

天山北坡中段雪岭云杉人工林碳汇随林龄的动态变化*

马媛^{1,2}, 常顺利^{1,2†}, 王冠正^{1,2}, 张毓涛^{2,3}, 孙雪娇^{2,3}, 李吉玫^{2,3}

(1. 新疆大学生态与环境学院 绿洲生态教育部重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830017; 2. 新疆天山森林生态系统国家定位观测研究站, 新疆 乌鲁木齐 830063; 3. 新疆林业科学院 森林生态研究所, 新疆 乌鲁木齐 830063)

摘要: 人工林是森林固碳增汇的重要组成部分, 其碳汇动态随林龄的增长存在较大差异。以天山林区广泛分布的单一人工林雪岭云杉(*Picea schrenkiana*)为研究对象, 选取未抚育的各龄级人工林样地并以无林地作为对照, 通过样地调查与取样, 计算植被地上、植被地下、枯落物和土壤碳密度, 采用空间代替时间的方法量化了人工林碳汇量和造林后固碳量特征随林龄的变化规律。结果表明: 1) 不同龄组雪岭云杉人工林植被地上碳密度为1.82~119.34 t·hm⁻², 植被地下碳密度为1.26~27.77 t·hm⁻², 树干累积了植被46.4%~62.0%的碳, 随林龄增加, 碳密度(造林固碳量)呈现明显的异速增长, 碳汇量则表现为先升高后降低的趋势。2) 凋落物碳密度介于0.42~1.74 t·hm⁻²之间, 碳汇量在各龄组间差异不大, 发挥了0.23~0.42 t·hm⁻²·10 a的碳汇功能, 造林后固碳量随林龄成线性增长趋势。3) 造林前期, 土壤深层碳密度显著增大; 造林后期, 表层土壤碳在凋落物分解输入作用下逐渐累积, 显著大于10~60 cm; 造林能够有效提高土壤碳汇, 平均碳汇量达51.66 t·hm⁻²·10 a; 造林后土壤固碳量与无林地相比提升较明显, 21~30 a林龄时达最大值101.83 t·hm⁻², 固碳量随林龄表现为先增后降的二项式分布。4) 雪岭云杉人工林总碳汇呈非匀速增长趋势, 其中60 a人工林碳汇潜力较高, 总碳汇累积量可达488.60 t·hm⁻²; 雪岭云杉人工林植被地上部和地下部碳汇在生态系统总碳汇的占比不断增加, 由10~20 a林龄的4.6%增加至51~60 a林龄的67.7%, 同时土壤碳汇在生态系统总碳汇的占比不断降低。

关键词: 人工林; 林龄; 碳密度; 碳汇; 云杉森林

DOI: 10.13568/j.cnki.651094.651316.2023.04.24.0003

中图分类号: S714.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-7675(2024)01-0110-011

引文格式: 马媛, 常顺利, 王冠正, 张毓涛, 孙雪娇, 李吉玫. 天山北坡中段雪岭云杉人工林碳汇随林龄的动态变化[J]. 新疆大学学报(自然科学版)(中英文), 2024, 41(1): 110-120.

英文引文格式: MA Yuan, CHANG Shunli, WANG Guanzheng, ZHANG Yutao, SUN Xuejiao, LI Jimei. Dynamic changes of carbon sink of *Picea schrenkiana* plantation with forest age in middle section of northern slope of Tianshan mountains[J]. Journal of Xinjiang University(Natural Science Edition in Chinese and English), 2024, 41(1): 110-120.

Dynamic Changes of Carbon Sink of *Picea schrenkiana* Plantation with Forest Age in Middle Section of Northern Slope of Tianshan Mountains

MA Yuan^{1,2}, CHANG Shunli^{1,2}, WANG Guanzheng^{1,2}, ZHANG Yutao^{2,3},
SUN Xuejiao^{2,3}, LI Jimei^{2,3}

(1. Key Laboratory of Oasis Ecology under the Ministry of Education, School of Ecology and Environment, Xinjiang University, Urumqi Xinjiang 830017, China; 2. Tianshan Forest Ecosystem National Station, Urumqi Xinjiang 830063, China; 3. Institute of Forest Ecology, Xinjiang Academy of Forestry, Urumqi Xinjiang 830063, China)

Abstract: Artificial forest is an important component of forest carbon sequestration and sink enhancement, and its carbon dynamics are quite different with the increase of forest age. Taking *Picea schrenkiana*, a single plantation widely distributed in Tianshan forest area, as the research object, the untended plantation sample plots of different

* 收稿日期: 2023-04-24

基金项目: 新疆维吾尔自治区自然科学基金“基于三库转移模型的不同水热条件下天山北坡森林土壤有机碳分解特征研究”(2022D01B174); 2023年新疆林业发展补助资金项目“2023年新疆天山森林生态系统国家定位观测研究站运行补助项目”; 新疆林业生态基础类项目“生态树种新品种选育与生态修复关键技术研究”(XJLYKJ-2021-20)。

作者简介: 马媛(1997—), 女, 硕士生, 从事森林生态学的研究, E-mail: 2927273695@qq.com.

† 通讯作者: 常顺利(1975—), 男, 博士, 副教授, 主要从事森林生态学的研究, E-mail: ecocsl@163.com.

ages and no forest land as the control were selected. Through the investigation and sampling of sample plots, the carbon density of vegetation above ground, vegetation under ground, litter and soil were calculated, and the variation law of carbon sink and carbon sequestration after afforestation with forest age were quantified by using the method of replacing time with space. The results showed that: 1) The above ground carbon density of different age groups was $1.82\sim 119.34\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ and the under ground carbon density was $1.26\sim 27.77\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$. The trunk accumulated 46.4%~62.0% of the vegetation carbon. The carbon density (carbon sequestration) increased at different speeds with the increase of forest age, while the carbon sink increased at first and then decreased. 2) The carbon density of litter ranged from $0.42\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ to $1.74\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, and the carbon sequestration of litter played a role of $0.23\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot 10\text{ a}$ to $0.42\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot 10\text{ a}$. 3) In the early stage of afforestation, the carbon density in deep soil was significantly higher; At the later stage of afforestation, the carbon in topsoil gradually accumulated under the action of litter decomposition input, which was significantly greater than 10~60 cm; Afforestation can effectively improve soil carbon sink, the average amount of carbon sink reached $51.66\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot 10\text{ a}$; Compared with no forest land, the amount of carbon sequestration increased obviously after afforestation, and reached the maximum value of $101.83\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ at 21~30 a of forest age, and the amount of carbon sequestration increased first and then decreased binomial with forest age. 4) The total carbon sequestration of plantation showed a non-uniform growth trend, in which the carbon sequestration potential of 60 a plantation was high, and the total carbon sequestration accumulation could reach $488.60\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, the proportion of above ground and under ground carbon sinks in the total carbon sinks of the ecosystem of plantation increased from 4.6% in 10~20 a to 67.7% in 51~60 a, while the proportion of soil carbon sinks in the total carbon sinks of the ecosystem decreased continuously.

Key words: plantation forests; forest age; carbon density; carbon sink; spruce forest

0 引言

通过造林、再造林以及森林经营来增加陆地生态系统固碳量和碳汇潜力,是减缓气候变暖和实现碳中和的重要措施^[1-2].第九次全国森林资源清查结果显示,我国人工林总面积为7 954.28万公顷,蓄积量为33.88亿立方米^[3],是世界上人工林面积最大的国家,其发挥的碳汇功能是我国林业碳汇的重要组成部分,在实现我国“双碳”目标过程中具有关键的支撑作用.

近年来,国内外学者在基于国家、区域及生态系统等尺度上积累了大量关于森林碳储量和碳汇功能的研究成果^[4-6],这些研究涵盖了不同气候条件下多种森林类型的固碳现状及其动态变化,对于准确评价我国森林碳库在全球碳循环和碳平衡中的地位起到了推动作用.但这些研究多集中于天然林,关于人工林,尤其是干旱-半干旱地区人工林生态系统碳汇特征的研究较少,并且缺乏对人工林造林后产生的固碳量的系统评价.目前,亟需对人工林生态系统碳汇特征进行精准计量,深入开展人工林生长发育过程中生态系统碳源汇动态变化、分配规律及其影响机制研究.

人工林生态系统碳密度主要由植被地上、植被地下、凋落物、枯死木和土壤碳密度组成^[5,7],其碳汇量可用一定时间内森林碳密度变化量之和来表示^[8],主要受气候、造林物种立地条件和林分年龄等因素的显著影响^[9-10].一般认为,造林年限是人工林碳汇功能的主要影响因素,例如黄土丘陵区刺槐和油松人工林碳汇功能随林龄增加呈先升后降的变化^[11];而广西地区不同林龄软阔林生态系统碳储量随林龄的增长总体持续增加,但硬阔林总碳储量却随林龄增长呈先降后升趋势^[12-13].表明造林对碳汇的提升作用随林龄的变化趋势由于区域特征、林分类型和造林方式等而具有不确定性.

中国新疆地处干旱-半干旱区,天山森林在全疆碳平衡中发挥着重要作用,雪岭云杉是天山森林的单优树种,也是天山林区最主要的造林树种,根据第九次森林资源清查数据,雪岭云杉人工林面积达1.32万公顷,但目前关于雪岭云杉人工林的碳汇作用分析研究还未见报道.因此,本文以天山北坡中段雪岭云杉人工林为研究对象,结合雪岭云杉异速生长方程及土壤碳含量实测数据,通过建立人工林碳密度、碳汇量和造林后固碳量的时间序列,主要解决以下问题:1)明确雪岭云杉人工林不同组分碳汇特征;2)揭示雪岭云杉人工林碳汇特征随林龄的动态变化趋势;3)构建人工林林龄与造林后固碳量的函数关系,量化雪岭云杉人工造林发挥的固碳功能大小及动态过程.以期为森林碳汇精准化计量和提高森林经营管理水平提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本文依托中国森林生态系统研究网络天山森林生态系统国家定位观测研究站($43^{\circ}14'\sim 43^{\circ}26'\text{ N}$, $87^{\circ}07'\sim$

87°28'E)开展工作,该地位于天山北坡中段乌鲁木齐板房沟林场,属大陆温带气候,最大积雪深度为65 cm,年总辐射约为 $5.85 \times 10^5 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$. 年均气温 $2 \sim 7 \text{ }^\circ\text{C}$,年降水量400~800 mm,年蒸发量达1 100~2 100 mm. 林下土壤类型为山地灰褐色森林土.

1.2 各龄组样地的选取

结合林场经营档案以及树木生长锥确定人工林造林年限. 按照每10 a一个龄级,将雪岭云杉人工林划分为10~20、21~30、31~40、41~50、51~60 a五个龄组. 每个林龄组布设3块20 m×20 m的调查样地. 所选样地造林方式均为8~10 a实生苗植苗造林,郁闭度处于0.7~0.9之间,林分密度约每公顷2 500~3 500株. 同时,在每个龄组样地周边选取立地条件与该龄组人工林样地相对一致的无林地,设3块20 m×20 m样地作为造林前的对照.

对样地的海拔和经纬度等基本信息进行调查,以胸径尺、测高仪和卷尺调查样地内所有雪岭云杉的胸径、树高、冠幅和生长状态,以对角线望高法测定样地的郁闭度.

1.3 样品采集与测试方法

凋落物生物量:采用全收获法测定,在每个样地内按品字形设置5个1 m×1 m小样方,收集样方内所有凋落物并混合称鲜质量,取其混合样品约300 g,置于80 °C烘箱烘干至恒重,利用样品鲜质量、样品烘干质量及样方鲜样总质量换算样地凋落物总生物量.

土壤有机碳含量:每个样地内设置3个土壤取样点,除去土壤表层凋落物及杂质后,每个采样点按0~10、10~20、20~40、40~60、60~100 cm将土壤剖面分为五层,每层用环刀法测定土壤容重,同一样方内的土样同层均匀混合. 将每个样方内各采样点的土样剔除植物、昆虫等残体,压碎,使之自然风干,利用四分法取样磨细并过筛,以重铬酸钾氧化-外加热法测定风干样品中土壤总有机碳含量(Soil Organic Carbon, SOC).

1.4 碳密度、碳汇与造林后固碳量的计算

1.4.1 碳密度

1) 植被地上和地下碳密度

雪岭云杉生物量的估算采用兰洁等^[14]在该研究区建立的生物量方程(表1),此方程符合该区雪岭云杉生长特点,可较准确地估算雪岭云杉生物量. 雪岭云杉各器官含碳率参考许文强等^[15]在天山北坡森林的研究成果. 由于雪岭云杉人工林无林下灌木、且枯死木和草本很少,在此部分不考虑灌木和草本的碳密度,并将枯死木碳密度加入植被地上和地下碳密度一起计算.

表 1 雪岭云杉各器官生物量方程^[14]

| 树木器官 | 异速生长方程 | 拟合优度 | 含碳率 |
|------|------------------------------------|------|--------|
| 树叶 | $W_L = 0.035 8D^{0.229} H^{1.881}$ | 0.80 | 48.69% |
| 树枝 | $W_B = 0.004 9D^{0.252} H^{2.736}$ | 0.83 | 46.57% |
| 树根 | $W_R = 0.100 6(D^2 H)^{0.697}$ | 0.91 | 46.87% |
| 树干 | $W_S = 0.088 5D^{0.625} H^{1.938}$ | 0.96 | 46.56% |

注: W 为植被地上和地下器官生物量(kg), D 为单株乔木胸径(cm), H 为单株乔木高度(m)

以枝、干、叶单位面积生物量与含碳率的乘积之和计算植被地上碳密度(VACD):

$$VACD = \sum_{i=1}^n W_i \times VC_i \quad (1)$$

式中: $VACD$ 为植被地上碳密度($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$), W_i 为雪岭云杉枝、干、叶单位面积生物量($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$), VC_i 为各器官含碳率(%).

以树根单位面积生物量与含碳率的乘积计算植被地下碳密度(VBCD):

$$VBCD = W_r \times VC_r \quad (2)$$

式中: $VBCD$ 为植被地下碳密度($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$), W_r 为雪岭云杉树根单位面积生物量($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$), VC_r 为树根含碳率(%).

2) 土壤有机碳密度

土壤有机碳密度(SOCD)计算公式为:

$$SOCD = \sum_{i=1}^n C_i B D_i D_i (1 - R_i) \times 10^{-1} \quad (3)$$

式中: C_i 为第*i*层土壤有机碳含量 ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$), $B D_i$ 为该层土壤平均容重 ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$), D_i 为该层土壤厚度 (cm), R_i 为直径大于2 mm的石砾所占百分比 (%), 10^{-1} 为单位转换系数.

3) 凋落物碳密度

以凋落物单位面积生物量和含碳率计算凋落物层碳密度 (LCD):

$$LCD = W_l \times V C_l \quad (4)$$

式中: LCD 为凋落物层碳密度 ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$), W_l 为凋落物层单位面积生物量 ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$), $V C_l$ 为凋落物层含碳率 (%). 含碳率参考许文强等^[15]的研究成果, 为42.14%.

4) 总碳密度

总碳密度 (TCD) = 植被地上碳密度 ($VACD$) + 植被地下碳密度 ($VBCD$) + 凋落物碳密度 (LCD) + 土壤碳密度 ($SOCD$).

1.4.2 造林后固碳量

通过造林后的碳密度减去造林前(无林地)的碳密度来计算造林后产生的固碳量大小:

$$\Delta TCD = TCD - TCD_{ck} \quad (5)$$

式中: ΔTCD 代表造林后固碳量 ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$); TCD_{ck} 代表造林前(无林地)的碳密度 ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$), 其中造林前植被地上、地下和凋落物层碳密度为0.

1.4.3 碳汇量

本文定义人工林随林龄增长的碳汇为人工林生态系统总碳密度在单位时间上的变化量, 即两个林龄人工林造林后碳密度之差, 为这两个林龄人工林在生长年限(林龄差)的碳汇量:

$$\Delta CS = \frac{TCD_{T_2} - TCD_{T_1}}{\Delta T} \quad (6)$$

式中: ΔCS 为碳汇 ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot 10 \text{ a}$), TCD_{T_2} 为 T_2 时刻生态系统总碳密度 ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$), TCD_{T_1} 为 T_1 时刻生态系统总碳密度 ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$), ΔT 表示 T_2 时刻与 T_1 时刻的时间间隔, 单位为10 a.

1.5 数据处理与分析方法

采用Microsoft Excel 2016对数据进行整理和统计, 并利用Microsoft Excel 2016和Origin pro 2020绘制相关图表, 利用单因素方差分析中的Duncan多重比较方法探讨差异性显著分析, 图表中数据均为“平均值±标准误”; 应用非线性回归法, 对造林后固碳量与林龄进行拟合, 通过判定系数 (R^2)、标准误差 (SE) 的大小及回归检验显著水平来选取最优回归模型.

2 结果分析

2.1 雪岭云杉人工林地上部和地下部碳汇随林龄的动态变化

植被地上和地下碳密度、碳汇量和造林后固碳量如表2和图1所示, 随着林龄增加, 植被地上干、枝、叶的碳密度均显著增加 ($P < 0.05$), 地上碳密度从 $1.82 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 显著增长到 $119.34 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ($P < 0.05$), 树干部分占地上部碳密度比例最大, 为75.4%~78.9%, 具有绝对优势; 分布在叶、枝当中的碳密度仅为5.5%~18.7%. 地上碳汇量随林龄表现为先快速增加又减小的趋势, 31~40 a的碳汇量最大, 达 $73.25 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot 10 \text{ a}$. 10~20、21~30 a的地上碳汇量仅为 $1.82 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot 10 \text{ a}$ 、 $0.45 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot 10 \text{ a}$. 地上部分造林后的碳汇量与林龄表现出显著的线性函数关系, 随林龄升高, 造林后固碳量逐渐上升, 函数关系式为: $y = 3.285 2x - 56.043$.

植被地下碳密度从10~20 a的 $1.26 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 快速增长至51~60 a的 $27.77 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ($P < 0.05$), 增长了21倍. 地下碳汇量随林龄变化趋势与地上碳汇量相同, 表现为先上升至31~40 a ($20.17 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot 10 \text{ a}$) 达到最大后又下降的趋势. 造林后植被地下固碳量随林龄增加呈指数上升, 与林龄的函数关系式为: $y = 0.280 6e^{0.092x}$.

表 2 不同林龄雪岭云杉人工林植被地上和地下部分碳密度和碳汇量特征

| 林龄/a | 地上部 | | | | 碳汇量 (10 a) | 地下部 | |
|-------|-------------|-------------|--------------|--------------|------------|-------------|------------|
| | 树叶 | 树枝 | 树干 | 小计 | | 树根 | 碳汇量 (10 a) |
| 10~20 | 0.27±0.21b | 0.12±0.10b | 1.43±1.17b | 1.82±1.48 | 1.82 | 1.26±1.01b | 1.26 |
| 21~30 | 0.39±0.11b | 0.16±0.05b | 1.72±0.50b | 2.27±0.66 | 0.45 | 1.27±0.25b | 0.01 |
| 31~40 | 8.23±3.01a | 9.23±4.01ab | 58.06±23.55a | 75.52±30.57 | 73.25 | 21.44±7.79a | 20.17 |
| 41~50 | 9.91±2.78a | 12.28±3.01a | 73.56±17.15a | 95.76±22.94 | 20.24 | 25.40±4.77a | 3.96 |
| 51~60 | 10.92±2.24a | 17.24±4.38a | 91.18±17.84a | 119.34±24.46 | 23.58 | 27.77±2.81a | 2.37 |

注: 同列不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$), 下同

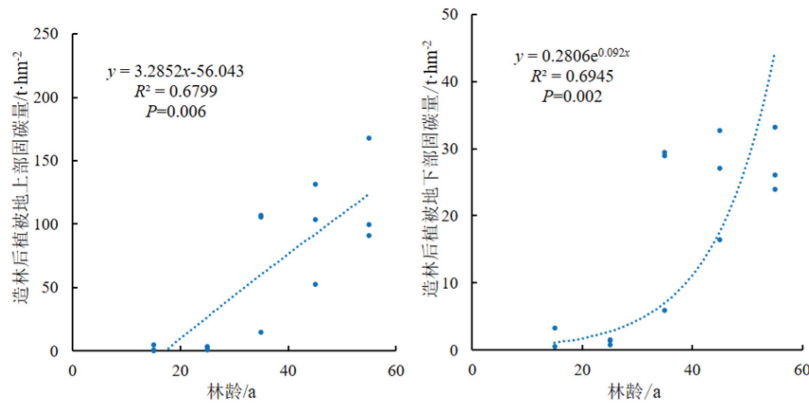


图 1 植被地上部和地下部造林后固碳量随林龄的变化趋势

2.2 雪岭云杉人工林凋落物碳汇随林龄的动态变化

不同林龄雪岭云杉人工林凋落物碳密度、碳汇量和造林后固碳量特征如图2至图4所示, 随林龄逐渐增加, 从10~20 a的 $0.42 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 显著增加至51~60 a的 $1.74 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ($P < 0.05$), 增长率达314.3%。凋落物层碳汇量在造林后快速累积, 10~20 a的碳汇量达 $0.42 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot 10 \text{ a}$, 后降低至21~30 a的 $0.29 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot 10 \text{ a}$, 随着林龄增加逐渐增长, 至41~50 a达到最大 ($0.41 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot 10 \text{ a}$), 51~60 a的碳汇量又有所降低。凋落物层造林后固碳量与林龄呈显著的线性函数关系, 随林龄升高固碳量不断上升, 最优拟合方程为: $y = 0.0344x - 0.1044$ 。

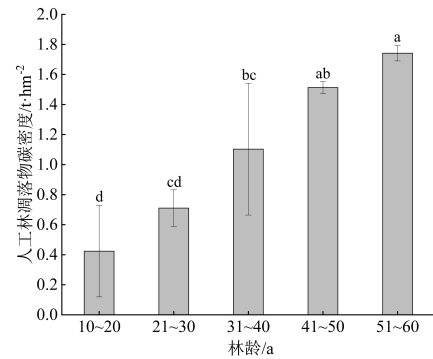


图 2 不同林龄雪岭云杉人工林的凋落物层碳密度特征

注: 不同小写字母表示不同林龄间差异显著 ($P < 0.05$)

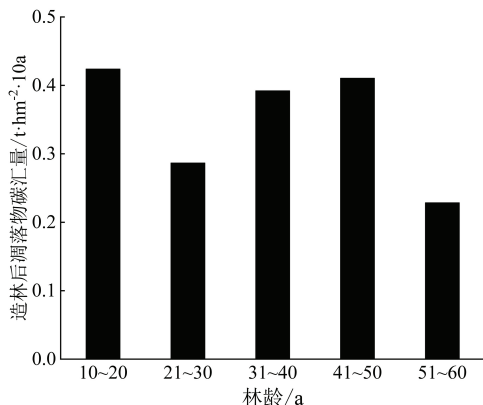


图 3 不同林龄雪岭云杉人工林的凋落物层碳汇量特征

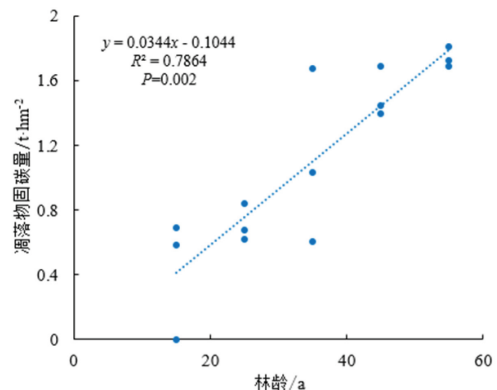


图 4 造林后凋落物层固碳量随林龄的变化趋势

2.3 雪岭云杉人工林土壤碳汇随林龄的动态变化

雪岭云杉人工林土壤层碳密度、碳汇量和造林后固碳量如图5至图7所示。随着林龄的增加,土壤碳密度表现为先升高后降低的变化趋势,土壤层有机碳密度从土层垂直剖面上来看,造林前期10~40 a随土层深度显著增加($P < 0.05$),深层60~100 cm土壤碳密度是表层0~10 cm的0.94~2.60倍。造林后期40~60 a,表层0~10 cm和深层60~100 cm显著大于其余土层($P < 0.05$)。不同林龄相同土层中,除表层土壤外,土壤有机碳密度总体表现为先升高至21~30 a达到最大后又显著降低的趋势($P < 0.05$)。0~10 cm表层土壤碳密度随林龄逐渐升高,至41~50 a显著升高后($P < 0.05$),51~60 a又有所降低($P < 0.05$)。土壤层碳汇量随林龄增加表现为先升高后降低的倒“V”字形趋势。

与无林地相比,各龄组人工林的土壤造林后固碳量均显著增加($P < 0.05$),土壤固碳量为造林地与无林地土壤碳密度差值,表明造林能够显著提高土壤碳密度。由图7可知,造林后天山雪岭云杉各龄组人工林的土壤固碳量平均增加至 $79.99 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,21~30 a土壤固碳量最大,10~20 a土壤固碳量较小。土壤层造林后固碳量随林龄呈先升高后降低的二项式分布,二者的最优拟合方程为: $y = -0.0747x^2 + 4.9495x + 13.249$ 。

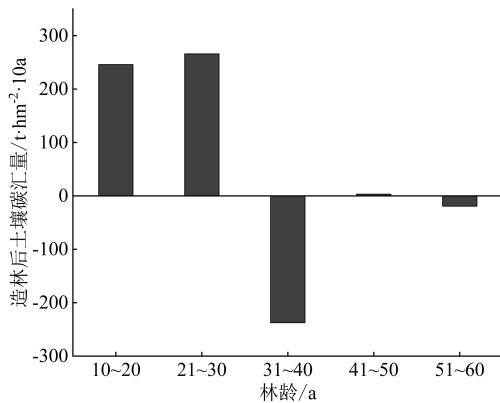


图6 不同林龄雪岭云杉人工林土壤层碳汇量特征

2.4 雪岭云杉人工林生态系统碳汇特征的动态变化

各龄组雪岭云杉人工林总碳密度、总碳汇量和造林后固碳量如图8至图10所示。随着林龄增加,雪岭云杉人工林生态系统碳密度随林龄表现为先显著升高又逐渐下降的变化趋势。碳汇峰值出现在21~30 a,该龄组碳汇量为 $266.65 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot 10 \text{ a}$; 低值出现在31~40 a,该龄组为负值,表现为碳源。

造林后雪岭云杉人工林生态系统固碳量与林龄表现出显著的二次函数关系,随林龄升高,造林后固碳量逐渐上升后趋于平缓,函数关系式为: $y = -0.0878x^2 + 9.9567x - 67.887$ 。林龄也改变了天山北坡中段雪岭云杉人工林生态系统固碳量各层组分贡献百分比(图10左图),30 a前以土壤固碳量为主(94.8%~96.0%),31~40 a植被层和土壤层二者占比接近平衡,41~60 a人工林生态系统主要表现为植被固碳(62.3%~67.7%),土壤层贡献率下降至31.5%。

3 讨论

3.1 雪岭云杉人工林植被地上和地下层碳汇的影响因素分析

天山北坡中段雪岭云杉人工林地上和地下碳密度随着林龄增长而增加,增速呈先慢后快再慢的趋势,此“S”型生长规律在其它人工林的研究中也普遍存在^[16-17]。原因在于雪岭云杉为慢生树种,其天然林在20 a以前为形成期,21~40 a为速生期^[18],而人工林在10~20 a至21~30 a过渡阶段生长较慢,这一时期由于植株个体较

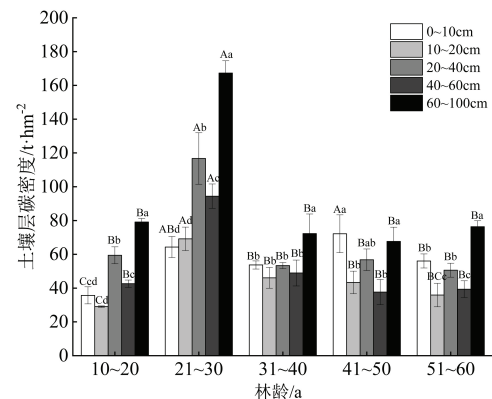


图5 雪岭云杉人工林土壤层不同林龄不同土层的碳密度特征

注:不同大写字母表示同一土层不同林龄间差异显著($P < 0.05$),不同小写字母表示同一林龄不同土层间差异显著($P < 0.05$)

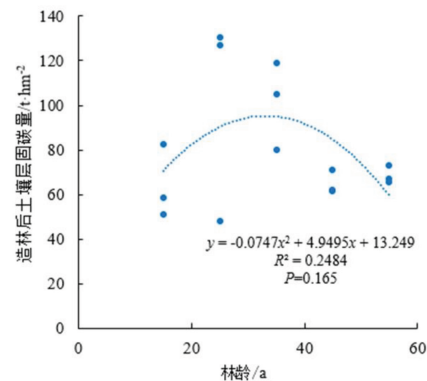


图7 雪岭云杉人工林土壤层造林后固碳量随林龄的变化趋势

小,林冠层叶表面积有限,能够进行光合作用的区域相对较少,导致林分的年生产力较低,年固碳量在 $0.18\sim 0.23\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 之间.为了在此阶段壮大个体并组建群落,需要林木建立具有增大林分并与外界进行物质和能量交换的功能器官,以制造更多的有机物质.因此在这个林龄阶段,枝叶的生物产量增加速率高于其它器官^[19],在31~40 a进入速生期.除了雪岭云杉本身的生长特性外,气候也可能是导致该过渡阶段生长较慢的原因,20世纪90年代为天山山区偏暖期,温度有较大幅度提升,平均温度上升约 $0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[20],导致土壤水分蒸散及植物蒸腾作用加强,加快了雪岭云杉水分散失和养分消耗,光合作用速率减弱,树木生长减缓^[21].

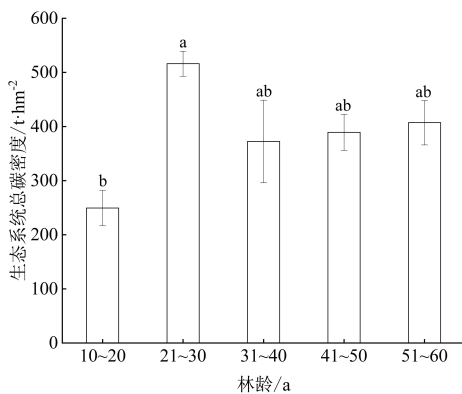


图 8 不同林龄雪岭云杉人工林碳密度特征

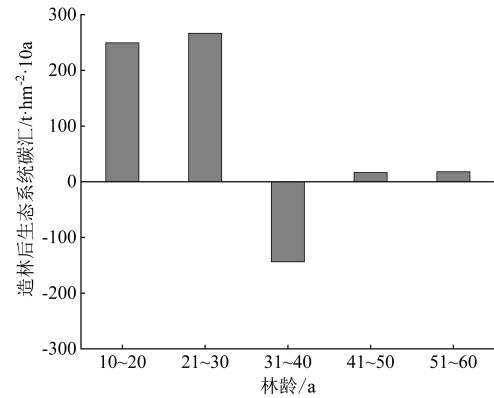


图 9 不同林龄雪岭云杉人工林碳汇量特征

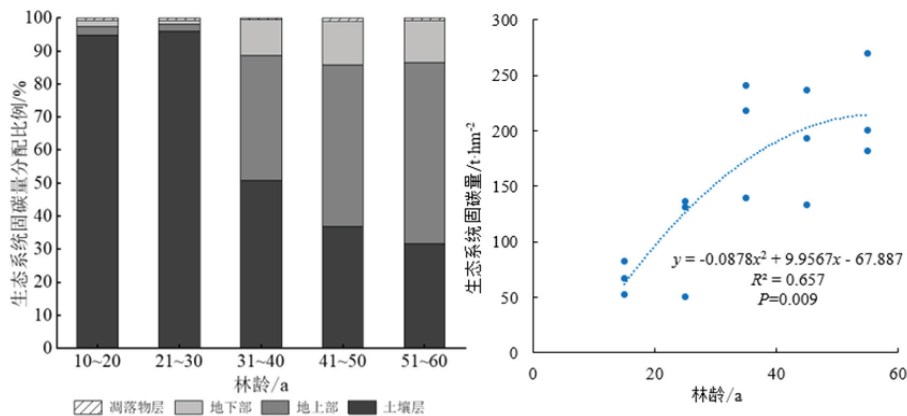


图 10 不同林龄雪岭云杉人工林造林后固碳量分配格局及其随林龄变化趋势

本文结果显示树根碳密度仅次于树干碳密度,这是因为雪岭云杉地处干旱-半干旱区,干旱胁迫导致植物发生不同程度生长缓慢、物候提前、地上/地下生物量分配比例改变、萎蔫或死亡加剧等诸多生长特性的变化,但干旱胁迫也会促进植物根系生长,通过改变根表面积、侧根数、根冠比等策略,调整地下生物量积累和分配,便于吸收水分^[22].本文发现天山北坡中段雪岭云杉人工林平均植被地上和地下碳密度为 $74.37\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,远高于我国森林植被平均碳密度($57.07\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)和西北地区植被碳密度($42.82\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)^[23],但低于全国云冷杉林植被平均碳密度($82.01\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)^[6].推测其原因:一方面是树种类型、气候条件等客观因素所致,雪岭云杉喜阴冷潮湿,但研究区夏季日照较强,降雨量稀少,且存在季节性冻融现象,使得雪岭云杉人工林生长速度相对较慢^[24];另一方面是研究区雪岭云杉人工林未曾抚育,因自疏和干扰等因素导致同龄人工林林分密度存在差异,树木生长受限于树冠和茎的大小以及光合作用空间^[25].

3.2 雪岭云杉人工林凋落物层和土壤层碳汇的影响因素分析

雪岭云杉人工林内,凋落物自身储存少量的碳,占比不到总固碳量的1%,但其覆盖于地面能有效减少土壤的碳流失,是土壤碳和植物碳的重要连接库^[26].有较高的生物量或凋落物并不意味着有较高的土壤有机碳储量,凋落物分解过程中产物去向决定了土壤有机碳的赋存状态,高质量的凋落物分解产物向土壤转移的比例更高^[27].林龄变化对人工林生态系统群落结构、物种丰富度、生物量累积以及碳的分配会产生巨大影响,进而影

响森林生态系统土壤碳库变化及碳吸存能力^[28]。0~20 cm的土层深度土壤碳密度最高,主要是因为土壤有机碳的主要来源为土壤有机质,土壤表层有机质的积累在很大程度上依靠土壤表层凋落物的分解,且雪岭云杉的根系在土层中呈平铺式伸展、分布较浅,死亡根系及其分泌物的补充主要发生在表层,使表层有机碳持续积累,而地表植物残体不能被土壤中下层直接吸收,主要依赖上层的淋溶下移和地下部分植物残体分解^[29]。

人工林土壤碳汇与造林时间通常情况下呈非线性变化^[30],本文结果显示雪岭云杉人工林土壤碳汇随着造林时间增加呈先增加后降低的趋势,这与Ahmad等^[31]对我国西北落叶松人工林土壤碳库的研究结果相似。不同林龄雪岭云杉人工林平均土壤固碳量为 $79.99 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,造林后土壤固碳量与无林地相比提升较明显。这是因为雪岭云杉林冠对降水截流作用较强,林地削弱了地表径流,且侵蚀量远小于无林地,具有较好的水土保持作用^[32]。其中21~30 a雪岭云杉人工林在0~20 cm土层土壤固碳量为负值,这可能是该林龄人工林在草地上造林所致。有学者指出土地利用方式的改变会影响土壤碳汇^[33],在土壤碳密度较低的荒地、耕地上造林,土壤表现为净固碳;而在土壤碳密度较高的天然林、草地上造林,前期易造成土壤有机碳净损失^[34],这是因为较高的土壤有机碳密度会加速土壤有机碳矿化,造林后前期又因森林冠层、腐殖质覆盖的干扰和土壤结构的破坏导致土壤出现明显的碳损失^[35-36]。此外,造林过程中对土壤的人为扰动也会提高土壤温度,增强微生物活性,加速土壤有机质矿化^[37]。Hong等^[38]的研究也表明土壤有机碳的积累速率取决于本底土壤碳密度。

3.3 不同类型人工林碳汇的分析比较

估算人工林生态系统碳汇是预测人工林碳动态长期变化的基础,本文发现雪岭云杉人工林生态系统平均碳汇为 $81.43 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot 10 \text{ a}$,高于相关学者对黄土丘陵区油松($67.23 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot 10 \text{ a}$)^[39]、南亚热带红锥($52.33 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot 10 \text{ a}$)^[40]以及燕山华北落叶松($45.99 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot 10 \text{ a}$)^[41]等人工林的研究结果,同时也高于一些学者对川中桉-柏混交林($-2.94 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot 10 \text{ a}$)、侧柏($5.43 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot 10 \text{ a}$)^[42]和黄土高原刺槐($-7.55 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot 10 \text{ a}$)^[43]等人工林的研究结果,与我国这些类型人工林相比,雪岭云杉人工林碳汇能力相对较高,这可能与雪岭云杉树种自身生理特性以及本文选取的人工林林龄相对较大有关,以雪岭云杉为单优树种的森林占天山森林的90%^[44],表明天山北坡中段雪岭云杉人工林在我国西北及全国范围人工林中具有重要碳吸存能力。

人工林生态系统中31~40 a云杉表现为碳源,因为林分逐渐郁闭,林内光照强度减弱,土层温度下降,林木根系密度和土壤生物活性降低,凋落物分解速率变慢,土壤有机碳输入减少,致使人工林生态系统碳累积量增速减缓^[45],因此亟需对该林龄雪岭云杉人工林林分结构进行优化。其中抚育间伐和修枝是人工林经营过程中两种重要的营林措施,可增大林内透光率,增强太阳辐射,提高土壤温湿度,使树木光合作用加强以促进生长^[46-47],并且抚育过程中掉落的枯死枝叶,可与林下植被和凋落物进行协同作用,加速林地养分循环^[48-49]。本文依据“空间代替时间”的方法开展,虽能弥补采样点相同时间线样地数量不足的弊端,但在山地生态系统中仍存在空间异质性,对结果有一定的干扰,因此需对云杉人工林进行长期连续观测,以尽可能减少该类研究实验误差,并明确最适的人工抚育措施和抚育强度,这对提升云杉人工林林分稳定性和碳汇潜力具有重要意义。

4 结论

本文综合分析了天山北坡中段雪岭云杉人工林生态系统碳汇在林龄梯度上的变化规律和分配特征。雪岭云杉人工林植被地上和地下碳汇随着林龄增加而增大,树干碳汇为植被地上部的主体,造林前土地利用类型造成了一定程度的影响,土壤固碳贡献率随着林龄增加不断减弱,生态系统碳汇整体上随林龄增加而增加。在全球气候变化背景下,天山北坡中段雪岭云杉人工林具有可观的碳汇能力,加强人工抚育和管理是改善其碳汇功能的重要手段。

参考文献:

- [1] 张小全,李怒云,武曙红.中国实施清洁发展机制造林和再造林项目的可行性和潜力[J].林业科学,2005,41(5):139-143.
ZHANG X Q, LI N Y, WU S H. Analysis on feasibility and potentiality of afforestation and reforestation under the clean development mechanism of the kyoto protocol[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2005, 41(5): 139-143. (in Chinese)
- [2] 武曙红,张小全,李俊清.CDM造林或再造林项目的基线问题[J].林业科学,2006,42(4):112-116.
WU S H, ZHANG X Q, LI J Q. Baseline issues for forest-based carbon sink project on clean development mechanism (CDM)[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2006, 42(4): 112-116. (in Chinese)
- [3] 崔海鸥,刘珉.我国第九次森林资源清查中的资源动态研究[J].西部林业科学,2020,49(5):90-95.

- CUI H O, LIU M. Analysis on the results of the 9th national forest inventory[J]. Journal of West China Forestry Science, 2020, 49(5): 90-95. (in Chinese)
- [4] LIANG B Y, WANG J, ZHANG Z Y, et al. Planted forest is catching up with natural forest in China in terms of carbon density and carbon storage[J]. Fundamental Research, 2022, 2(5): 688-696.
- [5] 程然然, 关晋宏, 张建国, 等. 甘肃省5种典型人工林生态系统固碳现状与潜力[J]. 应用生态学报, 2017, 28(4): 1112-1120.
CHENG R R, GUAN J H, ZHANG J G, et al. Carbon storage and sequestration potential of five typical plantation ecosystems in Gansu Province, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(4): 1112-1120. (in Chinese)
- [6] 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[J]. 植物生态学报, 2000, 24(5): 518-522.
ZHOU Y R, YU Z L, ZHAO S D. Carbon storage and budget of major Chinese forest types[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2000, 24(5): 518-522. (in Chinese)
- [7] 康冰, 刘世荣, 张广军, 等. 广西大青山南亚热带马尾松、杉木混交林生态系统碳素积累和分配特征[J]. 生态学报, 2006, 26(5): 1320-1329.
KANG B, LIU S R, ZHANG G J, et al. Carbon accumulation and distribution in *Pinus massoniana* and *Cunninghamia lanceolata* mixed forest ecosystem in Daqingshan Guangxi of China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(5): 1320-1329. (in Chinese)
- [8] EGGLESTON H S, BUENDIA L, MIWA K. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. 3. Industrial processes and product use[M]. Tokyo: IGES, 2006.
- [9] 刘魏魏, 王效科, 逯非, 等. 造林再造林、森林采伐、气候变化、CO₂浓度升高、火灾和虫害对森林固碳能力的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(8): 2113-2122.
LIU W W, WANG X K, LU F, et al. Influence of afforestation, reforestation, forest logging, climate change, CO₂ concentration rise, fire, and insect on the carbon sequestration capacity of the forest ecosystem[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(8): 2113-2122. (in Chinese)
- [10] 王红英, 樊星火, 华玉武, 等. 不同林龄序列杉木人工林生态系统碳储量变化特征[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(21): 278-280.
WANG H Y, FAN X H, HUA Y W, et al. Characteristics of carbon storage changes in the ecosystem of Chinese fir plantations with different forest age sequences[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2017, 45(21): 278-280. (in Chinese)
- [11] 刘迎春, 王秋凤, 于贵瑞, 等. 黄土丘陵区两种主要退耕还林树种生态系统碳储量和固碳潜力[J]. 生态学报, 2011, 31(15): 4277-4286.
LIU Y C, WANG Q F, YU G R, et al. Ecosystems carbon storage and carbon sequestration potential of two main tree species for the Grain for Green Project on China's hilly Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(15): 4277-4286. (in Chinese)
- [12] 陈莉, 宋敏, 宋同清, 等. 广西不同林龄软阔林碳储量及其分配格局[J]. 生态学杂志, 2017, 36(3): 592-600.
CHEN L, SONG M, SONG T Q, et al. Carbon storage and its allocation in soft broadleaved forests with different stand ages in Guangxi[J]. Chinese Journal of Ecology, 2017, 36(3): 592-600. (in Chinese)
- [13] 王华, 苏樑, 宋同清, 等. 广西不同林龄硬阔林生态系统碳储量及其分配格局[J]. 生态学杂志, 2017, 36(6): 1465-1472.
WANG H, SU L, SONG T Q, et al. Carbon storage and allocation in hardwood broad-leaved forests with different stand ages in Guangxi[J]. Chinese Journal of Ecology, 2017, 36(6): 1465-1472. (in Chinese)
- [14] 兰洁, 肖中琪, 李吉玫, 等. 天山雪岭云杉生物量分配格局及异速生长模型[J]. 浙江农林大学学报, 2020, 37(3): 416-423.
LAN J, XIAO Z Q, LI J M, et al. Biomass allocation and allometric growth of *Picea schrenkiana* in Tianshan Mountains[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2020, 37(3): 416-423. (in Chinese)
- [15] 许文强, 杨辽, 陈曦, 等. 天山森林生态系统碳储量格局及其影响因素[J]. 植物生态学报, 2016, 40(4): 364-373.
XU W Q, YANG L, CHEN X, et al. Carbon storage, spatial distribution and the influence factors in Tianshan forests[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2016, 40(4): 364-373. (in Chinese)
- [16] 田大伦, 李雄华, 罗赵慧, 等. 湘潭锰矿废弃地不同林龄栎树人工林碳储量变化趋势[J]. 生态学报, 2014, 34(8): 2137-2145.
TIAN D L, LI X H, LUO Z H, et al. Dynamics of carbon storage at different aged *Koelreuteria paniculata* tree in Xiangtan Mn mining wasteland[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(8): 2137-2145. (in Chinese)
- [17] 马炜, 孙玉军, 郭孝玉, 等. 不同林龄长白落叶松人工林碳储量[J]. 生态学报, 2010, 30(17): 4659-4667.
MA W, SUN Y J, GUO X Y, et al. Carbon storage of *Larix olgensis* plantation at different stand ages[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(17): 4659-4667. (in Chinese)
- [18] 丁良忱, 别克. 天山云杉人工幼林生长规律的初步研究[J]. 八一农学院学报, 1988(2): 38-45.
DING L C, BIE K. A study on growth of man-made young trees of spruce in Tianshan[J]. Journal of August 1st Agricultural

- College, 1988(2): 38-45. (in Chinese)
- [19] 姚利辉, 康文星, 赵仲辉, 等. 会同杉木人工林不同生长阶段植物固碳特征[J]. 生态学报, 2015, 35(4): 1187-1197.
YAO L H, KANG W X, ZHAO Z H, et al. Carbon fixed characteristics of plant of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantation at different growth stages in Huitong[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(4): 1187-1197. (in Chinese)
- [20] 袁晴雪, 魏文寿. 中国天山山区近40 a来的年气候变化[J]. 干旱区研究, 2006, 23(1): 115-118.
YUAN Q X, WEI W S. Annual climate change in the Tianshan Mountainous since recent 40 years[J]. Arid Zone Research, 2006, 23(1): 115-118. (in Chinese)
- [21] 张艳静, 郑宏伟, 于瑞德, 等. 天山中西段不同地区雪岭云杉径向生长对气候变暖的响应差异[J]. 植物研究, 2017, 37(3): 340-350.
ZHANG Y J, ZHENG H W, YU R D, et al. Response differences of radial growth of *Picea schrenkiana* to climate warming in midwestern Tianshan Mountains[J]. Bulletin of Botanical Research, 2017, 37(3): 340-350. (in Chinese)
- [22] 周国逸, 李琳, 吴安驰. 气候变暖下干旱对森林生态系统的影响[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2020, 12(1): 81-88.
ZHOU G Y, LI L, WU A C. Effect of drought on forest ecosystem under warming climate[J]. Journal of Nanjing University of Information Science and Technology(Natural Science Edition), 2020, 12(1): 81-88. (in Chinese)
- [23] 李海奎, 赵鹏祥, 雷渊才, 等. 基于森林清查资料的乔木林生物量估算方法的比较[J]. 林业科学, 2012, 48(5): 44-52.
LI H K, ZHAO P X, LEI Y C, et al. Comparison on estimation of wood biomass using forest inventory data[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2012, 48(5): 44-52. (in Chinese)
- [24] 胡仲豪, 常顺利, 张毓涛, 等. 天山林区不同类型群落土壤氮素对冻融过程的动态响应[J]. 生态学报, 2019, 39(2): 571-579.
HU Z H, CHANG S L, ZHANG Y T, et al. Dynamic response of soil nitrogen to freeze-thaw processes in different cenotypes in the forests of the Tianshan Mountains[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(2): 571-579. (in Chinese)
- [25] CHENG X R, YU M K, WU T G. Effect of forest structural change on carbon storage in a coastal *Metasequoia glyptostroboides* stand[J]. The Scientific World Journal, 2013, 2013: 830509.
- [26] RIBE R G. Aesthetic perceptions of green-tree retention harvests in vista views: The interaction of cut level, retention pattern and harvest shape[J]. Landscape and Urban Planning, 2005, 73(4): 277-293.
- [27] XIONG X, ZHOU G Y, ZHANG D Q. Soil organic carbon accumulation modes between pioneer and old-growth forest ecosystems[J]. Journal of Applied Ecology, 2020, 57(12): 2419-2428.
- [28] FELDPAUSCH T R, RONDON M A, FERNANDES E C M, et al. Carbon and nutrient accumulation in secondary forests regenerating on pastures in central Amazonia[J]. Ecological Applications, 2004, 14(sp4): 164-176.
- [29] 徐英明, 虞依娜, 李鑫, 等. 南亚热带不同造林模式碳汇林土壤碳积累与碳汇功能[J]. 生态学报, 2019, 39(1): 355-362.
XU Y M, YU Y N, LI X, et al. Soil carbon accumulation and carbon sinks under different afforestation patterns in Chinese subtropical forests[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(1): 355-362. (in Chinese)
- [30] BATEMAN I J, LOVETT A A. Estimating and valuing the carbon sequestered in softwood and hardwood trees, timber products and forest soils in Wales[J]. Journal of Environmental Management, 2000, 60(4): 301-323.
- [31] AHMAD B, WANG Y H, HAO J, et al. Variation of carbon density components with overstory structure of larch plantations in Northwest China and its implication for optimal forest management[J]. Forest Ecology and Management, 2021, 496: 119399.
- [32] 孙雪娇, 李吉玫, 张毓涛, 等. 天山北坡山地森林林地产流产沙特征及其影响因素分析[J]. 生态环境学报, 2021, 30(9): 1821-1830.
SUN X J, LI J M, ZHANG Y T, et al. Characteristics and influence of runoff and sediment yield in mountain forest on the north slope of Tianshan Mountains[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2021, 30(9): 1821-1830. (in Chinese)
- [33] 孙彩丽, 王艺伟, 王从军, 等. 喀斯特山区土地利用方式转变对土壤酶活性及其化学计量特征的影响[J]. 生态学报, 2021, 41(10): 4140-4149.
SUN C L, WANG Y W, WANG C J, et al. Effects of land use conversion on soil extracellular enzyme activity and its stoichiometric characteristics in karst mountainous areas[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(10): 4140-4149. (in Chinese)
- [34] GUO L B, GIFFORD R M. Soil carbon stocks and land use change: A meta analysis[J]. Global Change Biology, 2002, 8(4): 345-360.
- [35] DON A, REBMANN C, KOLLE O, et al. Impact of afforestation-associated management changes on the carbon balance of grassland[J]. Global Change Biology, 2009, 15(8): 1990-2002.
- [36] LAGANIÈRE J, ANGERS D A, PARÉ D. Carbon accumulation in agricultural soils after afforestation: A meta-analysis[J]. Global

- Change Biology, 2010, 16(1): 439-453.
- [37] SONG Y H, ZHAI J Y, ZHANG J Y, et al. Forest management practices of *Pinus tabulaeformis* plantations alter soil organic carbon stability by adjusting microbial characteristics on the Loess Plateau of China[J]. The Science of the Total Environment, 2021, 766: 144209.
- [38] HONG S B, YIN G D, PIAO S L, et al. Divergent responses of soil organic carbon to afforestation[J]. Nature Sustainability, 2020, 3: 694-700.
- [39] 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[J]. 生态学报, 2014, 34(8): 2128-2136.
YANG Y J, CHEN Y M, CAO Y. Carbon density and distribution of *Pinus tabulaeformis* plantation ecosystem in Hilly Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(8): 2128-2136. (in Chinese)
- [40] 刘恩, 王晖, 刘世荣. 南亚热带不同林龄红锥人工林碳贮量与碳固定特征[J]. 应用生态学报, 2012, 23(2): 335-340.
LIU E, WANG H, LIU S R. Characteristics of carbon storage and sequestration in different age beech (*Castanopsis hystrix*) plantations in south subtropical area of China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(2): 335-340. (in Chinese)
- [41] 马长明, 赵辉, 牟洪香, 等. 燕山山地华北落叶松人工林碳密度及分配特征[J]. 水土保持学报, 2017, 31(5): 208-214.
MA C M, ZHAO H, MU H X, et al. Carbon density and its allocation characteristics of *Larix principis-rupprechtii* plantation in Yanshan Mountainous area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(5): 208-214. (in Chinese)
- [42] 王艳芳, 刘颖, 李志超, 等. 豫西黄土丘陵区不同林龄栎类和侧柏人工林碳、氮储量[J]. 应用生态学报, 2018, 29(1): 25-32.
WANG Y F, LIU L, LI Z C, et al. Storage of carbon and nitrogen in *Quercus* and *Platycladus orientalis* plantations at different ages in the hilly area of western Henan Province, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(1): 25-32. (in Chinese)
- [43] 牛春梅, 关晋宏, 程然然, 等. 黄土高原中西部刺槐人工林生态系统碳密度及其影响因子[J]. 生态学报, 2017, 37(15): 5049-5058.
NIU C M, GUAN J H, CHENG R R, et al. Ecosystem carbon density of *Robinia pseudoacacia* plantations and influencing factors in the middle and western Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(15): 5049-5058. (in Chinese)
- [44] 阿地来·赛提尼亚孜, 常顺利, 张毓涛, 等. 天山雪岭云杉林群落组成与结构10年动态变化[J]. 生态学杂志, 2021, 40(10): 3033-3040.
ADILAI S, CHANG S L, ZHANG Y T, et al. A decade variation of species composition and community structure of spruce forest in Tianshan Mountains[J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(10): 3033-3040. (in Chinese)
- [45] 代林利, 周丽丽, 伍丽华, 等. 不同林分密度杉木林生态系统碳密度及其垂直空间分配特征[J]. 生态学报, 2022, 42(2): 710-719.
DAI L L, ZHOU L L, WU L H, et al. Carbon density and vertical spatial distribution characteristics of *Cunninghamia lanceolata* forest ecosystem with different stand density[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(2): 710-719. (in Chinese)
- [46] 南维波. 不同抚育强度对兴安落叶松人工林的影响[J]. 农村实用技术, 2020(6): 121-122.
NAN W B. The influence of different nurturing intensities on the artificial forest of *Larix gmelinii*[J]. Practical Rural Technology, 2020(6): 121-122. (in Chinese)
- [47] ARES A, NEILL A R, PUETTMANN K J. Understory abundance, species diversity and functional attribute response to thinning in coniferous stands[J]. Forest Ecology and Management, 2010, 260(7): 1104-1113.
- [48] 杨洋, 王继富, 张心昱, 等. 凋落物和林下植被对杉木林土壤碳氮水解酶活性的影响机制[J]. 生态学报, 2016, 36(24): 8102-8110.
YANG Y, WANG J F, ZHANG X Y, et al. Mechanism of litter and understory vegetation effects on soil carbon and nitrogen hydrolase activities in Chinese fir forests[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(24): 8102-8110. (in Chinese)
- [49] 李旭华, 徐峥静茹, 蔡蕾, 等. 不同抚育措施对川西亚高山云杉人工林土壤微生物群落结构的短期影响[J]. 应用与环境生物学报, 2023, 29(3): 663-669.
LI X H, XUZHENG J R, CAI L, et al. Short-term effects of different tending measures on soil microbial communities in subalpine spruce plantations of western Sichuan[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2023, 29(3): 663-669. (in Chinese)