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

大兴安岭多年冻土区乔灌木地下生物量特征

林禹彤 黄紫颜 李佳诺 王添珍 庞婉智 郭蒙

Belowground biomass characteristics of trees and shrubs in the permafrost region of the Da Xing'an Mountains

Lin Yutong, Huang Ziyan, Li Jianuo, Wang Tianzhen, Pang Wanzhi, Guo Meng

引用本文:
林禹彤, 黄紫颜, 李佳诺, 王添珍, 庞婉智, 郭蒙. 大兴安岭多年冻土区乔灌木地下生物量特征[J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(10):37–46. doi: 10.12171/j.1000–1522.20260177
Lin Yutong, Huang Ziyan, Li Jianuo, Wang Tianzhen, Pang Wanzhi, Guo Meng. Belowground biomass characteristics of trees and shrubs in the permafrost region of the Da Xing'an Mountains[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(10):37–46. doi: 10.12171/j.1000–1522.20260177

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20260177

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

晋西黄土区油松林土壤碳氮磷计量特征对林龄和密度的响应

Response of soil carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometric characteristics of *Pinus tabuliformis* forests to stand age and density in the Loess Plateau region of western Shanxi Province, northern China

北京林业大学学报, 2024, 46(12): 30–40. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240188

东北胡桃楸次生林生长随林龄和林分密度的变化规律

Growth patterns of *Juglans mandshurica* secondary forest with stand age and stand density in Northeast China

北京林业大学学报, 2024, 46(6): 10–19. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230171

黄土丘陵区不同林龄刺槐养分利用特征和林分质量研究

Nutrient utilization characteristics and stand quality of *Robinia pseudoacacia* at different stand ages in the loess hilly region of northwestern China

北京林业大学学报, 2023, 45(12): 90–99. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230058

林龄对杉木叶片质量面积异速生长关系的影响

Effects of stand age on allometric relationship between leaf mass and leaf area in *Cunninghamia lanceolata*

北京林业大学学报, 2026, 48(2): 125–131. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250395

寒温带不同林龄白桦林叶片碳氮磷含量及生态化学计量特征

Leaf carbon, nitrogen and phosphorus contents and ecological stoichiometry characteristics of *Betula platyphylla* forests of different ages in cold and temperate regions

北京林业大学学报, 2025, 47(11): 77–84. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250207

晋西黄土残塬沟壑区刺槐林土壤入渗特征及影响因素分析

Soil infiltration characteristics and influencing factors of *Robinia pseudoacacia* plantation in the loess gully region of western Shanxi Province, northern China

北京林业大学学报, 2021, 43(1): 77–87. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200122

DOI:10.12171/j.1000−1522.20260177

大兴安岭多年冻土区乔灌木地下生物量特征

林禹彤　黄紫颜　李佳诺　王添珍　庞婉智　郭　蒙
（东北师范大学地理科学学院长白山地理过程与生态安全教育部重点实验室，吉林 长春 130024）

摘要:【目的】量化大兴安岭多年冻土区乔、灌木地下生物量，明确其空间分布特征，解析乔、灌木地下生物量的种间差异及其对林龄、地形和冻土类型的响应规律。**【方法】**基于样方实地调查数据，采用异速生长方程结合根冠比法估算乔木地下生物量，利用直接挖掘法测定灌木地下生物量，并统计分析不同坡度、林龄和冻土类型条件下乔、灌木地下生物量特征。**【结果】**(1)大兴安岭多年冻土区乔木地下生物量估算平均值为 10.92 t/hm^2，灌木地下生物量实测平均值为 0.64 t/hm^2，且乔、灌木地下生物量均存在极显著种间差异($P < 0.001$)；(2)乔、灌木地下生物量对林龄的响应存在分化：乔木地下生物量随龄组增加显著积累，表现为成熟林 > 近熟林 > 中龄林 > 幼龄林($P < 0.001$)，而灌木地下生物量受龄组影响不显著($P = 0.33$)；(3)坡度对乔、灌木地下生物量的影响显著但规律不同：乔木表现为斜坡 > 缓坡 > 平坡($P < 0.001$)，灌木表现为缓坡 > 斜坡 > 平坡($P < 0.001$)；(4)多年冻土类型对乔木地下生物量的整体影响不显著，但具有树种依赖性，兴安落叶松和桦树在稀疏岛状冻土区显著偏低；灌木地下生物量随冻土退化呈递减趋势($P < 0.001$)，具体表现为大片连续多年冻土区 > 大片−岛状冻土区 > 稀疏岛状冻土区。**【结论】**乔木与灌木地下生物量对坡度、林龄和冻土类型的响应存在明显差异。未来多年冻土区地下碳库评估需区分乔灌、木功能群分别核算，并将林下灌木层的碳库动态纳入区域碳收支评估，以提升森林碳储量估算精度。

关键词：根冠比；空间分异；多年冻土类型；林龄；地形
中图分类号：S718.5　**文献标志码：**A　**文章编号：**1000−1522(2026)10−0037−10
引文格式：林禹彤，黄紫颜，李佳诺，等. 大兴安岭多年冻土区乔灌木地下生物量特征［J］. 北京林业大学学报，2026，48(10)：37−46. Lin Yutong, Huang Ziyan, Li Jianuo, et al. Belowground biomass characteristics of trees and shrubs in the permafrost region of the Da Xing'an Mountains［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(10): 37−46.

Belowground biomass characteristics of trees and shrubs in the permafrost region of the Da Xing'an Mountains

Lin Yutong　Huang Ziyan　Li Jianuo　Wang Tianzhen　Pang Wanzhi　Guo Meng
(Ministry of Education Key Laboratory of Geographical Processes and Ecological Security in Changbai Mountains, School of Geographical Sciences, Northeast Normal University, Changchun 130024, Jilin, China)

Abstract:［**Objective**］This study aims to quantify the belowground biomass (BGB) of trees and shrubs in the permafrost region of the Da Xing'an Mountains, clarify their spatial distribution patterns, and analyze interspecific differences in BGB and their responses to stand age, topography, and permafrost type.［**Method**］Based on field quadrat survey data, tree BGB was estimated using allometric equations combined with the root-to-shoot ratio method, whereas shrub BGB was determined via direct excavation. The BGB characteristics of trees and shrubs were statistically analyzed across different slope gradients, stand ages, and permafrost types.［**Result**］(1) The mean tree BGB in the permafrost region of the Da Xing'an Mountains was 10.92 t/ha, while the mean measured shrub BGB was 0.64 t/ha. Both tree and shrub BGB exhibited

收稿日期: 2026−04−14　**修回日期:** 2026−07−31
基金项目: 国家自然科学基金“双碳”专项子课题(32241033)，国家自然科学基金面上项目(42371098)。
第一作者: 林禹彤。主要研究方向：景观生态学。Email: linyutong100@nenu.edu.cn　地址：130024 吉林省长春市人民大街 5268 号东北师范大学地理科学学院。
责任作者: 郭蒙，博士生导师，教授。主要研究方向：景观生态学。Email: guom521@nenu.edu.cn　地址：同上。
本刊网址: https://j.bjfu.edu.cn; https://journal.bjfu.edu.cn

highly significant interspecific differences ($P < 0.001$). (2) Tree and shrub BGB exhibited divergent responses to stand age: Tree BGB increased significantly with age class, following the order mature forest > near-mature forest > middle-aged forest > young forest ($P < 0.001$), whereas shrub biomass was not significantly affected by stand age class ($P = 0.33$). (3) Slope gradient significantly influenced both tree and shrub BGB, albeit with contrasting patterns: Tree BGB followed the order steep slope > gentle slope > flat slope ($P < 0.001$), while shrub BGB followed the order gentle slope > steep slope > flat slope ($P < 0.001$). (4) Permafrost type had no significant overall effect on tree BGB, but the effect was species-dependent, with both larch and birch showing significantly lower values in the sparse island permafrost zone. In contrast, shrub BGB decreased significantly with permafrost degradation ($P < 0.001$), specifically in the order: predominantly continuous permafrost zone > extensive-discontinuous permafrost zone > sparse island permafrost zone. [**Conclusion**] BGB distribution is primarily influenced by slope, stand age, and permafrost type, with marked differences in the response patterns of trees and shrubs. Notably, heterogeneity in root-to-shoot ratio sources across species and methodological inconsistencies between tree and shrub biomass estimation may introduce uncertainties, warranting future validation and standardization of localized root-to-shoot equations. This study addresses the critical gap in the scarcity of field-measured data for shrub-layer belowground biomass in this region. Furthermore, future carbon pool assessments in permafrost regions should separately account for tree and shrub functional groups, and integrate the carbon pool dynamics of the understory shrub layer into regional carbon budgets to improve the accuracy of forest carbon stock estimation.

Key words: root-to-shoot ratio; spatial differentiation; permafrost type; stand age; topography

在全球气候变暖背景下，陆地生态系统碳循环过程及其气候反馈效应已成为全球变化研究的重要议题。森林作为陆地生态系统的核心要素，在调节全球碳平衡及减缓大气 CO_2 浓度升高方面发挥着不可替代的作用，是全球持续且稳定的碳汇[1]。森林在全球碳循环中占据关键地位，尽管森林仅占全球陆地面积的约 27%，却储存了全球约 80% 的地上碳和约 40% 的土壤碳[2]。1990 年以来，全球森林生态系统一直维持着显著而持续的净碳汇功能[1]。准确量化森林生物量格局及其分配特征，是明确森林碳汇能力的基础，对于揭示气候变化与生态系统碳循环的相互作用具有重要意义。

长期以来，森林生物量研究多聚焦于地上生物量，主要采用样方调查、遥感监测等方法，相关估算和反演技术已较为成熟[3−5]，且目前已有多种地上生物量遥感产品。地下生物量通常以地表为界，指地表以下的所有生物量[6]，作为森林总生物量的重要组成部分，其在土壤有机碳积累及碳循环调节中具有关键作用[7]。然而，由于根系挖掘采样破坏性强、工作难度大，地下生物量数据远少于地上生物量，导致区域尺度上森林地下生物量的空间格局及驱动机制仍不清楚，尤其是乔木层与灌木层地下生物量的特征差异及其对环境梯度的响应，目前尚缺乏系统比较与定量分析。

大兴安岭地区位于我国东北部，是我国唯一的中高纬度多年冻土区，也是唯一的北方针叶林分布区。受多年冻土影响，该区域植被地下生物量特征区别于其他林区，乔木根系以横向蔓延为主，分布较浅。现有研究已对中国东北地区森林生物量格局及其影响因素进行了系统研究[8]，在大兴安岭特定局域尺度上的应用效果仍有待进一步验证。已有研究表明，在气候变暖背景下，东北多年冻土区正经历快速退化，多年冻土面积显著减少，冻土连续性降低或向季节冻土转化[9]；在大兴安岭地区，由于气候变化和林火扰动，冻土退化主要表现为活动层加深、地温升高和多年冻土南界北移[10]，多年冻土退化已导致森林、湿地退化等生态问题[11]。因此，在多年冻土退化背景下研究乔灌木地下生物量的空间分异及其环境响应，具有鲜明的区域代表性和现实紧迫性。

目前，大兴安岭地区的相关研究主要集中于地上生物量的遥感估算[12]、森林碳储量评估[13]以及火烧迹地植被恢复过程等方面[14]。涉及地下生物量的研究多以单一树种或乔木层根系为主[15]，灌木层地下生物量大多被忽略。尽管灌木层在群落总生物量中的占比通常较小，但在高纬度北方森林中，林下灌木对树木更新、养分循环和土壤碳积累具有重要生态功能，在多年冻土退化与植被演替过程中可能发挥关键作用。因此，系统比较乔木层与灌木层地下生物量的差异，并综合林龄、地形和冻土退化程度 3 类因子，揭示其对地下生物量空间分布的影响规律，

不仅能够弥补当前研究在对象层次和驱动机制上的不足，也可为高纬度冻土森林碳库评估、生态恢复与适应性经营管理提供科学依据。

1　研究区概况与研究方法

1.1　研究区概况

大兴安岭（50°06′～53°34′N，121°11′～127°00′E）位于我国地势第二、三级阶梯过渡带，北隔黑龙江与俄罗斯相望，东南毗邻小兴安岭及松嫩平原。该区域地势西高东低，山脉呈东北—西南走向，地貌以中低山为主。气候属寒温带大陆性季风气候，冬季寒冷漫长、晴朗干燥，夏季短促温热、降水集中。依据多年冻土分布的连续性，自北向南可划分为大片连续多年冻土区（冻土面积占比 > 70%）、大片−岛状多年冻土区（过渡类型，占比 50%～60%）和稀疏岛状多年冻土区（占比 10%～30%）[16]。

该区域植被以森林为主。森林生态系统以北方针叶林为主体，优势建群种为兴安落叶松（*Larix gmelinii*），伴生樟子松（*Pinus sylvestris* var. *mongolica*）等针叶树种。落叶阔叶林主要由蒙古栎（*Quercus mongolica*）、白桦（*Betula platyphylla*）和山杨（*Populus davidiana*）等构成[17]。林下灌木层发育良好，以胡枝子（*Lespedeza bicolor*）、兴安杜鹃（*Rhododendron dauricum*）等为优势种。本研究选取漠河、呼中、呼玛 3 个县区作为研究区，涵盖大兴安岭多年冻土区南北向与东西向的空间梯度（图 1）。

1.2　野外调查数据

2022 和 2023 年夏秋季节对研究区开展野外样方调查，共设置 1 300 个样方，每个样方面积为 25 m × 25 m，详细记录样方的经纬度、海拔和坡度等基本信息。对样方内胸径大于 5 cm 的乔木进行每木检尺，记录每株乔木的树种、胸径和树高等指标。在样方内的 4 个顶点分别设置 2 m × 2 m 的灌木样方，记录灌木种类和株数；从每种灌木中选取 3 株标准木，采用破坏取样法收割地上生物量，装入自封袋并标记后带回室内进行后续分析。

1.3　乔木地下生物量计算

乔木地下生物量是森林地下碳库的核心组成部分。鉴于完整挖掘根系会对森林生态系统造成不可逆破坏，且在区域尺度上难以实施，本研究采用间接方法进行估算：基于野外实测胸径和树高，利用异速生长方程计算单株地上生物量，再依据文献记载的各树种根冠比推算地下生物量。

异速生长方程描述了林木形态指标（胸径、树高）与生物量之间的幂函数关系，是森林生物量估算的核心方法，已广泛应用于区域尺度森林碳库评估研究。本研究依据现行 GB/T 43648—2024《主要树种立木生物量模型与碳计量参数》[18]中提供的异速生长方程及参数，估算单株乔木地上生物量。

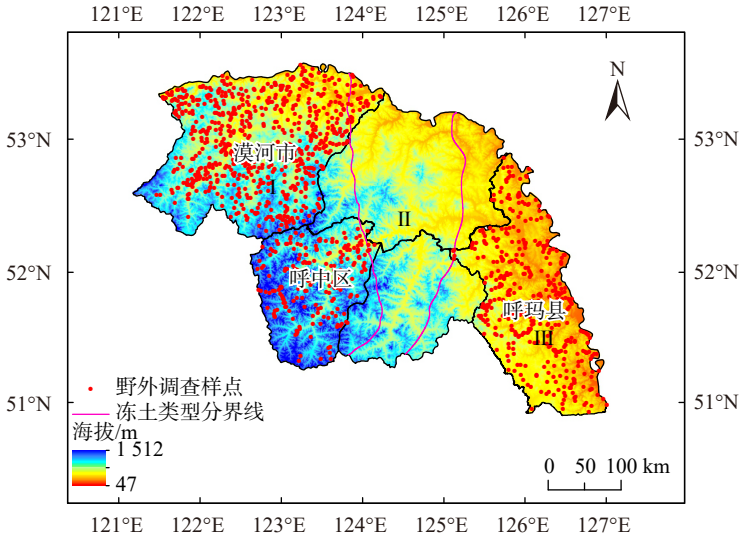
$$M_A = a_0 D^{a_1} H^{a_2} \tag{1}$$

式中：M_A 表示地上生物量估计值（kg）；D 为林木胸径（cm）；H 为林木树高（m）；a_0、a_1、a_2 为模型参数。

受气候、土壤、植被类型及物种组成等区域差异影响，异速生长方程的应用需采用本地化参数。本研究采用根冠比法推算乔木地下生物量，即通过地下生物量与地上生物量的比例关系实现无损估算。

$$M_{BGB} = M_{AGB} \times (R/S) \tag{2}$$

式中：M_{BGB} 为乔木地下生物量；M_{AGB} 为乔木地上生物量；R/S 为对应树种的根冠比。本研究各树种根冠



I、II、III分别代表大片连续多年冻土区、大片−岛状多年冻土区及稀疏岛状多年冻土区。

图 1　研究区位置及样方分布

Fig. 1　Location of the study area and distribution of sampling quadrats

比参数均来源于大兴安岭及东北林区基于全株挖掘法的实测结果，具有明确的区域适用性。其中，白桦根冠比随径阶增大呈递减趋势：6 ~ 10 cm 径阶为 0.145 ± 0.044，10 ~ 14 cm 径阶为 0.109 ± 0.020，14 ~ 18 cm 径阶为 0.093 ± 0.009[19]；其余树种采用单一均值，蒙古栎根冠比为 0.36[20]，兴安落叶松为 0.23[21]，樟子松为 0.27[22]，红皮云杉（*Picea koraiensis*）为 0.312[23]，山杨为 0.196[23]，榆树（*Ulmus pumila*）为 0.325[23]，黑桦（*Betula davurica*）为 0.28[23]。

为评估单一均值根冠比的可靠性，以白桦为例进行敏感性检验：将分段根冠比结果作为基准，比较其与单一均值（取各径阶加权平均）的差异。结果显示，二者偏差仅为 8.6%，表明其他树种采用单一均值根冠比进行估算的结果具有可信度。

1.4 灌木地下生物量的计算

本研究共设置 1 300 个乔木样方，其中 850 个样方具有完整灌木调查数据，用于灌木生物量统计分析。鉴于灌木植株个体较小、根系分布较浅，全株挖掘对生态系统扰动有限，且能较准确获取灌木生物量数据，本研究从上述样方中选取 60 个样方，对代表性灌木标准木采用直接挖掘法获取其地上和地下部分。

将根系置于 65 ℃ 恒温烘箱中烘干至质量恒定，使用电子天平测定地下部分干质量，并计算灌木根冠比。样方尺度灌木地下生物量推算过程如下：在 2 m × 2 m 灌木样方内，记录各灌木物种株数，并选取代表性标准木称鲜质量。利用 850 个样方数据中获得的灌木物种平均干鲜比，将标准木鲜质量换算为地上生物量；利用标准木直接挖掘法测得根冠比，由地上生物量推算地下生物量。将小样方内各灌木物种所有个体的地下生物量求和后，除以小样方面积（4 m^2），折算为该物种单位面积地下生物量。

1.5 统计分析

基于胸径–年龄关系[24]，将龄组划分为幼龄林（≤ 40 年）、中龄林（41 ~ 80 年）、近熟林（81 ~ 100 年）和成熟林（≥ 100 年）。鉴于数据经正态性检验呈非正态分布，采用 Kruskal-Wallis 检验进行组间比较[25]，地下生物量之间的关联采用 Spearman 秩相关分析。所有统计分析均在 R 4.3.1 环境中完成。

按坡度、林龄和冻土类型分层后，各分组下不同乔木树种的样方数量统计如下。在坡度分组中，兴安落叶松在平坡（≤5°）、缓坡（5° ~ 15°）和斜坡（>15°）的样方数分别为 391、513 和 107，桦树分别为 266、411 和 60，蒙古栎分别为 31、75 和 6，樟子松分别为 37、88 和 45，杨树分别为 90、163 和 34。在林龄分组中，兴安落叶松在幼龄林、中龄林、近熟林和成熟林的样方数分别为 118、543、186 和 164，樟子松分别为 7、76、40 和 47，蒙古栎分别为 30、52、15 和 15，桦树分别为 107、402、134 和 94，杨树分别为 43、136、50 和 58。在冻土类型分组中，兴安落叶松在大片连续、大片–岛状和稀疏岛状冻土区的样方数分别为 709、27 和 275，樟子松分别为 143、2 和 25，桦树分别为 466、24 和 247，杨树分别为 134、7 和 146；蒙古栎仅在稀疏岛状冻土区有 112 个样方，无大片连续及大片–岛状冻土区样方。

2 结果与分析

2.1 地下生物量的整体特征

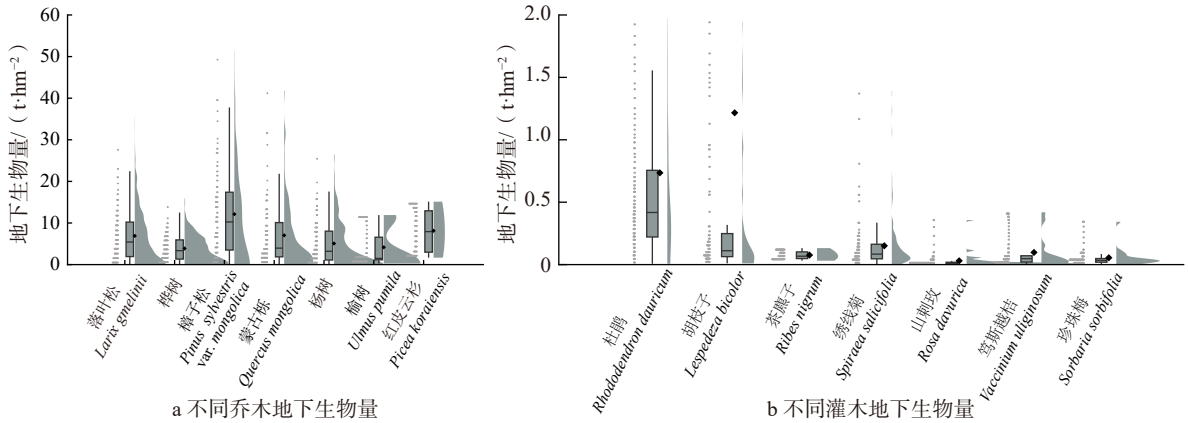
研究区样方地下生物量均值为（11.42 ± 7.38）t/hm^2。其中，乔木地下生物量分布范围为 0.04 ~ 51.40 t/hm^2，平均值为 10.92 t/hm^2；灌木地下生物量平均值为 0.64 t/hm^2。

Kruskal-Wallis 非参数检验表明，不同乔木树种和灌木的地下生物量差异均达到极显著水平（$P < 0.001$）。在乔木中，樟子松的地下生物量平均值（12.10 t/hm^2）高于其他树种，且分布跨度最大（0.12 ~ 51.40 t/hm^2）；红皮云杉、蒙古栎和兴安落叶松次之；桦树均值最低（3.87 t/hm^2）。在灌木中，胡枝子均值最高（1.22 t/hm^2），但中位数低于杜鹃（0.45 t/hm^2）；杜鹃的中位数最大，均值却非最高。这一差异反映了二者生物量分布格局的不同：胡枝子仅在少数样方中生物量极高，从而拉高了整体均值；而杜鹃分布更为广泛，在多数样方中保持着稳定且较高的地下生物量，因而中位数最高。杜鹃在灌木总地下生物量中占比最大，山刺玫（*Rosa davurica*）平均值最低（图 2）。

2.2 不同坡度乔灌木地下生物量特征

不同坡度条件下，乔灌木地下生物量差异均达到极显著水平（$P < 0.001$），表明坡度对研究区植被地下生物量具有极显著的调控作用。乔木地下生物量整体表现为斜坡（15.73 t/hm^2）> 缓坡（11.17 t/hm^2）> 平坡（9.29 t/hm^2）的变化规律（图 3）。这表明，尽管平坡地形相对平整，但由于其通气透水性较差且根系伸展空间受限，生物量积累能力有限。灌木地下生物量随坡度变化呈缓坡 > 斜坡 > 平坡的分布规律。与乔木的变化趋势存在差异，这主要归因于坡度特征通过影响光热及土壤条件进而调控灌木地下生物量的累积。此外，乔灌木地下生物量之间呈极微弱正相关（$r_s = 0.086$，$P = 0.012$），说明二者的关联在实际生态学意义上较弱，在坡度梯度上的空间分布相对独立。

不同坡度条件下，各乔木树种的地下生物量呈现差异化变化趋势（图 4）。总体而言，针叶树的地下



桦树包括白桦（*Betula platyphylla*）和黑桦（*Betula davurica*）；杨树包括山杨和甜杨（*P. suaveolens*）。下同。

图 2　不同乔木与灌木的地下生物量

Fig. 2　Belowground biomass of different tree and shrub species

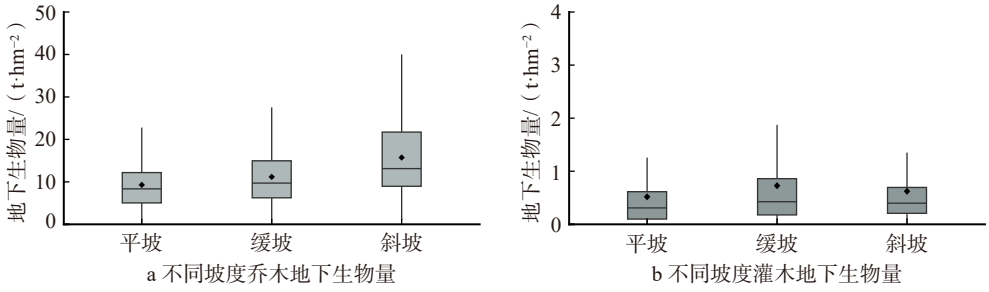


图 3　不同坡度下乔木与灌木的地下生物量

Fig. 3　Belowground biomass of trees and shrubs across different slope gradients

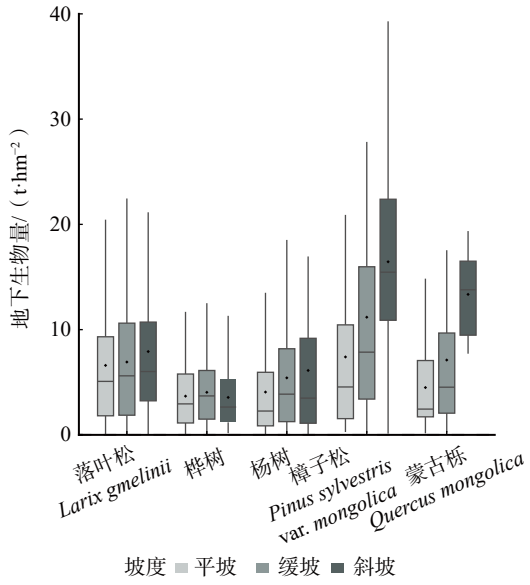


图 4　不同坡度下不同树种地下生物量对比

Fig. 4　Comparison of belowground biomass among different tree species across slope gradients

生物量高于阔叶树，且斜坡处的地下生物量高于缓坡和平坡。樟子松作为深根型针叶树种，其地下生物量随坡度升高增幅最大，整体水平最高，具体表现为斜坡（17.90 t/hm^2）> 缓坡（11.20 t/hm^2）> 平坡（7.40 t/hm^2），且分别高于其他树种。兴安落叶松地下生物量与坡度呈正相关，具体表现为斜坡（7.92 t/hm^2）> 缓坡（6.92 t/hm^2）> 平坡（6.60 t/hm^2），各坡度生物量分布相对集中，离散程度较低。杨树地下生物量随坡度升高持续增加，具体表现为斜坡（6.12 t/hm^2）> 缓坡（5.42 t/hm^2）> 平坡（4.07 t/hm^2）；受立地条件异质性影响，其斜坡与缓坡数据的离散程度较高。蒙古栎地下生物量随坡度升高呈递增趋势，具体表现为斜坡（13.30 t/hm^2）> 缓坡（7.57 t/hm^2）> 平坡（4.50 t/hm^2）。桦树在各坡度下的地下生物量水平相近，平坡、缓坡和斜坡的平均值分别为 3.68、4.04 和 3.56 t/hm^2，表明坡度对其生物量的调控作用较弱。

2.3　不同龄组乔灌木地下生物量特征

不同龄组乔木地下生物量整体呈显著差异（P < 0.001），且随林龄增加呈上升趋势。如图 5 所示，各龄组乔木地下生物量表现为幼龄林（4.93 t/hm^2）< 中龄林（10.50 t/hm^2）< 近熟林（12.70 t/hm^2）< 成熟林（15.69 t/hm^2），表明乔木地下生物量随林龄增长具有明显的累积效应。不同龄组灌木地下生物量整体水平相近，其中成熟林平均值最高（0.74 t/hm^2），但其中位数与其他龄组接近，且数据分布高度重叠，说明该组均值偏高主要受少数高值样方驱动。幼龄林平均值最低（0.54 t/hm^2）；各龄组中位数差异较小，介于 0.30 ~ 0.38 t/hm^2 之间，数据分布亦高度重叠。这表明灌木地下根系的固碳能力随林龄增加保持相对稳定。

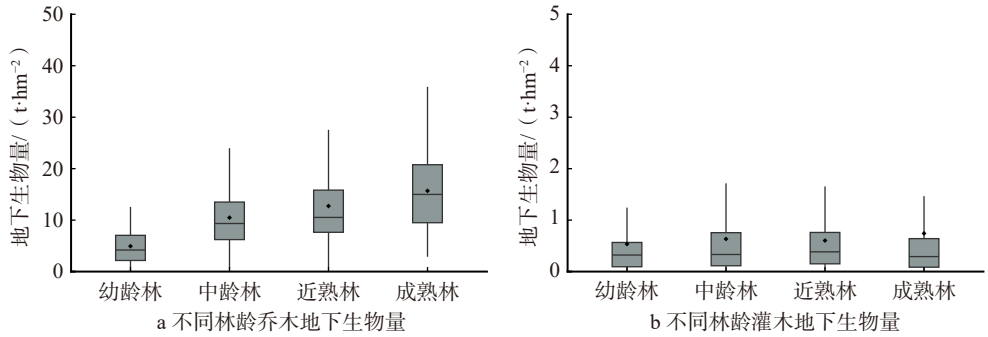


图 5 不同林龄乔木与灌木的地下生物量

Fig. 5 Belowground biomass of trees and shrubs across different stand ages

根据主要树种地下生物量随林龄的变化结果（图 6），樟子松地下生物量随林龄增幅最大且整体水平最高，具体表现为成熟林（18.30 t/hm²）> 近熟林（14.00 t/hm²）> 中龄林（8.13 t/hm²）> 幼龄林（3.73 t/hm²），分析高于其他树种。兴安落叶松地下生物量随林龄增长呈稳定上升趋势，具体表现为成熟林（8.99 t/hm²）> 近熟林（7.45 t/hm²）> 中龄林（7.04 t/hm²）> 幼龄林（2.52 t/hm²）。桦树作为演替先锋树种，其地下生物量随林龄变化呈先升高后降低的趋势，具体表现为近熟林（4.49 t/hm²）> 中龄林（4.29 t/hm²）> 成熟林（2.94 t/hm²）> 幼龄林（2.38 t/hm²）。杨树地下生物量随林龄增加持续升高，具体表现为成熟林（6.94 t/hm²）> 近熟林（6.35 t/hm²）> 中龄林（4.50 t/hm²）> 幼龄林（2.92 t/hm²）。蒙古栎地下生物量随林龄呈波动变化，幼龄林平均值为 4.16 t/hm²，中龄林升高至 8.91 t/hm²，近熟林下降至 6.00 t/hm²，成熟林回升至 7.28 t/hm²。近熟林阶段的下降可能与样方内个体密度降低及部分植株因种内竞争死亡有关，具体机制有待长期观测数据验证。

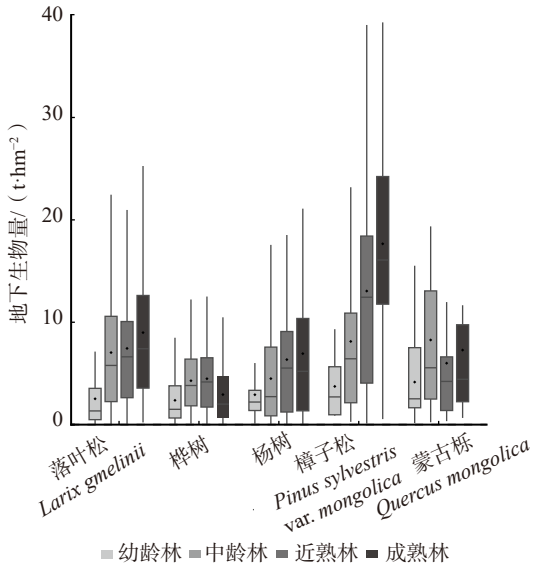


图 6 不同林龄下不同乔木树种地下生物量对比

Fig. 6 Comparison of belowground biomass among different tree species across stand age classes

2.4 不同冻土类型的乔灌木地下生物量特征

不同冻土类型下，乔灌木地下生物量均值分别为大片连续多年冻土（11.47 ± 7.40）t/hm²，稀疏岛状多年冻土（11.30 ± 7.57）t/hm²，大片−岛状多年冻土（11.34 ± 4.41）t/hm²。

乔木地下生物量在不同冻土类型间无显著差异（$P = 0.706$），而灌木地下生物量存在极显著差异（$P < 0.001$）。由表 1 可知，大片连续和大片−岛状多年冻土区乔木地下生物量均值均为 10.90 t/hm²，稀疏岛状多年冻土区为 11.00 t/hm²，3 组中位数介于 9.34 ~ 10.00 t/hm²，表明冻土类型对乔木地下生物量积累的整体调控作用不明显。然而，不同冻土类型间树种组成的差异可能掩盖冻土效应，故本研究进一步按树种分层检验（图 7）。结果显示，兴安落叶松地下生物量呈大片−岛状（7.91 t/hm²）> 大片连续（7.13 t/hm²）> 稀疏岛状（6.23 t/hm²）的趋势（$P = 0.026$）；桦树趋势相似，均值依次为大片−岛状 6.18 t/hm²、大片连续 4.17 t/hm²、稀疏岛状 3.10 t/hm²（$P <$

表 1 不同冻土类型地下生物量的统计特征

Tab. 1 Descriptive statistics of belowground biomass across permafrost types

	冻土类型	平均值/(t·hm⁻²)	中位数/(t·hm⁻²)	最小值/(t·hm⁻²)	最大值/(t·hm⁻²)
乔木	大片连续多年冻土区	10.90	9.34	0.25	51.40
	大片−岛状多年冻土区	10.90	9.58	3.35	24.80
	稀疏岛状多年冻土区	11.00	10.00	0.04	41.80
灌木	大片连续多年冻土区	0.81	0.44	0.001	3.85
	大片−岛状多年冻土区	0.55	0.44	0.004	2.39
	稀疏岛状多年冻土区	0.32	0.17	0.001	2.69

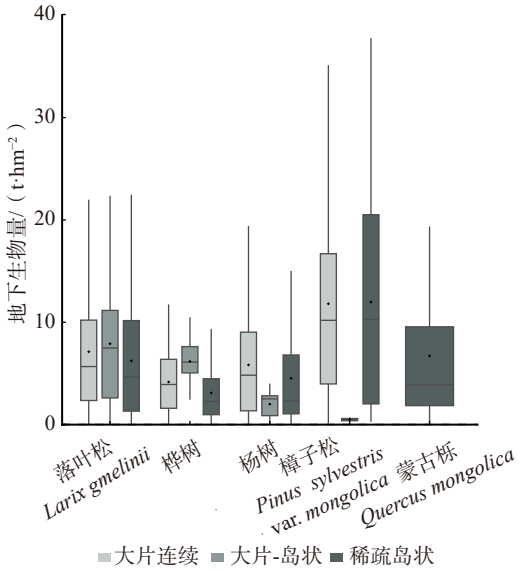


图 7　不同冻土类型下不同乔木树种地下生物量对比

Fig. 7　Comparison of belowground biomass among different tree species across permafrost types

0.001)；杨树差异亦显著(P = 0.045)，但趋势波动，大片−岛状区均值偏低(2.00 t/hm^2)可能与其样本量较少(仅 7 个样方)有关。上述结果表明，冻土类型对乔木地下生物量的调控具有树种依赖性：整体比较时，树种差异掩盖了冻土效应，导致不显著；而在单一树种层面，多个树种均表现为稀疏岛状冻土区地下生物量最低。除树种组成外，龄组结构差异也可能混淆冻土效应，因此进一步按龄组分层检验。结果显示，幼龄林(P = 0.705)和成熟林(P = 0.180)中不同冻土类型间差异不显著，但中龄林(P < 0.001)和近熟林(P = 0.036)中差异显著。综合树种与龄组分层检验结果可知，乔木整体不显著的原因在于冻土类型的调控效应被树种组成和龄组结构的差异在整体层面掩盖。灌木地下生物量表现为大片连续多年冻土区(0.81 t/hm^2) > 大片−岛状多年冻土区(0.55 t/hm^2) > 稀疏岛状多年冻土区(0.32 t/hm^2)。

3　讨　　论

3.1　地形对植被地下生物量的影响

地形通过改变立地水热条件进而影响植物生长[26]。鉴于研究区地形以低山为主，本研究仅考虑坡度对乔、灌木地下生物量的影响。乔木是森林生态系统地上和地下生物量的主体。尽管有研究指出，受竞争能力差异影响，乔木与灌木地上生物量间存在此消彼长的负相关关系[27]，但本研究在样方尺度上未观测到乔木与灌木地下生物量之间存在类似趋势；相反，乔灌木地下生物量间呈现极微弱的正相关关系(r_s = 0.086, P = 0.012)，表明在大兴安岭多年冻土区，二者在坡度梯度上的空间分布相对独立。这种独立性源于乔木与灌木根系资源获取策略的差异：乔木倾向于通过与菌根真菌协作获取养分，而灌木则具有较高的地下生物量投资[28]。灌木根系在浅层土壤中的锚固能力及对表层环境的依赖程度显著高于乔木，反映出灌木根系更集中于浅层土壤，对表层土壤水分和养分变化更为敏感；而乔木根系构型以粗根为主，其土壤锚固方式与灌木不同[29]。两类植物采用不同的根系构型策略适应环境，导致其对坡度的响应在样方尺度上相关性极弱。

坡度通过改变生境局部区域的热量、水分、光照强度及土壤养分等非生物因子，对植物功能群产生直接或间接影响[30]。本研究表明，坡度对植被地下生物量具有显著调控作用，且乔木与灌木的响应规律存在差异。其中，乔木地下生物量整体随坡度增加而增加，这与前人结论一致[31]。而灌木地下生物量则表现为缓坡最大、平坡最小的规律。这主要受立地条件影响：缓坡排水通畅、光照适宜且土壤养分保存良好，能为浅根系灌木提供稳定优越的生长环境，更利于根系发育与地下生物量积累；斜坡土层较薄，水土流失相对明显，在一定程度上限制了灌木根系的扩展空间[32]。

多年冻土区的冻土在不同地形的发育特征也会影响植被地下生物量。平坡地段通常下伏多年冻土，冻土活动层厚度相对坡地更浅[33]，本研究发现，平坡地段的乔木和灌木地下生物量均相对较小，这与冻土发育的限制有关。但本研究未实测样方活动层厚度，上述归因尚需结合后续实测数据进一步验证。

3.2　龄组对植被地下生物量的影响

成熟林具有更强的固碳能力[34−36]。这主要归因于绿色植被通过光合作用逐年累积地上和地下生物量，且该累积效应主要集中在乔木树种[34]。相比之下，灌木多呈丛生状，无明显主干，寿命较短；此外，灌木在林下环境中竞争能力较弱，生长速率缓慢。

不同乔木树种的地下生物量对林龄的响应存在差异，但生物量的年龄累积效应在树种间具有普遍性[37−39]。这种差异与树种的竞争能力、生态位选择及生活史特征密切相关。阔叶树种通常光合作用较强，竞争力突出。在植被受干扰后，由于光照充足，桦树和杨树等阔叶树种常作为先锋树种率先占据生态位。但同为先锋树种，二者的地下生物量随林龄的积累规律存在差别。桦树根系较浅，生长周期短，前期生长迅速；在幼龄林至近熟林阶段，其根系快速发育，但进入老龄阶段后，受自身生理衰退和种间竞争加剧的影响，根系生长势减弱，导致地下生物量下降[19]。杨树在生长过程中，光合作用效率提升、根系发展和环境适应能力增强，从而增强资源获取和竞

争能力，这些因素共同促成生物量的增加[40]，因此其地下生物量随林龄增长而增加。蒙古栎在近熟林阶段地下生物量出现下降，可能与样方内个体密度降低有关；部分个体在种内竞争中死亡，导致样方总地下生物量暂时减少，而在成熟林阶段，留存个体的根系充分发育后使生物量回升。这一波动趋势的具体驱动机制尚需结合长期固定样地观测数据进一步验证。在针叶树种中，樟子松多生长在阳坡且根系发达，能高效获取深层土壤资源[41]，因此其地下生物量随林龄持续稳定递增，并在成熟林阶段达到峰值；兴安落叶松作为本区顶级群落的优势种，虽以浅根为主，但在适宜立地条件下也表现出随林龄累积的趋势[15]。

本研究表明，林龄对灌木地下生物量的影响不显著，这与前人研究结果一致[42]。该结果说明，相较于乔木层随林龄呈现的规律性变化，灌木层碳库更为稳定。

3.3 多年冻土对植被地下生物量的影响

在较大空间尺度上，太阳辐射和温度通过调控多年冻土的热力状态[43]，进而影响区域植被的生长环境；而在较小尺度上，多年冻土对植被的影响主要源于活动层厚度变化引起的土壤可利用养分差异。受多年冻土影响，大兴安岭地区的植被根系普遍较浅，导致即使同一树种也无法采用全国统一的根冠比核算地下生物量，而需依据该地区不同树种的实地挖掘根系结果分别确定根冠比[19−23]。

本研究发现，多年冻土类型对研究区乔木地下生物量无显著调控作用。分树种检验显示，兴安落叶松和桦树在稀疏岛状冻土区的地下生物量显著偏低，但在分龄组检验中，中龄林和近熟林中不同冻土类型间的乔木地下生物量存在显著差异。这表明，树种组成与龄组结构的异质性掩盖了冻土类型的真实效应，导致乔木整体的影响不显著。

与乔木不同，多年冻土类型对灌木地下生物量具有显著调控作用，且随多年冻土连续性降低呈明显递减趋势，表现为大片连续多年冻土区 > 大片−岛状多年冻土区 > 稀疏岛状多年冻土区。由于乔木层与灌木层地上生物量显著负相关，乔木层生物量较低、冠层较开阔时，灌木地上生物量较高；因此，在大片连续多年冻土区，乔木地上生物量相对较低反而有利于灌木生长，并可能促使其将更多生物量分配至地下。

3.4 乔灌木地下生物量特征对比

近年来，大兴安岭多年冻土区植被研究取得新进展，主要涉及冻土退化对乔木树种的物种特异性影响[41]、林火与冻土对植被恢复的联合驱动[14]，以及活动层厚度变化对植被生长的调控[44]等方面。在此基础上，本研究进一步揭示了地形、林龄和冻土类型对乔灌木地下生物量的差异化调控机制：乔木地下生物量整体随坡度升高和林龄增加而持续积累，但受冻土类型的影响因树种组成而异；灌木地下生物量受地形显著调控（缓坡最优），对冻土退化呈递减响应，而林龄对其影响不显著。这表明，评估冻土区地下碳库对未来变化的响应时，需区分乔灌木功能群进行分别评估。

3.5 研究的不确定性与局限性

研究区树种以兴安落叶松和白桦为主，兼有少量其他树种。既往地下生物量研究多聚焦于这两个优势树种，导致对其他树种的关注不足。本研究的乔木根冠比数据主要源自文献，尽管均采用直接挖掘法，但实验标准的差异可能影响不同树种（尤其是非优势树种）的根冠比结果。此外，受限于文献数量，部分物种进行了合并处理，如桦树（包括白桦、黑桦）和杨树（包括山杨、甜杨）等。样地调查虽覆盖了研究区主要冻土类型，但部分区域（如大片−岛状冻土区）的样方数量偏少，代表性有限。

综上所述，本研究在现有数据条件下尽力保证了分析方法的严谨性。上述不确定性因素不影响核心结论的可靠性，但提示未来研究应在参数标准化、方法统一性及样地覆盖度方面进一步完善。

4 结　　论

本研究基于样方调查数据，量化了大兴安岭多年冻土区森林生态系统的地下生物量，并分析了其空间异质性。结果显示，（1）大兴安岭地区样方乔木和灌木地下生物量均值为（11.42 ± 7.38）t/hm^2，其中乔木地下生物量估算平均值为 10.92 t/hm^2，灌木地下生物量实测平均值为 0.64 t/hm^2。（2）地形和龄组特征显著影响乔木地下生物量：随着林龄和坡度增加，乔木地下生物量整体呈增加趋势；除桦树外，主要乔木树种的地下生物量总体随坡度升高而增加。（3）冻土类型对乔木地下生物量的整体影响不显著，但兴安落叶松和桦树在稀疏岛状冻土区的生物量显著偏低，且中龄林和近熟林中不同冻土类型间的乔木地下生物量存在显著差异，这表明树种组成与龄组结构的差异混淆了冻土类型的真实效应。（4）地形特征和多年冻土类型对灌木地下生物量有显著影响，但不同龄组间灌木地下生物量无显著差异。

本研究深化了对多年冻土区地下生物量特征的认知，弥补了森林生态系统总生物量估算的不足，对准确估算陆地生态系统碳储量及实现“双碳”战略具有重要指导意义。依托 1 300 个样方的实地调查数据及经敏感性检验验证的根冠比估算体系，本研究主要结论在方法学层面具有稳健性。灌木地下生物

量对冻土退化的显著响应提示，在未来冻土消融加剧的背景下，应将林下灌木层的碳库动态纳入区域碳收支评估框架。

参 考 文 献

[1] Pan Y D, Birdsey R A, Phillips O L, et al. The enduring world forest carbon sink [J]. Nature, 2024, 631(8021): 563−569.

[2] Bai X J, Huang Y M, Wang B R, et al. Belowground allocation and fate of tree assimilates in plant-soil-microorganisms system: ^{13}C labeling and tracing under field conditions [J]. Geoderma, 2021, 404: 115296.

[3] Xiao J F, Chevallier F, Gomez C, et al. Remote sensing of the terrestrial carbon cycle: a review of advances over 50 years [J]. Remote Sensing of Environment, 2019, 233: 111383.

[4] Zhang Y Z, Liang S L, Yang L. A review of regional and global gridded forest biomass datasets [J]. Remote Sensing, 2019, 11(23): 2744.

[5] Belgiu M, Drăguţ L. Random forest in remote sensing: a review of applications and future directions [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2016, 114: 24−31.

[6] Mokany K, Raison R J, Prokushkin A S. Critical analysis of root: shoot ratios in terrestrial biomes [J]. Global Change Biology, 2006, 12(1): 84−96.

[7] 胡宇美, 马理辉, 李蕊, 等. 黄土高原地区森林生态系统地下生物量影响因素 [J]. 生态学报, 2021, 41(21): 8643−8653.
Hu Y M, Ma L H, Li R, et al. Factor analysis of underground biomass in forest ecosystem on the Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(21): 8643−8653.

[8] Wang X P, Fang J Y, Zhu B. Forest biomass and root–shoot allocation in Northeast China [J]. Forest Ecology and Management, 2008, 255(12): 4007−4020.

[9] 常晓丽, 肖苓海, 金会军, 等. 大兴安岭北部多年冻土现状及变化特征 [J]. 冰川冻土, 2025, 47(1): 126−138.
Chang X L, Xiao L H, Jin H J, et al. Major features of permafrost in northern Da Xing'anling Mountains, Northeast China and their changes [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2025, 47(1): 126−138.

[10] Li X Y, Jin H J, Feng Q, et al. An integrated dataset of ground hydrothermal regimes and soil nutrients monitored in some previously burned areas in hemiboreal forests in Northeast China during 2016−2022 [J]. Earth System Science Data, 2024, 16(11): 5009−5026.

[11] 周传芳, 魏小勇, 孙彦峰, 等. 大兴安岭地区生态地质脆弱性研究 [J]. 地质论评, 2025, 71(S1): 299−301.
Zhou C F, Wei X Y, Sun Y F, et al. Study on the eco-geological vulnerability of the Daxing'anling Region [J]. Geological Review, 2025, 71(S1): 299−301.

[12] 张颖. 基于高分辨率遥感和极化雷达数据的大兴安岭地区森林地上生物量估测 [D]. 北京: 北京林业大学, 2016.
Zhang Y. Aboveground biomass estimation of Daxing'anling based on high resolution and SAR data [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2016.

[13] 胡海清, 罗碧珍, 魏书精, 等. 大兴安岭 5 种典型林型森林生物碳储量 [J]. 生态学报, 2015, 35(17): 5745−5760.
Hu H Q, Luo B Z, Wei S J, et al. Estimating biological carbon storage of five typical forest types in the Daxing'anling Mountains, Heilongjiang, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(17): 5745−5760.

[14] Li X Y, Li J T, Jin H J, et al. Fire severity and its induced permafrost degradation drive vegetation recovery and succession in the permafrost region in the northern Daxing'anling Mountains, NE China [J]. Catena, 2025, 254: 108970.

[15] 王晓宏, 张秋良, 郭玉东, 等. 兴安落叶松天然林粗根生物量及分布特征的研究 [J]. 林业资源管理, 2013(5): 62−66,90.
Wang X H, Zhang Q L, Guo Y D, et al. Study on the coarse root biomass and distribution characteristics about natural *Larix gmelinii* forest [J]. Forest Resources Management, 2013(5): 62−66,90.

[16] 米德生.《中国冰雪冻土图》(1∶400 万) 的编制 [J]. 冰川冻土, 1990, 12(2): 175−181.
Mi D S. Map of snow, ice and frozen ground in China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1990, 12(2): 175−181.

[17] 陈科屹, 王建军, 何友均, 等. 黑龙江大兴安岭重点国有林区森林碳储量及固碳潜力评估 [J]. 生态环境学报, 2022, 31(9): 1725−1734.
Chen K Y, Wang J J, He Y J, et al. Estimations of Forest Carbon Storage and Carbon Sequestration Potential of Key State−Owned Forest Region in Daxing'anling, Heilongjiang Province [J]. Ecology and Environment Sciences, 2022, 31(9): 1725−1734.

[18] GB/T 43648—2024 主要树种立木生物量模型与碳计量参数 [S].
GB/T 43648—2024 Tree biomass models and related parameters to carbon accounting for major tree species [S].

[19] 杜昕, 岳永杰, 李钢铁, 等. 白桦根系生物量与生产力研究 [J]. 林业资源管理, 2014(5): 64−68.
Du X, Yue Y J, Li G T, et al. Study on birch root biomass and productivity [J]. Forest Resources Management, 2014(5): 64−68.

[20] 阳帆, 孟盛旺, 王威, 等. 大兴安岭蒙古栎生物量分配格局与可加性模型研究 [J]. 农业机械学报, 2020, 51(6): 292−300.
Yang F, Meng S W, Wang W, et al. Biomass allocation and additive allometric models for *Quercus mongolica* in Daxing' anling Mountains [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6): 292−300.

[21] 李巍, 王传宽, 张全智. 林木分化对兴安落叶松异速生长方程和生物量分配的影响 [J]. 生态学报, 2015, 35(6): 1679−1687.
Li W, Wang C K, Zhang Q Z. Differentiation of stand individuals impacts allometry and biomass allocation of *Larix gmelinii* trees [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(6): 1679−1687.

[22] 罗天祥. 中国主要森林类型生物生产力格局及其数学模型 [D]. 北京: 中国科学院研究生院 (国家计划委员会自然资源综合考察委员会), 2006.
Luo T X. Patterns of net primary productivity for Chinese major forest types and their mathematical models [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences (Commission for Integrated Survey of Natural Resources, State Planning Commission), 2006.

[23] 董利虎. 东北林区主要树种及林分类型生物量模型研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2015.
Dong L H. Developing individual and stand-level biomass equations in Northeast China forest area [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2015.

[24] 王殿中, 孙国清, 过志峰. 天然林林龄的模拟估算及案例 [J]. 生态环境, 2008, 17(5): 1999−2003.
Wang D Z, Sun G Q, Guo Z F. A case study on estimating natural forest age with DBH distribution and forest growth model [J].

Ecology and Environment, 2008, 17(5): 1999−2003.

[25] 张林泉. 多独立样本 Kruskal-Wallis 检验的原理及其实证分析 [J]. 苏州科技学院学报 (自然科学版), 2014, 31(1): 14−16,38.
Zhang L Q. Principles of Kruskal-Wallis test and its empirical analysis [J]. Journal of Suzhou University of Science and Technology (Natural Science), 2014, 31(1): 14−16,38.

[26] 尹加元, 罗明良, 白雷超, 等. 地形因子影响典型气候带植被指数的定量归因——基于地理探测与地理加权视角 [J]. 西华师范大学学报 (自然科学版), 2024, 45(5): 457−465.
Yin J Y, Luo M L, Bai L C, et al. Quantitative attribution of topographic factors influencing vegetation indices in typical climatic zones: based on geographic detector and GWR [J]. Journal of China West Normal University (Natural Sciences), 2024, 45(5): 457−465.

[27] Zhang Q Y, Zhang Q, Zhai Y N, et al. Drivers of aboveground biomass shift with forest stratum in temperate forest of North China [J]. Science of the Total Environment, 2023, 860: 160548.

[28] 杨弦, 郭焱培, 安尼瓦尔·买买提, 等. 中国北方温带灌丛生物量的分布及其与环境的关系 [J]. 植物生态学报, 2017, 41(1): 22−30.
Yang X, Guo Y P, Anniwar M, et al. Distribution of biomass in relation to environments in shrublands of temperate China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2017, 41(1): 22−30.

[29] Pang Z L, Zhang Y, Han S J, et al. Effects of root architecture on uprooting properties between deciduous and evergreen species with different growth habits [J]. Forests, 2024, 15(4): 585.

[30] 崔博亮, 安彦明, 张起鹏, 等. 坡度对亚高寒草甸狼毒群落植物多样性的影响 [J]. 草业科学, 2021, 38(5): 823−34.
Cui B L, An Y M, Zhang Q P, et al. Effect of slope on plant diversity of a *Stellera chamaejasme* communityin subalpine meadow [J]. Pratacultural Science, 2021, 38(5): 823−834.

[31] 赵文洁, 李凤日, 庄宸, 等. 大兴安岭地区落叶松林碳密度空间分布 [J]. 东北林业大学学报, 2014, 42(6): 1−5.
Zhao W J, Li F R, Zhuang C, et al. Spatial distribution of carbon density for larch forest in Daxing'an mountain [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2014, 42(6): 1−5.

[32] 李义强, 伍红燕, 宋桂龙, 等. 岩石边坡坡度对胡枝子和紫穗槐根系形态特征影响 [J]. 草原与草坪, 2020, 40(2): 23−29.
Li Y Q, Wu H Y, Song G L, et al. Effect of slope gradient on root morphological characteristics of *Lespedeza bicolor* and *Amorpha fruticosa* [J]. Grassland and Turf, 2020, 40(2): 23−29.

[33] 吕久俊, 李秀珍, 胡远满, 等. 呼中自然保护区多年冻土活动层厚度的影响因子分析 [J]. 生态学杂志, 2007, 26(9): 1369−1374.
Lü J J, Li X Z, Hu Y M, et al. Factors affecting the thickness of permafrost's active layer in Huzhong National Nature Reserve [J]. Chinese Journal of Ecology, 2007, 26(9): 1369−1374.

[34] 何普林, 林陈君, 赵俊, 等. 不同林龄和起源尾巨桉人工林生物量与碳储量的变化规律 [J]. 西北林学院学报, 2026, 41(1): 173−183.
He P L, Lin C J, Zhao J, et al. Variations of ecosystem biomass and carbon storage in different ages and regenerations of *Eucalyptus urophylla* × e. grandis plantation [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2026, 41(1): 173−183.

[35] 王晓. 杉木林土壤有机碳来源及贡献随林龄变化研究 [D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2025.
Wang X. Study on the variation of soil organic carbon sources and contributions with stand and age in Chinese fir forest with forests [D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2025.

[36] Wang Z B, Sun X H, Guo Y W, et al. Distribution characteristics and influencing factors of carbon storage in *Populus* plantations with different stand ages in the Luxi Yellow River floodplain, China [J]. Frontiers in Plant Science, 2026, 17: 1764796.

[37] 贾炜玮, 李凤日, 董利虎, 等. 基于相容性生物量模型的樟子松林碳密度与碳储量研究 [J]. 北京林业大学学报, 2012, 34(1): 6−13.
Jia W W, Li F R, Dong L H, et al. Carbon density and storage for *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation based on compatible biomass models [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2012, 34(1): 6−13.

[38] 史山丹, 赵鹏武, 周梅, 等. 大兴安岭南部温带山杨天然次生林不同生长阶段生物量及碳储量 [J]. 生态环境学报, 2012, 21(3): 428−433.
Shi S D, Zhao P W, Zhou M, et al. Biomass and carbon storage of the secondary forest (*Populus davidiana*) at different stand growing stages in southern Daxinganling temperature zone [J]. Ecology and Environment Sciences, 2012, 21(3): 428−433.

[39] 霍常富, 尤文忠, 张慧东, 等. 辽宁冰砬山不同林龄蒙古栎次生林生物量和生产力初探 [J]. 辽宁林业科技, 2011(4): 4−6,11.
Huo C F, You W Z, Zhang H D, et al. Biomass and net primary productivity of *Quecus mongolica* plantation in Binglashan Mountains in Liaoning Province [J]. Liaoning Forestry Science and Technology, 2011(4): 4−6,11.

[40] 郭玉伟, 梁晶, 伍海兵, 等. 鲁西黄泛平原不同林龄杨树人工林碳储量分布格局及影响因素分析 [J]. 植物研究, 2025, 45(2): 241−253.
Guo Y W, Liang J, Wu H B, et al. Ecosystem carbon storage distribution and influencing factors in different-aged poplar plantations in the yellow river floodplain in western Shandong, China [J]. Bulletin of Botanical Research, 2025, 45(2): 241−253.

[41] Wang Y B, Liu X H, Jin H J, et al. Climate-induced permafrost degradation exerts species-specific impacts on pine and larch growth in the Da Xing'anling Mountains, Northeast China [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2025, 372: 110665.

[42] 费玲, 钟全林, 程栋梁, 等. 天然阔叶林与杉木人工林灌木层地上地下生物量的分配关系 [J]. 林业科学, 2016, 52(3): 97−104.
Fei L, Zhong Q L, Cheng D L, et al. Biomass allocation between aboveground-and underground of shrub layer vegetation in natural evergreen broad-leaved forest and Chinese fir plantation [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2016, 52(3): 97−104.

[43] Ran Y H, Li X, Cheng G D, et al. New high-resolution estimates of the permafrost thermal state and hydrothermal conditions over the Northern Hemisphere [J]. Earth System Science Data, 2022, 14(2): 865−884.

[44] 温理想, 郭蒙, 黄书博, 等. 大兴安岭北部多年冻土区植被对活动层厚度变化的响应 [J]. 冰川冻土, 2021, 43(5): 1531−1541.
Wen L X, Guo M, Huang S B, et al. The response of vegetation to the change of active layer thickness in permafrost region of the north Greater Khingan Mountains [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(5): 1531−1541.

（责任编辑 孟 瑶
责任编委 臧润国）