物量碳(MBC)含量的特征

在 0~40 cm 土层中,3 种不同密度麻疯树人工林土壤微生物生物量碳的含量分布范围为 856.10~159.41 mg/kg,土壤微生物生物量碳含量与栽植密度之间没有呈现出有规律变化的趋势,当林分由低密度增加到中密度时,土壤微生物生物量碳含量降低,而当林分由中密度增加到高密度时,土壤微生物生物量碳含量又有升高的趋势(图 2)。其中,低密度林分含量最高(737.40 mg/kg),中密度林分含量最低(260.94 mg/kg),二者含量相差 2.83 倍,方差分析表明,低密度林分与中密度林分之间含量差异达显著水平( $p<0.05$ )。在垂直方向上,3 种不同密度麻疯树人工林土壤微生物生物量碳含量均随着土层深度的增加逐渐降低,但不同土层之间含量差异均不显著( $p>0.05$ )。

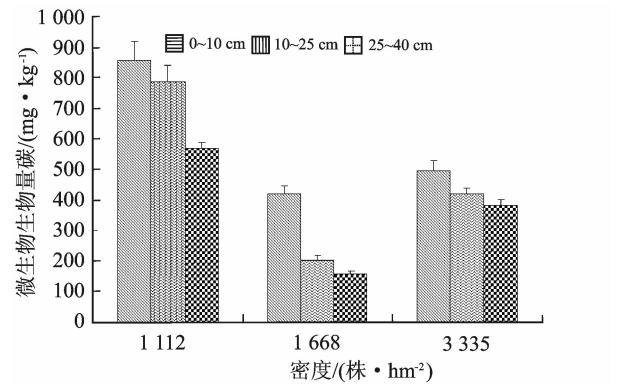


图 2 不同密度麻疯树人工林土壤微生物生物量碳含量

Fig. 2 Soil MBC contents of *J. curcas* plantation with different planting densities

### 3.3 不同密度麻疯树人工林土壤水溶性有机碳(WSOC)含量的特征

在 0~40 cm 土层中,3 种不同密度麻疯树人工林土壤水溶性有机碳含量分布范围为 259.55~736.92 mg/kg。从图 3 可以看出,不同林分土壤水溶性有机碳含量与林分密度之间呈现出有规律的变化趋势,即当林分由低密度增加到中密度和高密度时,水溶性有机碳含量也呈现出不断增加的趋势,其中,高密度林分含量最高(633.80 mg/kg),低密度林分含量最低(420.87 mg/kg)。方差分析表明,3 种不同林分密度麻疯树人工林土壤水溶性有机碳含量差异不显著( $p>0.05$ )。在垂直方向上,3 种不同

密度麻疯树人工林土壤水溶性有机碳含量均随着土层深度增加逐渐降低,但差异均不显著( $p>0.05$ )。

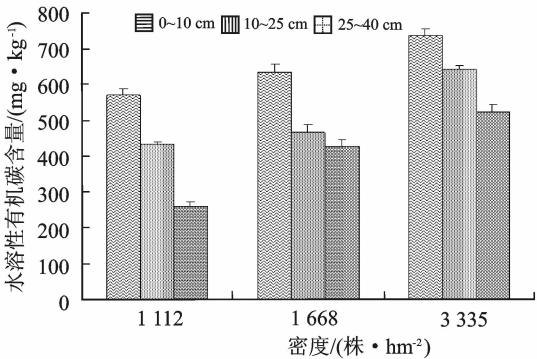


图 3 不同密度麻疯树人工林土壤水溶性有机碳含量  
Fig. 3 Soil WSOC contents of *J. curcas* plantation with different planting densities

### 3.4 不同密度麻疯树人工林土壤易氧化碳 (ROC) 含量的特征

在 0~40 cm 土层中,3 种不同密度麻疯树人工林土壤易氧化碳含量分布范围为 3.56~1.63 mg/g,林分密度对土壤易氧化碳含量有较大的影响。当林分由低密度增加到中密度时,土壤易氧化碳含量降低,而当林分由中密度增加到高密度时,土壤易氧化碳含量又有升高的趋势(图 4)。高密度林分含量最高(3.41 mg/g),中密度林分含量最低(2.18 mg/g)。方差分析表明,3 种不同密度麻疯树人工林土壤易氧化碳含量差异达极显著水平( $p<0.01$ )。

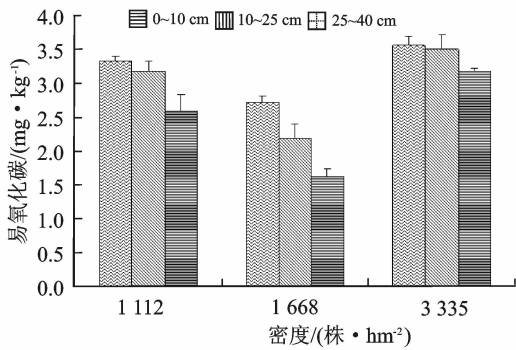


图 4 不同林分密度下麻疯树人工林土壤易氧化碳的含量  
Fig. 4 Soil ROC contents of *J. curcas* plantation with different planting densities

在垂直方向上,3 种不同密度麻疯树人工林土壤易氧化碳含量均随着土层深度增加而逐渐降低,即土壤表层含量最高,底层含量最低。方差分析表明,高密度林分和低密度林分在各自垂直方向上土壤易氧化碳含量差异不显著( $p>0.05$ ),而中密度林分在垂直方向上土壤易氧化碳含量差异达极显著水平( $p<0.01$ )。

### 3.5 不同密度麻疯树人工林土壤活性有机碳分配比例变化

活性有机碳含量占土壤总有机碳含量的比例较

活性有机碳总量更能反映森林植被对土壤碳行为的影响结果,活性有机碳所占比例越高,说明土壤碳的活性越大,稳定性越差。

从表 2 可以看出,在 0~40 cm 土层中,麻疯树人工林土壤活性有机碳占总有机碳比例与种植密度有一定的关系,但是变化规律不明显。低密度林分中土壤微生物生物量碳含量占总有机碳含量的比例最大(4.09%),但与其他 2 种林分之间差异不显著( $p>0.05$ );中密度林分中土壤水溶性有机碳含量占总有机碳含量的比例最大(3.90%),但 3 种不同密度的林分之间差异显著( $p<0.05$ );易氧化碳含量是 3 种活性有机碳中含量最高的,其中高密度林分土壤所占比例最大(26.18%),所占比例均超过了 10%,方差分析表明,不同密度林分之间易氧化碳所占比例差异达极显著水平( $p<0.01$ ),而微生物生物量碳和水溶性有机碳含量占总有机碳含量的比例均较小,表明麻疯树人工林土壤中 ROC 是土壤有机碳的重要组成部分。

表 2 不同林分密度麻疯树人工林 0~40 cm 土壤活性有机碳占总有机碳的比例

Table 2 Ratios of SLOC to TOC of <i>J. curcas</i> plantation at 0~40 cm soil layer of different densities %			
林分密度	MBC/TOC	ROC/TOC	WSOC/TOC
低密度	4.09a	16.73a	2.32a
中密度	2.00a	10.68b	3.90b
高密度	2.13a	26.18c	3.11ab

注:同一列中不同字母代表差异显著( $p<0.05$ )。

## 4 结论与讨论

### 4.1 结论

云南红河流域干热河谷区 3 种不同密度麻疯树人工林在 0~40 cm 土壤中总有机碳含量分布范围为 10.569~20.513 g/kg,水溶性有机碳含量分布范围为 259.55~736.92 mg/kg,微生物生物量碳含量分布范围为 856.10~159.41 mg/kg,易氧化碳含量分布范围为 3.56~1.63 mg/g。

土壤水溶性有机碳含量占总有机碳比例在不同密度的 3 种林分中均超过 10%,比微生物生物量碳和易氧化碳所占的比例高,说明水溶性有机碳是麻疯树人工林土壤活性有机碳的重要组成部分。

在 0~40 cm 土壤中,麻疯树人工林土壤总有机碳、水溶性有机碳、易氧化碳和微生物生物量碳含量变化均随着密度的变化而变化。当林分由低密度增加到高密度时,总有机碳、水溶性有机碳、易氧化碳含量均达到最大,而土壤微生物生物量碳含量最大值则出现在低密度林分中。

麻疯树既是一种生物质能源树种,又是一种经济林树种,在其经营过程中一方面要考虑其经济效益,也就是要保证结实量,另一方面又要考虑其固碳增汇的能力,也就是如何促进土壤有机碳含量的增加。若仅从其固碳增汇能力方面考虑,麻疯树人工林应采用高密度(3 335 株/hm<sup>2</sup>)的方式密度种植。

4.2 讨论

在人工林营造过程中,由于种植密度不同通常会改变光照、水分、温度、养分等土壤微环境,从而影响到有机碳的输入和输出的平衡。在大面积人工林经营过程中很难做到精细化经营和管理,也就是缺乏人工施肥和抚育等措施,在这种条件下,林分密度就是影响土壤有机碳含量的关键因素。

林分密度大小会影响到土壤温度和湿度,而二者是影响土壤有机碳库的重要环境因子之一<sup>[24]</sup>。当麻疯树人工林林分由低密度逐渐增加到中密度和高密度时,土壤总有机碳含量和活性有机碳含量均随着林分密度的变化出现波动。总有机碳、水溶性有机碳和易氧化碳含量变化均表现为从低密度到中密度含量降低,而从中密度到高密度含量升高的趋势。在土壤容重差异不显著( $p>0.05$ )的情况下,土壤温度和湿度在一定程度上影响着土壤有机碳的含量。从表 1 可以看出,土壤平均温度高低顺序为低密度>中密度>高密度,土壤平均湿度大小顺序为低密度>高密度>中密度,除微生物生物量碳外,总有机碳、水溶性有机碳和易氧化碳含量变化与土壤温度和湿度呈负相关,即土壤温度是湿度越大,有机碳含量越低,说明在一定范围内,土壤温度上升湿度增加将加速土壤有机碳的分解和矿化进程,不利于土壤有机碳库的稳定性,这与漆良华<sup>[25]</sup>的研究结果相似。同时,高密度人工林由于其林木数量较多,郁闭度最高,凋落物厚度最大,分解后回归土壤的有机质也最多,因而其有机碳含量较高。研究表明,麻疯树人工林枯落物所占全部生物量的比例较大<sup>[26]</sup>,枯落物是土壤主要的有机碳源之一。在林分密度大时,输入土壤的枯落物就多,经过微生物的分解及缓慢的腐解过程,最终转化为腐殖质,并将长期而稳定的保存于土壤中,维持较长时间的碳储藏,所以林分密度大,枯落物多,更利于土壤有机碳积累<sup>[27]</sup>。本研究的结果证明,适当的密植是有利于人工林土壤有机碳的累积,这与赵雪梅<sup>[16]</sup>和任丽娜<sup>[17]</sup>的研究结果相同。

土壤微生物生物量碳是反映土壤系统健康和土壤质量的重要生物学指标,可以敏感地反映管理措施、人为干扰等对土壤生态系统的影响程度。土壤微生物生物量碳一方面决定于土壤总有机碳含量大

量研究表明,土壤微生物量碳和土壤总有机碳含量有较好的线性相关<sup>[28]</sup>,而本研究中低密度麻疯树林分的土壤微生物生物量碳含量最大,与杜满义<sup>[29]</sup>的研究结果相反,很可能是中密度和高密度人工林林地内光照相对不足,温度较低,微生物活动较弱,数量较少,造成微生物生物量碳含量相对偏低。

总之,土壤活性有机碳的分解是一个复杂的生物学过程,时空变异大,受温度、水分、养分、土壤结构和 pH 值等因素的影响,如何评价麻疯树人工林土壤活性有机碳含量在碳循环中的重要价值还有待进一步的研究。

参考文献:

[1] 孙成权,曲建升. 国际地球科学发展态势[J]. 地球科学进展, 2002,17(3):344-347.  
SUN C Q, QU J S. Status and trends of the international earth science studies[J]. Advance in Earth Sciences, 2002, 17(3): 344-347. (in Chinese)

[2] SCHLESINGER W H. Evidence from chronosequence studies for a low carbon-storage potential of soils[J]. Nature, 1990, 348:232-234.

[3] POST W M, EMANUEL W R *et al.* Soil carbon pools and world life zones[J]. Nature, 1982, 298:156-159.

[4] 沈宏,曹志洪,胡正义. 土壤活性有机碳的表征及其生态效应[J]. 生态学杂志, 1999, 18(3):32-38.  
SHEN H, CAO Z H, HU Z Y. Characteristics and ecological effects of the active organic carbon in soil[J]. Chinese Journal of Ecology, 1999, 18(3):32-38. (in Chinese)

[5] 王淑平,周广胜,高素华,等. 中国东北样带土壤活性有机碳的分布及其对气候变化的响应[J]. 植物生态学报, 2003, 27(6): 780-785.  
WANG S P, ZHOU G S, GAO S H, *et al.* Distribution of soil labile carbon along the Northeast China transect(Nect) and its response to climatic change[J]. Acta Phytocologica Sinica, 2003, 27(6):780-785. (in Chinese)

[6] WATSON R T, Noble I. R, Bolin B, *et al.* Land-use, land-use change and forestry: a special report of the IPCC[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000:377.

[7] IPCC. Climate change 2001: impacts, adaptation and vulnerability of climate change[R]. London: Cambridge University Press, 2001:1032.

[8] 冯瑞芳,杨万勤,张健. 人工林经营与全球变化减缓[J]. 生态学报, 2006, 26(11):3870-3877.  
FENG R F, YANG W Q, ZHANG J. Artificial forest management for global change mitigation[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(11):3870-3877. (in Chinese)

[9] 方精云,陈安平. 中国森林植被碳库的动态变化及其意义[J]. 植物学报, 2001, 43(9):967-973.  
FANG J Y, CHEN A P. Dynamic Forest biomass carbon pools in China and their significance[J]. Acta Botanica Sinica, 2001, 43(9):967-973. (in Chinese)

[10] 李跃林,胡成志,张云,等. 几种人工林土壤碳储量研究[J]. 福

建林业科技,2001,31(4):5-7.

LI Y L, HU C Z, ZHANG Y, *et al.* Studies of the carbon storages of soils under the different kinds of plantations[J]. Journal of Fujian Forestry Science and Technology, 2001, 31(4):5-7. (in Chinese)

[11] 方晰,田大伦,项文华,等. 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.

FANG X, TIAN D L, XIANG W H, *et al.* Vertical distribution of soil organic carbon in *Cunninghamia lanceolata* plantation[J]. Journal of Zhejiang Forestry College, 2004, 21(4): 418-423. (in Chinese)

[12] 胡会峰,刘国华. 森林管理在全球 CO<sub>2</sub> 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)

[13] 于洋,王海燕,雷相东,等. 东北过伐林区蒙古栎天然林土壤有机碳研究[J]. 西北林学院学报,2011,26(2):57-62.

YU Y, WANG H Y, LEI X D, *et al.* Soil organic carbon in over logged forest stands of *Quercus mongolica* in North Eastern China[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2011, 26(2):57-62. (in Chinese)

[14] 任丽娜,王海燕,丁国栋,等. 密度调控对华北落叶松人工林土壤有机碳及养分特征的影响[J]. 干旱区资源与环境,2012,26(4):138-143.

REN L N, WANG H Y, DING G D, *et al.* Effects of *Larix principis-rupprechtii* plantation density control on soil organic carbon and nutrients characteristics[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2012, 26(4):138-143. (in Chinese)

[15] 刘玲,王海燕,杨晓娟,等. 不同密度长白落叶松天然林土壤有机碳及养分特征[J]. 东北林业大学学报,2013,41(2):51-55.

LIU L, WANG H Y, YANG X J, *et al.* Soil organic carbon and nutrients in natural *Larix olgensis* at different stand densities[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2013, 41(2):51-55. (in Chinese)

[16] 赵雪梅,孙向阳,康向阳,等. 短轮伐期毛白杨不同密度林分土壤有机碳和全氮动态[J]. 生态学报,2012,32(15):4714-4721.

ZHAO X M, SUN X Y, KANG X Y, *et al.* Dynamics of soil organic carbon and total nitrogen contents in short-rotation triploid *Populus tomentosa* plantations [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(15):4714-4721. (in Chinese)

[17] 任丽娜,王海燕,丁国栋,等. 林分密度对华北土石山区油松人工林土壤有机碳及养分特征的影响[J]. 干旱区地理,2012,35(3):456-464.

REN L N, WANG H Y, DING G D, *et al.* Effects of *Pinus tabulaeformis* Carr. plantation density on soil organic carbon and nutrients characteristics in rocky mountain area of northern China[J]. Arid Land Geography, 2012, 35(3):456-464. (in Chinese)

[18] 曾觉民. 可大力发展的生物质能源植物一膏桐[J]. 云南林业, 2006, 27(2):21-22.

[19] 林大仪. 土壤学实验指导[M]. 北京:中国林业出版社,2004.

[20] 韩成卫,李忠佩,刘丽,等. 去除溶解性有机质对红壤水稻土碳氮矿化的影响[J]. 中国农业科学,2007,40(1):107-113.

HAN C W, LI Z P, LIU L, *et al.* Influence on carbon and nitrogen mineralization after dissolved organic matter removal in subtropical Chinese paddy soils[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2007, 40(1):107-113. (in Chinese)

[21] VANCE E D, BROOKES P C, JENJUNSON D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass[J]. Soil Biol. Biochem, 1987, 19:703-707.

[22] LEFROY R D B, BLAIR G J, STRONG W M, *et al.* Changes in soil organic matter with cropping as measured by organic carbon fractions and <sup>13</sup>C natural isotope abundance[J]. Plant Soil, 1993:155/156, 399-402.

[23] POST W M, IZAURRALDE R C, MANN L K, *et al.* Monitoring and verifying changes of organic carbon in soil[J]. Climatic Change, 2001, 51(1):73-99.

[24] PODWOJEWSKI P, POULENARD J, NGUYET M L, *et al.* Climate and vegetation determine soil organic matter status in an alpine innertropical soil catena in the Fansipan Mountain, Vietnam[J]. Catena, 2011, 87(2):226-239.

[25] 漆良华,毛超,杜满义,等. 湘中丘陵区不同经营类型毛竹林土壤有机碳垂直分布与季节动态[J]. 东北林业大学学报,2013, 41(6):38-40,79.

QI L H, MAO C, DU M Y. Vertical distribution and seasonal dynamics of soil organic carbon of *Phyllostachy edulis* forests under different managing patterns in the Hilly region of central Hunan Province, Southern China[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2013, 41(6):38~40,79. (in Chinese)

[26] 郭永清,郎南军,杨旭,等. 云南膏桐人工幼龄林生物量和生产力的研究[J]. 西北林学院学报,2010,25(2):1-4.

GUO Y Q, LANG N J, YANG X, *et al.* Biomass and productivity of *Jatropha curcas* plantation in Honghe river area[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2010, 25(2):1-4. (in Chinese)

[27] 史军,刘纪远,高志强,等. 造林对土壤碳储量影响的研究[J]. 生态学杂志,2005,24(4):410-416.

SHI J, LIU J Y, GAO Z Q, *et al.* A review on the influence of afforestation on soil carbon storage[J]. Chinese Journal of Ecology, 2005, 24(4):410-416. (in Chinese)

[28] HAYNES R J. Labile organic matter as an indicator of organic matter quality in arable and pastoral soil in New Zealand [J]. Soil Biology&Biochemistry, 2000, 32(2):211-219.

[29] 杜满义,范少辉,漆良华,等. 不同类型毛竹林土壤活性有机碳[J]. 生态学杂志,2013,32(3):571-576.

DU M Y, FAN S H, QI L H, *et al.* Soil labile organic carbon in different types of moso bamboo(*Phyllostachysedulis*) stands[J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(3):571-576. (in Chinese)