

DOI: 10.5846/stxb201803290634

沈会涛, 张韬, 马文才, 秦彦杰, 武爱彬, 曹建生, 赵艳霞, 郑振华. 太行山东坡不同林龄杏树林碳储量及其分配特征. 生态学报, 2018, 38(18):

Shen H T, Zhang T, Ma W C, Qin Y J, Wu A B, Cao J S, Zhao Y X, Zheng Z H. Carbon storage and its allocation pattern in *Armeniaca vulgaris* plantations at different ages on the eastern slope of Taihang Mountain. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(18):

太行山东坡不同林龄杏树林碳储量及其分配特征

沈会涛^{1,2}, 张 韬¹, 马文才³, 秦彦杰¹, 武爱彬¹, 曹建生⁴, 赵艳霞^{1,2}, 郑振华^{1,2,*}

1 河北省科学院地理科学研究所, 石家庄 050021

2 河北省地理信息开发应用工程技术研究中心, 石家庄 050021

3 河北省科学院, 石家庄 050051

4 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心, 石家庄 050021

摘要:在生物量调查的基础上,对太行山东坡 4、8、12 年生和 16 年生杏树林生态系统碳储量及其分配特征进行了研究。结果表明:杏树各器官碳含量在 447.3—488.1 g/kg;树干碳含量随林龄的增长而显著降低($P<0.05$),不同林龄间树根、树枝和树叶碳含量无显著差异;土壤层(0—100 cm)碳含量随林龄的增长而增大;随土层深度的增加而降低。林龄对杏树林乔木层、土壤层和生态系统碳储量均有显著影响。4、8、12 年生和 16 年生杏树林生态系统碳储量分别为 27.810、72.647、82.450 Mg/hm²和 102.336 Mg/hm²;土壤层碳储量占总碳储量的 90.1%—99.6%,且主要集中于 0—40 cm。乔木层碳储量分配随着林龄的增长而增加,土壤碳储量分配则减小。结果揭示了土壤层是杏树林生态系统的主要碳库;杏树人工林生态系统在生长过程中能显著地积累有机碳。研究结果可为经济林经营管理及碳汇功能评价提供参考。

关键词:杏树林;林龄;碳含量;碳储量;分配格局

Carbon storage and its allocation pattern in *Armeniaca vulgaris* plantations at different ages on the eastern slope of Taihang Mountain

SHEN Huitao^{1,2}, ZHANG Tao¹, MA Wencai³, QIN Yanjie¹, WU Aibin¹, CAO Jiansheng⁴, ZHAO Yanxia^{1,2}, ZHENG Zhenhua^{1,2,*}

1 Institute of Geographical Sciences, Hebei Academy of Sciences, Shijiazhuang 050021, China

2 Hebei Engineering Research Center for Geographic Information Application, Institute of Geographical Sciences, Hebei Academy of Sciences, Shijiazhuang 050021, China

3 Hebei Academy of Sciences, Shijiazhuang 050051, China

4 Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang 050021, China

Abstract: Carbon storage and its allocation of 4-, 8-, 12-, and 16-year-old *Armeniaca vulgaris* plantation ecosystems on the eastern slope of Taihang Mountain were studied based on a biomass survey. The results showed that the carbon contents in different organs of apricots ranged from to 447.3 to 488.1 g/kg. The carbon content of stems decreased significantly with stand age, whereas no significant differences in carbon content were observed among the roots, branches, and leaves of the apricot plantations with different ages. The carbon content in the soil layer (0—100 cm) increased significantly with increasing stand age, but decreased with increasing soil depth ($P<0.05$). The carbon storage in the arbor layer, soil layer, and whole ecosystem of the apricot plantations was obviously age dependent. The values of total carbon storage in the 4-, 8-,

基金项目:国家自然科学基金项目(3150048);河北省科学院科技攻关项目(18111);河北省青年拔尖人才项目;河北省科学院青年拔尖人才项目

收稿日期:2018-03-29; 修订日期:2018-07-02

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zzh6711@sina.com

12-, and 16-year-old apricot plantation ecosystems were 27.810, 72.647, 82.450 Mg/hm² and 102.336 Mg/hm², respectively. The carbon storage in the soil layer accounted for >90.1% of the carbon storage in the apricot plantation ecosystem, which was accumulated at higher levels in the 0—40 cm soil layer. The carbon storage and distribution patterns in the apricot plantations varied obviously with the stand age. In addition, carbon storage allocation increased in the arbor layer but decreased in the soil layer with increasing stand age. Our results suggested that the soil layer was the major carbon pool, and also implied that the plantation ecosystems at these stand ages could accumulate organic carbon continuously. Quantifying carbon storage and distribution patterns of apricot plantations could help design sustainable forest management strategies for achieving its potential in mitigating climate change.

Key Words: *Armeniaca vulgaris* plantations; stand age; carbon content; carbon storage; allocation pattern

森林在全球碳循环中发挥着重要作用^[1-2]。通过造林和合理的森林经营管理可增加森林碳汇功能及潜力,能有效减缓气候变化^[3-4]。因此,开展人工林生态系统碳平衡动态研究,已成为国际社会关注的热点^[5-11]。

我国经济林面积约 0.11 亿 hm²,占全国土地总面积 1.1%,占世界经果林总面积 23%^[12]。与森林生态系统相比,人为干扰增加了经济林碳储量研究的复杂性,尽管国内外学者已开展相关研究,但大多仅限于经济林生态系统碳储量现状,如郭雪艳等^[12]对上海地区桃树(*Amygdalus persica*)和柑橘(*Citrus reticulata*)的植被层和土壤层碳储量以及乔木层年净固碳量进行估测。此外,也有学者针对不同经营年限的经济林土壤碳库特征进行了分析,如王义祥^[13]研究了不同经营年限柑橘(*C. reticulata*)园土壤碳库的变化特征;甘卓亭等^[14]对苹果(*Malus pumila*)园不同林龄的土壤碳库进行了分析。

目前,有关经济林随林龄增长而导致其生态系统碳库变化规律的研究还较为缺乏。为此,本文选择太行山东坡具有相似立地条件与管护措施不同林龄的杏树(*Armeniaca vulgaris*)人工林为对象,通过样地调查与室内实验分析相结合,测定乔木层和土壤层的含碳率,研究不同林龄阶段的碳储量及其分配特征,从而为山区经济林碳汇评价与林分经营管理提供基础数据和理论基础。

1 研究地区和研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于太行山东麓(38°05'N,114°18'E),距离河北省石家庄市约 30 km。该研究区为低山丘陵陵区,主要地貌类型是以中、低山为主体的土石山区,地带性土壤以褐土为主。气候属暖温带半湿润季风型大陆性气候,四季分明。年均气温为 13.9℃,最热月 7 月和最冷月 1 月的月平均气温分别为 27.2 和 -1.7℃。年降水量为 542.2 mm,降水主要集中于 7、8 两个月,占全年降水总量的 56%。年日照时数为 1776.9 h,无霜期日数平均为 219 d^[15]。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置

野外调查于 2015 年 9—10 月进行。根据研究区内全面踏查情况,选取 4、8、12 年生和 16 年生杏树林为研究对象,每个林龄分别设置 3 个 20 m×20 m 样地。对每个样地进行每木检尺,测定树高、冠幅、基径,样地基本情况见表 1。

1.2.2 样品采集和碳含量测定

生物量调查及样品采集:在标准样地中找与平均基径、平均树高接近并干形比较圆满的单株树作为解析木。4 个样地共选择 12 株杏树伐倒,分别测定干、枝、叶生物量(不含果实);根系采用全挖法,由于 <5 mm 树根很难获取,所以本文中树根不包括此部分^[5,16]。同时取部分样品带回实验室于 80℃ 烘干测定其含水率,换算干生物量。由于杏树树高受人为剪枝等影响,本研究采用基于基径(D)为自变量的幂函数模型^[16],计算乔木层各器官生物量(表 2),进一步求和得到单株生物量和样地内乔木层的生物量^[2]。此外,在除草、翻耕和采

摘等人为干扰下,样地内杂草和枯枝落叶较少,所以未对草本层和枯落物层进行采样。

表 1 不同林龄杏树林基本特征

Table 1 General information of apricot plantation stands

林龄 Stand age/a	基径 Basal diameter/cm	树高 Height /m	密度 Density / (株/hm ²)	海拔 Altitude/m
4	2.03±0.15	1.40±0.10	1667±113	235
8	4.44±0.61	2.20±0.20	1083±101	169
12	9.35±0.58	3.42±0.17	942±87	198
16	15.12±1.26	4.76±0.42	742±76	182

表 2 杏树单株生物量方程

Table 2 Biomass estimation equations for apricot trees

组分 Component	方程 Equation	R ²	Sig.(P)	组分 Component	方程 Equation	R ²	Sig.(P)
根 Root	$W=0.174D^{1.386}$	0.922	<0.01	枝 Branch	$W=0.168D^{1.237}$	0.959	<0.01
干 Stem	$W=0.027D^{2.357}$	0.959	<0.01	叶 Leaf	$W=0.227D^{0.785}$	0.838	<0.01

W:生物量 Biomass;D:基径 Diameter at basal height

土壤样品采样:在每个样地内按“品”字形随机选取 3 个取样点,采用土钻法,按 0—20、20—40、40—60cm 和 60—100 cm 分层钻取土壤样品,将同一土层样品混合,置于自封袋中带回实验室。同时,在样方内选取一块具有代表性的地段挖取土壤剖面,层次划分与土钻法相同,使用环刀法取各层原状土,每层 3 个重复,样品带回实验室于 105℃ 下烘干至恒量,称其干质量后计算土壤容重。

碳含量测定:各组分植物混合样于 80℃ 下烘干、粉碎过 60 目土壤筛;各层土壤混合样去除根系与粗石,风干、磨碎过 60 目土壤筛。所有土壤和植物样品的有机碳含量均采用重铬酸钾氧化外加热法^[17]测定。

1.2.3 碳贮量的计算

乔木层碳储量^[17]计算公式:

$$T_{AOC} = \sum_{i=1}^n C_i \times B_i$$

式中, T_{AOC} 为乔木层总有机碳储量(Mg/hm²); C_i 为各组分(树根、树干、树枝和树叶)有机碳含量(Mg/Mg); B_i 为对应部分碳生物量(Mg/hm²)。

土壤有机碳储量计算公式^[6,18]如下:

$$T_{SOC} = \sum_{i=1}^n 0.1 \times C_i \times L_i \times BD_i \times (1 - G_i)$$

式中, T_{SOC} 为土壤总有机碳储量(Mg/hm²); C_i 为第*i*层土壤有机碳含量(g/kg); L_i 为第*i*层土壤厚度(cm); BD_i 为第*i*层土壤容重(g/cm³); G_i 为第*i*层土壤中直径≥2 mm 砾石的体积含量(%),0.1 为单位换算系数^[6]。

生态系统碳贮量为乔木层碳储量和土壤层碳储量之和。

1.3 数据处理

利用 Excel 2010 和 SPSS 18.0 软件分别进行作图和数据统计分析。采用单因素方差分析(one-way ANOVA)和最小显著差数法(LSD)进行差异显著性检验($\alpha=0.05$)。图表中数据为平均值±标准差。

2 结果与分析

2.1 杏树人工林生态系统各组分碳含量特征

2.1.1 乔木层碳含量

不同林龄杏树各器官碳含量在 447.3—488.1 g/kg(图 1)。林龄仅对树干的碳含量有显著影响($P<0.05$),随着林龄的增长,树干的碳含量呈减小趋势,4 年生显著高于后 3 个林龄段。不同林龄间树根、树枝和树

叶的碳含量差异不显著;树根碳含量随林龄的增长而增大;树枝碳含量随林龄增长呈现先增加后减小趋势;树叶碳含量无明显规律性。不同器官间碳含量明显不同,以树干最高,树叶最低,大小顺序为:树枝(473.3 g/kg)>树干(469.9 g/kg)>树根(469.4 g/kg)>树叶(449.8 g/kg)。

2.1.2 土壤碳含量

不同林龄杏树林土壤层碳含量在 1.3—10.2 g/kg(图 2)。同一土层不同林龄间碳含量差异显著,0—100 cm 各土层碳含量随林龄的增长而增大。不同杏树林土壤层都表现出明显的垂直分布特征,0—20 cm 土壤层碳含量均显著高于下层土壤,并随着土壤层深度的增加逐渐减小。

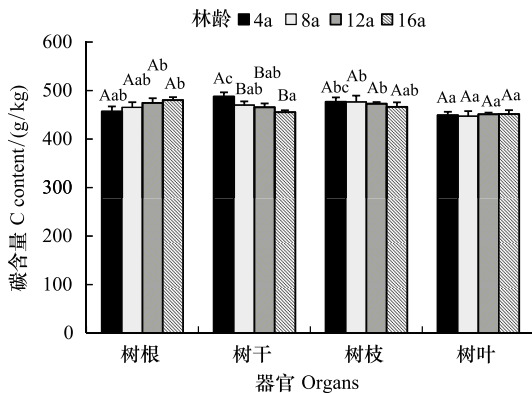


图 1 不同林龄杏树人工林乔木层各器官碳含量

Fig.1 Carbon contents in different organs of arbor layer in the plantations at different stand ages

不同大写字母表示林龄间差异显著,不同小写字母表示器官间差异显著 ($P < 0.05$)

2.2 杏树人工林碳储量及分配

2.2.1 乔木层生物量、碳储量及分配

4、8、12 年生和 16 年生杏树林乔木层生物量分别是 0.26、6.18、11.02 Mg/hm² 和 21.90 Mg/hm²。树根和树干生物量分配随林龄的增长而逐渐增大,树枝和树叶生物量分配则呈相反趋势(图 3)。乔木层各器官碳储量随林龄的变化趋势与生物量变化特征较为一致,各器官碳储量随林龄的增长而显著增大(表 3)。林龄对乔木层各器官碳储量分配有显著影响,随着林龄的增长,碳储量在树根和树干的分配增加,而在树枝和树叶的分配下降。树枝和树叶碳储量所占比例从 4 年生的 30.7% 和 24.6% 分别下降到 13.3% 和 5.6%;树干的变化趋势正好相反,其碳储量所占比例由 4 年生的 17.9% 增加到 16 年生的 54.5%;树根碳储量所占比例则呈现先增加后减小的趋势。

2.2.2 土壤层碳储量及分配

杏树林各土壤层碳储量随林龄的增长而增大,4 年生杏树林各土壤层碳储量显著低于其他 3 个林分(图 4);8、12 年生和 16 年生 3 种林龄对 0—20 cm 和 60—100 cm 土层土壤碳储量的影响均不显著。土壤层对各林龄杏树林土壤碳储量有显著影响;各林龄土壤碳储量随土壤层加深表现出先减少后增加的趋势,40—60 cm

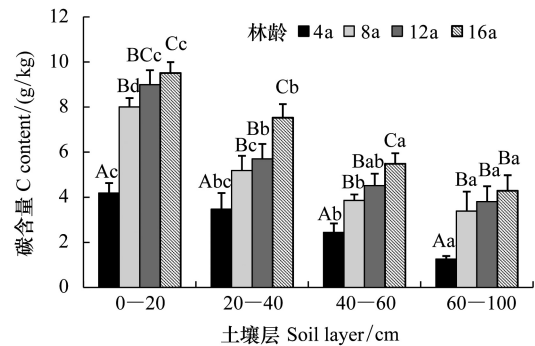


图 2 不同林龄杏树人工林各土壤层碳含量

Fig.2 Soil C contents in different soil layers in the apricot plantations at different stand ages

不同大写字母表示林龄间差异显著,不同小写字母表示各土壤层差异显著 ($P < 0.05$)

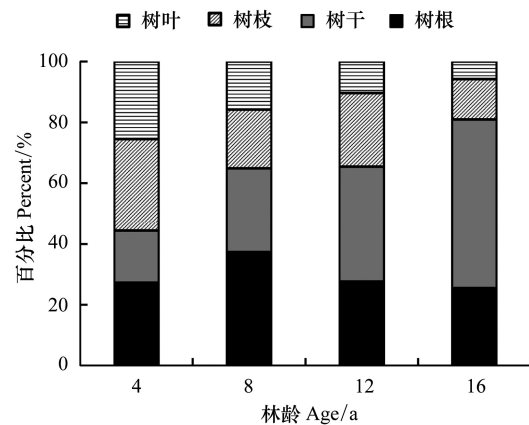


图 3 杏树人工林乔木层各器官生物量的分配比例

Fig.3 Biomass allocation of different organs in arbor layer in the apricot plantations

土壤层土壤碳储量最低。0—40 cm 土壤层土壤碳储量占土壤层总碳储量(0—100 cm)的 52.7%—59.7%,可见,0—40 cm 土壤层对土壤总碳储量的贡献较大。

表 3 杏树人工林乔木层碳储量特征 (Mg/hm^2)

Table 3 Carbon storage in arbor layer in apricot plantation

林龄 Age	树根 Root	树干 Stem	树枝 Branch	树叶 Leaf
4	0.033±0.003Abc	0.022±0.002Aa	0.037±0.001Ac	0.030±0.002Ab
6	1.071±0.035Bd	0.801±0.040Bc	0.569±0.012Bb	0.437±0.055Ba
8	1.443±0.042Cb	1.941±0.078Cc	1.263±0.121Cb	0.514±0.053BCa
12	2.690±0.246Dc	5.532±0.457Dd	1.351±0.143Cb	0.571±0.068Ca

同列不同大写字母表示林龄间差异显著;同行不同小写字母表示器官间差异显著 ($P<0.05$)

2.2.3 生态系统碳储量及分配

由表 4 可以看出,不同林龄杏树林生态系统总碳储量在 27.810—102.336 Mg/hm^2 ;林龄对杏树林生态系统碳储量有显著影响,乔木层和土壤层土壤碳储量均随林龄的增长而增大。不同林龄杏树林各组分碳储量比例不同。4、8、12 年生和 16 年生杏树林乔木层占生态系统碳储量的比例依次是 0.4%、4.0%、6.3%和 9.9%,随林龄的增长而增大;不同林龄杏树林生态系统碳储量主要集中在土壤层,占生态系统碳储量的 90.1%—99.6%。

3 讨论

本研究中,杏树林乔木层各器官的碳含量(447.3—488.1 g/kg)与艾泽民等^[17]对黄土丘陵区刺槐(*Robinia pseudoacacia*)人工林乔木层的碳含量(435.9—493.4 g/kg)和 Elias 等^[19]测定的 32 个热带森林树种碳含量(444.0—494.5 g/kg)相似,低于明安刚等^[4]对格木(*Erythrophleum fordii*)人工林乔木层碳含量(509.0—572.4 g/kg)和杨丽丽等^[20]对六盘山白桦木(*Betula platyphylla*)林乔木层碳含量(533.1—565.2 g/kg)。这表明碳含量大小与树种的关系极为密切,不同树种的碳含量有明显差异^[4,21]。目前,在计算森林碳储量时的通用碳系数为 0.5 或者 0.45^[3]。杏树林乔木层平均碳含量在该范围内,但 4 个林龄段的碳含量不同,可见,在估算该地区杏树林碳储量时,可以利用这一通用碳系数,但若研究不同林龄的碳储量状况,利用这一碳系数可能会低估或高估了杏树林生态系统的碳储量,导致结果存在偏差。

表 4 杏树人工林生态系统碳储量 (Mg/hm^2) 及其分配格局Table 4 C storage (Mg/hm^2) and allocation pattern in apricot plantation ecosystem

项目 Item	林龄 Age/a			
	4	8	12	16
乔木层 Arbor layer	0.122±0.006A	2.876±0.136B	5.162±0.138C	10.144±0.497D
土壤层 Soil layer	27.688±3.121A	69.771±9.924B	77.287±7.746B	92.192±10.924B
生态系统 Ecosystem	27.810±3.167A	72.647±10.788B	82.450±8.881BC	102.336±11.420C

同行不同大写字母表示不同林龄间差异显著 ($P<0.05$)

杏树林(4—16 年生)生态系统中乔木层的碳储量(0.122—10.144 Mg/hm^2)与岷江干旱河谷岷江柏(*Cupressus chengiana*)人工林(4—13 年生)乔木层碳储量(0.163—14.006 Mg/hm^2)^[7]及黄土丘陵区刺槐人工林(9—17 年生)乔木层碳储量(11.7—12.9 Mg/hm^2)^[17]相似。与其他经济林相比较,本研究 8 年生杏树林乔

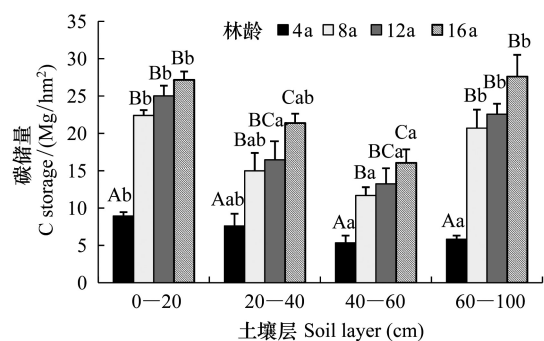


图 4 杏树人工林各土壤层碳储量

Fig. 4 Soil C storage in apricot plantations

不同大写字母表示林龄间差异显著,不同小写字母表示各土壤层间差异显著 ($P<0.05$)

木层碳储量(2.876 Mg/hm²)低于福建7年生柑橘园乔木层碳储量(4.75 Mg/hm²)^[22]和上海7年生桃园和柑橘园的乔木层碳储量(分别为15.91Mg/hm²和23.54 Mg/hm²)^[12]。这种差异主要受树种类型、立地条件、气候条件和管理措施等因素影响^[23]。此外,杏树林作为一种典型的农用型植被类型,其碳循环过程受到人类管理措施(间伐、除草、剪枝、翻耕和对果实的收获等)的影响,在实际生产过程中,地被杂草、枯枝落叶和果实迅速归还土壤或被带走^[24],这些构成杏树林生态系统中暂时性或流动性的植被层碳库。因此,杏树林生态系统中乔木层的实际碳储量将大于本研究结果。此外,4—16年生杏树林乔木层碳储量分配格局随林龄增长而变化。4年生杏树林乔木层碳储量主要分布于树枝,约占30.7%;而16年生杏树林树干碳储量所占比例最大,达到54.5%。艾泽民等^[17]研究表明,9年生和17年生刺槐人工林乔木层碳储量以树干所占比例最多,分别为55.4%和63.3%。胡亚林等^[10]研究发现,退耕5年和退耕10年生杨树(*Populussimonii*)人工林生物量碳储量主要分布于树干,分别为41.1%和45.9%。乔木层各器官碳储量分配的差异性可以归因于树木个体各器官不同的生长规律,是树木个体各器官之间及与环境之间长期相互作用和适应的结果^[25]。

土壤碳库是在气候、植被覆盖、地形、人为活动等因素影响下有机碳输入与输出之间平衡的结果^[26-27]。本研究中,杏树林土壤碳含量和碳储量随林龄增加而增大,这主要是由于在杏树林生长过程中,根系生长代谢增加了土壤碳储量。除受自然环境影响外,不同林龄阶段杏树林土壤碳库的差异并不能完全排除人类活动(修剪、施肥、灌溉、翻耕、高密度栽植等)的影响^[23]。韩营营等^[28]对不同林龄白桦林及侯浩等^[29]对小陇山不同林龄锐齿栎林(*Quercusalienavar. acuteserrata*)的研究均表明,土壤碳储量随林龄的增长而增大;然而,齐光等^[30]的研究表明,大兴安岭林区兴安落叶松(*Larixgmelinii*)人工林土壤碳储量随林龄增加,呈先减少后增加的变化趋势。土壤碳库随林龄的变化具有不确定性,受林龄、树种、原有土地利用类型等多种因素制约^[6,30]。此外,本研究中杏树林各林龄土壤层碳含量和碳储量均为表层(0—20 cm)最大,随土壤层深度的增加而逐渐降低,这主要是由于表层土壤能够直接接收植物残体和根系生长代谢输入的有机碳^[2, 17];杏树林各林龄0—40 cm土层碳储量占土壤层总碳储量的52.7%—59.7%,这与王卫霞等^[31]和艾泽民等^[17]的研究结果相一致,可见土壤中的碳库主要集中在表层,具有明显的表层富集作用。

森林组成、林龄、密度、林分起源以及森林经营活动对生态系统碳储量有明显影响^[17,32-34]。有研究表明,油松(*Pinustabuliformis*)^[2,35]、岷江柏^[18]、刺槐^[17]和格木^[4]人工林生态系统碳储量均随着林龄增长而增加。本研究中,4—16年生杏树林生态系统碳储量也表现出相一致规律,随林龄的生长能持续地积累有机碳。4、8、12年生和16年生杏树林生态系统平均碳储量为71.311 Mg/hm²,远低于我国森林生态系统平均碳储量(258.82 Mg/hm²)^[36]。杏树林乔木层碳储量分配比例随林龄的增长而增大,土壤层碳储量分配比例呈减少趋势,这在5—30年生油茶林^[37]、1—10年生花椒林^[17]和3—27年生马尾松林^[33]等人工林生态系统中也存在类似变化规律。随林龄增长,根系生长代谢以及外源性有机质的输入,促进土壤碳积累,但部分碳被消耗来供给植被生长^[38]。因此,随林龄增长,森林生态系统中乔木层碳储量分配比例呈上升趋势,而土壤层碳储量分配比例呈下降趋势^[39]。

本研究中存在一些不足之处,如细根生物量数据不完整以及间伐对不同林龄杏树林碳储量的影响,都有待于进一步调查研究。现今经济林生态系统碳储量的估算存在较大的不确定性。本研究采取样地调查与室内分析相结合的方法估算太行山东坡不同林龄杏树林碳储量,可能会出现结果与真实值的偏差。今后有必要开展果园管理与种植技术改进等相关研究,为保持并提高其碳贮存能力提供进一步的科学依据。

4 结论

(1) 树干碳含量随林龄的增长而显著降低($P < 0.05$),其他器官碳含量随林龄的增长变化规律并不显著。随林龄的增长,0—100 cm各土层碳含量显著增大($P < 0.05$);不同林龄杏树林土壤有机碳含量随着土层的加深而逐渐降低。

(2) 杏树林乔木层、土壤层和生态系统碳储量均随林龄的增长而显著增大($P < 0.05$);4年生杏树林乔木

层碳储量分配以树枝为主,随林龄增长,树干成为乔木层碳储量的主体;0—40 cm 土层碳储量占土壤层总碳储量的 52.7%—59.7%,具有明显的表层富集作用;土壤层是杏树林生态系统的主要碳库,占总碳储量的 90.1%—99.6%。

参考文献 (References):

- [1] Wang Z, Liu G B, Xu M X, Zhang J, Wang Y, Tang L. Temporal and spatial variations in soil organic carbon sequestration following revegetation in the hilly Loess Plateau, China. *Catena*, 2012, 99: 26-33.
- [2] 刘冰燕, 陈云明, 曹扬, 吴旭. 秦岭南坡东段油松人工林生态系统碳、氮储量及其分配格局. *应用生态学报*, 2015, 26(3): 643-652.
- [3] 杨玉姣, 陈云明, 曹扬. 黄土丘陵区油松人工林生态系统碳密度及其分配. *生态学报*, 2014, 34(8): 2128-2136.
- [4] 明安刚, 贾宏炎, 田祖为, 陶怡, 卢立华, 蔡道雄, 史作民, 王卫霞. 不同林龄栎木人工林碳储量及其分配特征. *应用生态学报*, 2014, 25(4): 940-946.
- [5] 宋娅丽, 韩海荣, 康峰峰. 山西太岳山不同林龄油松林生物量及碳储量研究. *水土保持研究*, 2016, 23(1): 29-33.
- [6] 苗娟, 周传艳, 李世杰, 闫俊华. 不同林龄云南松林土壤有机碳和全氮积累特征. *应用生态学报*, 2014, 25(3): 625-631.
- [7] 罗达, 冯秋红, 史作民, 李东胜, 杨昌旭, 刘千里, 何建社. 岷江干旱河谷区岷江柏人工林碳氮储量随林龄的动态. *应用生态学报*, 2015, 26(4): 1099-1105.
- [8] Wang C M, Ouyang H, Shao B, Tian Y Q, Zhao J G, Xu H Y. Soil carbon changes following afforestation with Olga Bay Larch (*Larix olgensis* Henry) in northeastern China. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2006, 48(5): 503-512.
- [9] Schulp C J E, Nabuurs G J, Verburg P H, De Waal R W. Effect of tree species on carbon stocks in forest floor and mineral soil and implications for soil carbon inventories. *Forest Ecology and Management*, 2008, 256(3): 482-490.
- [10] 胡亚林, 曾德慧, 姜涛. 科尔沁沙地退耕杨树人工林生态系统 C、N、P 储量和分配格局. *生态学报*, 2009, 29(8): 4206-4214.
- [11] Pérez-Cruzado C, Mansilla-Salineró P, Rodríguez-Soalleiro R, Merino A. Influence of tree species on carbon sequestration in afforested pastures in a humid temperate region. *Plant and Soil*, 2012, 353(1/2): 333-353.
- [12] 郭雪艳, 蔡婷, 段秀文, 韩玉洁, 黄丹, 达良俊. 上海主要经果林生态系统碳储量及其分布格局. *生态学杂志*, 2013, 32(11): 2881-2885.
- [13] 王义祥. 不同经营措施下果园土壤有机碳库特性及固碳潜力研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2011: 44-46.
- [14] 甘卓亭, 张掌权, 陈静, 刘文兆, 周正朝. 黄土塬区苹果园土壤有机碳分布特征. *生态学报*, 2010, 30(8): 2135-2140.
- [15] 吕超. 河北鹿泉市旅游可持续发展研究[D]. 石家庄: 河北师范大学, 2009: 4-8.
- [16] 施文涛, 谢昕云, 刘西军, 张驰, 柯立, 徐小牛. 安徽大别山区杉木人工林乔木层生物量模型及碳贮量. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(5): 758-764.
- [17] Cheng J Z, Lee X Q, Theng B K G, Zhang L K, Fang B, Li F S. Biomass accumulation and carbon sequestration in an age-sequence of *Zanthoxylum bungeanum* plantations under the Grain for Green Program in karst regions, Guizhou province. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 203: 88-95.
- [18] 艾泽民, 陈云明, 曹扬. 黄土丘陵区不同林龄刺槐人工林碳、氮储量及分配格局. *应用生态学报*, 2014, 25(2): 333-341.
- [19] Elias M, Potvin C. Assessing inter-and intra-specific variation in trunk carbon concentration for 32 neotropical tree species. *Canadian Journal of Forest Research*, 2003, 33(6): 1039-1045.
- [20] 杨丽丽, 王彦辉, 文仕知, 刘延惠, 杜敏, 郝佳, 李振华. 六盘山四种森林生态系统的碳氮储量、组成及分布特征. *生态学报*, 2015, 35(15): 5215-5227.
- [21] 刘恩. 南亚热带典型人工林碳储量研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2012: 34-39.
- [22] 吴志丹, 王义祥, 翁伯琦, 蔡子坚, 温寿星. 福州地区 7 年生柑橘果园生态系统的碳氮储量. *福建农林大学学报: 自然科学版*, 2008, 37(3): 316-319.
- [23] 沈会涛, 王晓学, 赵艳霞, 刘欣. 河北省太行山区 10a 生核桃林生态系统的碳氮储量. *四川农业大学学报*, 2017, 35(2): 208-212.
- [24] 林清山, 洪伟, 吴承祯, 林勇明, 陈灿. 永春县柑橘林生态系统的碳储量及其动态变化. *生态学报*, 2010, 30(2): 309-316.
- [25] 梁萌杰, 陈龙池, 汪思龙. 湖南省杉木人工林生态系统碳储量分配格局及固碳潜力. *生态学杂志*, 2016, 35(4): 896-902.
- [26] Six J, Paustian K, Elliot E T, Combrink C. Soil Structure and organic matter: I. Distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64(3/4): 681-689.
- [27] 焦加国, 杨林章, 武俊喜, 李辉信, Ellis E C. 不同区域的人口密集农村地区土壤有机碳的分布. *生态学报*, 2007, 27(5): 1969-1977.
- [28] 韩营营, 黄唯, 孙涛, 陆彬, 毛子军. 不同林龄白桦天然次生林土壤碳通量和有机碳储量. *生态学报*, 2015, 35(5): 1460-1469.
- [29] 侯浩, 张宋智, 关晋宏, 杜盛. 小陇山不同林龄锐齿栎林土壤有机碳和全氮积累特征. *生态学报*, 2016, 36(24): 8025-8033.
- [30] 齐光, 王庆礼, 王新闻, 于大炮, 周莉, 周旺明, 彭舜磊, 代力民. 大兴安岭林区兴安落叶松人工林土壤有机碳贮量. *应用生态学报*,

- 2013, 24(1): 10-16.
- [31] 王卫霞, 史作民, 罗达, 刘世荣, 卢立华, 明安刚, 于浩龙. 我国南亚热带几种人工林生态系统碳氮储量. 生态学报, 2013, 33(3): 925-933.
- [32] 文丽, 王克林, 曾馥平, 彭晚霞, 杜虎, 李莎莎, 宋同清. 不同林龄尾巨桉人工林碳储量及分配格局. 西北植物学报, 2014, 34(8): 1676-1684.
- [33] Justine M F, Yang W Q, Wu F Z, Khan M N. Dynamics of biomass and carbon sequestration across a chronosequence of masson pine plantations. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2017, 122(3): 578-591.
- [34] 刘顺, 罗达, 刘千里, 张利, 杨洪国, 史作民. 川西亚高山不同森林生态系统碳氮储量及其分配格局. 生态学报, 2017, 37(4): 1074-1083.
- [35] 黄晓强, 信忠保, 赵云杰, 马凤原. 林龄和立地条件对北京山区油松人工林碳储量的影响. 水土保持学报, 2015, 29(6): 184-190.
- [36] 周玉荣, 于振良, 赵士洞. 我国主要森林生态系统碳贮量和碳平衡. 植物生态学报, 2000, 24(5): 518-522.
- [37] 李海露. 桂北地区不同林龄油茶林碳储量分配格局. 湖南农业科学, 2017, (5): 53-55.
- [38] Lal R. Forest soils and carbon sequestration. *Forest Ecology and Management*, 2005, 220(1/3): 242-258.
- [39] 向仰州. 海南桉树人工林生态系统生物量和碳储量时空格局[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2012.