



雪岭云杉林地上死有机质碳和养分特征的区域差异及组分分异

苏香萍 王思沅 黄子铭 范静 黄继红 臧润国 刘华

Regional variation and component-specific carbon and nutrient characteristics of aboveground dead organic matter in *Picea schrenkiana* forests

Su Xiangping, Wang Siyuan, Huang Ziming, Fan Jing, Huang Jihong, Zang Runguo, Liu Hua

引用本文:

苏香萍, 王思沅, 黄子铭, 范静, 黄继红, 臧润国, 刘华. 雪岭云杉林地上死有机质碳和养分特征的区域差异及组分分异[J]. *北京林业大学学报*, 2026, 48(9):111–120. doi: 10.12171/j.1000–1522.20260305

Su Xiangping, Wang Siyuan, Huang Ziming, Fan Jing, Huang Jihong, Zang Runguo, Liu Hua. Regional variation and component-specific carbon and nutrient characteristics of aboveground dead organic matter in *Picea schrenkiana* forests[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2026, 48(9):111–120. doi: 10.12171/j.1000–1522.20260305

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20260305>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

温带云冷杉混交林凋落物养分的空间分布特征

Spatial distribution characteristics of litter nutrients in temperate spruce–fir mixed forests

北京林业大学学报, 2021, 43(3): 73–84. <https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200065>

间伐对华北落叶松林凋落物分解的影响

Effects of thinning on litter decomposition of *Larix principis-rupprechtii* plantation

北京林业大学学报, 2021, 43(12): 29–37. <https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210114>

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>

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>

森林土壤有机质预测模型阈值优化

Threshold optimization for forest soil organic matter prediction model: a case study of Guangdong Province of southern China

北京林业大学学报, 2025, 47(2): 32–39. <https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240314>

林下植被和凋落物对我国寒温带天然林土壤CO₂通量的短期影响

Short-term effects of understory vegetation and litter on soil CO₂ flux of natural forests in cold temperate zone of China

北京林业大学学报, 2021, 43(3): 55–65. <https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200249>

DOI:10.12171/j.1000-1522.20260305

雪岭云杉林地上死有机质碳和养分特征的 区域差异及组分分异

苏香萍¹ 王思沅¹ 黄子铭¹ 范 静² 黄继红³ 臧润国³ 刘 华¹

(1. 安徽农业大学林学与园林学院, 安徽 合肥 230031; 2. 安徽职业技术大学, 安徽 合肥 230011;

3. 中国林业科学研究院森林生态环境与自然保护研究所, 北京 100091)

摘要:【目的】明确天山山脉雪岭云杉天然林凋落物和粗木质残体(CWD)碳储量及养分特征的区域变化规律, 以期为认识森林地上死有机质库的组成特征及其在生态系统物质循环中的作用提供科学依据。【方法】以天山山脉昭苏、新源、呼图壁、天池和奇台 5 个典型区域的天然雪岭云杉林为研究对象, 测定凋落物和 CWD 的碳、氮、磷、钾、钙和镁含量, 分析其化学计量特征及碳储量组成。【结果】(1)凋落物养分含量和化学计量特征均存在明显区域差异, 而 CWD 养分组成相对稳定, 仅磷、钾和镁表现出区域差异。(2)与凋落物相比, CWD 具有较高的碳氮比和碳磷比以及更大的化学计量变异幅度, 表明长期腐解过程中元素迁移增强。(3)不同区域地上死有机质碳储量差异主要来源于凋落物, 且沿天山山脉由西向东逐渐增加。尽管凋落物和 CWD 对总地上死有机质碳储量的贡献率存在明显差异, 但总地上死有机质碳储量在区域间未表现出显著变化。其中, 凋落物和 CWD 对总地上死有机质碳储量贡献率分别为 57.2%~86.6% 和 13.4%~42.8%。【结论】凋落物和 CWD 的碳养分特征及其碳储量占比的区域差异, 共同塑造了雪岭云杉林地上死有机质碳库的空间格局。研究结果有助于深化对于旱区山地森林地上死有机质碳库形成过程及养分循环特征的认识。

关键词: 雪岭云杉林; 凋落物; 粗木质残体; 生态化学计量学; 地上死有机质碳库

中图分类号: S791.18 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1522(2026)09-0111-10

引文格式: 苏香萍, 王思沅, 黄子铭, 等. 雪岭云杉林地上死有机质碳和养分特征的区域差异及组分分异 [J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(9): 111-120. Su Xiangping, Wang Siyuan, Huang Ziming, et al. Regional variation and component-specific carbon and nutrient characteristics of aboveground dead organic matter in *Picea schrenkiana* forests[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(9): 111-120.

Regional variation and component-specific carbon and nutrient characteristics of aboveground dead organic matter in *Picea schrenkiana* forests

Su Xiangping¹ Wang Siyuan¹ Huang Ziming¹ Fan Jing²

Huang Jihong³ Zang Runguo³ Liu Hua¹

(1. School of Forestry & Landscape Architecture, Anhui Agricultural University, Hefei 230031, Anhui, China;

2. Anhui University of Applied Technology, Hefei 230011, Anhui, China;

3. Ecology and Nature Conservation Institute, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: [Objective] To characterize regional patterns in carbon stocks and nutrient properties of litter and coarse woody debris (CWD) in natural *Picea schrenkiana* forests across the Tianshan Mountains, and thereby improve understanding of the composition of aboveground dead organic matter pools and their role in ecosystem nutrient cycling. [Method] Natural Schrenk spruce (*Picea schrenkiana*) forests located in five

收稿日期: 2026-06-17 修回日期: 2026-08-17

基金项目: 安徽省教育厅项目(2023jyxxggyY071)。

第一作者: 苏香萍, 博士后。主要研究方向: 森林生态系统碳循环。Email: suxiangping95@163.com 地址: 230031 安徽省合肥市蜀山区长江西路 130 号安徽农业大学林学与园林学院。

责任作者: 刘华, 博士生导师, 教授。主要研究方向: 森林生态学。Email: liuhuanmg@126.com 地址: 同上。

本刊网址: <https://j.bjfu.edu.cn>; <https://journal.bjfu.edu.cn>

representative regions of the Tianshan Mountains, including Zhaosu, Xinyuan, Hutubi, Tianchi, and Qitai, were selected for this study. Concentrations of carbon (C), nitrogen (N), phosphorus (P), potassium (K), calcium (Ca), and magnesium (Mg) in litter and CWD were determined to evaluate their stoichiometric characteristics and carbon storage patterns. [Result] (1) Significant regional differences were observed in nutrient concentrations and stoichiometric characteristics of litter, whereas nutrient composition in CWD was comparatively stable, with only P, K, and Mg varying significantly among regions. (2) Compared with litter, CWD exhibited higher C:N and C:P and greater stoichiometric variability, indicating enhanced elemental losses and retention during long-term decomposition. (3) Regional variation in aboveground dead organic matter carbon storage was primarily driven by litter and generally increased from west to east across the Tianshan Mountains. Although the relative contributions of litter and CWD differed substantially among regions, total aboveground dead organic matter carbon storage showed no significant regional differences. Litter and CWD accounted for 57.2%–86.6% and 13.4%–42.8% of total aboveground dead organic matter carbon storage, respectively. [Conclusion] The spatial pattern of the aboveground dead organic matter C pool in Tianshan spruce forests is jointly shaped by regional variation in the C and nutrient characteristics of litter and CWD and in their relative contributions to C storage. These findings improve our understanding of the formation and nutrient cycling processes of aboveground dead organic matter pools in mountain forests of arid regions.

Key words: *Picea schrenkiana* forest; litter; coarse woody debris; ecological stoichiometry; aboveground dead organic matter carbon pool

森林死有机质是连接植被生产、土壤有机质形成和养分循环的重要纽带,也是森林生态系统碳库的重要组成部分^[1]。其中,凋落物和粗木质残体(coarse woody debris, CWD)是地上死有机质库的两个主要组分,但二者在形成途径、周转速率和生态功能上存在明显差异^[2-4]。凋落物主要由叶片、枝条和生殖器官等植物有机残体组成,周转速度快,是养分归还和土壤有机质形成的重要来源;CWD则由枯立木、倒木和粗枝等组成,具有较长周转时间,在长期碳储存、养分保持和生态系统结构稳定性方面发挥重要作用^[5-7]。由于周转过程和腐解机制不同,凋落物和CWD可能代表森林生态系统中不同时间尺度的碳库,其对环境变化的响应也可能存在差异^[6,8]。因此,从凋落物和CWD这两个组分揭示地上死有机质碳与养分特征的变化规律,对于认识森林碳循环和养分循环过程具有重要意义。

21世纪初以来,围绕森林凋落物和CWD,国内外已开展了大量研究。已有研究主要关注凋落物分解与养分释放过程^[4]、CWD储量与腐解动态^[9-11],以及死有机质在森林碳循环中的作用^[12]。已有研究^[13-15]表明,区域环境梯度不仅能够影响森林死有机质储量,还会改变不同组分之间的养分分配关系及其化学计量特征。生态化学计量特征反映了生态系统中碳积累与养分供应之间的平衡关系,是理解养分限制和物质循环过程的重要指标^[16-17]。然而,现有研究多针对凋落物或CWD等单一组分展开,对两类

地上死有机质组分进行同步比较的研究相对较少。尤其是在区域尺度上,不同组分是否对环境梯度表现出一致的响应模式,以及这种差异响应是否进一步影响地上死有机质碳库组成及其空间异质性,仍缺乏系统认识。由于凋落物和CWD分别对应快速和缓慢周转碳库,忽略组分间差异可能导致对森林地上死有机质碳库形成过程及养分循环特征的认识存在偏差。

雪岭云杉(*Picea schrenkiana*)林是我国西北干旱区面积最大的山地针叶林生态系统,在区域水源涵养、碳固定和生态安全维护中具有不可替代的重要作用^[18-19]。已有研究^[19-20]表明,雪岭云杉林碳储量和CWD储量具有明显空间异质性,但相关研究主要集中于凋落物分解过程、水文特性或CWD储量结构等单一组分特征,对凋落物和CWD的养分含量、化学计量比及其碳储量贡献比例的区域差异缺乏综合比较。基于此,本研究以天山山脉昭苏、新源、呼图壁、天池和奇台5个典型区域的天然雪岭云杉林为研究对象,系统分析凋落物和CWD的碳(C)、氮(N)、磷(P)、钾(K)、钙(Ca)和镁(Mg)含量,C:N、C:P和N:P化学计量特征以及碳储量组成,旨在揭示雪岭云杉林不同地上死有机质组分养分的区域变化规律及其组分分异特征,并重点回答以下问题:不同区域凋落物和CWD养分含量及化学计量特征是否表现出一致的响应模式;不同区域地上死有机质碳储量及其组成特征如何变化;不同地上死有机质

组分的差异响应是否影响区域尺度地上死有机质碳库的空间异质性。研究结果可为理解雪岭云杉林地上死有机质碳库形成过程及养分循环特征提供理论依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于新疆天山山脉($43^{\circ}43' \sim 44^{\circ}34'N$, $81^{\circ}37' \sim 91^{\circ}33'E$),地处准噶尔盆地和塔里木盆地之间。该区域属于典型的温带大陆性干旱气候,年日照时数约为2 500~3 500 h,年降水量介于205~512 mm之间。土壤类型为黄土状沉积物和钙质风化物发育而来的山地灰褐色森林土。

雪岭云杉是研究区的优势乔木树种,主要分布在天山北坡海拔1 250~2 800 m之间土壤水分条件较好的阴坡和半阴坡。林下植被较为丰富,灌木层主要包括宽刺蔷薇(*Rosa platyacantha*)、天山花楸(*Sorbus tianschanica*)等;草本层主要包括天蓝岩苣(*Cicerbita azurea*)、高山羊角芹(*Aegopodium podagraria*)、天山羽衣草(*Alchemilla tianschanica*)等。

1.2 研究方法

1.2.1 样地选取

2010年7—8月,在雪岭云杉分布区选择昭苏、新源、呼图壁、天池和奇台5个代表性地点开展调查(图1a)。在各调查地点,沿雪岭云杉林分布的海拔梯度,按照相邻目标海拔之间约50 m的垂直高差设置样地。在每个目标海拔附近,选择雪岭云杉占优势、林分结构相对完整且人为干扰较小的典型林分,建立1个20 m×20 m固定样地。单个样地用于表

征该海拔位置附近的局地林分状况,而非整个50 m海拔区间。其中,昭苏、新源、呼图壁、天池和奇台的海拔梯度分别为2 000~2 900 m、1 700~2 300 m、1 700~2 150 m、1 700~2 600 m和1 700~2 600 m。因此,这5个地点分别设置19、13、10、19和19个样地,共80个,用于凋落物和CWD样品的采集及相关指标测定。样地基本特征见表1。

1.2.2 样品采集

凋落物样品收集:在每块20 m×20 m样地内,以5 m×5 m为单位划分16个网格,在两条对角线上选择4个内部网格中心和样地中心,共设置5个1 m×1 m小样方,所有小样方均位于样地边界以内(图1b)。测定各小样方凋落物层厚度后,将每个小样方内全部凋落物收集装袋,编号并称量鲜质量,据此计算凋落物单位面积储量。共获得凋落物样品80份。

CWD调查与样品收集:在每块20 m×20 m样地内,参照Harmon等^[22]的CWD界定标准,对样地内所有粗头部分直径 ≥ 2.5 cm的雪岭云杉CWD进行测量和记录,包括倒木、枯立木、枯枝和树桩(包括伐桩和倒木残桩)。倒木树干按4 m分段,测量各区分段的中央直径,并测量最后不足4 m梢头区段的长度和梢头底端直径。枯立木测量胸径和树高,枯枝和树桩测量长度(高度)和中央直径。依据实测尺寸计算各CWD个体体积,并按照腐解等级汇总每块样地内CWD体积后换算成单位面积蓄积量。

依据国际通用的五级腐解分类标准对雪岭云杉CWD进行采样^[22]。对腐解程度较低的I、II、III级CWD,采用钢锯截取厚度约为5 cm的圆盘样品。对

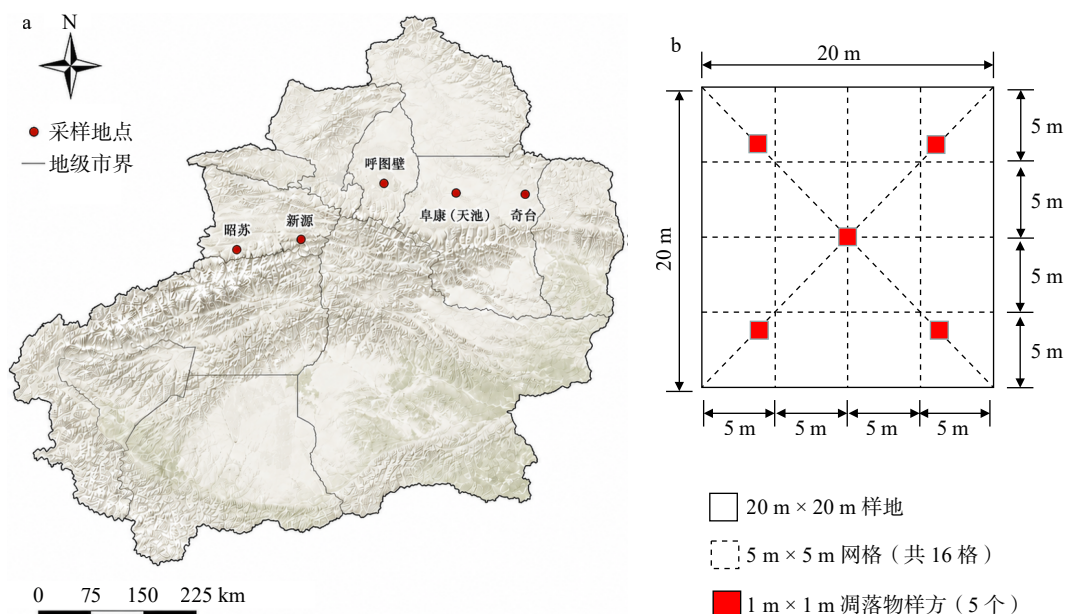


图1 研究区分布(a)及凋落物采样示意图(b)

Fig. 1 Location of the study area (a) and schematic diagram of litter sampling (b)

表 1 样地基本特征

Tab. 1 Basic characteristics of the sample plot

地点	经纬度	坡度/(°)	年平均降水量/mm	年平均温度/℃	乔木平均胸径/cm	云杉种群密度/(株·hm ⁻²)	林分郁闭度	土壤 pH 值
昭苏	42°30'~42°38'N, 80°35'~80°46'E	32.6±9.8	512	2.9	25.2±5.6	710.5	0.4±0.1	6.43
新源	43°14'~43°17'N, 84°12'~84°14'E	29.2±10.7	480	8.1	35.5±17.5	428.8	0.4±0.2	6.33
呼图壁	43°41'~43°43'N, 86°39'~86°40'E	25.8±12.0	500	4.1	25.0±5.6	647.5	0.4±0.2	6.81
天池	43°52'~43°54'N, 88°05'~88°07'E	21.3±9.9	205	6.7	23.5±6.8	909.2	0.5±0.2	6.52
奇台	43°31'~43°34'N, 89°42'~89°50'E	19.2±7.5	269	5.5	29.2±4.9	467.1	0.5±0.1	6.17

注:坡度、乔木平均胸径和林分郁闭度为样地尺度实测数据,以平均值±标准差表示;经纬度和海拔为实测调查数据。云杉种群密度^[21]和土壤 pH^[20]为各研究区的汇总值,原始样地记录缺失。年平均降水量和年平均温度为研究区尺度气候数据。

于腐解程度较高的 IV、V 级 CWD, 则用半径 15 cm、高 5 cm 的圆柱形铁盒进行采样。在每个研究区随机采集各腐解等级的 CWD 样品, 每个等级采集 6~8 个重复。所有样品分别编号后装袋保存, 并带回实验室进行后续分析。

1.2.3 凋落物和粗木质残体的养分含量

凋落物和 CWD 样品分别置于 80 ℃ 和 68 ℃ 烘箱中烘干至质量恒定。将部分烘干后样品经粉碎机粉碎后过 1 mm 筛, 并密封保存备用。有机 C 含量采用重铬酸钾-硫酸氧化法测定, 全 N 含量采用凯氏定氮法测定, 全 P 含量采用氢氧化钠熔融-钼锑抗比色法测定, K、Ca 和 Mg 含量经硝酸-高氯酸消解后, 利用原子吸收法测定^[23]。

1.2.4 凋落物和 CWD 的单位面积碳储量

将每个 1 m×1 m 样方内收集的凋落物烘干至质量恒定并称量, 计算凋落物单位面积储量(t/hm²)。采用重铬酸钾-硫酸氧化法测定凋落物碳含量(mg/g)。依据凋落物单位储量与碳含量计算其单位面积碳储量。

$$S = \frac{GC}{1\,000} \quad (1)$$

式中: S 为凋落物单位面积碳储量(t/hm²), G 为凋落物单位储量(t/hm²), C 为凋落物碳含量(mg/g)。

根据野外调查数据计算各样地 CWD 体积。枯枝并入倒木类计算单位蓄积量。倒木采用中央断面区分求积法计算体积, 各 4 m 区分段的体积为

$$V_1 = \frac{\pi}{4} D^2 L \quad (2)$$

最后不足一个区分段的梢头体积为

$$V_2 = \frac{\pi}{12} D_0^2 L \quad (3)$$

式中: D 为区分段中央直径(m), D₀ 为梢头底端直径(m), L 为相应区分段或梢头长度(m)。

枯立木体积采用雪岭云杉二元立木材积方程计算。

$$V = aD_1^b H^c \quad (4)$$

式中: D₁ 为枯立木胸径(cm), H 为树高(m), a、b 和 c 为雪岭云杉二元立木材积方程参数。将每块样地内各 CWD 个体体积按腐解等级汇总, 并根据样地面积换算为各腐解等级 CWD 的单位面积蓄积量(V_i, m³/hm²)。

在各研究地点, 从各腐解等级 CWD 中随机选取 3 个样品, 烘干至质量恒定后测定其干质量。随后将样品浸水至饱和, 采用体积排水法测定样品体积。当连续两次测定质量差小于 5 mg 时, 认为样品达到饱和状态。依据样品干质量和体积计算 CWD 密度。

$$\rho = M_0/V_0 \quad (5)$$

式中: ρ 为 CWD 密度(t/m³), M₀ 为 CWD 干质量(t), V₀ 为 CWD 体积(m³)。

结合各腐解等级粗木质残体密度和对应单位面积蓄积量, 计算 CWD 单位储量。

$$G_0 = \sum_{i=1}^5 (\rho_i V_i) \quad (i = 1, 2, 3, 4, 5) \quad (6)$$

式中: G₀ 为 CWD 单位面积储量(t/hm²), i 为 CWD 的腐解等级, ρ_i 为 i 腐解等级 CWD 的密度(t/m³), V_i 为 i 腐解等级 CWD 的单位面积蓄积量(m³/hm²)。

采用重铬酸钾-硫酸氧化法测定各腐解等级 CWD 的碳含量, 各腐解等级单位面积碳储量由其碳含量与对应单位储量乘积获得^[20]。5 个腐解等级碳储量之和即为 CWD 单位面积碳储量。总地上死有机质碳储量为凋落物和 CWD 单位面积碳储量之和。

1.2.5 数据分析

在方差分析之前, 利用 Shapiro-Wilk 检验对数据进行正态性检验, 利用 Levene 检验方差齐性。当数据满足正态分布和方差齐性要求时, 采用单因素方差分析(one-way ANOVA)比较不同区域间凋落物和 CWD 的养分含量、化学计量特征及碳储量的差异; 当方差分析达到显著水平(p<0.05)时, 进一步采用 Tukey HSD 法进行事后多重比较。为分析凋落物和 CWD 的养分含量及化学计量特征与环境因子

之间的关系,以研究区作为独立统计单元($n=5$),采用 Spearman 相关性分析昭苏、新源、呼图壁、天池和奇台 5 个研究区各指标的区域平均值之间的相关关系。所有的统计分析和绘图均采用 R 4.4.1 软件进行。

2 结果与分析

2.1 不同区域凋落物和 CWD 养分含量特征

不同地点凋落物和 CWD 养分含量存在不同程度的差异(图 2)。其中,凋落物各养分元素在区域间存在显著差异,而 CWD 养分组成相对稳定,仅部分元素在区域间表现出显著变化。

具体来说,5 个区域的凋落物 C、N、P、K、Ca 和 Mg 含量范围分别在 111.91 ~ 509.65 mg/g、9.10 ~ 27.86 mg/g、0.30 ~ 1.08 mg/g、1.84 ~ 18.70 mg/g、2.79 ~ 11.30 mg/g、2.58 ~ 13.41 mg/g 之间。其中,奇台凋落物 C 含量最高,新源和昭苏最低;N 和 P 含量均以呼图壁最高,天池和奇台最低;K、Ca 和 Mg 含量均以昭苏最高。

CWD 养分含量整体变异幅度低于凋落物。5 个地点的 CWD 的 C、N、P、K、Ca 和 Mg 含量范围分别在 376.50 ~ 532.03 mg/g、2.30 ~ 9.14 mg/g、0.03 ~ 1.11 mg/g、2.52 ~ 8.04 mg/g、4.88 ~ 9.21 mg/g、1.80 ~ 5.94 mg/g 之间。其中,C、N 和 Ca 含量在区域间无显著差异,而 P、K 和 Mg 含量在区域间存在显著差

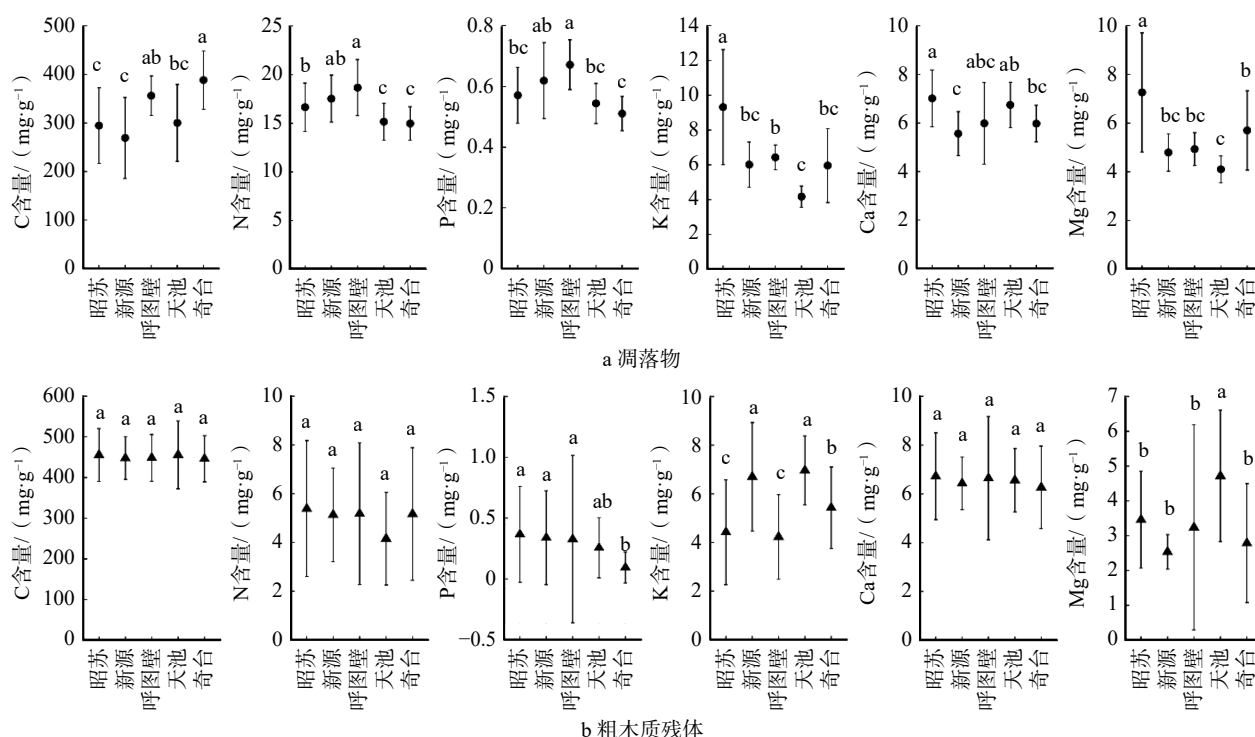
异。奇台 P 含量显著低于其余区域;新源和天池 K 含量显著高于昭苏、呼图壁和奇台;天池的 Mg 含量显著高于其他区域(图 2)。

2.2 不同区域凋落物和 CWD 养分化学计量特征

凋落物和 CWD 化学计量特征在不同区域表现出不同的变化模式(图 3)。总体上,CWD 的 C:N 和 C:P 高于凋落物,且化学计量特征的区域变异幅度大于凋落物。5 个区域凋落物 C:N、C:P 和 N:P 均值变化范围分别为 15.34 ~ 25.72、435.05 ~ 760.64 和 27.76 ~ 29.58。其中,奇台凋落物 C:N 和 C:P 最高,均显著高于其他区域;N:P 在区域间无显著差异。CWD 的 C:N、C:P 和 N:P 均值变化范围分别为 77.83 ~ 111.24、1 240.80 ~ 4 746.23 和 15.94 ~ 55.67。其中,天池的 C:N 最高,显著高于昭苏、新源和呼图壁;奇台的 C:P 和 N:P 最高,均显著高于其余区域(图 3)。

2.3 不同区域地上死有机质碳储量及组成

凋落物和 CWD 单位面积碳储量在区域间表现出不同变化特征。5 个区域凋落物单位面积碳储量范围为 1.24 ~ 5.35 t/hm²,其中奇台最高,显著高于其余区域。CWD 单位面积碳储量范围为 0.22 ~ 3.14 t/hm²,不同区域间无显著差异。沿天山山脉由西向东,凋落物单位面积碳储量总体呈增加趋势,而 CWD 单位面积碳储量呈相对下降趋势。尽管不同区域间总死有机质单位面积碳储量无显著差异,但



数据为均值±95%置信区间。同一组分内不同区域间小写字母表示差异显著($p < 0.05$)。下同。

图2 不同区域凋落物与粗木质残体的养分含量差异

Fig. 2 Regional differences in nutrient concentrations of litter and coarse woody debris

不同组分对总碳库的贡献率存在明显变化(图4)。总地上死有机质碳库均以凋落物贡献为主,凋落物和CWD对总碳库的贡献率分别为57.2%~86.6%和13.4%~42.8%。其中,奇台和天池凋落物贡献率较高,分别为86.6%和81.9%;新源CWD贡献率最高,为42.8%(图4)。

2.4 凋落物和CWD养分含量及化学计量比与环境因子的相关性

Spearman 相关分析显示,凋落物养分含量主要与水分和林分结构相关。其中,K含量与年平均降水量(MAP)呈显著正相关,而与郁闭度呈显著负相关;Ca含量与种群密度呈显著正相关(图5)。相比之下,CWD的养分含量与种群密度、MAP和郁闭度存在显著相关性。C和Mg含量与种群密度呈显著正相关,N含量与MAP呈显著正相关,但其C:N与MAP呈显著负相关。随着郁闭度的增加,CWD的N和P含量显著降低,而C:N和C:P显著升高。

3 讨论

3.1 凋落物和CWD养分分配格局的区域差异

本研究所测的凋落物各养分元素均表现出显著区域差异,而CWD中仅P、K和Mg存在显著区域

变化,表明两类死有机质组分对区域环境因子具有不同的响应模式(图5)。已有研究^[3-4,24]表明,凋落物主要由叶片、枝条和生殖器官等植物有机残体组成,其周转周期较短,养分组成能够较快响应植物养分吸收和外界环境变化,因此具有较高的空间敏感性。相比之下,CWD由枯立木、倒木和粗枝等组成,具有较长的周转时间,其化学组分受到长期腐解过程和养分迁移的共同影响,因而相对稳定^[9,25-26]。

其中,CWD中P、K和Mg含量在区域间的差异可能与不同元素在腐解过程中的环境驱动因子有关。本研究结果显示,P含量与郁闭度呈显著负相关,这可能是因为高郁闭度下的弱光照会抑制微生物活性,延缓P的矿化释放,但该推测尚需微生物学证据支持^[27]。Mg含量与种群密度呈显著正相关,可能源于高密度林分内CWD输入量增加。Mg作为叶绿素和酶辅因子等结构组分的重要元素,其积累直接受有机质输入量的正向调控^[28]。相较而言,K含量与所测环境因子均无显著相关性。尽管已有研究指出,K在腐解中易通过淋溶作用迁移^[26],但本研究中区域尺度上降水量与K的关系并不显著。这可能是由于淋溶作用与林冠截留、植被吸收等过程相互抵消,或其空间异质性受本研究中未涵盖的其他因素(如

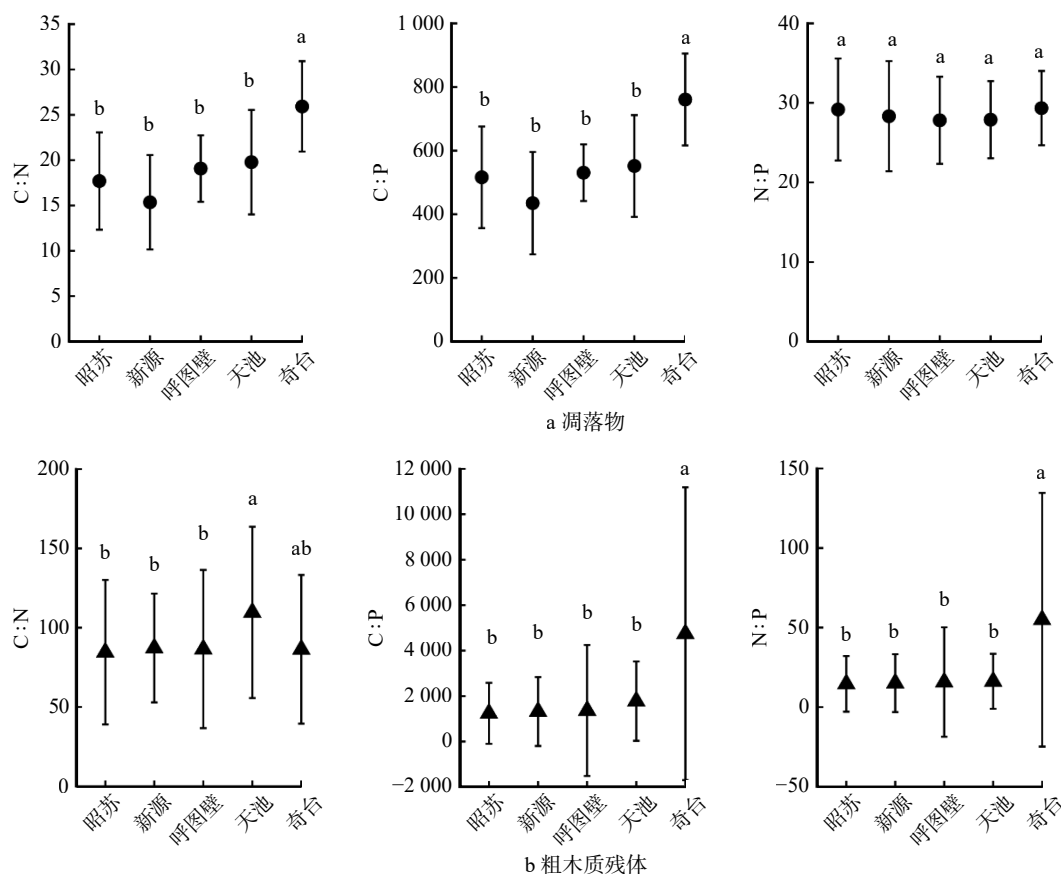


图3 不同区域凋落物与CWD的养分化学计量比差异

Fig. 3 Regional variation in nutrient stoichiometric ratios of litter and coarse woody debris

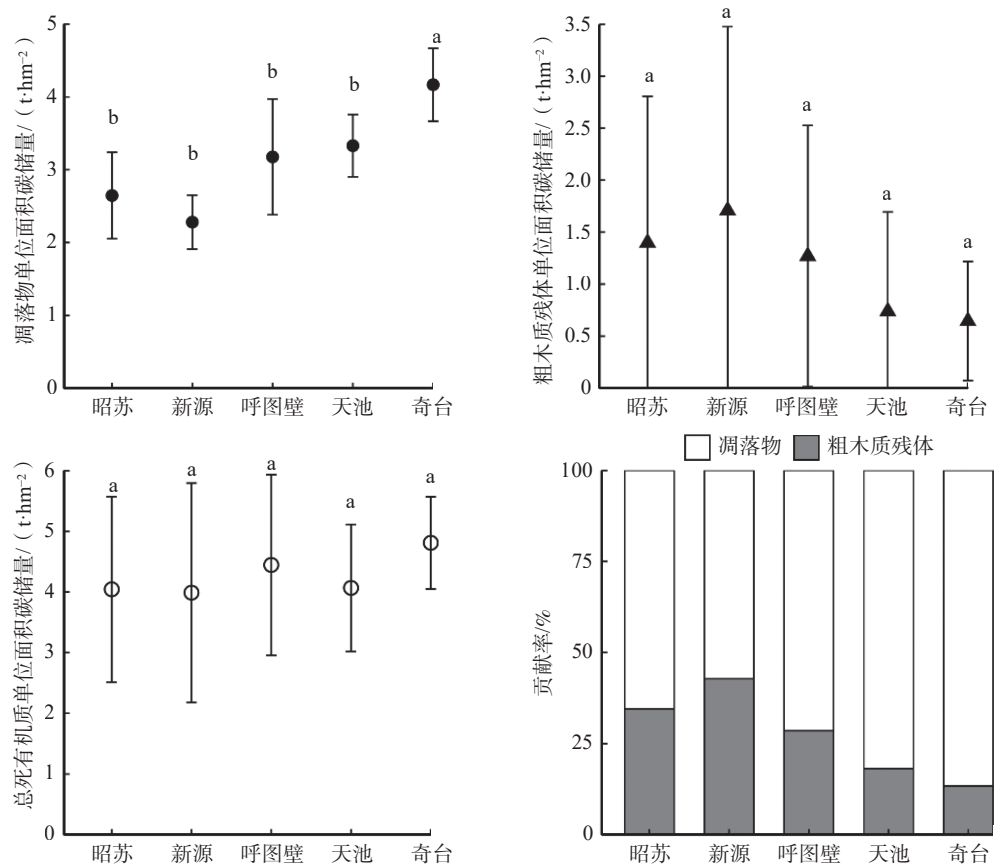
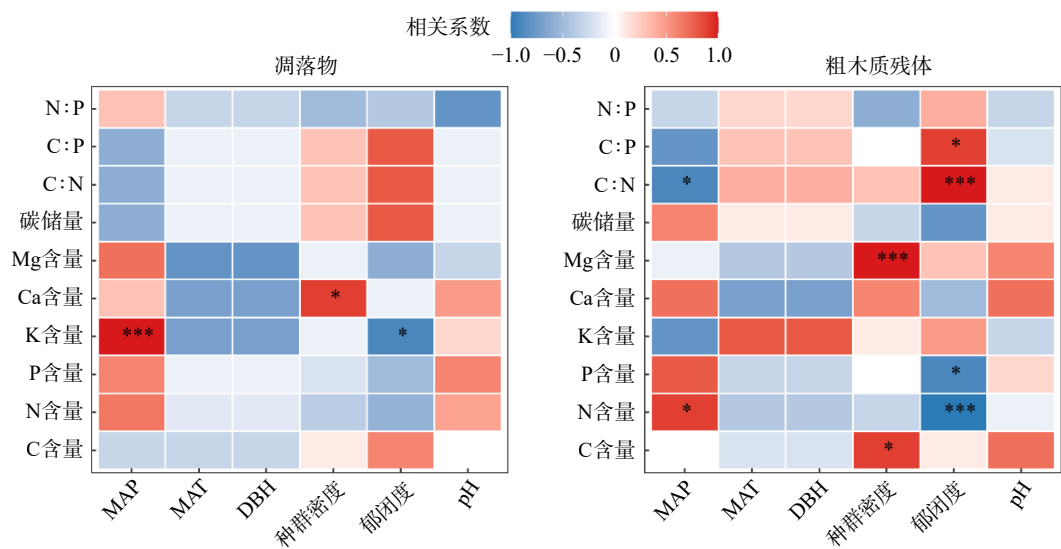


图 4 不同区域地上死有机质碳储量及其组分贡献

Fig. 4 Carbon stocks and component contributions of aboveground dead organic matter across different regions



MAP. 年平均降水量; MAT. 年平均温度; DBH. 胸径。*、***分别表示在 $p < 0.05$ 、 $p < 0.001$ 水平上显著相关。

图 5 凋落物和 CWD 的养分含量及化学计量比与环境因子的相关性

Fig. 5 Spearman correlations of nutrient contents and stoichiometric ratios in litter and CWD with environmental factors

凋落物质量、土壤因子)驱动。

凋落物和 CWD 的养分组成对区域环境梯度的不同响应说明,森林死有机质并非一个性质均一的碳库,而是由不同周转时间尺度的组分共同构成。相比于能够快速反映当前环境条件的凋落物,CWD

更多记录了长期养分积累和释放过程^[22, 26, 29]。因此,在区域尺度养分循环评估中,将凋落物和 CWD 视为统一的死有机质库可能掩盖其在生态系统养分维持和稳定性调节中的作用,应将二者作为具有不同时间尺度特征的组分分别评价^[30]。

3.2 凋落物与 CWD 的化学计量特征

本研究发现, 尽管凋落物养分含量在区域间存在显著差异, 但其 N:P 保持相对稳定。相比之下, CWD 的 C:P 和 N:P 表现出更大的区域变异幅度。这表明两类死有机质组分在化学计量关系上存在明显差异。

凋落物 N:P 的区域稳定性表明雪岭云杉对限制性养分的利用具有较强的调节能力^[7]。已有研究^[31]表明, 植物在叶片衰老过程中通常会同步回收 N 和 P, 以提高养分利用效率并减少养分损失, 同时维持相对稳定的化学计量关系。这与本研究凋落物 N:P 在区域间仍保持稳定的结果一致。这种稳定的化学计量特征有利于保持凋落物分解和养分归还过程的连续性, 从而维持森林生态系统养分循环的稳定运行。与凋落物相比, CWD 具有更高的 C:N 和 C:P 且区域变异更明显, 说明木质残体富含木质素和纤维素, 其腐解过程持续时间较长, 元素组成会随着分解进程不断发生变化^[32]。特别是奇台地区 CWD 表现出最高的 C:P 和 N:P, 较高的 C:P 和 N:P 通常反映其 P 含量相对于 C 和 N 含量较低^[33]。因此, CWD 化学计量特征反映出长期腐解过程中不同区域元素释放过程存在差异, 从而导致其内部 C、N 和 P 之间的比例关系发生改变。与凋落物相比, CWD 化学计量特征能够更敏感地记录长期腐解过程中元素循环过程的区域差异。

3.3 雪岭云杉林地上死有机质碳库组成特征及其区域生态意义

死有机质碳库是森林生态系统碳库的重要组成部分, 其组成特征直接影响森林生态系统的碳循环过程^[34-36]。本研究发现, 雪岭云杉林地上死有机质碳库主要由凋落物构成, 凋落物贡献率达到 57.2%~86.6%, 明显高于 CWD。已有研究表明, CWD 储量主要受死亡木输入与腐解输出之间平衡关系的控制, 其积累过程通常需要较长时间尺度^[10]。相较于以大量死亡木积累为特征的老龄针叶林, 本研究区域地上死有机质碳库中凋落物仍占据主导地位, 表明持续的针叶和细枝输入是维持死有机质碳库的重要来源。然而, CWD 仍贡献了 13.4%~42.8% 的碳储量, 也是区域死有机质碳库不可忽视的组成部分, 两者共同决定了地上死有机质碳库的稳定性^[2]。

此外, 本研究发现, 沿天山山脉由西向东(从昭苏到奇台), 凋落物碳储量总体呈增加趋势, 而 CWD 碳储量呈现相对下降的趋势, 但区域间差异未达到显著水平。凋落物主要由针叶和细枝的持续输入形成, 周转周期较短, 受植被生产力、微气候条件及分解过程的影响较大^[8, 13]。而 CWD 则主要由树木死

亡和倒木形成, 其输入具有较强的随机性, 并受林分年龄结构、干扰历史及腐解过程的长期影响^[22, 30, 37]。值得注意的是, 不同区域地上死有机质碳库组成并非表现为凋落物和 CWD 同步增加, 而是表现出相反的变化趋势。尽管两类组分变化方向不同, 但总地上死有机质碳储量在区域间并未表现出明显差异。这说明区域环境变化对雪岭云杉林地上死有机质碳库的影响主要体现在不同组分贡献率的调整, 而非总碳储量的显著改变。不同地上死有机质组分的差异响应是形成区域尺度死有机质碳库空间异质性的主要原因。因此, 在开展区域尺度森林碳汇评估时, 需要同时考虑凋落物和 CWD 两类组分, 才能更加准确地评价森林生态系统的碳储存能力^[8, 38]。

值得注意的是, 2010 年以来, 新疆及天山地区的气候和水热条件发生了明显变化^[39-40]。因此, 本研究中两类死有机质组分的碳储量和养分含量可能与当前水平存在一定差异。然而, 本研究主要关注不同区域凋落物和 CWD 之间的相对差异, 反映的是区域环境、林分结构及组分周转过程共同作用下的空间分异特征。近年来的研究仍表明, 雪岭云杉生长对水热条件具有明显的空间和海拔差异^[40], 凋落物分解及元素释放也对水热条件变化较为敏感^[41]。相比之下, CWD 的形成与变化更多受到林分死亡输入及长期腐解过程的影响^[30, 37]。这些研究支持了本研究关于区域环境差异和死有机质组分分异的认识。因此, 本研究结果可作为天山雪岭云杉林地死有机质碳和养分特征的重要区域基线, 并为理解不同死有机质组分的空间分异及其环境响应提供参考。

4 结 论

雪岭云杉林凋落物和 CWD 对区域环境梯度表现出不同的响应模式。凋落物养分对当前环境响应较敏感, 而 CWD 养分组成相对稳定, 但其化学计量比(C:P 和 N:P)的区域变异幅度更大, 表明两类死有机质组分在化学计量关系上存在明显分异。区域环境变化主要改变各组分对碳储量的贡献率, 而总死有机质碳储量在区域间变化相对较小, 说明区域尺度死有机质碳库空间异质性主要来源于不同组分的差异响应。因此, 在区域森林碳库评估和养分循环研究中, 应同时考虑凋落物和 CWD 两类组分, 以更加准确地认识干旱区山地森林死有机质碳库组成及其变化特征。

参 考 文 献

- [1] 王清奎, 田鹏, 孙兆林, 等. 森林土壤有机质研究的现状与挑战[J]. 生态学报, 2020, 39(11): 3829-3843.

- Wang Q K, Tian P, Sun Z L, et al. Research on soil organic matter in forest ecosystems: status and challenge [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, 39(11): 3829–3843.
- [2] Stokland J, Alfredsen G. From deadwood to forest soils: quantifying a key carbon flux in boreal ecosystems [J]. *Biogeochemistry*, 2024, 167(10): 1225–1242.
- [3] 常晨晖, 朱彪, 朱江玲, 等. 森林粗木质残体分解研究进展 [J]. *植物生态学报*, 2024, 48(5): 541–560.
- Chang C H, Zhu B, Zhu J L, et al. Review on the study of forest coarse woody debris decomposition [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2024, 48(5): 541–560.
- [4] 张颀, 满秀玲, 刘思琪, 等. 寒温带地区非生长季典型森林群落凋落物分解及养分释放 [J]. *北京林业大学学报*, 2022, 44(3): 65–74.
- Zhang D, Man X L, Liu S Q, et al. Litter decomposition and nutrient release of typical forest communities in non-growing season in cold temperate zone [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2022, 44(3): 65–74.
- [5] Marañón-Jiménez S, Castro J. Effect of decomposing post-fire coarse woody debris on soil fertility and nutrient availability in a Mediterranean ecosystem [J]. *Biogeochemistry*, 2013, 112(1): 519–535.
- [6] Dadda M, Thorn S, Luo A R, et al. Tree species richness and productivity influence deadwood amount, but microclimate its decay in an early successional subtropical forest [J]. *European Journal of Forest Research*, 2026, 145(4): 80.
- [7] de la Casa J, Sardans J, Galindo M, et al. Stoichiometry of litter decomposition under the effects of climate change and nutrient enrichment: a meta-analysis [J]. *Plant and Soil*, 2025, 506(1): 709–726.
- [8] Zhang X Y, Heděnc P, Yue K, et al. Global forest gaps reduce litterfall but increase litter carbon and phosphorus release [J]. *Communications Earth & Environment*, 2024, 5: 288.
- [9] Herrmann S, Bauhus J. Nutrient retention and release in coarse woody debris of three important Central European tree species and the use of NIRS to determine deadwood chemical properties [J]. *Forest Ecosystems*, 2018, 5(1): 22.
- [10] Yuan J, Hou L, Wei X, et al. Decay and nutrient dynamics of coarse woody debris in the Qinling Mountains, China [J]. *PLoS One*, 2017, 12(4): e0175203.
- [11] Herrmann S, Dunger S, Oehmichen K, et al. Harmonization and variation of deadwood density and carbon concentration in different stages of decay of the most important Central European tree species [J]. *European Journal of Forest Research*, 2024, 143(1): 249–270.
- [12] Pan Y D, Birdsey R A, Fang J Y, et al. A large and persistent carbon sink in the world's forests [J]. *Science*, 2011, 333(6045): 988–993.
- [13] Berg B, McClaugherty C. Plant litter: decomposition, humus formation, carbon sequestration [M]. Berlin: Springer, 2014.
- [14] Yuan J, Wu F Z, Peng C H, et al. Global spectra of plant litter carbon, nitrogen and phosphorus concentrations and returning amounts [J]. *Journal of Ecology*, 2024, 112(4): 717–729.
- [15] 张日施, 黄振格, 何斌, 等. 桂西北不同年龄阶段秃杉人工林的生物量积累及生产力变化 [J]. *北京林业大学学报*, 2021, 43(11): 20–27.
- Zhang R S, Huang Z G, He Bin, et al. Biomass accumulation and productivity changes of *Taiwania flousiana* plantation at different age stages in northwestern Guangxi, southern China [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2021, 43(11): 20–27.
- [16] Güsewell S. N: P ratios in terrestrial plants: variation and functional significance [J]. *New Phytologist*, 2004, 164(2): 243–266.
- [17] Sardans J, Rivas-Ubach A, Peñuelas J. The C: N: P stoichiometry of organisms and ecosystems in a changing world: a review and perspectives [J]. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 2012, 14(1): 33–47.
- [18] Xu X L, Yang Z P, Saiken A, et al. Natural Heritage value of Xinjiang Tianshan and global comparative analysis [J]. *Journal of Mountain Science*, 2012, 9(2): 262–273.
- [19] 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.
- [20] 马现永. 天山云杉粗木质残体生态功能特性研究 [D]. 合肥: 安徽农业大学, 2013.
- Ma X Y. Ecological functions of coarse woody debris of *Picea schrenkiana* var. *tianschanica* in Tianshan Mountains [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2013.
- [21] 柏云龙. 天山云杉群落结构及物种多样性研究 [D]. 合肥: 安徽农业大学, 2013.
- Bai Y L. Heterogeneity of community structure and species diversity of *Picea schrenkiana* var. *tianschanica* in the Tianshan Mountains, northwest China [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2013.
- [22] Harmon M E, Franklin J F, Swanson F J, et al. Ecology of coarse woody debris in temperate ecosystems [M]//Advances in Ecological Research. Amsterdam: Elsevier, 1986: 133–302.
- [23] 范静. 天山云杉林地凋落物养分和持水特性的初步研究 [D]. 合肥: 安徽农业大学, 2013.
- Fan J. Nutrient and water-holding characteristics of litter of *Picea schrenkiana* var. *tianschanica* forest in the Tianshan mountains [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2013.
- [24] Fanin N, Bezaud S, Sarneel J M, et al. Relative importance of climate, soil and plant functional traits during the early decomposition stage of standardized litter [J]. *Ecosystems*, 2020, 23(5): 1004–1018.
- [25] Hu Z H. The decomposition of woody debris in subtropical forests [M]. Beijing: Science Press, 2023.
- [26] Palviainen M, Finér L, Laiho R, et al. Carbon and nitrogen release from decomposing Scots pine, Norway spruce and silver birch stumps [J]. *Forest Ecology and Management*, 2010, 259(3): 390–398.

- [27] 于航, 张蕾, 王刚, 等. 光照强度和温度对三峡水库消落区典型土壤磷释放的影响 [J]. 安徽农业科学, 2011, 39(19): 11539–11541, 11546.
- Yu H, Zhang L, Wang G, et al. Effects of light and temperature on phosphorus release in typical soil of drawdown area of Three Gorges Reservoir [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2011, 39(19): 11539–11541, 11546.
- [28] Berg B, Sun T, Johansson M B, et al. Magnesium dynamics in decomposing foliar litter—a synthesis [J]. Geoderma, 2021, 382: 114756.
- [29] 李顺. 环境因子和系统发育对植物叶片养分重吸收的影响 [D]. 大理: 大理大学, 2023.
- Li S. Effects of environmental factors and phylogeny on leaf nutrient resorption in plants [D]. Dali: Dali University, 2023.
- [30] Harmon M E. The role of woody detritus in biogeochemical cycles: past, present, and future [J]. Biogeochemistry, 2021, 154(2): 349–369.
- [31] Sun X B, Li D J, Lü X T, et al. Widespread controls of leaf nutrient resorption by nutrient limitation and stoichiometry [J]. Functional Ecology, 2023, 37(6): 1653–1662.
- [32] 李垚, 盛基峰, 于美佳, 等. 森林生态系统粗木质残体研究进展 [J]. 广东农业科学, 2022, 49(2): 85–92.
- Li Y, Sheng J F, Yu M J, et al. Research progress of coarse woody residues in forest ecosystems [J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2022, 49(2): 85–92.
- [33] Yan Z B, Tian D, Han W X, et al. An assessment on the uncertainty of the nitrogen to phosphorus ratio as a threshold for nutrient limitation in plants [J]. Annals of Botany, 2017, 120(6): 937–942.
- [34] 吕琨珑, 饶良懿, 李菲菲, 等. 中国森林粗木质残体储量及其影响因素 [J]. 浙江农林大学学报, 2013, 30(1): 114–122.
- Lü K L, Rao L Y, Li F F, et al. Storage and determinants of coarse woody debris in China's forests [J]. Journal of Zhejiang A & F University, 2013, 30(1): 114–122.
- [35] 曹彦, 游巍斌, 王方怡, 等. 森林生态系统粗木质残体碳储量研究进展 [J]. 生态学报, 2021, 41(20): 7913–7927.
- Cao Y, You W B, Wang F Y, et al. Research progress on carbon storage of coarse woody debris in forest ecosystems [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(20): 7913–7927.
- [36] 范静, 刘华, 白志强, 等. 天山云杉枯落物持水特性的空间异质性 [J]. 东北林业大学学报, 2013, 41(5): 56–60.
- Fan J, Liu H, Bai Z Q, et al. Spatial heterogeneity of *Picea schrenkiana* forest litter water-holding characteristics in the Tianshan Mountains [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2013, 41(5): 56–60.
- [37] Russell M B, Fraver S, Aakala T, et al. Quantifying carbon stores and decomposition in dead wood: a review [J]. Forest Ecology and Management, 2015, 350: 107–128.
- [38] Ouimette A, Hastings J, D'Amato T, et al. Can coarse woody material account for the nitrogen imbalance at Hubbard Brook Experimental Forest, New Hampshire, USA? [J]. Biogeochemistry, 2026, 169(2): 18.
- [39] Jin C H, Wang B, Cheng T F, et al. How much we know about precipitation climatology over Tianshan Mountains—the Central Asian water tower [J]. npj Climate and Atmospheric Science, 2024, 7(1): 21.
- [40] He J, Shen Z, Ning C, et al. Elevational effects of climate warming on tree growth in a *Picea schrenkiana* forest in the Eastern Tianshan Mountains [J]. Forests, 2024, 15(12): 2052.
- [41] Gong L, Chen X, Zhang X, et al. Schrenk spruce leaf litter decomposition varies with snow depth in the Tianshan Mountains [J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 19556.

(责任编辑 孟 瑶
责任编委 赵秀海)