

DOI: 10.5846/stxb202111153207

孙思琦, 裴晓娜, 韩锐, 杨光, 邸雪颖, 赵曦阳. 降解剂对森林凋落物可溶性有机碳含量的影响及凋落物降解模式比较研究. 生态学报, 2023, 43(5): 2005-2012.

Sun S Q, Pei X N, Han R, Yang G, Di X Y, Zhao X Y. Effects of degrading agents on dissolved organic carbon content of forest litter and comparative study on litter degradation modes. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(5): 2005-2012.

降解剂对森林凋落物可溶性有机碳含量的影响及凋落物降解模式比较研究

孙思琦¹, 裴晓娜¹, 韩锐¹, 杨光², 邸雪颖², 赵曦阳^{1,*}

1 吉林农业大学林学与草学学院, 长春 130118

2 东北林业大学林学院, 森林生态系统可持续经营教育部重点实验室, 哈尔滨 150040

摘要: 森林凋落物是森林生态系统中可溶性有机碳 (DOC) 的主要来源, 在生态系统碳循环过程中起重要作用。以帽儿山地区胡桃楸、兴安落叶松以及胡桃楸-兴安落叶松人工林凋落物为研究对象, 通过液体发酵培养将纤维素高效降解真菌 *Peniophora intranata* 与 *Sarocladium strictum* 制成单一 (A 菌剂、B 菌剂) 及混合菌剂 (C 菌剂), 测定野外条件下经降解剂处理的凋落物基质在不同时期的 DOC 含量, 分析降解剂对不同森林凋落物 DOC 动态变化的影响, 并比较各凋落物基质降解模式异同。结果表明: (1) 凋落物基质 DOC 含量在降解剂处理后均随降解时间增加呈下降趋势, 且下降幅度大小表现为混合基质 > 胡桃楸基质 > 落叶松基质; 在最初的 1 个月, 各凋落物基质 DOC 含量均显著高于其他降解时期 DOC 含量。(2) 经混合菌剂处理后的胡桃楸基质 DOC 含量相较于 2 种单一菌剂处理后的胡桃楸基质 DOC 含量低, 而经混合菌剂处理后的兴安落叶松基质与胡桃楸-兴安落叶松基质的 DOC 含量未表现出相同的显著性。(3) 经 3 种菌剂处理后的胡桃楸基质降解模式均相同, 经 B 菌剂与 C 菌剂处理的落叶松基质降解模式相同, 经 A 菌剂与 C 菌剂处理的混合基质降解模式相同。研究表明森林凋落物类型影响 DOC 的释放能力; 具协同效应的两菌种制得的混合菌剂较单一菌种制得菌剂降解凋落物能力强, 从而促进 DOC 的释放, 同时也受凋落物基质成分组成的影响。通过比较降解剂处理下不同类型凋落物 DOC 动态变化与降解模式的差异, 为帽儿山地区森林凋落物分解及碳管理提供科学依据。

关键词: 降解剂; 森林凋落物; 可溶性有机碳; 降解模式

Effects of degrading agents on dissolved organic carbon content of forest litter and comparative study on litter degradation modes

SUN Siqu¹, PEI Xiaona¹, HAN Rui¹, YANG Guang², DI Xueying², ZHAO Xiyang^{1,*}

1 College of Forestry and Grassland Science, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China

2 Key Laboratory of Sustainable Forest Ecosystem Management-Ministry of Education, College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

Abstract: Forest litter is the main source of dissolved organic carbon (DOC) in forest ecosystem and plays an important role in the process of ecosystem carbon cycle. In this study, the litter of *Juglans mandshurica*, *Larix gmelinii* and their mixed plantation in Maoer Mountain were taken as research objects. The high-efficiency cellulose degrading fungi *Peniophora intranata* and *Sarocladium strictum* were made into single (agent A, agent B) and mixed fungal agent (agent C) by liquid fermentation culture. The DOC content of forest litters treated with agents in different periods under field conditions was measured. The effects of degrading agents on the dynamic changes of DOC content of different types of litters

基金项目: 吉林农业大学人才引进科研启动经费项目 (2021002)

收稿日期: 2021-11-15; 网络出版日期: 2022-10-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhaoxyphd@163.com

were analyzed, and the similarities and differences of degradation modes of each litter substrate were compared. Results showed that DOC contents of the three litter substrates showed a downward trend with the increase of degradation time after treatment, and the decreasing range was in the order of mixture > *J. mandshurica* > *L. gmelinii*. In the first month, the DOC content of each litter substrate was significantly higher than that of other degradation periods. The DOC content of *J. mandshurica* substrate treated with the mixed fungal agent was lower than that treated with the two single fungal agents, but the DOC content of *L. gmelinii* and mixed substrate treated with mixed fungal agent did not show the same significance. The degradation modes of *J. mandshurica* substrate treated with the three kinds of agent were same. The degradation mode of *L. gmelinii* substrate treated with agent B was the same as that treated with agent C, and the mode of mixed substrate treated with agent A was the same as that treated with agent C. This study shows that the types of litter affect the release capacity of DOC. The mixed fungal agent made of two strains with synergistic effect has stronger ability to degrade litters than that made of single strain, so as to promote the release of DOC. At the same time, it is also affected by the composition of litter substrates. This study provides a scientific basis for forest litter decomposition and carbon management in Maoer Mountain area by comparing the dynamic changes of DOC and degradation modes of different types of litter under the treatment of degrading agents.

Key Words: degrading agents; forest litter; dissolved organic carbon; degradation modes

可溶性有机质(DOM)是土壤和自然水体中一种活跃的化学物质,主要包括可溶性有机碳(DOC)、可溶性有机氮(DON)以及可溶性有机磷(DOP)等成分,对陆地生态系统存在多方面的影响^[1]。对于森林生态系统而言,DOM不仅是其重要的可移动碳源和养分库,而且也是微生物进行生命活动以及生物分解过程中的重要能量来源^[2-3],森林生态系统养分循环过程受其重要影响。当前研究认为,森林生态系统中的DOM主要来源于新近的森林凋落物和土壤腐殖质^[4],其中,约80%的DOC与DON产生于凋落物^[5-6]。并且,碳在凋落物中的滞留时间比在矿质土壤中短,其对环境条件变化的响应迅速^[7],因此,森林凋落物溶出的DOM进入土壤即植物中的养分回迁至土壤的过程,森林凋落物的碳归还还是森林碳循环的重要环节。但是,由于来源不同的DOM结构组成与化学性质存在差异,影响着土壤有机碳的周转:异养生物可直接利用养分含量较高的低分子量可溶性有机质使土壤碳固定,而存在于森林生态系统中的高分子量有机质较难分解,对土壤碳的固定贡献较小^[8]。因此,作为联系森林生态系统中植物群落与土壤的载体,森林凋落物的分解影响着DOM向土壤层的迁移过程,进而影响土壤固碳潜力与速率^[9]。

帽儿山地区地处中温带,气候类型属温带大陆性季风气候,冬季寒冷而干燥^[10],同时该地区大量营造人工林,林下微生物种类和数量较天然林少,森林凋落物的分解受到很大程度的制约,使得该地区森林凋落物量进一步增加。研究表明,森林凋落物的分解是陆地生态系统形成土壤有机质、有机养分矿化以及碳平衡的重要环节^[11-12],然而其过程通常非常缓慢,促进森林凋落物的分解是减少森林凋落物量的有效手段,同时也能促进DOM的释放及其在森林土壤中的循环与转化。

习惯上,DOM的浓度通常用DOC来衡量^[13]。由于凋落物质量以及分解过程中养分释放动态存在差异,凋落物种类可对其DOC含量以及分解产生促进和抑制效应,同时也包括无显著影响。陈子豪等^[14]对土壤DOC浓度如何响应川西亚高山不同森林类型凋落物输入的季节变化的研究表明,土壤DOC浓度在3—6月降低、在6—9月升高。通过改变凋落物量,王晓峰等^[15]发现杉木(*Cunninghamia lanceolata*)凋落物添加对土壤有机碳分解产生显著激发效应,但对土壤DOC并无显著影响。张晓鹏等^[16]通过室内培养润楠(*Machilus pingii*)、栲(*Castanopsis platyacantha*)和木荷(*Schima sinensis*)凋落物及其混合物得出,凋落物分解率与土壤DOC在不同培养时期具有不同的相关性。

近年来,国内外有关森林凋落物的调控技术方法^[17-18]、凋落物量的影响因素与动态变化^[19-21]以及不同组分对凋落物分解的影响^[22-26]等方面均有报道,且关于凋落物分解的研究多为模拟野外生态系统条件下进

行,但对于在森林凋落物野外分解作用下其 DOC 含量变化的研究相对较少。为了解野外自然条件下施加降解剂的森林凋落物 DOC 含量随降解时间变化的规律,以及不同降解剂对不同类型凋落物降解模式的异同,本研究选取经降解剂处理不同时期与未施加降解剂的胡桃楸 (*Juglans mandshurica*)、兴安落叶松 (*Larix gmelinii*) 以及胡桃楸-兴安落叶松混合凋落物基质为研究材料,分析野外条件下经降解剂处理的凋落物基质在不同时期的分解动态,探究降解剂对不同类型凋落物 DOC 含量的影响并比较经不同降解剂处理后各凋落物基质的降解模式异同,为帽儿山地区森林凋落物分解及碳管理提供科学依据。

1 试验地概况

凋落物降解试验区位于黑龙江省尚志市东北林业大学帽儿山实验林场,林场地理坐标为 45°20′—45°25′N, 127°30′—127°34′E, 平均海拔 300 m, 属中温带大陆性季风气候。林场年均气温 2.8 °C, 1 月平均气温 -19.6 °C, 7 月平均温度 20.9 °C, 无霜期 120—140 d; 年平均降水量 723 mm, 年平均蒸发量 1094 mm; 地带性土壤为暗棕色森林土, 平均厚度 40—45 cm, 腐殖质层平均厚度为 10 cm。林场植被属长白山植物区系, 是由地带性顶级植被阔叶红松 (*Pinus koraiensis*) 林经人为干扰破坏后形成的较典型的东北东部天然次生林区, 主要林分有水曲柳 (*Fraxinus mandshurica*) 林、蒙古栎 (*Querus mongolica*) 林、白桦 (*Betula platyphylla*) 林、山杨 (*Populus davidiana*) 林、杂木林等^[10], 境内还包含一定面积的兴安落叶松人工林、红松人工林和樟子松 (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*) 人工林。其中, 兴安落叶松人工林地表枯落叶很厚, 其凋落物量是各树种林分类型中最大的。

2 研究方法

2.1 样地设置和样品采集

试验林分为东北林业大学帽儿山实验林场区域内的胡桃楸、兴安落叶松人工纯林及其人工混交林, 地理坐标分别为 45°17′47″—45°17′50″N, 127°32′22″—127°32′27″E、45°17′33″—45°17′50″N, 127°31′11″—127°32′32″E 和 45°17′44″—45°17′45″N, 127°32′14″—127°32′25″E。分别在每个林分内设置 20 m × 20 m 标准地 3 个, 每个标准地随机选取 9 个 1 m × 1 m 小样方, 即野外降解试验点。

凋落物样品于降解试验前采集于上述样地内。

2.2 凋落物袋放置

将采集的凋落物样品于 80 °C 烘干至恒重, 准确称取 10 g 样品, 装进大小为 10 cm × 15 cm、孔径为 0.17 mm 的尼龙网袋中。将凋落物样袋按林型分别放置于设置好的各小样方内, 同时将对照凋落物袋随机放置于小样方中。

2.3 降解剂制备

本研究选取前期分离出的 2 株纤维素高效降解真菌 A2 (*Peniophora intranata*) 与 A4 (*Sarocladium strictum*) 作为降解剂制备菌种^[27]。从保藏在 4 °C 冰箱中的固体斜面培养基上将 2 株菌分别接种到马铃薯葡萄糖琼脂培养基 (PDA) 平板上, 于 28 °C 恒温培养, 在无菌条件下用直径 6 mm 的打孔器在长满菌丝的平板上打孔, 得到纤维素降解菌的菌丝菌饼, 将 40 个真菌菌饼接入盛有 400 mL 麦芽浸粉液体培养基^[28]的三角瓶中, 28 °C 条件下 180 r/min 振荡培养 5 d, 用灭菌纱布过滤后得到 2 种纤维素降解单一菌剂。通过 2 种单一菌剂等体积混合得到混合菌剂^[29]。菌株 A2、A4 制得的单一菌剂分别记为 A 菌剂和 B 菌剂, 由 2 菌株混合制得菌剂记为 C 菌剂。

2.4 降解剂喷洒与样品回收

将 3 种纤维素降解菌剂均匀喷洒到放置于小样方内的凋落物样袋上。3 种林型的每个标准地均作相同处理。

野外降解试验共持续 6 个月, 于喷洒纤维素降解菌剂后每月采集菌剂处理和未作处理 (对照) 的凋落物

样袋,样品经 80 °C 烘干至恒重后粉碎过 40 目筛。

2.5 凋落物基质可溶性有机碳测定

采用水浸提法提取凋落物基质样品中 DOC^[30]。称取 1 g 凋落物样品于 50 mL 离心管中,加入 30 mL 去离子水,在 200 r/min 条件下充分振荡 30 min,混匀后经 8000 r/min 离心 10 min,再用 0.22 μm 的醋酸纤维滤膜过滤,最终得到凋落物基质样品浸出液,于-20 °C 条件下保存。

使用碳氮分析仪测定凋落物基质样品浸出液可溶性有机碳含量。

凋落物样品 DOC 含量根据下式进行转换:

$$\text{DOC} = \text{DOC}_{\text{实测}} \times C \times \frac{30}{1000}$$

式中,DOC_{实测}为 DOC 含量实测值(mg/g),DOC 为 DOC 实际含量(mg/g),C 为稀释倍数。

2.6 数据处理

试验数据用 Excel 2016 软件整理后,用 DPS 软件进行数据分析,用多重比较法(LSD)比较差异显著性,采用配对样本 *t* 检验比较不同纤维素降解菌剂对不同类型凋落物降解能力以及降解模式的异同,图形制作使用 Origin 2018 软件。

3 结果与分析

3.1 不同降解剂对 3 种凋落物基质中可溶性有机碳的影响

3.1.1 不同菌剂对胡桃楸基质中可溶性有机碳的影响

由图 1 所示,随降解时间的延长,胡桃楸基质中的 DOC 含量总体呈下降趋势,且伴随一定的波动性。在野外降解最初的 3 个月,实验组 DOC 含量与对照组差异均不显著($P>0.05$);在试验的第 4 个月,施加 B 菌剂和 C 菌剂的胡桃楸基质 DOC 含量显著低于对照组($P<0.05$);在降解期间的最后 2 个月,经 A、B、C 菌剂处理后的凋落物基质 DOC 含量均显著低于对照组($P<0.05$),至野外降解结束,与对照相比分别减少了 24.26%、13.04%、28.10%。

对于 A 菌剂处理后的胡桃楸基质,从野外降解的第 2 个月起,其 DOC 含量开始出现明显下降。具体表现为:降解的最后 2 个月基质 DOC 含量显著低于第 2—4 个月($P<0.05$),第 2—4 个月基质 DOC 含量显著低于降解最初的 1 个月($P<0.05$);施加 B 菌剂和 C 菌剂的胡桃楸基质 DOC 含量在降解 4—6 个月后显著低于第 2—3 个月($P<0.05$),第 2—3 个月 DOC 含量显著低于降解最初的 1 个月($P<0.05$)。

3.1.2 不同菌剂对落叶松基质中可溶性有机碳的影响

由图 2 可知,对于落叶松基质,其 DOC 含量随着时间的延长亦呈下降趋势,与胡桃楸基质相比,其下降幅度相对较小,但亦存在一定的波动。在试验的第 1 个月,3 个实验组与对照组间均无显著差异;试验的第 2 个月起,经 B 菌剂和 C 菌剂处理后的实验组 DOC 含量与对照组相比分别表现出显著性差异($P<0.05$),其中,当降解进行 2 个月时,施加 C 菌剂的实验组 DOC 含量与对照组相比减少了 31.12%;施加 A 菌剂的实验组仅在第 5 个月和第 6 个月与对照组相比有显著性差异($P<0.05$)。

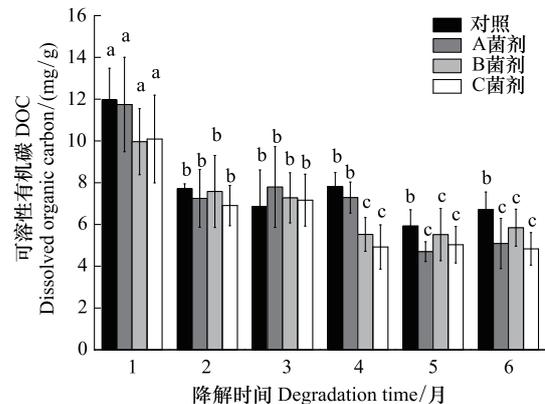


图 1 不同菌剂处理下胡桃楸基质 DOC 含量变化

Fig.1 Changes of DOC content in *Juglans mandshurica* substrate under different fungal agent treatments

施加处理的差异用小写字母表示,不同字母表示差异显著 ($P<0.05$);A 菌剂和 B 菌剂分别为菌株 A2、A4 制得的单一菌剂,C 菌剂为 A2、A4 菌株混合制得;DOC: 可溶性有机碳 Dissolved organic carbon

3.1.3 不同菌剂对混合基质中可溶性有机碳的影响

不同类型凋落物基质中,随降解时间的增加,混合基质 DOC 含量整体下降幅度相比胡桃楸和兴安落叶松基质均更大(图 3)。结合落叶松基质的试验结果,胡桃楸基质的添加使混合后基质 DOC 含量下降幅度增大,说明阔叶凋落物与针叶凋落物在分解过程中的相互作用促进了 DOC 含量的下降。在降解试验的第 2—3 个月,经 A 菌剂处理的混合基质 DOC 含量显著低于降解最初的 1 个月($P < 0.05$),第 4—6 个月基质 DOC 含量显著低于第 2—3 个月;在试验的第 3 个月,施加 B 菌剂的凋落物 DOC 含量显著低于降解最初的 2 个月($P < 0.05$),第 4—6 个月凋落物 DOC 含量显著低于第 3 个月($P < 0.05$);在整个降解期间,除第 3 个月外,施加 C 菌剂的凋落物 DOC 含量均显著低于降解最初的 1 个月($P < 0.05$)。

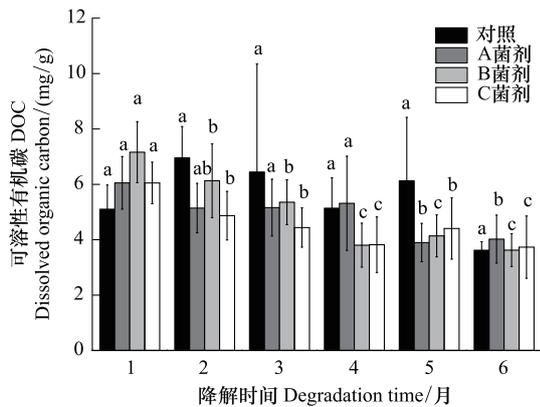


图 2 不同菌剂处理下落叶松基质 DOC 含量变化

Fig.2 Changes of DOC content in *Larix gmelinii* substrate under different fungal agent treatments

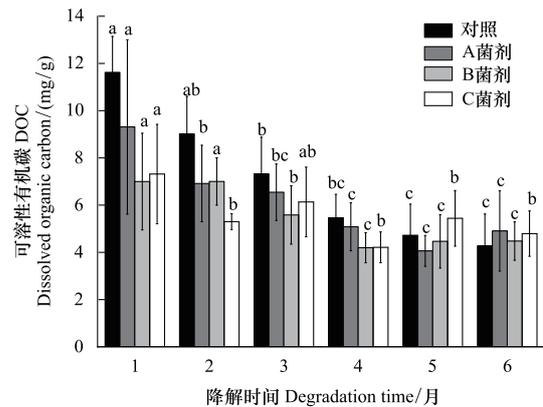


图 3 不同菌剂处理下混合基质 DOC 含量变化

Fig.3 Changes of DOC content in mixed substrate under different fungal agent treatments

3.2 不同降解剂对 3 种凋落物基质降解能力与降解模式比较

不同降解剂处理后的 3 种凋落物基质 DOC 含量之间存在一定的相关性(表 1)。对于胡桃楸基质,经 C 菌剂处理的实验组 DOC 含量显著低于经 A 菌剂与 B 菌剂处理的实验组;对于落叶松基质,经 C 菌剂处理的实验组 DOC 含量显著低于经 B 菌剂处理的实验组;对于混合基质,施加 C 菌剂的实验组 DOC 含量显著低于施加 A 菌剂的实验组。并且,以上 4 组 DOC 含量两两之间呈极显著正相关($P < 0.01$),而另外 2 组组间差异与相关关系均不显著。

表 1 相同降解阶段不同降解剂配对样本 t 检验

Table 1 Paired sample t-test of different fungal agents at the same period of degradation

样本 Sample	配对差值 Pairing difference				t	df	P (two tails)	相关性 Relevance	显著性 Significance	
	平均值 Average	标准差 Standard deviation	标准差 平均值 Mean value of standard deviation	差值 95%置信区间 95% confidence interval of difference						
				下限 Lower limit						上限 Upper limit
J A-C	0.7495	2.1330	0.3180	0.1087	1.3904	2.357	44	0.023	0.672	0.000
J B-C	0.4601	1.5984	0.2175	0.0238	0.8963	2.115	53	0.039	0.720	0.000
L A-C	0.3552	1.6139	0.2217	-0.0897	0.8000	1.602	52	0.115	0.146	0.297
L B-C	0.4851	1.4813	0.2035	0.0768	0.8933	2.384	52	0.021	0.468	0.000
M A-C	0.6056	2.0322	0.2766	0.0509	1.1603	2.190	53	0.033	0.591	0.000
M B-C	-0.0933	2.1244	0.2918	-0.6789	0.4922	-0.320	52	0.750	0.127	0.366

J、L 和 M 分别表示胡桃楸、兴安落叶松以及胡桃楸-兴安落叶松分解基质;

J, L and M represent *Juglans mandshurica*, *Larix gmelinii* and their mixed decomposition substrates, respectively;

A、B、C 分别表示 A 菌剂、B 菌剂、C 菌剂,A 菌剂和 B 菌剂为菌剂 A2 和 A4 制得,C 菌剂为 A2、A4 菌株混合制得

4 讨论

4.1 不同降解剂对 3 种凋落物基质中可溶性有机碳的影响

在自然环境下,凋落物分解过程中最初的失重是由于可溶性化合物的浸出^[31],这与本研究的结果一致。无论是对照组还是实验组,野外降解其他时期不同类型的 3 种凋落物基质 DOC 含量均显著低于降解的第 1 个月。从分解产物中有机成分的生物可利用性来看,在凋落物分解的初始阶段,凋落物中水溶性组分以及易分解的碳水化合物优先被分解,而在中后期分解速率明显减慢,主要是与木质素、纤维素等难分解有机物的积累有关,抑制了凋落物的分解,分别表现为难分解有机物在微生物的作用下降解以及残余物质的腐殖化。由此可见,从地被物层初始淋溶出来的可溶性有机质与其分解的自身限制因素无关^[32]。凋落物基质 DOC 含量在降解进行 4 个月后开始显著下降,这个结果是由于降解试验的第 4 个月处于夏季,随夏季气温升高土壤表面温度也升高,凋落物接触到的微生物活性增强,使凋落物基质的分解加速,而且夏季降雨偏多,促进了凋落物中 DOM 向土壤层迁移,从而造成 DOC 含量的下降。这与 Huang 和 Schoenau^[33]对加拿大白杨(*Populus tremuloides*)林凋落物 DOC 动态规律的研究结果表现出相同的趋势,即 DOC 浓度随凋落物分解程度增加而降低,Kaiser 等^[34]与 Cleveland 等^[35]的研究结果均与此一致。

在本试验中,3 种不同类型的凋落物基质 DOC 含量随降解时间的变化均有一定的波动。李美娟等^[36]对比油松(*Pinus tabulaeformis*)和兴安落叶松凋落物分解实验发现二者在分解不同阶段 DOC 在数值上均呈现不同程度的波动,这一结果是由于在凋落物分解的几个阶段发生了不同的反应:一是可溶性成分析出;二是在微生物作用下,使凋落物中纤维素、半纤维素、木质素以及单宁等不易分解的组成成分发生的氧化反应;三是物理过程以及生物破碎的生物化学过程^[37-38]。胡桃楸以及落叶松林下凋落物的分解所经历的过程与之类似,吸附富集与微生物降解交错进行,复杂的生化反应导致凋落物 DOC 含量出现了波动。

来自不同树种的两种凋落物混合在一起分解时,可使其分解速率与养分释放得到加强,并且这种相互作用主要是通过环境中的微生物来调节的^[39-40],这与本研究发现混合凋落物基质 DOC 含量在降解剂处理后随降解时间增加而下降的幅度较阔叶和针叶基质大的结果一致。在自然环境中,针阔混交林的凋落量较针叶和阔叶人工纯林大,且碳归还量相对较高,具有良好的碳吸存能力^[41]。另外,潘思涵等^[42]的研究表明森林凋落物在分解过程中的分解速率与其释放的 DOC 量呈极显著正相关,即分解速率越快,凋落物释放的 DOC 量就越大。并且,与针叶凋落物相比,阔叶凋落物中可溶解成分含量较高,在凋落物降解过程中水溶性组分和小分子碳水化合物被优先降解,因此本研究中阔叶凋落物的分解速率决定了其 DOC 释放量要大于针叶凋落物,与 Kaiser 等^[34]的研究结果一致。

4.2 不同降解剂对 3 种凋落物基质降解能力与降解模式比较

真菌对于森林凋落物的分解起重要作用,并且该过程十分复杂,往往需要多种真菌共同协调发生^[43]。纤维素降解真菌的菌丝可以穿过森林凋落物的角质层与木质层,在其自身酶系作用下将凋落物中的纤维素大分子逐步分解为简单的葡萄糖小分子,因此使凋落物的降解加速。本研究中制备的 C 菌剂系纤维素高效降解真菌 *Peniophora intranata* 与 *Sarocladium strictum* 混合而得,2 菌种组合具有协同降解凋落物的作用,较单一菌种制得菌剂降解能力强,与以往研究结果一致^[44-46],从而促进了 DOC 的释放。在以胡桃楸为基质的实验组中,经 C 菌剂处理后的凋落物 DOC 含量显著低于经 A 菌剂与 B 菌剂处理后的,而对于落叶松基质以及混合基质却没有表现出相同的显著性,这可能是由于针叶凋落物表面相对较厚的角质层使真菌更难穿过,并且组成角质层的主要成分为角质及蜡质,分别为不饱和度很高的生物高聚物与脂溶性物质组成的混合物^[43],两者均不溶于水,所以无法使其 DOC 含量发生较大变化。这与多数研究的观点一致,即针叶树种凋落物的分解在其组成成分、内含物与化学特性的作用下,通常要比阔叶树种凋落物分解困难^[24,37]。另外,本研究中采用的降解剂由纤维素降解菌制备,主要针对凋落物中的纤维素组分起降解作用,而对凋落物中更顽固的木质素组分的降解存在限制性。因此,后续相关研究在使用降解剂进行凋落物降解时可以考虑引入木质素降解真

菌,结合凋落物基质化学性质构建木质纤维素降解复合菌系,从而提高凋落物降解率。

5 结论

综合来看,胡桃楸、兴安落叶松及其混合凋落物中 DOC 含量均随降解时间增加呈下降趋势,且混合凋落物 DOC 含量相较于胡桃楸、落叶松凋落物 DOC 含量下降幅度更大,DOC 释放能力更强。然而,目前针对不同树种凋落物混合对其分解的研究并未得到一致的结论,包括混合可加速分解^[47-48]、抑制分解^[49-50]以及对分解无显著影响^[51-52]。因此,混合凋落物降解机制及其 DOC 释放的生物生态机理与驱动因素仍有待更长期和深入的研究。

不同降解剂处理同种凋落物、同种降解剂处理不同类型凋落物均表现出不同效果,经混合菌剂降解后的胡桃楸凋落物基质 DOC 含量相较于 2 种单一菌剂降解后的胡桃楸凋落物基质 DOC 含量更低,然而经混合菌剂降解后的兴安落叶松凋落物与胡桃楸-兴安落叶松凋落物的 DOC 含量未表现出相同的显著性。因此,当利用菌剂进行森林凋落物降解时,要根据不同类别凋落物化学性质以及对凋落物中不同组分具针对性降解能力的真菌种属,选择适合的调配方法,从而达到更高效的降解。

参考文献(References):

- [1] 黄泽春, 陈同斌, 雷梅. 陆地生态系统中水溶性有机质的环境效应. 生态学报, 2002, 22(2): 259-269.
- [2] McDowell W H, Wood T. Podzolization: soil processes control dissolved organic carbon concentrations in stream water. *Soil Science*, 1984, 137(1): 23-32.
- [3] 杨玉盛, 林瑞余, 李庭波, 董彬, 王小国, 郭剑芬. 森林凋落物淋溶中的溶解有机物与紫外-可见光谱特征. 热带亚热带植物学报, 2004, 12(2): 124-128.
- [4] 杨玉盛, 郭剑芬, 陈光水, 陈银秀, 于占源, 董彬, 刘东霞. 森林生态系统 DOM 的来源、特性及流动. 生态学报, 2003, 23(3): 547-558.
- [5] Huang W Z, Schoenau J J. Fluxes of water-soluble nitrogen and phosphorus in the forest floor and surface mineral soil of a boreal aspen stand. *Geoderma*, 1998, 81(3/4): 251-264.
- [6] Michalzik B, Matzner E. Dynamics of dissolved organic nitrogen and carbon in a Central European Norway spruce ecosystem. *European Journal of Soil Science*, 1999, 50(4): 579-590.
- [7] 杨万勤, 邓仁菊, 张健. 森林凋落物分解及其对全球气候变化的响应. 应用生态学报, 2007, 18(12): 2889-2895.
- [8] 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. *Applied Soil Ecology*, 2011, 49: 224-233.
- [9] Fröberg M, Kleja D B, Hagedorn F. The contribution of fresh litter to dissolved organic carbon leached from a coniferous forest floor. *European Journal of Soil Science*, 2007, 58(1): 108-114.
- [10] 东北林学院. 帽儿山实验林场基础资料. 哈尔滨: 东北林学院, 1984.
- [11] Austin A T, Ballaré C L. Dual role of lignin in plant litter decomposition in terrestrial ecosystems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010, 107(10): 4618-4622.
- [12] Wu H T, Lu X G, Yang Q, Jiang M, Tong S Z. Early-stage litter decomposition and its influencing factors in the wetland of the Sanjiang Plain, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(10): 4027-4035.
- [13] 李廷强, 杨肖娥. 土壤中水溶性有机质及其对重金属化学与生物行为的影响. 应用生态学报, 2004, 15(6): 1083-1087.
- [14] 陈子豪, 焦泽彬, 刘瑶, 徐振锋, 谭波, 张丽. 凋落物季节性输入对川西亚高山森林土壤活性有机碳的影响. 应用与环境生物学报, 2021, 27(3): 594-600.
- [15] 王晓峰, 汪思龙, 张伟东. 杉木凋落物对土壤有机碳分解及微生物生物量碳的影响. 应用生态学报, 2013, 24(9): 2393-2398.
- [16] 张晓鹏, 潘开文, 王进闯, 陈其兵. 栲-木荷林凋落叶混合分解对土壤有机碳的影响. 生态学报, 2011, 31(6): 1582-1593.
- [17] 金琳, 刘晓东, 张永福. 森林可燃物调控技术方法研究进展. 林业科学, 2012, 48(2): 155-161.
- [18] 李炳怡, 舒立福, 丁永全, 孙文国, 吴松, 李华, 王明玉, 赵凤君. 我国人工林森林可燃物特点及管理技术研究进展. 世界林业研究, 2021, 34(1): 90-95.
- [19] 于海晨, 王薇, 杜建华, 刘赵东, 陈敏斯, 王博, 刘晓东. 油松和侧柏林地表可燃物负荷量及影响因素. 北京林业大学学报, 2021, 43(6): 33-40.
- [20] 梁瀛, 李吉玫, 赵凤君, 张毓涛, 孔婷婷, 努尔古丽·马坎. 天山中部天山云杉林地表可燃物载量及其影响因素. 林业科学, 2017, 53(12): 153-160.
- [21] Collins B M, Lydersen J M, Fry D L, Wilkin K, Moody T, Stephens S L. Variability in vegetation and surface fuels across mixed-conifer-dominated landscapes with over 40 years of natural fire. *Forest Ecology and Management*, 2016, 381: 74-83

- [22] 孙思琦, 瓮岳太, 邸雪颖, 刘雪峰, 杨光. 木质素降解真菌的筛选及其对森林地表可燃物的降解效果. 中南林业科技大学学报, 2021, 41(1): 29-36.
- [23] 彭徐剑, 韩焕金. 森林地被可燃物生物降解研究概述. 森林防火, 2017, (2): 34-36.
- [24] Hobbie S E, Reich P B, Oleksyn J, Ogdahl M, Zytkowski R, Hale C, Karolewski P. Tree species effects on decomposition and forest floor dynamics in a common garden. *Ecology*, 2006, 87(9): 2288-2297.
- [25] Isaac S R, Nair M A. Biodegradation of leaf litter in the warm humid tropics of Kerala, India. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37(9): 1656-1664.
- [26] Austin A T, Vitousek P M. Precipitation, decomposition and litter decomposability of *Metrosideros polymorpha* in native forests on Hawai'i. *Journal of Ecology*, 2000, 88(1): 129-138.
- [27] 孙思琦. 纤维素高效降解菌对帽儿山三种人工林地地表可燃物降解研究[D]. 东北林业大学, 2020.
- [28] Lee H, Jang Y, Lee Y M, Lee H, Kim G H, Kim J J. Enhanced removal of PAHs by *Peniophora incarnata* and ascertainment of its novel ligninolytic enzyme genes. *Journal of Environmental Management*, 2015, 164: 10-18.
- [29] 孙思琦, 瓮岳太, 邸雪颖, 刘志华, 杨光. 纤维素高效降解真菌的筛选及其降解森林地表可燃物的效果. 林业科学, 2020, 56(8): 89-97.
- [30] Kalbitz K, Schmerwitz J, Schwesig D, Matzner E. Biodegradation of soil-derived dissolved organic matter as related to its properties. *Geoderma*, 2003, 113(3/4): 273-291.
- [31] Berg B, McClaugherty C, Johansson M B. Litter mass-loss rates in late stages of decomposition at some climatically and nutritionally different pine sites. Long-term decomposition in a Scots pine forest. VIII. *Canadian Journal of Botany*, 1993, 71(5): 680-692.
- [32] Cleveland C C, Neff J C, Townsend A R, Hood E. Composition, dynamics, and fate of leached dissolved organic matter in terrestrial ecosystems: results from a decomposition experiment. *Ecosystems*, 2004, 7(3): 275-285.
- [33] Huang W Z, Schoenau J J. Distribution of water-soluble organic carbon in an aspen forest soil. *Canadian Journal of Forest Research*, 1996, 26(7): 1266-1272.
- [34] Kaiser K, Guggenberger G, Haumaier L, Zech W. Seasonal variations in the chemical composition of dissolved organic matter in organic forest floor layer leachates of old-growth Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and European beech (*Fagus sylvatica* L.) stands in northeastern Bavaria, Germany. *Biogeochemistry*, 2001, 55(2): 103-143.
- [35] Cleveland C C, Nemergut D R, Schmidt S K, Townsend A R. Increases in soil respiration following labile carbon additions linked to rapid shifts in soil microbial community composition. *Biogeochemistry*, 2007, 82(3): 229-240.
- [36] 李美娟, 炊雯. 秦岭落叶松及油松凋落物可溶性有机碳含量及其紫外-可见光谱特征. 四川环境, 2019, 38(1): 23-28.
- [37] 李志安, 邹碧, 丁永祯, 曹裕松. 森林凋落物分解重要影响因子及其研究进展. 生态学杂志, 2004, 23(6): 77-83.
- [38] 郭剑芬, 杨玉盛, 陈光水, 林鹏, 谢锦升. 森林凋落物分解研究进展. 林业科学, 2006, 42(4): 93-100.
- [39] Blair J M, Parmelee R W, Beare M H. Decay rates, nitrogen fluxes, and decomposer communities of single- and mixed-species foliar litter. *Ecology*, 1990, 71(5): 1976-1985.
- [40] Chapman K, Whittaker J B, Heal O W. Metabolic and faunal activity in litters of tree mixtures compared with pure stands. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 1988, 24(1/3): 33-40.
- [41] 杨智杰, 陈光水, 谢锦升, 杨玉盛. 杉木、木荷纯林及其混交林凋落物量和碳归还量. 应用生态学报, 2010, 21(9): 2235-2240.
- [42] 潘思涵, 程宇琪, 杜浩, 杨宇娜, 王雨晴, 张成福. 大兴安岭森林演替过程中凋落物分解与 DOC 释放研究. 西南林业大学学报, 2019, 39(5): 75-83.
- [43] 高森, 王亚虹, 邵惠芳, 许自成, 牛路路, 陈征, 张海楸, 黄五星. 植物角质层结构组成、生物学功能及分离方法研究进展. 中国农业科技导报, 2018, 20(3): 46-54.
- [44] Osono T. Ecology of ligninolytic fungi associated with leaf litter decomposition. *Ecological Research*, 2007, 22(6): 955-974.
- [45] 杨晨. 几种真菌群落对凋落物分解及养分循环的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2016.
- [46] 冯乐, 宋福强. 外生菌根真菌与丝状真菌混合对红松凋落物降解效能的影响. 生态科学, 2011, 30(3): 315-320.
- [47] 彭徐剑. 森林地被可燃物的生物降解技术研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2012.
- [48] Wardle D A, Nilsson M C, Zackrisson O, Gallet C. Determinants of litter mixing effects in a Swedish boreal forest. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, 35(6): 827-835.
- [49] Taylor B R, Parsons W F J, Parkinson D. Decomposition of *Populstremuloides* leaf litter accelerated by addition of *Alnuscrispa* litter. *Canadian Journal of Forest Research*, 1989, 19(5): 674-679.
- [50] Li W, Pan K W, Wu N, Wang J C, Han C M, Liang X L. Effects of mixing pine and broadleaved tree/shrub litter on decomposition and N dynamics in laboratory microcosms. *Ecological Research*, 2009, 24(4): 761-769.
- [51] Hansen R A. Effects of habitat complexity and composition on a diverse litter microarthropod assemblage. *Ecology*, 2000, 81(4): 1120-1132.
- [52] Klemmedson J O. Decomposition and nutrient release from mixtures of Gambel oak and ponderosa pine leaf litter. *Forest Ecology and Management*, 1992, 47(1/4): 349-361.