

林下药用植物淋出物对红桦和杜仲枯落物分解及土壤酶活性的影响

卢玉鹏¹ 许纪元² 张晓曦² 王博雅³ 谢 博³ 刘增文^{3,4*}

¹西北农林科技大学林学院, 陕西杨凌 712100; ²西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌 712100; ³西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100; ⁴农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 陕西杨凌 712100

摘 要 林木枯落物的分解是影响养分循环和生态系统稳定的重要因素, 林药复合系统中药用植物淋出物中富含植物次生代谢物(PSM), 可能会对林木枯落物分解和土壤酶活性产生抑制作用, 检验该现象是否存在是选择林下药用植物的重要依据。该文以秦岭山区典型红桦(*Betula albo-sinensis*)和杜仲(*Eucommia ulmoides*)林及地丁草(*Corydalis bungeana*)、薄荷(*Mentha haplocalyx*)、戴菜(又名鱼腥草) (*Houttuynia cordata*)、荆芥(*Nepeta cataria*)、绞股蓝(*Gynostemma pentaphyllum*)和夏枯草(*Prunella vulgaris*) 6种常见林下药用植物为对象, 通过以药用植物茎叶淋出物(水浸提液)定期多次喷浇林木枯落物及土壤的分解试验, 研究了药用植物淋出物对林木枯落物分解、养分(C、N和P)释放和土壤酶活性的影响。结果表明: 对于红桦枯落物, 戴菜淋出物处理后半衰期和周转期分别延长了76%和4.3倍, 并抑制了C和N的释放, 绞股蓝淋出物处理后半衰期和周转期分别延长了35%和2.7倍, 并抑制了C、N和P的释放, 两种处理均抑制了7种土壤酶(蔗糖酶、羧甲基纤维素酶、 β -葡萄糖苷酶、脱氢酶、多酚氧化酶、蛋白酶和磷酸酶)活性; 对于杜仲枯落物, 戴菜淋出物处理后半衰期和周转期分别延长了1.7倍和4.2倍, 绞股蓝淋出物处理后半衰期和周转期分别延长了1倍和9倍, 两种处理均抑制了C、N和P的释放以及7种土壤酶活性。由此可见, 戴菜、绞股蓝茎叶淋出物对红桦和杜仲枯落物的分解速率、养分释放以及多种土壤酶活性均有显著抑制作用。因此, 建议在红桦和杜仲林下应尽量避免种植戴菜和绞股蓝, 或者通过降低套种密度来减轻影响。

关键词 林药复合; 植物次生代谢物; 枯落物分解; 养分释放; 土壤酶活性

引用格式: 卢玉鹏, 许纪元, 张晓曦, 王博雅, 谢博, 刘增文 (2017). 林下药用植物淋出物对红桦和杜仲枯落物分解及土壤酶活性的影响. 植物生态学报, 41, 639–649. doi: 10.17521/cjpe.2016.0350

Effects of leachate from understory medicinal plants on litter decomposition and soil enzyme activities of *Betula albo-sinensis* and *Eucommia ulmoides*

LU Yu-Peng¹, XU Ji-Yuan², ZHANG Xiao-Xi², WANG Bo-Ya³, XIE Bo³, and LIU Zeng-Wen^{3,4*}

¹College of Forestry, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; ²Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; ³College of Natural Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; and ⁴Key Laboratory for Agricultural Resources and Environmental Remediation in Loess Plateau of Agriculture Ministry of China, Yangling, Shaanxi 712100, China

Abstract

Aims Forest litter decomposition is an important factor affecting nutrient cycling and ecosystem stability. In a complex system with forest and understory medicinal plants, leachate from the medicinal plants enriched in plant secondary metabolites (PSM) may inhibit litter decomposition and soil enzyme activity of forest trees. Thus, inspection on whether or not this phenomenon exists is one important basis for selecting understory medicinal plants.

Methods In this paper, typical forest species *Betula albo-sinensis* and *Eucommia ulmoides* and six species of common medicinal plants (*Corydalis bungeana*, *Mentha haplocalyx*, *Houttuynia cordata*, *Nepeta cataria*, *Gynostemma pentaphyllum* and *Prunella vulgaris*) in Qinling Mountains area were taken as objects, and the litter decomposition experiment was carried out. The leachate (water-extraction solution) from the stems and leaves of the medicinal materials were sprayed onto the litter in order to study the effects of leachate from understory plants on forests litter decomposition, nutrient release (carbon, nitrogen and phosphorus) and soil enzyme activity.

Important findings For litter of *B. albo-sinensis*, the decomposition half-life and the turnover period were extended by 76% and 4.3 times, respectively, under *H. cordata* leachate treatment and the inhibitory effects on the release of carbon and nitrogen were also significant. While under *G. pentaphyllum* leachate treatment, the half-life

收稿日期Received: 2016-11-23 接受日期Accepted: 2017-04-05

* 通信作者Author for correspondence (E-mail: zengwenliu2003@aliyun.com)

of litter decomposition and turnover period were extended by 35% and 2.7 times, respectively, and the inhibitory effects on the release of carbon, nitrogen and phosphorus were all significant. The leachate from these two species of medicinal plants displayed significant inhibitory effects on seven kinds of soil enzymes (invertase, carboxymethyl cellulase, β -glucosidase, dehydrogenase, polyphenol oxidase, protease and phosphatase) activity. For litter of *E. ulmoides*, the decomposition half-life and the turnover period were extended by 1.7 times and 4.2 times respectively, under *H. cordata* leachate treatment; while they were extended by 1 times and 9 times respectively, under *G. pentaphyllum* leachate treatment. The leachate from these two species of medicinal plants displayed significant inhibitory effects on the release of carbon, nitrogen and phosphorus from litter decomposition and the activities of all seven kinds of soil enzymes. Therefore, results suggested that *H. cordata* and *G. pentaphyllum* should not be planted under *B. albo-sinensis* and *E. ulmoides* forests, or the interplanting density must be low to reduce the inhibitory effects of litter decomposition.

Key words compound system of forest-medicinal; plant secondary metabolites; litter decomposition; nutrients release; soil enzyme activity

Citation: Lu YP, Xu JY, Zhang XX, Wang BY, Xie B, Liu ZW (2017). Effects of leachate from understory medicinal plants on litter decomposition and soil enzyme activities of *Betula albo-sinensis* and *Eucommia ulmoides*. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 41, 639–649. doi: 10.17521/cjpe.2016.0350

红桦 (*Betula albo-sinensis*) 和杜仲 (*Eucommia ulmoides*) 是秦岭山区以天然林或人工林广泛分布的典型森林树种(郭垚鑫等, 2011; 杨明琰等, 2012), 但是, 许多红桦、杜仲纯林生长后期往往存在衰退、土壤退化等问题(陈竹君等, 2006; 林玥等, 2008), 不但生态效益下降, 而且经济收入减少。为改善这种状况, 利用林药共生原理, 在林下种植药用植物, 发展林药复合种植是一种互利共赢的经营模式(刘晓鹰和程颂, 1992)。但是, 目前的相关研究主要集中在林药复合的经济效益、栽培管理技术和植物生长生理等方面(王继永等, 2003; 吴统贵等, 2011), 很少涉及林药种间关系问题。

在林药复合经营中, 一般遵循的原则是“林木为主、以林护药、以药养林”, 而在林药复合生态系统中, 枯落物分解对整个生态系统中养分循环、土壤肥力恢复以及森林生态系统稳定维持有很大影响(Berg, 2000; Koukol *et al.*, 2006)。因此, 在选择林下药用植物时, 林木枯落物分解是否会受到影响是一个必须要考虑的重要因素。枯落物分解是一个有机质分解的过程, 可分为淋溶作用、自然粉碎作用和代谢作用3个阶段(Tian & Takeishi, 2002), 枯落物分解前期主要是通过腐食动物啃食、细菌真菌的定殖对易分解物质(纤维素、半纤维素和果胶等)的分解, 密切关联的土壤酶包括淀粉酶、蔗糖酶和纤维素酶等; 分解后期主要是真菌对顽固物(木质素等)的分解, 密切关联的土壤酶包括木聚糖酶和多酚氧化酶等(张瑞清等, 2008; 严海元等, 2010)。进一步研究表明, 影响枯落物分解过程中碳(C)释放的土壤酶主要

有淀粉酶、蔗糖酶和纤维素酶等水解酶类以及脱氢酶、过氧化物酶和多酚氧化酶等氧化还原酶类, 而影响枯落物氮(N)、磷(P)释放的关键是微生物自身养分需求及周围环境中N、P的含量(胡霞等, 2012), 发挥主要作用的土壤酶是蛋白酶和磷酸酶。

因此, 在特定气候条件下, 枯落物分解主要与其基质质量和土壤性质有关(Chomel *et al.*, 2016), 而药用植物淋出物所含有的次生代谢物(PSM)可能会对土壤生物和酶活性产生影响, 进而影响林木枯落物分解。有研究表明, PSM中的某些生物碱类可以通过影响土壤动物和微生物活动, 降低枯落物分解速率(Purahong & Hyde, 2011); 单宁可以与蛋白质或金属离子形成不溶性的聚合物, 抑制有机质的进一步分解, 或对土壤生物产生毒害从而影响了其取食枯落物碎屑, 并对土壤酶活性也有抑制作用(Hättenschwiler & Vitousek, 2000); 酚类物质可以抑制土壤中真菌的定殖、孢子萌发和菌丝伸长并影响细菌的粘附以及膜蛋白的转运(Mierziak *et al.*, 2014), 进而影响枯落物分解。然而, 目前关于该方面的研究集中在来自植物自身或其枯落物的内源PSM(Chomel *et al.*, 2014)或人工添加某种特定PSM(Hättenschwiler & Vitousek, 2000)对枯落物分解的影响, 而很少关注在自然环境中普遍存在且种类组成更加复杂的外源PSM(Zhang *et al.*, 2016)的影响。

在林药复合生态系统中, 林下药用植物释放出的PSM, 可能会通过影响土壤性质, 改变枯落物分解的外部环境条件, 进而影响枯落物分解与养分释放。为验证该假设, 本文以秦岭红桦和杜仲林以及当

地6种常见林下药用植物为对象, 通过以药用植物淋出物(以水浸提法获得)喷浇林木枯落物的室内控制分解试验研究, 分析林下药用植物对红桦和杜仲林木枯落物分解及土壤酶活性的影响, 从而为秦岭山区的林药复合模式(药用植物种类)选择提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 样品采集与处理

研究区位于陕西秦岭山区周至县厚畛子林场镇安沟流域境内, 地理位置33.75° N, 107.75° E, 地属秦岭中段北坡, 暖温带湿润气候, 海拔1 500–2 500 m, 平均气温7.4 °C, 年降水量900 mm, 该区域分布有丰富的天然和人工林植被及大量的药用植物资源, 土壤属山地褐土。于2014年10–11月在研究区采集典型成熟的26年红桦和24年杜仲林当年凋落的完好枯落物, 自然风干后保存备用。于2015年7–8月在研究区采集林下常见药用植物地丁草(*Corydalis bungeana*)、薄荷(*Mentha haplocalyx*)、蕺菜(又名鱼腥草)(*Houttuynia cordata*)、荆芥(*Nepeta cataria*)、绞股蓝(*Gynostemma pentaphyllum*)和夏枯草(*Prunella vulgaris*)的地上茎叶样品, 风干后保存。同时采集当地无林荒地的表层(0–10 cm)土壤, 清除根系、石块等杂物, 直接以鲜土过5 mm土壤筛后充分混合, 适当风干(以便于试验过程中控制水分)备用。

1.2 药用植物茎叶淋出物制备

将不同药用植物茎叶样品粉碎成0.5 cm长的碎屑, 分别用蒸馏水浸泡48 h以制成质量浓度为80 mg·mL⁻¹(即相当于8 g植物样品浸泡于100 mL蒸馏水)的浸提液获得淋出物(浓度基于当地林下药用植物最大生物量和最大降雨量确定), 经离心过滤后装入棕色瓶中, 4 °C低温冷藏待用。

1.3 林木枯落物分解试验

试验在西北农林科技大学校内实验室进行。将林木枯落物统一剪碎成长度为1.5 cm左右的碎片, 置于60 °C下烘干。每种枯落物准确称量6.00 g干样分别装入规格为10 cm × 20 cm、孔径为0.5 mm的尼龙网袋中, 红桦和杜仲枯落物各7个处理(6种药用植物为6个处理, 加上一个对照), 每个处理15袋。分别称取2.85 kg的制备好的过筛土壤, 装入20 cm × 40 cm × 20 cm规格的塑料培养钵中, 将装有同一种枯落物的分解袋5个分别斜插埋入土壤, 保证分解

袋与土壤均匀接触, 每种枯落物30个培养钵。以喷浇相同药用植物淋出物为1个处理, 每个处理3个重复, 对照喷浇蒸馏水。埋设完毕后, 每个培养钵用喷雾器分别均匀喷浇相应的药用植物茎叶淋出物150 mL, 对照喷以等量蒸馏水, 统一调节土壤湿度(根据预先测定土壤田间持水量, 此时土壤湿度为田间持水量的60%)。置于室温下(20–25 °C)进行分解培养, 每隔2周喷浇一次淋出物(1 kg土壤50 mL), 保持土壤湿度基本不变(根据预试验结果, 以该比例喷浇淋出物土壤湿度基本不变), 连续培养6个月终止。

1.4 样品测定

在分解试验过程中, 分5次回收分解袋(回收时间分别为分解开始后第1、2、3、5和6个月时), 每个处理从3个培养钵中分别回收1袋, 作为3个重复; 同时分3次回收土壤样本(回收时间分别为分解开始后第1、3和6个月时, 每次500 g)。取出枯落物分解残余物置于0.15 mm土壤筛中仔细用水除去表面杂物, 置于60 °C下烘干后, 测定分解残留量及C、N、P含量。其中C含量采用重铬酸钾容量法-外加热法测定; N、P含量采用H₂SO₄-H₂O₂混合液消煮后分别以连续流动分析仪(AA3, Bran + Luebbe, Hamburg, German)和紫外分光光度计(UV-2450, Shimadzu, Kyoto, Japan)(钼钼黄比色法)测定。蔗糖酶和羧甲基纤维素酶活性采用3,5-二硝基水杨酸比色法测定, 活性以葡萄糖(每克干土每天产生的葡萄糖毫克数)(mg·g⁻¹·d⁻¹)表示; β-葡萄糖苷酶活性采用硝基酚比色法测定, 活性以硝基酚(mg·g⁻¹·d⁻¹)表示; 脱氢酶采用三苯基四唑氯化物比色法测定, 活性以甲臞(mg·g⁻¹·d⁻¹)表示; 多酚氧化酶活性采用邻苯三酚比色法测定, 活性以红紫精(mg·g⁻¹·d⁻¹)表示; 蛋白酶活性采用茚三酮比色法测定, 活性以氨基氮(mg·g⁻¹·d⁻¹)表示; 磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法测定, 活性以P₂O₅(mg·g⁻¹·d⁻¹)表示。

同时, 将制备好的药用植物淋出物进行二重过滤: 第一重用定量滤纸过滤; 第二重用滤元单位为0.45 μm的滤膜过滤, 得到不含微生物的淋出物。再用乙酸乙酯萃取滤液, 萃取3次, 最后合并萃取液, 除水(用无水Na₂SO₄过夜处理)后浓缩除去乙酸乙酯, 定性分析所含的次生代谢物质(鄢彩霞等, 2014)。

检测仪器条件: 气相色谱质谱联用仪(GCMS-QP 2010 Ultra, Shimadzu, Kyoto, Japan), 色谱柱:

Stabilwas-DA 30 mm × 0.25 mm × 0.25 μm石英毛细管柱。起始温度50 °C, 保持3 min, 以10 °C·min⁻¹升温至300 °C, 保持10 min, 进样量1 μL。载气为氦气(1 mL·min⁻¹), 进样器温度为230.00 °C, 接口温度为280.00 °C。EI电离方式, 电子能量70 eV, 用谱图库(NIST08和NIST08s)检索确定各种化合物。

1.5 数据处理

枯落物分解速率采用SigmaPlot 12.5软件, 依据改良的指数衰减模型 $R = ae^{-bt} + ce^{-dt}$ (式中: R 为枯落物分解残余率, a 、 b 、 c 和 d 为模型参数, t 为分解进行时间)。对同种处理枯落物残留量(换算为残余率)进行拟合, 计算分解周转期(干物质分解95%的时间, $T_{0.95}$)和分解半衰期(干物质分解50%的时间, $T_{0.50}$)。同时, 采用SPSS 20软件对不同处理进行单因素方差分析, 多重比较采用最小显著差异法(LSD) ($\alpha = 0.05$); 采用SPSS 20软件对同种处理养分分解试验前期、中期和后期残留量进行配对样本 t 检验; 采用SigmaPlot 12.5软件绘图。

2 结果

2.1 林木枯落物分解初始养分含量

据测定, 红桦和杜仲枯落物初始C含量均超过400 mg·g⁻¹, 且红桦枯落物的N和P含量显著高于杜仲(表1)。根据Manzoni等(2010)的研究, 分解者对枯落物C/N需求为9.33–17.50, C/P需求为51.67–266.67, N/P需求为5.54–15.24。据此, 红桦与杜仲枯落物初始C/N略大于此范围, C/P略小于此范围(杜仲C/P处于范围边缘), N/P小于此范围, 说明红桦、杜仲枯落物的基质质量较差并不利于分解。

2.2 药用植物淋出物对林木枯落物分解速率的影响

根据林木枯落物残留量变化, 建立分解模型并计算出枯落物分解周转期(整体分解)和半衰期(前期分解)(表2)。其中, 对于红桦枯落物, 藜芦淋出物处理的半衰期和周转期分别延长76%和4.3倍, 绞股蓝淋出物处理的半衰期和周转期分别延长35%和2.7倍, 可见, 二者对红桦枯落物的前期分解和整体分

表1 红桦与杜仲枯落物初始养分含量(平均值±标准偏差)

Table 1 Initial nutrient contents of *Betula albo-sinensis* and *Eucommia ulmoides* litters (mean ± SD)

枯落物来源 Litter source	C (mg·g ⁻¹)	N (mg·g ⁻¹)	P (mg·g ⁻¹)	C/N	C/P	N/P
红桦 <i>B. albo-sinensis</i>	407.69 ± 8.43 ^a	20.35 ± 0.87 ^a	8.61 ± 0.12 ^a	20.03	47.35	2.36
杜仲 <i>E. ulmoides</i>	408.65 ± 4.25 ^a	15.52 ± 0.69 ^b	6.90 ± 0.15 ^b	26.34	59.19	2.25

同列不同小写字母表示显著差异($p < 0.05$)。

Different lowercase letters in same column indicate significant differences ($p < 0.05$).

表2 不同处理对红桦和杜仲林木枯落物分解速率的影响

Table 2 Effects of different treatments on litter decomposition rates of *Betula albo-sinensis* and *Eucommia ulmoides*

枯落物 Litters	药用植物 Medicinal plants	枯落物分解模型 Model of litter decomposition	R^2	$T_{0.95}$ (a)	$T_{0.50}$ (a)
红桦 <i>B. albo-sinensis</i>	地丁草 <i>Corydalis bungeana</i>	$R = 0.3194e^{-7.2672t} + 0.6801e^{-0.2996t}$	0.965 9	8.712 3 ^{bc}	1.028 0 ^a
	薄荷 <i>Mentha haplocalyx</i>	$R = 0.2870e^{-12.9332t} + 0.7200e^{-0.4001t}$	0.961 3	6.666 4 ^{bc}	0.911 4 ^a
	藜芦 <i>Houttuynia cordata</i>	$R = 0.4209e^{-9.7308t} + 0.5834e^{-0.1114t}$	0.935 1	22.054 3 ^a	1.384 8 ^a
	荆芥 <i>Nepeta cataria</i>	$R = 0.2370e^{-11.4407t} + 0.7674e^{-0.3988t}$	0.952 7	6.848 0 ^{bc}	1.074 2 ^a
	绞股蓝 <i>Gynostemma pentaphyllum</i>	$R = 0.4270e^{-7.2586t} + 0.5936e^{-0.1614t}$	0.937 9	15.329 5 ^b	1.065 5 ^a
	夏枯草 <i>Prunella vulgaris</i>	$R = 0.1490e^{-13.7989t} + 0.8500e^{-0.564t}$	0.963 3	5.023 4 ^{bc}	0.940 8 ^a
	CK	$R = 0.1411e^{-301.3496t} + 0.8589e^{-0.6864t}$	0.849 9	4.142 8 ^c	0.788 2 ^b
杜仲 <i>E. ulmoides</i>	地丁草 <i>Corydalis bungeana</i>	$R = 0.1973e^{-558.9289t} + 0.8027e^{-0.8954t}$	0.911 5	3.100 2 ^c	0.528 7 ^b
	薄荷 <i>Mentha haplocalyx</i>	$R = 0.1339e^{-75.016t} + 0.8661e^{-1.2611t}$	0.960 3	2.261 5 ^c	0.435 6 ^b
	藜芦 <i>Houttuynia cordata</i>	$R = 0.3395e^{-14.7065t} + 0.6613e^{-0.2285t}$	0.950 1	11.300 6 ^b	1.223 6 ^a
	荆芥 <i>Nepeta cataria</i>	$R = 0.1409e^{-14184.4866t} + 0.8591e^{-1.3367t}$	0.949 7	2.127 5 ^c	0.404 9 ^b
	绞股蓝 <i>Gynostemma pentaphyllum</i>	$R = 0.4582e^{-9.5318t} + 0.5494e^{-0.1114t}$	0.953 8	21.515 3 ^a	0.848 3 ^a
	夏枯草 <i>Prunella vulgaris</i>	$R = 0.1463e^{-24.2668t} + 0.8542e^{-1.3354t}$	0.961 7	2.125 3 ^c	0.401 1 ^b
	CK	$R = 0.1156e^{-53.1005t} + 0.8844e^{-1.3324t}$	0.962 7	2.156 2 ^c	0.428 0 ^b

CK, 与药用植物淋出物等量的蒸馏水处理; R , 枯落物分解残余率; t , 分解进行时间; R^2 , 决定系数; $T_{0.95}$ 、 $T_{0.50}$, 分别为枯落物分解周转期和半衰期。同列不同小写字母表示显著差异($p < 0.05$)。

CK, treatment with distilled water same amount to leachate from medicinal plants; R , residue rate of litter decomposition; t , duration of litter decomposition; R^2 , coefficient of determination; $T_{0.95}$, $T_{0.50}$, turnover period or half-life period of litter decomposition. Different lowercase letters in same column indicate significant differences ($p < 0.05$).

解均有显著抑制作用; 而地丁草、薄荷、荆芥和夏枯草淋出物处理只对红桦枯落物前期分解有显著抑制作用(半衰期延长16%–36%)。对于杜仲枯落物, 蕺菜淋出物处理的半衰期和周转期分别延长1.7倍和4.2倍, 绞股蓝淋出物处理的半衰期和周转期分别延长1倍和9倍, 说明二者对杜仲枯落物前期分解和整体分解均有显著抑制作用, 而其他药用植物处理影响不显著。

2.3 药用植物淋出物对林木枯落物C、N和P释放的影响

根据红桦和杜仲枯落物分解过程中的C、N、P含量变化测定结果(图1), 2种枯落物分解过程中C表现为持续“释放”, N表现为总体“释放”但存在阶段性“富集”, P表现为“释放-富集”的波动变化。根据枯落物分解“由快到慢”的规律以及土壤酶活性测定时间, 将本试验分为前期(第1个月)、中期(第2–3个月)和后期(第4–6个月)进行分析。

对于红桦枯落物, 地丁草处理在前期抑制了N的释放, 中期抑制了C的释放, 后期抑制了P的释放; 薄荷在中期抑制了C的释放, 后期促进了N的释放,

抑制了P的释放; 蕺菜在前期抑制了N的释放, 中期促进了P的释放, 后期抑制了C和N的释放; 荆芥在前期促进了N的释放, 抑制了P的释放, 中期抑制了C和N的释放, 促进了P的释放, 后期抑制了P的释放; 绞股蓝在前期抑制了N的释放, 中期抑制了C的释放, 促进了P的释放, 后期抑制了C和P的释放; 夏枯草在前期抑制了N和P的释放, 中期抑制了C的释放, 促进了P的释放, 后期促进了N的释放, 抑制了P的释放。

对于杜仲枯落物, 地丁草处理在前期抑制了N的释放, 促进了P的释放, 中期抑制了C的释放, 后期抑制了P的释放; 薄荷在前期抑制了N的释放, 促进了P的释放, 中期促进了N和P的释放, 后期抑制了P的释放; 蕺菜在前期抑制了N的释放, 促进了P的释放, 后期抑制了C、N和P的释放; 荆芥在前期抑制了N的释放, 促进了P的释放, 中期促进了N的释放, 后期抑制了P的释放; 绞股蓝在中期促进了C的释放, 后期抑制了C、N和P的释放; 夏枯草在前期抑制了N的释放, 后期抑制了P的释放。

从影响强度来看, 蕺菜和绞股蓝淋出物对红桦

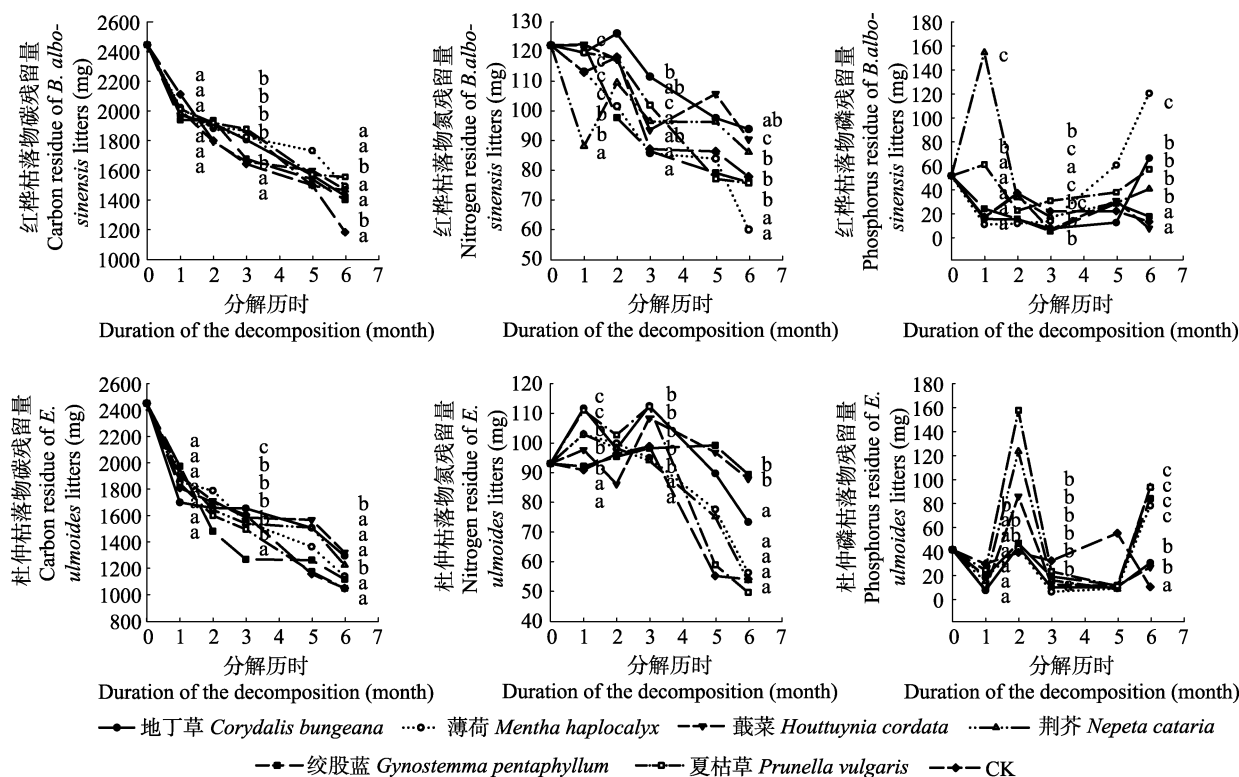


图1 红桦与杜仲枯落物分解试验前期(第1个月)、中期(第2–3个月)和后期(第4–6个月)不同处理养分释放多重比较。不同小写字母表示表示显著差异($p < 0.05$)。

Fig. 1 Multiple comparisons of nutrient release under different treatments were conducted in the early (first month), middle (second to third months) and late (fourth to sixth months) stages of litter decomposition of *Betula albo-sinensis* and *Eucommia ulmoides*. Different lowercase letters indicate significant differences ($p < 0.05$).

和杜仲枯落物分解过程中C、N和P的释放抑制作用最强。此外, 所有处理C的释放在前期均无影响, N的释放抑制作用主要发生在前期, P的释放抑制作用主要发生在后期。

2.4 药用植物淋出物对林木枯落物分解过程中土壤酶活性的影响

根据红桦和杜仲枯落物分解过程中土壤酶活性变化结果(图2, 图3), 一般的规律是蔗糖酶在分解试验前期和中期活性较高, 羧甲基纤维素酶、 β -葡萄糖苷酶和蛋白酶在中期和后期活性较高, 脱氢酶在中期活性较高, 多酚氧化酶在后期活性较高, 磷酸酶在前期活性较高。

对于红桦枯落物分解过程中土壤酶活性, 所有处理均抑制了蔗糖酶、羧甲基纤维素酶和 β -葡萄糖苷酶活性且体现在中期或后期, 部分处理抑制了脱氢酶和多酚氧化酶活性且主要体现在后期, 各处理对蛋白酶和磷酸酶活性影响差异较大。对于蛋白酶, 在前期藎菜和绞股蓝处理抑制了其活性, 在中期夏枯草处理抑制了其活性, 在后期地丁草、薄荷、荆芥和夏枯草处理提高了其活性。对于磷酸酶, 在前期地丁草和薄荷处理提高了其活性, 在中期荆芥和夏枯草处理提高了其活性而藎菜处理抑制了其活性, 在后期薄荷和夏枯草处理提高了其活性。

对于杜仲枯落物分解过程中土壤酶活性, 藎

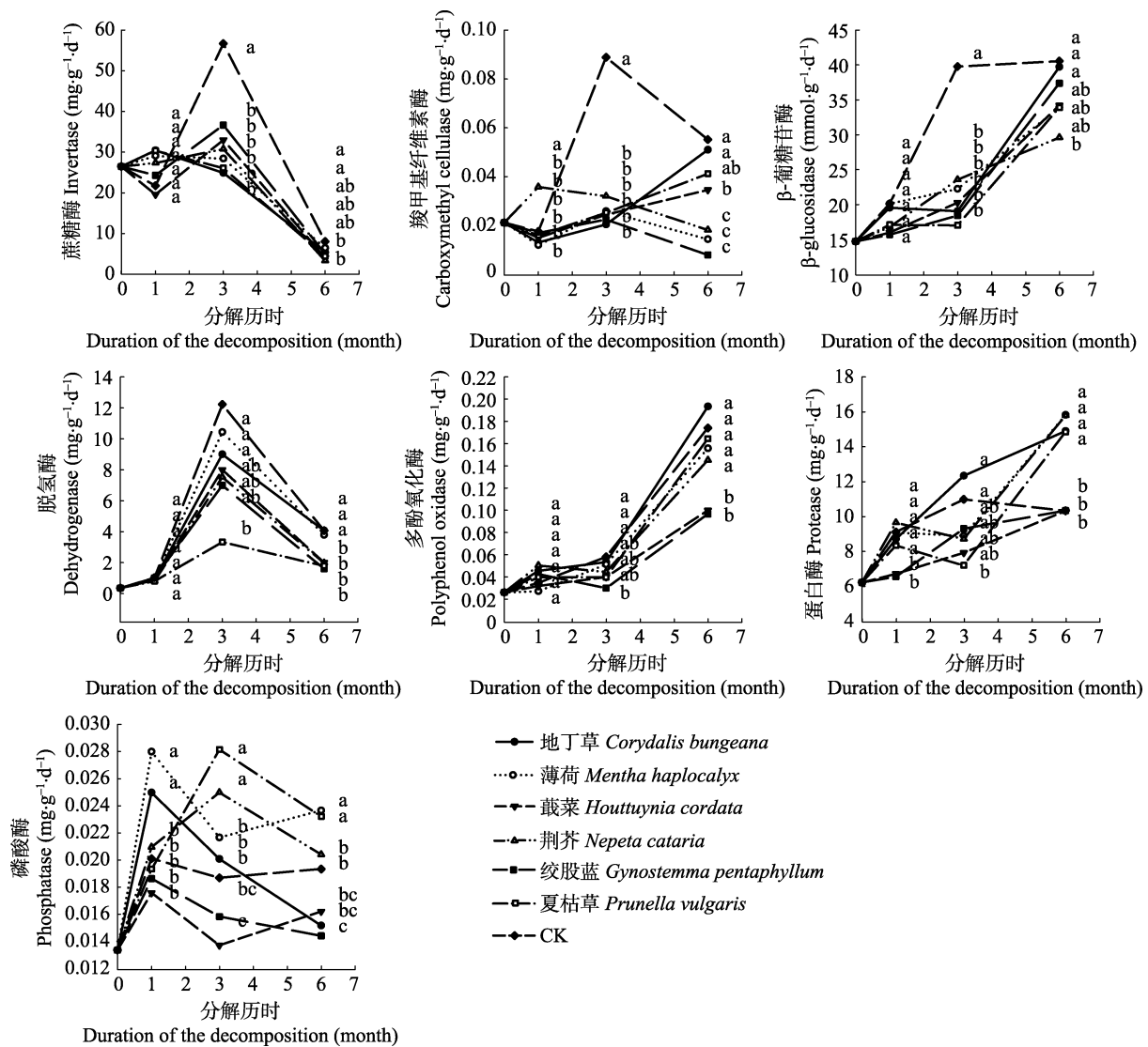


图2 红桦枯落物分解试验前期(第1个月)、中期(第2–3个月)和后期(第4–6个月)不同处理土壤酶活性多重比较。不同小写字母表示表示显著差异($p < 0.05$)。

Fig. 2 Multiple comparisons of soil enzyme activities under different treatments were conducted in the early (first month), middle (second to third months) and late (fourth to sixth months) stages of litter decomposition of *Betula albo-sinensis*. Different lowercase letters indicate significant differences ($p < 0.05$).

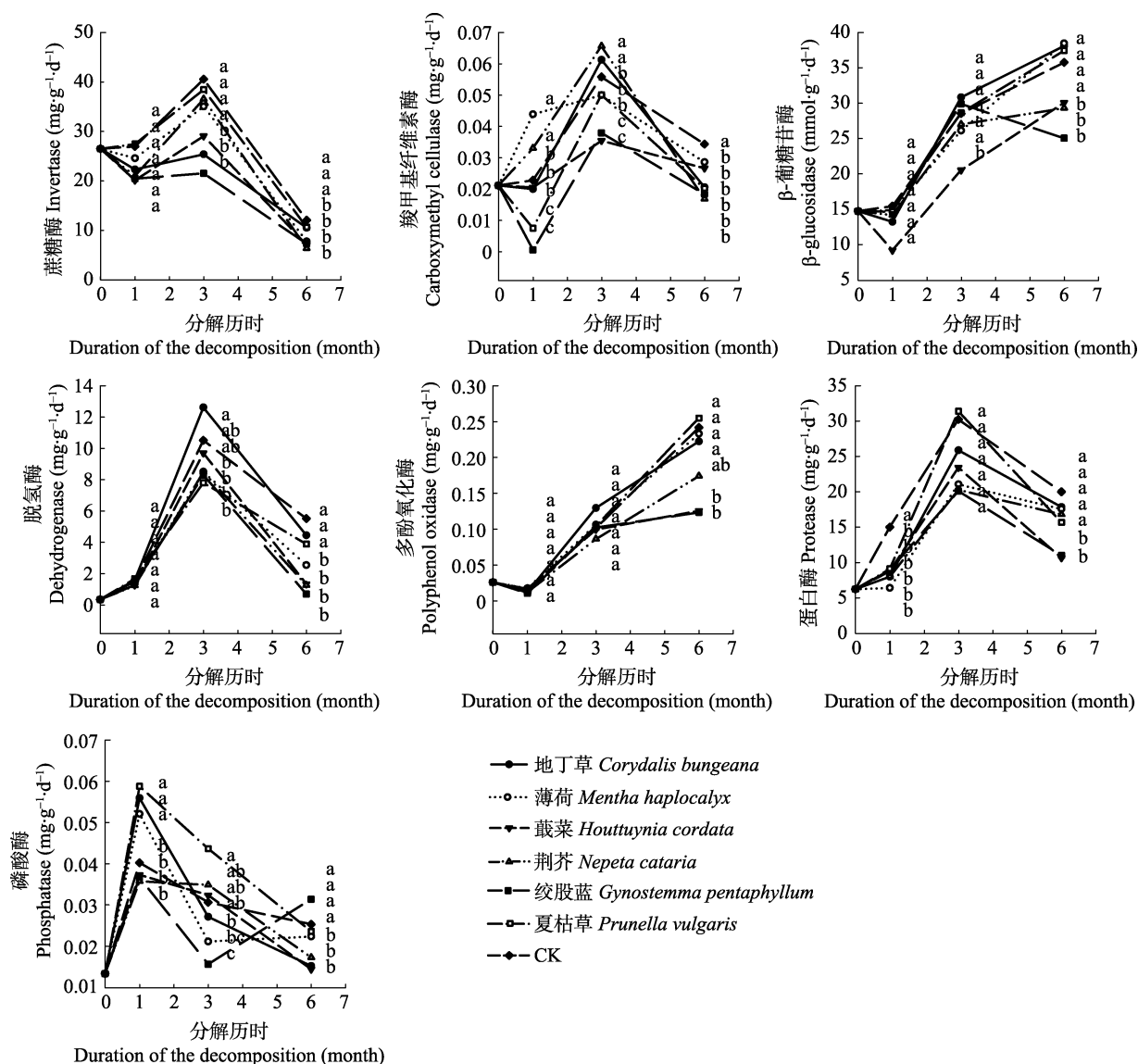


图3 杜仲枯落物分解试验前期(第1个月)、中期(第2-3个月)和后期(第4-6个月)不同处理土壤酶活性多重比较。不同小写字母表示表示显著差异($p < 0.05$)。

Fig. 3 Multiple comparisons of soil enzyme activities under different treatments were conducted in the early (first month), middle (second to third months) and late (fourth to sixth months) stages of litter decomposition of *Eucommia ulmoides*. Different lowercase letters indicate significant differences ($p < 0.05$).

菜、荆芥和绞股蓝处理抑制了蔗糖酶、羧甲基纤维素酶、 β -葡萄糖苷酶和脱氢酶活性且体现在中期或后期,但荆芥处理在前期和中期提高了羧甲基纤维素酶活性,蕺菜和绞股蓝在后期抑制了多酚氧化酶活性,所有处理均抑制了蛋白酶活性且主要体现在前期(蕺菜和绞股蓝在后期也抑制了蛋白酶活性),各处理对磷酸酶活性影响差异较大。其中,对于磷酸酶,在前期地丁草、薄荷和夏枯草处理提高了其活性,在中期绞股蓝处理抑制了其活性,在后期地丁草、蕺菜和荆芥处理抑制了其活性。

从影响强度总体而言,蕺菜和绞股蓝处理对红

桦和杜仲枯落物分解过程中土壤酶活性抑制作用最强。此外,药用植物淋出物对红桦和杜仲枯落物土壤酶活性的影响,相同点在于对蔗糖酶和羧甲基纤维素酶抑制作用较强且体现在中期和后期,对脱氢酶和多酚氧化酶抑制作用较弱且体现在后期,不同点在于药用植物淋出物对红桦枯落物分解过程中 β -葡萄糖苷酶活性的抑制作用较强且部分处理在后期蛋白酶活性提高。

2.5 药用植物淋出物化学物质鉴定

对6种药用植物茎叶淋出物的GC-MS测定结果表明,药用植物水淋出物中所含化学物质主要大类

表3 不同药用植物淋出物检出化学物质
Table 3 Chemicals of different medicinal plants extracts

药材植物 Medicinal plants	化学物质 Chemicals
地丁草 <i>Corydalis bungeana</i>	邻苯二甲酸正丁异辛酯, 叶绿醇, 1,2-环氧十八烷, β -谷甾醇, (Z)-9-十六碳烯醛 Octyl butyl phthalate, Phytol, 1,2-Epoxyoctadecan-e, β -Sitosterol, (Z)-9-Hexadecena
薄荷 <i>Mentha haplocalyx</i>	薄荷醇, 香芹酮, (1S)-(+)-10-樟脑磺啞嗪, 石竹素, 新癸酸, 邻苯二甲酸二丁酯, 绿花白千层醇, 穿心莲内酯, 喇叭茶醇, 维生素 A 醋酸酯 Menthhol, DL-carvone, (1S)-(+)-(Camphorylsulfonyl)oxaziridine, Caryophylene oxide, Neodecanoic acid, Dibutyl phthalate, Himbaccol, Andrographolide, Palustrol, Retinyl acetate
戴菜 <i>Houttuynia cordata</i>	邻苯二甲酸二丁酯, 正三十六烷, 溴代三十烷, 癸醚, 1-氯二十二烷, 正三十五烷 Dibutyl phthalate, Hexatriacontane, 1-Bromotriaco-ntane, 1-(Decyloxy)decane, 1-Chlorodocosane, N-pentatriacontane
荆芥 <i>Nepeta cataria</i>	薄荷酮, 胡薄荷酮, 邻苯二甲酸二丁酯, β -谷甾醇, 正二十一烷, 辛酸异辛酯, 棕榈酸, 邻苯二甲酸二异辛酯, 十四酸十四酯 Menthone, P-menthone, Dibutyl phthalate, β -Sitosterol, N-heneicosane, 2-Ethylhexyl octanoate, Palmitic acid, Diisocetyl phthalate, Myristyl myristate
绞股蓝 <i>Gynostemma pentaphyllum</i>	叶绿醇, 十五醛, 十二烯基丁二酸酐, 胆固醇, 油醇, 角鲨烯, 棕榈酸, 十五烷酸, 油酸酰胺, 环鸦片甾烯醇, 二十酸, 二十七烷醇, 生育酚, 亚麻酸甲酯, β -谷甾醇 Phytol, Pentadecanal, Dodeceny succinicanhydride, Cholesterol, Oleyl alcohol, Squalene, Palmitic acid, Pentadecanoic acid, Oleamide, Cycloaudenol, Eicosanoic acid, Heptacosanol, Tocopherol, Methyl linolenate, β -Sitosterol
夏枯草 <i>Prunella vulgaris</i>	邻苯二甲酸二丁酯, 环阿屯醇, 环鸦片甾烯醇, 环桉树醇, 叶绿醇, 十五醛, 角鲨烯, β -谷甾醇, β -扶桑甾醇氧化物, 油醇, (Z)-9-十六碳烯醛, 二十七烷醇 Dibutyl phthalate, Cycloartenol, Cycloaudenol, Cycloeucalenol, Phytol, Pentadecanal, Squalene, β -Sitosterol, β -Sitostenone, Oleyl alcohol, (Z)-9-Hexa-decena, Heptacosanol

有苯甲酸衍生物、烷烃、萜类、有机酸、醇类、酮类和酯类等, 在此只列具代表性的化学物质(表3)。

3 讨论

3.1 关于药用植物次生代谢物(PSM)对林木枯落物分解速率的影响

根据本研究结果, 6种处理中, 戴菜和绞股蓝处理对红桦和杜仲枯落物前期分解和整体分解均有抑制作用, 这可能与2种药用植物茎叶中所含PSM对微生物和土壤酶活性的抑制作用有关。因为, 据检测, 戴菜淋出物中含有邻苯二甲酸二丁酯, 绞股蓝淋出物中含有棕榈酸、十五烷酸、二十酸和 β -谷甾醇等。这些PSM中, 邻苯二甲酸二丁酯对单细胞和丝状真菌表现出强烈的抑制作用(Roy *et al.*, 2006), 其中, 丝状真菌被认为在枯落物分解中起主要作用(严海元等, 2010); 邻苯二甲酸二丁酯处理后, 改变了土壤呼吸和微生物量以及土壤酶活性, 其中过氧化氢酶和酸性磷酸酶活性表现为显著抑制, 蔗糖酶和蛋白酶活性表现为低浓度促进而高浓度抑制(王志刚等, 2015); β -谷甾醇可抑制黑曲霉和蒂腐菌真菌孢子的萌发和胚芽的伸长(Aderiye *et al.*, 1989), 其中, 曲霉菌是分解枯落物中纤维素、半纤维素和果胶的主要真菌(严海元等, 2010); 棕榈酸会降低土壤中真菌的数量和组成比例, 增加土壤中细菌和放线菌的数量和组成比例(周宝利等, 2010); 有机酸也可通过影响土壤pH值, 进而影响土壤酶活性(王涵

等, 2008)。

然而, 地丁草、薄荷、荆芥和夏枯草处理对红桦枯落物前期分解有抑制作用, 对后期分解反而有一定的促进作用, 对杜仲枯落物分解则无影响。分析其原因, 地丁草淋出物中含有 β -谷甾醇, 薄荷淋出物中含有薄荷醇、香芹酮、石竹素和邻苯二甲酸二丁酯等, 荆芥淋出物中含有薄荷酮、邻苯二甲酸二丁酯、 β -谷甾醇和棕榈酸等, 夏枯草淋出物中含有邻苯二甲酸二丁酯和 β -谷甾醇等。其中, 薄荷醇可以抑制桃褐腐病菌、匍枝根霉、青霉菌的菌丝生长(Sellamuthu *et al.*, 2013), 而青霉菌是分解枯落物中纤维素、半纤维素和果胶的主要真菌, 褐腐菌是分解枯落物中木质素的主要真菌(严海元等, 2010); 香芹酮可作为抑菌剂(Aggarwal *et al.*, 2002); 薄荷酮具有抗菌和清除自由基的能力(Mimica-Dukic *et al.*, 2004); 石竹素可以抑制细菌、真菌活性(Özer *et al.*, 2007)。但是, 这4种药用植物处理对红桦枯落物后期分解反而有促进作用, 这可能与4种药用植物处理下土壤多酚氧化酶活性(分解木质素的主要酶)均未受到影响和分解试验后期土壤蛋白酶活性的提高有关。而杜仲枯落物分解未受到这4种药用植物处理的影响, 其原因可能是: 首先, 杜仲与红桦枯落物基质质量存在差异, 导致其土壤环境中土壤动物和微生物群落组成与活性有差异(Berg, 2000), 所以对来自药用植物同种PSM的响应不同。其次, 枯落物在分解过程中, 自身也会释放出一些PSM, 对土

壤微生物及土壤酶活性产生影响(Batish *et al.*, 2002)。同时, PSM作用机制中存在“级联效应”(Chomel *et al.*, 2016), 即某种PSM的作用结果可能对其他PSM的作用产生影响, 因此, 在不同的土壤环境中一种或几种PSM作用结果的差异可能由于“级联效应”而导致最终结果不同。此外, 在红桦枯落物分解过程中, 所有药用植物淋出物对土壤 β -葡萄糖苷酶活性均存在抑制作用, 而在杜仲枯落物分解过程中, 只有戴菜、荆芥和绞股蓝淋出物存在抑制作用, 这可能也是造成药用植物淋出物对红桦与杜仲枯落物分解速率影响存在差异的原因。

3.2 关于药用植物PSM对林木枯落物养分释放的影响

根据本研究结果, 枯落物分解过程中C的释放与有机质分解速率相关, 比如红桦枯落物所有处理均存在抑制作用, 而杜仲枯落物只有地丁草、戴菜和绞股蓝处理存在抑制作用。同时, C的释放与蔗糖酶、羧甲基纤维素酶、 β -葡萄糖苷酶、脱氢酶和多酚氧化酶活性相关, 即C的释放受到抑制的原因可能是相关土壤酶活性受到抑制。比如, 在分解试验前期, 所有处理C的释放均未受到影响, 同时期所有处理蔗糖酶、 β -葡萄糖苷酶、脱氢酶和多酚氧化酶活性均未受到影响; 在分解试验中期, 地丁草、薄荷、荆芥、绞股蓝和夏枯草处理均抑制了红桦枯落物C的释放, 同时期这5种处理均抑制了蔗糖酶、羧甲基纤维素酶和 β -葡萄糖苷酶活性; 在分解试验后期, 戴菜和绞股蓝处理抑制了杜仲枯落物C的释放, 同时期蔗糖酶、羧甲基纤维素酶、 β -葡萄糖苷酶、脱氢酶和多酚氧化酶活性均受到抑制。此外, 部分处理土壤酶活性受到抑制, C的释放却未受到影响, 比如, 在分解试验后期, 地丁草、薄荷、荆芥和夏枯草处理抑制了杜仲枯落物羧甲基纤维素酶活性, 而C的释放并未受到影响。原因可能是枯落物分解并不是单一酶的独立作用, 而是多种酶类参与综合作用的结果(牛小云等, 2015)。其中, 脱氢酶和多酚氧化酶受影响较小, 原因是根据枯落物分解半衰期结果, 分解试验至结束仍处在枯落物分解前期或刚进入分解后期, 因而在分解后期发挥作用的土壤酶受影响较小。

枯落物分解过程中N、P的释放与蛋白酶和磷酸酶活性有一定相关性, 但并不完全一致。原因可能是, 与C的“净释放”不同, 枯落物中N、P的含量变化

还存在“富集”过程。当林木枯落物中N、P含量不能满足自身需求时, 就会诱导合成蛋白酶和磷酸酶, 以从土壤中获得自身代谢所需的N、P, 这个过程中枯落物中N、P含量可能上升(即“富集”现象)或下降幅度变小。因此, 枯落物分解过程中N、P的释放受到抑制, 与微生物自身代谢和适应性调节有关(张瑞清等, 2008)。本实验中, 红桦和杜仲枯落物初始N含量均低于微生物要求, 以及蛋白酶活性在分解试验前期受到的抑制作用, 可能是所有处理N的释放主要在分解试验前期受到抑制的原因。而在分解试验后期, 绝大多数处理P的释放受到抑制, 原因可能是P的释放在分解试验前期或中期受到促进作用, 在分解试验后期枯落物P含量较低, 微生物诱导合成磷酸酶以获得自身代谢所需要的P, 从而进一步分解有机残体(张瑞清等, 2008)。而在同时期, 部分处理磷酸酶活性受到促进, 与此相吻合, 原因可能是微生物的诱导合成作用。

综上所述, 秦岭6种常见林下药用植物茎叶淋出物富含各种次生代谢物(PSM), 它们会通过影响土壤酶活性, 改变林木枯落物分解的外部环境条件, 进而影响枯落物分解与养分释放。综合而言, 戴菜和绞股蓝淋出物对红桦和杜仲枯落物分解, C、N、P养分释放及土壤酶活性均存在显著的抑制作用。因此, 建议在红桦和杜仲林下尽量避免种植戴菜和绞股蓝, 或者通过降低其套种密度来减轻影响。

基金项目 国家自然科学基金(30471376)。

参考文献

- Aderiyi BI, Ogundana SK, Adesanya SA, Roberts MF (1989). The effect of β -sitosterol on spore germination and germ-tube elongation of *Aspergillus niger* and *Botryodiplodia theobromae*. *International Journal of Food Microbiology*, 8, 73–78.
- Aggarwal KK, Khanuja SPS, Ahmad A, Santha Kumar TR, Gupta VK, Kumar S (2002). Antimicrobial activity profiles of the two enantiomers of limonene and carvone isolated from the oils of *Mentha spicata* and *Anethum sowa*. *Flavour and Fragrance Journal*, 17, 59–63.
- Batish DR, Singh HP, Pandher JK, Arora V, Kohli RK (2002). Phytotoxic effect of *Parthenium* residues on the selected soil properties and growth of chickpea and radish. *Weed Biology and Management*, 2, 73–78.
- Berg B (2000). Litter decomposition and organic matter turnover in northern forest soils. *Forest Ecology and Management*, 133, 13–22.

doi: 10.17521/cjpe.2016.0350

- Chen ZJ, He JF, Tang DR, Li QX, Heng ZZ, Li H, Li MS, Chen DW, Luo JM, Liu WY (2002). Nutrients in forest soils of *Eucommia ulmoides* Oliv and its responses to fertilization in south of Shaanxi Province. *Journal of Soil and Water Conservation*, 16(4), 94–97. (in Chinese with English abstract) [陈竹君, 何景峰, 唐德瑞, 李群学, 衡智州, 李宏, 李孟生, 陈登位, 罗建民, 刘文英 (2006). 陕南杜仲林地土壤营养状况及施肥效应. 水土保持学报, 16(4), 94–97.]
- Chomel M, Fernandez C, Bousquet-Mélou A, Gers C, Monnier Y, Santonja M, Gauquelin T, Gros R, Lecareux C, Baldy V (2014). Secondary metabolites of *Pinus halepensis* alter decomposer organisms and litter decomposition during afforestation of abandoned agricultural zones. *Journal of Ecology*, 102, 411–424.
- Chomel M, Guittonny-Larchevêque M, Fernandez C, Gallet C, DesRochers A, Paré D, Jackson BG, Baldy V (2016). Plant secondary metabolites: A key driver of litter decomposition and soil nutrient cycling. *Journal of Ecology*, 104, 1527–1541.
- Guo YX, Kang B, Li G, Wang DX, Yang GH, Wang DW (2011). Species composition and point pattern analysis of standing trees in secondary *Betula albo-sinensis* forest in Xiaolongshan of west Qinling Mountains. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 22, 2574–2580. (in Chinese with English abstract) [郭垚鑫, 康冰, 李刚, 王德祥, 杨改河, 王大伟 (2011). 小陇山红桦次生林物种组成与立木的点格局分析. 应用生态学报, 22, 2574–2580.]
- Hättenschwiler S, Vitousek PM (2000). The role of polyphenols in terrestrial ecosystem nutrient cycling. *Trends in Ecology & Evolution*, 15, 238–243.
- Hu X, Wu N, Wu Y, Zuo WQ, Guo HX, Wang JN (2012). Effects of snow cover on the decomposition and nutrient dynamics of *Sibiraea angustata* leaf litter in western Sichuan plateau, Southwest China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 23, 1226–1232. (in Chinese with English abstract) [胡霞, 吴宁, 吴彦, 左万庆, 郭海霞, 王金牛 (2012). 川西高原季节性雪被覆盖对窄叶鲜卑花凋落物分解和养分动态的影响. 应用生态学报, 23, 1226–1232.]
- Koukol O, Novák F, Hrabal R, Vosátka M (2006). Saprotrophic fungi transform organic phosphorus from spruce needle litter. *Soil Biology & Biochemistry*, 38, 3372–3379.
- Lin Y, Ren JY, Yue M (2008). Population structure and spatial analysis of *Betula albo-sinensis* at Taibai Mountain, Northwestern China. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)*, 32, 1335–1345. (in Chinese with English abstract) [林珣, 任坚毅, 岳明 (2008). 太白山红桦种群结构与空间分析. 植物生态学报, 32, 1335–1345.]
- Liu XY, Cheng S (1992). A preliminary study on the artificial forest-medicinal plant complex ecosystem. *Journal of Beijing Forestry University*, 14(2), 65–71. (in Chinese with English abstract) [刘晓鹰, 程颂 (1992). 林药人工复合生态系统的初步研究. 北京林业大学学报, 14(2), 65–71.]
- Manzoni S, Trofymow JA, Jackson RB, Porporato A (2010). Stoichiometric controls on carbon, nitrogen, and phosphorus dynamics in decomposing litter. *Ecological Monographs*, 80, 89–106.
- Mierziak J, Kostyn K, Kulma A (2014). Flavonoids as important molecules of plant interactions with the environment. *Molecules*, 19, 16240–16265.
- Mimica-Dukic N, Bozin B, Sokovic M, Simin N (2004). Antimicrobial and antioxidant activities of *Melissa officinalis* L. (Lamiaceae) essential oil. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 52, 2485–2489.
- Niu XY, Sun XM, Chen DS, Zhang SG (2015). Soil enzyme activities of the litter in *Larix kaempferi* plantation. *Scientia Silvae Sinicae*, 51(4), 16–25. (in Chinese with English abstract) [牛小云, 孙晓梅, 陈东升, 张守攻 (2015). 日本落叶松人工林枯落物土壤酶活性. 林业科学, 51(4), 16–25.]
- Özer H, Sökmen M, Güllüce M, Adigüzel A, Sahin F, Sökmen A, Kiliç H, Baris Ö (2007). Chemical composition and antimicrobial and antioxidant activities of the essential oil and methanol extract of *Hippomarathrum microcarpum* (Bieb.) from Turkey. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55, 937–942.
- Purahong W, Hyde KD (2011). Effects of fungal endophytes on grass and non-grass litter decomposition rates. *Fungal Diversity*, 47, 1–7.
- Roy RN, Laskar S, Sen SK (2006). Dibutyl phthalate, the bioactive compound produced by *Streptomyces albidoflavus* 321.2. *Microbiological Research*, 161, 121–126.
- Sellamuthu PS, Sivakumar D, Soundy P (2013). Antifungal activity and chemical composition of thyme, peppermint and citronella oils in vapor phase against avocado and peach postharvest pathogens. *Journal of Food Safety*, 33, 86–93.
- Tian XJ, Takeishi T (2002). Relative roles of microorganisms and soil animals on needle litter decomposition in a subalpine coniferous forest. *Acta Phytocologica Sinica*, 26, 257–263.
- Wang H, Wang G, Huang YY, Chen J, Chen MM (2008). The effects of pH change on the activities of enzymes in an acid soil. *Ecology and Environment*, 17, 2401–2406. (in Chinese with English abstract) [王涵, 王果, 黄颖颖, 陈璟, 陈妹妹 (2008). pH变化对酸性土壤酶活性的影响. 生态环境, 17, 2401–2406.]
- Wang JY, Wang WQ, Liu Y (2003). Effects of tree and medicinal plant intercropping system on medicinal plants' yield. *Journal of Beijing Forestry University*, 25(6), 55–59. (in Chinese with English abstract) [王继永, 王文全, 刘勇 (2003). 林药间作系统对药用植物产量的影响. 北京林业大学学报, 25(6), 55–59.]

- Wang ZG, Zhao XS, Xu WH, Su YP, You YM, Liu S, Hu Y, Hu YL, Zhang Y (2015). Response of microbial biomass and enzyme activities in black soil to di-n-butyl phthalate contamination. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 10(6), 199–205. (in Chinese with English abstract) [王志刚, 赵晓松, 徐伟慧, 苏云鹏, 由义敏, 刘帅, 胡影, 胡云龙, 张颖 (2015). 黑土微生物量和酶活性对邻苯二甲酸二丁酯污染的响应. *生态毒理学报*, 10(6), 199–205.]
- Wu CX, Liu SJ, Zhao GQ (2014). Isolation and identification of the potential allelochemicals in the aqueous extract of yellow sweet clover. *Acta Prataculturae Sinica*, 23(5), 184–192. (in Chinese with English abstract) [郭彩霞, 刘苏娇, 赵国琦 (2014). 黄花草木樨水浸提液中潜在化感物质的分离、鉴定. *草业学报*, 23(5), 184–192.]
- Wu TG, Yu MK, Sun HJ, Li HX, Zhang C, Cheng XR (2011). Photosynthetic response to different irradiances of under-growth plants in tree-herb plantation. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 19, 338–341. (in Chinese with English abstract) [吴统贵, 虞木奎, 孙海菁, 李会欣, 张翠, 成向荣 (2011). 林药复合系统林下植物光合特性对生长光强的响应. *中国生态农业学报*, 19, 338–341.]
- Yan HY, Gu XR, Shen H (2010). Microbial decomposition of forest litter. *Chinese Journal of Ecology*, 29, 1827–1835. (in Chinese with English abstract) [严海元, 辜夕容, 申鸿 (2010). 森林凋落物的微生物分解. *生态学杂志*, 29, 1827–1835.]
- Yang MY, Tian J, Ma Y, Sun C, Huang JH (2012). Isolation, identification and antimicrobial activity of endophyte fungi from medicinal plant *Eucommia ulmoides* Oliv. in Qinling Mountains. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 32, 193–198. (in Chinese with English abstract) [杨明琰, 田稼, 马瑜, 孙超, 黄继红 (2012). 杜仲内生真菌的分离鉴定及抗菌活性研究. *西北植物学报*, 32, 193–198.]
- Zhang J, Salahuddin, Ji L, Yang LX, Wang HR, You LX (2016). Effects of larch (*Larix gmelinii*) phenolic acids on manchurian ash (*Fraxinus mandshurica*) soil microbial community structure. *Allelopathy Journal*, 37, 123–135.
- Zhang RQ, Sun ZJ, Wang C, Yuan TY (2008). Ecological process of leaf litter decomposition in tropical rainforest in Xishuangbanna, SW China. III. Enzyme dynamics. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)*, 32, 622–631. (in Chinese with English abstract) [张瑞清, 孙振钧, 王冲, 袁堂玉 (2008). 西双版纳热带雨林凋落叶分解的生态过程. III. 酶活性动态. *植物生态学报*, 32, 622–631.]
- Zhou BL, Han L, Yin YL, Wu JX, Sun CQ, Ye XL, Bai LP (2010). Effects of allelochemicals hexadecanoic acid on soil microbial composition and biomass in rhizosphere of eggplant. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 41(3), 275–278. (in Chinese with English abstract) [周宝利, 韩琳, 尹玉玲, 武建霞, 孙传奇, 叶雪凌, 白丽萍 (2010). 化感物质棕榈酸对茄子根际土壤微生物组成及微生物量的影响. *沈阳农业大学学报*, 41, 275–278.]

责任编辑: 储诚进 责任编辑: 李 敏



扫码向作者提问