

中南林业科技大学学报

Journal of Central South University of Forestry & Technology

ISSN 1673-923X，CN 43-1470/S

《中南林业科技大学学报》2026年第6期

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923X.2026.06.012

论文标题： 辽东山区蒙古栎林不同发育阶段碳储量变化特征及其影响因素

作　　者： 胡 博，董莉莉，孙云霞，等

收稿日期： 2025-06-18

引文格式： 胡博,董莉莉,孙云霞,等.辽东山区蒙古栎林不同发育阶段碳储量变化特征及其影响因素 [J].中南林业科技大学学报,2026,46(6):121-129.

HU B, DONG L L, SUN Y X, et al. Characteristics of carbon storage variations of *Quercus mongolica* forests at different development stages in the east of Liaoning mountainous area and their influencing factors[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026, 46(6):121-129.

相关论文推荐

Recommended articles

森林固碳计量方法研究综述

A review of measurement methods of forest carbon sequestration

基于多尺度地理加权回归模型的辽宁省森林碳储量估算

Estimation of forest carbon stocks in Liaoning Province based on a multi-scale geographically weighted regression model

基于地理加权随机森林的黑龙江省森林碳储量遥感估测

Geographically weighted random forest approach to predict forest carbon storage by remote sensing in Heilongjiang

2001—2023年春陵水流域植被碳储量时空变化及碳汇潜力分析

Analysis of spatial and temporal changes in vegetation carbon stocks and carbon sink potential in Chongling water basin from 2001 to 2023

基于分段模型的中条山国有林管理局油松林碳储量估计

Estimation of carbon storage in *Pinus tabulaeformis* forests of Zhongtiaoshan state-owned forest administration based on segmented model

基于海拔梯度的华北落叶松林地上碳储量模型

Aboveground carbon storage models for *Larix principis-rupprechtii* forests based on elevational gradients

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923x.2026.06.012
http: //qks.csuft.edu.cn

辽东山区蒙古栎林不同发育阶段碳储量变化特征及其影响因素

胡　博[1, 2, 3]，董莉莉[1, 2, 3]，孙云霞[1, 2]，陈　罡[1]，赵济川[1, 2]，汪成成[1, 2]，
刘红民[1, 2, 3]，杨圆圆[1, 2, 3]，高英旭[1, 2]

（1. 辽宁省林业科学研究院，辽宁 沈阳 110032；2. 栎树国家林业和草原局重点实验室，辽宁 沈阳 110032；
3. 辽宁白石砬子森林生态系统国家定位观测研究站，辽宁 丹东 118201）

摘　要：【目的】探究不同发育阶段林分碳储量变化规律，揭示影响林分碳储量的关键因子，为科学经营和管理森林和提高森林碳储量提供理论基础。【方法】以辽东山区蒙古栎林为研究对象，采用异速生长方程计算乔木层碳储量，同时采用样方法测量样地中灌木、草本、枯落物及土壤层（0 ～ 30 cm）碳储量，分析不同发育阶段蒙古栎林生态系统碳储量特征，采用冗余分析法对影响林分碳储量的主要环境因子进行分析。【结果】1）辽东山区蒙古栎林幼、中、成、过熟林生态系统碳储量分别为 296.13、332.65、300.72、503.55 $t·hm^{-2}$，过熟林碳储量最大，与其他林龄差异显著（$P < 0.05$）；2）在生态系统的各组分中，土壤层碳储量占比最大，其次为植被层和枯落物层。随着林龄的增加，植被层碳储量呈增加趋势，土壤层碳储量占比逐渐减小，但仍超过 50%；3）植被层碳储量占比随林龄增加呈先增大后减小的趋势，在成熟林占比最大，为 48%；4）影响林分碳储量的主要环境因子为海拔、坡向及土壤全磷含量，其解释率分别为 20.5%、12.1% 和 3.6%。【结论】辽东山区不同发育阶段蒙古栎林碳储量表现为幼龄林到成熟林变化较小，过熟林最大；土壤层碳储量在生态系统的各组分中占主导地位，植被层次之，海拔是影响蒙古栎林碳储量变化的最主要环境因子，其次为坡向和土壤全磷含量。

关键词：碳储量；龄组；辽东山区；蒙古栎林
中图分类号：S757.1　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1673-923X(2026)06-0121-09

Characteristics of carbon storage variations of *Quercus mongolica* forests at different development stages in the east of Liaoning mountainous area and their influencing factors

HU Bo[1,2,3], DONG Lili[1,2,3], SUN Yunxia[1,2], CHEN Gang[1], ZHAO Jichuan[1,2], WANG Chengcheng[1,2], LIU Hongmin[1,2,3],
YANG Yuanyuan[1,2,3], GAO Yingxu[1,2]

(1. Liaoning Academy of Forest Science, Shenyang 110032, Liaoning, China;
2. Quercus National Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration, Shenyang 110032, Liaoning, China;
3. Liaoning Baishilazi Forest Ecosystem Research Station, Dandong 118201, Liaoning, China)

Abstract:【Objective】To explore the changing patterns of carbon storage at different development stages of forest stands, identify the factors influencing carbon storage, and to provide a theoretical foundation for the scientific management, operation, and enhancement of forest carbon storage.【Method】Focusing on *Quercus mongolica* forests in the east of Liaoning mountainous area, the carbon storage in the arboreal layer was estimated using the anisotropic growth equation. Additionally, the carbon stocks of shrubs, herbs, litter, and soil within representative sample plots were measured utilizing the sampling method. Our analysis of these data elucidated the characteristics of ecosystem carbon storage across different developmental stages of *Q. mongolica* forests. Moreover, redundancy analysis was employed to identify the key environmental factors influencing variations in carbon storage.【Result】1) The ecosystem carbon storage of

收稿日期（Received）：2025-06-18　　**修订日期**（Revised）：2025-09-15
基金项目：国家重点研发计划重点专项（2023YFF1304003-04）；辽宁省重点研发项目（2024JH2/102500096）；辽宁省农业科学院产业关键核心技术攻关项目（2026CY3529）。
第一作者：胡博（869621936@qq.com），工程师，硕士。　**通信作者：**高英旭（95114701@qq.com），正高级工程师，硕士。
引文格式：胡博，董莉莉，孙云霞，等．辽东山区蒙古栎林不同发育阶段碳储量变化特征及其影响因素 [J]. 中南林业科技大学学报，2026, 46(6):121-129.
HU B, DONG L L, SUN Y X, et al. Characteristics of carbon storage variations of *Quercus mongolica* forests at different development stages in the east of Liaoning mountainous area and their influencing factors[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(6):121-129.

Q. mongolica forests in the east of Liaoning mountainous area is 296.13, 332.65, 300.72, and 503.55 t·hm^{-2} for young, half-mature, mature, and overmature forests, respectively. Notably, overmature forests exhibit the highest carbon stocks, significantly surpassing those of the other developmental stages. ($P < 0.05$); 2) Among the ecosystem components, the carbon stock in the soil layer (0-30 cm) accounted for the largest proportion. As the forest progresses through its developmental stages, carbon storage in the vegetation layer gradually increases, while the proportion of soil carbon stock decreases; however, it consistently remains above 50%; 3) The proportion of carbon storage in the vegetation layer exhibits a trend of initially increasing and then decreasing with forest age, reaching its maximum of 48% in mature forests; 4) Elevation, aspect, and soil total phosphorus content are the primary environmental factors influencing variations in carbon storage, collectively accounting for 20.5%, 12.1%, and 3.6% of the total variation in ecosystem carbon storage, respectively. 【Conclusion】Among the various development stages of *Q. mongolica* forests in the east of Liaoning mountainous area, carbon storage remains relatively stable from the young to mature stages, while overmature forests exhibit the highest ecosystem carbon stocks. The soil layer constitutes the primary component of carbon storage within the ecosystem, followed by the vegetation layer. Elevation is the most significant factor influencing changes in ecosystem carbon storage, followed by aspect and total phosphorus content in the soil.

Keywords: carbon storage; age group; east of Liaoning mountainous; *Quercus mongolica* forest

森林是最大的陆地生态系统，不仅支撑了人类的生存与发展，而且在维护生态平衡和保护物种多样性等方面起到重要作用，其碳汇功能在缓解全球气候变暖等方面发挥着重要作用，因此，科学地经营和管理森林非常重要。生物量是指某一时间或单位范围内存活的有机化合物的总量，包括地上生物量和地下生物量。林木生物量是森林生产力的具体表现，作为树木生长动态的最基本指标，一直受到国内外学者的关注，并且已经成为评价森林生态系统功能的重要指标。生物量不仅能体现林木之间在能量流动与物质循环中的关联，还可以体现森林的生产经营水平，既是进行森林研究的理论基石，又是各种复杂生态问题的研究基础，是进一步进行森林碳储量研究的前提条件 [1-4]。受全球气候变暖影响，森林生态系统碳储量越来越受国内外学者关注。近年来，对森林生态系统碳储量的研究主要集中在生物量以及含碳率测定 [5-7]、区域尺度碳储量估算 [8]、生态系统碳储量影响因子 [9-10]、碳储量时空变化规律及碳汇潜力 [11] 等方面。

蒙古栎 *Quercus mongolica* 为壳斗科 Fagaceae 栎属 *Quercus* 落叶乔木 [12]，是中国东北、华北地区的主要成林树种，也是我国主要用材树种之一，具有强大的固碳能力。蒙古栎林在涵养水源、维持森林生态系统稳定性等方面发挥了重要作用，具有较高的经济和生态价值 [13]。目前，辽东山区的森林经高强度采伐后退化严重，碳汇功能下降。近年来，对东北地区蒙古栎次生林天然更新、群落特征和林分结构的研究较为普遍，但针对森林生态系统碳储量开展系统性研究的较少。因此，开展碳储量特征及其影响因素研究对于提升森林碳汇功能、提质增效具有重要意义。

本研究以辽东山区蒙古栎天然次生林为对象，分别计算植被层、枯落物层和土壤层碳储量，分析不同发育阶段蒙古栎林生态系统碳储量特征，并采用冗余分析法揭示影响碳储量变化的主要环境因子，以期为森林碳汇功能提升，实现高效碳汇林经营提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于辽宁省抚顺市新宾满族自治县赵家国有林场（41°14′～41°58′N，124°15′～125°27′E），属暖温带大陆性季风气候，地处辽东山区，气候特点为四季分明。新宾满族自治县年降水量 750～850 mm，无霜期 150 d 左右，植被属长白植物区系，兼有华北和内蒙古两地植物区系特征，地带性植被类型为温带针阔混交林，主要树种有蒙古栎、胡桃楸 *Juglans mandshurica*、水曲柳 *Fraxinus mandshurica*、紫椴 *Tilia amurensis*、色木槭 *Acer pictum* 等；主要灌木有卫矛 *Euonymus alatus*、毛榛 *Corylus mandshurica*、刺五加 *Acanthopanax senticosus* 等；草本主要有东风菜 *Aster scaber*、山茄子 *Brachybotrys paridiformis*、牛叠肚 *Rubus crataegifolius* 等；土壤类型多为棕壤，呈酸性或微酸性。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置

2023 年对抚顺市新宾满族自治县赵家林场蒙古栎林进行全面踏查，并采用典型样地调查法共设置 16 块有代表性的样地，其中幼龄林、中龄林、成熟林和过熟林样地各 4 块，样地大小为 30 m×30 m，记录样地的海拔、坡度、坡向、林分密度等基本信息如表 1 所示。

表 1　不同发育阶段蒙古栎林样地基本信息
Table 1　Basic information on *Q. mongolica* forest plots at different development stages

龄组 Age group	林龄 Age /a	海拔 Altitude /m	坡度 Slope /(°)	密度 Density /(株·hm^{-2})	树高 Tree height /m	胸径 DBH /cm
幼龄林 Young forest	26 ～ 28	550 ～ 658	24 ～ 35	1 733 ～ 2 289	9.8 ～ 11.8	10.75 ～ 12.58
中龄林 Half-mature forest	45 ～ 48	195 ～ 388	22 ～ 30	1 389 ～ 1 611	9.8 ～ 11.0	12.85 ～ 15.95
成熟林 Mature forest	72 ～ 73	465 ～ 546	25 ～ 40	1 100 ～ 1 222	10.7 ～ 14.7	16.20 ～ 19.15
过熟林 Overmature forest	81 ～ 82	625 ～ 741	19 ～ 20	733 ～ 944	11.9 ～ 14.1	19.30 ～ 22.14

1.2.2　生物量测定

首先进行样地调查，对样地内所有胸径大于 5 cm 的活立木进行每木检尺，记录每株树的树种名称、坐标、健康状况，测量树高、胸径、枝下高和冠幅等生长指标。经调查，所有样地中共有 19 个树种（表 2），在《中国主要林木生物量模型手册》[14] 中选择东北地区的整株生物量模型估算样地内乔木层生物量。

表 2　不同树种生物量估算模型 †
Table 2　Biomass models for different tree species

树种 Species	生物量模型 Biomass model
蒙古栎 *Q. mongolica*	$y = 0.244 \times D^{2.35}$
紫椴 *T. amurensis*	$\lg y = -1.335 + 2.702 \times \lg D$
糠椴 *Tilia mandshurica*	$\lg y = -1.335 + 2.702 \times \lg D$
暴马丁香 *Syringa reticulata*	$y = 0.058\ 4 \times D^{2.196}$
春榆 *Ulmus davidiana* var. *japonica*	$y = 0.098 \times D^{2.299\ 8}$
千金榆 *Carpinus cordata*	$y = 0.098 \times D^{2.299\ 8}$
色木槭 *A. pictum*	$\lg y = -0.753 + 2.381 \times \lg D$
假色槭 *Acer pseudosieboldianum*	$\lg y = -0.753 + 2.381 \times \lg D$
胡桃楸 *J. mandshuric*	$\lg y = -0.727 + 2.308 \times \lg D$
黄檗 *Phellodendron amurense*	$\lg y = -1.129 + 2.468 \times \lg D$
水曲柳 *F. mandshurica*	$\lg y = -0.787 + 2.417 \times \lg D$
白桦 *Betula platyphylla*	$y = 0.222\ 7 \times D^{2.262\ 5}$
裂叶榆 *Ulmus laciniata*	$y = 0.098 \times D^{2.299\ 8}$
大果榆 *Ulmus macrocarpa*	$y = 0.098 \times D^{2.299\ 8}$
刺槐 *Robinia pseudoacacia*	$y = 0.098 \times D^{2.299\ 8}$
落叶松 *Larix gmelinii*	$y = 0.153 \times D^{2.493}$
山桃 *Prunus davidiana*	$y = 0.182\ 4 \times D^{2.055\ 8}$
稠李 *Prunus padus*	$\lg y = -0.753 + 2.381 \times \lg D$
灯台树 *Cornus controversa*	$\lg y = -0.753 + 2.381 \times \lg D$

† *y* 表示整株生物量，*D* 表示胸径。
y represents biomass and *D* represents diameter at breast height.

林下植被层包括灌木、草本和枯落物层，其生物量测定使用样方收获法。在样地内沿对角线分别设置 3 个 5 m×5 m、3 个 1 m×1 m 和 3 个 0.5 m×0.5 m 有代表性的小样方，称量小样方中所有灌木、草本和枯落物得到鲜质量，其中灌木和草本需要连同地下部分一起挖出，取样带回实验室，将所有样品置于烘箱中 105 ℃下烘干 2 h，75 ℃烘至恒质量，测定样品含水率，计算干鲜质量比，换算成干质量，最后换算为单位面积的生物量。

1.2.3　土壤理化性质测定

按照 5 点取样法的原则，使用环刀分别采集每个样地 0 ～ 10、10 ～ 20、20 ～ 30 cm 层的土壤，去除石块和植物细根后带回实验室，测定土壤含水率、石砾含量、pH 值、碳含量、全氮含量、全磷含量等指标 [15]。土壤碳储量计算公式为 [16]：

$$S_t = 0.1 \times \sum_{i=1}^{n} (1 - G_i) S_i \gamma_i \rho_i \quad (1)$$

式中：S_t 为土壤总碳储量（t/hm^2）；0.1 为单位换算系数；G_i 为土壤第 *i* 层石砾含量（%）；S_i 为第 *i* 层土壤碳含量（g·kg^{-1}）；γ_i 为第 *i* 层土壤土层厚度（cm）；ρ_i 为第 *i* 层土壤容重（g·cm^{-3}）。

1.2.4　碳储量测定

有研究表明，中国大部分阔叶树的含碳率在 0.45 ～ 0.50 g C·g^{-1} 之间 [17]，并且在本研究的蒙古栎林中，蒙古栎占比在 70% 以上，所以本研究将蒙古栎的含碳率作为蒙古栎林的平均含碳率，即 0.484 g C·g^{-1}[18]。林下植被层、枯落物层含碳率测定使用“干烧法”[19]，灌木、草本和枯落物碳储量的计算公式为：

碳储量 = 生物量 × 含碳率　　（2）

生态系统碳储量为植被层、枯落物层和土壤层碳储量之和 [20]。

1.2.5　林分空间结构参数计算

选取角尺度（*W*）、大小比数（*U*）、混交度（*M*）和密集度（*C*）作为林分空间结构的基本参数，计算公式如下 [21-22]：

$$W_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{n} Z_{ij} \quad (3)$$

$$U_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{n} K_{ij} \quad (4)$$

$$M_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{n} V_{ij} \quad (5)$$

$$C_i = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} Y_{ij} \quad (6)$$

式中：W_i 为角尺度，Z_{ij} 为离散变量，当标准角 α_0 大于第 j 个 α 角时，Z_{ij}=1，否则 Z_{ij}=0，n 表示中心木最近邻木的株数；U_i 为大小比数，K_{ij} 为离散变量，当对象木第 j 株树木的胸径大于近邻木时，K_{ij} 取值为 0，否则取值为 1；M_i 为混交度，V_{ij} 为离散变量，当对象木与近邻木树种相同时，V_{ij} 取值为 0，否则为 1；C_i 为密集度，Y_{ij} 为离散变量，当对象木与近邻木的树冠投影重叠时，Y_{ij} 取值为 1，否则为 0。角尺度、大小比数、混交度和密集度分别使用均值 $\overline{W}$、$\overline{U}$、$\overline{M}$、$\overline{C}$ 表示林分的整体分布。

1.2.6 数据分析

采用 SPSS 27.0 软件对不同发育阶段蒙古栎林内的乔木、灌木、草本及枯落物层碳储量进行 ANOVA 方差分析和 LSD 多重比较，分析其差异显著性（$P < 0.05$）。采用 Canoco 5.0 软件进行冗余分析（RDA），明确不同环境因子（林分结构因子、地形因子、土壤因子）对植被层碳储量和土壤层碳储量的影响，各指标数据均使用蒙特卡洛检验 [23]。使用 Origin2019b 软件作图。

2 结果与分析

2.1 不同发育阶段蒙古栎林环境特征

林分结构因子包括密集度、混交度、大小比数、角尺度、郁闭度和林分密度（表 3）。从林分空间结构来看，幼龄林的密集度与其他林龄有显著差异（$P < 0.05$），成熟林的角尺度与其他林龄有显著差异（$P < 0.05$）。

表 3 不同发育阶段蒙古栎林林分结构和土壤因子 †

Table 3 Stand structure factors and soil factors of *Q. mongolica* forest at different development stages

因子 Factors		龄组 Age group			
		幼龄林 Young forest	中龄林 Half-mature forest	成熟林 Mature forest	过熟林 Overmature forest
林分结构 Stand structure	密集度 C	0.78±0.04 b	0.91±0.03 a	0.84±0.02 ab	0.89±0.04 a
	混交度 M	0.45±0.04 a	0.52±0.07 a	0.55±0.06 a	0.48±0.09 a
	大小比数 U	0.49±0.02 a	0.47±0.01 a	0.49±0.01 a	0.49±0.01 a
	角尺度 W	0.55±0.03 a	0.54±0.01 a	0.48±0.01 b	0.56±0.01 a
	郁闭度 CD	0.83±0.03 a	0.70±0.01 b	0.74±0.02 b	0.85±0.03 a
	林分密度 Density /(株·hm^{-2})	1 966.50±119.53 a	1 419.50±117.19 b	1 152.50±25.38 b	860.75±75.96 c
土壤 Soil	pH 值 pH value	5.31±0.09 a	5.34±0.22 a	5.34±0.13 a	5.46±0.19 a
	全氮含量 TN /(g·kg^{-1})	1.87±0.34 a	1.94±0.17 a	2.72±0.15 a	2.38±0.44 a
	全磷含量 TP /(g·kg^{-1})	0.26±0.04 a	0.35±0.02 a	0.39±0.04 a	0.41±0.08 a
	有效磷含量 AP /(mg·kg^{-1})	1.74±0.19 b	1.54±0.18 b	2.40±0.15 a	1.94±0.26 a

† 同列不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)，下同。
Different letters in the same column meant significant difference at 0.05 level. The same below.

2.2 植被层碳储量

2.2.1 乔木层碳储量

辽东山区蒙古栎林不同发育阶段乔木层碳储量存在极显著差异。幼龄林、中龄林、近熟林和过熟林乔木层碳储量分别为 85.36、99.45、142.66、196.36 t·hm^{-2}（表 4）。随着林龄的增加，乔木层碳储量呈增加趋势。其中，幼龄林乔木层碳储量最低，成熟林、过熟林极显著高于幼龄林（$P < 0.01$），分别为幼龄林的 1.7 倍和 2.3 倍，中龄林与幼龄林之间的差异不显著。

2.2.2 林下植被层碳储量

林下植被层主要包括灌木层和草本层，不同发育阶段灌木层碳储量主要表现为成熟林最大，为 431.38 kg·hm^{-2}，过熟林最少，仅有 94.13 kg·hm^{-2}，约为成熟林的 22%。其中，除过熟林灌木层碳储量与其他龄组差异显著外（$P < 0.05$），各龄组灌木层碳储量并无显著差异；不同林龄组间的草本层碳储量差异均不显著（$P < 0.05$）。草本层碳储量的大致趋势为先增大后减小，成熟林草本层碳储量达到最大值，为 161.99 kg·hm^{-2}；过熟林草本层碳储量最小，为 23.65 kg·hm^{-2}。

2.3 枯落物层碳储量

由表 4 可以看出，蒙古栎林不同发育阶段枯落物层碳储量分别为 4.28、4.30、7.99、1.57 t·hm^{-2}，随着林龄的增加，枯落物层碳储量呈先增大后减小的趋势，成熟林枯落物层碳储量最大，过熟林枯落物层碳储量急剧减小，与成熟林之间具有显著差异（$P < 0.05$）。

表 4　不同发育阶段蒙古栎林生态系统各组分碳储量

Table 4　Carbon storage of different components in *Q. mongolica* forest ecosystems at different development stages

龄组 Age group	植被层碳储量 Carbon storage in the vegetation layer /(t·hm^{-2})			枯落物层碳储量 Carbon storage in the litter layer /(t·hm^{-2})	土壤层碳储量 Carbon storage in the soil layer /(t·hm^{-2})		
	乔木 Tree	灌木 Shrub	草本 Herb		0 ～ 10 cm	10 ～ 20 cm	20 ～ 30 cm
幼龄林 Young forest	85.36±5.63 c	0.29±0.08 a	0.07±0.01 a	4.28±3.51 a	86.99±0.95 bc	69.67±9.34 ab	49.60±5.25 a
中龄林 Half-mature forest	99.45±7.58 c	0.14±0.03 a	0.14±0.06 a	4.30±0.96 a	120.46±14.96 ab	62.13±12.28 b	46.08±6.61 a
成熟林 Mature forest	142.66±5.95 b	0.43±0.19 a	0.16±0.05 a	7.99±4.12 a	74.19±14.54 c	43.48±8.19 b	31.36±6.89 a
过熟林 Overmature forest	196.36±13.64 a	0.09±0.02 b	0.24±0.11 a	1.57±1.92 b	133.84±15.61 a	98.10±6.77 a	60.43±13.43 a

2.4　土壤层碳储量

在 0 ～ 10 cm 的土层中，成熟林与过熟林土壤层碳储量差异显著（$P < 0.05$），其他林龄间差异不显著；在 10 ～ 20 cm 的土层中，过熟林与中龄林和成熟林的土壤层碳储量差异显著（$P < 0.05$），其他林龄间差异不显著；在 20 ～ 30 cm 的土层中，所有林龄土壤层碳储量均不具有显著差异。在不同深度的土层中，土壤碳储量的变化规律基本一致，均呈先增大后减小再增大的趋势，成熟林的土壤碳储量最低（表 4），幼龄林、中龄林、成熟林和过熟林土壤层（0 ～ 30 cm）碳储量分别为 206.26、228.67、149.03、292.37 t·hm^{-2}。

2.5　生态系统碳储量

辽东山区蒙古栎林幼、中、成、过熟林生态系统碳储量分别为 296.13、332.65、300.72、503.55 t·hm^{-2}（图 1），从幼龄林到过熟林林分碳储量大致呈逐渐增加趋势，从幼龄林到成熟林处于碳储量积累阶段，并无显著差异，与过熟林差异显著（$P < 0.05$），其他龄组之间差异不显著。

由图 2 可以看出，从幼龄林到过熟林，在不同林龄的林分中，土壤层（0 ～ 30 cm）碳储量均占最大比例，在幼龄林和中龄林中，占比约为 69.7%。随着林龄的增大，植被层碳储量逐渐增加，土壤碳储量占比减小，但依然保持在 50.0% 以上。植被层碳储量占比随林龄的增大呈先增大后减小的趋势，在成熟林中占比最大，为 47.8%。枯落物层碳储量最小，占比在 0.4% ～ 2.6% 之间。

2.6　生态系统碳储量影响因素分析

采用冗余分析法量化林分结构、地形和土壤养分等环境因子对植被层碳储量和土壤层碳储量的影响（图 3）。分析结果表明，总体解释率为 88.2%，前两个主成分对总体碳储量变化的解释率为 85.98%。在所有环境因子中，土壤全磷含量对碳储量变化有极显著影响（$P < 0.01$），且与植被层碳储量呈显著正相关关系。海拔和坡向对碳储量变化有显著影响（$P < 0.05$），与植被层和土壤层碳储量均呈正相关关系，其中海拔对碳储量变化的解释率达 20.5%，是最主要的影响因素，其次为坡向和土壤全磷含量，解释率分别为 12.1% 和 3.6%。

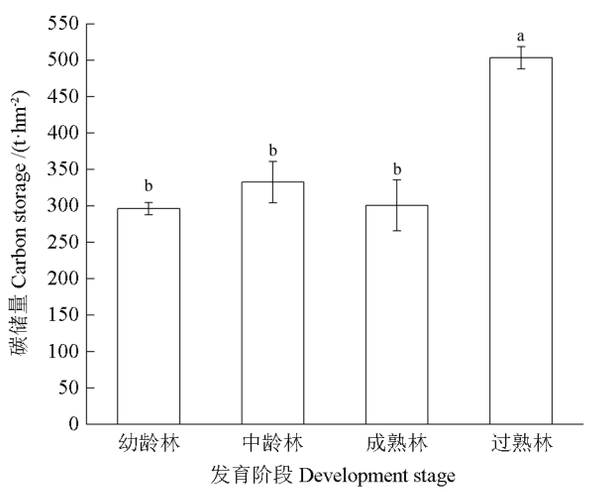


图 1　不同发育阶段蒙古栎林生态系统碳储量

Fig. 1　Carbon storage in ecosystem of *Q. mongolica* forest at different development stages

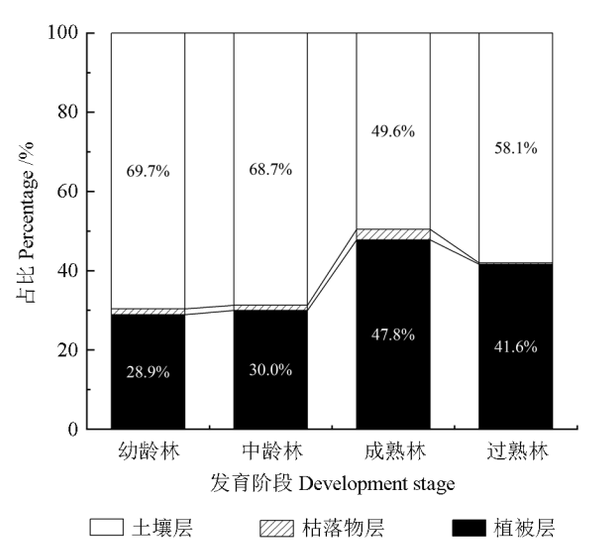
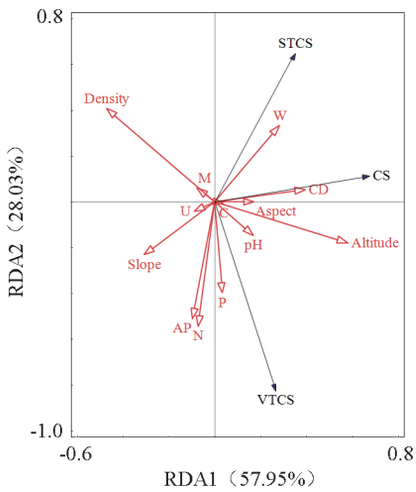


图 2　不同发育阶段蒙古栎林生态系统各组分碳储量占比

Fig. 2　Carbon storage proportions of different components in *Q. mongolica* forest ecosystems at different development stages



CS 为生态系统碳储量，STCS 为土壤层碳储量，VTCS 为植被层碳储量，Aspect 为坡向，Altitude 为海拔，Slope 为坡度，下同。
CS represents ecosystem carbon storage, STCS represents carbon stocks in the soil layer, VTCS represents carbon storage in the vegetation layer. The same below.

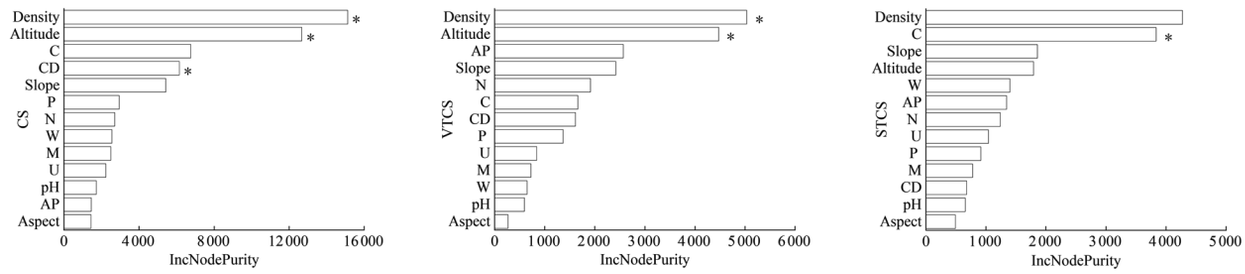
图 3　不同环境因子与碳储量的冗余分析
Fig. 3　Redundancy analysis of different environmental factors and carbon storage

3　讨　论

森林碳储量是评价森林结构和功能、体现森林生产力的关键指标，森林的固碳作用是应对当前气候变化的主要途径 [24]，因此，准确量化林分碳储量不仅能为预测森林生态系统碳汇潜力提供数据支撑，还能为科学经营森林和实现森林资源的可持续管理提供理论依据。本研究针对辽东山区蒙古栎林，分别对植被层、枯落物层、土壤层以及森林生态系统的碳储量进行调查核算。结果显示，该研究区蒙古栎林乔木层碳储量变化范围为 85.36 ～ 196.36 t·hm^{-2}，而黑龙江省北部蒙古栎林乔木层碳储量为 59.36 ～ 94.04 t·hm^{-2}[25]。植被层碳储量变化范围为 85.72 ～ 196.69 t·hm^{-2}，约为北方（48 ～ 57 t·hm^{-2}）和东北地区（42.07 ～ 93.19 t·hm^{-2}）森林植被碳储量的 1.8 ～ 3.5 倍和 2.0 ～ 2.1 倍 [26]。究其原因，一方面是由于本研究选取幼龄林为 26 ～ 28 a，接近中龄林，这使得幼龄林乔木在生长过程中积累了更多的碳，导致其碳储量相对偏高。另一方面，本研究的试验样地林分密度相对较小，树木之间的竞争压力较小，养分和生长空间较大，使得林木胸径普遍较大，单木生物量较高，从而导致乔木层碳储量普遍偏高。在草本和枯落物碳储量方面，本研究结果表明，其随林龄增加呈先增加后降低的趋势，这与贾汉森等 [27] 和魏红等 [28] 的研究结果一致。在森林发育早期，草本植物随着林分环境的改善逐渐丰富，枯落物积累也逐渐增加，然而随着林龄的增加，林分逐渐郁闭，林下光照和养分竞争加剧，抑制了草本植物的生长，枯落物分解速率加快，导致碳储量降低。然而，本研究中灌木层碳储量较低，这是由于林分密度较小，树木生长空间较大，为了获取更多的光照冠层生长得更加茂密，林分郁闭度较高，导致下层灌木得不到足够的光照和养分，生长受到抑制。枯落物碳储量虽占比较小，但也是生态系统中的重要组成部分，枯落物覆盖于土壤表层，其分解作用与改善土壤理化性质以及全球碳循环息息相关 [29]。在本研究中，枯落物层碳储量占比约为 0.4% ～ 2.6%，与其他研究的结果一致 [30-31]。此外，由于在取样时没有适宜的近熟林样方，所以在本研究中并未对近熟林的碳储量进行比较分析，但在相似的研究中 [10,32-34]，近熟林的碳储量介于中龄林与成熟林之间，不同林龄的碳储量大小表现为幼龄林＜中龄林＜近熟林＜成熟林＜过熟林。构建蒙古栎林不同林龄的林分尺度生物量方程，进而提高辽东山区蒙古栎林碳储量的估算精度或许是未来的研究方向。

在对不同环境因子对生态系统碳储量变化的冗余分析中，海拔、坡向和土壤全磷含量是主要影响因子，解释率分别为 20.5%、12.1% 和 3.6%。为进一步探究碳储量的影响因素，使用 R 软件中的“randomForest”包对环境因子进行随机森林回归分析，并使用“rfPermute”包进行显著性检验，选择 IncNodePurity 值作为环境因子重要性的评估标准。结果显示各环境因子对生态系统、植被层、土壤层碳储量的总体解释率为 40.37%、24.02% 和 17.21%，其中林分密度、海拔和郁闭度是生态系统碳储量的主要影响因子（图 4），林分密度和海拔是植被层碳储量的主要影响因子，密集度是土壤层碳储量的主要影响因子，随机森林结果与冗余分析结果相互佐证。海拔是影响辽东山区蒙古栎林生态系统碳储量的最主要因子，研究表明 [35]，在小范围内，海拔和坡向等环境因子会影响生态系统碳储量，随着海拔升高，温度逐渐降低，在影响植被生长的同时，也会限制土壤有机碳的分解，因此有利于碳储量的积累。

此外，在冗余分析中，还有一些环境因子的 *P* 值与显著的临界值非常接近，如：林分密度（Density）、土壤有效磷含量（AP）、pH 值，它们对碳储量变化的解释率分别为 13.1%、12.1% 和 6.2%，也是不可忽视的环境因子，这也与其他研究的结果相似 [10]。其中，林分密度、土壤有效磷含量、土壤 pH 值主要通过影响植被层进而影响生态系统碳储量。林分密度与植被层碳储量呈负相关关系，这是由于林木对光照、水源、土壤养分



* 表示差异显著（$P < 0.05$）。* means significant difference at 0.05 level.

图 4　生态系统、植被层和土壤层中环境因子的 IncNodePurity 值排序

Fig. 4　Ranking of IncNodePurity values for environmental factors in the ecosystem, vegetation layer and soil layer

的竞争关系，密度过大会抑制林木生长，长期被压制的林木无法获取足够的养分和能量来维持自身的基本生命活动，林分会发生自然稀疏，导致碳储量降低。在森林经营中，应注意林分密度，适当开展抚育间伐等经营措施。土壤全磷、有效磷含量、pH 值与植被层碳储量呈正相关，本研究试验样地的土壤呈弱酸性，有研究表明 [36]，在弱酸性至弱碱性的土壤中，氮磷钾等营养元素活性更高，而磷元素是植被生长发育过程中的必需营养元素之一，可以起到促进植被营养吸收、提升光合效率的作用，有利于碳储量的积累。综上，为提高蒙古栎林固碳能力，在林业生产中应尽量将蒙古栎种植在高海拔的阳坡或半阳坡地区，同时应注意林地养分管护，必要时可进行林地施肥，特别是磷元素的补充。

4　结　论

辽东山区不同发育阶段蒙古栎林碳储量随着林龄的增加呈增加趋势，成熟林碳储量最大。在生态系统的各个组分中，土壤层碳储量的占比最大，其次为植被层和枯落物层。植被层中乔木层碳储量占比最大，且随着林龄的增加呈增加趋势。灌木、草本和枯落物碳储量随着林龄增加呈先增加后减小的趋势，成熟林达到最大，过熟林最小。冗余分析结果表明，海拔是影响林分碳储量变化的最主要环境因子，其次为坡向和土壤全磷含量。此外，林分密度、土壤有效磷含量和土壤 pH 值也是影响森林生态系统碳储量的关键环境因子。本研究明确了辽东山区不同发育阶段蒙古栎林碳储量的动态变化规律，揭示了影响蒙古栎林碳储量的关键环境因子，可为提升蒙古栎林的碳汇功能提供理论依据。

参考文献：

[1] 胡海波 , 刘佳璇 , 丁冬霞 , 等 . 森林固碳计量方法研究综述 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2024,44(11):58-69.
HU H B, LIU J X, DING D X, et al. A review of measurement methods of forest carbon sequestration[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2024,44(11):58-69.

[2] ALAMGIR M, AL-AMIN M. Allometric models to estimate biomass organic carbon stock in forest vegetation[J]. Journal of Forestry Research,2008,19(2):101-106.

[3] 顾纯僖 , 欧光龙 , 刘畅 , 等 . 思茅松森林碳储量动态预测研究 [J]. 西南林业大学学报 (自然科学),2024,44(6):150-157.
GU C X, OU G L, LIU C, et al. Dynamic prediction of carbon storage in *Pinus kesiya* var. *langbianensis* forest[J]. Journal of Southwest Forestry University (Natural Science),2024,44(6):150-157.

[4] 杨支齐 . 木论自然保护区喀斯特常绿落叶阔叶林群落结构与动态 [D]. 南宁 : 广西大学 ,2023.
YANG Z Q. Community structure and dynamics of evergreen deciduous broad-leaved karst forest in Mulun nature reserve[D]. Nanning: Guangxi University,2023.

[5] 邢艳秋 , 王立海 . 基于森林调查数据的长白山天然林森林生物量相容性模型 [J]. 应用生态学报 ,2007,18(1):1-8.
XING Y Q, WANG L H. Compatible biomass estimation models of natural forests in Changbai mountains based on forest inventory[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2007,18(1):1-8.

[6] WANG M, GUAN D X, HAN S J, et al. Comparison of eddy covariance and chamber-based methods for measuring CO_2 flux in a temperate mixed forest[J]. Tree Physiology,2010,30:149-163.

[7] 蒋晨阳 , 李宪 , 张涵 , 等 . 不同杉木林分类型乔木层生物量与碳储量及养分分布特征 [J]. 东北林业大学学报 ,2023,51(9):8-14.
JIANG C Y, LI X, ZHANG H, et al. Biomass, carbon storage and nutrient distribution characteristics of different *Cunninghamia lanceolata* stand types[J]. Journal of Northeast Forestry University,2023,51(9):8-14.

[8] ZHANG J, GE Y, CHANG J, et al. Carbon storage by ecological service forests in Zhejiang Province, subtropical China[J]. Forest Ecology and Management,2007,245:64-75.

[9] 刘钰 . 林分结构和立地对南方型杨树人工林碳储量的影

响 [D]. 南京 : 南京林业大学 ,2024.
LIU Y. Influence of stand structure and site condition on carbon storage in southern-type poplar plantations[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University,2024.

[10] 储炳银 . 不同林龄序列杉木人工林生态系统碳储量特征及其影响因子 [D]. 安徽 : 安徽农业大学 ,2020.
CHU B Y. Carbon storage characteristics and influencing factors of Chinese fir plantation ecosystem in different age classes[D]. Anhui: Anhui Agricultural University,2020.

[11] 张艺蓁 , 吴绍安 , 王建 , 等 . 2001—2023 年春陵水流域植被碳储量时空变化及碳汇潜力分析 [J]. 中南林业科技大学学报 , 2025,45(12):119-131,153.
ZHANG Y C, WU S A, WANG J, et al. Analysis of spatial and temporal changes in vegetation carbon stocks and carbon sink potential in Chongling water basin from 2001 to 2023[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2025,45(12):119-131,153.

[12] 常诗麒 , 李殿伟 , 徐梦昊 , 等 . 张广才岭东部地区黑线姬鼠夏秋季植物性食物分析研究 [J]. 野生动物学报 ,2024,45(4): 727-733.
CHANG S Q, LI D W, XU M H, et al. Analysis of plant food of *Apodemus agrarius* in summer and autumn in eastern Zhangguangcailing[J]. Chinese Journal of Wildlife,2024,45(4): 727-733.

[13] 董莉莉 , 汪成成 , 赵济川 , 等 . 辽东山区蒙古栎次生林天然更新特征及其影响因子分析 [J]. 西北农林科技大学学报 (自然科学版),2023,51(1):94-101.
DONG L L, WANG C C, ZHAO J C, et al. Natural regeneration characteristics and influencing factors of *Quercus mongolica* secondary forest in the mountainous area of eastern Liaoning[J]. Journal of Northwest A & F University,2023,51(1):94-101.

[14] 罗云建 , 王效科 , 逯非 . 等 . 中国主要林木生物量模型手册 [M]. 北京 : 中国林业出版社 ,2015.
LUO Y J, WANG X K, LU F. Comprehensive database of biomass regressions for China’s tree species[M]. Beijing: China Forestry Publishing House,2015.

[15] 崔芳科 , 许秀玉 , 兰成峰 , 等 . 广东海岸带木麻黄造林对植物多样性和土壤碳储量的影响 [J]. 东北林业大学学报 , 2025,53(1):120-127.
CUI F K, XU X Y, LAN C F, et al. The impact of *Casuarina equisetifolia* afforestation on plant diversity and soil carbon storage in the coastal zone of Guangdong[J]. Journal of Northeast Forestry University,2025,53(1):120-127.

[16] 万胜 , 张虎国 , 易杭 , 等 . 不同龄级及林分密度天山云杉的碳储量及其分配特征 [J]. 森林与环境学报 ,2024,44(5):521-529.
WAN S, ZHANG H G, YI H, et al. Carbon storage and distribution characteristics of *Picea schrenkiana* var. *tianschanica* natural forest at different age classes and stand densities[J]. Journal of Forest and Environment,2024,44(5):521-529.

[17] 马钦彦 , 陈遐林 , 王娟 , 等 . 华北主要森林类型建群种的含碳率分析 [J]. 北京林业大学学报 ,2002,24(5-6):100-104.
MA Q Y, CHEN X L, WANG J, et al. Carbon content rate in constructive species of main forest types in northern China[J]. Journal of Beijing Forestry University,2002,24(5-6):100-104.

[18] 陆龙龙 , 袁靓 , 范春楠 , 等 . 长白山林区主要树种含碳率及其差异分析 [J]. 北华大学学报 (自然科学版),2018,19(2): 164-169.
LU L L, YUAN L, FAN C N, et al. On carbon sequestration rates and differences of main tree species in Changbai mountain forest area[J]. Journal of Beihua University,2018,19(2):164-169.

[19] 任毅华 . 秦岭火地塘林区主要森林类型碳汇功能研究 [D]. 杨凌 : 西北农林科技大学 ,2012.
REN Y H. Carbon sequestration of main forest types at Huoditang forest region in the Qinling mountains[D]. Yangling: Northwest A & F University,2012.

[20] 鲁姝月 , 张小梅 , 罗可馨 , 等 . 不同立地类型的柏木人工林空间结构分析 [J]. 森林与环境学报 ,2024,44(5):511-520.
LU S Y, ZHANG X M, LUO K X, et al. Spatial structure analysis of *Cupressus funebris* plantations of different site types[J]. Journal of Forest and Environment,2024,44(5):511-520.

[21] 曹雨婷 , 叶生晶 , 张超 , 等 . 大同山杉木人工林林分空间结构与种内竞争关系 [J]. 东北林业大学学报 ,2024,52(5):8-12,18.
CAO Y T, YE S J, ZHANG C, et al. Spatial structure of forest stand and intra-specific competition in the *Cunninghamia lanceolata* plantation in Datong mountain[J]. Journal of Northeast Forestry University,2024,52(5):8-12,18.

[22] 付翠林 , 汪洋 , 孙林山 , 等 . 柏木人工林空间结构特征及其评价 [J]. 湖南生态科学学报 ,2022,9(1):17-26.
FU C L, WANG Y, SUN L S, et al. Spatial structure characteristics and evaluation of *Cupressus funebris* plantations[J]. Journal of Hunan Ecological Science,2022,9(1):17-26.

[23] 冯悦 , 岳永杰 , 赵鹏武 . 碳中和愿景下森林碳储量核算及固碳潜力评价研究进展 [J]. 内蒙古农业大学学报 (自然科学版), 2024,45(2):93-100.
FENG Y, YUE Y J, ZHAO P W. Research progress in accounting for forest carbon storage and evaluating carbon sequestration potential evaluation under the vision of carbon neutrality[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition),2024,45(2):93-100.

[24] 吕浩 , 彭春良 , 吴惠俐 , 等 . 森林生态系统不同碳库碳储量估算方法综述 [J]. 湖南林业科技 ,2022,49(6):90-98.
LYU H, PENG C L, WU H L, et al. A review of methods to

estimate carbon storage of forest ecosystems[J]. Hunan Forestry Science & Technology,2022,49(6):90-98.

[25] 王长龙 , 任生 , 陈晓才 . 森林火灾后蒙古栎林碳素分布及储量的分析 [J]. 吉林林业科技 ,2010,39(1):1-4,7.
WANG C L, REN S, CHEN X C. Carbon amount and distribution of *Querus mongolica* forest after fire[J]. Jilin Forestry Science and Technology,2010,39(1):1-4,7.

[26] 董莉莉 , 刘红民 , 汪成成 , 等 . 间伐对蒙古栎次生林生态系统碳储量的短期和长期影响 [J]. 沈阳农业大学学报 ,2019,50(5):614-620.
DONG LL, LIU H M, WANG C C, et al. Short-term and long-term effects of thinning on carbon storage of *Quercus mongolica* secondary forests[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2019,50(5):614-620.

[27] 贾汉森 , 段劼 , 马履一 , 等 . 不同林龄刺槐人工林碳储量及分配规律 [J]. 安徽农业大学学报 ,2017,44(4):636-642.
JIA H S, DUAN J, MA L Y, et al. Characteristics of carbon storage and sequestration in different age *Robinia psedudoacia* plantations[J]. Journal of Anhui Agricultural University,2017, 44(4):636-642.

[28] 魏红 , 满秀玲 . 中国寒温带不同林龄白桦林碳储量及分配特征 [J]. 植物生态学报 ,2019,43(10):843-852.
WEI H, MAN X L. Carbon storage and its allocation in *Betula platyphylla* forests of different ages in cold temperate zone of China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology,2019,43(10):843-852.

[29] 郑世伟 , 江洪 . 氮沉降对森林生态系统影响的研究进展 [J]. 浙江林业科技 ,2014,34(2):56-64.
ZHENG S W, JIANG H. Advances on the impact of nitrogen deposition on forest ecosystems[J]. Journal of Zhejiang Science and Technology,2014,34(2):56-64.

[30] 阳晶晶 . 河北平泉地区不同林龄油松人工林碳储量研究 [D]. 北京 : 北京林业大学 ,2012.
YANG J J. Carbon storage of *Pinus tabulaeformis* plantation at different stand ages of Hebei Province[D]. Beijing: Beijing Forestry University,2012.

[31] 明安刚 , 贾宏炎 , 田祖为 , 等 . 不同林龄格木人工林碳储量及其分配特征 [J]. 应用生态学报 ,2014,25(4):940-946.
MING A G, JIA H Y, TIAN Z W, et al. Characteristics of carbon storage and its allocation in *Erythrophleum fordii* plantations with different ages[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014,25(4):940-946.

[32] 巨文珍 . 不同年龄长白落叶松人工林生物量及碳储量研究 : 以伊春市东折棱河林场为例 [D]. 北京 : 北京林业大学 ,2010.
JU W Z. Age effects on stand biomass and carbon storage of *Larix olgensis* plantation: a case study in Dongzhelenghe forestry station in Yichun City[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2010.

[33] 伊丽茜 . 内蒙古大兴安岭北部局域尺度兴安落叶松林碳储量研究 [D]. 呼和浩特 : 内蒙古农业大学 ,2022.
YI L Q. Carbon storage of larch forests at local scale in northern Greater Hinggan mountains, Inner Mongolia[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University,2022.

[34] 史丽娟 , 吕海涛 , 张树梓 , 等 . 冀北山地蒙古栎天然林林分结构特征 [J]. 东北林业大学学报 ,2025,53(2):25-32,42.
SHI L J, LYU H T, ZHANG S Z, et al. Structural characteristics of *Quercus mogolica* natural forest stands in the northern Hebei mountain area[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2025,53(2):25-32,42.

[35] 李妙宇 , 上官周平 , 邓蕾 . 黄土高原地区生态系统碳储量空间分布及其影响因素 [J]. 生态学报 ,2021,41(17):6786-6799.
LI M Y, SHANGGUAN Z P, DENG L. Spatial distribution of carbon storage in the terrestrial ecosystems and its influencing factors on the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica,2021, 41(17):6786-6799.

[36] 道如娜 . 辽东山地水源涵养林植物多样性及其与土壤养分关系的研究 [D]. 呼和浩特 : 内蒙古农业大学 ,2014.
DAO R N. Research on plant species diversity of water conservation forest and its relationship with soil nutrients in Liaodong mountains[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University,2014.

[本文编校：吴　彬]