

中国寒温带不同林龄白桦林碳储量及分配特征

魏 红 满秀玲*

东北林业大学林学院, 东北林业大学森林生态系统可持续经营教育部重点实验室, 哈尔滨 150040

摘 要 为了解中国寒温带地区不同林龄白桦林生态系统碳储量及固碳能力, 在样地调查基础上, 以大兴安岭地区25、40与61年白桦(*Betula platyphylla*)林生态系统为研究对象, 对其乔木层、林下地被物层(灌木层、草本层、凋落物层)、土壤层(0–100 cm)碳储量与分配特征进行调查研究。结果表明白桦林乔木层各器官碳含量在440.7–506.7 g·kg⁻¹之间, 各器官碳含量随着林龄的增长而降低; 灌木层、草本层碳含量随林龄的增加呈先降后升的变化趋势; 凋落物层碳含量随林龄增加而降低; 土壤层(0–100 cm)碳含量随林龄增加而显著升高, 随着土层深度的增加而降低。白桦林生态系统各层次碳储量均随林龄的增加而明显升高。25、40与61年白桦林乔木层碳储量分别为11.9、19.1和34.2 t·hm⁻², 各器官碳储量大小顺序表现为树干>树根>树枝>树叶, 树干碳储量分配比例随林龄增加而升高。25、40与61年白桦林生态系统碳储量分别为77.4、180.9和271.4 t·hm⁻², 其中土壤层占生态系统总碳储量的81.6%、87.7%和85.9%, 是白桦林生态系统的主要碳库。随林龄增加, 白桦林年净生产力(2.0–4.4 t·hm⁻²·a⁻¹)、年净固碳量(1.0–2.1 t·hm⁻²·a⁻¹)均出现增长, 老龄白桦林仍具有较强的碳汇作用。

关键词 白桦林; 碳储量; 固碳能力; 碳含量; 林龄

魏红, 满秀玲 (2019). 中国寒温带不同林龄白桦林碳储量及分配特征. 植物生态学报, 43, 843–852. DOI: 10.17521/cjpe.2019.0127

Carbon storage and its allocation in *Betula platyphylla* forests of different ages in cold temperate zone of China

WEI Hong and MAN Xiu-Ling*

School of Forestry, Northeast Forestry University, Key Laboratory of Sustainable Forest Ecosystem Management-Ministry of Education, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

Abstract

Aims The objective of this study was to estimate the carbon storage and its allocation in the *Betula platyphylla* forests of three different ages (25, 40, 61-year-old) in the cold temperate zone, NE China.

Methods Through analyzing the field data, we estimated the carbon storage and sequestration rates of tree, understory layer (shrub layer, herb layer, litter layer) and soil layer (0–100 cm) of the 25, 40 and 61-year-old *Betula platyphylla* ecosystems in the north section of the Da Hinggan Ling Mountains.

Important findings The results showed that the carbon content of each organ in the tree layer of the forests ranged from 440.7 to 506.7 g·kg⁻¹, that decreased as the forest age increases. Carbon content in the shrub and herb layers decreased first and then increased as the forest aged, while that in the litter layer decreased with the increase of forest age. The carbon content in soil layer (0–100 cm) increased significantly with the forest age ($p < 0.05$), and decreased as soil drought intensified. The carbon storage of *B. platyphylla* ecosystem at all levels increased significantly with the increase of forest age. The carbon storage of tree layer in the forests of 25, 40 and 61-year-old were 11.9, 19.1 and 34.2 t·hm⁻², respectively. The carbon storage of the organs follow the order of: trunk > root > branch > leaf, and the allocation ratio of trunk carbon increased as the forest aged. The carbon storage in the *Betula platyphylla* forest ecosystems of 25, 40 and 61-year-old were 77.4, 180.9 and 271.4 t·hm⁻², respectively. Soil layer, the main carbon pool of the ecosystems, accounted for 81.6%, 87.7% and 85.9% of the total carbon storage. The annual net productivity (2.0–4.4 t·hm⁻²·a⁻¹) and annual net carbon sequestration (1.0–2.1 t·hm⁻²·a⁻¹) of the forests increased with the age increase of the forest, and the old-growth *B. platyphylla* forests hold a strong carbon sequestration capacity.

Key words *Betula platyphylla* forests; carbon storage; carbon sequestration; carbon content; forest age

收稿日期Received: 2019-05-28 接受日期Accepted: 2019-10-06

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2572018AA02)和国家自然科学基金(31770488)。Supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities (2572018AA02), and the National Natural Science Foundation of China (31770488).

* 通信作者Corresponding author (mannefu@163.com)

© 1994–2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Wei H, Man XL (2019). Carbon storage and its allocation in *Betula platyphylla* forests of different ages in cold temperate zone of China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 43, 843–852. DOI: 10.17521/cjpe.2019.0127

由大气中温室气体排放量增加所导致的温室效应、气候变暖等问题已影响到全人类的生存和发展(Wang *et al.*, 2012), 实施碳减排、增加碳汇来应对气候变化的影响已成为国际社会的共识(吴贤荣等, 2014)。森林生态系统作为陆地上最大的碳库, 对全球碳循环及碳平衡至关重要(Pan *et al.*, 2011), 因此森林碳储量的估算成为适应全球变化和增汇减排机制研究的重要内容(方精云等, 2001)。森林生态系统碳储量受气候因素、立地条件、森林类型、森林经营管理、林龄结构的影响较大(Fang *et al.*, 2001; Chen & Luo, 2015), 其中林龄对森林碳储量的影响尤为重要(Zhu *et al.*, 2017a)。目前已有许多学者针对森林碳储量及分配格局随林龄的变化进行了研究(明安刚等, 2014; 胡海清等, 2015; 张毅等, 2015; Zhu *et al.*, 2017b), 结果表明, 在一定年龄范围内随着林龄的增加, 植被碳储量通常呈增加状态, 土壤碳储量由于更易受到土地利用方式、气候及植物种类等因素的影响, 因此随着林龄的增加土壤碳储量的变化较为不确定(Li *et al.*, 2011; 韩营营等, 2015)。但目前研究多集中于我国亚热带及温带地区(周序力等, 2018), 有关我国寒温带森林生态系统碳储量及分配格局随林龄变化特征的研究鲜有报道。

寒温带林区土壤中分布着大面积连续多年冻土, 存在冻融循环现象(鲁博权等, 2019), 对该区域植被生长与养分循环存在巨大影响, 白桦(*Betula platyphylla*)是我国寒温带地区主要树种, 占本区森林总面积和总蓄积量的41.15%和41.59%(刘双娜等, 2012; Girardin *et al.*, 2016; Zhou *et al.*, 2019), 具有重要的生态地位。目前有关白桦林的研究多集中于其生长发育(兰士波, 2018)、土壤特性(李文影等, 2009)、水化学(刘茜等, 2015)、生物量(李建强等, 2010)、植被层碳储量(胡海清等, 2015)和土壤碳通量(韩营营等, 2015)等, 研究地点多位于温带地区, 且多以中龄白桦林为研究对象(李娜娜等, 2015)。本文选择我国寒温带地区25、40和61年白桦林为研究对象, 通过野外调查与室内试验相结合的方法, 研究白桦林生态系统碳储量及分配特征, 既可以丰富我国寒温带地区森林生态系统碳汇研究, 也可为区域尺度精确测算白桦林生态系统碳储量及碳汇功能提供基础数据和科学参考。

1 材料和方法

1.1 研究区概况与样地设置

研究区位于黑龙江漠河森林生态系统国家定位观测研究站(122.10°–122.45° E, 53.28°–53.50° N)内, 该区属于寒温带大陆性季风气候, 冬季气候寒冷、干燥而漫长; 夏季气候湿热, 降水集中, 雨量充沛。该区年平均气温-4.9℃, 平均无霜期为89天, 年降水量为350–500 mm, 是多年冻土分布区。主要森林类型有兴安落叶松(*Larix gmelinii*)林、白桦林、樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)林和混交林等。林下灌木主要有兴安杜鹃(*Rhododendron dauricum*)、杜香(*Ledum palustre*)、越桔(*Vaccinium vitis-idaea*)等, 草本植物有小叶章(*Deyeuxia angustifolia*)、北柴胡(*Bupleurum chinense*)、肾叶鹿蹄草(*Pyrola renifolia*)、地榆(*Sanguisorba officinalis*)等。地带性土壤为棕色针叶林土, 还分布有草甸土和沼泽土等土壤类型。

在踏查基础上, 选取该区域占比较高的(25 ± 6)、(40 ± 4)和(61 ± 7)年白桦林为研究对象(以下简称25、40和61 a), 按照中华人民共和国林业行业标准(LY/T2908-2017)并结合大兴安岭白桦林生长特点(胡海清等, 2015), 将这3种不同林龄白桦林划归为幼龄林、中龄林和老龄林。在25、40和61 a白桦林内选择立地条件基本一致的典型区域, 各随机布设3块20 m × 20 m样地, 对每个样地进行每木检尺, 样地基本概况见表1。

1.2 白桦林生态系统生物量调查

1.2.1 乔木层

乔木生物量的估算采用相对生长法, 对样地内胸径 ≥ 4 cm乔木进行每木检尺, 将树高、胸径的实测结果代入表2马林(2012)研究出的白桦单木生物量模型, 计算各器官生物量, 汇总得出单位面积乔木生物量。

1.2.2 林下地被物层

1.2.2.1 灌木层 在每个样地内, 沿对角线随机设置3个2 m × 2 m小样方, 记录小样方内灌木的种类与株数, 采用“全收获法”按照地上、地下两部分采集小样方内全部灌木, 将同种植物相同部分混合, 在野外称量各部分鲜质量。随后选取部分样品带回

表1 大兴安岭北部不同林龄白桦林样地基本情况(平均值±标准偏差)

Table 1 General information of the studied *Betula platyphylla* forests in the north section of the Da Hinggan Ling Mountains, NE China (mean ± SD)

林龄 Stand age (a)	坡度 Slope (°)	密度 Stand density (No.·hm ⁻²)	郁闭度 Canopy density	平均树高 Mean tree height (m)	平均胸径 Mean DBH (cm)	林下主要植物 Main understory plants
25 ± 6	3 ± 1	1 825 ± 225	0.7 ± 0.1	8.6 ± 1.6	7.1 ± 1.8	1, 2, 3, 5, 6, 8
40 ± 4	2 ± 1	2 075 ± 300	0.9 ± 0.1	11.1 ± 3.0	9.5 ± 1.8	1, 2, 4, 5, 7, 9
61 ± 7	6 ± 2	1 820 ± 250	0.8 ± 0.1	15.2 ± 3.5	12.4 ± 2.2	1, 2, 4, 5, 6, 7, 8

1, 越桔; 2, 杜香; 3, 笃斯越桔; 4, 兴安杜鹃; 5, 小叶章; 6, 地榆; 7, 肾叶鹿蹄草; 8, 二叶舞鹤草。

DBH, diameter at breast height. 1, *Vaccinium vitis-idaea*; 2, *Ledum Palustre*; 3, *Vaccinium uliginosum*; 4, *Rhododendron dauricum*; 5, *Deyeuxia angustifolia*; 6, *Sanguisorba officinalis*; 7, *Pyrola renifolia*; 8, *Maianthemum bifolium*.

表2 白桦生物量方程

Table 2 General regression models used to estimate biomass of different organs of the *Betula platyphylla* forests

器官 Organ	回归方程 Regression equation	R ²
树干 Stem	$W = 0.046D^{1.55}H^{1.163}$	0.969
树枝 Branch	$W = 5.921D^{1.925}H^{-1.54}$	0.793
树叶 Leaf	$W = 0.012D^{1.662}H^{0.49}$	0.711
树根 Root	$W = 0.016D^{2.171}H^{0.281}$	0.933

D代表胸径, H代表树高。

D stands for diameter at breast height and H stands for tree height.

实验室, 85 °C 烘干至恒质量(间隔6 h两次称量所得的含水率差小于0.1%即被视为达到恒质量), 用精度为0.01 g的电子天平称干质量, 计算地上、地下部分的生物量, 两部分生物量相加计算出单位面积生物量(张治军等, 2009)。

1.2.2.2 草本层 在每个样地内, 沿对角线随机设置5个1 m × 1 m小样方, 调查样方内草本植物的盖度、种类和平均高度, 按照地上、地下两部分采集小样方内全部草本植物, 将同种植物相同部分混合, 在野外称量各部分鲜质量。测定方法与灌木层生物量测定方法相同。

1.2.2.3 凋落物层 在每一样地内, 按对角线设置5个50 cm × 50 cm凋落物样方, 按照未分解层与半分解层收集样方内凋落物, 相同层凋落物混合, 野外测定湿质量。测定方法同灌木生物量测定方法。

1.3 白桦林生态系统碳储量测定

1.3.1 乔木层

在样地内选取白桦标准木, 共选取标准木10株(25 a林分4株, 40 a林分3株, 61 a林分3株), 采集标准木的树干、树枝、树叶和根, 其中树干分别从树干基部、胸径和梢头3个部位进行取样, 枝带皮从粗枝到小枝按比例取样, 叶亦分别从不同部位取样, 根带皮从粗根到小根按比例分别取样。带回实验室, 放置于85 °C 烘箱, 烘干至恒质量, 粉碎, 过筛, 用于碳含量的测定。将表1所得到的白桦林每木检尺数

据带入表2回归方程中可得到白桦乔木层干、枝、叶、根每hm²的生物量, 再乘以各器官碳含量, 即为乔木层干、枝、叶、根每hm²的碳储量。

1.3.2 林下地被物层

灌木层每hm²碳储量为各部分碳含量与对应部分每hm²生物量的乘积。草本层与凋落物层每hm²碳储量计算方法同上。

林下地被物层碳储量为各层次每hm²碳储量之和。

1.3.3 土壤层

在样地内随机挖取3个土壤剖面, 按照0–10、10–20、20–30、30–50、50–100 cm分层取样, 并分层取环刀, 测定容重。将土壤样品带回实验室, 自然风干, 研磨过筛, 使用Elemental Vario TOC cube型Hanau, 元素分析仪(Elemental, Hanau, Germany)测定土壤内有机碳含量。土壤剖面有机碳储量的计算模型如下:

$$SOC_D = \sum_{i=1}^n \frac{\rho_i C_i T_i (1 - \theta_i)}{10} \quad (1)$$

式中, SOC_D 为土壤剖面有机碳储量(t·hm⁻²); θ_i 为第*i*层砾石含量(体积%); ρ_i 为第*i*层土壤容重(g·cm⁻³); C_i 为第*i*层土壤有机碳含量(C g·kg⁻¹); T_i 为第*i*层土层厚度(cm)。

1.4 数据处理

叶片的净生产量按照现存量直接转换(郑瞳等, 2016), 其他部分均按照白桦林龄, 结合年净生产量公式计算:

$$\Delta W = (W_m - W_{m-n})/n \quad (2)$$

式中, ΔW 为年净生产量(t·hm⁻²·a⁻¹), W_m 为*m*年时单位面积现存生物量(t·hm⁻²), W_{m-n} 为(*m-n*)年时单位面积现存生物量(t·hm⁻²), *n*为年数(a)(丁贵杰和王鹏程, 2002)。

采用SPSS 19.0软件据进行统计分析、方差分析和差异性显著检验($\alpha = 0.05$), 采用Excel 2016软件

作图, 图表中数据为平均值 \pm 标准偏差。

2 结果和分析

2.1 不同林龄白桦林生态系统各组分碳含量

2.1.1 乔木层碳含量

由表3可知, 不同林龄白桦林乔木层各器官碳含量在440.7–506.7 g·kg⁻¹, 林龄对乔木层各器官碳含量均存在显著影响($p < 0.05$), 随着林龄的增加乔木层各器官碳含量均呈现下降趋势。其中树干碳含量降幅最大, 从490.3减至440.7 g·kg⁻¹, 树枝碳含量降幅最小, 从485.9减至453.6 g·kg⁻¹。不同器官碳含量及大小顺序存在差异, 但均以树叶最高。

2.1.2 林下地被物层碳含量

林下地被物包括活地被物与死地被物, 本研究主要测定了白桦林林下灌木层、草本层与凋落物层的碳含量。由表3可知, 随着林龄的增加, 灌木层与草本层碳含量先降低后升高, 表现为61 a > 25 a > 40 a, 凋落物层的碳含量随着林龄的增加而下降, 表现为25 a (515.2 g·kg⁻¹) > 40 a (483.1 g·kg⁻¹) > 61 a (426.4 g·kg⁻¹), 不同林龄间差异显著($p < 0.05$)。25 a与40 a白桦林林下地被物层的碳含量表现为凋落物层>灌木层>草本层, 61 a白桦林表现为灌木层>草本层>凋落物层。灌木层、草本层地上部分碳含量高于地下部分, 凋落物未分解层的碳含量高于半分解层。

2.1.3 土壤层碳含量

从图1可知, 不同林龄白桦林土壤层碳含量为1.3–77.0 g·kg⁻¹, 同一土层不同林龄间碳含量存在显著差异($p < 0.05$), 随着林龄的增加土壤碳含量升高, 表现为: 61 a > 40 a > 25 a。不同林龄白桦林土壤层碳含量具有明显垂直分布特征, 表层(0–10 cm)土壤碳含量最高, 分别为19.9、42.9和77.0 g·kg⁻¹, 随着土层深度的增加土壤碳含量明显下降。0–30 cm土层碳含量显著高于下层土壤, 随着土层深度的继续增加, 土壤碳含量继续下降, 但不同土层间差异逐渐减小。

2.2 白桦林生态系统各组分碳储量及分配特征

2.2.1 乔木层生物量、碳储量及分配特征

由表3可知, 随着林龄的增加, 乔木层各器官生物量均呈显著增加趋势($p < 0.05$), 25、40与61 a白桦林乔木层生物量分别为24.1、41.5和76.5 t·hm⁻², 树干、树根生物量分配比例随着林龄的增加而增加(48.5%–70.6%和8.7%–10.6%), 树枝生物量分配比

例随着林龄的增加而降低(39.0%–14.9%), 树叶生物量分配比例较为稳定, 随林龄的增加未表现出明显变化(3.7%–4.1%)。乔木层各器官碳储量随林龄变化趋势与生物量较为接近, 随着林龄的增加各器官碳储量呈现增加趋势, 25、40和61 a白桦林乔木层碳储量分别为11.9、19.1和34.2 t·hm⁻²。各器官碳储量排序为树干(48.7%–69.6%) > 树枝(38.6%–15.2%) > 树叶(3.8%–4.2%) > 树根(8.4%–11.1%)。林龄对树干、树枝、树根碳储量分配比例存在显著影响, 随着林龄增加树干碳储量分配比例逐渐增加, 树枝和树根碳储量分配比例随着林龄的增加而降低, 随着林龄增加树叶碳储量分配比例未发现明显变化。

2.2.2 林下地被物碳储量及分配特征

由表3可知, 林下地被物层碳储量较低, 不同林龄白桦林林下地被物层碳储量分别为2.3 t·hm⁻²、3.2 t·hm⁻²和4.0 t·hm⁻², 随着林龄增加而升高。灌木层、草本层碳储量随着林龄的增加先降低后升高, 凋落物层碳储量随着林龄的增加而升高。

25a白桦林林下地被物层碳储量表现为灌木层>凋落物层>草本层, 40 a与61 a白桦林表现为凋落物层>灌木层>草本层。灌木层与草本层地上部分碳储量高于地下部分, 凋落物半分解层碳储量高于未分解层, 差异均达到显著水平($p < 0.05$)。

2.2.3 土壤层碳储量及分配特征

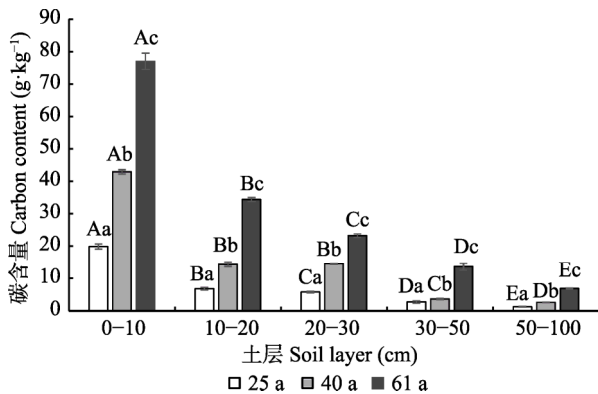
由图2可知, 白桦林土壤碳储量随林龄的增加呈增长趋势, 25、40和61 a白桦林0–100 cm土层碳储量分别为63.2、158.6和233.2 t·hm⁻², 林龄对不同土层土壤碳储量均存在显著影响($p < 0.05$)。各林龄白桦林土壤碳储量均随着土层深度的增加表现出下降趋势, 土壤碳主要集中于0–30 cm土层, 其碳分配比例分别为71.1%、78.9%和65.3%, 30–100 cm土层土壤碳储量较低。

2.3 白桦林固碳能力

由表4可知, 白桦林年净生产力、年固碳量均随着林龄的增加而显著升高, 25、40和61 a白桦林的年净生产力分别为2.0、3.0和4.4 t·hm⁻²·a⁻¹, 年固碳量分别为1.0、1.8和2.1 t·hm⁻²·a⁻¹。其中乔木层固碳能力最强, 且随着林龄增长乔木层固碳量逐渐增多, 分别为0.9、1.3和2.0 t·hm⁻²·a⁻¹, 占生态系统总固碳量的90.0%、72.2%和95.2%, 且由中龄至老龄阶段的增长幅度(53.8%)高于幼龄至中龄阶段(44.4%)。

表3 大兴安岭北部不同林龄白桦林各组分生物量($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)、碳含量($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)和碳储量($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)(平均值 \pm 标准偏差)Table 3 Biomass, carbon content and carbon storage of the components (organs) of the studied *Betula platyphylla* forests in the north section of the Da Hinggan Ling Mountains, NE China (mean \pm SD)

组分 Component		25 a			40 a			61 a		
		生物量 Biomass ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)	碳含量 Carbon Content ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	碳储量 Carbon Stor- age ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)	生物量 Biomass ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)	碳含量 Carbon content ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	碳储量 Carbon stor- age ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)	生物量 Biomass ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)	碳含量 Carbon content ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	碳储量 Carbon stor- age ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)
乔木层 Arbor layer	树干 Stem	$11.7 \pm 0.6^{\text{Ac}}$	$490.3 \pm 8.8^{\text{Ba}}$	$5.8 \pm 0.5^{\text{Ac}}$	$24.8 \pm 1.2^{\text{Ab}}$	$453.3 \pm 8.7^{\text{Bb}}$	$11.2 \pm 0.6^{\text{Ab}}$	$54.0 \pm 2.7^{\text{Aa}}$	$440.7 \pm 4.7^{\text{Db}}$	$23.8 \pm 0.7^{\text{Aa}}$
	树枝 Branch	$9.4 \pm 0.5^{\text{Bb}}$	$485.9 \pm 8.4^{\text{Ca}}$	$4.6 \pm 0.4^{\text{Bb}}$	$11.1 \pm 0.5^{\text{Ba}}$	$473.7 \pm 3.6^{\text{Aa}}$	$5.3 \pm 0.3^{\text{Ba}}$	$11.4 \pm 0.1^{\text{Ba}}$	$453.6 \pm 6.8^{\text{Cb}}$	$5.2 \pm 0.2^{\text{Ba}}$
	树叶 Leaf	$0.9 \pm 0.1^{\text{Fc}}$	$506.7 \pm 7.3^{\text{Ba}}$	$0.5 \pm 0.0^{\text{Gc}}$	$1.7 \pm 0.1^{\text{Db}}$	$484.2 \pm 16.0^{\text{Ab}}$	$0.8 \pm 0.0^{\text{Eb}}$	$3.0 \pm 0.2^{\text{Da}}$	$467.9 \pm 9.7^{\text{Cb}}$	$1.4 \pm 0.0^{\text{Ea}}$
	树根 Root	$2.1 \pm 0.1^{\text{Cc}}$	$505.9 \pm 11.0^{\text{Ba}}$	$1.0 \pm 0.1^{\text{Cc}}$	$3.9 \pm 0.2^{\text{Cb}}$	$471.6 \pm 12.5^{\text{Ab}}$	$1.8 \pm 0.1^{\text{Cb}}$	$8.1 \pm 0.5^{\text{Ca}}$	$465.6 \pm 12.6^{\text{Cb}}$	$3.8 \pm 0.1^{\text{Ca}}$
	总计 Sum	$24.1 \pm 1.1^{\text{c}}$		$11.9 \pm 1.0^{\text{c}}$	$41.5 \pm 2.0^{\text{b}}$		$19.1 \pm 1.0^{\text{b}}$	$76.5 \pm 3.5^{\text{a}}$		$34.2 \pm 1.0^{\text{a}}$
灌木层 Shrub layer	地上部分 Aboveground	$1.5 \pm 0.1^{\text{Da}}$	$505.3 \pm 1.7^{\text{Bb}}$	$0.8 \pm 0.1^{\text{Db}}$	$1.0 \pm 0.1^{\text{Eb}}$	$494.3 \pm 14.9^{\text{Ab}}$	$0.5 \pm 0.1^{\text{Fc}}$	$1.5 \pm 0.1^{\text{Ea}}$	$575.3 \pm 26.6^{\text{Aa}}$	$0.9 \pm 0.2^{\text{Fa}}$
	地下部分 Underground	$1.2 \pm 0.1^{\text{Ea}}$	$483.7 \pm 1.9^{\text{Cb}}$	$0.6 \pm 0.1^{\text{Fb}}$	$0.9 \pm 0.0^{\text{Fb}}$	$465.7 \pm 1.3^{\text{Bc}}$	$0.4 \pm 0.1^{\text{Gc}}$	$1.3 \pm 0.1^{\text{Fa}}$	$551.7 \pm 7.5^{\text{Aa}}$	$0.7 \pm 0.1^{\text{Ga}}$
	总计 Sum	$2.8 \pm 0.2^{\text{a}}$		$1.4 \pm 0.2^{\text{b}}$	$1.8 \pm 0.1^{\text{b}}$		$0.9 \pm 0.2^{\text{c}}$	$2.8 \pm 0.2^{\text{a}}$		$1.6 \pm 0.3^{\text{a}}$
草本层 Herb layer	地上部分 Aboveground	$0.2 \pm 0.0^{\text{Gb}}$	$426.1 \pm 2.9^{\text{Db}}$	$0.1 \pm 0.0^{\text{Ib}}$	$0.7 \pm 0.1^{\text{Ga}}$	$412.8 \pm 2.7^{\text{Cc}}$	$0.3 \pm 0.1^{\text{Ja}}$	$0.7 \pm 0.0^{\text{Ga}}$	$462.4 \pm 7.1^{\text{ABc}}$	$0.1 \pm 0.0^{\text{Ib}}$
	地下部分 Underground	$0.1 \pm 0.0^{\text{Hb}}$	$424.8 \pm 1.5^{\text{Db}}$	$0.0 \pm 0.0^{\text{Jc}}$	$0.5 \pm 0.0^{\text{Ha}}$	$399.8 \pm 9.1^{\text{Cc}}$	$0.2 \pm 0.0^{\text{Ja}}$	$0.5 \pm 0.0^{\text{Ha}}$	$471.5 \pm 8.3^{\text{Ba}}$	$0.0 \pm 0.0^{\text{Ib}}$
	总计 Sum	$0.2 \pm 0.0^{\text{b}}$		$0.1 \pm 0.0^{\text{b}}$	$1.1 \pm 0.1^{\text{a}}$		$0.5 \pm 0.1^{\text{a}}$	$0.2 \pm 0.0^{\text{b}}$		$0.1 \pm 0.0^{\text{b}}$
凋落 物层 Litter layer	未分解层 Undecomposed layer		$544.0 \pm 63.0^{\text{Aa}}$	$0.1 \pm 0.0^{\text{Hc}}$		$478.1 \pm 21.8^{\text{Ab}}$	$0.3 \pm 0.1^{\text{Hb}}$		$433.0 \pm 17.8^{\text{Dc}}$	$0.6 \pm 0.1^{\text{Ha}}$
	半分解层 partially- decomposed layer		$486.3 \pm 11.7^{\text{Ca}}$	$0.7 \pm 0.1^{\text{Eb}}$		$488.1 \pm 13.3^{\text{Aa}}$	$1.5 \pm 0.2^{\text{Da}}$		$419.9 \pm 2.4^{\text{Eb}}$	$1.8 \pm 0.2^{\text{Da}}$
	总计 Sum		515.2	$0.8 \pm 0.1^{\text{c}}$		483.1	$1.8 \pm 0.3^{\text{b}}$		426.4	$2.3 \pm 0.3^{\text{a}}$

不同大写字母表示同一林龄不同组分间差异显著, 不同小写字母表示同一组分不同林龄间差异显著($p < 0.05$)。Different uppercase letters indicate significant differences among different levels of the components of the forest of same age, and different lowercase letters showed significant differences among the same type of component, but different forest ages ($p < 0.05$).图1 大兴安岭北部不同林龄白桦林土壤层碳含量(平均值 \pm 标准偏差)。不同大写字母表示同一林龄不同土层间差异显著, 不同小写字母表示同一土层不同林龄间差异显著($p < 0.05$)。Fig. 1 Carbon content of soil layer in the *Betula platyphylla* forests of different ages in the north section of the Da Hinggan Ling Mountains, NE China (mean \pm SD). Different capital letters indicate significant differences among different levels of the components of the forest of same age, and different lower-case letters showed significant differences among the same type of component, but different forest ages ($p < 0.05$).

不同林龄白桦林乔木层各组分年固碳量的排序大致为树叶(55.6%–70.0%) > 树干(20.0%–23.1%) > 树枝

(5.0%–22.2%) > 树根(0–7.7%)。随着林龄的增加, 乔木层树叶年固碳量占比逐渐增大, 其余组分年固碳量占比均逐渐减小。林下植被层的年固碳量分别为0.2、0.5和0.1 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 即40 a白桦林林下地被物层固碳能力最强, 61 a最弱。

2.4 白桦林生态系统碳储量的分配特征

由表5可知, 随着林龄增加, 白桦林生态系统碳储量出现明显增长, 25、40与61 a白桦林生态系统碳储量分别为77.4、180.9和271.4 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 不同林龄间差异显著($p < 0.05$)。乔木层、林下地被物层、土壤层碳储量均随着林龄的增加而增长, 乔木层碳储量分配比例随着林龄的增加先降低后升高, 分别为15.4%、10.6%和12.6%, 林下地被物层碳储量分配比例随着林龄的增加而降低, 分别为3.0%、1.8%和1.5%, 白桦林生态系统碳储量主要集中于土壤层(81.6%–87.7%), 随着林龄的增加土壤层碳储量分配比例先升高后降低, 分配比例随林龄的变化特征与乔木层相反。

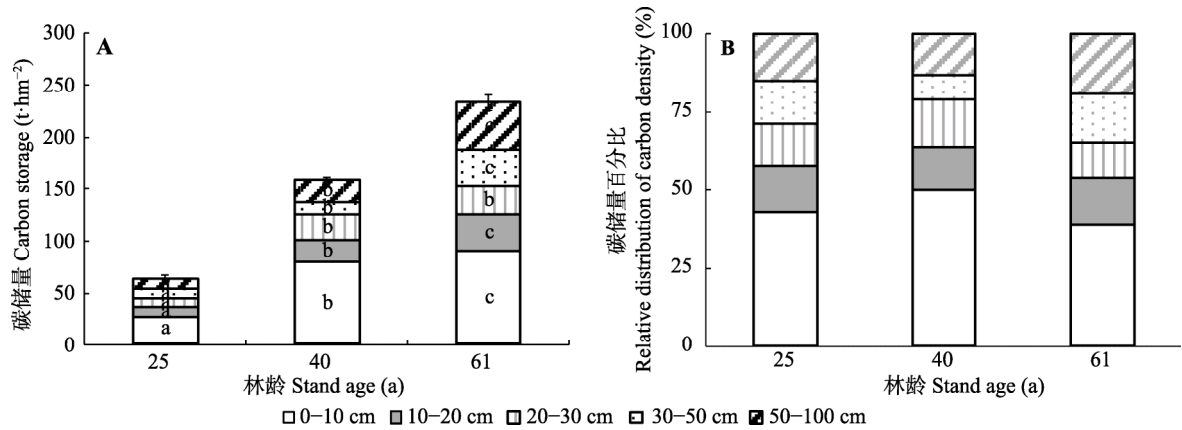


图2 大兴安岭北部不同林龄白桦林土壤碳储量绝对值(平均值±标准偏差)(A)和相对值(B)。
Fig. 2 Absolute (mean ± SD)(A) and relative distribution (B) of soil carbon density by soil depth in the *Betula platyphylla* forests of different ages in the north section of the Da Hinggan Ling Mountains, NE China.

表4 大兴安岭北部白桦林各组分年净生产力和年净固碳量(t·hm⁻²·a⁻¹)(平均值±标准偏差)
Table 4 Net productivity and carbon storage of each component in the *Betula platyphylla* forests in the north section of the Da Hinggan Ling Mountains, NE China (t·hm⁻²·a⁻¹)(mean ± SD)

林龄 Age (a)		乔木层 Arbor layer					灌木层 Shrub layer	草本层 Herb layer	总计 Total
		树干 Trunk	树枝 Bark	树叶 Leaf	树根 Root	总计 Total			
25	年净生产力 Annual net productivity	0.4 ± 0.0	0.3 ± 0.0	0.9 ± 0.1	0.1 ± 0.0	1.7 ± 0.1	0.1 ± 0.0	0.2 ± 0.0	2.0 ± 0.1
	年固碳量 Annual carbon storage	0.2 ± 0.0	0.2 ± 0.0	0.5 ± 0.0	0.0 ± 0.0	0.9 ± 0.1	0.1 ± 0.0	0.1 ± 0.0	1.0 ± 0.1
40	年净生产力 Annual net productivity	0.6 ± 0.0	0.3 ± 0.0	1.7 ± 0.1	0.1 ± 0.0	1.9 ± 0.1	0.0 ± 0.0	1.0 ± 0.1	3.0 ± 0.3
	年固碳量 Annual carbon storage	0.3 ± 0.0	0.1 ± 0.0	0.8 ± 0.0	0.1 ± 0.0	1.3 ± 0.1	0.0 ± 0.0	0.5 ± 0.1	1.8 ± 0.1
61	年净生产力 Annual net productivity	0.9 ± 0.0	0.2 ± 0.0	3.0 ± 0.2	0.1 ± 0.0	4.2 ± 0.2	0.0 ± 0.0	0.2 ± 0.0	4.4 ± 0.2
	年固碳量 Annual carbon storage	0.4 ± 0.0	0.1 ± 0.0	1.4 ± 0.1	0.1 ± 0.0	2.0 ± 0.1	0.0 ± 0.0	0.1 ± 0.0	2.1 ± 0.1

表5 大兴安岭北部白桦林碳储量(t·hm⁻²)及分配格局(平均值±标准偏差)
Table 5 Carbon storage (t·hm⁻²) and allocation percentage of the *Betula platyphylla* forests in the north section of the Da Hinggan Ling Mountains, NE China (t·hm⁻²·a⁻¹)(mean ± SD)

项目 Item	林龄 Age (a)					
	25		40		61	
	碳储量 Carbon storage	分配比例 Allocation pattern	碳储量 Carbon storage	分配比例 Allocation pattern	碳储量 Carbon storage	分配比例 Allocation pattern
乔木层 Arbor layer	11.9 ± 1.0	15.4% ± 1.4%	19.1 ± 1.0	10.5% ± 0.6%	34.2 ± 1.0	12.6% ± 0.4%
林下地被物层 Understory ground cover layer	2.3 ± 0.3	3.0% ± 0.4%	3.2 ± 0.5	1.8% ± 0.3%	4.0 ± 0.6	1.5% ± 0.2%
土壤层 Soil layer	63.2 ± 4.1	81.6% ± 5.3%	158.6 ± 3.0	87.7% ± 1.7%	233.2 ± 7.6	85.9% ± 2.8%
生态系统 Ecosystem	77.4 ± 5.4		180.9 ± 4.5		271.4 ± 9.2	

3 讨论

3.1 乔木层碳储量

林龄是影响森林生态系统碳储量的重要因素(Pregitzer & Euskirchen, 2004), 我国温带及热带地区森林生态系统中普遍存在着随林龄增加其碳储量升高的变化趋势(Zhu *et al.*, 2017b; 周序力等, 2018)。本研究结果发现我国寒温带地区白桦林生态系统乔木层碳储量亦随着林龄的增加而显著升高($p < 0.05$), 25、40和61 a白桦林乔木层碳储量分别为

11.9、19.1和34.2 t·hm⁻²。本研究结果低于六盘山51 a白桦林(41.80 t·hm⁻²)(杨丽丽等, 2015)和长白山地区35 a白桦林(40.81–80.08 t·hm⁻²)(李娜娜等, 2015), 老龄林(61 a)与小兴安岭30 a白桦林(29.2–42.6 t·hm⁻²)(张毅, 2015)相近, 这是由于北方森林多属于中营养、贫营养地区, 树木生长受到养分供应限制(吕超群和孙书存, 2004; 解宪丽等, 2004), 且本研究区位于寒温带, 土壤有永冻层存在, 年平均气温-4.9℃, 不利于植被生长, 使得该区域白桦生长速度较慢, 合成碳物质的累积量较小, 乔木层碳含量

较低(van Huysen *et al.*, 2016), 即白桦林乔木层碳储量受到林龄与立地条件的显著影响, 这与该区域其他树种的研究结果(黄国胜等, 2014)相类似。

3.2 林下地被物层碳储量

25、40与61 a白桦林的林下地被物层碳储量分别为2.3、3.2和4.0 t·hm⁻², 随着林龄的增加呈升高趋势。林下生物量随林龄的增加未发生明显变化, 其平均碳含量随林龄的增加先升高后降低, 这可能与林内郁闭度有关, 40 a白桦林内郁闭度高(表1), 林下植物接受光照相对较少, 不利于植物体碳的累积(齐光等, 2011), 因此活地被物层碳储量随林龄的增加呈现先降低后升高的变化趋势。有关凋落物随林龄增加的变化趋势目前已有研究结果, 但尚未得出定论(Bradford & Kastendick, 2010; Zhu *et al.*, 2017a), 本研究发现寒温带地区白桦林凋落物碳储量随林龄的增长呈现升高趋势, 这是因为随着林龄的增加植被碳储量显著增加, 导致凋落物的产量也随之增加(周序力等, 2018)。

3.3 土壤碳储量

本研究结果显示林龄对我国寒温带地区白桦林土壤(0–100 cm)碳储量存在显著影响($p < 0.05$), 25、40与61 a白桦林土壤层碳储量分别为63.2、158.6和233.2 t·hm⁻², 随着林龄的增长显著增加, 表现为碳积累过程(Zhu *et al.*, 2017b)。不同林龄白桦林土壤层(0–100 cm)平均碳含量表现为61 a (31.6 g·kg⁻¹) > 40 a (15.9 g·kg⁻¹) > 25 a (7.6 g·kg⁻¹), 随着林龄的增加而显著升高($p < 0.05$), 与其他地区白桦林的研究结果(韩营营等, 2015)相似。一方面是因为随着林龄增加土壤碳蓄积能力增强, 另一方面是随着林龄的增加乔木层碳含量降低, 干物质合成累积量逐渐减少, 降低了对土壤养分的需求, 土壤碳消耗量小于累积量(向云西等, 2019)。寒温带地区白桦林碳储量低于其他区域研究结果(韩营营等, 2015; 杨丽丽等, 2015), 主要是由于该区域存在冻融现象, 冻融作用导致土壤可溶性有机碳流失, 在很大程度上影响了土壤碳的累积(鲁博权等, 2019); 此外该地区年平均气温较低, 不利于凋落物分解, 土壤碳输入较少, 且土层较薄, 也使得其土壤碳储量较低(刘林馨等, 2018)。

3.4 生态系统碳储量及其分配

本研究中我国寒温带地区白桦林生态系统碳储量从25 a的77.4 t·hm⁻²增加至61 a的271.4 t·hm⁻², 主

要由土壤碳储量贡献, 这与小兴安岭地区白桦林(张毅等, 2015)及国内外很多高纬度地区森林的研究结果(吕超群和孙书存, 2004)相一致。本研究中寒温带地区25、40与61 a白桦林生态系统碳储量均表现为土壤>乔木层>林下地被物层, 地上>地下, 这与国内外许多温带、亚热带森林类型的研究结果相一致, 如大兴安岭南段华北落叶松林(舒洋等, 2016)和亚热带日本落叶松林(马丰等, 2016)等。寒温带地区白桦林生态系统碳储量主要由土壤碳储量贡献, 随着林龄增长, 土壤碳储量比重先升高后降低, 乔木层碳储量比重与之相反, 先降低后升高。林下植被层的碳储量比重随林龄的增加而降低, 由25 a的3.0%减少至61 a的1.5%。

3.5 白桦林植被净初级生产力与年固碳量

本研究发现寒温带地区白桦林在生长季内植被净初级生产力与年固碳量随着林龄的增加而升高, 其年固碳量从25 a的1.0 t·hm⁻²增加至61 a的2.1 t·hm⁻², 但低于其他地区的白桦林(李娜娜等, 2015; 郑瞳等, 2016), 这是由于本研究区纬度较高, 年平均气温较低, 而森林净初级生产力与年平均气温之间存在正相关关系(Raich *et al.*, 2006)。不同林龄白桦林植被年固碳量均以乔木层占主体地位(72.2%–95.2%), 其中乔木层各器官以树叶最大, 且随着林龄增加树叶占乔木层比例逐渐增大, 由25 a的55.6%增加至61 a的70.0%。灌木层与草本层占其植被净初级生产力(4.5%–33.3%)和年固碳量(4.8%–27.8%)的次要地位, 不同林龄白桦林灌木层与草本层生物量相差较大, 对植被净初级生产力与年固碳量的贡献率存在显著差异, 因此计算寒温带地区白桦林植被净初级生产力与年固碳量时应区分龄组并考虑灌木层与草本层对其的影响, 否则所得数值将与实际值间存在较大偏差。

3.6 不确定性

本研究调查了我国寒温带地区不同林龄白桦林生态系统乔木层、林下地被物层与土壤层碳储量及分配特征。以下因素可能会为本研究结果带来一定不确定性: 一是由于本实验区域位于保护区内, 该区严禁采伐树木, 因此未能建立本研究区白桦的相对生长方程。只能采用相近气候条件下同一树种的相对生长方程进行乔木层生物量计算, 会对本研究结果造成一定不确定性。二是本研究采用空间代替时间的方法, 尽管所选的不同林龄白桦林立地

条件基本一致,但不排除空间异质性的存在,也会为本研究结果带来一定的不确定性。

致谢 感谢黑龙江漠河森林生态系统国家定位观测研究站在野外采样调查工作中给予的支持和配合。

参考文献

- Bradford JB, Kastendick DN (2010). Age-related patterns of forest complexity and carbon storage in pine and aspen-birch ecosystems of northern Minnesota, USA. *Canadian Journal of Forest Research*, 40, 401–409.
- Chen HYH, Luo Y (2015). Net aboveground biomass declines of four major forest types with forest ageing and climate change in western Canada's boreal forests. *Global Change Biology*, 21, 3675–3684.
- Ding GJ, Wang PC (2002). Study on change laws of biomass and productivity of Masson pine forest plantation II. Biomass and productivity of stand at different ages. *Forest Research*, 15(1), 54–60. [丁贵杰, 王鹏程 (2002). 马尾松人工林生物量及生产力变化规律研究II. 不同林龄生物量及生产力. 林业科学研究, 15(1), 54–60.]
- Fang JY, Chen AP, Peng CH, Zhao SQ, Ci LJ (2001). Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. *Science*, 292, 2320–2322.
- Fang JY, Piao SL, Zhao SQ (2001). The carbon sink: The role of the middle and high latitudes terrestrial ecosystems in the Northern Hemisphere. *Acta Phytocologica Sinica*, 25, 594–602. [方精云, 朴世龙, 赵淑清 (2001). CO₂失汇与北半球中高纬度陆地生态系统的碳汇. 植物生态学报, 25, 594–602.]
- Girardin MP, Bouriaud O, Hogg EH, Kurz W, Zimmermann NE, Metsaranta JM, de Jong R, Frank DC, Esper J, Büntgen U, Guo XJ, Bhatti J (2016). No growth stimulation of Canada's boreal forest under half-century of combined warming and CO₂ fertilization. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 113, 8406–8414.
- Han YY, Huang W, Sun T, Lu B, Mao ZJ (2015). Soil organic carbon stocks and fluxes in different age stands of secondary *Betula platyphylla* in Xiaoxing'an Mountain, China. *Acta Ecologica Sinica*, 35, 1460–1469. [韩莹莹, 黄唯, 孙涛, 陆彬, 毛子军 (2015). 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, 35, 1460–1469.]
- Hu HQ, Luo BZ, Wei SJ, Wei SW, Wen ZM, Sun L, Luo SS, Wang LM, Ma HB (2015). Estimating biological carbon storage of five typical forest types in the Daxing'an Ling Mountains, Heilongjiang, China. *Acta Ecologica Sinica*, 35, 5745–5760. [胡海清, 罗碧珍, 魏书精, 魏书威, 文正敏, 孙龙, 罗斯生, 王立明, 马洪斌 (2015). 大兴安岭5种典型林型森林生物碳储量. 生态学报, 35, 5745–5760.]
- Huang GS, Ma W, Wang XJ, Xia CZ, Dang YF (2014). Carbon storage measurement of larch forest in northeastern China. *Scientia Silvae Sinicae*, 50(6), 167–174. [黄国胜, 马伟, 王雪军, 夏朝宗, 党永锋 (2014). 东北地区落叶松林碳储量估算. 林业科学, 50(6), 167–174.]
- Lan SB (2018). Comparison, selection and its progeny test of natural population of *Betula platyphylla* in northern China. *Journal of Beihua University (Natural Science)*, 19, 582–587. [兰士波 (2018). 中国北方白桦自然群体比较选择及子代测定. 北华大学学报(自然科学版), 19, 582–587.]
- Li JQ, Ju H, Zhang QL (2010). Study on the *Betula platyphylla* natural forest biomass model. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition)*, 31(1), 76–82. [李建强, 菊花, 张秋良 (2010). 白桦天然林生物量模型的研究. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 31(1), 76–82.]
- Li NN, Mu CC, Zheng T, Zhang Y, Cheng JY, Cao WL (2015). Effect of site types on carbon storage of natural white birch forest ecosystem in Changbai Mountains, Northeast China. *Forest Research*, 28, 618–626. [李娜娜, 牟长城, 郑瞳, 张毅, 程家友, 曹万亮 (2015). 立地类型对长白山天然白桦林生态系统碳储量的影响. 林业科学研究, 28, 618–626.]
- Li WY, Man XL, Zhang YW (2009). Soil properties and water conservation function of *Betula platyphylla* secondary forest with different stand ages. *Science of Soil and Water Conservation*, 7(5), 63–69. [李文影, 满秀玲, 张阳武 (2009). 不同林龄白桦次生林土壤特性及其水源涵养功能. 中国水土保持科学, 7(5), 63–69.]
- Li XD, Yi MJ, Son Y, Park PS, Lee KH, Son YM, Kim RH, Jeong MJ (2011). Biomass and carbon storage in an age-sequence of Korean pine (*Pinus koraiensis*) plantation forests in central Korea. *Journal of Plant Biology*, 54, 33–42.
- Liu LX, Wang J, Yang XJ, Liu CZ, Wang XW (2018). Forest plant community and soil organic carbon density in Da Xing'an Mountains. *Ecology and Environmental Sciences*, 27, 1610–1616. [刘林馨, 王健, 杨晓杰, 刘传照, 王秀文 (2018). 大兴安岭不同森林群落植被多样性对土壤有机碳密度的影响. 生态环境学报, 27, 1610–1616.]
- Liu SN, Zhou T, Wei LY, Shu Y (2012). The spatial distribution of forest carbon sinks and sources in China. *Chinese Science Bulletin*, 57, 943–950, 987. [刘双娜, 周涛, 魏林艳, 舒阳 (2012). 中国森林植被的碳汇/源空间分布格局. 科学通报, 57, 943–950, 987.]
- Liu X, Man XL, Tian YH (2015). Hydro-chemical and nutrient importing characteristics of precipitation in secondary *Betula platyphylla* forests in northern Great Xing'an Mountains, northeastern China. *Journal of Beijing Forestry University*, 37(8), 83–89. [刘茜, 满秀玲, 田野宏 (2015). 白桦次生林降雨水化学及养分输入特征. 北京

- 林业大学学报, 37(8), 83–89.]
- Lu BQ, Zang SY, Sun L (2019). The effects of freezing-thawing process on soil active organic carbon and nitrogen mineralization in Daxing'anling Mountain forests. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 39, 1664–1672. [鲁博权, 臧淑英, 孙丽 (2019). 冻融作用对大兴安岭典型森林土壤活性有机碳和氮矿化的影响. 环境科学学报, 39, 1664–1672.]
- Lü CQ, Sun SC (2004). A review on the distribution patterns of carbon density in terrestrial ecosystems. *Acta Phytocologica Sinica*, 28, 692–703. [吕超群, 孙书存 (2004). 陆地生态系统碳密度格局研究概述. 植物生态学报, 28, 692–703.]
- Ma FF, Zhang CM, Li YZ (2016). Density and distribution of organic carbon of *Larix kaempferi* plantation ecosystem in Subtropics. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 36(1), 94–100. [马丰丰, 张灿明, 李有志 (2016). 亚热带日本落叶松人工林生态系统碳密度及其分配特征. 中南林业科技大学学报, 36(1), 94–100.]
- Ma L (2012). *Xiaoxing'anling Birch Natural Forest Ecosystem Carbon Storage Research*. Master degree dissertation, Northeast Forestry University, Harbin. [马林 (2012). 小兴安岭白桦天然林生态系统碳储量的研究. 硕士学位论文, 东北林业大学, 哈尔滨.]
- Ming AG, Jia HY, Tian ZW, Tao Y, Lu LH, Cai DX, Shi ZM, Wang WX (2014). Characteristics of carbon storage and its allocation in *Erythrophloeum fordii* plantations with different ages. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 25, 940–946. [明安刚, 贾宏炎, 田祖为, 陶怡, 卢立华, 蔡道雄, 史作民, 王卫霞 (2014). 不同林龄格木人工林碳储量及其分配特征. 应用生态学报, 25, 940–946.]
- Pan YD, Birdsey RA, Fang JY, Houghton R, Kauppi PE, Kurz WA, Phillips OL, Shvidenko A, Lewis SL, Canadell JG, Ciais P, Jackson RB, Pacala SW, David McGuire A, Piao SL, Rautiainen A, Sitch S, Hayes D (2011). A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 333, 988–993.
- Pregitzer KS, Euskirchen ES (2004). Carbon cycling and storage in world forests: Biome patterns related to forest age. *Global Change Biology*, 10, 2052–2077.
- Qi G, Wang QL, Wang XC, Qi L, Wang QW, Ye YJ, Dai LM (2011). Vegetation carbon storage in *Larix gmelinii* plantations in Great Xing'an Mountains. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 22, 273–279. [齐光, 王庆礼, 王新闻, 齐麟, 王庆伟, 叶雨静, 代力民 (2011). 大兴安岭林区兴安落叶松人工林植被碳储量. 应用生态学报, 22, 273–279.]
- Raich JW, Russell AE, Kitayama K, Parton WJ, Vitousek PM (2006). Temperature influences carbon accumulation in moist tropical forests. *Ecology*, 87, 76–87.
- Shu Y, Zhou M, Zhao PW, Zeng N, Shi L, Wang ZX, Wang D, Ge P, Zhang B (2016). Carbon storage and its distribution characteristics in the planted forest of *Larix principis* in southern Daxinganling. *Ecology and Environmental Sciences*, 25, 1604–1611. [舒洋, 周梅, 赵鹏武, 曾楠, 石亮, 王梓璇, 王鼎, 葛鹏, 张波 (2016). 大兴安岭南段华北落叶松人工林碳储量及分配特征研究. 生态环境学报, 25, 1604–1611.]
- van Huysen TL, Perakis SS, Harmon ME (2016). Decomposition drives convergence of forest litter nutrient stoichiometry following phosphorus addition. *Plant and Soil*, 406, 1–14.
- Wang Z, Liu GB, Xu MX, Zhang J, Wang Y, Tang L (2012). Temporal and spatial variations in soil organic carbon sequestration following revegetation in the hilly Loess Plateau, China. *Catena*, 99, 26–33.
- Wu XR, Zhang JB, Tian Y, Li P (2014). Provincial agricultural carbon emissions in China: Calculation, performance change and influencing factors. *Resources Science*, 36, 129–138. [吴贤荣, 张俊飏, 田云, 李鹏 (2014). 中国省域农业碳排放: 测算、效率变动及影响因素研究——基于DEA-Malmquist指数分解方法与Tobit模型运用. 资源科学, 36, 129–138.]
- Xiang YX, Chen SK, Pan P, Ouyang XZ, Ning JK, Li Q (2019). Stoichiometric traits of C, N and P of leaf-litter-soil system of *Pinus massoniana* forest. *Journal of Forest and Environment*, 39(2), 120–126. [向云西, 陈胜魁, 潘萍, 欧阳勋志, 宁金魁, 李琦 (2019). 马尾松叶片-凋落物-土壤的碳氮磷化学计量特征. 森林与环境学报, 39(2), 120–126.]
- Xie XL, Sun B, Zhou HZ, Li ZP (2004). Soil carbon stocks and their influencing factors under native vegetations in China. *Acta Pedologica Sinica*, 41, 687–699. [解宪丽, 孙波, 周慧珍, 李忠佩 (2004). 不同植被下中国土壤有机碳的储量与影响因子. 土壤学报, 41, 687–699.]
- Yang LL, Wang YH, Wen SZ, Liu YH, Du M, Hao J, Li ZH (2015). Carbon and nitrogen storage and distribution in four forest ecosystems in Liupan Mountains, northwestern China. *Acta Ecologica Sinica*, 35, 5215–5227. [杨丽丽, 王彦辉, 文仕知, 刘延惠, 杜敏, 郝佳, 李振华 (2015). 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, 35, 5215–5227.]
- Zhang Y (2015). *Effect of Site Types on Carbon Storage of Natural White Birch Forest Ecosystem in Xiaoxing'an Mountains of China*. Master degree dissertation, Northeast Forestry University, Harbin. [张毅 (2015). 立地类型对小兴安岭天然白桦次生林生态系统碳储量的影响. 硕士学位论文, 东北林业大学, 哈尔滨.]
- Zhang Y, Mu CC, Zheng T, Li NN (2015). Ecosystem carbon storage of natural secondary birch forests in Xiaoxing'an Mountains of China. *Journal of Beijing Forestry University*, 37, 38–47. [张毅, 牟长城, 郑瞳, 李娜娜 (2015). 小兴安岭天然白桦林生态系统碳储量. 北京林业大学学报, 37, 38–47.]

- Zhang ZJ, Zhang XQ, Wang YH, Luo YJ, Li ZY, Cao L (2009). Carbon storage and distribution of *Pinus massoniana* forest ecosystem in Tieshanping of Chongqing. *Scientia Silvae Sinicae*, 45(5), 49–53. [张治军, 张小全, 王彦辉, 罗云建, 李志勇, 曹磊 (2009). 重庆铁山坪马尾松林生态系统碳贮量及其分配特征. 林业科学, 45(5), 49–53.]
- Zheng T, Mu CC, Zhang Y, Li NN (2016). Effects of site condition on ecosystem carbon storage in a natural *Betula platyphylla* forest in the Zhangguangcai Mountains, China. *Acta Ecologica Sinica*, 36, 6284–6294. [郑瞳, 牟长城, 张毅, 李娜娜 (2016). 立地类型对张广才岭天然白桦林生态系统碳储量的影响. 生态学报, 36, 6284–6294.]
- Zhou XL, Cai Q, Xiong XY, Fang WJ, Zhu JX, Zhu JL, Fang JY, Ji CJ (2018). Ecosystem carbon stock and within-system distribution in successional *Fagus lucida* forests in Mt. Yueliang, Guizhou, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 42, 703–712. [周序力, 蔡琼, 熊心雨, 方文静, 朱剑霄, 朱江玲, 方精云, 吉成均 (2018). 贵州月亮山不同演替阶段亮叶水青冈林碳储量及其分配格局. 植物生态学报, 42, 703–712.]
- Zhou Y, Hartemink AE, Shi Z, Liang ZZ, Lu YL (2019). Land use and climate change effects on soil organic carbon in North and Northeast China. *Science of the Total Environment*, 647, 1230–1238.
- Zhu JX, Hu HF, Tao SL, Chi XL, Li P, Jiang L, Ji CJ, Zhu JL, Tang ZY, Pan YD, Birdsey RA, He XH, Fang JY (2017a). Carbon stocks and changes of dead organic matter in China's forests. *Nature Communications*, 8, 151–160.
- Zhu JX, Zhou XL, Fang WJ, Xiong XY, Zhu B, Ji CJ, Fang JY (2017b). Plant debris and its contribution to ecosystem carbon storage in successional *Larix gmelinii* forests in northeastern China. *Forests*, 8, 191–200.

特邀编委: 代力民 责任编辑: 李 敏 实习编辑: 赵 航