植物生态学报 2024, **48** (9): 1232-1242 DOI: 10.17521/cjpe.2023.0272
Chinese Journal of Plant Ecology http://www.plant-ecology.com

增温和氮磷添加对亚热带森林凋落物溶解有机碳生物可降解性的影响

冉佳鑫 张宇辉 王 云 杨智杰 毛 超*

福建师范大学地理科学学院, 福州 350117; 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

摘 要 凋落物源溶解有机碳(DOC)是森林土壤DOC的重要来源, 其生物降解性的大小会影响土壤有机碳的固定和损失。关注气候变暖、氮磷养分输入量增加等因子对DOC生物降解性的影响, 有助于深入理解全球变化背景下森林土壤有机碳的形成和稳定。该研究依托亚热带常绿阔叶林野外增温实验平台, 以分解0天(未分解)和180天(分解中后期)的格氏栲(*Castanopsis kawakamii*)的叶片凋落物为研究对象, 探究增温和氮磷添加及其交互作用对不同分解阶段的凋落物源DOC生物可降解性(BDOC)及相应的光谱指标变化量(ΔDOC光谱指标)的影响。结果表明: (1)凋落物BDOC随凋落物分解逐渐降低, 分解中后期较未分解阶段减少了22.6%。(2)增温显著提高未分解凋落物的BDOC, 但未显著影响分解中后期的BDOC。同时, 增温也显著增加了未分解阶段的ΔDOC光谱指标, 且未显著影响分解中后期的ΔDOC光谱指标。(3)氮添加显著降低了未分解阶段的BDOC, 但提高了分解中后期的BDOC。与BDOC不同, 氮添加均未显著影响两个分解阶段的ΔDOC光谱指标。(4)磷添加不仅显著提高未分解和分解中后期凋落物BDOC, 也显著增加了两个阶段的ΔDOC光谱指标。(5)增温和氮磷添加对凋落物BDOC和ΔDOC光谱指标均存在显著交互作用。总之, 增温和磷添加均会加速未分解凋落物源DOC的降解, 而分解中后期凋落物源DOC的降解主要受氮磷养分含量的影响。

关键词 增温; 氮添加; 磷添加; 亚热带森林; 凋落物; 溶解有机碳生物可降解性; 格氏栲

冉佳鑫, 张宇辉, 王云, 杨智杰, 毛超 (2024). 增温和氮磷添加对亚热带森林凋落物溶解有机碳生物可降解性的影响. 植物生态学报, 48, 1232-1242. DOI: 10.17521/cjpe.2023.0272

Effects of warming and nitrogen and phosphorus addition on dissolved organic carbon biodegradability of litter in a subtropical forest

RAN Jia-Xin, ZHANG Yu-Hui, WANG Yun, YANG Zhi-Jie, and MAO Chao*

School of Geographical Science, Fujian Normal University, Fuzhou 350117, China; and Sanming Forest Ecosystem National Observation and Research Station, Sanming, Fujian 365002, China

Abstract

Aims The biodegradability of dissolved organic carbon (DOC) is crucial to affect the amount of soil organic carbon in forest ecosystems as litter-derived DOC is one of the important sources of soil DOC. To further understand the formation and stability of forest soil organic carbon under climate change scenarios, it is essential to focus on the effects of climate warming and nutrient addition on the biodegradability of DOC (BDOC).

Methods Based on a manipulative soil warming experiment in a subtropical evergreen broadleaf forest, we took leaf litter of *Castanopsis kawakamii* with 0-day decomposition (undecomposed stage) and 180-day decomposition (middle-late stage of decomposition) as research materials. We experimentally quantified the effects of warming and nitrogen and phosphorus addition and their interactions on the BDOC of litter and the corresponding variation in ultraviolet-visible spectral index (ΔDOC spectral index) at different decomposition stages.

Important findings The results showed that: (1) the BDOC decreased gradually with litter decomposition, with a 22.6% reduction at the middle-late stage of decomposition compared to the undecomposed stage. (2) Warming significantly enhanced the BDOC at undecomposed stage while had no significant effects at the middle-late stage. Similarly, warming significantly increased the ΔDOC spectral index of undecomposed litter, but not at the milled-late stage. (3) Nitrogen addition significantly decreased BDOC at undecomposed stage but increased it at the middle-late stage. However, nitrogen addition did not change ΔDOC spectrum index at both decomposition

收稿日期Received: 2023-09-22 接受日期Accepted: 2024-02-07
基金项目: 国家自然科学基金(31930071和32201354)。Supported by the National Natural Science Foundation of China (31930071 and 32201354).
* 通信作者Corresponding author (maochao@fjnu.edu.cn)

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

stages. (4) Phosphorus addition significantly enhanced BDOC and ΔDOC spectrum index at both decomposition stages. (5) The interaction between warming and nutrient addition also had significant effects on increasing BDOC and ΔDOC spectrum index. Overall, both warming and phosphorus addition accelerated the degradation of DOC derived from undecomposed litter, while the degradation of DOC derived from middle-late decomposed litter was mainly regulated by nutrient contents.

Key words warming; nitrogen addition; phosphorus addition; subtropical forest; litter; dissolved organic carbon biodegradability; *Castanopsis kawakamii*

Ran JX, Zhang YH, Wang Y, Yang ZJ, Mao C (2024). Effects of warming and nitrogen and phosphorus addition on dissolved organic carbon biodegradability of litter in a subtropical forest. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 48, 1232-1242. DOI: 10.17521/cjpe.2023.0272

森林生态系统土壤碳库是陆地生态系统碳库的重要组成部分。溶解有机碳(DOC)作为土壤有机碳库中最活跃的组分(Bolan et al., 2011), 虽然在森林土壤有机碳库中占比较低, 但在调节森林土壤碳循环方面起着至关重要的作用(Jansen et al., 2014)。植物凋落物是森林土壤DOC的重要来源, 约有10%–25%的凋落物碳以DOC的形式输送到森林土壤中(Hensgens et al., 2020)。但是, 与其他土壤碳组分相比, 凋落物源DOC中高活性组分多、分子量低(Wu et al., 2021), 极易被微生物分解利用, 生物可降解性强。因此, 探究凋落物DOC的生物可降解性(BDOC)对于深入了解森林土壤碳平衡及生态系统结构功能具有重要意义。

DOC的生物降解主要受温度、养分有效性、凋落物分解阶段、DOC的结构组成和微生物群落等因素影响(Marschner & Kalbitz, 2003; Ni et al., 2022; Begum et al., 2023)。温度升高通常会提高微生物的生长速率并促进代谢活动, 加速DOC的降解(Mao & Li, 2018)。土壤有效氮含量的增加能缓解微生物的养分限制, 提高BDOC (Wickland et al., 2012)。磷养分有效性的增加会刺激微生物对DOC的分解, 增强BDOC (Mao et al., 2017)。同时, 凋落物在分解前期会释放较多的易降解有机化合物(Spohn & Berg, 2023), 生物可降解性高; 而在分解后期释放的DOC具有较高的芳香化和腐殖化程度, 结构相对稳定, 生物可降解性较低(Hall et al., 2020)。此外, 微生物群落的丰度越高, 活性越高, 对DOC的降解能力越强(Hu et al., 2023)。但是, 现有关于凋落物源BDOC的研究大都集中在温带和北方森林中(Wickland et al., 2012; Pinsonneault et al., 2016), 较少关注亚热带/热带森林地区。根据气象模型预测, 到21世纪末, 全球气温将升高1.0–5.7 ℃ (IPCC, 2022)。热带/亚热带地区植物常年生长于最适温度范围内(Liu et al., 2014), 对升温的敏感性可能高于温带或北方地区的植物。同时, 和高纬度地区不同, 亚热带森林土壤微生物的生长发育和生理代谢主要受土壤磷含量的限制(Hou et al., 2020; 张慧等, 2023)。因此, 关注增温和养分添加对亚热带森林生态系统中凋落物BDOC的影响, 对于揭示森林土壤有机质的形成和稳定具有重要的理论意义。

我国亚热带地区分布着世界上现存面积最大、最典型的常绿阔叶林, 森林覆盖率约占全国森林的45.6%。亚热带森林生态系统凋落物产量高且分解速度快, 通过淋溶输送到土壤中的DOC量较大, 同时, 亚热带森林土壤微生物的磷限制程度较强。基于此, 本研究依托亚热带格氏栲(*Castanopsis kawakamii*)天然林野外增温实验平台, 选取格氏栲凋落叶为研究对象, 分析增温和养分添加对凋落物BDOC和DOC光谱特征的影响, 旨在为揭示亚热带森林凋落物DOC输出特征提供数据支撑。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区域位于福建三明森林生态系统国家野外科学观测研究站(26.20° N, 117.48° E)。该区域属中亚热带季风气候, 地势为低山丘陵, 平均海拔为340 m, 年平均气温19.3 ℃, 年降水量1 638 mm。2022年4–11月, 月平均气温24.29 ℃, 累积降水量1 207 mm, 占年降水量的73.7%。该区域的建群种为格氏栲, 常见树种还包括米槠(*Castanopsis carlesii*)、木荷(*Schima superba*)、桂北木姜子(*Litsea subcoriacea*)等, 林分密度为250株·hm^{-2}, 格氏栲为178株·hm^{-2}, 格氏栲凋落物占林内凋落物总输入量的80%。该区域的土壤类型为砂岩形成的山地红壤

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

和暗红壤, 土壤高度风化, 由高岭石和铁铝氧化物的黏土矿物组成。

1.2 样地设置与凋落物样品采集

本实验依托的格氏栲天然林野外增温实验平台包括未增温(环境温度)和土壤增温(增加4 ℃)两种处理, 共有10个6 m × 6 m的小区。采用电缆增温(TXLP/1, Nexans, Oslo, Norway), 电缆沿等高线平行铺设, 埋在10 cm深的土壤中, 间距为20 cm。土壤温度由半自主研发的土壤主动增温系统(哈佛森林增温系统升级版)控制, 使增温幅度保持在4 ℃。实验样地于2015年10月开始通电增温, 至凋落物分解实验时间已增温7年。

在2022年3月(林木落叶高峰期)收集新鲜且完整的格氏栲凋落叶, 自然晾干后装入尼龙材质的凋落物袋中, 每袋10 g凋落叶。于2022年4月去除林内地表原有凋落物和杂物后, 将凋落物袋布设于增温小区和对照小区内的地面, 并于第0、180天收集凋落物袋用于室内测定分析。样品带回实验室采用去离子水浸提, 即凋落叶与去离子水以1:120的质量比于黑暗环境下浸提48 h, 经0.45 μm滤膜过滤后作为凋落物浸提液, 用于氮磷添加室内培养实验。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 氮磷添加室内实验

将未增温和增温处理下的凋落物浸提液分别等体积移入培养瓶中, 每个培养瓶中有200 mL浸提液。随后, 将未增温处理下的浸提液培养瓶分为4份, 分别添加等体积去离子水(CT)、NH_4NO_3溶液(N)、$K_2H_2PO_4$溶液(P)、$NH_4NO_3 + K_2H_2PO_4$溶液(N × P)。增温处理的浸提液培养瓶也分为4份, 分别添加等体积去离子水(W)、NH_4NO_3溶液(W × N)、$K_2H_2PO_4$溶液(W × P)、$NH_4NO_3 + K_2H_2PO_4$溶液(W × N × P)。氮磷添加量参考格氏栲天然林土壤碳氮磷化学计量比(碳:氮:磷= 90:15:1), 最终培养瓶内溶液的碳氮磷浓度分别为12、2和0.13 mg·kg^{-1}。随后, 每个培养瓶内加入1 mL土壤接种液, 即林内表层土壤的水提取液(土水质量比为1:25)。其中, 未增温处理的凋落物浸提液接种未增温小区的土壤接种液, 增温处理的凋落物浸提液接种增温小区土壤接种液。增温处理和对照处理的土壤微生物属性见表1。然后, 将所有培养瓶置于室温(20 ℃)和黑暗条件下培养28天。

表1 格氏栲天然林对照和增温样地的土壤微生物属性(平均值±标准误)
Table 1 Soil microbial properties of the warming (CK) and control (W) plots in the *Castanopsis kawakamii* forest (mean ± *SE*)

因子 Factor	对照 CK	增温 W
MBC (mg·kg^{-1})	181.05 ± 9.05^a	148.38 ± 6.32^b
MBN (mg·kg^{-1})	79.99 ± 6.63^a	53.17 ± 2.97^b
MBC/MBN	2.30 ± 0.16^b	2.82 ± 0.17^a
βG (nmol·h^{-1}·g^{-1})	19.47 ± 0.87^b	24.93 ± 1.00^a
CBH (nmol·h^{-1}·g^{-1})	0.61 ± 0.04^b	1.23 ± 0.05^a
PPO (nmol·h^{-1}·g^{-1})	0.68 ± 0.04^b	0.97 ± 0.07^a
Px (nmol·h^{-1}·g^{-1})	5.00 ± 0.50^b	7.20 ± 0.35^a

βG, β-葡萄糖苷酶活性; CBH, 纤维素生物水解酶活性; MBC, 微生物生物量碳含量; MBN, 微生物生物量氮含量; PPO, 酚氧化酶活性; Px, 过氧化物酶活性。不同小写字母表示增温与对照间存在显著差异($p < 0.05$)。
βG, β-glucosidase activity; CBH, cellobiohydrolase activity; MBC, microbial biomass carbon content; MBN, microbial biomass nitrogen content; PPO, phenol oxidase activity; Px, peroxidase activity. Different lowercase letters indicate significant differences ($p < 0.05$) between warming and control treatment.

1.3.2 DOC生物可降解性的测定

培养前后的溶液经0.45 μm滤膜过滤后, 用总有机碳分析仪(TOC-LCPH/CPN, Shimadzu, Kyoto, Japan)测定溶液的DOC含量。BDOC通常用一段时间内微生物矿化分解及固持的DOC的变化量来表示(McDowell et al., 2006)。本实验中培养前后溶液DOC含量的损失比为BDOC, 具体计算公式为:

$$BDOC\ (\%) = (DOC_{t=0} - DOC_{t=28})/DOC_{t=0} \times 100$$

式中, $DOC_{t=0}$和$DOC_{t=28}$分别为培养0天和28天后的DOC含量。

1.3.3 紫外可见光吸收光谱分析

采用紫外-可见分光光度计(UV-2600, Shimadzu, Kyoto, Japan)测定培养前后溶液的紫外可见光谱特征。以Milli-Q超纯水为空白, 利用10 mm的石英比色皿测定200–700 nm波长下溶液的紫外可见吸收光谱。$SUVA_{254}$、$SUVA_{260}$和$SUVA_{280}$分别为254、260和280 nm波长下的吸光度与DOC浓度之比。a_{300}由300 nm紫外吸光度乘以Napierian吸光系数(2.303)得到。$SUVA_{254}$值越大, 表明芳香度越高(Carter et al., 2012)。$SUVA_{260}$与溶液中的疏水性物质有关, 其值越大, 表明疏水组分越多(Yuan et al., 2018)。$SUVA_{280}$与高分子量化合物含量有关, 值越大, 表明高分子量化合物越多(Wang et al., 2014)。a_{300}表征溶液中发色团含量的多少, a_{300}值越大, 表明发色团含量越多。$\Delta SUVA_{254}$、$\Delta SUVA_{260}$、$\Delta SUVA_{280}$和Δa_{300}为培养前后光谱指标的变化量, 比如:

$$\Delta SUVA_{254} = SUVA_{254(t=28)} - SUVA_{254(t=0)}$$

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

式中, $SUVA_{254(t=0)}$和$SUVA_{254(t=28)}$分别为培养0天和28天后的$SUVA_{254}$值。

1.4 数据处理

采用单因素方差分析来分析增温和分解时间对可溶性有机碳含量的影响, 随后, 利用多因素方差分析来分析增温和分解时间对可溶性有机碳的影响以及增温和氮磷添加对BDOC和紫外可见光谱指标变化量的影响。利用线性回归分析来检验凋落物BDOC与DOC光谱指标之间的相关关系。采用SPSS 26.0软件对数据进行统计分析, 采用Origin 2021软件绘图。显著性水平设为α = 0.05。图表中数据为平均值±标准误。

2 结果和分析

2.1 增温和氮磷添加对凋落物BDOC的影响

由图1可知, 凋落物源DOC含量随分解时间的增加而显著下降, 对照和增温处理下的DOC含量在凋落物分解180天后分别降低了87.5%和90.5%。与对照相比, 增温处理显著降低分解180天凋落物DOC含量, 下降幅度为24.0%。增温×分解时间对凋落物DOC含量不存在交互作用。

由表2和图2A可知, 增温显著提高未分解阶段(分解0天)凋落物的BDOC, 增幅约为7.1%。同时, 养分添加也显著影响未分解凋落物BDOC。与对照相比, 氮添加使BDOC降低了12.1%, 而磷添加则使BDOC增加了11.1%。此外, 增温×氮添加处理对未分解凋落物的BDOC没有交互作用, 而增温×磷添加处理则使BDOC显著增加了11.9%, 表明增温和磷添加对BDOC存在交互作用。氮添加×磷添加也显著提高了未分解凋落物BDOC, 增幅为25.0%, 表明氮磷养分之间也具有交互作用。增温×氮添加×磷添加也显著提高了该阶段的BDOC。

由表2和图2B可知, 与未分解凋落物不同, 增温未显著影响分解中后期(分解180天)凋落物的BDOC。但是, 养分添加显著影响了该阶段的BDOC。与对照相比, 氮添加使BDOC显著增加了6.7%, 磷添加使BDOC显著增加了16.6%。此外, 增温×氮添加处理未显著影响分解中后期凋落物BDOC, 而增温×磷添加处理则使BDOC增加了15.8%, 表明增温和磷添加对BDOC存在交互作用。氮添加×磷添加使BDOC显著增加了13.6%, 表明氮磷添加之间也存在交互作用。增温×氮添加×磷添加处理对该阶段BDOC没有交互作用。

2.2 增温和氮磷添加对凋落物DOC光谱指标变化量的影响

增温和养分添加对未分解(分解0天)凋落物ΔDOC光谱指标的影响存在差异(表3; 图3)。与对照相比, 增温显著增加该阶段$\Delta SUVA_{254}$、$\Delta SUVA_{260}$和$\Delta SUVA_{280}$, 增幅分别为15.6%、23.9%和37.3%, 表明增温显著增加了凋落物DOC的芳香性、疏水性和分子量。同时, 氮添加显著降低$\Delta SUVA_{254}$, 显著提

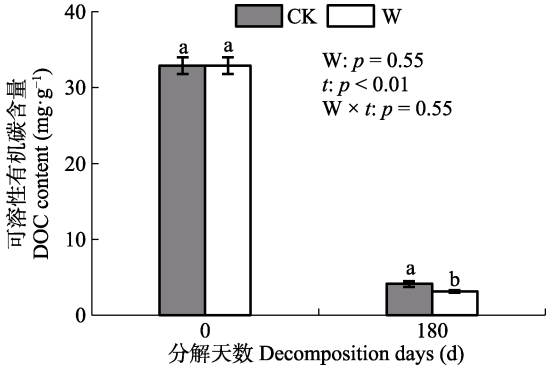


图1 增温和分解时间对亚热带森林凋落物可溶性有机碳(DOC)含量的影响(平均值±标准误)。CK, 对照; *t*, 分解时间; W, 增温。不同小写字母表示增温和对照间存在显著差异(p < 0.05)。

Fig. 1 Effects of warming and decomposition time on dissolved organic carbon (DOC) content of litter in a subtropical forest (mean ± *SE*). CK, control treatment; *t*, decomposition time; W, warming. Different lowercase letters indicate significant differences (p < 0.05) between warming and control treatment.

表2 增温和养分添加对亚热带森林凋落物分解0天和180天可溶性有机碳(DOC)生物可降解性的影响

Table 2 Effects of warming and nutrient addition on 0-day decomposition and 180-day decomposition litter-derived dissolved organic carbon (DOC) in a subtropical forest

处理 Treatment	分解0天 0-day decomposition		分解180天 180-day decomposition	
	F	*p*	*F*	*p*
W	21.18	<0.01	0.01	0.91
N	5.57	<0.05	5.90	<0.05
P	167.92	<0.01	144.70	<0.01
N × P	50.94	<0.01	4.87	<0.05
W × N	3.05	0.09	0.74	0.40
W × P	21.11	<0.01	4.77	<0.05
W × N × P	5.29	<0.05	3.44	0.07

N, 氮添加; N × P, 氮和磷添加的交互作用; P, 磷添加; W, 增温; W × N, 增温和氮添加的交互作用; W × N × P, 增温、氮和磷添加的交互作用; W × P, 增温和磷添加的交互作用。

N, nitrogen addition; N × P, interaction between nitrogen and phosphorus addition; P, phosphorus addition; W, warming; W × N, interaction between warming and nitrogen addition; W × N × P, interaction among warming, nitrogen and phosphorus addition; W × P, interaction between warming and phosphorus addition.

DOI: 10.17521/cjpe.2023.0272

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

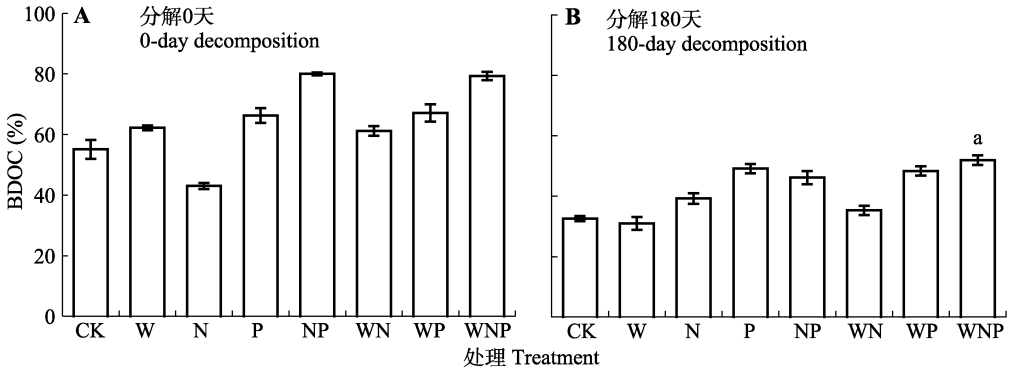


图2 增温和氮磷添加对亚热带森林凋落物分解0天(**A**)和180天(**B**)可溶性有机碳生物可降解性(BODC)的影响(平均值±标准误)。CK, 对照; N, 氮添加; NP, 氮和磷添加的交互作用; P, 磷添加; W, 增温; WN, 增温和氮添加的交互作用; WNP, 增温、氮和磷添加的交互作用; WP, 增温和磷添加的交互作用。

Fig. 2 Effects of warming and nitrogen and phosphorus addition on the biodegradability of litter-derived dissolved oganic carbon (BDOC) at 0-day decomposition (**A**) and 180-day decomposition (**B**) stage in a subtropical forest (mean ± *SE*). CK, control treatment; N, nitrogen addition; NP, interaction between nitrogen and phosphorus addition; P, phosphorus addition; W, warming; WN, interaction between warming and nitrogen addition; WNP, interactions among warming, nitrogen and phosphorus addition; WP, interaction between warming and phosphorus addition.

表3 增温和氮磷添加对亚热带森林凋落物分解0天和180天可溶性有机碳光谱指标变化量(ΔDOC)的影响

Table 3 Effects of warming and nitrogen and phosphorus addition on the variation in dissolved organic carbon (ΔDOC) spectral index of littex at 0-day decomposition and 180-day decomposition stages in a subtropical forest.

分解时间 Decomposition time	处理 Treatment	$\Delta SUVA_{254}$		$\Delta SUVA_{260}$		$\Delta SUVA_{280}$		Δa_{300}	
		F	*p*	*F*	*p*	*F*	*p*	*F*	*p*
分解0天 0-day decomposition	W	4.23	<0.05	6.82	<0.05	11.92	<0.01	0.45	0.51
	N	6.23	<0.05	0.27	0.61	0.40	0.53	8.34	<0.01
	P	55.52	<0.01	34.63	<0.01	51.21	<0.01	31.14	<0.01
	N × P	20.35	<0.01	9.52	<0.01	6.65	<0.05	11.88	<0.01
	W × N	2.85	0.10	6.22	<0.05	0.45	0.51	0.17	0.68
	W × P	7.04	<0.05	6.51	<0.05	4.31	<0.05	0.32	0.57
	W × N × P	1.92	0.18	0.02	0.89	2.93	0.10	0.25	0.62
分解180天 180-day decomposition	W	0.69	0.41	1.01	0.32	0.46	0.50	0.02	0.89
	N	2.04	0.16	2.54	0.12	2.84	0.10	0.54	0.47
	P	30.57	<0.01	49.27	<0.01	21.43	<0.01	49.74	<0.01
	N × P	<0.01	0.99	1.28	0.27	5.93	<0.05	0.03	0.86
	W × N	<0.01	1.00	0.02	0.88	0.03	0.87	5.74	<0.05
	W × P	2.35	0.14	6.99	<0.05	5.99	<0.05	0.03	0.86
	W × N × P	0.03	0.86	0.61	0.44	2.47	0.13	5.68	<0.05

$\Delta SUVA_{254}$、$\Delta SUVA_{260}$、$\Delta SUVA_{280}$和Δa_{300}分别表征凋落物浸提液的芳香化程度、疏水性组分、高分子量化合物和发色团物质在培养28天后的变化量。N, 氮添加; N × P, 氮和磷添加的交互作用; P, 磷添加; W, 增温; W × N, 增温和氮添加的交互作用; W × N × P, 增温、氮和磷添加的交互作用; W × P, 增温和磷添加的交互作用。

$\Delta SUVA_{254}$, $\Delta SUVA_{260}$, $\Delta SUVA_{280}$ and Δa_{300} represented the aromaticity, hydrophobicity, molecular weight and chromophoric dissolved organic matter composition of leaf litter, respectively after 28-day incubation. N, nitrogen addition; N × P, interaction between nitrogen and phosphorus addition; P, phosphorus addition; W, warming; W × N, interaction between warming and nitrogen addition; W × N × P, interactions among warming, nitrogen and phosphorus addition; W × P, interaction between warming and phosphorus addition.

高Δa_{300}。磷添加则显著提高$\Delta SUVA_{254}$、$\Delta SUVA_{260}$、$\Delta SUVA_{280}$, 增幅分别为40.2%、49.2%、58.5%, 但使Δa_{300}显著降低76.0%。此外, 增温×氮添加仅显著影响$\Delta SUVA_{260}$, 增温×磷添加则显著提高$\Delta SUVA_{254}$、$\Delta SUVA_{260}$、$\Delta SUVA_{280}$。氮添加×磷添加显著影响所有ΔDOC光谱指标, 但增温×氮添加×磷添加未对ΔDOC光谱指标产生显著影响。

增温和养分添加对分解中后期(分解180天)凋落物ΔDOC光谱指标的影响也存在差异(表3; 图3)。增温和氮添加均未显著影响该阶段凋落物的所有

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

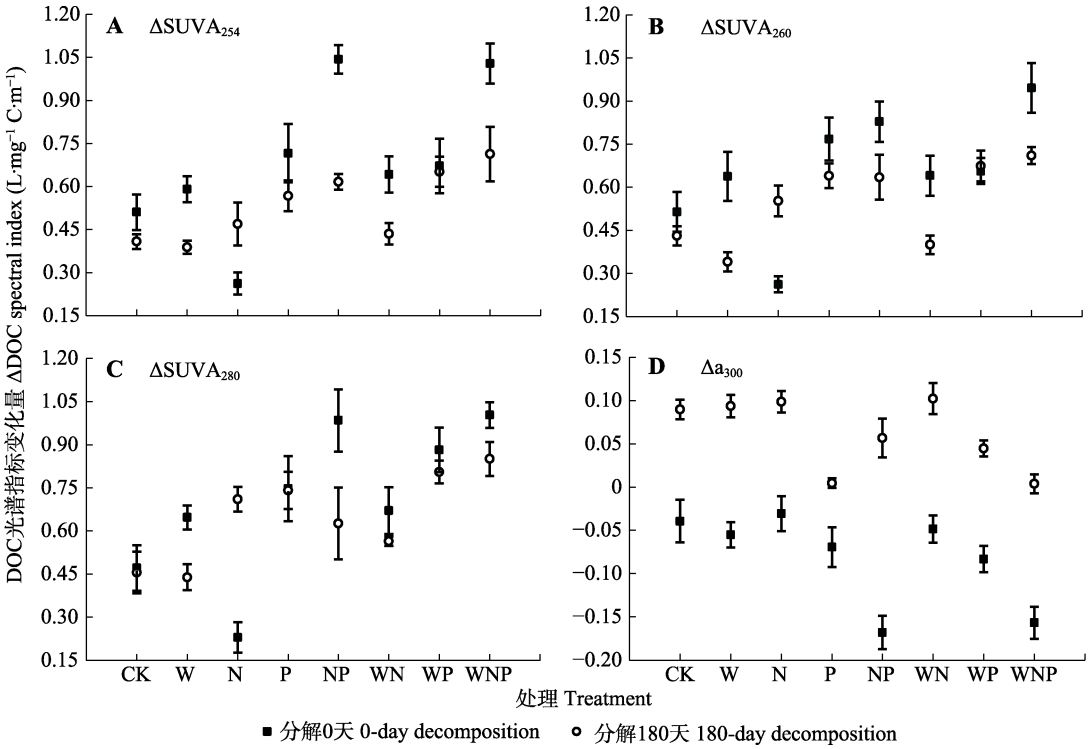


图3 增温和氮磷添加对亚热带森林凋落物分解0天和180天可溶性有机碳光谱指标变化量(ΔDOC)的影响(平均值±标准误)。$\Delta SUVA_{254}$、$\Delta SUVA_{260}$、$\Delta SUVA_{280}$和Δa_{300}分别表征凋落物浸提液的芳香化程度、疏水性组分、高分子量化合物和发色团物质在培养28天后的变化量。CK, 对照; N, 氮添加; NP, 氮和磷添加的交互作用; P, 磷添加; W, 增温; WN, 增温和氮添加的交互作用; WNP, 增温、氮和磷添加的交互作用; WP, 增温和磷添加的交互作用。

Fig. 3 Effects of warming and nitrogen and phosphorus addition on the variations in dissolved organic carbon (ΔDOC) spectral index of litter with 0-day decomposition and 180-day decomposition in a subtropical forest (mean ± *SE*). $\Delta SUVA_{254}$, $\Delta SUVA_{260}$, $\Delta SUVA_{280}$ and Δa_{300} represented the aromaticity, hydrophobicity, high molecular weight and chromophoric dissolved oganic matter composition of leaf litter, respectively after 28-day incubation. CK, control treatment; N, nitrogen addition; NP, interaction between nitrogen and phosphorus addition; P, phosphorus addition; W, warming; WN, interaction between warming and nitrogen addition; WNP, interactions among warming, nitrogen and phosphorus addition; WP, interaction between warming and phosphorus addition.

ΔDOC光谱指标。但是, 磷添加使$\Delta SUVA_{254}$、$\Delta SUVA_{260}$、$\Delta SUVA_{280}$分别显著增加了39.1%、48.6%、62.6%, 使Δa_{300}显著降低了94.9%, 表明磷添加显著提高凋落物DOC的芳香性、疏水性和分子量, 但减少了发色团含量。同时, 增温×氮添加仅显著影响了Δa_{300}, 增温×磷添加则显著影响$\Delta SUVA_{260}$、$\Delta SUVA_{280}$, 而氮添加×磷添加仅显著改变了$\Delta SUVA_{280}$。此外, 增温×氮添加×磷添加仅显著影响Δa_{300}。

2.3 BDOC与DOC光谱特征的关系

由图4可知, 凋落物分解过程中BDOC与4种初始DOC光谱指标以及光谱指标变化量存在显著相关关系, 表明DOC组分对BDOC起着重要的调控作用。BDOC与$SUVA_{254}$、$SUVA_{260}$、$SUVA_{280}$以及a_{300}呈显著负相关关系, 说明DOC的生物降解受底物质量调控。BDOC与$\Delta SUVA_{254}$、$\Delta SUVA_{260}$、$\Delta SUVA_{280}$呈显著正相关关系, 与Δa_{300}呈显著负相关关系, 表明在凋落物DOC的生物降解过程中, 易分解物质快速减少, 难分解物质逐渐积累。

3 讨论

3.1 凋落物分解阶段对BDOC的影响

凋落物分解产生的DOC是土壤碳库的重要来源。随着凋落物分解过程的进行, 凋落物的结构和组成会发生相应的变化, 改变凋落物淋溶液的性质和凋落物源BDOC。本研究表明, 未分解凋落物的BDOC平均值为(55.2 ± 3.1)%, 而分解中后期凋落物的BDOC平均值为(30.5 ± 0.9)%, 表明凋落物BDOC随分解时间增加而降低, 这与Don和Kalbitz (2005)在温带森林的研究结果一致。凋落物BDOC在很大程度上取决于DOC的化学组成(Abbott et al., 2014)。本研究结果表明, BDOC与$SUVA_{254}$、

DOI: 10.17521/cjpe.2023.0272

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

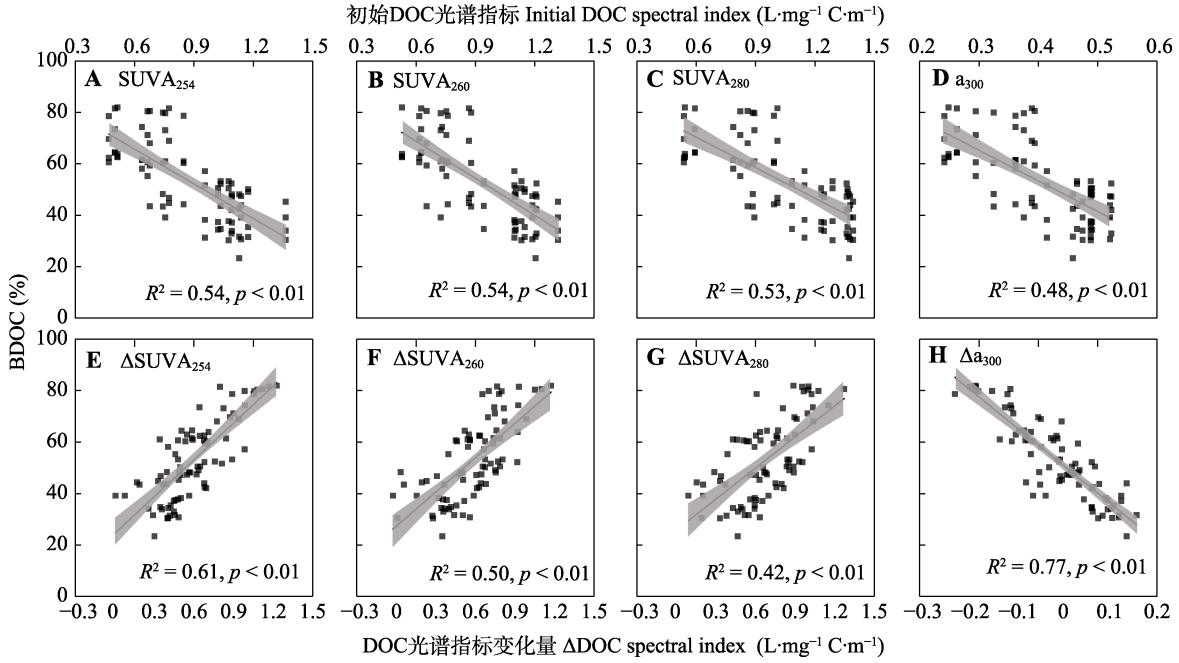


图4 可溶性有机碳生物可降解性(BDOC)与凋落物初始可溶性有机碳(DOC)光谱指标和可溶性有机碳光谱指标变化量(ΔDOC)的拟合。$SUVA_{254}$、$SUVA_{260}$、$SUVA_{280}$和a_{300}分别表征凋落物浸提液的芳香化程度、疏水性组分、高分子量化合物和发色团物质。$\Delta SUVA_{254}$、$\Delta SUVA_{260}$、$\Delta SUVA_{280}$和Δa_{300}分别表征凋落物浸提液的芳香化程度、疏水性组分、高分子量化合物和发色团物质在培养28天后的变化量。

Fig. 4 Variations of dissolved organic carbon biodegradability (BDOC) and corresponding the variations in dissolved organic carbon (ΔDOC) with initial dissolved organic carbon (DOC) during litter incubation. $SUVA_{254}$, $SUVA_{260}$, $SUVA_{280}$ and a_{300} represented the aromaticity, hydrophobicity, high molecular weight and chromophoric dissolved organic matter (DOM) composition of leaf litter, respectively. $\Delta SUVA_{254}$, $\Delta SUVA_{260}$, $\Delta SUVA_{280}$ and Δa_{300} denoted the aromaticity, hydrophobicity, molecular weight and chromophoric DOM composition of leaf litter, respectively during 28-day incubation.

$SUVA_{260}$、$SUVA_{280}$之间存在显著负相关关系, 这与Fork等(2020)的研究结果一致, 均表明较多的芳香族、疏水性以及大分子量化合物会降低BDOC。一般来说, 新鲜未分解凋落物的浸提液含有较少的芳香化物质、疏水性物质和大分子量物质, 此时的含碳化合物易被微生物降解。随着凋落物不断分解, 凋落物释放的DOC主要来源于木质素衍生化合物, 组成较为稳定, 微生物难以分解利用。同时, 化学性质高度稳定的芳香类等化合物也会不断富集, 而易被微生物利用的物质则不断减少, 降低底物的微生物可利用性(Qin et al., 2023), 进而降低BDOC。本研究结果也论证了这一观点, 凋落物DOC的$SUVA_{254}$、$SUVA_{260}$、$SUVA_{280}$等光谱指标随凋落物分解而不断增加, 表明凋落物浸提液中难分解物质增多, 这将抑制凋落物DOC的生物降解。因此, BDOC在凋落物不同分解阶段间的差异是由DOC化学组分的变化造成的。

3.2 增温对凋落物BDOC的影响

本研究结果表明, 增温显著提高未分解凋落物BDOC。这与Wang等(2014)在湿地生态系统的研究结果一致。增温对未分解凋落物BDOC的影响可能是与土壤微生物群落和活性有关。已有的研究表明, 增温会显著改变土壤微生物群落结构, 进而改变土壤微生物对碳氮的利用(Zhou et al., 2021)。赵建琪等(2019)对亚热带常绿阔叶林的研究表明增温提高土壤细菌相对丰度, 降低真菌相对丰度。细菌丰度的增加有利于易分解有机碳的降解, 因此增温提高凋落物BDOC。同时, 本研究中, 增温显著提高与碳循环相关的水解酶(β-葡萄糖苷酶(βG)、纤维素生物水解酶(CBH))以及氧化酶(酚氧化酶(PPO)、过氧化物酶(PX))的活性, 这与郑蔚等(2019)对亚热带森林的研究结果一致。土壤酶活性的提高会加速DOC的酶促降解, 提高凋落物BDOC (Chen & Sinsabaugh, 2021)。本研究中, 增温显著提高$\Delta SUVA_{254}$、$\Delta SUVA_{260}$以及$\Delta SUVA_{280}$, 表明增温显著提高凋落物DOC中芳香性化合物、疏水组分和大分子量化合物含量, 这些结果说明增温促进微生物优先快速分解非芳香族化合物等易分解物质, 使芳香族等难分解化合物被积累下来。

与未分解凋落物相比, 本研究发现增温未显著

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

影响分解中后期凋落物BDOC, 也未显著改变DOC的光谱特征。这种差异可能与凋落物质量有关。Liu等(2022)对亚热带天然林凋落物分解的研究显示, 凋落物分解早期, 可溶性物质能迅速从凋落物中释放出来, 满足微生物对底物的需求, 但随着时间的推移, 凋落物分解减慢, 即可供微生物利用的底物减少。来自热带地区的研究也发现, 温度和凋落物质量均是凋落物分解的重要影响因素, 且低质量凋落物对增温的响应小于高质量凋落物(Liu et al., 2017)。因此, 较低的微生物底物可利用性可能会抵消升温的促进效应, 导致增温背景下凋落物BDOC未呈现显著变化。值得注意的是, 不同于以往研究中的直接效应(Nguyen & Choi, 2015; Mao & Li, 2018), 本研究中增温处理是通过改变土壤微生物群落结构和活性、凋落物淋溶液的质量及化学组成来间接影响凋落物BDOC。此外, 本研究中分解初期和中后期的凋落物淋溶液中添加了相同的土壤接种液, 忽略了土壤微生物性质在凋落物不同分解阶段间的差异。通常来讲, 凋落物分解过程会改变糖类、氨基酸等活性物质的向下淋溶量, 进而可能影响土壤微生物的丰度和活性(龙健等, 2019)。考虑到土壤微生物对DOC生物降解的调控作用, 在未来研究中需要将凋落物不同分解阶段土壤微生物群落的差异纳入考虑范畴。

3.3 氮磷添加对凋落物BDOC的影响

本研究中, 氮添加处理显著降低未分解凋落物BDOC, 这一现象与Abbott等(2014)的研究结果相似, 其发现氮添加未显著促进富氮水体中DOC的降解。本研究也发现磷添加处理显著提高凋落物DOC的降解速率, 这与Räsänen等(2014)在磷限制生态系统中的研究结果一致。氮添加与磷添加的结果差异可能与亚热带地区磷限制有关。亚热带地区是全球大气氮沉降最严重的地区之一, 此地区的氮通过生物固氮或大气氮沉降已经达到饱和(姚钧能等, 2018)。已有的研究表明, 亚热带森林主要受到磷的限制, 一方面, 随着氮水平的增加, 刺激植物生长, 增加对磷的需求(Li et al., 2016); 另一方面, 由于亚热带地区土壤高度风化以及高温和大量降水增强植物对磷的需求, 使得土壤和植物中有效磷含量低, 导致亚热带森林生态系统更容易受到磷限制而不是氮限制(Hou et al., 2018, 2020)。因此磷添加能缓解微生物的磷限制, 提高微生物活性, 促进凋落物DOC的降解。而氮添加会加剧磷养分限制, 抑制微生物活性, 降低凋落物BDOC。

本研究中, 氮和磷添加均显著提高分解中后期凋落物BDOC。这与Wickland等(2012)和Mao等(2017)的研究结果一致。养分的可利用性是制约凋落物分解的主要因素, 当凋落物质量较差时, 可能导致环境中长时间的养分缺乏(林成芳等, 2017)。Talbot和Treseder (2012)的研究表明, 凋落物分解中后期木质素等难分解物质浓度较高, 凋落物质量较差, 此时环境中氮、磷等养分不足。而微生物在分解凋落物DOC的过程中对氮、磷养分有着很高的需求。因此通过向凋落物分解中后期浸提液中添加氮、磷, 满足微生物对氮、磷的需求, 增强微生物活性, 进一步加速对碳的分解, 进而提高凋落物BDOC。

3.4 增温与氮磷添加的交互作用对凋落物BDOC的影响

凋落物DOC的生物降解与多种因素有关, 可能会受到增温与氮磷添加交互作用的影响。本研究中, 增温与磷添加对未分解凋落物BDOC具有显著的交互作用。有研究表明, 增温会提高土壤磷酸酶活性, 进而提高土壤磷有效性(蒋芬等, 2021)。磷供应水平的提高能够缓解因增温而提高的微生物磷限制程度。本研究中, 氮添加与磷添加对凋落物BDOC也具有交互作用, 这与以往的研究结果(Elser et al., 2007)相似。氮添加通常会加剧亚热带地区磷等养分的限制程度, 而磷添加缓解微生物限制, 提高凋落物BDOC。本研究中, 增温与氮磷添加之间对未分解凋落物DOC的生物可降解性也存在交互作用。增温会改变微生物群落, 提高微生物活性, 氮磷添加满足微生物的养分需求, 因此, 增温和氮磷添加提高凋落物BDOC。

本研究中, 增温与磷添加、氮添加与磷添加均对分解中后期凋落物BDOC存在交互作用。凋落叶分解中后期, 凋落物DOC中多为稳定性组分, 由于氮、磷养分通过淋溶作用已经被释放出去, 微生物分解受养分限制更为严重(Moore et al., 2006)。此时, 养分含量而非温度是DOC分解的关键限制因素。磷作为亚热带地区的限制性元素, 严重影响着微生物群落活动以及土壤有机碳的分解(Yang, 2018)。向分解中后期凋落物浸提液中添加氮、磷, 可以缓解微生物在此阶段的养分需求, 加速对DOC的分解。因此, 增温与磷添加以及氮添加与磷添加均使分解中后期

DOI: 10.17521/cjpe.2023.0272

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

凋落物BDOC升高。增温与氮添加对整个分解过程的凋落物DOC的生物降解都不存在交互作用。

4 结论

综上所述, 凋落物BDOC随凋落物分解逐渐降低。在凋落物未分解阶段, 增温和磷添加显著提高凋落物BDOC和紫外光谱指标变化量, 表明增温和磷添加均加速了该阶段凋落物易分解物质的分解。凋落物分解中后期, 养分添加显著提高了凋落物BDOC和紫外光谱指标变化量, 而增温未呈现显著影响, 表明该阶段凋落物DOC的分解主要受养分调控。同时, 增温和氮磷添加对这两个阶段的凋落物BDOC均存在交互作用。本研究结果揭示了凋落物源BDOC对增温和氮磷添加的响应, 为评估全球变暖背景下养分添加和凋落物质量对亚热带森林生态系统凋落物源DOC动态变化的影响提供了理论支持和数据支撑。

参考文献

Abbott BW, Larouche JR, Jones Jr. JB, Bowden WB, Balser AW (2014). Elevated dissolved organic carbon biodegradability from thawing and collapsing permafrost. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 119, 2049-2063.

Begum MS, Park JH, Yang LY, Shin KH, Hur J (2023). Optical and molecular indices of dissolved organic matter for estimating biodegradability and resulting carbon dioxide production in inland waters: a review. *Water Research*, 228, 119362. DOI: 10.1016/j.watres.2022.119362.

Bolan NS, Adriano DC, Kunhikrishnan A, James T, McDowell R, Senesi N (2011). Dissolved organic matter: biogeochemistry, dynamics, and environmental significance in soils. *Advances in Agronomy*, 110, 1-75.

Carter HT, Tipping E, Koprivnjak JF, Miller MP, Cookson B, Hamilton-Taylor J (2012). Freshwater DOM quantity and quality from a two-component model of UV absorbance. *Water Research*, 46, 4532-4542.

Chen J, Sinsabaugh RL (2021). Linking microbial functional gene abundance and soil extracellular enzyme activity: implications for soil carbon dynamics. *Global Change Biology*, 27, 1322-1325.

Don A, Kalbitz K (2005). Amounts and degradability of dissolved organic carbon from foliar litter at different decomposition stages. *Soil Biology & Biochemistry*, 37, 2171-2179.

Elser JJ, Bracken MES, Cleland EE, Gruner DS, Harpole WS, Hillebrand H, Ngai JT, Seabloom EW, Shurin JB, Smith JE (2007). Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems. *Ecology Letters*, 10, 1135-1142.

Fork ML, Osburn CL, Heffernan JB (2020). Bioavailability and compositional changes of dissolved organic matter in urban headwaters. *Aquatic Sciences*, 82, 66. DOI: 10.1007/s00027-020-00739-7.

Hall SJ, Huang WJ, Timokhin VI, Hammel KE (2020). Lignin lags, leads, or limits the decomposition of litter and soil organic carbon. *Ecology*, 101, e03113. DOI: 10.1002/ecy.3113.

Hensgens G, Laudon H, Peichl M, Gil IA, Zhou Q, Berggren M (2020). The role of the understory in litter DOC and nutrient leaching in boreal forests. *Biogeochemistry*, 149, 87-103.

Hou E, Chen C, Luo Y, Zhou G, Kuang Y, Zhang Y, Heenan M, Lu X, Wen D (2018). Effects of climate on soil phosphorus cycle and availability in natural terrestrial ecosystems. *Global Change Biology*, 24, 3344-3356.

Hou EQ, Luo YQ, Kuang YW, Chen CR, Lu XK, Jiang LF, Luo XZ, Wen DZ (2020). Global meta-analysis shows pervasive phosphorus limitation of aboveground plant production in natural terrestrial ecosystems. *Nature Communications*, 11, 637. DOI: 10.1038/s41467-020-14492-w.

Hu J, Kang LY, Li ZL, Feng XH, Liang CF, Wu Z, Zhou W, Liu XN, Yang YH, Chen LY (2023). Photo-produced aromatic compounds stimulate microbial degradation of dissolved organic carbon in thermokarst lakes. *Nature Communications*, 14, 3681. DOI: 10.1038/s41467-023-39432-2.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Jansen B, Kalbitz K, McDowell WH (2014). Dissolved organic matter: linking soils and aquatic systems. *Vadose Zone Journal*, 13, 1-4.

Jiang F, Huang J, Chu GW, Cheng Y, Liu XJ, Liu JX, Lie ZY (2021). Effects of warming on soil phosphorus fractions and their contributions to available phosphorus in south subtropical forests. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 45, 197-206. [蒋芬, 黄娟, 褚国伟, 程严, 刘旭军, 刘菊秀, 列志旸 (2021). 增温对南亚热带森林土壤磷形态的影响及其对有效磷的贡献. 植物生态学报, 45, 197-206.]

Li Y, Niu SL, Yu GR (2016). Aggravated phosphorus limitation on biomass production under increasing nitrogen loading: a meta-analysis. *Global Change Biology*, 22, 934-943.

Lin CF, Peng JQ, Hong HB, Yang ZJ, Yang YS (2017). Effect of nitrogen and phosphorus availability on forest litter decomposition. *Acta Ecologica Sinica*, 37, 54-62. [林成芳, 彭建勤, 洪慧滨, 杨智杰, 杨玉盛 (2017). 氮、磷养分有

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

效性对森林凋落物分解的影响研究进展. 生态学报, 37, 54-62.]

Liu JX, Liu SG, Li YY, Liu SZ, Yin GC, Huang J, Xu Y, Zhou GY (2017). Warming effects on the decomposition of two litter species in model subtropical forests. *Plant and Soil*, 420, 277-287.

Liu M, Zhang ZJ, He Q, Wang H, Li X, Schoer J (2014). Exogenous phosphorus inputs alter complexity of soil-dissolved organic carbon in agricultural riparian wetlands. *Chemosphere*, 95, 572-580.

Liu XF, Chen SD, Li XJ, Yang ZJ, Xiong DC, Xu C, Wanek W, Yang YS (2022). Soil warming delays leaf litter decomposition but exerts no effect on litter nutrient release in a subtropical natural forest over 450 days. *Geoderma*, 427, 116139. DOI: 10.1016/j.geoderma.2022.116139.

Long J, Zhao C, Zhang MJ, Wu JN, Wu QS, Huang BC, Zhang JM (2019). Effect of litter decomposition on soil microbes on different slopes. *Acta Ecologica Sinica*, 39, 2696-2704. [龙健, 赵畅, 张明江, 吴劲楠, 吴求生, 黄博聪, 张菊梅 (2019). 不同坡向凋落物分解对土壤微生物群落的影响. 生态学报, 39, 2696-2704.]

Mao R, Li SY (2018). Temperature sensitivity of biodegradable dissolved organic carbon increases with elevating humification degree in subtropical rivers. *Science of the Total Environment*, 635-636, 1367-1371.

Mao R, Zhang XH, Li SY, Song CC (2017). Long-term phosphorus addition enhances the biodegradability of dissolved organic carbon in a nitrogen-limited temperate freshwater wetland. *Science of the Total Environment*, 605, 332-336.

Marschner B, Kalbitz K (2003). Controls of bioavailability and biodegradability of dissolved organic matter in soils. *Geoderma*, 113, 211-235.

McDowell WH, Zsolnay A, Aitkenhead-Peterson JA, Gregorich EG, Jones DL, Jödemann D, Kalbitz K, Marschner B, Schwesig D (2006). A comparison of methods to determine the biodegradable dissolved organic carbon from different terrestrial sources. *Soil Biology & Biochemistry*, 38, 1933-1942.

Moore TR, Trofymow JA, Prescott CE, Fyles J, Titus BD (2006). Patterns of carbon, nitrogen and phosphorus dynamics in decomposing foliar litter in Canadian forests. *Ecosystems*, 9, 46-62.

Nguyen HVM, Choi JH (2015). Changes in the dissolved organic matter leaching from soil under severe temperature and N-deposition. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187, 323.

Ni MF, Ma YM, Wang ZK, Wang XD, Zhu SX (2022). A distinctive mode of dissolved organic carbon biodegradation in karst lakes and reservoirs: evidence from trophic controls and compositional transformations. *Journal of Cleaner Production*, 368, 133217. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.133217.

Pinsonneault AJ, Moore TR, Roulet NT, Lapierre JF (2016). Biodegradability of vegetation-derived dissolved organic carbon in a cool temperate ombrotrophic bog. *Ecosystems*, 19, 1023-1036.

Qin FC, Lu JK, Li ZS, Meng S, Wang SK, Liang JF, He XH (2023). Nitrogen rather than carbon released by litter decomposition mediates nutrient relationships in a multispecies forest plantation with hemiparasite. *Science of the Total Environment*, 888, 164176. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.164176.

Räsänen N, Kankaala P, Tahvanainen T, Akkanen J, Saarnio S (2014). Short-term effects of phosphorus addition and PH rise on bacterial utilization and biodegradation of dissolved organic carbon (DOC) from boreal mires. *Aquatic Ecology*, 48, 435-446.

Spohn M, Berg B (2023). Import and release of nutrients during the first five years of plant litter decomposition. *Soil Biology & Biochemistry*, 176, 108878. DOI: 10.1016/j.soilbio.2022.108878.

Talbot JM, Treseder KK (2012). Interactions among lignin, cellulose, and nitrogen drive litter chemistry-decay relationships. *Ecology*, 93, 345-354.

Wang H, Holden J, Zhang ZJ, Li M, Li X (2014). Concentration dynamics and biodegradability of dissolved organic matter in wetland soils subjected to experimented warming. *Science of the Total Environmental*, 470-471, 907-916.

Wickland KP, Aiken GR, Butler K, Dornblaser MM, Spencer RGM, Striegl RG (2012). Biodegradability of dissolved organic carbon in the Yukon River and its tributaries: seasonality and importance of inorganic nitrogen. *Global Biogeochemical Cycles*, 26, GB0E03. DOI: 10.1029/2012GB004342.

Wu PP, Ding YD, Li SL, Sun XX, Zhang Y, Mao R (2021). Carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry controls interspecific patterns of leaf litter-derived dissolved organic matter biodegradation in subtropical plantations of China. *iForest-Biogeosciences and Forestry*, 14, 80-85.

Yang H (2018). Effects of nitrogen and phosphorus addition on leaf nutrient characteristics in a subtropical forest. *Trees*, 32, 383-391.

Yao JN, Lyu JH, Yu WL, Zhang JB, Lei ZF, Li Q, Song XZ (2018). Effects of nitrogen deposition and management intensity on stoichiometry of leaf litter in Moso bamboo forest. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 29, 467-473. [姚钧能, 吕建华, 俞卫良, 张君波, 雷赵枫, 李全, 宋新章 (2018). 氮沉降和经营强度对毛竹林凋落叶生态化学计量特征的影响. 应用生态学报, 29, 467-473.]

Yuan XC, Si YT, Lin WS, Yang JQ, Wang Z, Zhang QF, Qian W, Chen Y, Yang YS (2018). Effects of short-term warming and nitrogen addition on the quantity and quality

DOI: 10.17521/cjpe.2023.0272

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

of dissolved organic matter in a subtropical *Cunninghamia lanceolata* plantation. *PLoS ONE*, 13, e0191403. DOI: 10.1371/journal.pone.0191403.

Zhang H, Zeng WJ, Gong XT, Ma ZQ (2023). Relationships between root hairs and mycorrhizal fungi across typical subtropical tree species. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 47, 88-100. [张慧, 曾文静, 龚新桃, 马泽清 (2023). 亚热带典型树种根毛特征及其与共生真菌的关系. 植物生态学报, 47, 88-100.]

Zhao JQ, Wu JP, Zhang HL, Xiong X, Zhao MD, Chu GW, Meng Z, Zhou GY, Zhang DQ (2019). Effects of warming on soil microbial communities of a subtropical monsoon evergreen broad-leaved forest in southern China. *Ecology and Environmental Sciences*, 28, 881-889. [赵建琪, 吴建平, 张慧玲, 熊鑫, 赵梦峒, 褚国伟, 孟泽, 周国逸, 张德强 (2019). 增温对南亚热带季风常绿阔叶林土壤微生物群落的影响. 生态环境学报, 28, 881-889.]

Zheng W, Zhou JC, Lin WS, Zheng Y, Li C, Li XF, Ji YH, Yang ZJ (2019). Effects of soil warming on soil microbial extracellular enzyme activities with different depths in a young Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantation of subtropics. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 30, 832-840. [郑蔚, 周嘉聪, 林伟盛, 郑永, 李超, 李先锋, 纪宇骁, 杨智杰 (2019). 土壤增温对亚热带杉木幼树不同深度土壤微生物胞外酶活性的影响. 应用生态学报, 30, 832-840.]

Zhou YQ, Sun BY, Xie BH, Feng K, Zhang ZJ, Zhang Z, Li SZ, Du XF, Zhang Q, Gu SS, Song W, Wang LL, Xia JY, Han GX, Deng Y (2021). Warming reshaped the microbial hierarchical interactions. *Global Change Biology*, 27, 6331-6347.

责任编委: 石培礼　责任编辑: 赵　航

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology