

杉木和米槠人工林土壤可溶性碳组分 动态及其对凋落叶输入的响应

张可欣¹, 倪祥银^{1,2}, 杜琳¹, 卫芯宇¹, 杨静¹, 吴福忠^{1,2}

(1.福建师范大学湿润亚热带生态—地理过程教育部重点实验室,
福州 350007;2.福建师范大学地理研究所,福州 350007)

摘要: 可溶性碳组分是土壤有机碳库中最活跃的部分,作为土壤碳周转初期变化的敏感指标,其含量受到凋落叶等植物残体输入、森林类型及季节性水热变化的共同调节。采用土壤原位培养法,以亚热带米槠(*Castanopsis carlesii*)人工林与杉木(*Cunninghamia lanceolata*)人工林为对象,分析生长季内土壤可溶性碳(DOC)与热水溶性碳(HWSC)含量动态变化及其对凋落叶输入的响应趋势。结果表明,凋落叶输入、森林类型和培养月份均极显著影响土壤可溶性碳组分含量($p<0.001$)。杉木人工林土壤 DOC 与 HWSC 含量整体较高,分别高出米槠人工林 15.09%和 13.06%,但后者的土壤可溶性有机质芳香化程度更高。经过 1 个生长季的培养,2 种人工林土壤 DOC 与 HWSC 含量均明显增加。凋落叶增加生长季米槠人工林土壤 DOC 与 HWSC 的含量,但对杉木人工林的影响具有季节差异。研究结果表明杉木人工林土壤 DOC 与 HWSC 含量更高,但凋落叶输入促进米槠人工林 DOC 与 HWSC 含量,更易于随淋溶过程流失。

关键词: 土壤可溶性碳; 土壤热水溶性碳; 凋落叶; 亚热带人工林; 土壤碳循环

中图分类号: S714.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2023)02-0260-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2023.02.030

Dynamics of Soil Soluble Carbon Components and Their Responses to Foliar Litter in *Castanopsis carlesii* and *Cunninghamia lanceolata* Plantation

ZHANG Kexin¹, NI Xiangyin^{1,2}, DU Lin¹, WEI Xinyu¹, YANG Jing¹, WU Fuzhong^{1,2}

(1.The Key Laboratory for Humid Subtropical Eco-Geographical Processes of the Ministry of Education, Fujian Normal University, Fuzhou 350007; 2.Institute of Geography, Fujian Normal University, Fuzhou 350007)

Abstract: Soil soluble carbon is the most active part of soil organic carbon pool, which is often used as a sensitive indicator for the initial change of soil carbon turnover, but its content is jointly regulated by plant litter input, forest type, and seasonal variation of water and heat. The monthly dynamics of soil dissolved organic carbon (DOC) and hot water-soluble carbon (HWSC) contents and their responses to litter input during the growing season were analyzed by carrying out a field situ incubation experiment of two plantations (*Castanopsis carlesii* and *Cunninghamia lanceolata*/Chinese fir) in subtropical China. The results showed that litter input, forest type and monthly climate significantly affected the content of soil soluble carbon components ($p<0.001$). Soil DOC and HWSC contents in Chinese fir plantation were higher than those of *Castanopsis carlesii* plantation by 15.09% and 13.06%, respectively, but the degree of aromatation of soil soluble organic matter was higher in *Castanopsis carlesii* plantation. After one growing season of incubation, soil DOC and HWSC contents increased significantly in both plantations. Litter increased soil DOC and HWSC contents in *Castanopsis carlesii* plantation during the growing season, but which in Chinese fir plantation displayed seasonal difference. These results indicated that soil DOC and HWSC contents were higher in Chinese fir plantation than *Castanopsis carlesii* plantation, but litter could promoted the DOC and HWSC

contents of *Castanopsis carlesii* plantation, which would be easy to be lost during leaching.

Keywords: soil dissolved organic carbon; soil hot water-soluble organic carbon; litter; subtropical plantation; soil carbon cycle

溶解性有机质(DOM)是土壤有机质中最具流动性的部分,是参与生态系统碳与养分迁移最为前端的重要组分^[1],影响土壤有机质化学组成与结构稳定性。同时,土壤可溶性碳组分作为土壤有机碳库中活性较高的部分,周转相对较快,对环境变化具有高度敏感性,其含量变化往往可以指示土壤碳储量的初期变化^[2],反映土壤有机碳流动性,并直接参与土壤生物化学循环。以凋落叶为主体的地上部分凋落物是森林生态系统土壤可溶性碳的主要来源之一^[3]。然而,凋落物的输入不仅可以促进可溶性碳在植物—土壤间的流动,从而提高土壤可溶性碳的含量,也可能通过刺激微生物的活性,导致激发效应,促进土壤原可溶性有机碳的矿化^[4]。更为重要的是,森林类型与季节性水热动态也可极大地影响凋落物与土壤可溶性有机碳的相关关系,从而调控土壤可溶性有机碳组分变化规律和周转速率。有研究^[5-6]表明,林型间凋落物具有不同生态化学计量特征与季节动态,其碳释放对森林类型产生的响应也具有差异。增加降雨可以促进对凋落叶的淋洗作用,使可溶性碳组分进入土壤^[7],而短时间内干燥温暖的环境可以通过增加氧气,加快微生物活动与凋落物的分解,从而增加土壤可溶性有机碳含量^[8]。根据提取方法不同,将土壤中可溶性碳组分划分为水溶性有机碳(WSOC)和热水溶性有机碳(HWSC)^[9],通常也将 WSOC 作为土壤可溶性有机碳(DOC)。DOC 与 HWSC 作为土壤中简单的碳组分,被认为是土壤呼吸的可用性碳基质。相对而言,土壤 HWSC 更稳定,含量更高,且与土壤微生物量碳密切相关^[10]。充分认识不同类型森林土壤 DOC 和 HWSC 含量与凋落叶的关系可以综合认识土壤中可溶性碳组分的变化趋势与季节动态,深入理解人工林经营背景下凋落叶输入对土壤可溶性碳组分含量的影响。

我国的亚热带地区水热条件好,森林生产力高,是我国商品人工林的主要基地,为区域经济社会和生态建设做出了重要的贡献。然而,集约化经营的人工林往往为维持较高的生产力,表现出快速的凋落物生产与分解等物质循环过程,使得土壤水溶性碳组分的周转及其与凋落物的关系更为重要^[11]。米楮(*Castanopsis carlesii*)是我国亚热带常绿阔叶林主要建群种之一,而杉木林(*Cunninghamia lanceolata*)是我国面积最大的人工林^[12]。2 种人工林在质量与数量上具有明显差异的凋落物可能显著影响土壤可溶性碳动态过程,但

缺乏必要关注。因此,以亚热带典型米楮人工林与杉木人工林为对象,采用原位土柱培养方法,通过控制凋落叶输入,来研究凋落叶对土壤 DOC 和 HWSC 含量动态的影响,以期为深入认识亚热带人工林生态系统碳循环过程及其经营管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于福建三明森林生态系统国家野外科学观测研究站陈大观测点(26°19'N,117°36'E),海拔 250~500 m。该区域属中亚热带季风气候,年平均气温 19.5 ℃,年平均降水量 1 610 mm,雨季多集中在 3—8 月。区域地带性植被为亚热带常绿阔叶林,优势乔木以米楮、马尾松(*Pinus massoniana*)、闽粤栲(*Castanopsis fissa*)等为主,灌草层以山茶(*Camellia japonica*)、忍冬(*Lonicera japonica*)等为主。同时分布有面积广泛的杉木人工林,林下植物主要为芒萁(*Dicranopteris pedata*)、毛冬青(*Ilex pubescens*)等。地形多丘陵,土壤主要为红壤。本研究选择该地区米楮天然林经择伐后种植形成的米楮人工林和杉木人工林为对象。

1.2 样地设置

2011 年,在研究区内采用随机区组设计设置 6 个 20 m×20 m 的样地,将原有成熟米楮林皆伐、炼山后种植米楮(2 400 株/hm²)和杉木幼苗(2 860 株/hm²),形成米楮人工林和杉木人工林,每种林型各 3 个重复样地。2021 年 1 月,林木生长 10 年后,在米楮人工林以及杉木人工林内设置原位培养试验。其中,米楮人工林平均树高为 8.77 m,平均胸径为 0.09 m;杉木人工林平均树高为 11.30 m,平均胸径为 0.15 m。

在每种林型的 3 个重复样地中,选择坡向、坡度相近的区域随机设置 1 个 1 m×2 m 的样方,每个样方间距离 50 m 以上,样方内包含 2 个紧邻的原位培养框,分别为添加和去除凋落叶 2 种处理,培养框内设有排水管避免积水。在每个培养框中随机放置 7 个 PVC 培养柱(高为 25 cm,内径为 10 cm),柱壁上均匀打上小孔,确保水热交换。采集每个样方内 0—20 cm 土壤,去除其中的凋落物、石砾等杂质,将 3 个重复样地内采集的土壤混合均匀后回填到培养柱内,确保每个培养柱中土量一致,在整个土柱下方套上尼龙网(孔径 1 mm),使土层间物质流通且避免土壤流失。在每个培养框上方设置尼龙网,确保无凋落物自然输入。每次采样时去除培养框尼龙网上方自然输

入的凋落物。所有样方中,其中 1 个培养框内的土壤回填后不做任何处理,为去除凋落叶框;另 1 个培养框内于 2021 年 3 月在每个培养柱土壤表面放入凋落叶作为添加凋落叶框。在添加凋落叶处理中,根据课题组前期对研究样地相应林型单位面积年均凋落叶量调查数据^[13],计算得出米槭人工林每个培养柱中添加相当于烘干重 4.42 g 的风干凋落叶,杉木人工林每个培养柱中添加相当于烘干重 4.86 g 的风干凋落叶。在靠近样地的非森林区域用翻斗式雨量传感器(SL3-1,上海气象仪器厂有限公司,中国)每小时记录 1 次降雨量,同时布设大气温度记录仪(Micro-Lite5032P-RH, Fourtec-Fourier Technologies, Israel)测定空气温度,设置每 30 min 自动记录 1 次。采样期样地内月平均气温与降雨量见图 1。

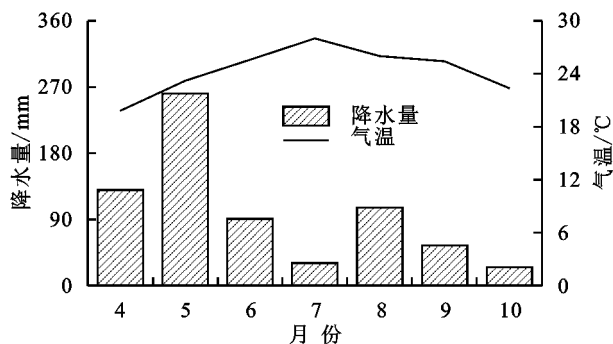


图 1 研究样地 2021 年 4—10 月气温与降雨量动态

1.3 样品采集与处理

2021 年 3—10 月,连续每月下旬收集土壤样品(9 月因受到新冠肺炎疫情影响未收集),共 7 次。每次采样时,在添加和去除凋落叶处理培养框中随机取出 1 个培养柱装入封口袋内带回实验室进行处理。在室温下风干,过 0.15 mm 筛,用于测定土壤 DOC 与 HWSC 值。

1.4 可溶性有机碳与热水溶性有机碳的测定

土壤 DOC 与 HWSC 含量分别采用水提取,于振荡机振荡 3 h,热水提取法^[14]于 80 °C 水浴 3 h,提取出的待测液采用总有机碳分析仪(TOC-VCPH/CPN, Shimadzu, Japan)测定 DOC、HWSC 含量。

1.5 光谱分析

采用紫外—可见分光光度计(UV-1200B, MAPADA, China)测定待测液在 250, 254, 365 nm 处吸光度 A_{250} 、 A_{254} 、 A_{365} ,计算得到芳香化指数 $SUVA_{254}$ 来表征土壤可溶性有机质(dissolved organic matter, DOM)与热水溶性有机质(hot-water extracts, HWE)芳香化程度^[15]:

$$SUVA_{254} = A_{254} / C \times 100 \quad (1)$$

式中: C 为 DOC 或 HWSC 浓度(mg/L)。

计算 E_2/E_3 值表征平均分子量, E_2/E_3 值越高,分子量越小^[16]:

$$E_2/E_3 = A_{250} / A_{365} \quad (2)$$

扫描 275~295, 350~400 nm (1 nm 间隔)波段内待测液吸光度(A),计算得到光谱斜率比(S_R),表征分子量大小,定性反映 DOM 地化特征^[17]:

$$a_g(\lambda) = 2.303 \times A / l \quad (3)$$

$$a_g(\lambda) = a_g(\lambda_r) \times e^{-S(\lambda - \lambda_r)} \quad (4)$$

$$S_R = S_{275 \sim 295} / S_{350 \sim 400} \quad (5)$$

式中: $a_g(\lambda)$ 为吸收系数; l 为光程路径(cm); λ_r 为参照波长; S 值为光谱斜率。

1.6 数据处理

所有数据处理与统计分析在 Microsoft Excel 2016 (Microsoft Corporation, Redmond, WA) 和 SPSS 26.0 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA) 上进行,图形均用 Origin 2021 (Origin Lab, MA) 软件进行绘制。采用重复测量方差分析(Repeated measures ANOVA)检验凋落叶处理、林型和月份及其交互作用对土壤可溶性碳组分的影响。采用独立样本 T 检验比较土壤可溶性碳组分与光谱特征参数在不同林型间的差异显著性以及凋落叶处理间土壤可溶性碳组分含量差值在不同林型间的差异显著性。采用 Pearson 相关分析,检验 2 种人工林土壤 DOC、HWSC 及其光谱特征参数与环境因子的相关关系。

2 结果与分析

2.1 土壤可溶性有机碳含量与光谱特征动态

森林类型以及凋落叶输入、月份极显著影响土壤 DOC 含量($p < 0.001$) (表 1)。相对于米槭人工林,杉木人工林土壤 DOC 含量较高($p < 0.001$),而土壤 DOM 的光谱特征值则相对较低(表 1、图 2 和图 3)。经过 1 个生长季的培养后,2 种人工林土壤在不同凋落叶处理下均表现出 DOC 含量、 E_2/E_3 、 S_R 值上升、 $SUVA_{254}$ 值下降的整体特征,但凋落叶输入改变不同林型 DOC 含量与光谱特征值的变化趋势。生长季前期,添加凋落叶导致杉木人工林土壤 DOC 含量在 4 月下降,5 月上升,而去除凋落叶对其影响相反(图 2a 和图 2b)。与去除凋落叶相比,添加凋落叶增加 5 月直至生长季末的杉木人工林土壤 DOC 含量(图 2c)。不同凋落叶处理下米槭人工林土壤 DOC 含量动态基本一致(图 2a 和图 2b)。与去除凋落叶相比,添加凋落叶增加整个生长季内米槭人工林土壤 DOC 含量,仅在 10 月略有降低(图 2c)。此外,添加凋落叶使得 2 种人工林土壤 DOM 的 $SUVA_{254}$ 、 E_2/E_3 、 S_R 值高峰均有不同程度地提前(图 3)。

2.2 土壤热水溶性有机碳含量与光谱特征动态

森林类型以及凋落叶输入、月份极显著影响土壤 HWSC 含量($p < 0.001$) (表 1)。与土壤 DOC 含量不同,土壤 HWSC 含量在培养前期持续下降(图 4)。相对于

米楮人工林,杉木人工林土壤 HWSC 含量更高 ($p < 0.001$),而土壤热水溶性有机物的光谱特征值相对较低。与土壤 DOC 相似,2 种人工林土壤在不同凋落叶处理下均表现为 HWSC 含量、 E_2/E_3 值上升、 $SUVA_{254}$ 值下降的整体特征,但凋落叶输入改变不同林型 HWSC 含量与光谱特征值的变化趋势(图 4、图 5)。由图 4 可以看出,添加凋落叶导致杉木人工林土壤 HWSC 含量在 5 月

上升,6 月下降,同时去除凋落叶对其产生相反的影响。不同凋落叶处理下米楮人工林土壤 HWSC 含量动态基本一致,仅在 6 月略有差异。与去除凋落叶相比,添加凋落叶增加整个生长季内米楮人工林土壤 HWSC 含量(图 4c)。2 种人工林在添加凋落叶处理下其土壤热水溶性有机质的 S_R 最高值均出现在 6 月,而去除凋落叶处理下则出现在 8 月(图 5)。

表 1 不同月份、凋落叶处理以及森林类型对土壤 DOC、HWSC 含量的重复测量方差分析

变异来源	df	可溶性有机碳		热水溶性有机碳	
		F	p	F	p
月份	6	2860.998	<0.001	1412.171	<0.001
凋落叶	1	368.769	<0.001	137.973	<0.001
森林类型	1	2254.100	<0.001	742.423	<0.001
月份×凋落叶	6	162.192	<0.001	117.585	0.001
月份×森林类型	6	76.214	<0.001	143.721	0.001
凋落叶×森林类型	1	82.226	<0.001	91.288	<0.001
月份×凋落叶×森林类型	6	103.106	<0.001	53.330	0.001

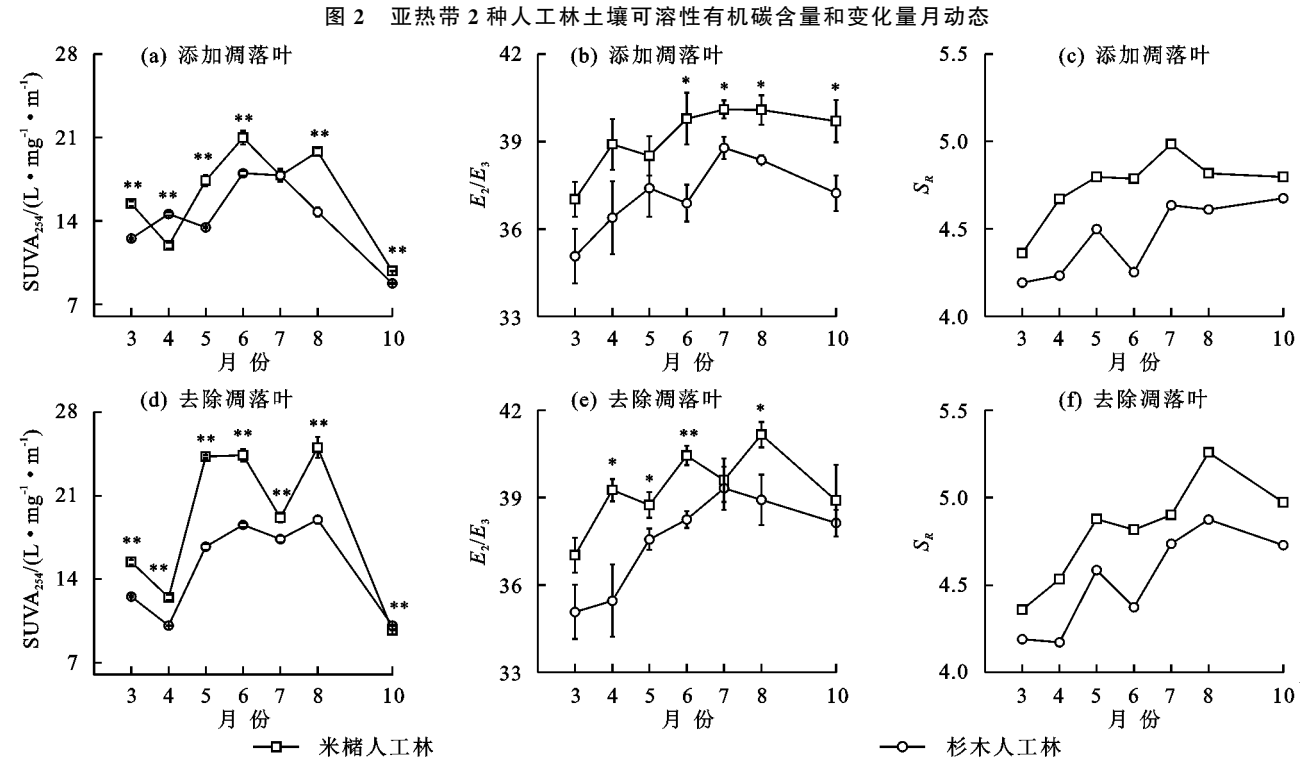
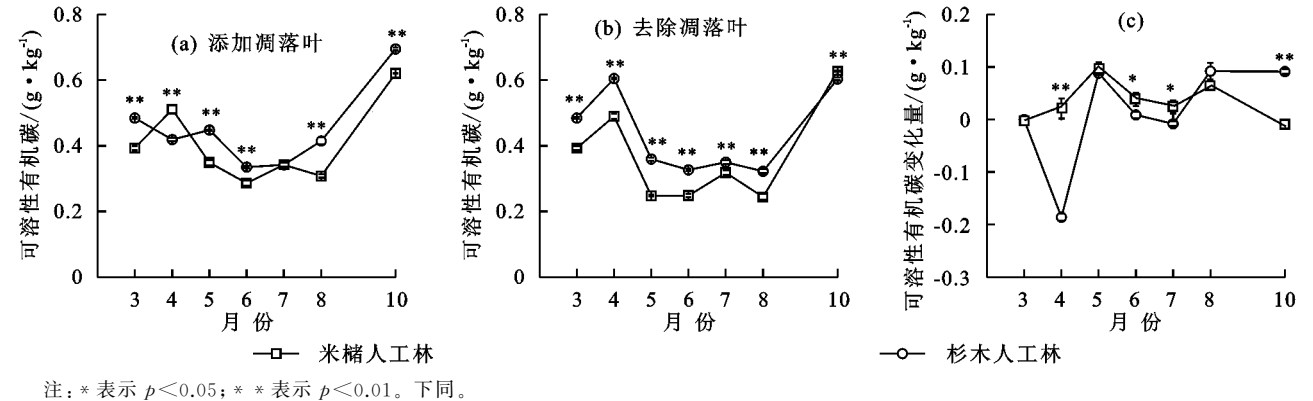


图 3 亚热带 2 种人工林土壤可溶性有机质 $SUVA_{254}$ 、 E_2/E_3 、 S_R 值月动态

2.3 土壤 DOC 和 HWSC 的影响因素

2 种人工林土壤 DOC 含量与 HWSC 含量呈极显著正相关($p<0.01$),土壤 DOC 含量与气温呈显著负相关($p<0.05$),而土壤 HWSC 含量与气温和降雨量均无显著相关性(图 6)。杉木人工林中,除土壤 DOM 的 S_R 值外,其余光谱特征值与气温之间均具有显著正相关关系($p<0.05$);土壤热水溶性有机质的 E_2/E_3 值与降雨量呈显著负相关($p<0.05$),其他因子与降雨量无显著相关

性。米槠人工林土壤 DOC、HWSC 含量及各光谱特征参数与热水溶性有机质的 S_R 值相关关系显著($p<0.05$),其中碳组分含量与热水溶性有机质的 S_R 值呈显著负相关($p<0.05$),而其余光谱特征值与热水溶性有机质的 S_R 值呈显著正相关($p<0.05$);米槠人工林中除土壤热水溶性有机质的 $SUVA_{254}$ 值外,其余光谱特征值与气温均呈显著正相关($p<0.05$),碳组分含量和光谱特征值与降雨量相关关系均不显著。

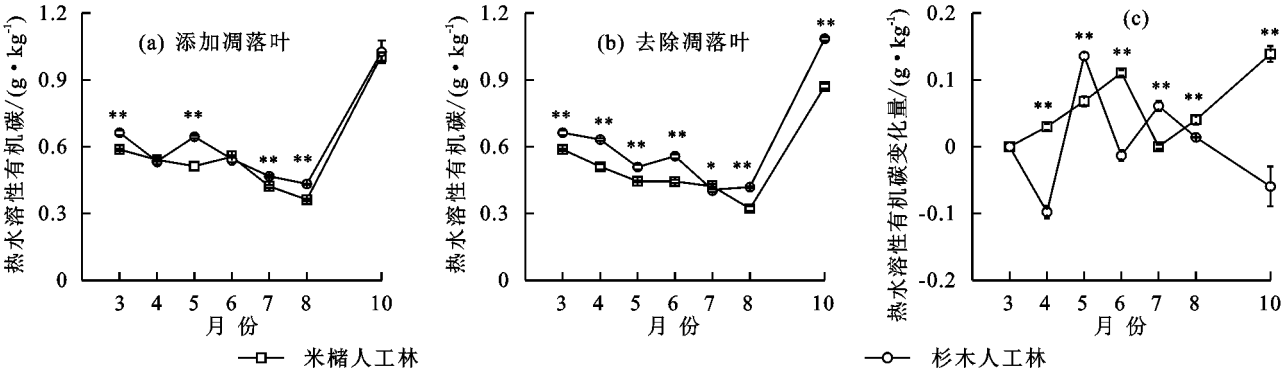


图 4 亚热带 2 种人工林土壤热水溶性有机碳含量和变化量月动态

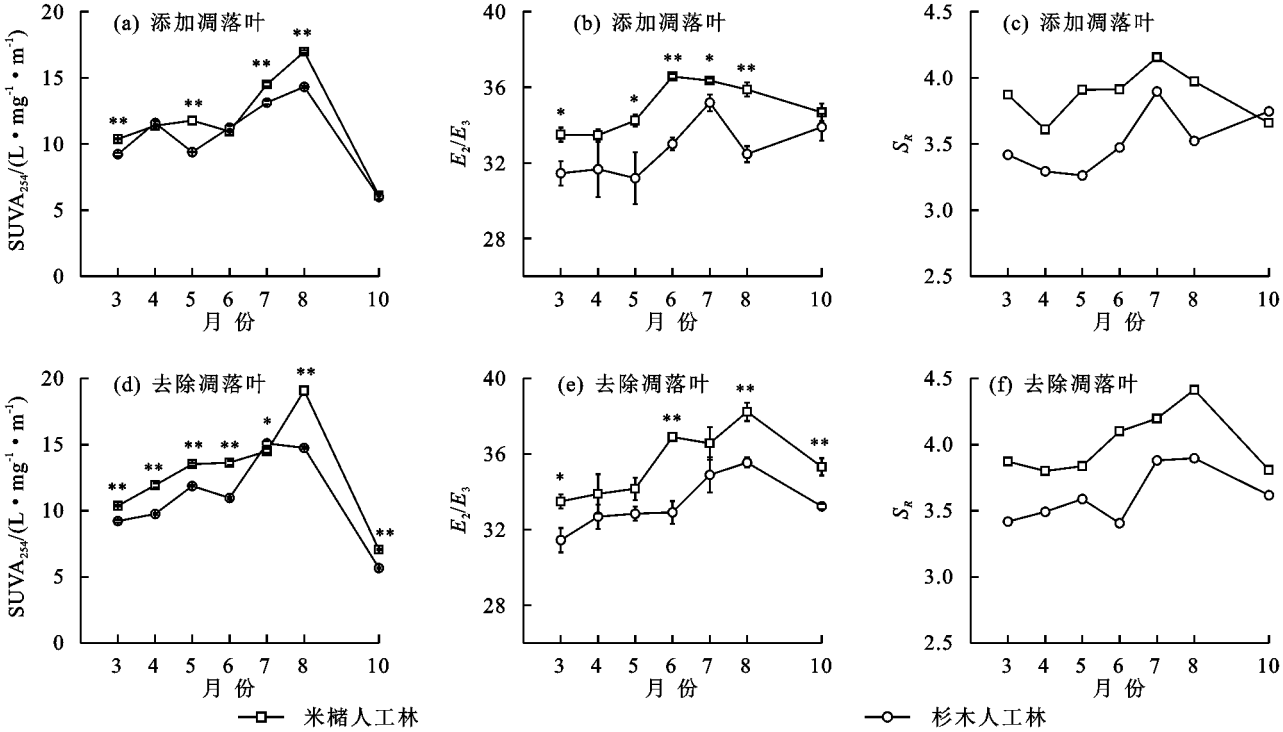


图 5 亚热带 2 种人工林热水溶性有机质 $SUVA_{254}$ 、 E_2/E_3 、 S_R 值月动态

3 讨论

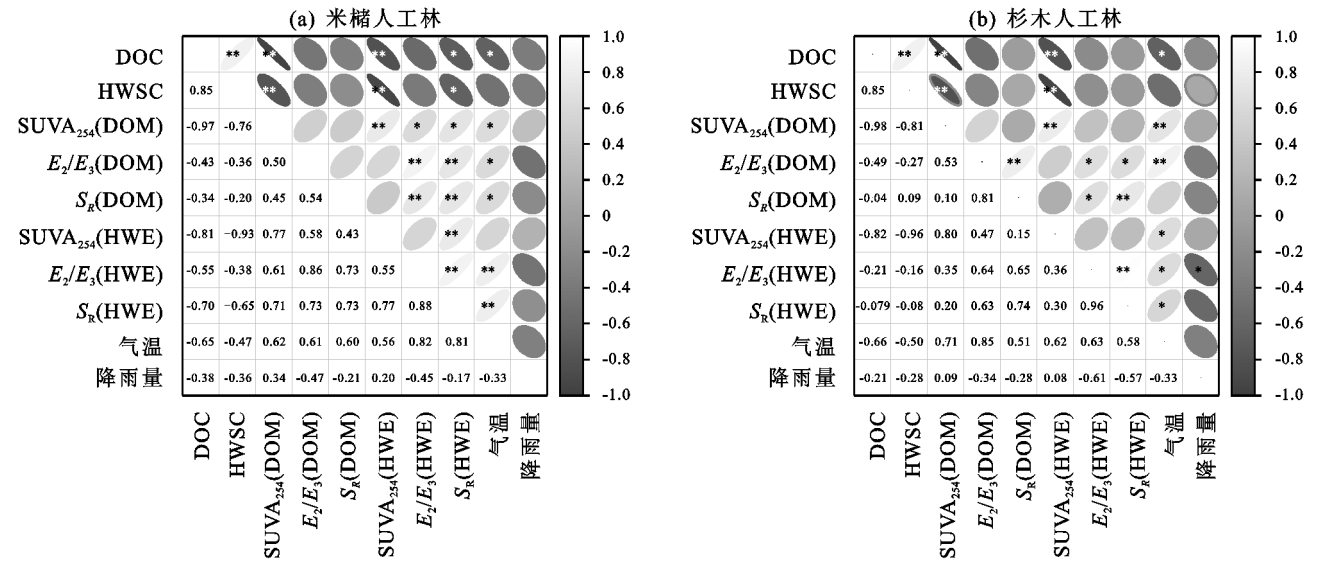
可溶性碳组分流动性强,是土壤有机碳中周转最为迅速的部分,其对生态系统物质循环与能量流动具有重要意义。本项研究发现,杉木人工林土壤 DOC 与 HWSC 含量均明显大于米槠人工林,但 $SUVA_{254}$ 、 E_2/E_3 、 S_R 值相对较小,表明杉木人工林可能具有更为快速的以土壤可溶性组分为载体的物质周转过程。同时,添加凋落叶使整个生长季节内米槠人工林土壤 DOC 与 HWSC 含量上升。而杉木人工林土壤可溶性碳组分对凋落叶的响

应在生长季不同时期具有差异,添加凋落叶抑制生长季节前期杉木人工林土壤 DOC 与 HWSC 的积累,而生长季节后期土壤 DOC 含量上升,土壤 HWSC 含量下降。凋落叶对亚热带地区 2 种人工林土壤 DOC 与 HWSC 含量变化的差异性表明,凋落叶的输入可能促进生长季米槠人工林土壤碳的流失,而有利于生长季后期杉木人工林土壤碳的积累。

DOC 作为凋落叶中极易被淋溶和分解的组分,是凋落叶与土壤之间养分交换的重要形式。相对于土壤

有机碳中的固相部分,土壤 DOC 活性更强,是微生物分解过程中优先利用的底物^[18],对物质循环以及土壤有机质的积累起着非常重要的作用。本研究中凋落叶添加对 2 种林型土壤可溶性碳组分含量均有显著影响,这与李常准等^[19]对于活性有机碳的研究结果一致。生长季初期,米楮人工林土壤 DOC 含量上升,且凋落叶的输入增加土壤中 DOC 的含量,而杉木人工林土壤在添加凋落叶后 DOC 含量下降。这可能是由于雨季降雨量大,同时米楮叶面积大于杉木,受到的淋洗作用更加强烈,分解更为迅速,从而使 DOC 在凋落叶输入初期迅速进入土壤。而杉木凋落叶前期分解较慢,且外源有机质的输入导致“激发效应”,土壤原有 DOC 被分解^[20],因此杉木人工林土壤 DOC 含量在前期降低。生长季中期,2 种人工林土壤 DOC 含量具有不同程度的下降。一方面,植物生长处于高峰期,养分需求旺盛,促使微生物

物对土壤有机质的分解以实现养分的释放^[21],且温度升高可能加速土壤 CO₂ 的释放^[22],本研究中土壤 DOC 含量与气温的显著负相关关系也印证这一观点;另一方面,正如观察到的月降雨量动态,生长季中期正值夏季,研究样地内降雨量较春季减少,降低随降雨输入到土壤中的 DOC 含量。即使 5—8 月 2 种人工林土壤 DOC 含量下降,但添加凋落叶土壤 DOC 含量仍然较去除凋落叶土壤更高。8 月后,杉木人工林添加凋落叶土壤 DOC 含量较去除凋落叶土壤更多,这与米楮人工林相反,这可能与土壤性质和凋落叶养分含量有关。研究区域土壤属于红壤,养分含量低且酸度高,其矿化易受外源物质输入的影响^[23]。相对于阔叶凋落物,针叶凋落物分解会产生更多酸性物质^[24],从而对微生物活动产生影响,减缓土壤矿化,使土壤 DOC 增多。



注:DOM 为可溶性有机质;HWE 为热水溶性有机质;* 表示 $p<0.05$; ** 表示 $p<0.01$ 。

图 6 亚热带 2 种人工林土壤 DOC 和 HWSC 含量与其他因子的相关关系

紫外—可见吸收光谱特征参数 SUVA₂₅₄ 与溶解性有机质芳香化程度具有极强相关性,被认为是指示 DOM 芳香性的指标^[15]。E₂/E₃ 值与 S_R 值可用于表示 DOM 平均分子量,E₂/E₃ 值与 S_R 值越高,分子量越低,且通常与 DOM 浓度无关^[16-17]。土壤 DOM 的 SUVA₂₅₄、E₂/E₃、S_R 值大小表现为米楮人工林>杉木人工林。这说明米楮人工林土壤 DOM 存在更多芳香化组分,但分子量小。有研究^[25]表明,与杉木相比,米楮叶具有更加丰富的养分,淋溶产生的 DOM 结构相对更加复杂,芳香化程度更高,容易被土壤吸附,且米楮林透冠雨中所含芳香化合物也高于杉木林^[26],这可能是导致 2 种凋落叶处理中米楮人工林土壤 DOM 芳香化程度均更高的原因。这表明米楮人工林土壤 DOM 具有更多难降解物质,不利于微生物分解作用,但有

利于维持土壤肥力和土壤有机质的积累。

土壤 HWSC 中不仅含有 DOC,还包括大量可提取根系分泌物,与微生物生物量碳正相关^[14]。杉木人工林土壤 HWSC 与 DOC 含量均高于米楮人工林,这与林伟盛等^[27]关于米楮和杉木的研究结果不一致,这可能是因为其研究对象为米楮天然林和杉木人工林,天然林较人工林结构更加复杂,庇护作用强烈,水土流失更为轻微,随雨水流失的土壤可溶性碳更少。土壤 HWSC 与 DOC 的动态变化基本相似,仅在培养前期具有差异。这可能是源于季节性对微生物活动有很大影响,从而影响到可溶性组分。本研究中生长季前期处于雨季,植物对土壤养分的需求量大,而植物与微生物对养分的利用存在着竞争机制^[28],因此微生物活动受到抑制,使土壤微生物生物量碳降低,影响土壤 HWSC 含量。凋落叶与森林

类型也对土壤 HWSC 含量产生影响。一个生长季结束,凋落叶输入抑制杉木人工林土壤 HWSC 的积累,主要原因可能是,杉木人工林土壤理化性状较差,且养分含量较低^[29],加上杉木凋落叶分解时易产生酸性物质,不利于土壤微生物生存,从而减少土壤 HWSC 含量。由于土壤 HWSC 与团聚体稳定性、土壤抗破碎性均存在显著相关性,被认为是促进团聚体稳定性的主要因素^[30],因此凋落叶输入可能不利于杉木人工林土壤碳的稳定性,但利于碳的流动与转化。

4 结论

(1)杉木人工林土壤 DOC 与 HWSC 含量较米楮人工林高,但米楮人工林土壤溶解性有机质芳香化程度高于杉木人工林。

(2)凋落叶增加生长季米楮人工林土壤 DOC 与 HWSC 的含量,但对杉木人工林土壤 DOC 与 HWSC 含量的影响具有季节差异。

(3)杉木人工林土壤含有更多可溶性有机碳,但凋落叶的输入促进米楮人工林土壤可溶性有机碳增加,但易受到淋溶而流失。

参考文献:

- [1] Smith C K, Munson A D, Coyea M R. Nitrogen and phosphorus release from humus and mineral soil under black spruce forests in central Quebec[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, 30(12): 1491-1500.
- [2] Christ M J, David M B. Temperature and moisture effects on the production of dissolved organic carbon in a Spodosol [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1996, 28(9): 1191-1199.
- [3] 袁方,黄力,魏玉洁,等.中国天然林凋落物量特征及其与气候因子的关系[J]. *生态学杂志*, 2018, 37(10): 3038-3046.
- [4] Zhang Q F, Cheng L, Feng J G, et al. Nitrogen addition stimulates priming effect in a subtropical forest soil [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2021, 160: e108339.
- [5] 郭绮雯,段文标,陈立新,等.模拟凋落物添加与氮磷沉降对红松凋落物生态化学计量特征的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2021, 27(7): 1222-1233.
- [6] 郭绮雯,段文标,刘玉萍,等.凋落物添加和模拟氮磷沉降对红松凋落物木质素降解和碳释放的影响[J]. *生态学报*, 2021, 41(16): 6621-6632.
- [7] Song X, Lyu S, Wang J, et al. High dissolved organic carbon deposition is buffered by surface soil in a head-water catchment of a subtropical plantation[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 607: e127557.
- [8] Tipping E, Woof C, Rigg E, et al. Climatic influences on the leaching of dissolved organic matter from upland UK moorland soils, investigated by a field manipulation experiment

- [J]. *Environment International*, 1999, 25(1): 83-95.
- [9] Cusack D F, Halterman S M, Tanner E, et al. Decadal-scale litter manipulation alters the biochemical and physical character of tropical forest soil carbon[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 124: 199-209.
- [10] Uchida Y, Nishimura S, Akiyama H. The relationship of water-soluble carbon and hot-water-soluble carbon with soil respiration in agricultural fields[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2012, 156: 116-122.
- [11] 朱玲,魏文涛,吴若冰,等.马尾松和杉木人工林凋落叶水溶性碳氮磷的季节动态[J]. *亚热带资源与环境学报*, 2021, 16(4): 7-14.
- [12] 国家林业和草原局.中国森林资源报告(2014—2018) [M].北京:中国林业出版社,2019.
- [13] Ni X Y, Lin C F, Chen G S, et al. Decline in nutrient inputs from litterfall following forest plantation in subtropical China[J]. *Forest Ecology and Management*, 2021, 496: e119445.
- [14] Ghani A, Dexter M, Perrott K W. Hot-water extractable carbon in soils: A sensitive measurement for determining impacts of fertilisation, grazing and cultivation[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, 35(9): 1231-1243.
- [15] Weishaar J L, Aiken G R, Bergamaschi B A, et al. Evaluation of specific ultraviolet absorbance as an indicator of the chemical composition and reactivity of dissolved organic carbon[J]. *Environmental Science and Technology*, 2003, 37(20): 4702-4708.
- [16] Peuravuori J, Pihlaja K. Molecular size distribution and spectroscopic properties of aquatic humic substances [J]. *Analytica Chimica Acta*, 1997, 337(2): 133-149.
- [17] 李璐璐,江韬,闫金龙,等.三峡库区典型消落带土壤及沉积物中溶解性有机质(DOM)的紫外—可见光谱特征[J]. *环境科学*, 2014, 35(3): 933-941.
- [18] Marschner B, Kalbitz K. Controls of bioavailability and biodegradability of dissolved organic matter in soils[J]. *Geoderma*, 2003, 113(3/4): 211-235.
- [19] 李常准,陈立新,段文标,等.凋落物处理对不同林型土壤有机碳全氮全磷的影响[J]. *中国水土保持科学*, 2020, 18(1): 100-109.
- [20] Guenet B, Neill C, Bardoux G, et al. Is there a linear relationship between priming effect intensity and the amount of organic matter input? [J]. *Applied Soil Ecology*, 2010, 46(3): 436-442.
- [21] Fontaine S, Henault C, Aamor A, et al. Fungi mediate long term sequestration of carbon and nitrogen in soil through their priming effect[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(1): 86-96.