

种植米楮、杉木土壤 DOM 浓度和光谱特征差异及其对短期增温的响应^①

黄媛¹, 王海珍^{1,2}, 杨智杰^{1,2,3}, 林伟盛^{1,2,3}, 钟美芳³, 郭剑芬^{1,2,3*}

(1 福建师范大学福建省植物生理生态重点实验室, 福州 350117; 2 福建三明森林生态系统国家野外科学观测研究站, 福建三明 365002; 3 福建师范大学地理研究所, 福州 350117)

摘要: 为揭示不同树种土壤可溶性有机质(Dissolved organic matter, DOM)对全球变暖的响应, 在福建三明森林生态系统国家野外科学观测研究站采用根箱增温法, 选取亚热带地区代表性植物幼苗米楮(*Castanopsis carlesii*, CC)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*, CL)为研究对象, 设置未种树作为对照处理, 结合紫外可见光谱和荧光光谱分析, 探究短期增温对种植米楮、杉木土壤 DOM 浓度和光谱特征的影响。结果表明: ①种植不同树种的土壤可溶性有机碳(Dissolved organic carbon, DOC)含量存在显著差异, 其中种植杉木处理显著高于米楮和未种树处理; 树种对根箱土壤 DOM 荧光指数(Fluorescence index, FluI)、生物源指数(Biological index, BIX)和腐殖化指数(Humification index, HIX)均无显著影响, 但米楮根箱土壤 DOM 芳香性(SUVA₂₅₄)、疏水性(SUVA₂₆₀)均高于杉木根箱和未种树处理; ②短期增温对种植不同树种根箱土壤 DOC 含量无显著影响, 也未显著影响 DOM 的 SUVA₂₅₄、SUVA₂₆₀、分子量大小(SUVA₂₈₀)、BIX 和 HIX, 但短期增温显著增加了种树根箱土壤 DOM 的 FluI、溶解性微生物副产物组分的相对贡献率; ③冗余分析和结构方程模型均表明, 增温通过调节根系生长、土壤养分和土壤微生物生物量, 对土壤 DOM 浓度及光谱特征产生不同程度的影响。总体上不同树种土壤 DOM 浓度及光谱特征对短期增温响应不明显, 但短期增温后种植米楮、杉木土壤的 DOM 结构复杂性降低, 微生物活动代谢来源增加。本研究可为理解亚热带区域森林土壤 DOM 的含量及组成提供基础数据, 也可为全球气候变暖背景下造林树种选择提供一定的参考。

关键词: 土壤增温; 可溶性有机质; 树种; 三维荧光光谱

中图分类号: S714.2 文献标志码: A

Differences in Soil DOM Concentration and Spectral Characteristics of *Castanopsis Carlesii* and *Cunninghamia Lanceolata* and Their Response to Short-term Warming

HUANG Xuan¹, WANG Haizhen^{1,2}, YANG Zhijie^{1,2,3}, LIN Weisheng^{1,2,3}, ZHONG Xianfang³, GUO Jianfen^{1,2,3*}

(1 Fujian Provincial Key Laboratory of Plant Ecophysiology, Fujian Normal University, Fuzhou 350117, China; 2 Sanming Forest Ecosystem National Observation and Research Station of Fujian Province, Sanming, Fujian 365002, China; 3 Institute of Geography, Fujian Normal University, Fuzhou 350117, China)

Abstract: In order to reveal soil dissolved organic matter (DOM) responses of different tree species to global warming, soil warming of root-boxes were employed at the Forest Ecosystem National Observation and Research Station in Sanming, Fujian. The representative plant seedlings of *Castanopsis carlesii* (CC) and *Cunninghamia lanceolata* (CL) in subtropical areas were selected as the research objects, and no tree was set as the control (NT). Uv-vis spectrum and fluorescence spectrum analysis were used to explore the effects of short-term warming on soil DOM concentrations and spectral characteristics. The results showed that, 1) Soil DOC concentrations were significantly different under different tree species, which was significantly higher under CL than that under CC and NT. Tree species had no significant effects on soil DOM fluorescence index (FluI), biological index (BIX) and humification index (HIX), but soil DOM aromaticity (SUVA₂₅₄) and hydrophobicity (SUVA₂₆₀) were higher under CC than those of CL and NT. 2) Short-term warming had no significant effect on soil DOC concentration under different tree species, and

①基金项目: 国家自然科学基金项目(31930071, 32271717)、福建省科技厅对外合作项目(2022I0012)、福建省科技厅公益类项目(2021R1002004)和福建师范大学碳中和研究院自然科学基金项目(TZH2022-01)资助。

* 通信作者(jifguo@fjnu.edu.cn)

作者简介: 黄媛(2003—), 女, 福建福安人, 本科生, 主要从事亚热带森林碳循环研究。E-mail: 15959311805@163.com

did not significantly affect the $SUVA_{254}$, $SUVA_{260}$, molecular weight ($SUVA_{280}$), BIX and HIX, but short-term warming significantly increased FluI of soil DOM and the relative contribution of dissolved microbial by-product components. 3) RDA and SEM analyses both showed that soil warming affected soil DOM concentration and spectral characteristics to varying degrees by regulating root growth, soil nutrients and microbial biomass. In conclusion, short-term warming insignificantly affects soil DOM concentrations and spectral characteristics under different tree species, but decreases the complexity of soil DOM structure and increases the metabolism sources of microbial activity. This study provides basic data for understanding the concentration and composition of forest soil DOM in subtropical region, and also provides certain reference for tree species selection under global warming.

Key words: Soil warming; Dissolved organic matter; Trees species; Three-dimensional fluorescence spectrum

可溶性有机质(Dissolved organic matter, DOM)是生态系统中最具流动性和活性的有机化合物之一,普遍存在于水体、土壤、沉积物中。一般认为是可通过 $0.45\ \mu\text{m}$ 过滤器的有机混合物。在森林生态系统中,土壤 DOM 可敏感地反映土壤有机质的变化,为植物根系和土壤微生物代谢活动直接提供营养和能量来源,在土壤养分流动中起着重要作用^[1]。植物作为陆地主要的生物因子,其生物量或其自身化学性质的差异,可能会在不同程度上改变土壤性质和微生物群落组成,进而影响土壤 DOM 特征。可溶性有机碳(Dissolved organic carbon, DOC)作为 DOM 重要组成部分,大约占 DOM 的 50%~70%,故 DOC 常用于表征 DOM^[2]。目前有关不同树种对 DOM 影响的研究表明,因不同树种土壤 DOM 易分解程度以及来源不同^[3-4],不同林分土壤 DOC 含量存在差异,如 Smolander 等^[5]研究发现,桦木成熟林(芬兰)土壤 DOC 含量显著高于相近林龄的松树成熟林。因此植物被认为是影响森林生态系统 DOM 数量和性质的重要因素之一^[6]。

气候变暖已对全球生态系统结构和功能产生巨大影响^[7]。在陆地生态系统中,增温可能会增加植被-土壤碳平衡的不稳定性^[8]。DOM 作为最具活性和流动性的化合物,温度升高对 DOM 的影响已引起了广泛关注。如 Liechty 等^[9]研究发现土壤 DOC 含量与温度成正比;增温提高了微生物代谢效率,进而提高 DOM 中微生物代谢产物的比例^[10]。不同的是,Fröberg 等^[11]对瑞典北部云杉林开展长达 14 年的增温试验,发现增温对土壤 DOC 含量并无显著影响。MacDoald 等^[7]也发现增温没有显著影响土壤 DOC。此外,温度可能会改变土壤 DOM 光谱特征,例如改变腐殖酸组成,提高土壤 DOM 浓度^[12-13],也可能增加土壤 DOM 中陆源腐殖质成分和高芳香性碳化合物的占比^[14-15]。目前对于增温影响土壤 DOM 浓度和光谱特征的机制尚不明确,已成为全球变化生态学研究

领域的热点之一。

随着气候变暖的加剧,亚热带地区树种组成以及土壤环境将发生明显改变,但这些变化将如何影响不同树种土壤 DOM 浓度及光谱特征仍未知^[16]。米槠(*Castanopsis carlesii*)是我国亚热带常绿阔叶林最典型的树种之一,而杉木(*Cunninghamia lanceolata*)又是我国亚热带地区常见的造林树种,因此,本研究选取这两种树种,通过设置根箱土壤增温试验,探究增温对种植不同树种土壤 DOM 浓度和光谱特征的影响,为理解亚热带区域森林土壤 DOM 的含量及组成提供基础数据,也可为全球气候变暖背景下造林树种选择提供一定的参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地位于三明森林生态系统国家野外科学观测研究站——陈大站点($26^{\circ}19'N$, $117^{\circ}60'E$)。该区以低山丘陵为主,属中亚热带季风气候,温暖湿润,年平均气温 $19.5\ ^{\circ}C$,最高气温 $40\ ^{\circ}C$,最低气温 $-5.5\ ^{\circ}C$,年均蒸发量 $1\ 585\ \text{mm}$,年均降水量 $1\ 670\ \text{mm}$ 。

1.2 试验设置

2021 年 1 月在实验地建立 $1.15\ \text{m}$ (长) $\times 0.5\ \text{m}$ (宽)根箱样方,设置种植米槠(*Castanopsis carlesii*, CC)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*, CL)一年生植物幼苗及未种树(NT)处理,并对各根箱进行增温($+4\ ^{\circ}C$, W)和对照(环境温度, CT)处理,每处理 5 个重复,样方依据随机区组分布,30 个样方,样地于 2021 年 11 月开始增温。

植物稳定生长 8 个月后,于 2022 年 7 月,按照五点取样法分别取 $0\sim 10\ \text{cm}$ 表层土壤,测定土壤基本理化性质、土壤 DOM 紫外和荧光光谱。根箱内布设 ECH₂O-5 土壤水分传感器(Decagon, Pullman, WA, 美国)和 T109 温度传感器(Campbell Scientific Inc., Logan, UT, 美国)。取样当天对照土壤温、湿度分

别为 28.33 °C、33.12%，增温组土壤温、湿度分别为 32.98 °C、24.93%，二者均存在显著差异($P<0.05$)。

1.3 样品分析方法

1.3.1 土壤基本理化性质和植物指标的测定 采集土壤样品前，测量各处理树根箱中米楮、杉木的株高、地径以及冠幅。土壤含水率(SWC)采用烘干法测定；利用土钻采集 0~10 cm 深度的土壤，并从中挑出植物根系，清洗后放入 65 °C 烘箱烘至恒重，称其生物量^[17]。使用 pH 计(STARTER 300, OHAUS, 美国)以土水质量比 1:2.5 浸提液测定土壤 pH；使用土壤碳氮元素分析仪和植物碳氮元素分析仪测定土壤全碳含量(Soil-TC)、全氮含量(Soil-TN)、碳氮比(Soil-C:N)和根系总碳含量(Root-TC)、总氮含量(Root-TN)、碳氮比(Root-C:N)；去离子水浸提鲜土(水土质量比 2:1)，在 4 000 r/min 的转速下振荡离心后过 0.45 μm 滤膜得到渗滤液，提取不同树种土壤 DOM，其中可溶性有机碳(Dissolved organic carbon, DOC)用总有机碳分析仪(TOC-VCPH/CPN, 日本)测定^[18]；土壤铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)和硝态氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)用 2 mol/L K_2SO_4 浸提，采用连续流动分析仪(Skalar san++, 荷兰)测定；土壤微生物生物量碳、氮(MBC、MBN)采用改良氯仿熏蒸法($\text{CHCl}_3\text{-K}_2\text{SO}_4$ 提取)，分别用总有机碳分析仪和连续流动分析仪测定^[2]。

1.3.2 土壤 DOM 光谱指标测定 采用紫外-可见光分光光度计(UV-2600, Shimadzu, Tokyo 日本)测定土壤 DOM 吸光度值。SUVA₂₅₄、SUVA₂₆₀、SUVA₂₈₀ 分别为 254、260 和 280 nm 波长的吸光度与 DOC 含量的比值，分别表示 DOM 的芳香化程度、疏水性、相对分子量大小；光谱斜率比值 $S_R(S_{275-295}/S_{350-400})$ 则代表 DOM 的光降解能力，其值越高说明 DOM 光降解性越强^[19-20]。采用荧光光谱仪(F7000, Hitachi, Tokyo 日本)测定 DOM 激发-发射矩阵荧光光谱(Excitation-emission matrix, EEM)。在 Matlab 2018b, 基于 Peaklist 工具箱, 分别计算荧光指数(Fluorescence index, FluI)、新鲜度指数(Freshness index, Frl)、生物源指数(Biological index, BIX)、腐殖化指数(Humification index, HIX)^[21-24]。

1.4 数据处理

使用 MATLAB R2018b, 基于 Peaklist 和 DOMFluor 工具箱对 EEMs 数据集解析, 确定 DOM 可识别的荧光组分及荧光强度 F_{max} ^[24]。使用 SPSS 22.0 和 Rstudio 对数据整理分析、作图。采用双因素方差分析对根箱植物状况、土壤基本理化性质和土壤 DOM 光谱特征进行差异显著性检验。采用 Canoco

5.0 软件将不同树种根箱土壤 DOC 含量和 DOM 光谱特征作为影响因子, 根箱土壤基本理化性质、植物基本状况作为环境因子进行冗余分析(RDA)。采用 R 包 PLS-MS 包构建偏最小二乘模型(PLSR)验证 DOC 质量与土壤植物生化性质的相关性。

2 结果与分析

2.1 不同根箱的植物状况

增温对根箱中米楮、杉木的树高、地径和冠幅均无显著影响(表 1)。比较不同树种, 增温和对照处理中杉木树高、地径和冠幅均显著大于米楮($P<0.05$)。增温显著($P<0.05$)减少了米楮根系生物量和根系 C:N, 且在两种温度处理中, 米楮根系生物量均显著低于杉木。增温显著增加了杉木根系 TC 含量和米楮根系 TN 含量($P<0.05$)。

2.2 不同根箱土壤基本理化性质

增温显著降低了杉木根箱土壤 pH 和米楮根箱土壤含水率(表 1, $P<0.05$)，对 DOC 含量无显著影响；不同树种间 DOC 含量存在显著差异($P<0.05$)。增温前米楮根箱土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量显著高于杉木根箱($P<0.05$)。增温前后, 米楮根箱土壤 DOC 含量均显著低于杉木和未种树处理($P<0.05$)，而杉木、未种树根箱的 DOC 含量无显著差异。增温前米楮根箱土壤 MBC、MBN 含量均高于杉木和未种树根箱, 增温显著降低了米楮根箱土壤 MBC、MBN 含量。增温后杉木根箱 MBC 含量显著提高, 且显著高于米楮、未种树处理($P<0.05$)。增温降低了杉木根箱土壤 TC 含量；增温处理中, 米楮根箱土壤 TN 含量显著低于杉木和未种树处理($P<0.05$)。杉木根箱土壤 C:N 在增温后显著降低；在增温处理中, 未种树处理根箱土壤 C:N 为 12.07, 显著高于米楮和杉木根箱($P<0.05$)。

2.3 不同根箱土壤 DOM 光谱指标

由表 2 可知, 6 种根箱处理土壤 DOM 的 SUVA₂₅₄ <3 , 说明土壤 DOM 主要是亲水性芳香基团^[25-27]。对照温度处理中, 不同树种根箱处理土壤 DOM 的 SUVA₂₅₄、SUVA₂₆₀、SUVA₂₈₀ 无显著差异, 且增温对各根箱土壤 SUVA₂₅₄、SUVA₂₆₀ 和 SUVA₂₈₀ 无显著影响。而增温处理中, 米楮、杉木树种土壤 DOM 的 SUVA₂₅₄、SUVA₂₆₀ 和 SUVA₂₈₀ 均显著高于不种树处理($P<0.05$)，但两种树种根箱土壤间无显著差异。有相关研究认为 $S_R<1$ 时, 表征 DOM 主要为外源(如新近凋落物、土壤腐殖质^[28])； $S_R>1$ 时, 表征 DOM 主要为生物源^[29]。增温对米楮和杉木处理根箱土壤 DOM

表 1 不同根箱的植物生长状况及土壤基本理化性质
Table 1 Plant growth status and soil physicochemical properties in different root boxes

指标	CT			W			T	S	T×S
	CC	CL	NT	CC	CL	NT			
树高(cm)	159.06 ± 21.15 b	252.50 ± 24.75 a	nd	152.56 ± 29.2 b	264.02 ± 41.61 a	nd	ns	**	ns
地径(cm)	2.47 ± 0.56 b	4.58 ± 0.32 a	nd	2.77 ± 0.83 b	4.40 ± 0.4 a	nd	ns	**	ns
冠幅(cm)	131.06 ± 22.56 b	180.93 ± 26.56 a	nd	116.08 ± 33.3 b	194.82 ± 31.57 a	nd	ns	**	ns
根系生物量 (g/m ²)	21.73 ± 5.5 Ab	36.49 ± 12.61 a	nd	9.32 ± 1.3 Bb	39.92 ± 7.19 a	nd	ns	**	*
Root-TC (mg/g)	399.17 ± 26.04 a	369.31 ± 14.49 Bb	nd	404.65 ± 19.83	411.87 ± 19.87 A	nd	*	ns	ns
Root-TN (mg/g)	3.21 ± 0.62 Bb	6.40 ± 1.49 a	nd	5.10 ± 0.55 Ab	6.74 ± 1.1 a	nd	*	**	ns
Root-C : N	127.2 ± 19.46 Aa	61.42 ± 16.35 b	nd	79.73 ± 5.46 B	62.32 ± 9.86	nd	**	**	**
pH	7.41 ± 0.24 b	7.62 ± 0.09 Aa	7.78 ± 0.06 a	7.43 ± 0.17 b	7.41 ± 0.15 Bb	7.82 ± 0.05 a	ns	**	ns
SWC(%)	19.03 ± 2.31 Aa	14.32 ± 3.06 b	15.06 ± 2.94 ab	15.36 ± 2.74 B	14.22 ± 1.96	12.45 ± 0.77	*	*	ns
NO ₃ ⁻ -N(mg/kg)	5.45 ± 2.36 a	2.81 ± 0.44 b	6.56 ± 1.12 a	4.01 ± 0.69 b	2.93 ± 0.35 b	7.33 ± 1.74 a	ns	**	ns
NH ₄ ⁺ -N(mg/kg)	0.81 ± 0.28 a	0.58 ± 0.11 ab	0.45 ± 0.01 b	0.86 ± 0.32 a	0.73 ± 0.09 ab	0.47 ± 0.03 b	ns	**	ns
DOC(mg/kg)	50.26 ± 3.61 b	54.99 ± 2.66 a	55.52 ± 2.10 a	51.09 ± 2.61 b	54.85 ± 1.57 a	55.08 ± 3.31 a	ns	**	ns
MBC(mg/kg)	189.13 ± 49.09 Aa	110.91 ± 32.69 Bb	85.60 ± 0 b	112.38 ± 12.49 Bb	182.68 ± 18.63 Aa	81.98 ± 7.31 b	**	**	**
MBN(mg/kg)	18.55 ± 4.54 Aa	4.61 ± 2.13 Bc	15.24 ± 2.74 Ab	5.15 ± 1.54 Bb	8.64 ± 3.01 Aab	10.03 ± 0.4 Ba	**	*	**
Soil-TC (mg/g)	12.59 ± 1.00 b	14.26 ± 1.16 Aa	15.55 ± 0.95 Ba	12.91 ± 0.93 b	12.8 ± 0.71 Bb	16.42 ± 0.95 Aa	ns	**	ns
Soil-TN (mg/g)	1.29 ± 0.04	1.35 ± 0.05	1.36 ± 0.03	1.24 ± 0.04 b	1.34 ± 0.12 a	1.36 ± 0.01 a	ns	**	ns
Soil-C : N	9.77 ± 0.55 b	10.53 ± 0.56 Aab	11.39 ± 0.52 a	10.45 ± 0.99 b	9.58 ± 0.49 Bb	12.07 ± 0.65 a	ns	**	*

注: CC, 米楮; CL, 杉木; NT, 未种树处理; CT, 对照处理(环境温度); W, 增温(+4 ℃)处理; Root-TC, 根总碳; Root-TN, 根总氮; Root-C : N, 根系碳氮比; SWC, 土壤含水率; DOC, 可溶性有机碳; MBC, 微生物生物量碳; MBN, 微生物生物量氮; Soil-TC, 土壤全碳; Soil-TN, 土壤全氮; Soil-C : N, 土壤碳氮比。nd, 无数据; T, 温度处理; S, 树种; ns, $P>0.05$; *, $P<0.05$; **, $P<0.01$; 表中数据为平均值 ± 标准差($n = 5$); 同行大写字母不同表示同一根箱树种不同温度处理间差异显著($P<0.05$), 小写字母不同表示同一温度不同根箱树种间差异显著($P<0.05$)。下同。

表 2 不同根箱土壤 DOM 紫外、二维荧光光谱指标
Table 2 UV-vis and 2D fluorescence spectral indicators of soil DOM in different root boxes

指标	CT			W			T	S	T×S
	CC	CL	NT	CC	CL	NT			
SUVA ₂₅₄	0.10 ± 0.02	0.09 ± 0.03	0.07 ± 0.04	0.09 ± 0.01 a	0.09 ± 0.02 a	0.04 ± 0.00 b	ns	**	ns
SUVA ₂₆₀	0.09 ± 0.02	0.08 ± 0.03	0.07 ± 0.04	0.08 ± 0.01 a	0.08 ± 0.02 a	0.04 ± 0.00 b	ns	**	ns
SUVA ₂₈₀	0.08 ± 0.02	0.06 ± 0.02	0.05 ± 0.04	0.07 ± 0.01 a	0.07 ± 0.02 a	0.03 ± 0.00 b	ns	**	ns
S _R	1.06 ± 0.14	1.17 ± 0.16	1.08 ± 0.51 A	1.08 ± 0.27 a	1.00 ± 0.06 a	0.57 ± 0.05 Bb	*	ns	ns
FluI	2.35 ± 0.04 B	2.43 ± 0.11 B	2.42 ± 0.00	2.45 ± 0.06 A	2.50 ± 0.12 A	2.45 ± 0.04	*	ns	ns
Frl	0.76 ± 0.00	0.75 ± 0.05	0.73 ± 0.00	0.75 ± 0.02	0.75 ± 0.03	0.77 ± 0.04	ns	ns	ns
BIX	0.78 ± 0.02	0.78 ± 0.06	0.75 ± 0.00	0.79 ± 0.03	0.77 ± 0.04	0.81 ± 0.03	ns	ns	ns
HIX	0.62 ± 0.10	0.60 ± 0.14	0.61 ± 0.10	0.67 ± 0.08	0.61 ± 0.10	0.62 ± 0.08	ns	ns	ns

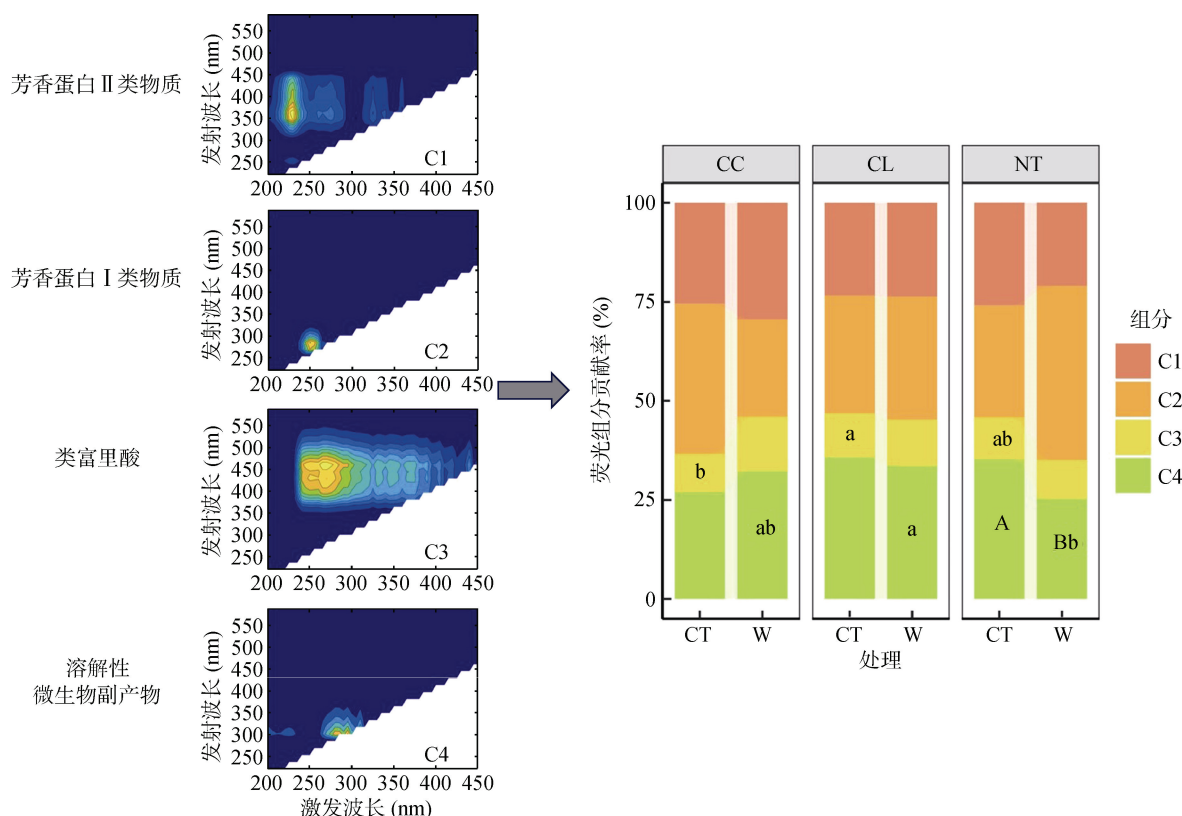
注: SUVA₂₅₄, 芳香化指数; SUVA₂₆₀, 疏水指数; SUVA₂₈₀, 相对分子量大小; S_R, 光谱斜率; FluI, 荧光指数; Frl, 新鲜度指数; BIX, 生物源指数; HIX, 腐殖化指数。

的 S_R 值无显著影响, 且均大于 1; 但显著降低了未种树根箱土壤 DOM 的 S_R 值($P<0.05$), 且增温后 S_R < 1。说明米楮、杉木根箱表层土壤 DOM 生物源特征明显, 而增温环境下未种树根箱土壤 DOM 的生物源特征和光降解性减小, 复杂程度增加。增温显著增加

了米楮、杉木根箱土壤 DOM 的 FluI 指数($P<0.05$), 其中两树种根箱土壤的 FluI 荧光指数均大于 2, 表明根箱土壤增温后, 土壤 DOM 的微生物来源显著增高^[30-31]。此外, 温度和树种对 DOM 的 Frl、BIX 和 HIX 指数均无显著影响。

土壤 DOM 主要由 4 种荧光组分组成(图 1)。荧光组分 1(C1)的激发波长在 230 nm 处,发射波长在 360 nm 处,代表了 DOM 中的芳香蛋白 II 类物质。荧光组分 2(C2)的激发波长在 250 nm 处,发射波长在 290 nm 处,代表了 DOM 中芳香蛋白 I 类物质。荧光组分 3(C3)的激发波长在 280 nm 处,发射波长峰值在 450 nm 处,代表 DOM 中的类富里酸。荧光组分 4(C4)的激发波长在 280 nm 处,发射波长 310 nm 处,代表了 DOM 中的溶解性微生物副产物,即微生物产生的酪氨酸物质^[32]。从整体上看,种树与未种树处理的根箱土壤 DOM 的 C1、C2、C4 组分的贡献

率较高,即 DOM 的荧光组分中以芳香蛋白 II 类物质、芳香蛋白 I 类物质和溶解性微生物副产物对 DOM 荧光组分的贡献多于类富里酸。对照温度下种树与未种树根箱中, C3 组分对杉木根箱土壤 DOM 荧光组分贡献最大($13.68\% \pm 1.4\%$),未种数根箱次之($11.08\% \pm 2.39\%$),米楮根箱最小。在增温处理中, C4 组分在杉木根箱土壤 DOM 的相对贡献率($35.28\% \pm 4.2\%$)显著高于未种树根箱($P < 0.05$)。温度对米楮和杉木根箱土壤 DOM 的 4 种荧光组分贡献率无显著影响,但增温显著降低了未种树根箱土壤 DOM 的 C4 组分贡献率($P < 0.05$)。



(C1 为芳香蛋白 II 类物质, C2 为芳香蛋白 I 类物质, C3 为类富里酸, C4 为溶解性微生物副产物); 图中大写字母不同表示同一根箱不同温度处理间差异显著($P < 0.05$), 小写字母不同表示同一温度不同根箱树种间差异显著($P < 0.05$)

图 1 不同处理土壤 DOM 荧光组分图

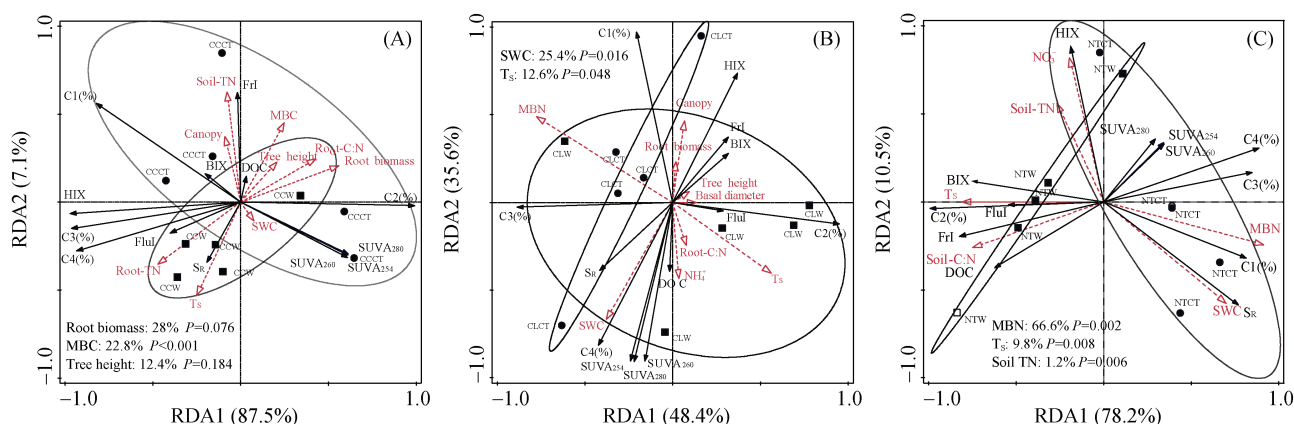
Fig. 1 Fluorescence component diagram of soil DOM under different treatments

2.4 土壤 DOC 含量和 DOM 光谱特征与土壤理化性质的冗余分析

将不同根箱土壤基本理化性质、植物生长状况作为解释变量与土壤 DOC 含量和 DOM 光谱指标、荧光组分相对贡献率进行冗余分析。结果表明, 米楮根箱中第一标准轴(RDA1)和第二标准轴(RDA2)分别解释了 DOM 各变量变化的 87.5% 和 7.1%(图 2A)。根系生物量、MBC、树高对 DOC 含量和 DOM 光谱特征变化的解释变量度分别达到 28%、22.8% 和

12.4%。其中 MBC 与 DOC 含量、Frl 指数呈极显著正相关($P < 0.05$), 而与 C4 组分相对贡献率、FluI 指数变化呈极显著负相关($P < 0.01$)。

在杉木根箱中, RDA1 和 RDA2 分别解释因变量变化的 48.4% 和 35.6%, 其中土壤含水率和土壤温度对 DOC 含量和 DOM 光谱特征变化的解释量分别为 25.4%、12.6%(图 2B)。其中 DOC 含量变化、C4 组分相对贡献率以及 S_r 与 SWC 呈明显正相关关系, FluI 指数与温度呈显著正相关($P < 0.05$)。



(A): 米楮根箱; B: 杉木根箱; C: 未种树根箱; CCCT: 对照(不增温)米楮根箱处理; CCW: 增温米楮根箱处理; CLCT: 对照(不增温)杉木根箱处理; CLW: 增温杉木根箱处理; NTCT: 对照(不增温)未种树根箱处理; NTW: 增温未种树根箱处理。TS: 土壤温度; Root biomass: 根生物量; Tree height: 树高; Basal diameter: 地径; Canopy: 冠幅)

图 2 根箱土壤 DOC 含量以及 DOM 光谱学特征与环境因子的冗余分析

Fig. 2 Redundancy analysis of soil DOC concentrations and spectroscopy characteristics with environment factors in different root boxes

根据图 2C 可知, 未种树根箱第一标准轴(RDA1)和第二标准轴(RDA2)分别解释因变量变化的 78.2% 和 10.5%。MBN 和土壤温度是影响 DOC 含量和 DOM 光谱特征变化的重要因素($P < 0.01$)。土壤 DOC 含量变化与 MBN 呈极显著负相关关系($P < 0.01$)。土壤 Flul 指数变化则与土壤温度呈极显著正相关关系($P < 0.01$)。

2.5 增温对不同根箱土壤 DOC 含量和 DOM 光谱特征影响的结构方程模型

由图 3 所示, 结构方程模型分别解释了温度对米楮、杉木和未种树根箱土壤 DOM 光谱特征总方差的 46.55%, 58.47% 和 69.48%。由图 3A 可知, 增温对米楮植物地下生物量有极显著正向影响($P < 0.01$), 其路径系数 β 为 0.856 4, 而温度对土壤基本理化性质有极显著负向影响($\beta = -0.856 3$, $P < 0.01$)。地下生物量和土壤基本理化性质对 DOM 光谱特征有显著正向影响, 相关路径系数为 1.160 6(地下生物量) > 0.535 4(土壤性质), 温度和植物地上生物量则是负向影响, 其相关效应分别是 -0.203 6 和 -0.251 5。在杉木根箱中, 温度、植物地上生物量和土壤基本理化性质对土壤 DOM 光谱特征均呈负向的影响, 相关路径系数分别是 -0.251 6, -0.156 4 和 -0.552 7。而温度对植物地下生物量呈极显著正向影响($\beta = 0.8712$, $P < 0.01$, 图 3B)

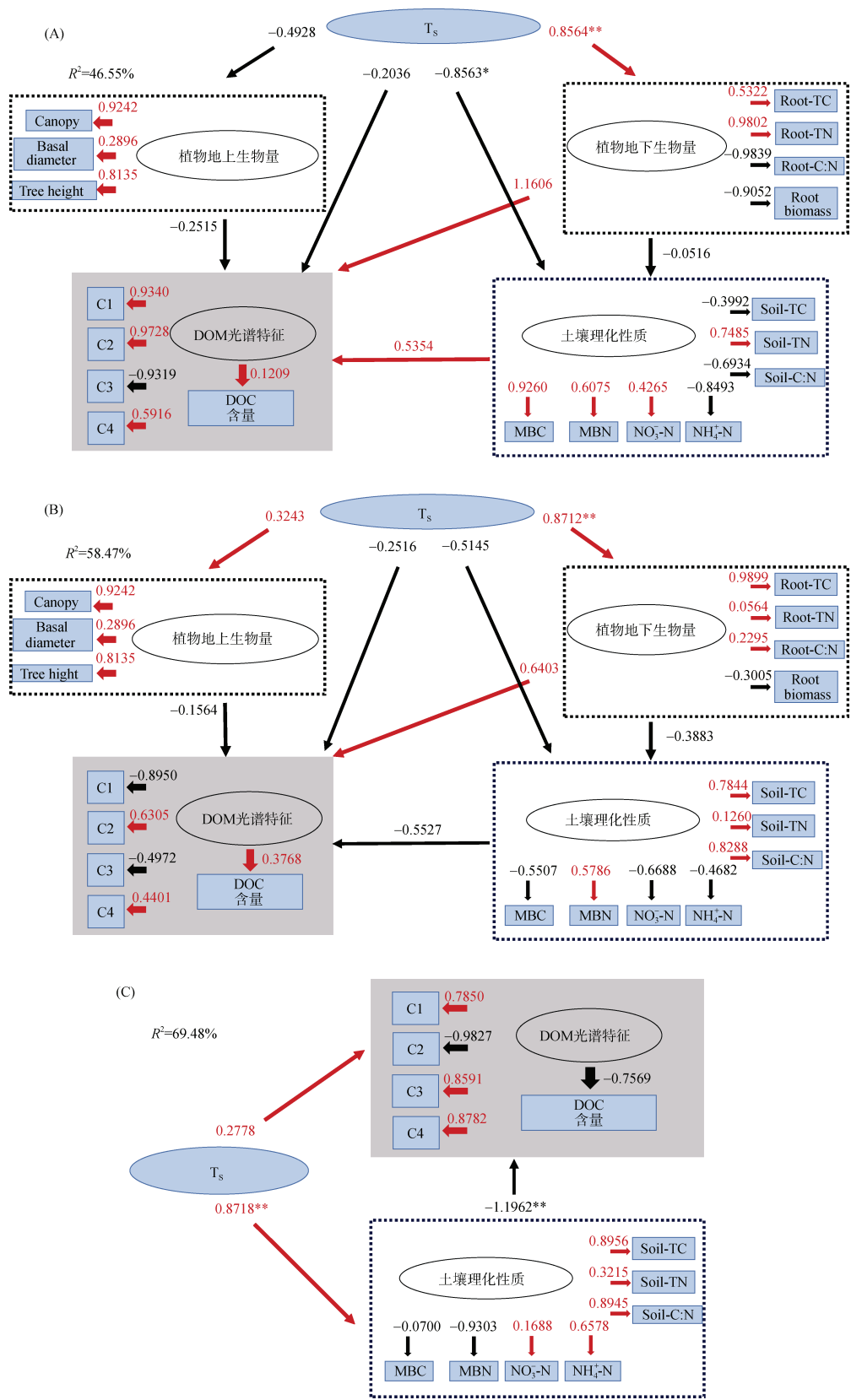
由图 3C 可知, 未种树根箱处理中, 温度对土壤理化性质、DOC 含量均是正向影响, 且温度对土壤理化性质正向影响极显著($\beta = 0.871 8$, $P < 0.01$)。土壤理化性质对土壤 DOC 含量、DOM 的 C2 组分有极显著负向影响($P < 0.01$)。

3 讨论

3.1 增温对种植不同树种土壤 DOC 含量和 DOM 光谱特征的影响

温度是影响土壤生物地球化学循环过程的重要环境因素之一。Liu 等^[32]研究认为增温对凋落物分解有促进作用, 进而提高土壤表层 DOC 含量。本研究中增温对种植不同树种根箱土壤 DOC 含量无显著影响, 可能是由于土壤 DOC 产生和降解之间存在相对平衡, 故 DOC 含量无显著变化^[33]; 也可能是因为增温加速植物增长, 进而促进其对土壤表层 DOC 等的吸收利用, 抵消了增长的那部分 DOC^[34]。本研究中, 增温只显著增加了不同根箱土壤 DOM 的荧光指数, 提高了 DOM 中溶解性微生物副产物组分, 说明增温环境下微生物活性提高, 大量难分解有机物被微生物分解^[34], 进而使米楮、杉木根箱土壤 DOM 的微生物代谢来源显著提高。与米楮、杉木不同, 增温后未种树根箱土壤 DOM 中溶解性微生物副产物组分相对贡献率以及光降解性显著降低, 这可能是因为未种树根箱土壤微生物量较少、微生物活性较弱, 增温使得土壤微生物活动减少, 故溶解性微生物副产物减少, 也可能是因为增温后土壤含水率的降低导致微生物对 DOM 中相对分子量较大化合物的利用受阻, 而转向对小分子量物质的分解, 故根箱土壤中 DOM 复杂程度增加^[35]。

本研究发现, 土壤 DOC 含量和 DOM 光谱特征在不同树种间有显著差异。两种温度处理中, 杉木(针叶树种)和未种树根箱土壤 DOC 含量均显著高于米楮(阔叶树种), 这与前人研究得出的阔叶林土壤 DOC



(A: 米楮根箱; B: 杉木根箱; C: 未种树根箱; 图中红色箭头表示因素间正向作用, 黑色箭头表示因素间负向作用。*、**分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ (双尾)显著; T_s : 土壤温度; Root biomass: 根生物量; Tree height: 树高; Basal diameter: 地径; Canopy: 冠幅)

图 3 增温对不同根箱土壤 DOC 含量和 DOM 光谱特征影响的结构方程模型

Fig. 3 Structural equation model of warming effects on soil DOC concentration and DOM spectral characteristics in different root boxes

含量通常低于针叶林土壤的结果^[36]一致。一方面可能是杉木树种凋落物分解速度较慢,凋落物层厚^[37],入渗水与有机物接触时间更长,从而使有机分子溶解为 DOC 的可能性增大,从而加速 DOC 的释放^[38]。也可能是由于杉木和米楮植物根系在土层中分布特点不同,对土壤 C 分解和利用效率差异导致。米楮根箱中细根主要分布于土壤表层,这引起表层土壤 DOC 的产出可能优先被微生物群落利用,而杉木细根在土壤垂直深度上均有分布,这有助于更深层土壤 C 分解,故造成两树种土壤 DOC 含量有显著差异^[39]。与张雅婷等^[40]研究结果不同,本研究中增温前后未种树根箱土壤 DOC 含量均为最高,可能是因为未种树根箱中没有因植物快速生长对养分的需求导致的土壤 DOC 的利用,且微生物矿化作用相比种树根箱较弱,故土壤 DOC 含量保持稳定且不易被消耗,也有可能是因为 DOC 未随植物根系从表层向下生长^[41],从而导致表层土壤(0~10 cm)中 DOC 含量高于米楮、杉木两种根箱。增温处理中,种树根箱(米楮、杉木)土壤 DOM 的紫外指数(SUVA₂₅₄、SUVA₂₆₀、SUVA₂₈₀)以及 S_R 均显著高于未种树根箱,表明种树根箱土壤 DOM 具有更强的植物源特征和生物降解性,DOM 中小分子量亲水性化合物易于被土壤中微生物利用,芳香蛋白类物质较多,且 DOM 的光降解性随芳香性增加而增加^[42]。而未种树根箱土壤活性较差^[39],DOM 结构较为复杂。与高颖等^[43]的研究相似,不同树种土壤 DOM 的紫外指数以杉木树种最高,说明杉木土壤 DOM 中含有更多芳香性和多酚化合物等亲水性芳香物质,这部分有机质不易被微生物所降解,这也与杉木叶片在土壤表层分解有关^[44-45]。在对照温度中,杉木根箱土壤 DOM 的 C3 组分即类富里酸显著高于米楮树种,说明杉木根箱土壤在正常条件下,土壤表层有机质分解慢于米楮树种,土壤 DOM 含有更多的包括弱脂肪和芳香族有机酸混合物的大分子量腐殖化物质^[46]。增温后,有种树(米楮、杉木)根箱土壤 DOM 的 C4 组分即溶解性微生物副产物的相对贡献率均高于未种树根箱,可能是因为树根箱内植物根际过程对土壤微生物、养分有富集效应^[47],进而增加了 DOM 溶解性微生物副产物的相对贡献率。

3.2 增温对种植不同树种土壤 DOC 含量和 DOM 光谱特征影响的潜在机制

为了进一步探究增温和树种对 DOC 含量和光谱特征的影响,本研究通过冗余分析以及结构方程模型的构建,表征土壤 DOC 含量和光谱特征与土壤基本理化性质、植物地上(下)生物量等环境因子的相关性。

冗余分析发现,米楮根箱土壤中 DOC 和 MBC 呈强正相关关系,可能是米楮根箱根系及其分泌物较多,土壤中 DOC 被微生物快速分解利用,表层土壤 MBC 也随之增加^[34]。此外,米楮根箱土壤 DOC 也受地下根系生物量显著影响,根系生物量增加的同时与特定微生物群落结合,生成的根系分泌物,不仅刺激了微生物的活动和微生物对养分的需求,也为土壤有机碳提供重要来源^[48]。杉木根箱中,DOC 含量随土壤含水率的减少而降低,这可能是由于增温后土壤含水率的降低抑制了土壤微生物活性,因而可能削弱增温对土壤微生物分解有机质释放 DOC 的促进效应^[49]。杉木根箱土壤 DOM 芳香性随土壤含水率的减少而降低,这可能是由于土壤含水率降低会影响土壤颗粒和胶体的组成,阻碍 DOM 中芳香性物质成分聚集^[50],而类富里酸相对贡献率(C3)、光降解性与温度呈负相关,说明增温后杉木根箱土壤 DOM 以小分子易分解物质为主^[51],腐殖化来源占比减少。有研究认为土壤 C:N 是土壤微生物群落组成的主要影响因素,未种树根箱土壤中 DOC 含量与土壤 C:N 相关性较高,且土壤 C:N 显著高于米楮、杉木根箱,加大了对土壤真菌群落的 C 分配^[52],也因此促进微生物代谢,提高根箱土壤 DOC 含量。

对不同根箱处理土壤 DOM 的光谱特征影响因素构建结构方程模型发现,温度对米楮根箱土壤性质产生显著负向影响,对地下生物量产生极显著的正向影响($P<0.01$),二者均对土壤光谱特征起正向作用。其中根系 TC、TN 与米楮根箱土壤 DOC 含量呈正相关关系,增温促进根系周围 N 的释放^[53],根系 TN 随温度的升高而显著增加,而根系 C、N 养分的增加、C:N 的减少一定程度减少微生物活动受养分的限制程度,从而增加微生物活性,表现出对 DOC 含量的正向作用,促进表层土 DOC 的释放,提高了 DOM 的微生物来源贡献度(C4)^[54]。而根系生物量随增温而显著减少,可能是因为增温引起的水分胁迫抑制根系生长,减少米楮细根生物量,进而减少根系微生物对根源活性碳的利用^[55],体现对 DOM 腐殖酸组分 C3 占比的负向影响。同时增温对土壤 C:N 起负向作用,从而使土壤腐殖化产物减少^[51],因而对 C3 组分相对贡献率有负向影响,此外增温对土壤 TN、NO₃⁻-N 以及 MBC、MBN 起正向作用,以此满足微生物对养分的需求,进而表现出对 DOC 含量的正向影响。

增温正向作用于杉木根系 TC、TN、C:N 以及土壤中 MBN 含量,加速根系生长,为微生物提供养分,促进微生物活动^[56],因此表现出对 C2、C4 组分

贡献率及 DOC 含量的正向作用。增温通过抑制土壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、MBC 含量, 对 DOC 含量起负向作用, 这是由于增温使微生物周转速度加快, 加速易降解底物的消耗, 进而使土壤微生物在较高温度下受到更强的养分限制^[57]。未种树根箱中, 增温对土壤理化性质有极显著正向作用($P<0.01$), 土壤理化性质对 DOC 含量呈极显著负向作用($P<0.01$), 其中 DOC 含量随 MBN 含量的减少而降低, 可能是因为升温幅度较大($+4\text{ }^\circ\text{C}$), 不耐高温的微生物数量减少、活性降低^[56], 一定程度上抑制 DOC 含量的提高。

4 结论

1) 增温促进种树(米楮、杉木)根箱表层土壤微生物活动, 从而提高了 DOM 中微生物代谢来源的组分, 降低其复杂程度; 但增温抑制未种树根箱表层土壤微生物活性, 使其复杂程度变高。

2) 不同树种土壤 DOC 含量存在差异, 其中未种树根箱中 DOC 含量最高。由于本研究只初步探讨短期增温对种植不同树种表层土壤 DOM 性质的影响, 未来需结合土壤 DOM 来源和微生物群落等因素深入开展不同土层 DOM 的研究, 以促进对气候变暖背景下土壤生物地球化学循环的理解。

参考文献:

- [1] Bi R, Lu Q, Yuan T, et al. Electrochemical and spectroscopic characteristics of dissolved organic matter in a forest soil profile[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2013, 25(10): 2093–2101.
- [2] 王海珍. 不同菌根树种土壤渗滤液 DOC 通量和光谱特征对短期增温的响应[D]. 福州: 福建师范大学, 2023.
- [3] Kiikkilä O, Kitunen V, Smolander A. Dissolved soil organic matter from surface organic horizons under birch and conifers: Degradation in relation to chemical characteristics[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(4): 737–746.
- [4] Ye Q H, Wang Y H, Zhang Z T, et al. Dissolved organic matter characteristics in soils of tropical legume and non-legume tree plantations[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, 148: 107880.
- [5] Smolander A, Kitunen V. Comparison of tree species effects on microbial C and N transformations and dissolved organic matter properties in the organic layer of boreal forests[J]. *Applied Soil Ecology*, 2011, 49: 224–233.
- [6] Feghel T S, Boot C M, Covino T P, et al. Amount and reactivity of dissolved organic matter export are affected by land cover change from old-growth to second-growth forests in headwater ecosystems[J]. *Hydrological Processes*, 2021, 35(8): e14343.
- [7] MacDonald N W, Randlett D L, Zak D R. Soil warming and carbon loss from a lake states spodosol[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1999, 63(1): 211–218.
- [8] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world[J]. *European Journal of Soil Science*, 2014, 65(1): 10–21.
- [9] Liechty H O, Kuuseoks E, Mroz G D. Dissolved organic carbon in northern hardwood stands with differing acidic inputs and temperature regimes[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1995, 24(5): 927–933.
- [10] Fouché J, Christiansen C T, Lafrenière M J, et al. Canadian permafrost stores large pools of ammonium and optically distinct dissolved organic matter[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 4500.
- [11] Fröberg M, Grip H, Tipping E, et al. Long-term effects of experimental fertilization and soil warming on dissolved organic matter leaching from a spruce forest in Northern Sweden[J]. *Geoderma*, 2013, 200: 172–179.
- [12] Wang H C, Chou C Y, Chiou C R, et al. Humic acid composition and characteristics of soil organic matter in relation to the elevation gradient of moso bamboo plantations[J]. *PLoS One*, 2016, 11(9): e0162193.
- [13] Toosi E R, Schmidt J P, Castellano M J. Land use and hydrologic flowpaths interact to affect dissolved organic matter and nitrate dynamics[J]. *Biogeochemistry*, 2014, 120(1): 89–104.
- [14] Nguyen H V M, Choi J H. Changes in the dissolved organic matter leaching from soil under severe temperature and N-deposition[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015, 187(6): 323.
- [15] Kalbitz K, Schmerwitz J, Schwesig D, et al. Biodegradation of soil-derived dissolved organic matter as related to its properties[J]. *Geoderma*, 2003, 113(3/4): 273–291.
- [16] Guo R H, Zheng J Q, Han S J, et al. Carbon and nitrogen turnover in response to warming and nitrogen addition during early stages of forest litter decomposition—An incubation experiment[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2013, 13(2): 312–324.
- [17] 马亚培. 氮沉降背景下生物炭施用对土壤可溶性有机质和微生物组成的影响[D]. 福州: 福建师范大学, 2021.
- [18] 程蕾, 林开森, 周嘉聪, 等. 氮沉降对毛竹林土壤可溶性有机质数量与光谱学特征的影响[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(5): 1754–1762.
- [19] Moran M A, Sheldon Jr W M, Zepp R G. Carbon loss and optical property changes during long-term photochemical and biological degradation of estuarine dissolved organic matter[J]. *Limnology and Oceanography*, 2000, 45(6): 1254–1264.
- [20] Helms J R, Stubbins A, Ritchie J D, et al. Absorption spectral slopes and slope ratios as indicators of molecular weight, source, and photobleaching of chromophoric dissolved organic matter[J]. *Limnology and Oceanography*, 2008, 53(3): 955–969.
- [21] McKnight D M, Boyer E W, Westerhoff P K, et al. Spectrofluorometric characterization of dissolved organic matter for indication of precursor organic material and

- aromaticity[J]. *Limnology and Oceanography*, 2001, 46(1): 38–48.
- [22] Huguet A, Vacher L, Relexans S, et al. Properties of fluorescent dissolved organic matter in the Gironde Estuary[J]. *Organic Geochemistry*, 2009, 40(6): 706–719.
- [23] Wilson H F, Xenopoulos M A. Effects of agricultural land use on the composition of fluvial dissolved organic matter[J]. *Nature Geoscience*, 2009, 2: 37–41.
- [24] Stedmon C A, Bro R. Characterizing dissolved organic matter fluorescence with parallel factor analysis: A tutorial[J]. *Limnology and Oceanography: Methods*, 2008, 6(11): 572–579.
- [25] 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 & Technology*, 2003, 37(20): 4702–4708.
- [26] Yuan X C, Si Y T, Lin W S, et al. Effects of short-term warming and nitrogen addition on the quantity and quality of dissolved organic matter in a subtropical *Cunninghamia lanceolata* plantation[J]. *PLoS One*, 2018, 13(1): e0191403.
- [27] Wang H, Holden J, Zhang Z J, et al. Concentration dynamics and biodegradability of dissolved organic matter in wetland soils subjected to experimental warming[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 470: 907–916.
- [28] 杨玉盛, 郭剑芬, 陈光水, 等. 森林生态系统 DOM 的来源、特性及流动[J]. *生态学报*, 2003, 23(3): 547–558.
- [29] Zhou Y Q, Zhang Y L, Shi K, et al. Dynamics of chromophoric dissolved organic matter influenced by hydrological conditions in a large, shallow, and eutrophic lake in China[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2015, 22(17): 12992–13003.
- [30] 李帅东, 姜泉良, 黎烨, 等. 环滇池土壤溶解性有机质 (DOM) 的光谱特征及来源分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2017, 37(5): 1448–1454.
- [31] Inamdar S, Finger N, Singh S, et al. Dissolved organic matter (DOM) concentration and quality in a forested mid-Atlantic watershed, USA[J]. *Biogeochemistry*, 2012, 108(1): 55–76.
- [32] Liu J X, Liu S G, Li Y Y, et al. Warming effects on the decomposition of two litter species in model subtropical forests[J]. *Plant and Soil*, 2017, 420(1): 277–287.
- [33] Hagedorn F, Martin M, Rixen C, et al. Short-term responses of ecosystem carbon fluxes to experimental soil warming at the Swiss alpine treeline[J]. *Biogeochemistry*, 2010, 97(1): 7–19.
- [34] 元晓春, 陈岳民, 袁硕, 等. 氮沉降对杉木人工幼林土壤溶液可溶性有机物质浓度及光谱学特征的影响[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(1): 1–11.
- [35] 郑小东, 陈香碧, 胡亚军, 等. 亚热带典型地貌下旱地和水田可溶性有机物化学组成特征[J]. *土壤*, 2019, 51(6): 1114–1121.
- [36] 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): 988–995.
- [37] Camino-Serrano M, Gielen B, Luyssaert S, et al. Linking variability in soil solution dissolved organic carbon to climate, soil type, and vegetation type[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2014, 28(5): 497–509.
- [38] Jiang J, Wang Y P, Yu M X, et al. Responses of soil buffering capacity to acid treatment in three typical subtropical forests[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 563: 1068–1077.
- [39] Förster A, Hertel D, Werner R, et al. Belowground consequences of converting broadleaf to conifer forest: Comparing the fine root systems of European beech and Scots pine[J]. *Forest Ecology and Management*, 2021, 496: 119457.
- [40] 张雅婷, 郑裕雄, 杨智杰, 等. 不同林龄杉木人工林根际与非根际土可溶性有机碳的差异[J]. *亚热带资源与环境学报*, 2023, 18(1): 48–55.
- [41] 白皓宇, 杨智杰, 郑永, 等. 增温对亚热带森林土壤可浸提有机碳的影响[J]. *生态学杂志*, 2020, 39(5): 1436–1444.
- [42] Van Stan J T, Stubbins A. Tree - DOM: Dissolved organic matter in throughfall and stemflow[J]. *Limnology and Oceanography Letters*, 2018, 3(3): 199–214.
- [43] 高颖, 鲍勇, 胡伟芳, 等. 亚热带地区 3 种典型林分土壤 DOM 数量及光谱特征[J]. *亚热带资源与环境学报*, 2018, 13(1): 26–35.
- [44] 高颖. 亚热带地区森林转换背景下不同林分土壤 DOM 化学结构及其生物降解性[D]. 福州: 福建师范大学, 2018.
- [45] Ding Y D, Xie X Y, Ji J H, et al. Tree mycorrhizal effect on litter-leached DOC amounts and biodegradation is highly dependent on leaf habits in subtropical forests of Southern China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2021, 21(11): 3572–3579.
- [46] Kalbitz K, Solinger S, Park J H, et al. Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: A review[J]. *Soil Science*, 2000, 165(4): 277–304.
- [47] 马源, 李林芝, 张德罡, 等. 退化高寒草甸优势植物根际与非根际土壤养分及微生物量的分布特征[J]. *草地学报*, 2019, 27(4): 797–804.
- [48] Finzi A C, Abramoff R Z, Spiller K S, et al. Rhizosphere processes are quantitatively important components of terrestrial carbon and nutrient cycles[J]. *Global Change Biology*, 2015, 21(5): 2082–2094.
- [49] 张宇辉, 陈娟, 胥超, 等. 增温对亚热带格氏栲天然林凋落物可溶性有机质数量和结构的影响[J]. *应用生态学报*, 2023, 34(4): 946–954.
- [50] Tiefenbacher A, Weigelhofer G, Klik A, et al. Antecedent soil moisture and rain intensity control pathways and quality of organic carbon exports from arable land[J]. *CATENA*, 2021, 202: 105297.
- [51] 袁硕. 增温对亚热带常绿阔叶林土壤可溶性有机物数量与组成的影响[D]. 福州: 福建师范大学, 2018.

- [52] Högberg M N, Högberg P, Myrold D D. Is microbial community composition in boreal forest soils determined by pH, C-to-N ratio, the trees, or all three?[J]. *Oecologia*, 2007, 150(4): 590–601.
- [53] 王小南, 熊德成, 张宇辉, 等. 增温和氮添加对中亚热带杉木人工林土壤氮矿化和 N_2O 排放的影响[J]. *林业科学研究*, 2023, 36(3): 22–31.
- [54] Miano T M, Senesi N. Synchronous excitation fluorescence spectroscopy applied to soil humic substances chemistry[J]. *Science of the Total Environment*, 1992, 117: 41–51.
- [55] 魏春雪, 杨璐, 汪金松, 等. 实验增温对陆地生态系统根系生物量的影响[J]. *植物生态学报*, 2021, 45(11): 1203–1212.
- [56] 梁百艳. 松嫩草地在模拟增温和氮沉降前后土壤微生物生物量对比研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2013.
- [57] 陈滢伊. 模拟增温和氮沉降对亚热带杉木幼林土壤可溶性有机质与微生物群落结构的影响[D]. 福州: 福建师范大学, 2019.