北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

基于结构方程模型的兴安落叶松天然林碳汇量驱动因素

梅雪松 董灵波 陈冠谋

Driving factors of carbon sink in natural *Larix gmelinii* forests based on structural equation models

Mei Xuesong, Dong Lingbo, Chen Guanmou

引用本文:
梅雪松, 董灵波, 陈冠谋. 基于结构方程模型的兴安落叶松天然林碳汇量驱动因素[J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(9):1–10. doi: 10.12171/j.1000–1522.20230284
Mei Xuesong, Dong Lingbo, Chen Guanmou. Driving factors of carbon sink in natural *Larix gmelinii* forests based on structural equation models[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(9):1–10. doi: 10.12171/j.1000–1522.20230284

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230284

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

基于气候因子的兴安落叶松天然林单木直径生长模型构建
Development of individual–tree diameter increment model for natural *Larix gmelinii* forests based on climatic factors
北京林业大学学报, 2022, 44(8): 1–11. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210353

基于林木分级的大兴安岭天然兴安落叶松树高曲线研究
Height curve of natural *Larix gmelinii* in the Daxing’anling Mountains of northeastern China based on forest classification
北京林业大学学报, 2023, 45(5): 88–96. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210513

长白落叶松人工林林分碳储量生长模型系研究
Stand carbon stock growth model system for *Larix olgensis* plantation
北京林业大学学报, 2021, 43(11): 1–10. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210040

天然次生林碳储量生长模型与固碳能力驱动力研究
Growth model of carbon storage and driving force of carbon sequestration capacity of natural secondary forests
北京林业大学学报, 2023, 45(1): 1–10. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210265

兴安落叶松人工林空间结构优化
Spatial structure optimal of *Larix gmelinii* plantation
北京林业大学学报, 2021, 43(4): 68–76. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200228

兴安落叶松火烧迹地林褥层碳氮化学计量特征
Stoichiometric characteristics of C and N of post–fire forest floor of *Larix gmelinii*
北京林业大学学报, 2021, 43(12): 55–64. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200281

DOI:10.12171/j.1000−1522.20230284

基于结构方程模型的兴安落叶松天然林碳汇量驱动因素

梅雪松　董灵波　陈冠谋
（东北林业大学林学院，森林生态系统可持续经营教育部重点实验室，黑龙江 哈尔滨 150040）

摘要:【目的】探究兴安落叶松天然林碳汇量及其驱动机制，为提升该地区的碳汇功能提供理论依据。**【方法】**基于黑龙江省大兴安岭地区第 7 次和第 8 次国家森林资源连续清查获取的 264 块固定样地调查数据，考虑林木生长、枯损、进界和采伐 4 个碳库，分别从林分、气候、多样性、土壤、地形和采伐 6 个方面选取 24 项指标，通过逐步回归和结构方程模型，量化了各指标对兴安落叶松天然林碳汇量的影响。**【结果】**(1)2005—2010 年间，该地区兴安落叶松天然林的平均碳汇量为(1.17 ± 0.71) t/(hm^2·a)。(2)逐步回归模型的确定系数(R^2)、均方根误差(RMSE)和平均绝对误差(MAE)分别为 0.60、0.60 t/(hm^2·a)和 0.45 t/(hm^2·a)，表明所建模型精度较高。模型筛选出的变量包括 Shannon-Wiener 指数、郁闭度、土壤全氮、土壤全钾、优势木平均胸径、年平均降水量、坡度和林分平均年龄。(3)结构方程模型中各变量对林分碳汇量的路径系数依次为 Shannon-Wiener 指数(0.462) > 郁闭度(0.357) > 优势木平均胸径(0.313) > 土壤全氮(0.286) > 土壤全钾(−0.142) >年平均降水量(−0.107) > 坡度(−0.069)。**【结论】**Shannon-Wiener 指数、优势木平均胸径、郁闭度和土壤条件是影响碳汇量的重要驱动因子，可在后续经营中通过合理抚育间伐或冠下补植来调整林分的树种组成、郁闭度和土壤肥力，以达到提升兴安落叶松天然林碳汇功能的目的。

关键词：森林经营；碳汇量；兴安落叶松；影响因子；逐步回归；结构方程模型
中图分类号：S791.222；S75　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1000−1522(2024)09−0001−10
引文格式：梅雪松，董灵波，陈冠谋. 基于结构方程模型的兴安落叶松天然林碳汇量驱动因素［J］. 北京林业大学学报，2024，46(9)：1−10. Mei Xuesong, Dong Lingbo, Chen Guanmou. Driving factors of carbon sink in natural *Larix gmelinii* forests based on structural equation models［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(9): 1−10.

Driving factors of carbon sink in natural *Larix gmelinii* forests based on structural equation models

Mei Xuesong　Dong Lingbo　Chen Guanmou
(School of Forestry, Key Laboratory of Sustainable Forest Ecosystem Management of Ministry of Education, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China)

Abstract:［**Objective**］This study aimed to clarify the driving mechanism of carbon sink formation in natural *Larix gmelinii* forest, and to provide theoretical basis for improving the carbon sink function of natural *L. gmelinii* forest in this area.［**Method**］Based on the survey data of 264 fixed plots from the 7th and 8th continuous national forest resource inventory in Daxing'anling region of Heilongjiang Province, northeastern China, this study selected 24 indexes from 6 aspects, namely stand, climate, diversity, soil, topography and cutting, considering 4 carbon pools of tree growth, mortality, ingrowth and cutting. The effects of each index on carbon sink in natural *L. gmelinii* forest were quantified by stepwise regression and structural equation model.［**Result**］(1) The average carbon sink of natural forest of *L. gmelinii* from 2005 to 2010 was (1.17 ± 0.71) t/(ha·year). (2) The determination coefficient (R^2), root mean square error (RMSE)

收稿日期: 2023−10−23　**修回日期:** 2024−04−15
基金项目: “十四五”国家重点研发计划(2022YFD2200502)，中央高校基本科研业务费专项(2572022CG07)。
第一作者: 梅雪松。主要研究方向：森林可持续经营。Email: mxs18832604392@163.com　地址：150040 黑龙江省哈尔滨市和兴路 26 号东北林业大学林学院。
责任作者: 董灵波，博士，副教授。主要研究方向：森林可持续经营。Email: Farrell0503@162.com　地址：同上。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn; http://journal.bjfu.edu.cn

and mean absolute error (MAE) of the stepwise regression model were 0.60, 0.60 t/(ha·year) and 0.45 t/(ha·year), respectively, indicating that the model was highly accurate. The variables selected by the model included Shannon-Wiener index, canopy density, soil total nitrogen, soil total potassium, average DBH of dominant trees, annual mean precipitation, slope and average age of stands. (3) In the structural equation model, the path coefficients of Shannon-Wiener index (0.462) > canopy density (0.357) > average DBH of dominant trees (0.313) > soil total nitrogen (0.286) > soil total potassium (−0.142) > annual mean precipitation (−0.107) > slope (−0.069). [**Conclusion**] Shannon-Wiener index, canopy density and soil conditions are important driving factors affecting carbon sink. Tree species composition, average DBH of dominant trees, canopy density and soil fertility can be adjusted through rational thinning or undercrown replanting in subsequent management to improve the carbon sink function of natural forest of *L. gmelinii*.

Key words: forest management; carbon sink; *Larix gmelinii*; influencing factor; stepwise regression; structural equation model

全球气候变暖已严重威胁人类健康和社会发展[1]，节能减排形势严峻。森林生态系统作为陆地生态系统的主要组成部分，其植被通过光合作用吸收的碳约占陆地生态系统碳吸收量的 90%，在减缓气候变暖中发挥重要作用[2−3]。以往的研究中，森林碳储量受到气候、林分、地理环境等非生物和生物因素的交互作用。Xu 等[4]发现树冠密度和树龄是亚热带森林植被碳储量最重要的驱动因子。Ruiz-Benito 等[5]研究发现物种多样性差异对植被碳储量具有显著影响，混交林比纯林具有更高生产力。Shamim 等[6]通过对森林边缘碳储量进行研究，发现人为干扰和林分特征对树木碳储量起调节作用。长期以来对森林碳汇影响因素的研究多集中于碳储量方面，而在碳汇量方面涉及较少。本研究整合了前期各学者对碳储量影响因子的研究成果，从林分、气候、多样性、土壤、地形和采伐 6 个方面探究碳汇量的影响因子。

各影响因子间存在错综复杂的耦合关系，凭借简单的数据处理手段（如相关性分析、多元回归模型等），很难量化各因子对碳汇量的直接和间接影响。沈浩等[7]采用随机森林和结构方程相结合的方法得出，郁闭度、林龄与林分密度是驱动亚热带阔叶林生态系统碳储量的重要因素。Mora 等[8]将森林年龄、树木群落属性与地上生物量碳建立结构方程模型，认为地上生物量碳与林龄、群落最大树高加权平均值呈一致正相关。何潇等[9]运用逐步回归法和结构方程模型研究退化森林生态系统中林分碳储量的驱动因子，结果表明林分平均胸径与株数密度对林分碳储量的影响最大。前期使用结构方程模型对森林碳的研究多集中于某一时间森林的碳储量，缺乏在时间尺度上对碳储量变化的研究。本研究考虑林木生长、枯损、进界和采伐 4 个碳库，分析了大兴安岭地区森林碳汇量的驱动机制。

兴安落叶松（*Larix gmelinii*）天然林作为大兴安岭地区顶级群落之一，由于长期的人为采伐，林分的结构、功能和稳定性严重削弱[10]。恢复生态功能、提高森林质量、促进森林“固碳增汇”成为该区森林经营管理的重要任务[11]。本研究旨在采用逐步回归筛选影响林分碳汇量的关键驱动因子，进而利用结构方程模型揭示林分碳汇量形成的多元驱动机制，为该地区兴安落叶松天然林的有效经营提供理论依据和技术支撑。

1 研究地区概况与研究方法

1.1 研究区概况

本研究区位于我国东北北部的大兴安岭地区（50°44′24″ ~ 53°28′47″N，121°17′ 25″~ 125°57′54″E），是我国境内唯一的寒温带季风区，平均海拔 573 m，坡度介于 0° ~ 28.99°之间，年平均气温−3.2 ℃，年均降水量 350 ~ 555 mm，无霜期 107 ~ 147 d，土壤 pH 约为 5.9。主要乔木树种有兴安落叶松、白桦（*Betula platyphylla*）、蒙古栎（*Quercus mongolica*）、樟子松（*Pinus sylvestris* var. *mongolica*）、云杉（*Picea asperata*）、山杨（*Populus davidiana*）等。

1.2 数据来源

本研究数据来源于大兴安岭地区第 7 次（2005 年）和第 8 次（2010 年）的一类清查固定样地数据，对样地内林木进行每木检尺，测量并记录各林木的树种、胸径、坐标等。经过去除异常值，共得到 264 块落叶松固定样地的数据，均为落叶松纯林（树种组成占七成），林中含有白桦、蒙古栎、樟子松、山杨等伴生树种。调查记录表明，2005—2010 年期间对 52 块样地进行过间伐，平均采伐强度为 35%。地形数据采用 30 m 分辨率的 ASTER GDEM 数据进行提取（https://www.gscloud.cn/）；气候数据来源于 ClimateAP 软件，采用 2005—2010 年气候数据的平均值；土壤数据来源国家地球系统科学数据中心

（http://www.geodata.cn/）。

1.3　研究方法

1.3.1　碳汇量计算

将每木检尺数据，代入生物量模型中，得到每株树的生物量。各树种均采用《中国森林植被生物量和碳储量评估》[12]中的全国生物量模型和参数（表 1）。再将生物量代入式（1）得出每株树的碳储量。林分碳储量为每株树的碳储量之和除以样地面积。

$$C_i = C_{ci} W_i \tag{1}$$

式中：C_i 为单木 i 的碳储量，C_{ci} 为单木 i 所属树种的含碳率，W_i 为单木 i 的生物量。

$$C = \Delta C + C_1 + C_2 + C_3 \tag{2}$$

式中：C 为林木碳汇量；ΔC 为林木碳净增量；C_1 为间隔期内采伐林木的碳储量；C_2 为间隔期内枯损林木的碳储量；C_3 为间隔期内进入起测径阶林木的碳储量。

1.3.2　关键指标

参照文献[5−6,13]，分别从林分、气候、树种多样性、土壤条件、地形条件以及采伐 6 个方面选择了 24 项观测指标。林分因子包括平均年龄、平均树高、林分断面积、郁闭度和优势木平均胸径；气候数据主要有年平均气温、年平均降水量、无霜期、月平均最低温和月平均最高温等；树种多样性采用树种丰富度、Simpson 指数（式 3）、Shannon-Wiener 指数（式 4）和 Pielou 均匀度指数（式 5）4 个指标来度量；土壤条件包括 pH 值、全氮、全磷、全钾和土壤有机质；地形条件包括海拔、坡向、坡度和坡位，其中坡向采用式 6 进行量化，坡位的上、中、下和山谷 4 个等级，分别赋值为 1、2、3 和 4；采伐强度则为间隔期内采伐林木的蓄积强度。详细数据见表 2。

Simpson 指数（D'）

$$D' = 1 - \sum_{i=1}^{S} (P_i)^2 \tag{3}$$

式中：S 为树种总数，P_i 为树种 i 的个体数与所有树种个体总数之比。

Shannon-Wiener 指数（H'）

$$H' = -\sum_{i=1}^{S} P_i \ln P_i \tag{4}$$

Pielou 均匀指数（E）

$$E = H / \ln S \tag{5}$$

坡向指数（I_A）

$$I_A = \frac{\left\{1 - \cos\left[\frac{\pi}{180}(A - 30)\right]\right\}}{2} \tag{6}$$

式中：A 为坡向，以正北为 0°，顺时针方向进行测量，取值范围为 0 ~ 360°。

1.3.3　驱动因子筛选

以林分碳汇量为因变量，各影响因子为自变量，采用双向逐步回归方法剔除不显著（$P > 0.05$）以及多重共线性（VIF < 5）较高的因子，进而得到影响林分碳汇量的关键驱动因子。

1.3.4　结构方程模型

结构方程模型是应用线性方程系统表示观测变量与潜变量之间关系的一种统计方法。潜变量是指那些不能被直接观测的变量，通常需要通过观测变量对其进行估计。结构方程模型分为结构模型和测量模型[14−15]，其中测量模型为

$$X = \Lambda_x \xi + \delta \tag{7}$$

$$Y = \Lambda_y \eta + \varepsilon \tag{8}$$

式中：X、Y 分别为外生测量变量和内生测量变量；

表 1　各树种生物量模型及含碳系数

Tab. 1　Biomass models and carbon content coefficients of various tree species

树种 Tree species	生物量模型 Biomass model	含碳率 Carbon content rate
落叶松 *Larix gmelinii*	$W_T = 0.046\,238(D^2H)^{0.905\,002}$; $W_R = W_T/4.81$	0.521 1
云杉 *Picea asperata*	$W_T = 0.067\,732(D^2H)^{0.865\,949}$; $W_R = 0.008\,8D^{2.538\,27}$	0.520 8
樟子松 *Pinus sylvestris* var. *mongolica*	$W_S = 0.336\,4D^{2.006\,7}$; $W_B = 0.298\,3D^{1.144}$; $W_L = 0.293\,1D^{0.848\,6}$; $W_R = W_S + W_B + W_L$; $W_R = W_T/3.14$	0.522 3
桦木 *Betula* sp.	$W_T = 0.027\,860\,1(D^2H)^{0.993\,386}$; $W_R = W_T/2.89$	0.491 4
其他硬阔叶树种 Other hard broadleaved tree species	$W_S = 0.044(D^2H)^{0.916\,9}$; $W_P = 0.023(D^2H)^{0.711\,5}$; $W_B = 0.010\,4(D^2H)^{0.999\,4}$; $W_L = 0.018\,8(D^2H)^{0.802\,4}$; $W_T = W_S + W_P + W_B + W_L$; $W_R = 0.019\,7(D^2H)^{0.896\,3}$	0.500 4
其他软阔叶树种 Other soft broadleaved tree species	$W_T = 0.049\,550\,2(D^2H)^{0.952\,453}$; $W_R = W_T/3.85$	0.495 6

注：D为胸径；H为树高；W_S为树干生物量；W_P为树皮生物量；W_B为树枝生物量；W_L为树叶生物量；W_T为地上部分总生物量；W_R为地下部分生物量。Notes: D is DBH; H is tree height; W_S is stem biomass; W_P is bark biomass; W_B is branch biomass; W_L is leaf biomass; W_T is total aboveground biomass; W_R is underground biomass.

表 2 样地信息

Tab. 2 Information of sample plots

指标类别 Index type	指标 Index	平均值 Mean	范围 Range	标准差 SD
碳库信息 Carbon pool information	碳枯损量/(t·hm^{-2}·a^{-1}) Carbon mortality/(t·ha^{-1}·year^{-1})	0.42	0 ~ 27.14	3.65
	碳进界量/(t·hm^{-2}·a^{-1}) Carbon ingrowth/(t·ha^{-1}·year^{-1})	0.14	0 ~ 6.97	1.01
	碳采伐量/(t·hm^{-2}·a^{-1}) Carbon harvesting volume/(t·ha^{-1}·year^{-1})	4.15	0 ~ 100.86	12.82
	碳净生长量/(t·hm^{-2}·a^{-1}) Net carbon growth/(t·ha^{-1}·year^{-1})	−0.22	−101.83 ~ 12.99	14.27
	碳汇量/(t·hm^{-2}·a^{-1}) Carbon sink/(t·ha^{-1}·year^{-1})	1.17	0.03 ~ 3.29	0.71
林分特征 Stand characteristics	平均年龄/a Average age/year	85.34	23.00 ~ 195.00	40.29
	株数密度/(株·hm^{-2}) Plant density/(plant·ha^{-1})	1 040.00	133.00 ~ 3 883.00	601.84
	DBH/cm	13.02	6.30 ~ 23.8	3.40
	蓄积/(m^3·hm^{-2}) Volume/(m^3·ha^{-1})	89.03	4.90 ~ 265.70	53.30
	优势木平均胸径 Mean DBH of dominant tree/cm	15.53	6.30 ~ 35.00	5.66
	平均树高 Mean tree height/m	13.78	4.20 ~ 23.00	3.82
	郁闭度 Canopy density	0.48	0.20 ~ 0.93	0.16
	林分断面积/(m^2·hm^{-2}) Stand basal area/(m^2·ha^{-1})	13.10	1.17 ~ 33.44	7.22
树种多样性 Tree species diversity	丰富度 Richness	2.53	1.00 ~ 6.00	1.01
	Simpson指数 Simpson index	0.26	0 ~ 0.62	0.17
	Shannon-Wiener指数 Shannon-Wiener index	0.45	0 ~ 1.12	0.29
	Pielou均匀度指数 Pielou evenness index	0.46	0 ~ 0.89	0.26
土壤条件 Soil condition	土壤 pH Soil pH	5.90	5.70 ~ 6.13	0.09
	土壤全磷 Soil total P/(g·kg^{-1})	0.50	0.36 ~ 0.68	0.06
	土壤全钾 Soil total K/(g·kg^{-1})	14.49	11.13 ~ 19.44	1.35
	土壤全氮 Soil total N/(g·kg^{-1})	1.95	1.50 ~ 2.93	0.31
	土壤有机质 Soil organic matter/%	28.40	21.73 ~ 42.79	3.50
立地条件 Site condition	海拔 Altitude/m	673.45	253.00 ~ 1 153.00	197.66
	坡向指数 Aspect index	0.40	0 ~ 1.00	0.35
	坡位 Slope position	2.33	1 ~ 4.00	0.99
	坡度 Slope/(°)	7.84	0 ~ 28.99	5.67
气候条件 Climatic condition	年均温 Annual mean temperature/℃	−2.45	−4.87 ~ −0.02	0.93
	年均降水 Annual mean precipitation/mm	452.76	331.00 ~ 543.00	30.67
	无霜期 Frost-free period/d	129.99	105.00 ~ 155.00	8.74
	平均最暖月温度 Mean warmest monthly temperature/℃	18.42	16.23 ~ 20.30	0.73
	平均最冷月温度 Mean coldest monthly temperature/℃	−25.57	−28.33 ~ −22.72	1.16
采伐 Harvesting	采伐强度 Harvesting intensity/%	6.89	0 ~ 83.63	18.28

ξ、η 分别为外生潜变量和内生潜变量；$\boldsymbol{\Lambda}_x$ 为 X 在 ξ 上的因子载荷矩阵；$\boldsymbol{\Lambda}_y$ 为 Y 在 η 上的因子载荷矩阵；δ、ε 为测量误差。

结构模型为

$$\eta = \boldsymbol{B}\eta + \boldsymbol{\Gamma}\xi + \zeta\eta$$

式中：$\boldsymbol{B}$ 为内生潜变量之间的作用路径系数矩阵；$\boldsymbol{\Gamma}$ 为外生潜变量与内生潜变量的影响路径系数矩阵；ζ 为随机干扰项。

参考前人研究[4,8,10]，本研究使用标准化残差（standardized root mean square residual，SRMR）、近

似均方根误差（root mean square error of approximation，RMSEA）、卡方自由度比（χ^2/df）、拟合优度指数（goodness of fit index，GFI）、比较适配指数（comparative fit index，CFI）对模拟结果进行检验，一般认为，χ^2/df < 3，P > 0.05，RMSEA < 0.05，SRMR < 0.08，GFI、CFI > 0.95，则模型拟合良好。

1.3.5　*数据处理*

数据处理采用 R4.2.3 完成，其中逐步回归和结构方程模型选用 stats、lavaan 和 semplot 包实现。

2　结果与分析

2.1　兴安落叶松碳汇量与碳储量基本特征

2005 年时，区域内兴安落叶松林平均碳储量为（38.94 ± 24.97）t/hm^2，其中幼龄林、中龄林、近熟林、成熟林和过熟林分别为 24.54、37.20、38.29、43.87 和 46.71 t/hm^2。到了 2010 年，区域内兴安落叶松林平均碳储量增加到（44.78 ± 25.68）t/hm^2，各龄组碳储量平均增加约 31.78%、17.98%、13.58%、10.60% 和 8.48%。据此，各龄组的平均碳汇量分别为 1.56、1.34、1.04、0.93 和 0.79 t/（hm^2·a）（图 1）。整体来看，兴安落叶松各龄组的平均碳储量随林龄的增加而增加，其平均碳汇量则随林龄的增加而减少。

2.2　驱动因素筛选

逐步回归模型的确定系数 R^2 = 0.610 7（调整后的 R^2 = 0.598 5），均方根误差和平均绝对误差分别为 0.60 和 0.45 t/（hm^2·a）。表 3 显示：林分因子中郁闭度、平均年龄、优势木平均胸径对碳汇量有极显著影响（P < 0.001）；气候方面，年平均降雨量对碳汇量有显著影响（P = 0.011）；地形方面，坡度对碳汇量有极显著影响（P < 0.001）；多样性方面，Shannon-Wiener 指数对碳汇量有极显著影响（P < 0.001）；土壤理化性质方面，土壤全钾和土壤全氮均对碳汇量有极显著影响（P < 0.001）。郁闭度、优势木平均胸径、土壤全氮、Shannon-Wiener 指数均与碳汇量呈正相关，而年均降水量、坡度、土壤全钾和平均年龄与碳汇量呈负相关（图 2）。

2.3　结构方程模型

将逐步回归筛选出来的重要驱动因子与林分碳汇量进行结构方程模型的构建与检验。修正指数（modification indices）结果为：χ^2/df = 0.98，P = 0.459，CFI = 1，GFI = 0.987，RMSEA = 0，SRMR = 0.032，表明所建立的结构方程模型拟合结果良好。

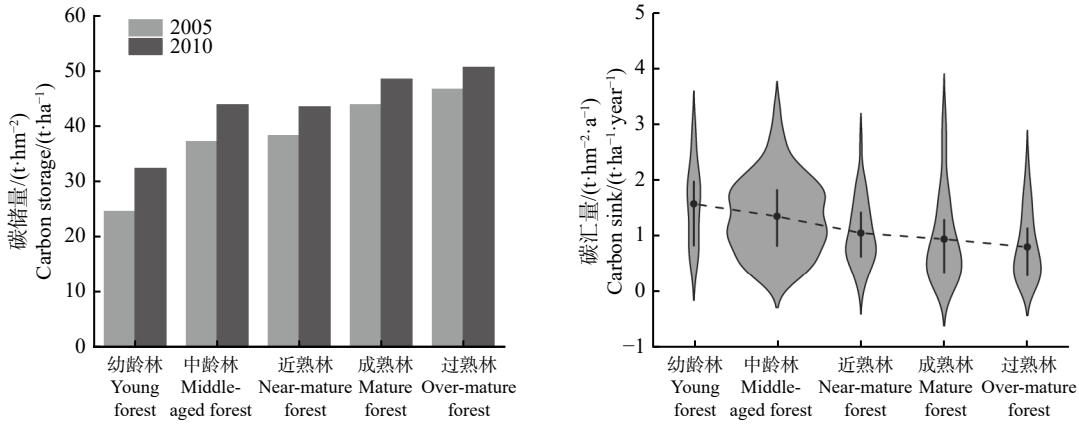


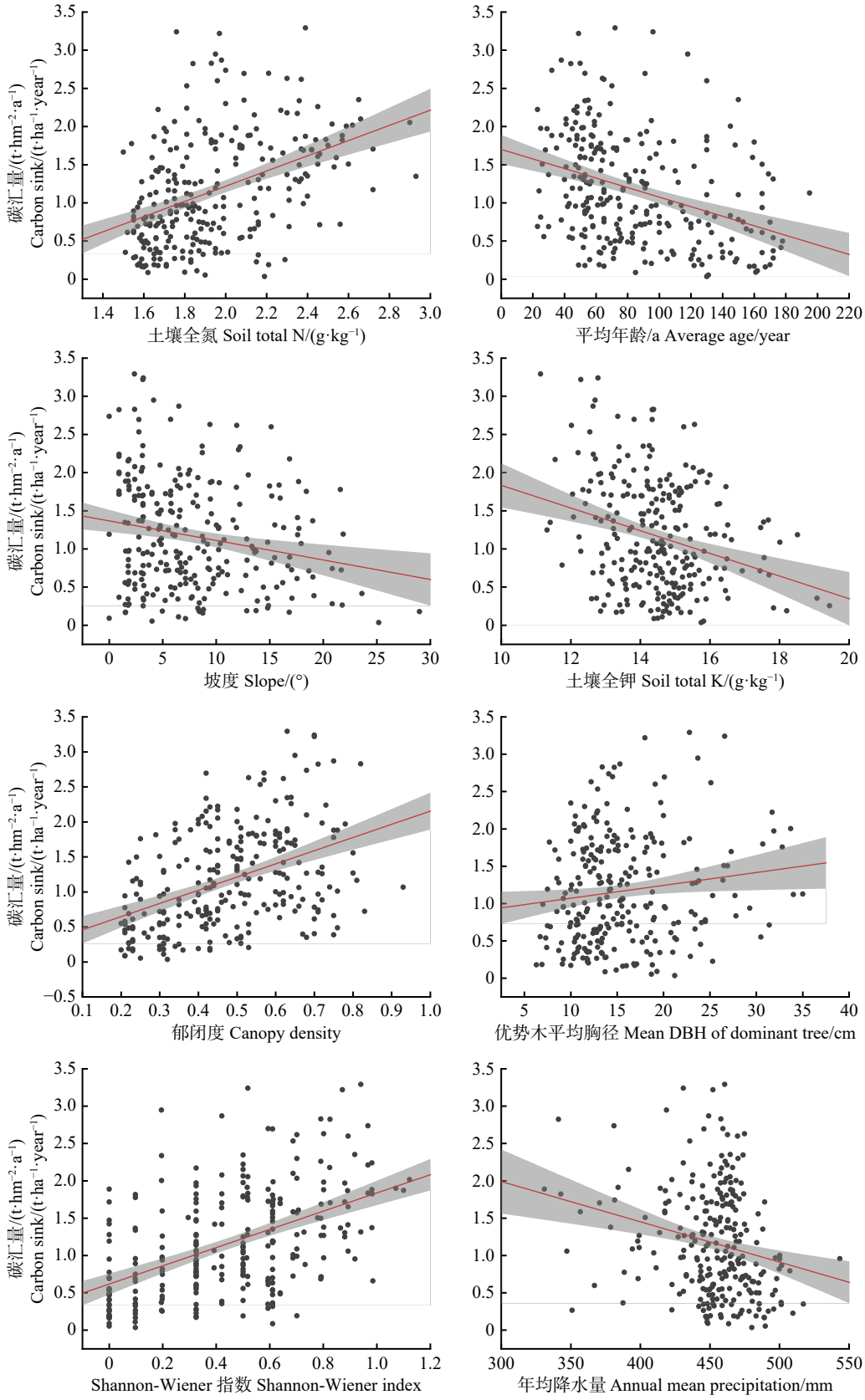
图 1　各龄组碳储量与碳汇量的动态变化

Fig. 1　Dynamic changes of carbon storage and carbon sink in each age group

表 3　碳汇量与各因子逐步回归

Tab. 3　Stepwise regression of carbon sink and each factor

影响因子 Influencing factor	平方和 Sum of squares	标准误差 Stand error	方差膨胀因子 VIF	参数估计值 Parameter estimate	T	P
平均年龄 Average age	4.885	0.001	1.766	−0.004	−4.879	< 0.001
优势木平均胸径 Mean DBH of dominant tree	8.211	0.006	1.482	0.038	6.325	< 0.001
郁闭度 Canopy density	13.338	0.191	1.242	1.539	8.061	< 0.001
坡度 Slope	2.536	0.006	1.344	−0.020	−3.515	< 0.001
年均降水量 Annual mean precipitation	1.337	0.001	1.120	−0.002	−2.552	0.011
Shannon-Wiener指数 Shannon-Wiener index	3.192	0.117	1.463	0.462	3.944	< 0.001
土壤全钾 Soil total K	4.570	0.024	1.382	−0.114	−4.719	< 0.001
土壤全氮 Soil total N	7.808	0.106	1.350	0.652	6.168	< 0.001

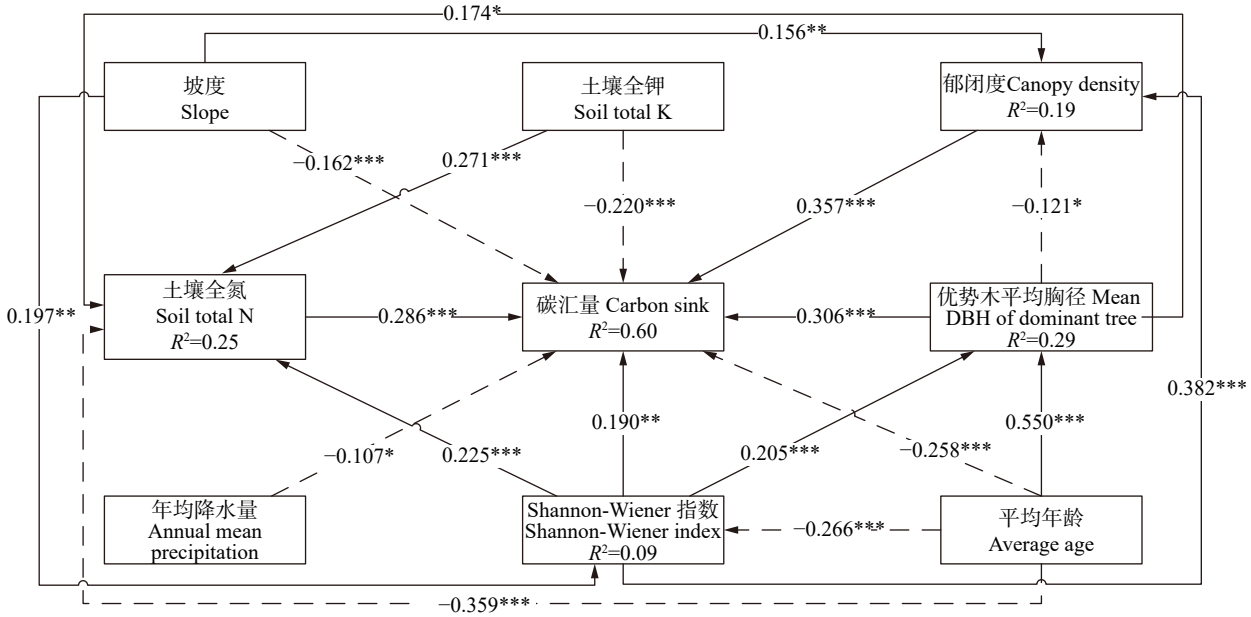


图中阴影部区域为拟合的 95% 置信区间。The shaded area in figure represents the fitted 95% confidence interval.

图 2 林分碳汇量与各显著因子的关系

Fig. 2 Relationship between forest carbon sink and various significant factors

结构方程模型(图 3)揭示了兴安落叶松天然林碳汇量 60% 的变异，其中 Shannon-Wiener 指数、郁闭度、优势木平均胸径、土壤全氮与碳汇量均有极显著的正相关($P < 0.01$)；林龄($P < 0.001$)、坡度($P < 0.001$)、年降水量($P < 0.05$)以及土壤全钾($P < 0.001$)与碳汇量显著负相关。图 3 和表 4 显示，Shannon-



虚线箭头显示负相关，实线箭头表示正相关，箭头中的值为归一化路径系数。*. $P < 0.05$，**. $P < 0.01$，***. $P < 0.001$。The dotted arrow shows negative correlations, the solid arrows show positive correlations and the value in arrow is normalized path coefficient. * means $P < 0.05$, ** means $P < 0.01$, *** means $P < 0.001$.

图 3　碳汇量结构方程模型

Fig. 3　Structural equation model of carbon sink

表 4　各变量对碳汇量影响

Tab. 4　Effects of each variable on carbon sink

变量 Variable	总影响 Total effect	直接影响 Direct effect	间接影响 Indirect effect
优势木平均胸径 Mean DBH of dominant tree	0.313	0.306	0.007
Shannon-Wiener指数 Shannon-Wiener index	0.462	0.190	0.272
郁闭度 Canopy density	0.357	0.357	0
平均年龄 Average age	−0.244	−0.258	0.014
土壤全氮 Soil total N	0.286	0.286	0
土壤全钾 Soil total K	−0.142	−0.220	0.078
坡度 Slope	−0.069	−0.162	0.093
年均降水量 Annual mean precipitation	−0.107	−0.107	0

Wiener 指数对碳汇量的影响最大(标准化路径总系数为 0.462)，但直接影响较小，仅为 0.190，主要通过影响土壤全氮、郁闭度以及优势木平均胸径对碳汇量产生正向的间接影响(0.272)；郁闭度对碳汇量有最大的直接影响(标准化路径系数为 0.357)；优势木平均胸径对碳汇量的总影响为 0.313(直接影响 0.306，间接影响 0.007)；土壤全氮对碳汇量的总影响为 0.286；林分平均年龄对碳汇量的总影响为−0.244(直接影响−0.258，间接影响 0.014)；土壤全钾对碳汇量的总影响为−0.142(直接影响−0.220，间接影响 0.078)；年平均降水量对碳汇量的总影响为−0.107；坡度对碳汇量的总影响为−0.069(直接影响−0.162，间接影响 0.093)。

3　讨　　论

3.1　生物因子对碳汇量的影响

林分生长过程环境复杂，影响因子种类繁多且具有较高的交互性。本研究中树种多样性对碳汇量的影响较为复杂，不仅对林分碳汇量有显著的正效应，还通过郁闭度、优势木平均胸径和土壤全氮对林分碳汇量有积极作用。越来越多的研究也证实，多样化的森林生态系统通常比物种贫乏的森林群落积累生物量更快[14]。这是由于生态位互补效应[16]所导致，具体表现为不同的物种在资源利用上存在差异，

群落中的物种会以互补的方式对有限的资源进行利用。群落内物种越多，这种互补现象越明显，相互促进的作用就越强。因此，增加物种的多样性有助于资源获得最大的利用效率，进而对森林生产力产生积极作用[17]。本研究还发现，树种多样性通过对郁闭度产生正向作用来间接影响碳汇量。Jucker 等[18]的研究结果可以解释这一现象，即多样性较高的森林能够更有效地利用冠层空间，冠层堆积效率随物种丰富度的增加而显著增加。

本研究结构方程结果表明，郁闭度是对大兴安岭地区落叶松林碳汇量直接作用最强的因子。郁闭度由冠层结构、树种组成和林分属性（如胸径、林分密度、树高等）决定。森林冠层内枝叶的垂直分布直接影响林下光照和小气候条件，使冠层结构成为森林生产力的关键决定因子[19]。密集的冠层可以最大限度地截获光照，从而提高森林生产力[20]。同时，它也阻碍光照传入林内，影响林下小气候，减缓温度波动以及水分散失。此外，凋落物产量的增加[21]，将更适合耐荫树种的生长，进而影响林分环境变化。

本研究表明，优势木平均胸径与碳汇量呈正相关，林分碳汇量受林内优势树的影响较大。以往的研究也证实，大型树木的树冠较大且光照良好，它们通过影响森林群落的水热条件分配，进而影响林下环境，还能为林下动物提供栖息地，促进林分进一步生长。Yuan 等[22]的研究也表明，林分碳储量主要取决于少数大树，这符合质量比假说[23]。同时，优势木还通过影响土壤全氮含量，对林分碳汇量产生正效应，这与王瑞华等[24]、樊雨时等[25]的研究结果一致，进一步反映了保护大直径树木对于维持森林碳汇能力的重要性。

林分平均年龄是影响森林碳汇的关键因素。Yang 等[26]和彭娓等[27]的研究均表明，随着林龄的增长，碳储量的变化速率下降，并在林分发育后期趋于平衡，这与本研究的结论一致。这种规律可能是由于林分发育过程中的养分限制、气孔限制和光合作用下降，导致林分净初级生产力（NPP）随着树龄的增加而下降[28−29]。本研究中，林分平均年龄的路径系数较小，这可能因为本研究的研究对象为天然林，调查期间经历过采伐干扰，导致林分年龄的调查存在很大的不确定性，按照现有的技术流程林分平均年龄多为主林层优势木的平均年龄，还有研究[30]表明林分平均年龄会受到进界木、采伐木和枯死木的影响，所以林分整体的年龄会与真实年龄出现偏差。结构方程模型显示林龄通过影响优势木平均胸径、Shannon-Wiener 指数以及土壤全氮对林分碳汇量产生间接作用。其中通过影响优势木平均胸径所带来的间接作用路径系数为 0.168，表明林龄与优势木平均胸径有很强的正相关性。

3.2 非生物因子对碳汇量的影响

土壤作为生态系统的组成部分，为森林生长发育提供了必要的环境条件，因此土壤的养分含量直接影响林分的生长状况。本研究发现，土壤全氮与林分碳汇量呈正相关，越来越多的研究也证实[31−32]，适量增施氮肥可以促进植物生长，加快腐殖质分解，进而影响森林土壤碳储量。然而，过量的氮会导致严重的环境破坏，如富营养化、土壤酸化以及生物多样性的丧失[33]。本研究还发现，土壤全钾对林分碳汇量产生了负作用，姜小蕾等[34]的研究结果也表明黑松（*Pinus thunbergii*）幼苗与土壤速效钾含量呈现显著负相关。

坡度影响土壤状况以及太阳辐射的接收，故被认为是决定一个地点生态条件的关键因素[35]。一般而言，坡度越大，土层越薄，养分越低，越不适合植物生长。Anvar 等[36]的研究表明，地上生物量随坡度的增加而减小，这与本研究结论一致。

气候变化通过影响森林植被和土壤健康，改变森林的碳动态，是影响森林碳汇能力的关键因素[37]。大兴安岭地区属于寒温带大陆季风气候，温差大，是我国对气候变化响应较为敏感的地区之一[38]，因此气候变化能直接影响其森林的固碳能力[39−40]。本研究结果表明，年降水量与碳汇量呈负相关，这与孔蕊等[41]的研究一致，即降水如果超出植被所需时，对植被活动会产生不利影响。由于研究区域受到采伐的样地数量较少（< 20%），导致采伐强度并没有对碳汇量产生显著影响。然而，大量研究[42−43]表明适度的抚育管理手段能提高森林生产力，因此在后续的研究中，可着重考虑采伐强度对林分碳汇量的影响。

4 结　　论

本研究采用逐步回归和结构方程模型，探讨了大兴安岭地区兴安落叶松天然林碳汇量的驱动机制。结果显示，该地区兴安落叶松天然林在 2010 年的平均碳储量为（44.78 ± 25.68）t/hm^2，2005—2010 年平均碳汇量为（1.17 ± 0.71）t/（hm^2·a）。树种多样性、郁闭度以及优势木平均胸径是大兴安岭地区兴安落叶松林碳汇量的关键驱动因子，其标准化路径总系数分别为 0.462、0.357 和 0.313。此外，土壤条件也对该地区碳汇产生重要影响。与以往研究不同，本研究考虑林木、枯损、进界和采伐 4 个碳库，并揭示了各驱动因子对兴安落叶松碳汇量的直接和间接影响，对该地区森林的经营管理以及准确评估森林生态系统碳汇能力具有一定的指导意义。

参 考 文 献

[1] Stocker T F, Qin D, Plattner G K, et al. IPCC, 2013: climate change 2013: the physical science basis contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[J]. Computational Geometry, 2013, 18(2): 95−123.

[2] Houghton R A, Hall F, Goetz S J. Importance of biomass in the global carbon cycle[J]. Journal of Geophysical Research-Biogeosciences, 2009, 114: G00E03.

[3] Yu G R, Chen Z, Piao S L, et al. High carbon dioxide uptake by subtropical forest ecosystems in the east Asian monsoon region[J]. Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America, 2014, 111(13): 4910−4915.

[4] Xu B, Pan Y, Plante A F, et al. Decadal change of forest biomass carbon stocks and tree demography in the Delaware River Basin[J]. Forest Ecology and Management, 2016, 374: 1−10.

[5] Ruiz-Benito P, Gómez-Aparicio L, Paquette A, et al. Diversity increases carbon storage and tree productivity in Spanish forests[J]. Global Ecology and Biogeography, 2014, 23(3): 311−322.

[6] Shamim R Z, Rezaul K, Fahmida S, et al. Multiple drivers of tree and soil carbon stock in the tropical forest ecosystems of Bangladesh[J]. Tress, Forests and People, 2021, 5: 100108.

[7] 沈浩, 姜姜, 周晨, 等. 江西石城不同起源阔叶林碳储量驱动因子分析 [J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2023, 47(4): 185−190.
Shen H, Jiang J, Zhou C, et al. Research on factors driving carbon storage in broad-leaved forests of different origins from Shicheng, Jiangxi Province[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2023, 47(4): 185−190.

[8] Mora F, Jaramillo V J, Bhaskar R, et al. Carbon accumulation in neotropical dry secondary forests: the roles of forest age and tree dominance and diversity[J]. Ecosystems, 2018, 21: 536−550.

[9] 何潇, 李海奎, 曹磊, 等. 退化森林生态系统中林分碳储量的驱动因素: 以内蒙古大兴安岭为例 [J]. 林业科学研究, 2020, 33(2): 69−76.
He X, Li H K, Cao L, et al. Drivers of carbon stocks in degraded forest ecosystems: a case study of the Great Xing'an Mountains in Inner Mongolia[J]. Forest Research, 2020, 33(2): 69−76.

[10] 董灵波, 田栋元, 陈莹, 等. 基于结构方程模型的兴安落叶松天然林更新影响因素 [J]. 应用生态学报, 2021, 32(8): 2763−2772.
Dong L B, Tian D Y, Chen Y, et al. Clarifying the factors affecting *Larix gmelinii* forest regeneration based on structural equation model[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(8): 2763−2772.

[11] 张会儒, 雷相东, 张春雨, 等. 森林质量评价及精准提升理论与技术研究 [J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(5): 1−18.
Zhang H R, Lei X D, Zhang C Y, et al. Research on theory and technology of forest quality evaluation and precision improvement[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41(5): 1−18.

[12] 李海奎, 雷渊才. 中国森林植被生物量和碳储量评估 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2010.
Li H K, Lei Y C, Estimation and evaluation of forest biomass storage in China[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2010.

[13] Zhu Y H, Zhao B Q, Zhu Z T, et al. The effects of crop tree thinning intensity on the ability of dominant tree species to sequester carbon in a temperate deciduous mixed forest, northeastern China[J]. Forest Ecology and Management, 2022, 505: 119893.

[14] 车盈, 金光泽. 物种多样性和系统发育多样性对阔叶红松林生产力的影响 [J]. 应用生态学报, 2019, 30(7): 2241−2248.
Che Y, Jin G Z. Effects of species diversity and phylogenetic diversity on productivity of a mixed broadleaved-Korean pine forest[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(7): 2241−2248.

[15] Hair J F, Howard M C, Nitzl C. Assessing measurement model quality in PLS-SEM using confirmatory composite analysis[J]. Journal of Business Research, 2020, 109: 101−110.

[16] Tilman D, Knops J, Wedin D, et al. The influence of functional diversity and composition on ecosystem processes[J]. Science, 1997, 277: 1300−1320.

[17] Hooper D U, Dukes J S. Overyielding among plant functional groups in a long-term experiment[J]. Ecology Letters, 2004, 7: 95−105.

[18] Jucker T, Bouriaud O, Coomes D A. Crown plasticity enables trees to optimize canopy packing in mixed species forests[J]. Functional Ecology, 2015, 29(8): 1078−1086.

[19] Binkley D, Campoe O C, Gspaltl M, et al. Light absorption and use efficiency in forests: why patterns differ for trees and stands[J]. Forest Ecology and Management, 2013, 288: 5−13.

[20] Hardiman B S, Bohrer G, Gough C M, et al. The role of canopy structural complexity in wood net primary production of a maturing northern deciduous forest[J]. Ecology, 2011, 92: 1818−1827.

[21] Scherer-Lorenzen M, Bonilla J L, Potvin C. Tree species richness affects litter production and decomposition rates in a tropical biodiversity experiment[J]. Oikos, 2007, 116(12): 2108−2124.

[22] Yuan Z Q, Arshad A, Anvar S, et al. Few large trees, rather than plant diversity and composition, drive the above-ground biomass stock and dynamics of temperate forests in northeast China[J]. Forest Ecology and Management, 2021, 481: 118698.

[23] Grime J P. Benefits of plant diversity to ecosystems: immediate, filter and founder effects[J]. Journal of Ecology, 1998, 86(6): 902−910.

[24] 王瑞华, 葛晓敏, 唐罗忠. 林下植被多样性、生物量及养分作用研究进展 [J]. 世界林业研究, 2014, 27(1): 43−48.
Wang R H, Ge X M, Tang L Z. A review of diversity, biomass and nutrient effect of understory vegetation[J]. World Forestry Research, 2014, 27(1): 43−48.

[25] 樊雨时. 青海典型人工林林分结构特征因子对林下植物多样性的影响 [D]. 北京: 北京林业大学, 2019.
Fan Y S. Effects of structural characteristics of typical artificial

forest stands on the diversity of understory plants in Qinghai[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2019.

[26] Yang Y H, Luo Y Q, Finzi A C. Carbon and nitrogen dynamics during forest stand development: a global synthesis[J]. New Phytologist, 2011, 190(4): 977−989.

[27] 彭娓, 李凤日, 贾炜玮, 等. 大兴安岭地区天然落叶松林乔木碳增量的研究 [J]. 植物研究, 2015, 35(4): 564−571.
Peng W, Li F R, Jia W W, et al. Tree carbon storage increment of natural larch forest in Daxing'an Mountains[J]. Bulletin of Botanical Research, 2015, 35(4): 564−571.

[28] Gower S T, McMurtrie R E, Murty D. Aboveground net primary production decline with stand age: potential causes[J]. Trends in Ecology & Evolution, 11(9): 378-382.

[29] Tang J W, Luyssaert S, Richardson A D, et al. Steeper declines in forest photosynthesis than respiration explain age driven decreases in forest growth[J]. Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America, 2014, 111: 8856−8860.

[30] 朱夕平, 杨连清. 浅谈连续清查中固定样地林分平均年龄的计算 [J]. 林草资源研究, 1987(1): 67−70.
Zhu X P, Yang L Q. A brief discussion on the calculation of average age of stand of fixed plot in continuous inventory[J]. Forest and Grassland Resources Research, 1987(1): 67−70.

[31] Mayer M, Prescott C E, Abaker W E A, et al. Influence of forest management activities on soil organic carbon stocks: a knowledge synthesis[J]. Forest Ecology Management, 2020, 466: 118127.

[32] Manning P, Saunders M, Bardgett R D, et al. Direct and indirect effects of nitrogen deposition on litter forest decomposition[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2008, 40: 688−698.

[33] Gilliam F S. Excess nitrogen in temperate forest ecosystems decreases herbaceous layer diversity and shifts control from soil to canopy structure[J]. Forests, 2019, 10(1): 66.

[34] 姜小蕾, 刘傲, 卢慧翠. 环境因子和林分结构对青岛黑松更新幼苗密度的影响 [J]. 山东农业大学学报 (自然科学版), 2021, 52(4): 552−558.
Jiang X L, Liu A, Lu H C. Effects of site conditions and stand structure on seedling regeneration of *Pinus thunbergii* secondary forest in Qingdao[J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2021, 52(4): 552−558.

[35] Jonathan B, Brian H, Andrew W, et al. Slope, aspect and climate: Spatially explicit and implicit models of topographic microclimate in chalk grassland[J]. Ecological Modelling, 2008, 216: 47−59.

[36] Anvar S, Mohammad A Z C, Arshad A, et al. Abiotic and biotic drivers of aboveground biomass in semi-steppe rangelands[J]. Science of the Total Environment, 2018, 615: 895−905.

[37] Mitchard E T A. The tropical forest carbon cycle and climate change[J]. Nature, 2018, 559: 527−534.

[38] 黄超, 贺红士, 梁宇, 等. 气候变化、林火和采伐对大兴安岭森林碳储量的影响 [J]. 应用生态学报, 2018, 29(7): 2088−2100.
Huang C, He H S, Liang Y, et al. Effects of climate change, fire and harvest on carbon storage of boreal forests in the Great Xing'an Mountains, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(7): 2088−2100.

[39] Lenoir J, Gégout J C, Marquet P, et al. A significant upward shift in plant species optimum elevation during the 20th century[J]. Science, 2008, 320: 1768−1771.

[40] Reyer C, Lasch B P, Suckow F, et al. Projections of regional changes in forest net primary productivity for different tree species in Europe driven by climate change and carbon dioxide[J]. Annals of Forest Science, 2014, 71: 211−225.

[41] 孔蕊, 张增信, 张凤英, 等. 长江流域森林碳储量的时空变化及其驱动因素分析 [J]. 水土保持研究, 2020, 27(4): 60−66.
Kong R, Zhang Z X, Zhang F Y, et al. Spatial and temporal dynamics of forest carbon storage and its driving factors in the Yangtze River Basin[J]. Research of Soil Water Conservation, 2020, 27(4): 60−66.

[42] Geng Y, Yue Q, Zhang C Y, et al. Dynamics and drivers of aboveground biomass accumulation during recovery from selective harvesting in an uneven-aged forest[J]. European Journal of Forest Research, 2021, 140(5): 1163−1178.

[43] Saarinen N, Kankare V, Yrttimaa T, et al. Assessing the effects of thinning on stem growth allocation of individual Scots pine trees[J]. Forest Ecology and Management, 2020, 474: 118344.

（责任编辑 范 娟
责任编委 张会儒）