

不同林下植被兴安落叶松林土壤活性有机碳组分特征

曾晨阳, 满秀玲, 蔡体久

(东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040)

摘要: [目的] 研究大兴安岭不同林下植被兴安落叶松林土壤活性有机碳组分特征, 为大兴安岭地区森林土壤活性有机碳及其稳定性研究提供科学依据。[方法] 以4种林下植被兴安落叶松林(兴安杜鹃-兴安落叶松林(*Rhododendron dauricum-Larix gmelinii* forest, 简称DJL)、杜香-兴安落叶松林(*Ledum palustre-Larix gmelinii* forest, 简称DXL)、苔草-兴安落叶松林(*Carex tristachya-Larix gmelinii* forest, 简称TCL)和苔藓-兴安落叶松林(*Sphagnum palustre-Larix gmelinii* forest, 简称TXL))为研究对象, 于2024年5—9月测定0~30 cm土层土壤活性有机碳组分质量分数及凋落物和草毡层碳氮质量分数, 分析不同林下植被兴安落叶松林土壤活性有机碳组分质量分数变化规律, 并探究关键影响因子。[结果] 1) 5—9月TCL 0~30 cm土层土壤微生物生物量碳(MBC)总平均质量分数(612.40 mg/kg)显著高于其他3种林型($p < 0.05$), 而最低的为DXL(355.07 mg/kg), 但TXL增幅最大, DXL增幅最低。2) 4种林型土壤易氧化有机碳(EOC)质量分数峰值均出现在7月, 其中TXL 0~5、5~10、20~30 cm土层土壤EOC质量分数均高于TCL和DXL, 且显著高于DJL($p < 0.05$), 同时, 5—9月TCL和TXL土壤EOC质量分数变化幅度高于DJL和DXL。3) 4种林型土壤可溶性有机碳(DOC)质量分数均由5月最高值波动式降低至9月, 波动在72.23~284.36 mg/kg间, 同时, TCL降幅显著高于DJL和DXL($p < 0.05$), 但与TXL差异不显著($p > 0.05$)。4) 7月TCL 0~30 cm土层土壤颗粒有机碳(POC)质量分数均高于其他林型, 而DJL最低, TCL和TXL土壤POC总平均质量分数显著高于DXL和DJL($p < 0.05$), TCL和TXL、DXL和DJL间差异不显著($p > 0.05$)。5) DJL和DXL土壤活性有机碳组分与总有机碳(TOC)和全氮(TN)呈显著正相关, 与土壤体积质量(BD)和土壤铵态氮(AN)呈显著负相关($p < 0.05$), BD和TOC为TCL和TXL土壤活性有机碳各组分的主导因子。[结论] 林下植被对兴安落叶松林土壤活性有机碳组分有显著影响, TCL和TXL土壤EOC、DOC和POC平均质量分数显著高于DXL和DJL, 而TCL土壤MBC质量分数均显著高于其他林型; 5—9月TCL和TXL土壤活性有机碳质量分数变幅大于DJL和DXL。研究结果对不同林下植被兴安落叶松林土壤碳库及稳定性研究具有重要意义。

关键词: 微生物生物量碳; 易氧化有机碳; 可溶性有机碳; 颗粒有机碳

中图分类号: S153.6

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)01-0242-11

Characterization of Soil Labile Organic Carbon Fractions in *Larix Gmelinii* Forests with Different Understory Vegetation Types

ZENG Chenyang, MAN Xiuling, CAI Tijiu

(College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: [Objective] To explore the characteristics of soil labile organic carbon (LOC) fractions in *Larix gmelinii* forests with different understory vegetation types and to provide a scientific basis for studying forest soil LOC and its stability in the Daxing'an Mountains. [Methods] Four types of *L. gmelinii* forests with distinct understory vegetation were selected as study sites, *Rhododendron dauricum-L. gmelinii* forest (DJL), *Ledum palustre-L. gmelinii* forest (DXL), *Carex tristachya-L. gmelinii* forest (TCL), and *Sphagnum palustre-L.*

收稿日期: 2025-08-04

修回日期: 2025-09-13

录用日期: 2025-10-11

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-10-31

资助项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD2200405)

第一作者: 曾晨阳(2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事水土保持研究。E-mail: 1817233223@qq.com

通信作者: 满秀玲(1964—), 女, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事水土保持研究。E-mail: mannefu@163.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

gmelinii forest (TXL). From May to September of 2024, the mass fractions of soil LOC fractions in the 0–30 cm soil layer were measured, as well as the carbon and nitrogen mass fractions of litter and mattic epipedon. The mass fraction variation patterns of soil LOC fractions of *L. gmelinii* forests were analyzed across different understory vegetation types, and their key influencing factors were identified. [Results] 1) From May to September, the overall mean mass fraction of soil microbial biomass carbon (MBC) in the 0~30 cm soil layer of TCL (612.40 mg/kg) was significantly higher than that of the other three forest types ($p < 0.05$), with the lowest value observed in DXL (355.07 mg/kg). TXL exhibited the largest increase, whereas DXL showed the smallest. 2) The mass fractions of easily oxidized organic carbon (EOC) peaked in July across all forest types. Among them, TXL consistently had higher EOC mass fractions in the 0–5, 5–10, and 20–30 cm soil layers compared with TCL and DXL, and significantly higher than DJL ($p < 0.05$). Furthermore, the variation of EOC mass fractions in TCL and TXL from May to September was greater than in DJL and DXL. 3) Soil dissolved organic carbon (DOC) mass fractions of four forest types declined from May to September in a fluctuating pattern, ranging from 72.23 mg/kg to 284.36 mg/kg. The reduction in TCL was significantly greater than in DJL and DXL ($p < 0.05$), but did not differ significantly from TXL ($p > 0.05$). 4) In July, the mass fraction of particulate organic carbon (POC) in the 0–30 cm soil layer of TCL was higher than that in other forest types, with the lowest value in DJL. The overall mean POC mass fractions in TCL and TXL were significantly higher than those in DXL and DJL ($p < 0.05$), while differences between TCL and TXL, and between DXL and DJL, were not significant ($p > 0.05$). 5) In DJL and DXL, soil LOC fractions were significantly positively correlated with total organic carbon (TOC) and total nitrogen (TN), but negatively correlated with soil bulk density (BD) and soil ammonium nitrogen (AN) ($p < 0.05$). BD and TOC were identified as dominant factors influencing soil LOC fractions in TCL and TXL. [Conclusion] Understory vegetation has a significant impact on the soil LOC fractions of *L. gmelinii* forests. The mean mass fractions of soil EOC, DOC, and POC in TCL and TXL are significantly higher than in DXL and DJL, while the soil MBC mass fraction in TCL is significantly higher than in other forest types. From May to September, the variation of soil LOC mass fractions in TCL and TXL is larger than that in DJL and DXL. The research results are of great significance for understanding soil carbon pools and their stability in *L. gmelinii* forests with different understory vegetation types.

Keywords: microbial biomass carbon; easily oxidized organic carbon; dissolved organic carbon; particulate organic carbon

Received: 2025-08-04

Revised: 2025-09-13

Accepted: 2025-10-11

Online(www.cnki.net): 2025-10-31

土壤是全球陆地生态系统储量最大的有机碳库,约 1 550 Pg 有机碳储存于土壤中,其质量分数是全球植被碳储量的 2~3 倍,大气碳储量的 2 倍^[1],土壤有机碳库的细微变化导致大气中 CO₂ 浓度产生显著性变化^[2],进而影响全球大气生态环境。土壤有机碳由不同碳组分构成,根据其稳定性差异可分为活性碳、缓效性碳和惰性碳 3 个组分^[3],其土壤活性有机碳占比较小,但最活跃,易被土壤微生物降解,还可及时准确反映土壤养分的动态变化^[4-5],并且是植被直接养分来源之一,因此,土壤活性有机碳成为土壤碳组分研究中的热点。土壤活性有机碳组分主要包括微生物生物量碳(microbial biomass carbon, MBC)、可溶性有机碳(dissolved organic carbon, DOC)、土壤易氧化有机碳(easily oxidized organic carbon, EOC)、颗粒有机碳(particulate organic carbon, POC)等^[6],

各组分间能够相互转化,共同调控土壤活性有机碳库,进而影响土壤有机碳库的稳定性。因此,研究森林土壤活性有机碳组分变化特征,对深入探究森林生态系统碳循环过程具有重要作用。

作为森林生态系统的关键构成部分,林下植被在改善林下微环境、增加土壤养分储备量,以及促进植物高效吸收养分等方面,发挥着不可替代的功能^[7],且通过影响土壤有机碳组分的分布,进而对土壤碳循环进行调控^[8]。有学者^[9]研究表明,林下植被会限制乔木的生长发育,出现争夺水分、养分^[10]和生存空间^[11]等现象,所以,以往森林经营管理实践中应去除林下植被^[12]。但近年研究^[13-14]表明,林下植被对森林生态系统发展具有促进作用,通过改变森林土壤温度、湿度、紧实度,增加凋落物储量和根际资源等方式,进而改善森林土壤质量和

微生物生境^[15-16];有研究^[17]表明,林下植被影响森林生态系统碳输入,显著影响土壤总有机碳和活性有机碳质量分数^[18];宋瑞朋等^[19]研究发现,不同林下植被的杉木人工林土壤惰性有机碳质量分数差异显著;潘萍等^[20]研究发现,不同林下植被的马尾松林土壤有机碳质量分数差异显著;也有研究^[21-22]表明,林下植被是通过影响土壤温度,对微生物活性产生作用,以此促进土壤有机碳积累。因此,林下植被对森林土壤有机碳质量分数有显著的影响。兴安落叶松林是大兴安岭寒温带顶级植被^[23],林下植被差异较大,形成不同类型的兴安落叶松林,王冰等^[24]、李金博等^[25]研究发现,林下植被对兴安落叶松林土壤有机碳质量分数影响较大;闫平等^[26]研究表明,林下植被对兴安落叶松林土壤碳储量影响显著,那么林下植被对兴安落叶松林土壤活性有机碳是否存在影响?影响程度如何?目前尚不清楚。因此,本研究选择4种类型兴安落叶松林,即兴安杜鹃-兴安落叶松林(DJL)、杜香-兴安落叶松林(DXL)、苔草-兴安落叶松林(TCL)和苔藓-兴安落叶松林(TXL)为研究对象,通过分析0~30 cm土层土壤MBC、DOC、EOC、POC质量分数在5—9月的变化规律,结合凋落物、草毡层和土壤基本理化性质,探讨寒温带不同林下植被兴安落叶松林土壤活性有机碳组分特征、变化规律和影响因子,为该地区林下植被管理及土壤活性有机碳组分研究作出贡献。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究依托黑龙江漠河森林生态系统国家定

位观测研究站(53°27′10″~53°28′01″N,122°20′17″~122°20′57″E),本区气候类型为寒温带大陆性,冬季严寒漫长,夏季温热且多雨,四季气温变化显著。夏季最高气温可升至36.7℃,而冬季最低气温则降至-52.3℃,全年平均气温-4.9℃,年有效积温为1400~2000℃,无霜期75~110d,年平均降水量450mm。土壤以棕色针叶林土为主,是多年冻土的分布区,冻结期长达8个月。研究区地带性植被为兴安落叶松林,另外还有樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)林、白桦(*Betula platyphylla*)林和山杨(*Populus davidiana*)林等森林类型。

1.2 样地设置与样品采集

基于2024年5月的前期踏查,选择兴安杜鹃-兴安落叶松林、杜香-兴安落叶松林、苔草-兴安落叶松林和苔藓-兴安落叶松林为研究对象。在不同林型的典型区域内,各布设3块标准为20m×30m的样地,并开展每木检尺工作,记录基础数据(表1)。仅针对0~30cm深度的土壤展开研究是由于30cm以下土层中石块占比较高。2024年5—9月,每月选取1次观测时间,在每种林型的每个样地内,沿“S”形路线随机设置3个土壤采样点。按照0~5、5~10、10~20、20~30cm土层进行样品采集,杂质去除后过2mm筛,每一林型同一土层的土壤样品等量混合,一部分放冰箱于-4℃储存,另一部分风干后过0.149mm筛,测定MBC、DOC、EOC、POC、pH、TN、AN和NN等指标。同时对凋落物按照分解程度,分为未分解层和半分解层进行采集,并采集草毡层,测定其全量碳氮质量分数(表2)。

表1 样地基本情况

Table 1 Basic information of sample plots

森林类型	密度/ (株·hm ⁻²)	林下主要植物	林下植被生物量/ (t·hm ⁻²)	郁闭度	平均胸径/ cm	平均树高/ m	林龄/ a
DJL	1217	1、5、6、8、9	11.52±1.02	0.7	13.67±5.02	15.7±6.1	75~90
DXL	1267	2、1、5、6、7、9	9.63±1.42	0.8	13.30±3.35	14.0±5.2	75~90
TCL	1567	3、2、5、10	6.01±0.66	0.7	12.81±6.11	14.6±4.2	75~90
TXL	1300	4、2、6、8	5.22±0.92	0.7	14.01±4.52	13.9±5.5	75~90

注:1~10分别为兴安杜鹃(*Rhododendron dauricum*)、杜香(*Ledum palustre*)、苔草(*Carex tristachya*)、泥炭藓(*Sphagnum palustre*)、笃斯越桔(*Vaccinium uliginosum*)、越桔(*Vaccinium vitis-idaea*)、红花鹿蹄草(*Pyrola incarnata*)、东方草莓(*Fragaria orientalis*)、地榆(*Sanguisorba officinalis*)和小叶章(*Deyeuxia angustifolia*);表中数据为平均值±标准差。下同。

表2 样地基础指标情况

Table 2 Basic indicators of sample plots

森林类型	土壤总有机碳/ (g·kg ⁻¹)	土壤全氮/ (g·kg ⁻¹)	凋落物		草毡层 总有机碳/ (g·kg ⁻¹)	pH	土壤含水率/%
			未分解层 总有机碳/ (g·kg ⁻¹)	半分解层 总有机碳/ (g·kg ⁻¹)			
DJL	18.60±0.29	2.46±0.35	447.61±2.46	441.31±4.01	382.97±10.21	5.53±0.51	22.57±2.55
DXL	23.73±0.55	3.04±0.44	440.51±5.89	431.27±7.60	356.83±11.04	5.67±0.88	21.99±4.63
TCL	35.37±0.39	3.77±1.02	425.47±14.56	453.35±9.42	415.33±7.82	6.32±0.26	58.77±5.99
TXL	44.90±0.90	2.75±0.98	449.42±11.28	428.00±7.32	381.33±10.14	6.02±0.44	50.52±6.21

1.3 测定方法

1.3.1 土壤基本理化性质测定方法 土壤含水率(SWC)采用烘干法测定;pH使用pH计(水土比为2.5:1)测定;土壤、凋落物未分解层(L层)、半分解层(F层)和草毡层(Ao)总有机碳(TOC)采用TOC固体模块进行测定;全氮(TN)、铵态氮(AN)、硝态氮(NN)及凋落物和草毡层全氮使用AA3连续流动分析仪测定^[27];土壤体积质量(BD)使用环刀法测定。

1.3.2 土壤活性有机碳组分测定方法 土壤微生物量碳(MBC)采用氯仿熏蒸-K₂SO₄浸提法测定;土壤可溶性有机碳(DOC)采用浸提法^[28]测定;土壤颗粒有机碳(POC)的测定^[29]:称取过2 mm风干土样20 g,加入100 mL的六偏磷酸钠(5 g/L),振荡18 h,将分散液过53 μm筛,用纯水洗至筛下水为无色,筛上部分于铝盒中烘干至恒重,称量并计算其占全土的百分比,再磨碎过0.149 mm筛,取一定数量样品使用Vario-TOC燃烧法测定其质量分数;土壤易氧化有机碳(EOC)采用高锰酸钾氧化-比色法^[28]测定。

1.4 数据处理

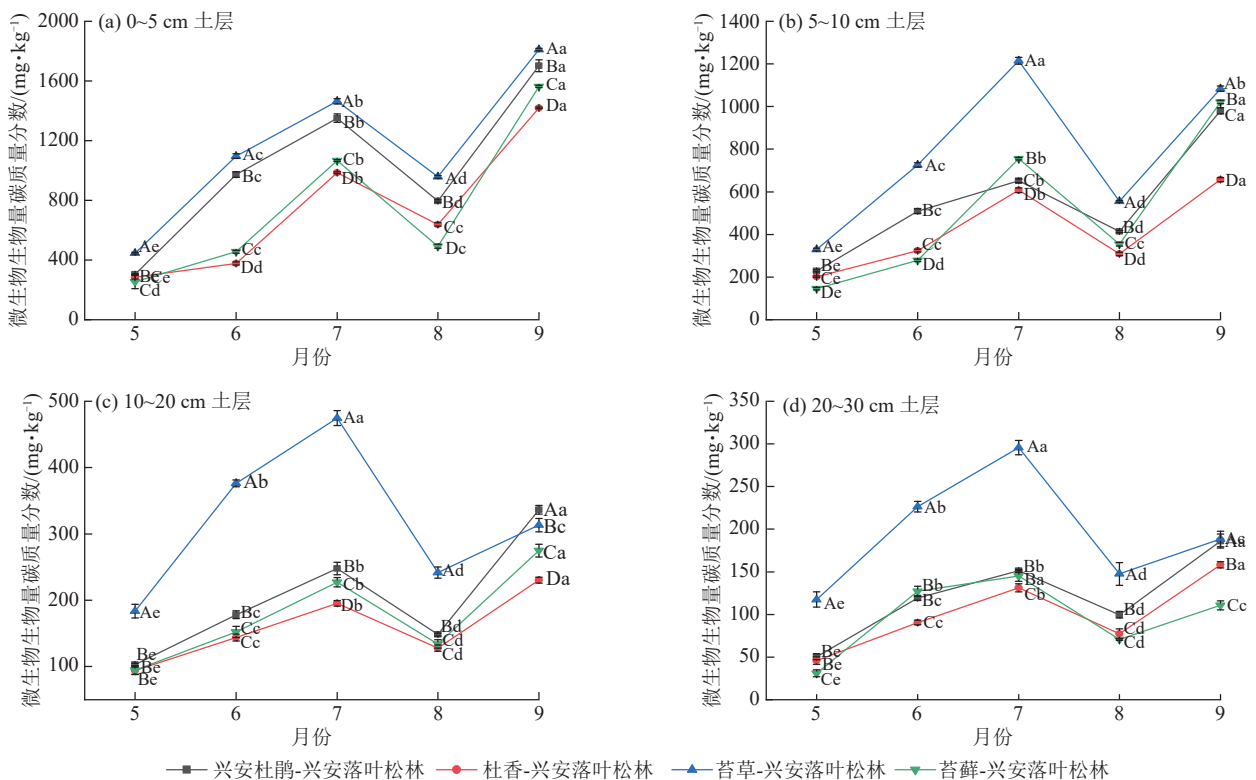
运用Microsoft Office Excel 2021软件对数据进行初步整理,采用SPSS 26软件对5—9月4种不同林下植被兴安落叶松林0~30 cm土层土壤活性有机碳

组分进行方差分析,并使用最小显著性差异法(least significant difference method, LSD)进行显著性检验($p < 0.05$);用Canoco 5.0软件对土壤活性有机碳组分与相关影响因子进行冗余分析(RDA),探究影响该地区土壤活性有机碳组分的关键生态因子;使用Origin 2025 b软件进行作图。

2 结果与分析

2.1 土壤微生物生物量碳(MBC)变化特征

由图1可知,4种林型0~30 cm土层土壤MBC质量分数由5月波动式增加至9月,7月和9月相对较高,且随着土层深度的增加显著减小($p < 0.05$)。4种林型0~30 cm土层土壤MBC质量分数由5月显著增加至7月($p < 0.05$),DJL 0~5 cm土层土壤MBC质量分数增幅最大(343.41%),而TXL 5~10、10~20、20~30 cm土层增幅均最高,分别达417.87%、140.18%、369.79%,但DXL 4个土层增幅均最低。8—9月TXL 0~5、5~10 cm土层土壤MBC质量分数增幅最高(217.76%和187.82%),10~20、20~30 cm土层分别为DJL和DXL最大,而TCL各土层平均增幅则为最低。TCL土壤MBC总平均质量分数(612.40 mg/kg)显著高于其他3种林型($p < 0.05$),而最低的为DXL(355.07 mg/kg),且TCL和TXL土壤MBC质量分数变化幅度相对高于DXL和DJL。



注:不同大写字母表示相同月份不同林型间差异达显著水平($p < 0.05$);不同小写字母表示相同林型不同月份间差异达显著水平($p < 0.05$)。下同。

图1 4种林下植被兴安落叶松林土壤MBC质量分数变化特征

Fig. 1 Variation characteristics of soil MBC mass fractions of *L. gmelinii* forests with four understory vegetation types

2.2 土壤易氧化有机碳(EOC)变化特征

由图2可知,5—9月4种林型0~30 cm土层土壤EOC质量分数均呈先减少后增加再减少趋势,7月最高且显著,同时表层均显著高于其他土层($p < 0.05$)。5—7月各林型土壤EOC质量分数呈波动式增加趋势,DXL仅0~5 cm土层增幅最大(57.67%),其余土层均最低,而5~10 cm土层为DJL最大(40.54%),10~20、20~30 cm土层则为TXL最大。7月TXL 0~5、5~

10、20~30 cm土层土壤EOC质量分数分别为22.65、9.98、5.19 g/kg,均高于TCL和DXL,显著高于DJL($p < 0.05$),且DJL各土层土壤EOC质量分数均最低,平均质量分数仅6.98 g/kg。8—9月DJL 0~10 cm土层土壤EOC质量分数出现小幅上升,但各土层平均质量分数仍最低(4.91 g/kg)。5—9月TXL和TCL 0~30 cm土层土壤EOC总平均质量分数显著高于DJL和DXL($p < 0.05$),但波动幅度大。

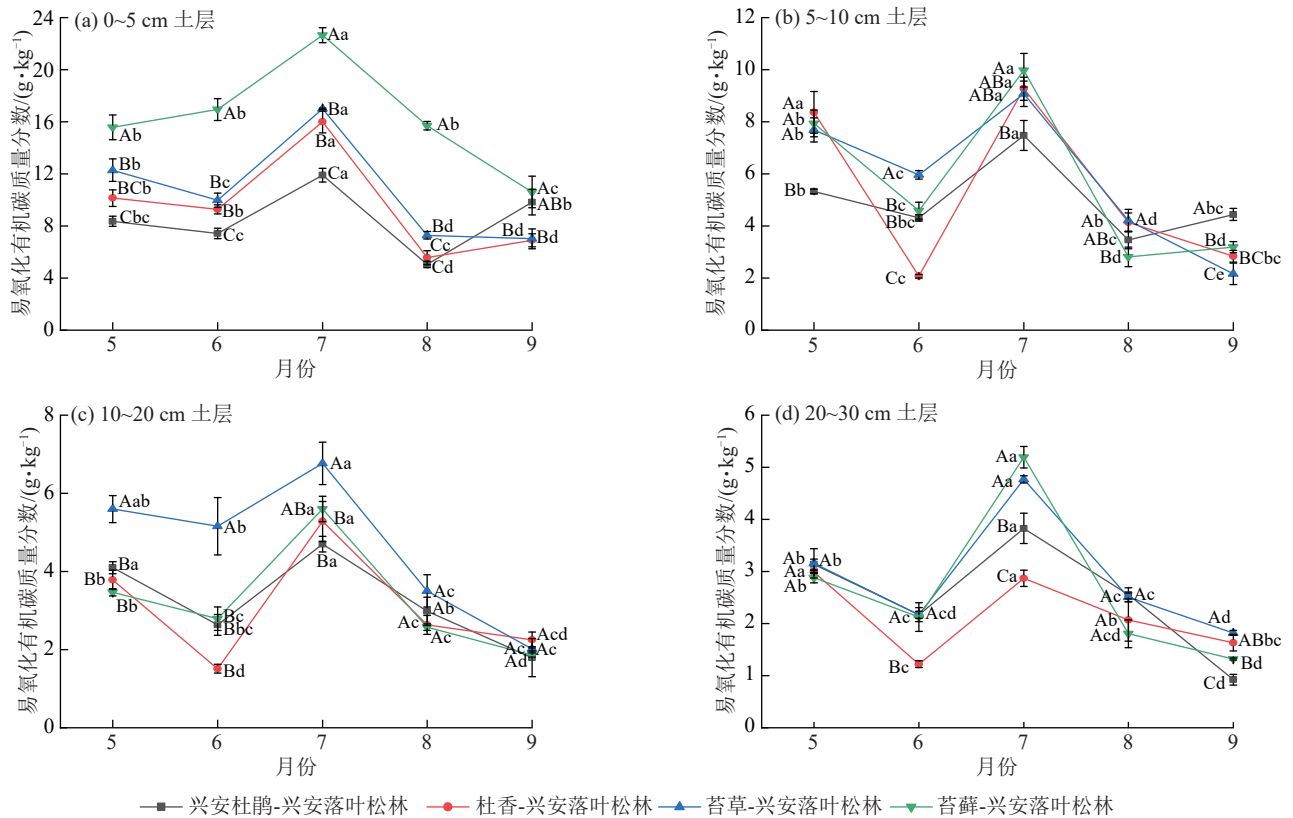


图2 4种林下植被兴安落叶松林土壤EOC质量分数变化特征

Fig. 2 Variation characteristics of soil EOC mass fractions of *L. gmelinii* forests with four understory vegetation types

2.3 土壤可溶性有机碳(DOC)变化特征

由图3可知,4种林型0~30 cm土层土壤DOC质量分数均由5月最高值显著降低至9月最低值($p < 0.05$),其质量分数为72.23~284.36 mg/kg。5月,TCL 0~5、10~20、20~30 cm土层土壤DOC质量分数显著高于其他林型($p < 0.05$),分别为284.36、202.57、162.51 mg/kg,且DXL 0~30 cm土层土壤DOC质量分数均显著低于TCL($p < 0.05$),而5~10 cm土层为TXL最大,但差异不显著($p > 0.05$)。9月,TCL 0~30 cm土层土壤DOC质量分数均低于其他林型,且与DJL差异显著($p < 0.05$),而DJL 4个土层土壤DOC质量分数均高于其他林型,其平均质量分数达110.58 mg/kg。5—9月TCL 0~30 cm土层降幅均最大,从上层至下层分别达154.05%、126.38%、160.30%、125.01%,DJL和DXL 0~30 cm土层土壤

DOC质量分数平均降幅均显著低于TCL($p < 0.05$),但与TXL降幅差异不显著($p > 0.05$)。

2.4 土壤颗粒有机碳(POC)变化特征

5—9月4种林型0~30 cm土层土壤POC质量分数均呈先增加后降低趋势(图4),最高值出现在7月,0~5 cm土层显著高于其他土层($p < 0.05$)。5—7月0~5、5~10 cm土层土壤POC质量分数增幅最高的分别为TXL和DJL(53.77%和97.47%),而10~30 cm土层均为DXL增幅最大;TXL除表层外,其余土层土壤POC质量分数增幅均最小,平均增幅仅38.89%。7月TCL 0~30 cm土层土壤POC质量分数从上层至下层分别为22.48、17.82、12.34、8.47 g/kg,均高于其他林型,而DJL 4个土层均为最低值,其平均质量分数仅10.21 g/kg。8—9月,DXL除10~20 cm土层外,其余土层降幅均最高,其平均降幅为86.76%,10~20 cm土层降幅最高为

DJL(130.87%),而TXL 0~30 cm 土层平均降幅为 4 种林型中最低,仅 48.21%。5—9 月,4 种林型土壤 POC 总平均质量分数大小为 TCL (11.97 g/kg) > TXL

(11.01 g/kg) > DXL(8.95 g/kg) > DJL(7.65 g/kg),TCL 和 TXL 显著高于 DXL 和 DJL($p < 0.05$),TCL 和 TXL、DXL 和 DJL 间差异不显著($p > 0.05$)。

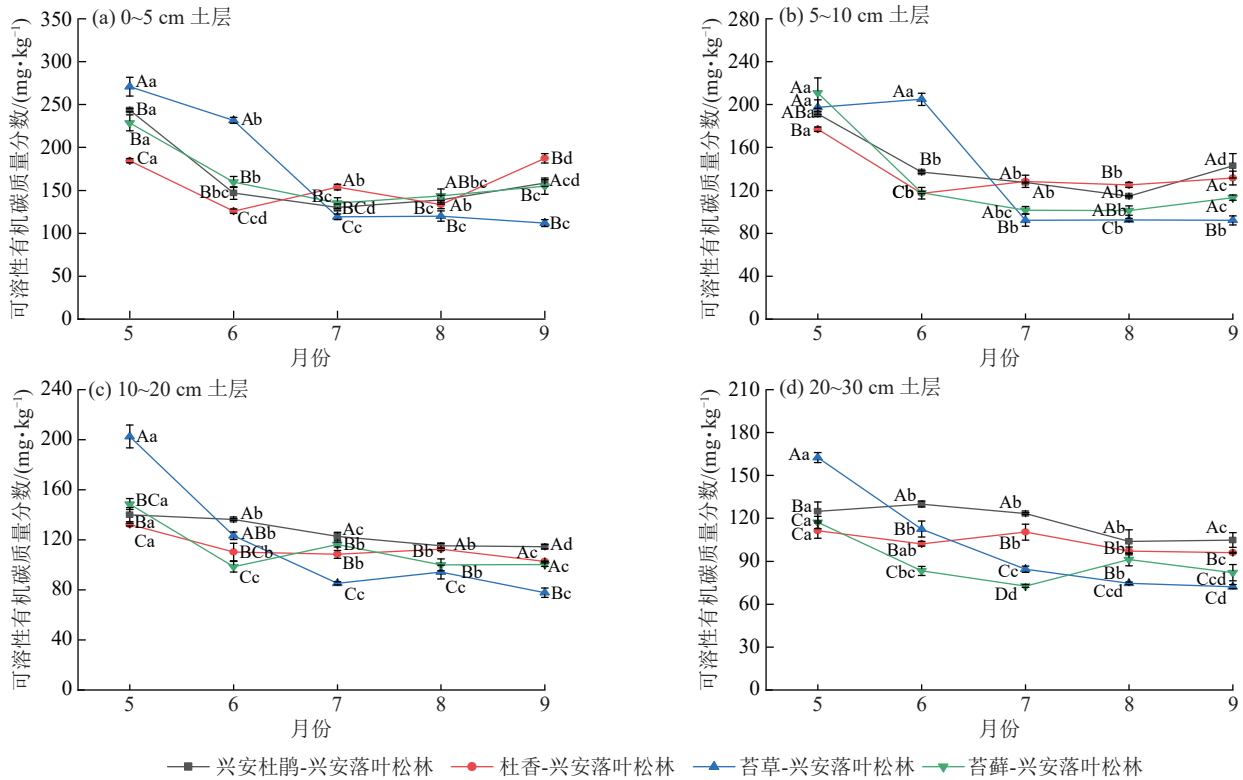


图 3 4 种林下植被兴安落叶松林土壤 DOC 质量分数变化特征

Fig. 3 Variation characteristics of soil DOC mass fractions of *L. gmelinii* forests with four understory vegetation types

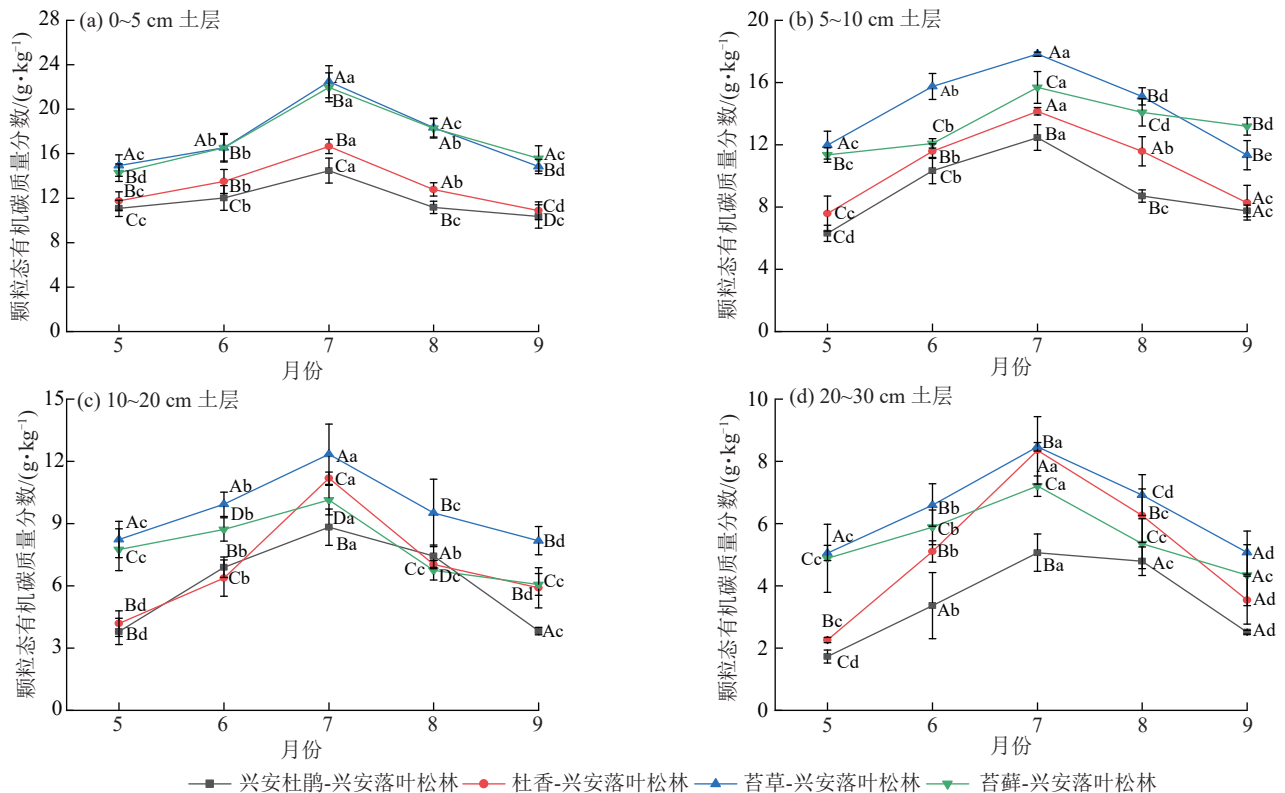


图 4 4 种林下植被兴安落叶松林土壤 POC 质量分数变化特征

Fig. 4 Variation characteristics of soil POC mass fractions of *L. gmelinii* forests with four understory vegetation types

2.5 土壤活性有机碳组分影响因子

图5 RDA分析表明,DJL、DXL、TCL和TXL第1和第2排序轴的解解释率分别为57.65%和22.76%、65.56%和17.48%、59.80%和20.95%、63.13%和17.07%,同时各林型两轴分别累计解释土壤活性有机碳组分特征80.41%、83.04%、80.75%、80.20%的变异,BD和TOC均为主导因子($p=0.002$)。DJL和

DXL主要影响因子有TOC、Ao层TOC、BD、TN和AN,且与TOC、TN呈显著正相关,与BD和AN呈显著负相关($p<0.05$)。TCL主导因子除BD和TOC外还包括Ao层TN、L层TOC和Ao层TOC,贡献率分别为18.50%、5.60%、2.00%,而TXL主导因子除BD和TOC外还包括F层TOC和pH,贡献率分别为19.30%和6.00%。

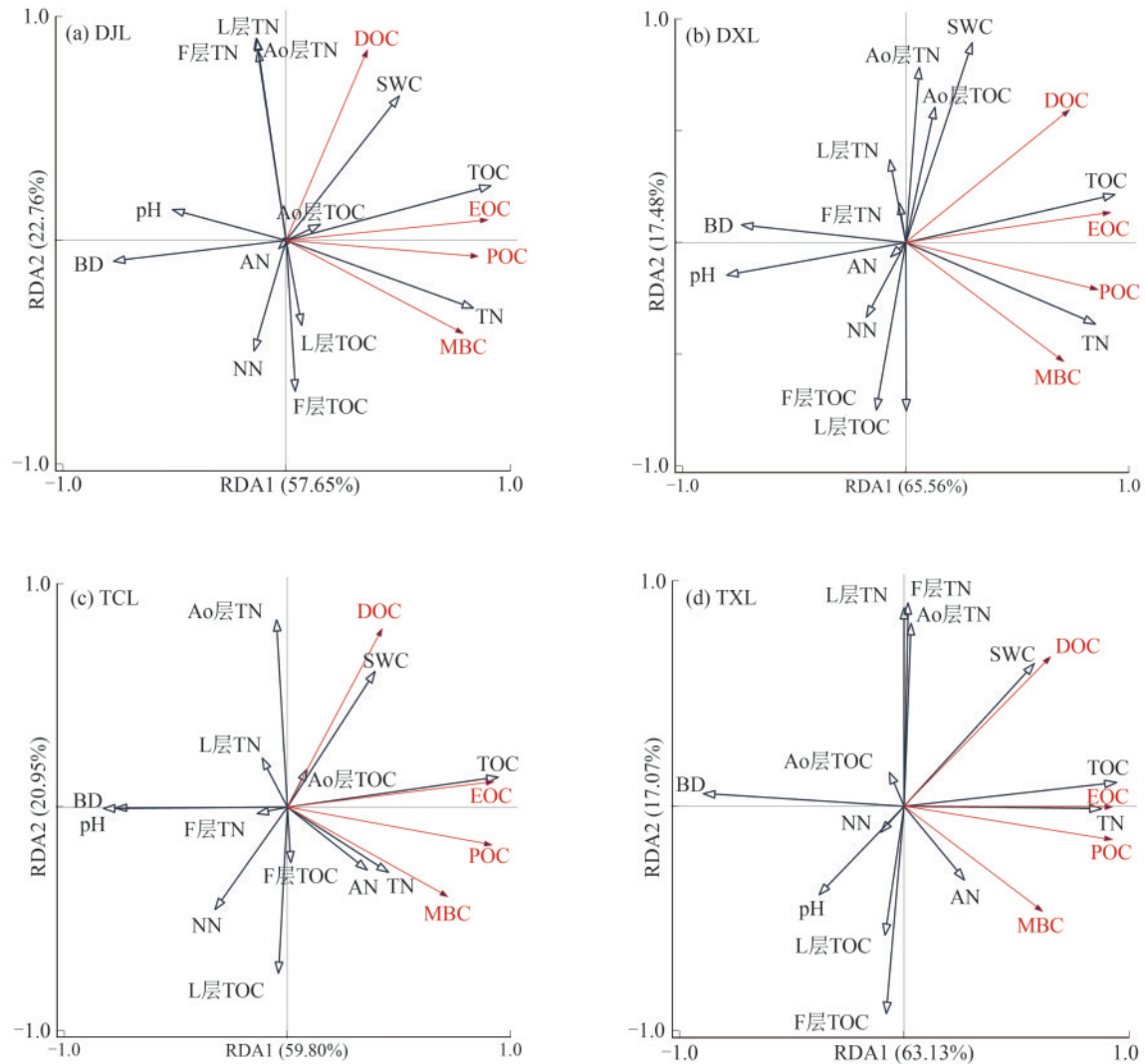


图5 4种林下植被兴安落叶松林土壤活性有机碳组分影响因子RDA分析

Fig. 5 RDA analysis of influencing factors on soil labile organic carbon fractions in *L. gmelinii* forests with four understory vegetation types

3 讨论

3.1 不同林下植被兴安落叶松林土壤活性有机碳组分动态变化特征

该研究区属寒温带大陆性气候,冬季寒冷漫长,夏季温暖多雨,冻结期长达8个月。5月,随着研究区土壤逐渐解冻,温度升高,降雨增多,前1a未分解的凋落物弥补土壤微生物能源供应不足的缺陷,微生物数量随之增加,活性增强,导致土壤有机碳的分解与转化速率增加^[29],进而使得土壤微生物生物量碳

和易氧化有机碳质量分数不断增加;枯枝落叶和根系分泌物是土壤有机碳的主要输入源,分解速率较快,不利于大粒级半腐殖化植物残体形成^[30],而土壤颗粒有机碳的主要来源是中等分解程度的半腐殖化植物残体,致使7月土壤颗粒有机碳质量分数出现显著增加的情况。8月,4种林下植被兴安落叶松林土壤微生物生物量碳、易氧化有机碳和颗粒有机碳均出现降低趋势。虽然土壤微生物和植物间属于互利关系,但有研究^[31]表明,在雨季,植物对养分需求量

较大,限制了土壤微生物的养分的利用。所以,二者对于土壤中营养利用属于竞争关系,而7—8月正属于该研究区植被生长旺季和雨季,植物对土壤中养分需求量大,限制土壤微生物生长发育,从而影响土壤微生物生物量碳、易氧化有机碳和颗粒有机碳质量分数,研究区9月气温大幅降低,植物生长由于生长养分消耗量较少,但土壤微生物分解的动植物残体及根系依旧持续进入土壤有机碳库^[32],因此,出现土壤微生物生物量碳质量分数增加的现象。土壤可溶性有机碳质量分数受外部环境条件影响较大,是土壤碳迁移和流失的主要形式^[28]。本研究发现,4种林下植被兴安落叶松林土壤可溶性有机碳质量分数在5月均为最高,但随着温度逐渐升高,植被开始进入生长旺季,导致土壤可溶性有机碳消耗增加,7—9月由于适宜的环境条件使土壤表层微生物活跃程度进一步提高,凋落物及腐殖质等被不断分解转化为土壤有机碳^[33],进而出现表层土壤可溶性有机碳质量分数上升的情况。

林下植被是森林生态系统重要组成部分,不同林下植被会导致林下凋落物储量、组成及植物根系结构的不同,凋落物分解速率也产生差异^[34]。土壤水分是森林生长发育不可或缺的重要成分之一,时刻参与着土壤物质间的转化及代谢过程^[35]。本研究表明,苔草-兴安落叶松林和苔藓-兴安落叶松林土壤水分显著高于兴安杜鹃-兴安落叶松林和杜香-兴安落叶松林,是由于苔草-落叶松林和苔藓-落叶松林地形条件有利于积水,致使土壤性质产生很大差异。林下植被的差异也反映出兴安落叶松林土壤水分、pH和全氮等理化性质不同,同时,凋落物和草毡层等外源物质分解转化速率也间接影响土壤物质间转化速率及代谢,从而对土壤活性有机碳组分质量分数产生影响。苔草-兴安落叶松林和苔藓-兴安落叶松林土壤微生物生物量碳平均质量分数高于杜香-兴安落叶松林和兴安杜鹃-兴安落叶松林,可能由于苔草群落根系数量比杜鹃和杜香群落多,其根系及分泌物对土壤微生物产生影响,同时相比于杜鹃和杜香群落,苔藓和苔草群落潮湿的生态环境更适合微生物生长发育。有研究^[36]表明,土壤湿度较高环境下更适合微生物生存。苔草-兴安落叶松林和苔藓-兴安落叶松林土壤易氧化有机碳和颗粒有机碳质量分数均高于兴安杜鹃-兴安落叶松林和杜香-兴安落叶松林,可能是苔草-兴安落叶松林和苔藓-兴安落叶松林处于季节性水淹状态,土壤含水率较高(表2),导致土壤中有有机物和无机物间转化速率减慢^[37],进而累积较多的土壤有机碳。导致兴安杜鹃-兴安落叶松林土壤可溶性有机碳质量分数高于苔草-兴安落叶松林和苔藓-兴安落叶松林的原因也可能

是含水率,冻融交替影响土壤团聚体的稳定性,削弱土壤有机碳的物理保护^[38]。

3.2 兴安落叶松林土壤活性有机碳组分影响因子

4种林下植被兴安落叶松林土壤pH均为弱酸性(表2),土壤微生物种类在酸性土壤中受到限制,且多以真菌为主,从而影响地表动植物残体的分解及土壤有机碳积累^[39],除苔草-兴安落叶松林外,土壤pH均对各林型土壤活性有机碳组分产生显著影响,可能是由于苔草-兴安落叶松林含水率较高,稀释其土壤酸性物质,减弱pH对土壤活性有机碳的影响。苔草-兴安落叶松林和苔藓-兴安落叶松林土壤平均含水量高于杜香-兴安落叶松林和兴安杜鹃-兴安落叶松林(表2),土壤水分主要通过影响通气性来调节土壤碳矿化和外源有机碳分解,进而对土壤活性有机碳组分产生影响^[40],苔草-兴安落叶松林和苔藓-兴安落叶松林存在季节性水淹,土壤透气性差,导致土壤碳矿化难度增加,且充足的水分使外源有机物质更易于腐烂降解,从而提高其土壤活性有机碳组分质量分数^[28]。RDA分析发现,兴安杜鹃-兴安落叶松林和杜香-兴安落叶松林土壤活性有机碳组分均受土壤TN显著影响,苔草-兴安落叶松林和苔藓-兴安落叶松林土壤活性有机碳组分分别受草毡层全氮和半分解层全氮显著影响,而4种兴安落叶松林均受土壤铵态氮显著影响。由于外源氮输入多少可直接影响土壤氮高低,而氮变化对土壤微生物种类及结构产生影响,土壤微生物利用碳的效率产生变化,进而影响到土壤有机碳的积累^[40]。不易分解的凋落物部分(如木质素等)可与土壤中氮元素结合,产生更难分解的杂环类物质和酚类物质,外源氮的输入显得尤为重要^[41]。土壤体积质量、含水率与4种林下植被兴安落叶松林土壤活性有机碳组分呈显著相关性,与前人^[42-43]研究结果一致。

不同林下植被的兴安落叶松林凋落物和草毡层种类及数量不同、根系的生长发育和微生物活性程度也不一致,从而造成土壤理化性质的差异^[44]。本研究结果表明,兴安落叶松林下植被不同使其土壤活性有机碳组分产生差异。苔草-兴安落叶松林和苔藓-兴安落叶松林的土壤活性有机碳组分质量分数与兴安杜鹃-兴安落叶松林和杜香-兴安落叶松林差异明显。有研究^[19]表明,土壤活性有机碳组分受外源碳输入的影响显著,而林下植被所产生的凋落物作为土壤重要的外源物质,其种类差异可间接影响土壤活性有机碳。苔草和苔藓喜湿润的生长环境,且具有保持水分的功能,同时,因其所处地势相对较低,出现季节性积水,土壤沼泽化,导致土壤中氧气含量较低,土壤微生物活性受到限制,减慢有机质分

解与转化速率,逐渐累积形成泥炭层,从而增加土壤中有有机碳的质量分数^[45];其次,苔草的生物量较大,可提供更多凋落物输入,为土壤提供大量碳的外源物质^[46]。兴安杜鹃-兴安落叶松林和杜香-兴安落叶松林地具有一定坡度,排水较好,导致土壤含水率相对较低,其土壤活性有机碳变化相对稳定,二者差异较小。兴安杜鹃和杜香的叶片均质地较厚且致密,表皮细胞排列紧密,可限制微生物和酶的渗透,从而使其分解与转化速率降低,兴安杜鹃含有黄酮素、香豆素、三萜类等化合物,而杜香富含挥发油、单宁等成分,二者化学成分结构复杂,均具有不易被微生物分解转化的特殊性质^[47],所以,兴安杜鹃-兴安落叶松林和杜香-兴安落叶松林的林下凋落物相较于苔草-兴安落叶松林和苔藓-兴安落叶松林更难分解转化为土壤有机碳的外源物质。综上,兴安落叶松林土壤活性有机碳组分不仅受林下植被的影响,同时受地形条件、土壤性质等多因素影响。

4 结论

寒温带不同林下植被兴安落叶松林土壤活性有机碳组分有显著差异,苔草-兴安落叶松林和苔藓-兴安落叶松林土壤微生物生物量碳、易氧化有机碳和颗粒有机碳总平均质量分数大于兴安杜鹃-兴安落叶松林和杜香-兴安落叶松林,且各林型0~30 cm 土层土壤微生物生物量碳质量分数在7月和9月相对较高,土壤易氧化有机碳和颗粒有机碳质量分数在7月达到峰值。4种林下植被兴安落叶松林土壤可溶性有机碳质量分数5—9月表现为逐渐降低趋势,其平均质量分数表现为兴安杜鹃-兴安落叶松林最高,杜香-兴安落叶松林最低。林下植被的不同导致土壤pH、含水率、氮质量分数及凋落物层和草毡层碳氮质量分数产生差异,从而对土壤活性有机碳组分产生影响。林下植被是土壤活性有机碳组分的关键外源输入,对于提高土壤有机碳储量具有极其重要作用。因此,建议该地区在进行森林经营管理时,要对林下植被进行保护,确保不同类型的兴安落叶松林发挥最佳的生态功能,提高森林生态系统的碳汇能力。

参考文献:

- [1] 马辉英,李昕竹,马鑫钰,等.新疆天山北麓中段不同植被类型下土壤有机碳组分特征及其影响因素[J].生态环境学报,2022,31(6):1124-1131.
MA H Y, LI X Z, MA X Y, et al. Characteristics and driving factors of soil organic carbon fractions under different vegetation types of the mid-northern Piedmont of the Tianshan Mountains, Xinjiang[J].Ecology and Environmental Sciences,2022,31(6):1124-1131.
- [2] 余健,房莉,卞正富,等.土壤碳库构成研究进展[J].生态学报,2014,34(17):4829-4838.
YU J, FANG L, BIAN Z F, et al. A review of the composition of soil carbon pool[J].Acta Ecologica Sinica, 2014,34(17):4829-4838.
- [3] 陈思思,王森,张楚,等.不同放牧强度对呼伦贝尔羊草草甸草原土壤活性有机碳的影响[J].中国土壤与肥料,2023(11):16-24.
CHEN S S, WANG M, ZHANG C, et al. Effects of different grazing intensities on soil reactive organic carbon in sheep grass meadow grassland in Hulunbeier[J].China Soil and Fertilizer,2023(11):16-24.
- [4] 杜雪,王海燕.中国森林土壤有机碳活性组分及其影响因素[J].世界林业研究,2022,35(1):76-81.
DU X, WANG H Y. Active components of forest soil organic carbon and its influencing factors in China[J].World Forestry Research,2022,35(1):76-81.
- [5] BAILEY V L, PRIES C H, LAJTHA K. What do we know about soil carbon destabilization?[J].Environmental Research Letters,2019,14(8):e083004.
- [6] 李玲,仇少君,刘京涛,等.土壤溶解性有机碳在陆地生态系统碳循环中的作用[J].应用生态学报,2012,23(5):1407-1414.
LI L, QIU S J, LIU J T, et al. Roles of soil dissolved organic carbon in carbon cycling of terrestrial ecosystems: A review[J].Chinese Journal of Applied Ecology, 2012,23(5):1407-1414.
- [7] WANG D, WANG B, NIU X. Effects of natural forest types on soil carbon fractions in north-east China [J].Journal of Tropical Forest Science,201426(3):362-370.
- [8] 胡海清,罗斯生,罗碧珍,等.林火干扰对广东省杉木林土壤有机碳及其组分的影响[J].北京林业大学学报,2019,41(12):108-118.
HU H Q, LUO S S, LUO B Z, et al. Effects of forest fire disturbance on soil organic carbon and its components of *cunninghamia lanceolata* forest in Guangdong Province, southern China[J].Journal of Beijing Forestry University,2019,41(12):108-118.
- [9] GIUGGIOLA A, ZWEIFEL R, FEICHTINGER L M, et al. Competition for water in a xeric forest ecosystem-Effects of understory removal on soil micro-climate, growth and physiology of dominant Scots pine trees[J].Forest Ecology and Management,2018,409:241-249.
- [10] LIAO Y C, FAN H B, WEI X H, et al. Competition increased fine root biomass in Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantations in subtropical China [J]. Forest Ecology and Management,2019,435:151-157.
- [11] MESSIER C, COLL L, POITRAS-LARIVIÈRE A, et al. Resource and non-resource root competition effects

- of grasses on early- versus late-successional trees [J]. *Journal of Ecology*, 2009, 97(3):548-554.
- [12] HE W, XU X, ZHANG C C, et al. Understory vegetation removal reduces the incidence of non-additive mass loss during leaf litter decomposition in a subtropical *Pinus massoniana* plantation [J]. *Plant and Soil*, 2020, 446(1):529-541.
- [13] JIANG M H, LIN T C, SHANER P L, et al. Understory interception contributed to the convergence of surface runoff between a Chinese fir plantation and a secondary broadleaf forest [J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 574:862-871.
- [14] ZHANG J J, LI Y F, CHANG S X, et al. Understory management and fertilization affected soil greenhouse gas emissions and labile organic carbon pools in a Chinese chestnut plantation [J]. *Forest Ecology and Management*, 2015, 337:126-134.
- [15] 王小平, 杨雪, 杨楠, 等. 凋落物多样性及组成对凋落物分解和土壤微生物群落的影响 [J]. *生态学报*, 2019, 39(17):6264-6272.
- WANG X P, YANG X, YANG N, et al. Effects of litter diversity and composition on litter decomposition characteristics and soil microbial community [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(17):6264-6272.
- [16] WANG T, XU Q, GAO D Q, et al. Effects of thinning and understory removal on the soil water-holding capacity in *Pinus massoniana* plantations [J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1):e13029.
- [17] 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.
- [18] 李炎真, 谢尧, 张晶玲, 等. 氮添加及林下植被去除对沙地樟子松人工林土壤呼吸组分的影响 [J]. *生态学杂志*, 2019, 38(10):2997-3006.
- LI Y Z, XIE Y, ZHANG J L, et al. Effects of nitrogen addition and understory removal on soil respiratory components in a sandy *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(10):2997-3006.
- [19] 宋瑞朋, 杨起帆, 郑智恒, 等. 3 种林下植被类型对杉木人工林土壤有机碳及其组分特征的影响 [J]. *生态环境学报*, 2022, 31(12):2283-2291.
- SONG R P, YANG Q F, ZHENG Z H, et al. Effects of three understory vegetation types on soil organic carbon and its components in *Cunninghamia lanceolata* plantation [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2022, 31(12):2283-2291.
- [20] 潘萍, 赵芳, 欧阳勋志, 等. 马尾松林两种林下植被土壤碳氮特征及其与凋落物质量的关系 [J]. *生态学报*, 2018, 38(11):3988-3997.
- PAN P, ZHAO F, OUYANG X Z, et al. Characteristics of soil carbon and nitrogen and relationship with litter quality under different understory vegetation in *Pinus massoniana* plantations [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(11):3988-3997.
- [21] 郑琳琳, 赵琼, 曾德慧. 林下植被去除对樟子松人工林土壤酶活性的影响 [J]. *生态学杂志*, 2017, 36(11):3056-3063.
- ZHENG L L, ZHAO Q, ZENG D H. Effects of understory removal on soil enzyme activities in a *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation in Horqin sandy land [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, 36(11):3056-3063.
- [22] 张喜亭, 张建宇, 肖路, 等. 大兴安岭多布库尔国家级自然保护区植物多样性和群落结构特征 [J]. *生态学报*, 2022, 42(1):176-185.
- ZHANG X T, ZHANG J Y, XIAO L, et al. Characteristics of plant diversity and community structure in Duobukuer Nature Reserve in Daxing'anling area [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(1):176-185.
- [23] 吴浩. 兴安落叶松林土壤有机碳特征分析 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2019.
- WU H. Characteristics of soil organic carbon in *Larix gmelinii* forest [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2019.
- [24] 王冰, 周扬, 张秋良. 兴安落叶松林土壤有机碳特征及与其他土壤理化性质关系研究 [J]. *生态与农村环境学报*, 2021, 37(9):1200-1208.
- WANG B, ZHOU Y, ZHANG Q L. Characteristics of soil organic carbon and its relationship with other soil physicochemical properties in *Larix gmelinii* Forest [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2021, 37(9):1200-1208.
- [25] 李金博, 朱道光, 崔福星, 等. 寒温带落叶松林不同林型土壤有机碳含量及相关性分析 [J]. *国土与自然资源研究*, 2015(5):72-75.
- LI J B, ZHU D G, CUI F X, et al. Analysis on the relationship between soil organic carbon content and soil organic carbon in different leaves of larch in alpine region [J]. *Territory and Natural Resources Study*, 2015(5):72-75.
- [26] 闫平, 高述超, 刘德晶. 兴安落叶松林 3 个类型生物及土壤碳储量比较研究 [J]. *林业资源管理*, 2008(3):77-81.
- YAN P, GAO S C, LIU D J. The comparative study about the carbon storage of vegetation and soil in three types of *Larix gmelinii* forests [J]. *Forest Resources Management*, 2008(3):77-81.
- [27] 刘贝贝, 蔡体久. 大兴安岭北部主要森林类型土壤活性碳组分及碳库稳定性变化特征 [J]. *水土保持学报*, 2024, 38(6):203-213.
- LIU B B, CAI T J. Characteristics of soil active carbon fractions and carbon pool stability in major forest types in

- northern Daxing'an Mountains [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(6):203-213.
- [28] 田舒怡, 满秀玲. 大兴安岭北部森林土壤微生物量碳和水溶性有机碳特征研究[J]. 土壤通报, 2016, 47(4):838-845.
TIAN S Y, MAN X L. Characteristics of soil microbial biomass carbon and dissolved organic carbon in northern forest region of Daxing'an Mountains [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2016, 47(4):838-845.
- [29] 李书杨, 满秀玲, 魏红. 大兴安岭白桦林和兴安落叶松林土壤活性有机碳动态特征[J]. 东北林业大学学报, 2018, 46(12):64-70.
LI S Y, MAN X L, WEI H. Dynamic characteristics of soil active organic carbon in *Betula platyphalla* forest and *Larix gmelinii* forest in Daxing'an Mountains [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2018, 46(12):64-70.
- [30] BARBHUIYA A R, ARUNACHALAM A, PANDEY H N, et al. Dynamics of soil microbial biomass C, N and P in disturbed and undisturbed stands of a tropical wet-evergreen forest [J]. European Journal of Soil Biology, 2004, 40(3/4):113-121.
- [31] SINGH S, GHOSHAL N, SINGH K P. Variations in soil microbial biomass and crop roots due to differing resource quality inputs in a tropical dryland agroecosystem [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2007, 39(1):76-86.
- [32] 位春杰, 王海燕, 崔雪, 等. 旺业甸林场不同林型土壤活性有机碳分布特征[J]. 中国农业科技导报(中英文), 2025, 27(10):193-205.
WEI C J, WANG H Y, CUI X, et al. Characteristics of soil reactive organic carbon distribution in different forest types in Wang Yedian Forest [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2025, 27(10):193-205.
- [33] 王卫霞, 史作民, 罗达, 等. 南亚热带 3 种人工林土壤微生物生物量和微生物群落结构特征[J]. 应用生态学报, 2013, 24(7):1784-1792.
WANG W X, SHI Z M, LUO D, et al. Characteristics of soil microbial biomass and community composition in three types of plantations in southern subtropical area of China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(7):1784-1792.
- [34] 唐靓茹, 刘雄盛, 蒋焱, 等. 红锥 4 种林型土壤理化性质及微生物量差异分析[J]. 中南林业科技大学学报, 2020, 40(1):76-81.
TANG J R, LIU X S, JIANG Y, et al. Analysis on difference of soil physical and chemical properties and micro-organism quantity in four types *Castanopsis hystrix* forest [J]. Journal of Central South University of Forestry and Technology, 2020, 40(1):76-81.
- [35] 李雪, 朱宾宾, 满秀玲. 温度和水分对寒温带典型森林类型土壤有机碳矿化的影响[J]. 东北林业大学学报, 2025, 53(2):127-136.
LI X, ZHU B B, MAN X L. The influence of temperature and moisture to soil organic carbon mineralization in typical forest types of the cold temperate zone [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2025, 53(2):127-136.
- [36] 朱正青, 满秀玲. 林下植被对寒温带兴安落叶松林土壤磷形态及有效性的影响[J]. 水土保持学报, 2024, 38(2):339-350.
ZHU Z Q, MAN X L. Effects of understory vegetation on soil phosphorus morphological and availability in *Larix gmelinii* forest in the cold temperate zone [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(2):339-350.
- [37] 李富, 臧淑英, 刘赢男, 等. 冻融作用对三江平原湿地土壤活性有机碳及酶活性的影响[J]. 生态学报, 2019, 39(21):7938-7949.
LI F, ZANG S Y, LIU Y N, et al. Effects of freezing and thawing on soil active organic carbon and enzyme activity in the Sanjiang Plain wetlands [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(21):7938-7949.
- [38] 洪雪姣. 大、小兴安岭主要森林群落类型土壤有机碳密度及影响因子的研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2012.
HONG X J. Study on soil organic carbon density and its influencing factors of main forest community types in Daxing'an and Xiaoxing'an Mountains [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2012.
- [39] 姜勇, 庄秋丽, 梁文举. 农田生态系统土壤有机碳库及其影响因子[J]. 生态学杂志, 2007, 26(2):278-285.
JIANG Y, ZHUANG Q L, LIANG W J. Soil organic carbon pool and its affecting factors in farmland ecosystem [J]. Chinese Journal of Ecology, 2007, 26(2):278-285.
- [40] KECHAVARZI C, DAWSON Q, BARTLETT M, et al. The role of soil moisture, temperature and nutrient amendment on CO₂ efflux from agricultural peat soil microcosms [J]. Geoderma, 2010, 154(3/4):203-210.
- [41] WANG Q K, WANG Y P, WANG S L, et al. Fresh carbon and nitrogen inputs alter organic carbon mineralization and microbial community in forest deep soil layers [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2014, 72:145-151.
- [42] 曹小玉, 李际平. 杉木林土壤有机碳含量与土壤理化性质的相关性分析[J]. 林业资源管理, 2014(6):104-109.
CAO X Y, LI J P. Contents of soil organic carbon and its relations with soil physicochemical properties in Chinese fir plantations [J]. Forest Resources Management, 2014(6):104-109.
- [43] 邓艳林, 陈芳芳, 张景, 等. 莽山不同次生林土壤有机碳分布与土壤物理性质的相关性[J]. 南方农业学报, 2017, 48(4):616-622.
DENG Y L, CHEN F F, ZHANG J, et al. Correlation between distribution of soil organic carbon and soil physical properties for different secondary forests in Mangshan [J]. Journal of Southern Agriculture, 2017, 48(4):616-622.

(下转第 266 页)