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

寒温带典型森林类型生长季土壤活性有机碳动态特征及影响因素

刘贝贝 蔡体久

Seasonal dynamics characteristics and influencing factors of soil labile organic carbon in typical boreal forest types during the growing season

Liu Beibei, Cai Tijiu

引用本文:
刘贝贝, 蔡体久. 寒温带典型森林类型生长季土壤活性有机碳动态特征及影响因素[J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(2):93–102. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250159
Liu Beibei, Cai Tijiu. Seasonal dynamics characteristics and influencing factors of soil labile organic carbon in typical boreal forest types during the growing season[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(2):93–102. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250159

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250159

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

寒温带林区不同林型下冻融土壤活性有机碳的变化

Changes of active organic carbon in frozen thawed soil under different forest types in cold temperate forest region

北京林业大学学报, 2021, 43(12): 65–72. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210030

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

Litter decomposition and nutrient release of typical forest communities in non–growing season in cold temperate zone

北京林业大学学报, 2022, 44(3): 65–74. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210338

荆条叶片最大水分利用效率的季节变化及其环境调控

Dynamics and environmental regulation of the maximum leaf water use efficiency of *Vitex negundo* var. *heterophylla* during growing season

北京林业大学学报, 2023, 45(6): 52–61. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220347

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

滇南不同类型森林优势种幼树枝生态化学计量特征

Ecological stoichiometric characteristics of sapling branches of dominant species in different forest types in southern Yunnan Province of southwestern China

北京林业大学学报, 2024, 46(5): 46–54. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220295

东北森林生长季NDVI对昼夜不对称增温及降水变化的响应特征

Response characteristics of NDVI to asymmetric diurnal temperature increase and precipitation changes during the forest growing season in Northeast China

北京林业大学学报, 2023, 45(2): 34–48. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210396

DOI:10.12171/j.1000−1522.20250159

寒温带典型森林类型生长季土壤活性有机碳动态特征及影响因素

刘贝贝　蔡体久
（东北林业大学林学院，黑龙江 哈尔滨 150040）

摘要:【目的】活性有机碳能够比总有机碳更灵敏地反映土壤碳库的变化。探究大兴安岭寒温带典型森林类型在生长季中土壤活性有机碳的动态变化及其驱动因素，以期为评估该区域土壤碳循环过程和制定森林经营管理策略提供科学依据。**【方法】**以大兴安岭北部寒温带兴安落叶松林、樟子松林、白桦林和山杨林为研究对象，于 2023 年 5—9 月采集 0 ~ 10 cm 和 10 ~ 20 cm 土层样品，测定土壤微生物量碳（MBC）、可溶性有机碳（DOC）、易氧化有机碳（EOC）和颗粒有机碳（POC）含量，分析其季节动态特征及影响因素。**【结果】**（1）5—9 月，4 种林型土壤 MBC、DOC、EOC 和 POC 含量分别为 107.36 ~ 931.92 mg/kg、74.31 ~ 442.8 mg/kg、7.23 ~ 14.97 g/kg 和 2.07 ~ 27.17 g/kg，均值表现为 POC > EOC > MBC > DOC。MBC、EOC 和 POC 呈“单峰”变化特征，于 8 月达到峰值，而 DOC 在 5 月达到最高值后逐渐下降。（2）林型、土层、月份及其交互作用极显著影响活性有机碳含量（$P < 0.001$），单因素贡献排序为土层 > 月份 > 林型。（3）土壤温湿度、β-葡萄糖苷酶活性和氮素含量与活性有机碳显著正相关，容重、pH 值与活性有机碳显著负相关（$P < 0.05$）；降水量和空气相对湿度主要影响 MBC 和 DOC。**【结论】**寒温带森林土壤活性有机碳的动态变化受到土层、水热条件及酶活性的协同调控，阔叶林因凋落物质量较高表现出更强的活性有机碳积累能力。本研究揭示了活性有机碳组分的特异性响应机制，为预测气候变化背景下北方森林碳汇功能提供了科学依据。

关键词：寒温带；森林类型；土壤活性有机碳；生长季；季节动态
中图分类号：S714.5；S79　**文献标志码：**A　**文章编号：**1000−1522(2026)02−0093−10
引文格式：刘贝贝，蔡体久. 寒温带典型森林类型生长季土壤活性有机碳动态特征及影响因素［J］. 北京林业大学学报，2026，48(2)：93−102. Liu Beibei, Cai Tijiu. Seasonal dynamics characteristics and influencing factors of soil labile organic carbon in typical boreal forest types during the growing season［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(2): 93−102.

Seasonal dynamics characteristics and influencing factors of soil labile organic carbon in typical boreal forest types during the growing season

Liu Beibei　Cai Tijiu
(School of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China)

Abstract: ［**Objective**］ Labile organic carbon (LOC) responds more sensitively to changes in soil carbon pools than total organic carbon. This study investigates the seasonal dynamics and driving factors of soil ROC in typical boreal forest types in the Greater Khingan Mountains during the growing season, aiming to provide a scientific basis for assessing regional soil carbon cycling and informing forest management strategies. ［**Method**］ We selected four representative forest types in northern Greater Khingan, including Dahurian larch (*Larix gmelinii*) forest, Scots pine (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*) forest, white birch (*Betula platyphylla*) forest, and aspen (*Populus davidiana*) forest as study sites. Soil samples were collected

收稿日期: 2025−05−05　**修回日期:** 2025−10−26
基金项目: 国家重点研发计划（2021YFD2200405）。
第一作者: 刘贝贝。主要研究方向：森林土壤学。Email：1015013484@qq.com　地址：150040 黑龙江省哈尔滨市香坊区和兴路 26 号东北林业大学林学院。
责任作者: 蔡体久，教授，博士生导师。主要研究方向：森林生态学和森林水文学。Email：15045853579@163.com　地址：同上。
本刊网址: https://j.bjfu.edu.cn；https://journal.bjfu.edu.cn

monthly from May to September 2023 at depths of 0−10 cm and 10−20 cm. We measured microbial biomass carbon (MBC), dissolved organic carbon (DOC), easily oxidizable organic carbon (EOC), and particulate organic carbon (POC) to analyze their seasonal dynamics and influencing factors. [**Result**] From May to September, MBC, DOC, EOC, and POC concentrations ranged from 107.36 to 931.92 mg/kg, 74.31 to 442.8 mg/kg, 7.23 to 14.97 g/kg, and 2.07 to 27.17 g/kg, respectively, with mean values following the order POC > EOC > MBC > DOC. MBC, EOC, and POC exhibited a unimodal pattern, peaking in August, whereas DOC peaked in May and then declined gradually. (2) Forest type, soil depth, month, and their interactions significantly affected LOC content ($P < 0.001$), with the relative importance of individual factors ranked as soil depth > month > forest type. (3) Soil temperature, moisture, β-glucosidase activity, and nitrogen content showed significant positive correlations with LOC, while bulk density and pH exhibited significant negative correlations ($P < 0.05$). Precipitation and air relative humidity primarily influenced MBC and DOC. [**Conclusion**] The seasonal dynamics of soil LOC in boreal forests are jointly regulated by soil depth, hydrothermal conditions, and enzyme activity. Broadleaf forests demonstrated greater LOC accumulation capacity due to higher-quality litter inputs. This study reveals the component-specific response mechanisms of LOC, offering a scientific foundation for predicting carbon sink functions of boreal forests under climate change scenarios.

Key words: boreal zone; forest type; soil labile organic carbon; growing season; seasonal dynamics

土壤有机碳库是陆地生态系统中最活跃的碳库，对维持土壤肥力和调节气候变化至关重要[1−2]。森林土壤有机碳的微小变化即可影响大气 CO_2 浓度[3]，土壤总有机碳变化缓慢，短期内不易观测[4]，而活性有机碳易被氧化分解和矿化，因此常被用作指示土壤碳库变化的早期敏感性指标[5−6]。活性有机碳包括多种高度游离的有机质[7]。其中，微生物量碳（microbial biomass carbon，MBC）与土壤中微生物活动密切相关，是调控生态系统碳及其他养分流动的关键因素[8]；易氧化有机碳（easily oxidizable organic carbon，EOC）对环境敏感且不稳定，是微生物能量的主要来源[9]；可溶性有机碳（dissolved organic carbon，DOC）易溶于水，其动态变化能够反映土壤有机碳循环与平衡的趋势[10]；颗粒有机碳（particulate organic carbon，POC）为新鲜残茬向腐殖质转化的中间过渡性碳库，对土壤长期碳固存具有重要作用[11]。这 4 种活性有机碳分别从不同的角度表征了土壤有机碳的周转速率及稳定性。

近期研究表明，林型[12]、土层[13]、季节[14]、气候[13]和土壤性质[15]等因素显著影响土壤活性有机碳含量，但其作用机制存在区域异质性。如长白山地区红松（*Pinus koraiensis*）林土壤活性有机碳的峰值出现时间受海拔和月份调控[3]；中亚热带森林土壤 MBC、EOC 含量在秋季较高，而 DOC 在秋季最低，这是林型、土层、季节及土壤环境等因素综合作用的结果[16]；东北泥炭地表层土壤 EOC、MBC、DOC 含量分别于 11 月、9 月和 1 月达到峰值，主要驱动因素为土壤温度、降水量、pH 值及全氮含量[17]。目前关于大兴安岭林区的研究对象较为单一，且驱动机制分析多聚焦于土壤性质，缺乏对气候因素协同作用的考量。作为我国唯一的高纬度寒温带林区[18]，大兴安岭复杂的环境条件使得土壤活性有机碳的季节演变特征及调控规律仍不清晰。鉴于此，开展多林型、全生长季的系统性研究，对于明确该区域土壤碳库对气候变化的响应具有重要意义。

本研究选取大兴安岭林区北部 4 种不同典型林型（兴安落叶松（*Larix gmelinii*）林、樟子松（*Pinus sylvestris* var. *mongolica*）林、白桦（*Betula platyphylla*）林和山杨（*Populus davidiana*）林），通过生长季连续监测，对比分析不同林型土壤活性有机碳月动态特征，识别关键驱动因素，以期为寒温带森林土壤固碳研究提供理论依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于黑龙江漠河森林生态系统国家定位观测研究站（53°33′30″N，123°15′30″E），属寒温带大陆性季风气候。年平均气温−4.9 ℃，年降水量 350 ~ 400 mm，无霜期约 86 d，年潜在蒸散量约 800 mm。地带性土壤以棕色针叶林土为主，局部地区还有草甸土和沼泽土分布，是我国多年冻土的主要分布区。植被类型为欧亚大陆寒温带明亮针叶林，以兴安落叶松林为主，同时分布有樟子松林、白桦林和山杨林等，林下灌木主要包括兴安杜鹃（*Rhododendron dauricum*）、杜香（*Rhododendron tomentosum*）和笃斯越橘（*Vaccinium uliginosum*）等。

1.2　样地设置与样品采集

在前期踏查基础上，2023 年 5 月，在大兴安岭北部林区选择兴安落叶松林、樟子松林、白桦林和山杨林为研究对象，每种林型设置 3 块 20 m × 30 m 样地。在样地内进行林分调查并记录（表 1）。

鉴于大兴安岭寒温带土层较薄（20 cm 以下多砾石），本研究仅采集 0 ~ 20 cm 土层样品。于 2023 年 5—9 月每月中旬，采用五点取样法在每个样地中按 0 ~ 10 cm 和 10 ~ 20 cm 分层采集土壤。在去除石块和动植物残体等杂物后，将同层土壤样品进行混合，过 2 mm 钢筛备用。

将过 2 mm 筛的新鲜土样分为两部分：一部分装入自封袋，于 4 ℃ 冰箱保存，用于测定微生物量碳氮、可溶性碳氮、铵态氮以及硝态氮等指标；另一部分在室内风干，用于测定土壤总有机碳、颗粒有机碳、易氧化有机碳、全氮、pH 值及土壤酶活性（如蔗糖酶、β-葡萄糖苷酶等）。

1.3　测定方法

1.3.1　土壤基本理化性质的测定

土壤含水率（soil water content，SWC）采用烘干法测定，土壤温度（soil temperature，ST）使用数字式瞬时温度计（6310，Spectrum，USA）测定，土壤容重采用环刀法测定，pH 使用 PHS-3E 型 pH 计（水土比为 2.5∶1）测定。总有机碳（total organic carbon，TOC）采用 Vario－TOC 燃烧法进行测定，全氮（total nitrogen，TN）、铵态氮（ammonium nitrogen，NH_4^+-N）、硝态氮（nitrate nitrogen，NO_3^--N）使用 AA_3 连续流动分析仪（seal analytical，Norderstedt，Germany）测定，可溶性有机氮（dissolved organic nitrogen，DON）使用 K_2SO_4 浸提法进行提取，微生物量氮（microbial nitrogen，MBN）则采用氯仿熏蒸-K_2SO_4 浸提法测定[16]。蔗糖酶采用 3-5−二硝基水杨酸比色法测定；β-葡萄糖苷酶（β-Glucosidase，βG）采用硝基苯比色法测定[16]。4 种森林土壤基本性质如表 2 所示。

1.3.2　土壤活性有机碳含量的测定

土壤 DOC 含量采用 K_2SO_4 浸提法测定；MBC 含量采用氯仿熏蒸法-K_2SO_4 提取法测定[16]；EOC 含量采用 $KMnO_4$ 氧化−比色法测定；POC 含量通过六偏磷酸钠震荡法提取后，在 Multi N/C 2100 TOC 分析仪上测定[3,10]。

1.3.3　环境因素测定

试验期间，各项环境因素由自动气象站连续监测（表 3）。其中，月均温与空气相对湿度采用 HMP155 探头（Vaisala，芬兰）测定；太阳有效辐射采用 LI190SB 光合有效辐射传感器（LI-Cor，美国）获取；降雨量通过 TE525 翻斗式雨量计（Campbell Scientific，美国）进行记录。

1.4　分析方法

采用 Excel 对数据进行处理，SPSS 26.0 对数据进行统计分析，Origin 2021 和 R 语言进行作图。使用单因素方差分析（one-way ANOVA）和最小显著性差异法（LSD）检验 4 种森林类型土壤活性有机碳含量的差异，显著性水平设定为 $\alpha = 0.05$。运用双因素方差分析林型、土层、气候变化及其交互作用对土壤活性有机碳含量的影响，采用 Pearson 法对土壤活性有机碳和环境因素进行相关性分析，并在 R 语言中绘制相关性热图。以 4 种活性有机碳含量为因变量，气候因素和土壤因素为自变量，使用 SPSS 26.0 进行线性逐步回归分析。

2　结果与分析

2.1　不同森林类型土壤活性有机碳含量变化特征

5—9 月，4 种林型 0 ~ 20 cm 土层土壤 MBC、DOC、EOC 和 POC 含量分别为 107.36 ~ 931.92 mg/kg、74.31 ~ 442.89 mg/kg、7.23 ~ 14.97 g/kg 和 2.07 ~ 27.17 g/kg。各种有机碳含量在生长季整体呈单峰趋势。其中，MBC、EOC 和 POC 均于 8 月达峰值，而 DOC 峰值则出现在 5 月（图 1）。

从林型均值来看，4 种林型土壤活性有机碳含量总体呈 POC > EOC > MBC > DOC 趋势（表 4）。白桦林中 MBC、DOC 和 POC 含量较高，分别为 479.48、186.64 和 18.10 g/kg，且 DOC 和 POC 显著

表 1　样地基本情况

Tab. 1　Basic information of the sample sites

森林类型	海拔/m	密度/（株·hm^{-2}）	林龄/a	坡度/（°）	郁闭度	土壤类型	平均胸径/cm	平均树高/m	母岩类型	树种组成
兴安落叶松（*Larix gmelinii*）林	305	1 260	86 ± 8A	6	0.7	棕色针叶林土	15.67 ± 0.32B	17.15 ± 1.05B	花岗岩、片麻岩	8落1樟1白
樟子松（*Pinus sylvestris* var. *mongolica*）林	290	736	97 ± 12A	10	0.6	棕色针叶林土	22.90 ± 1.08A	23.66 ± 0.77A	花岗岩	8樟2落
白桦（*Betula platyphylla*）林	378	1 663	43 ± 5B	6	0.8	暗棕壤	12.68 ± 0.66B	14.62 ± 0.61C	花岗岩、砂岩	10白
山杨（*Populus davidiana*）林	385	975	41 ± 6B	7	0.7	暗棕壤	13.82 ± 0.47B	18.54 ± 0.26B	片麻岩、砂岩	8杨2白

注：表中林龄、平均胸径、平均树高数据为平均值 ± 标准差。同列不同大写字母表示同一指标在不同森林类型间的差异达到显著水平（$P < 0.05$）。

表 2 土壤基本理化性质和酶活性含量

Tab. 2 Basic soil physicochemical properties and enzyme activities

指标	兴安落叶松林		樟子松林		白桦林		山杨林	
	0 ~ 10 cm	10 ~ 20 cm	0 ~ 10 cm	10 ~ 20 cm	0 ~ 10 cm	10 ~ 20 cm	0 ~ 10 cm	10 ~ 20 cm
ST/℃	4.14 ± 0.91Ba	3.31 ± 0.73Bb	9.10 ± 1.13Aa	8.38 ± 1.06Ab	5.40 ± 1.09Ba	5.09 ± 1.11Bb	5.91 ± 0.84Ba	5.55 ± 0.89Bb
SWC/%	41.33 ± 7.68Ba	25.64 ± 3.43Bb	36.06 ± 4.39Ba	26.98 ± 4.34Bb	56.74 ± 9.41Aa	31.14 ± 5.56Ab	42.02 ± 5.46Ba	33.22 ± 6.81Ab
ρb	1.07 ± 0.04Aa	1.24 ± 0.04Ba	0.91 ± 0.02Ca	1.12 ± 0.05Ca	1.07 ± 0.05Ab	1.87 ± 0.06Aa	0.97 ± 0.04Bb	1.24 ± 0.03Ba
pH	5.13 ± 0.05Ba	5.33 ± 0.05Aa	5.35 ± 0.09Ab	5.42 ± 0.04Aa	4.72 ± 0.01Ca	4.91 ± 0.04Ba	5.10 ± 0.52Bb	5.39 ± 0.63Aa
TOC/（g·kg^{-1}）	44.13 ± 0.92Aa	18.50 ± 1.07Ab	28.57 ± 1.09Ba	14.13 ± 0.33Bb	44.82 ± 1.50Aa	20.92 ± 1.47Ab	44.54 ± 1.39Aa	18.38 ± 0.70Ab
TN/（g·kg^{-1}）	2.67 ± 0.18Ba	1.33 ± 0.18ABb	1.76 ± 0.13Ca	1.07 ± 0.13Bb	3.20 ± 0.21Ba	1.77 ± 0.22Ab	4.01 ± 0.41Aa	1.52 ± 0.18ABb
NH_4^+-N/（mg·kg^{-1}）	14.83 ± 0.55Ba	8.77 ± 0.41Bb	11.35 ± 0.48Ca	9.18 ± 0.26Ba	15.57 ± 0.71Ba	10.72 ± 0.87Bb	19.81 ± 1.66Aa	14.45 ± 1.65Ab
NO_3^--N/（mg· kg^{-1}）	4.53 ± 0.88Aa	2.70 ± 0.56Ab	3.54 ± 0.49Aa	2.62 ± 0.58Ab	2.77 ± 0.65Aa	2.14 ± 0.63Ab	4.75 ± 1.00Aa	3.57 ± 0.89Ab
MBN/（mg·kg^{-1}）	114.46 ± 10.55Ba	70.3s6 ± 5.77Ab	133.20 ± 14.95ABa	61.20 ± 7.29Ab	166.05 ± 12.30Aa	85.96 ± 12.33Ab	159.77 ± 10.06Aa	63.08 ± 7.66Ab
DON/（mg·kg^{-1}）	52.49 ± 8.30ABa	32.32 ± 3.65ABb	38.07 ± 4.97Ba	27.28 ± 1.90Bb	66.67 ± 8.36Aa	39.31 ± 3.03Ab	62.17 ± 5.78Aa	37.02 ± 4.48ABb
SUC/（mg·kg^{-1}）	73.84 ± 1.66Aa	38.24 ± 1.60Ab	69.34 ± 4.44Aa	37.88 ± 3.46Ab	75.53 ± 2.80Aa	39.11 ± 5.83Ab	77.66 ± 2.11Aa	41.74 ± 3.64Ab
βG/(μg·g^{-1})	26.27 ± 1.12Ca	9.95 ± 0.53Bb	23.46 ± 0.89Ca	7.41 ± 0.46Cb	42.51 ± 0.67Aa	15.02 ± 0.31Ab	35.26 ± 1.45Ba	9.82 ± 0.61Bb

注：表中数据为5—9月的平均值 ± 标准误。同行不同大写字母表示同一土层不同森林类型间差异达显著水平（$P < 0.05$）；同行不同小写字母表示同一森林类型不同土层间差异达到显著水平（$P < 0.05$）。其中，ST为土壤温度，SWC为土壤含水率，ρb为土壤容重，pH为土壤酸碱度，TOC为土壤总有机碳，TN为土壤全氮，NH_4^+-N为铵态氮，NO_3^--N为硝态氮，MBN为微生物量氮，DON为可溶性有机氮，SUC为蔗糖酶，βG为β-葡萄糖苷酶。下同。

表 3 研究区 2023 年 5—9 月环境因素变化情况

Tab. 3 Changes in environmental factors in the study area from May to September 2023

月份	温度/℃	相对湿度/%	降水量/mm	太阳有效辐射/（W·m^{-2}）
5	9.26	54.87	51.40	107.95
6	15.66	73.52	59.10	131.11
7	20.17	75.86	37.70	135.37
8	16.89	70.71	33.70	112.63
9	8.98	70.07	26.20	56.42

高于其他 3 种林型（$P < 0.05$）。山杨林 EOC 较高（7.69 g/kg），显著高于樟子松林（$P < 0.05$）。整体而言，阔叶林（白桦林、山杨林）显著高于针叶林（兴安落叶松林、樟子松林，$P < 0.05$），阔叶林 MBC、DOC、EOC、POC 含量分别为针叶林的 1.14、1.17、1.47 和 1.28 倍。土壤活性有机碳含量随土层加深而降低，除 MBC 外，其余土层间差异均达显著水平（$P < 0.05$，表 4）。

2.2 土壤活性有机碳的影响因素

多因素方差分析（表 5）表明，林型、土层、月份及三者交互作用对土壤活性有机碳含量的影响均达极显著水平（$P < 0.001$）。主效应排序为土层 > 月份 > 林型。交互作用中，任意两因素交互后的影响效果均低于单因素作用力，且不同因素交互后对 4 种活性有机碳的作用程度也各不相同。月变化 × 林型对 MBC 影响最强，月份 × 土层对 DOC 影响最强，林型 × 土层对易氧化有机碳（EOC）影响最强，而三因素交互对颗粒有机碳（POC）具有显著效应（$P < 0.001$）。

相关性热图（图 2）表明，土壤性质与土壤活性有机碳间存在显著关联。微生物量氮、全氮、蔗糖酶和 β-葡萄糖苷酶与 4 种林型的微生物量碳（MBC）、易氧化有机碳（EOC）、颗粒有机碳（POC）均呈显著正相关（$P < 0.05$）；土壤容重、pH 与所有活性有机碳组分呈显著负相关。溶解性有机碳（DOC）与铵态氮、硝态氮的关联因林型而异，如硝态氮在樟子松林中与溶解性有机碳（DOC）呈显著负相关（$P < 0.05$），而在阔叶林中相关性不显著。

2.3 不同森林类型土壤活性有机碳的关键影响因素

逐步回归分析（表 6）表明，土壤活性有机碳变

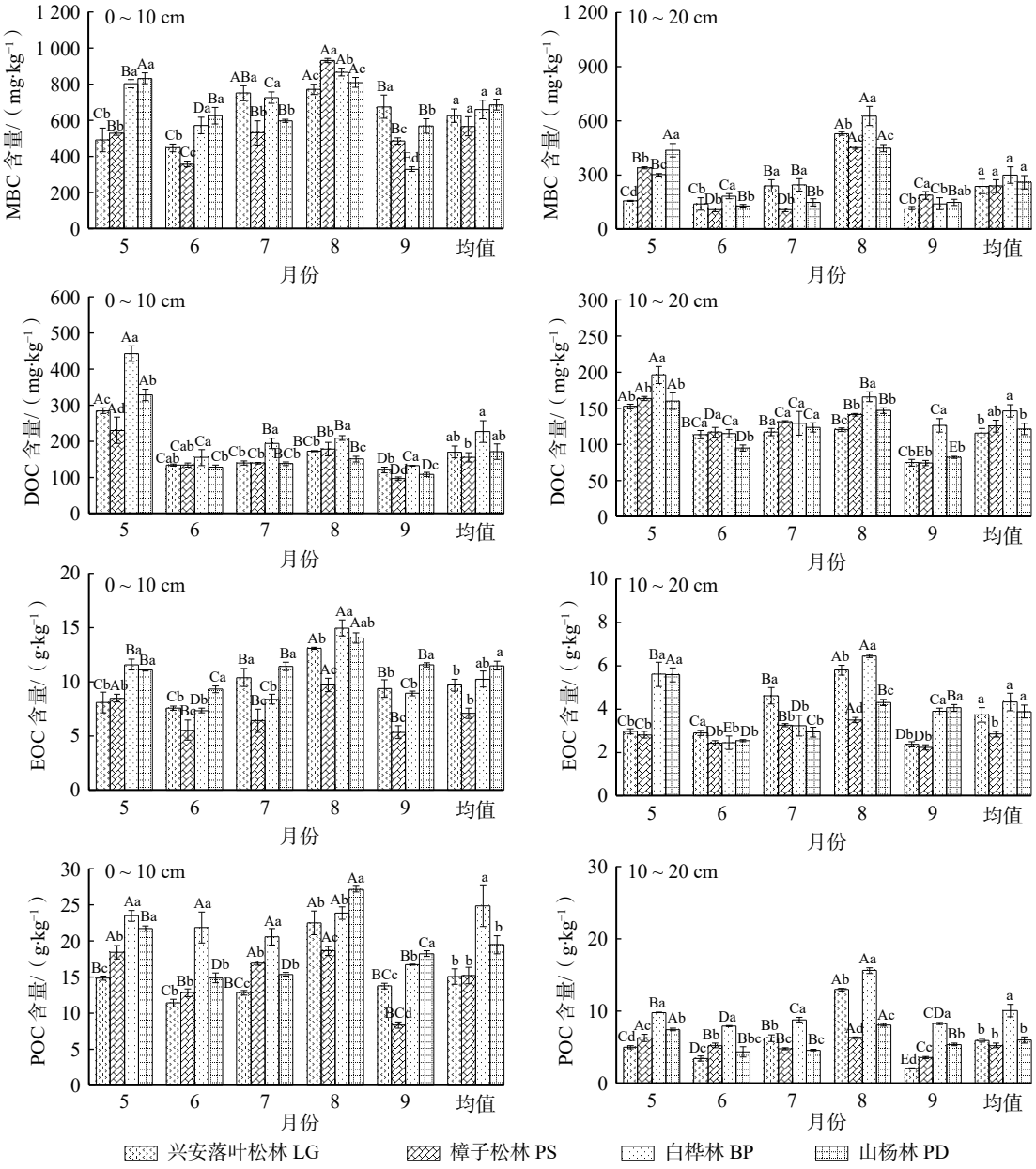


图 1　不同森林类型土壤活性有机碳含量动态变化

Fig. 1　Seasonal dynamics of soil labile organic carbon content in different forest types

注：MBC 为微生物量碳，DOC 为可溶性有机碳，EOC 为易氧化有机碳，POC 为颗粒有机碳。不同大写字母表示同一森林类型间不同月份间差异达显著水平（$P < 0.05$），不同小写字母表示同一月份不同森林类型间差异达到显著水平（$P < 0.05$）。

表 4　不同森林类型 5—9 月土壤活性有机碳均值变化特征

Tab. 4　Mean seasonal variation of soil labile organic carbon in different forest types from May to September

森林类型 Forest types	土层/cm	MBC/（mg·kg⁻¹）	DOC/（mg·kg⁻¹）	POC/（g·kg⁻¹）	EOC/（g·kg⁻¹）
针叶林	0 ~ 10	596.88 ± 34.50Aa	163.22 ± 9.25Ba	15.05 ± 0.59Ba	8.40 ± 0.64Ba
	10 ~ 20	237.79 ± 14.52Bb	120.63 ± 3.82Bb	5.59 ± 0.26Bb	3.29 ± 0.15Bb
	均值	417.33 ± 36.46B	141.92 ± 40.12B	10.50 ± 0.80B	5.85 ± 0.33B
阔叶林	0 ~ 10	672.92 ± 28.84Aa	198.90 ± 10.31Aa	20.38 ± 0.71Aa	10.87 ± 0.36Aa
	10 ~ 20	281.15 ± 24.30Ab	134.03 ± 7.72Ab	8.03 ± 0.23Ab	4.11 ± 0.24Ab
	均值	476.39 ± 38.20A	166.47 ± 63.18A	15.41 ± 0.88A	7.49 ± 0.44A

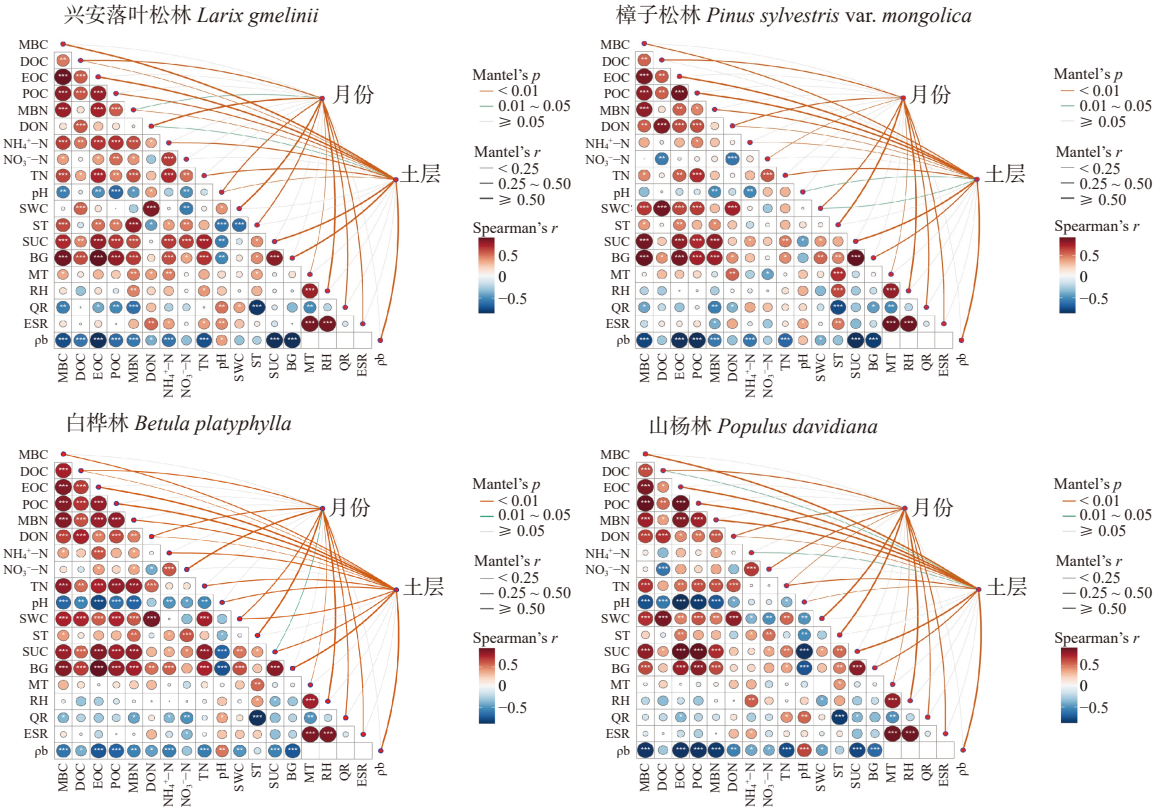
注：表中数据为平均值 ± 标准差；同列不同大写字母表示同一土层不同森林类型间差异达显著水平（$P < 0.05$）；同列不同小写字母表示同一森林类型不同土层间差异达到显著水平（$P < 0.05$）。

表 5 不同森林类型土壤活性有机碳的影响效应

Tab. 5 Effects of forest type on soil labile organic carbon components

因素	自由度	MBC		DOC		EOC		POC	
		F	*P*	*F*	*P*	*F*	*P*	*F*	*P*
A	4	557.811	< 0.001	656.356	< 0.001	288.073	< 0.001	118.097	< 0.001
B	1	4 618.877	< 0.001	780.947	< 0.001	5 327.676	< 0.001	1 674.865	< 0.001
C	3	52.844	< 0.001	127.979	< 0.001	216.875	< 0.001	124.522	< 0.001
A × B	4	17.352	< 0.001	169.549	< 0.001	31.444	< 0.001	5.06	< 0.001
A × C	12	50.607	< 0.001	20.556	< 0.001	24.858	< 0.001	10.708	< 0.001
B × C	3	14.42	< 0.001	28.324	< 0.001	71.022	< 0.001	15.418	< 0.001
A × B × C	12	24.266	< 0.001	16.956	< 0.001	6.561	< 0.001	12.668	< 0.001

注：A、B、C分别代表月份、土层深度、森林类型，A × B、A × C、B × C、A × B × C则表示它们之间的交互作用。



Mantelp's *r* 和 Mantelp's *p*分别表示土层及月份与环境因素间的相关性和显著性，Spearman's *r*表示各环境因素间的相关性。RH 为空气相对湿度，MT为月均温，QR 为每月总降水量，ESR 为太阳有效辐射。下同。

图 2 土壤活性有机碳与土壤理化性质的相关性分析

Fig. 2 Correlation analysis between soil labile organic carbon and soil physicochemical properties

异主要由土壤因素和气候因素共同作用决定，模型解释度为 74.0% ~ 98.0%（$P < 0.05$）。不同林型关键因素组合存在显著差异。其中，影响兴安落叶松林土壤微生物量碳（MBC）、可溶性有机碳（DOC）、易氧化有机碳（EOC）和颗粒有机碳（POC）的主导因素包括铵态氮、硝态氮、土壤温度、β-葡萄糖苷酶、pH、容重及大气相对湿度，其解释度分别为 94.7%、96.8%、97.2% 和 95.5%。对于樟子松林，土壤影响因素主要包括微生物量氮、可溶性有机氮、土壤温湿度、容重、硝态氮、全氮、蔗糖酶和 β-葡萄糖苷酶，气候因素为降水量和大气相对湿度，对 MBC、DOC、EOC 和 POC 的解释度分别为 96.7%、74.0%、93.4% 和 95.5%。白桦林的主导土壤因素为土壤含水率、容重、pH、可溶性有机氮、全氮、铵态氮、蔗糖酶和 β-葡萄糖苷酶，气候因素为降水量，对 MBC、DOC、EOC 和 POC 的解释度分别为 97.4%、93.9%、89.2% 和 81.6%。影响山杨林的土壤因素为 pH、土壤温湿度、容重、全氮、可溶性有机氮和铵态氮，气候因素

表 6　不同森林类型土壤活性有机碳与环境因素的逐步回归分析

Tab. 6　Stepwise regression analysis of soil labile organic carbon and environmental factors in different forest types

森林类型	活性有机碳	拟合方程	R^2
兴安落叶松林	MBC	$Y = 11.612X_{NH_4^+\text{-}N} - 59.045X_{NO_3^-\text{-}N} + 63.910X_{ST}$	0.947
	DOC	$Y = -0.930X_{NH_4^+\text{-}N} + 0.210X_{\beta G} + 0.079X_{RH}$	0.968
	EOC	$Y = 30.749 + 0.110X_{\beta G}$	0.972
	POC	$Y = 0.600X_{NH_4^+\text{-}N} + 0.040X_{\beta G} + 45.480X_{\rho b} - 5.187X_{pH}$	0.955
樟子松林	MBC	$Y = 1\,657.080 + 1.166X_{MBN} - 11.523X_{DON} + 1\,463.620X_{SWC} - 4.981X_{SUC} + 5.361X_{\beta G} - 981.728X_{\rho b} - 8.074X_{QR}$	0.967
	DOC	$Y = 3\,778.074 + 52.459X_{NO_3^-\text{-}N} + 125.969X_{ST} - 72.499X_{RH}$	0.740
	EOC	$Y = 0.074X_{DON} + 0.074X_{\beta G}$	0.934
	POC	$Y = 43.943 + 0.049X_{MBN} + 0.158X_{DON} + 2.111X_{TN} - 0.162X_{\beta G} - 38.122X_{\rho b}$	0.955
白桦林	MBC	$Y = 471.243X_{SWC} - 12.164X_{QR}$	0.974
	DOC	$Y = 155.299X_{pH} - 597.613X_{DON} - 56.507X_{TN} + 2.351X_{SUC}$	0.939
	EOC	$Y = 9.090X_{SWC} - 0.088X_{DON} + 0.344X_{\beta G} + 0.257X_{NH_4^+\text{-}N}$	0.892
	POC	$Y = 47.318 - 6.152X_{\rho b}$	0.816
山杨林	MBC	$Y = 3\,535.348 - 428.468X_{pH} + 231.014X_{SWC} - 828.024X_{\rho b}$	0.968
	DOC	$Y = 1\,234.589 + 1.459X_{DON} + 26.637X_{TN} - 314.342X_{SWC} - 20.863X_{RH} - 16.098X_{NO_3^-\text{-}N} + 25.427X_{ST}$	0.853
	EOC	$Y = 52.534 - 4.443X_{pH} - 19.811X_{\rho b}$	0.980
	POC	$Y = 10.870X_{SWC} - 0.117X_{DON} - 57.073X_{\rho b}$	0.925

为大气相对湿度，对 MBC、DOC、EOC 和 POC 的解释度分别为 96.8%、85.3%、98.0% 和 92.5%。综合分析表明，土壤容重和温湿度是调控 4 种活性有机碳的共性基础因素，而 β-葡萄糖苷酶和全氮分别对 EOC 和 POC 的变化起主要驱动作用，铵态氮对 DOC 的影响较为显著。在气候因素中，降水量和大气相对湿度主要调控 MBC 和 DOC 的月动态变化。

3　讨　　论

3.1　不同森林类型土壤活性有机碳含量变化特征

森林土壤活性有机碳含量主要受两方面因素影响：一是植物通过地上凋落物、根系分泌物及残体形式形成的碳输入；二是由微生物活动引起的碳损失[19−20]。本研究区活性有机碳含量高于华北与黄土高原地区[9,13,21−22]，这可能归因于低温高湿环境对微生物分解速率的抑制作用。研究期间，4 种林型 0 ~ 20 cm 土层土壤活性碳含量呈现 POC > EOC > MBC > DOC 的分布格局，与已有研究结果一致[12]。该分布反映了各组分的差异：POC 常与矿物质颗粒结合形成有机−矿物质复合体[23]，分解速度相对缓慢[11]；EOC 作为 POC 分解的中间产物，因化学活性高且易被微生物利用而难以累积[9]；MBC 受微生物生物量容量限制，周转快但库容量小[8,24]；DOC 存在于土壤溶液中，易受淋溶损失[25−26]。

阔叶林活性有机碳含量显著高于针叶林，这主要源于凋落物数量与质量的差异。阔叶林凋落物量大且分解速率快[9,14]；而针叶林凋落物中含有大量的树脂、木质素及单宁等难分解物质，且分解后产生的酸性物质阻碍了有机质分解产物向土壤中输入[12,24]。除山杨林 EOC 含量高于白桦林外，其余各活性有机碳组分含量均为白桦林 > 山杨林 > 兴安落叶松林 > 樟子松林。这与凋落物化学组成和微生物代谢策略密切有关。白桦凋落物氮含量高、木质素含量低，促进了微生物生物量（MBC）增长和可溶性产物（DOC、POC）释放[27−28]；山杨凋落物低氮、高木质素则限制微生物生长，导致植物源易分解碳（EOC）积累[24,28]。兴安落叶松林因季节性落叶集中输入，为微生物提供了周期性碳源刺激[14]；樟子松为常绿树种，凋落物持续输入但缺乏集中降解期，且松针蜡质层疏水性较强，分解缓慢[27,29]。

月动态方面，MBC、EOC 和 POC 含量在 8 月达到峰值，这与生长旺季适宜的水热条件及丰富的根系分泌物密切相关[26]；DOC 峰值出现在 5 月，反映了冻融作用破坏团聚体结构，并释放吸附的有机质，而春季微生物活性尚在恢复，对 DOC 的同化利用有限[30−31]。进入生长旺季后，微生物通过共代谢快速

消耗 DOC 以支持自身生长[32−33]，因此尽管碳源输入增加，DOC 浓度反而下降[25]。这种“先升后降”的格局凸显了活性有机碳组分对水热条件响应的分异性：MBC、EOC、POC 的积累依赖持续的生物合成与物理保护，而 DOC 则受控于瞬间释放与快速消耗的权衡。

3.2 土壤活性有机碳影响因素综合分析

多因素方差分析表明，林型、土层、月份及其交互作用均极显著影响土壤活性有机碳含量，且单因素贡献高于交互作用。这可能是因为多个环境因素共同作用时，因素间产生“拮抗作用”[13]。相关性分析表明，土壤温湿度、容重、氮素和酶活性是影响土壤活性有机碳动态变化的重要因素。其中，MBC、EOC 和 POC 主要受土壤温湿度、容重和 β-葡萄糖苷酶的影响，而 DOC 含量主要与土壤温湿度和 DON 相关，这与多数研究结果一致[9,12,14,34−35]。β-葡萄糖苷酶作为土壤中的关键水解酶，能有效降解含 β-1,4-糖苷键的多糖类物质为葡萄糖，供微生物和植物吸收利用，其活性越强，有机碳转化速率越快[36]。土壤含水率升高促进有机质从固相解吸并增加 DOC 浸出，同时创造厌氧微环境减缓碳分解[37]；温度升高则通过激活微生物及酶活性加速有机碳周转。

本研究还发现，4 种林型土壤活性有机碳与全氮、微生物量氮和可溶性有机氮显著相关。土壤氮素通过影响地上生物量和土壤呼吸间接影响活性有机碳含量，尤其在北方高纬度森林中，土壤有机碳的维持在很大程度上取决于氮素含量[15]。当土壤中可供植物吸收利用的氮素含量升高时，一方面促使植物光合作用能力增强，固碳速率加快[14]；另一方面通过改变微生物群落结构和功能，降低对稳定性有机碳的分解，促进活性有机碳的积累[24,34]。本研究中，pH 值对兴安落叶松林、白桦林和山杨林影响显著，但对樟子松林影响未达到显著水平，这可能是因为樟子松林土壤孔隙度较高，通气性和透水性良好[38]，对 pH 值变化具有一定的缓冲能力；而气候因素中，降水量和大气相对湿度主要影响 MBC 和 DOC，印证了二者对水分变化的敏感性。

鉴于本研究未涉及土壤团聚结构、矿物组成及微生物群落特征[12,13,38]，未来需结合分子标志物与宏基因组学技术，深入解析大兴安岭森林土壤活性有机碳的固存机制，为精准评估区域碳汇功能、制定森林土壤碳管理策略提供理论支撑。

4 结　　论

（1）5—9 月，4 种林型 0 ~ 20 cm 土层土壤活性有机碳含量表现为 POC > EOC > MBC > DOC，阔叶林高于针叶林；其中，MBC、EOC 和 POC 峰值出现在 8 月，而 DOC 在 5 月最高，随后呈波动下降趋势。

（2）林型、土层、月份及其交互作用对活性有机碳含量具有极显著影响（$P < 0.001$）。其中，单因素影响效应强于多因素交互作用，作用效果为土层 > 月份 > 林型，且土层主要通过影响土壤理化性质和酶活性调控活性有机碳含量。

（3）土壤温湿度、容重和 β-葡萄糖苷酶是影响 MBC、EOC 和 POC 的主要土壤因素，而 DOC 则与可溶性有机氮、土壤温湿度的相关性更强（$P < 0.05$）；气候因素中，降水量和大气相对湿度对 MBC 和 DOC 的影响更显著。本研究揭示了寒温带森林土壤活性有机碳的组分响应机制，为气候变化下的区域碳汇功能预测提供了科学依据。

参 考 文 献

[1] Kirschbaum M U F, Schipper L A, Mudge P L, et al. The trade-offs between milk production and soil organic carbon storage in dairy systems under different management and environmental factors[J]. Science of the Total Environment, 2017, 577: 61−72.

[2] Luo Z, Feng W, Luo Y, et al. Soil organic carbon dynamics jointly controlled by climate, carbon inputs, soil properties and soil carbon fractions [J]. Global Change Biology, 2017, 23(10): 4430−4439.

[3] 刘明慧, 孙雪, 于文杰, 等. 长白山不同海拔原始红松林土壤活性有机碳含量的生长季动态 [J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2018, 42(2): 67−74.
Liu M H, Sun X, Yu W J, et al. Seasonal dynamics of soil active organic carbon content in original *Korean pine* forests at different altitudes in Changbai Mountain [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2018, 42(2): 67−74.

[4] Da Silva Oliveira D M, Paustian K, Cotrufo M F, et al. Assessing labile organic carbon in soils undergoing land use change in Brazil: A comparison of approaches [J]. Ecological Indicators, 2017, 72: 411−419.

[5] Shang W, Wu X, Zhao L, et al. Seasonal variations in labile soil organic matter fractions in permafrost soils with different vegetation types in the central Qinghai−Tibet Plateau [J]. Catena, 2016, 137: 670−678.

[6] Liu X, Chen D, Yang T, et al. Changes in soil labile and recalcitrant carbon pools after land-use change in a semi-arid agro-pastoral ecotone in Central Asia [J]. Ecological Indicators, 2020, 110: 105925.

[7] 赵光影, 刘景双, 张雪萍, 等. CO_2 浓度升高对三江平原湿地小叶章碳氮含量的影响 [J]. 水土保持通报, 2013, 33(1): 87−91.
Zhao G Y, Liu J S, Zhang X P, et al. Effects of elevated CO_2 on carbon and nitrogen contents of calamagrostis angustifolia in wetland of sanjiang plain [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2013, 33(1): 87−91.

[8] 窦艳星, 王宝荣, 廖娇娇, 等. 黄土高原不同人工林型微生物残

体碳对土壤有机碳组分的积累贡献及影响因素 [J]. 生态学报, 2024, 44(13): 5494−5507.
Dou Y X, Wang B R, Liao J J, et al. Contributions of microbial necromass carbon to soil organic carbon fractions accumulation and influencing factors under different artificial forest types on the Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(13): 5494−5507.

[9] 郝江勃, 乔枫, 蔡子良. 亚热带常绿阔叶林土壤活性有机碳组分季节动态特征 [J]. 生态环境学报, 2019, 28(2): 245−251.
Hao J B, Qiao F, Cai Z L. Seasonal dynamics of soil labile organic carbon and its fractions in subtropical evergreen broadleaved forest [J]. Ecology and Environment Sciences, 2019, 28(2): 245−251.

[10] 颜辰亦, 龚吉蕊, 张斯琦, 等. 氮添加对内蒙古温带草原土壤活性有机碳的影响 [J]. 植物生态学报, 2024, 48(2): 229−241.
Yan C Y, Gong J R, Zhang S Q, et al. Effects of nitrogen addition on soil active organic carbon in a temperate grassland of Nei Mongol, China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2024, 48(2): 229−241.

[11] Cotrufo M F, Ranalli M G, Haddix M L, et al. Soil carbon storage informed by particulate and mineral-associated organic matter [J]. Nature Geoscience, 2019, 12(12): 989−994.

[12] 贾匡迪, 王勇强, 高雨, 等. 山西太岳山不同针叶纯林及混交林土壤有机碳库的变异性 [J]. 东北林业大学学报, 2024, 52(3): 112−118.
Jia K D, Wang Y Q, Gao Y, et al. Variability of soil organic carbon pool in different coniferous pure forests and mixed forests in taiyue mountain, Shanxi Province [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2024, 52(3): 112−118.

[13] 高琳, 张登山, 龙怀玉, 等. 气候、植被及土壤因素交互作用对宁夏土壤有机碳的影响机制 [J]. 生态学报, 2023, 43(24): 10081−10091.
Gao L, zhang D S, Long H Y, et al. Interaction mechanism of climate, vegetation and soil factors on soil organic carbon at different soil depths in Ningxia [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(24): 10081−10091.

[14] 陈子豪, 焦泽彬, 刘谣, 等. 凋落物季节性输入对川西亚高山森林土壤活性有机碳的影响 [J]. 应用与环境生物学报, 2021, 27(3): 594−600.
Chen Z H, Jiao Z B, Liu Y, et al. Influences of seasonal litter input on soil active organic carbon in subalpine forests in western Sichuan [J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2021, 27(3): 594−600.

[15] Wang B, Hao S, Zhang Q. Protection mechanisms and influencing factors of soil organic carbon pools in the *Larix gmelinii* forests [J]. Ecological Indicators, 2023, 150: 110242.

[16] 辜翔, 张仕吉, 项文化, 等. 中亚热带 4 种森林类型土壤活性有机碳的季节动态特征 [J]. 植物生态学报, 2016, 40(10): 1064−1076.
Gu X, Zhang S J, Xiang W H, et al. Seasonal dynamics of active soil organic carbon in four subtropical forests in Southern China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2016, 40(10): 1064−1076.

[17] Wang X, Sheng L, Li Y, et al. Soil labile organic carbon indicating seasonal dynamics of soil organic carbon in northeast peatland [J]. Ecological Indicators, 2022, 138: 108847.

[18] 高明磊, 满秀玲, 段北星. 林下植被和凋落物对寒温带森林生长季土壤 CH_4 通量的影响 [J]. 生态学报, 2021, 41(24): 9886−9897.
Gao M L, Man X L, Duan B X. Effects of understory vegetation and litter on soil CH_4 flux during growing season in cold temperate forest in China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(24): 9886−9897.

[19] Cotrufo M F, Wallenstein M D, Boot C M, et al. The Microbial Efficiency-Matrix Stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: do labile plant inputs form stable soil organic matter? [J]. Global Change Biology, 2013, 19(4): 988−955.

[20] Lehmann J, Hansel C M, Kaiser C, et al. Persistence of soil organic carbon caused by functional complexity [J]. Nature Geoscience, 2020, 13(8): 529−534.

[21] Ma Y, Wu H, Hu B, et al. Effects of Betula platyphylla invasion in North China on soil aggregate stability, soil organic carbon and active carbon composition of larch plantation [J]. Plant and Soil, 2023, 486(1): 337−359.

[22] Zhang M, Bai X, Wang Y, et al. Soil microbial trait-based strategies drive the storage and stability of the soil carbon pool in *Robinia pseudoacacia* plantations [J]. Catena, 2023, 222: 106894.

[23] Gao F, Cui X, Chen M, et al. Forest conversion changes soil particulate organic carbon and mineral-associated organic carbon *via* plant inputs and microbial processes [J]. Forests, 2023, 14(6): 1234.

[24] 朱雪峰, 孔维栋, 黄懿梅, 等. 土壤微生物碳泵概念体系 2.0[J]. 应用生态学报, 2024, 35(1): 102−110.
Zhu X F, Kong W D, Huang Y M, et al. Soil microbial carbon pump conceptual framework 2.0 [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024, 35(1): 102−110.

[25] Liu F, Wang D. Dissolved organic carbon concentration and biodegradability across the global rivers: a meta-analysis [J]. Science of the Total Environment, 2022, 818: 151828.

[26] Makarov M I, Malysheva T I, Mulyukova O S, et al. Freeze-thaw effect on the processes of transformation of carbon and nitrogen compounds in Alpine meadow soils [J]. Russian Journal Of Ecology, 2015, 46(4): 317−324.

[27] 张頔, 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.

[28] 立天宇, 康峰峰, 韩海荣, 等. 冀北辽河源自然保护区土壤微生物碳代谢对阔叶林叶凋落物组成的响应 [J]. 应用生态学报, 2015, 26(3): 715−722.
Li T Y, Kang F F, Han H R, et al. Responses of soil microbial carbon metabolism to the leaf litter composition in Liaohe River Nature Reserve of northern Hebei Province, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(3): 715−722.

[29] 王浩伊, 满秀玲, 王军, 等. 大兴安岭北部 2 种不同生活型针叶树种叶片生态化学计量特征研究 [J]. 北京林业大学学报, 2023, 45(10): 36−46.
Wang H Y, Man X L, Wang J, et al. Leaf stoichiometry of two conifer species with different life forms in northern Daxing'an Mountains of northeastern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023, 45(10): 36−46.

[30] 王洋, 刘景双, 王全英. 冻融作用对土壤团聚体及有机碳组分的影响 [J]. 生态环境学报, 2013, 22(7): 1269−1274.
Wang Y, Liu J S, Wang Q Y. The Effects of freeze-thaw processes on soil aggregates and organic carbon [J]. Ecology and Environment Sciences, 2013, 22(7): 1269−1274.

[31] Chai Y J, Zeng X B, E S Z, et al. Effects of freeze−thaw on aggregate stability and the organic carbon and nitrogen enrichment ratios in aggregate fractions [J]. Soil Use and Management, 2014, 30(4): 507−516.

[32] 王世佳, 郭亚芬, 崔晓阳. 寒温带林区不同林型下冻融土壤活性有机碳的变化 [J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(12): 65−72.
Wang S J, Guo Y F, Cui X Y. Changes of active organic carbon in frozen thawed soil under different forest types in cold temperate forest region[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2021, 43(12): 65−72.

[33] Lí J T, Hicks L C, Brangarí A C, et al. Subarctic winter warming promotes soil microbial resilience to freeze−thaw cycles and enhances the microbial carbon use efficiency [J]. Global Change Biology, 2024, 30(1): e17040.

[34] 徐嘉晖, 孙颖, 高雷, 等. 土壤有机碳稳定性影响因素的研究进展 [J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(2): 222−230.
Xu J H, Sun Y, Gao L, et al. A review of the factors influencing soil organic carbon stability [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(2): 222−230.

[35] 张晓曦, 田爽, 曾磊, 等. 北方常见绿化树种凋落物添加对城市土壤有机碳组成特征的影响 [J]. 植物科学学报, 2024, 42(2): 140−149.
Zhang X X, Tian S, Zeng L, et al. Effects of litter addition from common greening tree species in northern China on organic carbon composition characteristics of urban soils [J]. Plant Science Journal, 2024, 42(2): 140−149.

[36] 聂阳意, 王海华, 李晓杰, 等. 武夷山低海拔和高海拔森林土壤有机碳的矿化特征 [J]. 应用生态学报, 2018, 29(3): 748−756.
Nie Y Y, Wang H H, Li X J, et al. Characteristics of soil organic carbon mineralization in low altitude and high altitude forests in Wuyi Mountains, southeastern China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(3): 748−756.

[37] Guo Z, Wang Y, Wan Z, et al. Soil dissolved organic carbon in terrestrial ecosystems: Global budget, spatial distribution and controls [J]. Global Ecology and Biogeography, 2020, 29(12): 2159−2175.

[38] 朱家琪, 满秀玲, 王飞. 我国寒温带四种森林植被类型下土壤团聚体粒级组成及其稳定性比较研究 [J]. 土壤通报, 2020, 51(3): 606−613.
Zhu J Q, Man X L, Wang F. Composition and stability of soil aggregates in four forest vegetation types in cold temperate zone [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2020, 51(3): 606−613.

（责任编辑 孟 瑶
责任编委 臧润国）