

网络出版时间:2017-11-29 09:23 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2018.01.005  
网络出版地址:http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.s.20171129.0923.010.html

# 药材植物淋出物对油松枯落物分解和土壤酶活性的影响

许纪元<sup>1a</sup>, 卢玉鹏<sup>1b</sup>, 张晓曦<sup>1a</sup>,  
王博雅<sup>1c</sup>, 谢 博<sup>1c</sup>, 刘增文<sup>1c,2</sup>

(1 西北农林科技大学 a 水土保持研究所, b 林学院, c 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100;  
2 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】**【目的】研究油松(*Pinus tabulaeformis*)林下 9 种药材植物淋出物对油松枯落物分解和土壤酶活性的影响,为选择适宜油松林下种植的药材植物及适宜的林药复合模式提供依据。【方法】以秦岭山区广泛分布的典型油松林及林下 9 种常见药材植物蒲公英(*Taraxacum mongolicum*)、地丁(*Corydalis bungeana*)、薄荷(*Mentha haplocalyx*)、鱼腥草(*Houttuynia cordata*)、细辛(*Asarum sieboldii*)、荆芥(*Nepeta cataria*)、金银花(*Lonicera japonica*)、绞股蓝(*Gynostemma pentaphyllum*)和夏枯草(*Prunella vulgaris*)为研究对象,通过药材植物茎叶淋出物(以水浸提液模拟)喷浇油松枯落物进行分解试验,研究药材植物茎叶淋出物对油松枯落物分解速率、养分(C、N、P、Cu、Zn 和 Mn)释放和土壤酶活性的影响。【结果】蒲公英、地丁、薄荷、鱼腥草、金银花和荆芥的茎叶淋出物均显著抑制了油松枯落物的分解及总体养分释放(除金银花茎叶淋出物对 N 释放、荆芥茎叶淋出物对 N 和 P 的释放影响不显著外)。蒲公英、地丁、薄荷、鱼腥草和金银花茎叶淋出物均显著降低了土壤多酚氧化酶的活性,金银花茎叶淋出物降低了土壤中羧甲基纤维素酶活性,荆芥茎叶淋出物均显著降低了土壤中羧甲基纤维素酶和  $\beta$ -葡萄糖苷酶的活性。【结论】细辛、绞股蓝和夏枯草可与油松进行林药复合种植,其余 6 种药材植物应避免在油松林下种植或降低种植密度。

**【关键词】** 油松林;林药复合;枯落物分解;养分释放;土壤酶活性

**【中图分类号】** S154

**【文献标志码】** A

**【文章编号】** 1671-9387(2018)01-0030-09

## Effects of leachates from understory medicinal plants on decomposition of *Pinus tabulaeformis* litter and soil enzyme activities

XU Jiyuan<sup>1a</sup>, LU Yupeng<sup>1b</sup>, ZHANG Xiaoxi<sup>1a</sup>,  
WANG Boya<sup>1c</sup>, XIE Bo<sup>1c</sup>, LIU Zengwen<sup>1c,2</sup>

(1 a Institute of Soil and Water Conservation, b College of Forestry, c College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2 Key Lab for Agricultural Resources and Environmental Remediation in Loess Plateau of Agriculture Ministry of China, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** 【Objective】The effects of leachates from understory medicinal plants on decomposition of *Pinus tabulaeformis* litter and soil enzyme activities were investigated to provide scientific basis for selecting suitable understory species. 【Method】In this paper, and the effects of 9 leachates (water-extraction solu-

**【收稿日期】** 2016-12-02

**【基金项目】** 国家自然科学基金项目(30471376)

**【作者简介】** 许纪元(1991-),男,江苏扬州人,在读硕士,主要从事林草枯落物研究。E-mail: yz xu\_jiyuan2014@163.com

**【通信作者】** 刘增文(1965-),男,陕西横山人,教授,博士,主要从事水土保持与林业生态工程研究。  
E-mail: zengwenliu2003@aliyun.com

tion) from the stems and leaves of common medicinal plants (*Taraxacum mongolicum*, *Corydalis bungeana*, *Mentha haplocalyx*, *Houttuynia cordata*, *Asarum sieboldii*, *Nepeta cataria*, *Lonicera japonica*, *Gynostemma pentaphyllum* and *Prunella vulgaris*) in typical *Pinus tabulaeformis* forest in Qinling Mountains on litter decomposition, nutrient releases (C, N, P, Cu, Zn and Mn) and soil enzyme activities were studied. **【Result】** The leachates from *Taraxacum mongolicum*, *Corydalis bungeana*, *Mentha haplocalyx*, *Houttuynia cordata*, *Lonicera japonica* and *Nepeta cataria* had significant inhibitory effects on litter decomposition rates and release of nutrients (except *L. japonica* had no significant effect of N and *N. cataria* had no significant effect on N and P). The leachates from *T. mongolicum*, *C. bungeana*, *M. haplocalyx*, *H. cordata* and *L. japonica* lowered the activity of polyphenol oxidase. The leachates from *L. japonica* lowered activities of carboxymethyl cellulose, and *N. cataria* lowered activities of carboxymethyl cellulose and beta-glucosidase. **【Conclusion】** *A. sieboldii*, *G. pentaphyllum* and *P. vulgaris* were suggested to plant under *P. tabulaeformis* forests, where other 6 species were not suggested as understory species or their inter planting density should be diminished to avoid the inhibitory effects.

**Key words:** *Pinus tabulaeformis* forest; tree-herb system; litter decomposition; nutrient release; soil enzyme activity

秦岭山区拥有丰富的森林和药材植物资源,成为当地经济发展的主要依赖,然而散生的药材在采集、管理和营销等方面都存在很多困难。目前当地的经济模式是在保护天然林的基础上单纯大力发展人工林或大面积种植药材植物。但由单一树种组成的人工纯林连续生长或多代连栽会出现低产低效、林分衰败、土壤退化和极化现象<sup>[1-4]</sup>;单纯大面积种植药材植物的后果是毁林开荒、占用土地和引发新的水土流失<sup>[5]</sup>。因此林药复合(即在林下规模化种植药材植物)是当地经济发展的新出路。

在林药复合中,林与药材植物的种间关系是必须研究的问题,不但要研究林下环境条件是否适宜药材植物的生长,而且也要研究药材植物种植后是否会对土壤环境、枯落物分解及养分循环产生破坏<sup>[6]</sup>。因为药材植物之所以发挥临床疗效的基础是植物次生代谢产出的某些活性成分,而这些药效成分往往同时也是化感物质,容易释放到环境中<sup>[7]</sup>。前人的研究表明,植物次生代谢物中的酚类和萜类物质可以对微生物,尤其是真菌的生理活动产生抑制作用<sup>[8]</sup>;植物酚类次生代谢物可以抑制土壤中磷酸酶、葡糖苷酶和多酚氧化酶的活性<sup>[9]</sup>。鉴于微生物为枯落物分解的主体,而土壤酶为枯落物分解的主要执行者,其活性和数量的降低势必会对枯落物在土壤中的分解和养分释放造成影响,进而会影响林地养分循环利用和土壤肥力的长期平衡发展。为此,本研究以秦岭山区典型油松林以及 9 种常见林下药材植物为对象,通过药材植物茎叶淋出物(以水浸提液模拟)喷浇林下枯落物的分解培养试验,研究

药材植物茎叶淋出物对林木枯落物分解、养分释放和土壤酶活性的影响,为当地林药复合植物和模式的选择提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 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,年均降水量 900 mm,该区分布有丰富的天然和人工林植被及大量的药材植物资源,土壤属山地褐土。2014 年 11 月在研究区采集典型成熟的油松林当年枯落叶,自然风干剪碎成长度为 1.5 cm 左右的碎针叶。将枯落叶准确称量 6.00 g 干样,分别装入规格为 10 cm×20 cm、网眼直径为 0.25 mm 的尼龙网袋中,备用。每个处理 15 袋,共 10 个处理。于 2015 年 7—8 月在当地林下采集最新收获的 9 种药材植物地上茎叶样品,分别为蒲公英(*Taraxacum mongolicum*)、地丁(*Corydalis bungeana*)、薄荷(*Mentha haplocalyx*)、鱼腥草(*Houttuynia cordata*)、细辛(*Asarum sieboldii*)、荆芥(*Nepeta cataria*)、金银花(*Lonicera japonica*)、绞股蓝(*Gynostemma pentaphyllum*)和夏枯草(*Prunella vulgaris*),风干后粉碎成 0.5 cm 碎屑备用。同时采集当地林地附近无林荒地的表层(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 药材植物茎叶淋出物制备

将不同药材植物茎叶样品,分别与蒸馏水配制成质量浓度为 80 mg/mL(即相当于 8 g 植物样品浸泡于 100 mL 蒸馏水)的浸提液 1 000 mL(根据当地降雨量和林下药材植物生物量推算而得),浸泡 48 h,浸提液经离心过滤后保留约 500 mL,装入棕色瓶放入冰箱 4 °C 低温冷藏,待用。

## 1.3 油松枯落物分解试验

分别称取 2.85 kg 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,将装有枯落物的 5 个分解袋分别斜插入培养钵,保证分解袋周围与土壤均匀接触。150 袋枯落物,共用 30 个培养钵,随机分为 10 组,每组 3 个培养钵。每培养钵用喷雾器分别均匀喷浇相应的药材植物茎叶淋出物 150 mL,对照喷等量蒸馏水,以喷浇相同药材植物淋出物为 1 个处理,每处理 3 个重复。控制培养钵内物质质量以便统一调节土壤湿度(保持土壤湿度为预先测定田间持水量的 60%)。置于室温下(20~25 °C)进行分解培养,每隔 2 周喷浇 1 次淋出物(淋出物体积按 50 mL 淋出物/1 kg 干土的比例计算),保持土壤湿度基本不变,连续培养 6 个月终止。

## 1.4 样品测定

在油松枯落物分解试验过程中,分 5 次回收分解袋,回收时间分别为分解开始后 1,2,3,5 和 6 个月,每个处理从 3 个培养钵中分别回收 1 袋,3 个重复。取出枯落物分解残余物置于 0.15 mm 土壤筛中清洗,除去表面泥土等杂物,置于 60 °C 烘干,分别测定分解残留量及 C、N、P、Cu、Zn 和 Mn 含量<sup>[10]</sup>。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 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 混合液消煮后,分别以 AA3 连续流动分析仪和紫外分光光度计(钼钒黄比色法)测定;Cu、Zn 和 Mn 采用原子分光光度计法测定。同时,分 3 次采集培养钵中土样,采集时间分别为分解开始后 1,3 和 6 个月,风干后测定土壤酶活性<sup>[11]</sup>。其中,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,活性以每克干土每天产生的葡萄糖毫克数表示(mg/(g·d));β-葡萄糖苷酶活性采用硝基酚比色法测定,以每克干土每天产生的硝基酚的量表示(mmol/(g·d));脱氢酶活性采用三苯基四唑氯化物比色法测定,以每克干土每天产生的甲臞表示(mg/(g·d));多酚氧化酶活性采用邻苯三酚比色法测定,活性以每克干土每天产生的红紫脞精表示(mg/(g·d));蛋白酶活性

采用茚三酮比色法测定,活性以每克干土每天产生的氨基氮表示(mg/(g·d));磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法测定,活性以每克干土每天产生的五氧化二磷表示(mg/(g·d))。药材植物茎叶淋出物(浸提液)内含物质测定参照邬彩霞等<sup>[12]</sup>的方法,通过 GC/MS 进行定性分析。

## 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<sup>[13]</sup> $R = ae^{-bt} + ce^{-dt}$ (其中  $R$  为枯落物分解残留率,%; $a$ 、 $b$ 、 $c$  和  $d$  为模型参数; $t$  为分解历时,年),对同种处理枯落物残留量(换算为残余率,即枯落物残留质量占初始质量的比率)进行拟合,用其曲线的斜率可以来表示枯落物分解速率;计算分解周转期(干物质分解 95%,即残留量衰减至 5%的历时, $T_{0.95}$ )和分解半衰期(干物质分解 50%,即残留量衰减至 50%的历时, $T_{0.50}$ ),用上述两个分解过程时间节点的滞后或提前可以直观反映分解过程的速率。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法( $\alpha=0.05$ );采用 SigmaPlot 12.5 软件绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 药材植物淋出物对油松枯落物分解速率的影响

不同药材植物淋出物处理的油松枯落物分解周转期和半衰期见表 1。由表 1 可知,在无药材植物茎叶淋出物(对照)时,油松枯落物的分解周转期为 26.126 年,分解半衰期为 5.171 年。喷浇不同药材植物茎叶淋出物后,油松枯落物的分解速率受到不同程度的影响。与对照相比,蒲公英、地丁、薄荷、鱼腥草、金银花和荆芥的茎叶淋出物显著或极显著延长了油松枯落物的分解周转期和分解半衰期,说明这 6 种药材植物茎叶淋出物能显著或极显著抑制油松枯落物的前、后期分解速率;夏枯草茎叶淋出物显著缩短油松枯落物的分解周转期,促进了油松枯落物的分解,其分解周转期缩减 11.82%( $P<0.05$ );细辛和绞股蓝茎叶淋出物缩短了油松分解周转期和分解半衰期,但均无显著影响。

### 2.2 药材植物淋出物对油松枯落物养分释放的影响

油松枯落物分解过程中的养分含量测定结果如表 2 所示,剩余养分含量越大表示油松枯落物养分释放受到的抑制作用越强。

表 1 不同药材植物淋出物处理的油松枯落物分解周转期和半衰期

Table 1 Turnover period ( $T_{0.95}$ ) and half-life period ( $T_{0.50}$ ) of *P. tabuliiformis* litter decomposition in different treatments

药材植物 Medicinal plants	枯落物分解模型 Model of litter decomposition	分解周转期/年 $T_{0.95}$	分解半衰期/年 $T_{0.50}$
对照 CK	$R=0.133e^{-15.288 2t}+0.867e^{-0.059t}$	26.126	5.171
蒲公英 <i>Taraxacum mongolicum</i>	$R=0.140e^{-13.474 9t}+0.860e^{-0.071 6t}$	49.656*	9.554*
地丁 <i>Corydalis bungeana</i>	$R=0.151e^{-10.245 9t}+0.849 3e^{-0.039 3t}$	44.394*	8.383*
薄荷 <i>Mentha haplocalyx</i>	$R=0.113e^{-6.089.343 7t}+0.886 6e^{-0.118 2t}$	81.709**	15.221**
鱼腥草 <i>Houttuynia cordata</i>	$R=0.100e^{-27.143t}+0.901e^{-0.162 8t}$	52.757*	10.065**
细辛 <i>Asarum sieboldii</i>	$R=0.127e^{-14.220 4t}+0.874e^{-0.056 5t}$	20.721	3.806
金银花 <i>Lonicera japonica</i>	$R=0.864e^{-0.046 8t}+0.136e^{-17.891 2t}$	54.403**	10.567**
荆芥 <i>Nepeta cataria</i>	$R=0.110e^{-31.811 9t}+0.890e^{-0.147 1t}$	62.399**	11.970**
绞股蓝 <i>Gynostemma pentaphyllum</i>	$R=0.134e^{-15.263 5t}+0.865e^{-0.106 5t}$	20.355	4.066
夏枯草 <i>Prunella vulgaris</i>	$R=0.117e^{-19.395t}+0.883e^{-0.116t}$	20.038*	5.769

注:R 为枯落物分解残留率(%),t 为分解历时(年), $T_{0.95}$  为干物质分解 95% 的历时, $T_{0.50}$  为干物质分解 50% 的历时。\*,\*\* 分别表示与 CK 具有显著差异( $P<0.05$ )或极显著差异( $P<0.01$ )。

Note:R indicates the residual rate of the litter (%),t indicates the time from the experiment begins(year), $T_{0.95}$  indicates the turn-over period of litter decomposition, $T_{0.50}$  indicates the half-time period of the litter decomposition. \* and \*\* represent significant difference at 0.05 level and 0.01 level, respectively.

表 2 不同药材植物淋出物处理的油松枯落物养分残留量

Table 2 Nutrients remains of *P. tabuliiformis* litters in different treatments

mg/g

药材植物 Medicinal plant	分解时间/月 Duration/ month	C	N	P	Cu	Zn	Mn
对照 CK	0	464.15	4.97	6.03	4.53	25.85	32.33
	1	404.08±0.25	4.70±0	1.14±0	0.89±0	9.57±0.01	61.22±0.04
	2	375.44±0.71	4.76±0.01	1.72±0	3.49±0.01	15.06±0.03	59.91±0.10
	3	370.57±2.28	4.79±0.03	3.57±0.02	1.95±0.01	17.76±0.1	75.78±0.43
	5	357.38±3.66	3.98±0.03	1.72±0.01	6.97±0.06	17.10±0.15	67.60±0.58
	6	331.35±2.26 e	3.88±0.03 e	2.45±0.02 h	3.59±0.03 e	12.22±0.16 fg	59.09±1.13 f
蒲公英 <i>Taraxacum mongolicum</i>	1	406.18±1.96	4.72±0.02	3.03±0.01	2.73±0.01	10.62±0.05	54.49±0.26
	2	366.97±2.54	4.80±0.03	17.45±0.12	3.17±0.02	14.22±0.10	68.27±0.47
	3	358.17±3.18	4.75±0.05	30.83±0.30	2.74±0.03	12.56±0.12	68.98±0.68
	5	356.52±2.37	3.62±0.02	4.65±0.03	3.39±0.02	14.98±0.10	86.17±0.57
	6	338.95±2.38 d	4.31±0.04 bc	18.49±0.17 a	4.70±0.04 b	19.22±0.18 b	89.64±0.84 b
	地丁 <i>Corydalis bungeana</i>	1	288.37±1.17	5.40±0.02	3.40±0.01	3.04±0.01	16.60±0.07
2		408.25±3.94	5.60±0.05	4.43±0.04	2.75±0.03	19.24±0.19	67.61±0.65
3		337.80±2.41	5.70±0.04	2.78±0.02	3.13±0.02	18.02±0.13	73.54±0.52
5		371.40±2.10	4.53±0.03	13.65±0.08	3.02±0.02	21.74±0.12	78.04±0.44
6		334.18±2.67 e	5.13±0.04 a	16.91±0.13 c	3.94±0.03 cd	17.37±0.13 c	61.54±0.47 f
薄荷 <i>Mentha haplocalyx</i>		1	420.63±1.80	4.77±0.02	0.81±0	3.27±0.01	13.87±0.06
	2	426.23±2.68	4.97±0.03	1.58±0.01	3.64±0.02	16.14±0.10	82.88±0.52
	3	384.70±1.52	5.20±0.02	0.96±0	3.31±0.01	16.68±0.07	80.14±0.32
	5	349.07±0.23	3.07±0	24.31±0.02	3.63±0	14.65±0.01	87.61±0.06
	6	335.10±0.77 d	4.21±0.01 cd	17.47±0.03 b	4.08±0.01 b	11.50±0.02 g	61.09±0.11 f
	鱼腥草 <i>Houttuynia cordata</i>	1	347.85±1.00	5.21±0.01	0.72±0	2.77±0.01	15.54±0.04
2		393.32±3.35	5.62±0.05	1.53±0.01	3.03±0.03	19.09±0.16	79.53±0.68
3		378.60±2.99	5.01±0.04	0.58±0	1.91±0.02	14.40±0.11	70.15±0.55
5		362.15±3.32	4.97±0.05	4.74±0.04	4.17±0.04	19.31±0.18	80.87±0.74
6		347.70±5.59 b	4.41±0.06 b	5.26±0.08 g	5.27±0.08 a	27.89±0.4 a	76.69±1.1 d
细辛 <i>Asarum sieboldii</i>		1	355.98±0.58	4.65±0.01	2.21±0	3.01±0	13.17±0.02
	2	420.98±0.80	4.80±0.01	1.93±0	2.84±0.01	15.89±0.03	77.36±0.15
	3	406.53±1.55	4.73±0.02	3.25±0.01	2.50±0.01	14.38±0.05	91.15±0.35
	5	351.12±6.97	4.21±0.08	17.65±0.35	3.37±0.07	12.84±0.25	75.46±1.50
	6	347.75±1.22 b	5.03±0.01 a	14.97±0.04 d	3.82±0.01 d	15.00±0.04 d	79.62±0.23 cd

表 2(续) Continued table 2

药材植物 Medicinal plant	分解时间/月 Duration/ month	C	N	P	Cu	Zn	Mn
金银花 <i>Lonicera japonica</i>	1	384.80±1.88	4.87±0.02	1.09±0.01	4.14±0.02	14.02±0.07	97.16±0.47
	2	421.08±2.58	5.09±0.03	2.76±0.02	3.29±0.02	17.64±0.11	88.34±0.54
	3	363.63±2.83	5.01±0.04	2.87±0.02	3.07±0.02	17.07±0.13	96.59±0.75
	5	396.45±4.79	3.32±0.04	24.72±0.30	3.47±0.04	24.73±0.3	127.78±1.54
	6	355.68±2.27 a	3.98±0.02 e	6.88±0.04 f	4.86±0.03 b	13.53±0.07 e	111.03±0.6 a
荆芥 <i>Nepeta cataria</i>	1	330.13±1.68	4.44±0.02	1.79±0.01	3.15±0.02	12.17±0.06	73.88±0.38
	2	400.00±3.35	4.72±0.04	3.07±0.03	2.68±0.02	15.75±0.13	71.60±0.60
	3	377.30±1.71	4.39±0.02	1.27±0.01	1.77±0.01	16.14±0.07	63.20±0.29
	5	401.20±1.14	3.74±0.01	5.97±0.02	2.45±0.01	16.80±0.05	82.97±0.24
	6	345.32±3.06 b	4.05±0.03 de	2.36±0.02 h	3.18±0.02 f	12.39±0.09 f	65.25±0.49 e
绞股蓝 <i>Gynostemma pentaphyllum</i>	1	370.63±1.39	4.14±0.02	6.04±0.02	3.22±0.01	13.00±0.05	67.05±0.25
	2	417.05±2.54	4.92±0.03	3.97±0.02	2.41±0.01	13.60±0.08	58.17±0.35
	3	362.08±2.38	4.68±0.03	0.67±0	3.49±0.02	14.85±0.1	69.47±0.46
	5	402.60±1.07	4.17±0.01	2.33±0.01	3.58±0.01	15.96±0.04	80.84±0.22
	6	352.10±3.16 ab	4.38±0.03 bc	12.26±0.09 e	3.79±0.03 d	16.78±0.13 c	66.54±0.51 e
夏枯草 <i>Prunella vulgaris</i>	1	382.50±0.24	4.83±0	1.26±0	3.55±0	13.01±0.01	86.99±0.05
	2	378.08±0.64	5.43±0.01	1.55±0	2.78±0	19.40±0.03	84.12±0.14
	3	388.28±2.18	4.62±0.03	4.44±0.02	2.38±0.01	14.08±0.08	76.77±0.43
	5	422.43±3.89	4.14±0.04	2.62±0.02	3.49±0.03	17.42±0.16	111.11±1.02
	6	341.93±3.06 c	3.34±0.03 f	1.30±0.01 i	3.78±0.03 b	10.50±0.09 h	81.82±0.7 c

注:同列分解 6 个月时,数据后标不同小写字母表示分解试验结束时各处理间特定养分残留量差异显著( $P<0.05$ )。

Note: Different lowercase letters in each row represent significant difference at the end of experiment ( $P<0.05$ ).

由表 2 可知,至分解试验末期(分解 6 个月),药材植物茎叶淋出物均对枯落物的 C 释放存在显著的抑制作用,其中薄荷和金银花的抑制作用最强,分别降低 C 释放率 7.34% 和 6.26% ( $P<0.05$ ,下同)。对于枯落物的 N 释放,地丁、细辛、蒲公英、薄荷、鱼腥草和绞股蓝茎叶淋出物均存在显著抑制作用,其中地丁和细辛的抑制作用最强(降低释放率 32.07% 和 29.53%);而金银花和荆芥无显著影响,夏枯草反而促进了 N 释放。对于枯落物的 P 释放,荆芥影响不显著,夏枯草促进了 P 释放(释放率增加了 31.92%),其他药材植物均存在显著抑制作用,且以蒲公英的抑制作用最强(降低释放率 655.56%)。对于枯落物的 Cu 释放,除了夏枯草有促进作用(增加释放率 44.25%)外,其余 8 种药材均存在显著抑制作用,其中鱼腥草抑制作用最强(降低释放率 46.84%)。对枯落物的 Zn 释放,除夏枯草有促进作用(增加释放率 14.04%),荆芥无显著影响外,其余 7 种药材均存在显著抑制作用,其中鱼腥草抑制作用最强(降低释放率 128.36%)。对于枯落物的 Mn 释放,地丁和薄荷无显著影响,其余 7 种药材植物淋出物均存在显著抑制作用,其中金银花抑制作

用最强(降低释放率 87.89%)。

### 2.3 药材植物淋出物对油松枯落物土壤酶活性的影响

一般认为,枯落物分解初期起主要作用的土壤酶主要为蔗糖酶、蛋白酶和多酚氧化酶,而分解中、后期起主要作用的土壤酶为羧甲基纤维素酶、 $\beta$ -葡萄糖苷酶、脱氢酶、多酚氧化酶和碱性磷酸酶<sup>[14]</sup>。根据不同药材植物茎叶淋出物对土壤酶的影响(图 1),在枯落物分解初期(1 个月时),金银花、绞股蓝和夏枯草茎叶淋出物显著抑制了蔗糖酶活性(降低 35.11%~70.74%),蒲公英、地丁、鱼腥草、细辛和荆芥茎叶淋出物显著抑制了蛋白酶活性(降低 14.61%~38.15%),地丁、细辛、荆芥和绞股蓝淋出物显著抑制了磷酸酶活性(降低 25.04%~50.03%),蒲公英、薄荷、鱼腥草和细辛淋出物显著抑制了多酚氧化酶活性(降低 27.87%~50.82%)。

由图 1 可以看出,在枯落物分解试验中、后期(3 个月和 6 个月时),蒲公英、地丁、薄荷、鱼腥草和金银花淋出物显著抑制多酚氧化酶活性(降低 38.18%~80.00%),蒲公英、薄荷和金银花均抑制了磷酸酶活性(降低 36.81%~49.45%),鱼腥草、

荆芥和绞股蓝淋出物显著抑制了羧甲基纤维素酶活性(降低 43.08%~63.08%) 和  $\beta$ -葡萄糖苷酶活性(降低 20.86%~37.52%),细辛和夏枯草均显著抑

制了羧甲基纤维素酶的活性(降低 65.39%~67.69%),而对  $\beta$ -葡萄糖苷酶活性无显著影响。

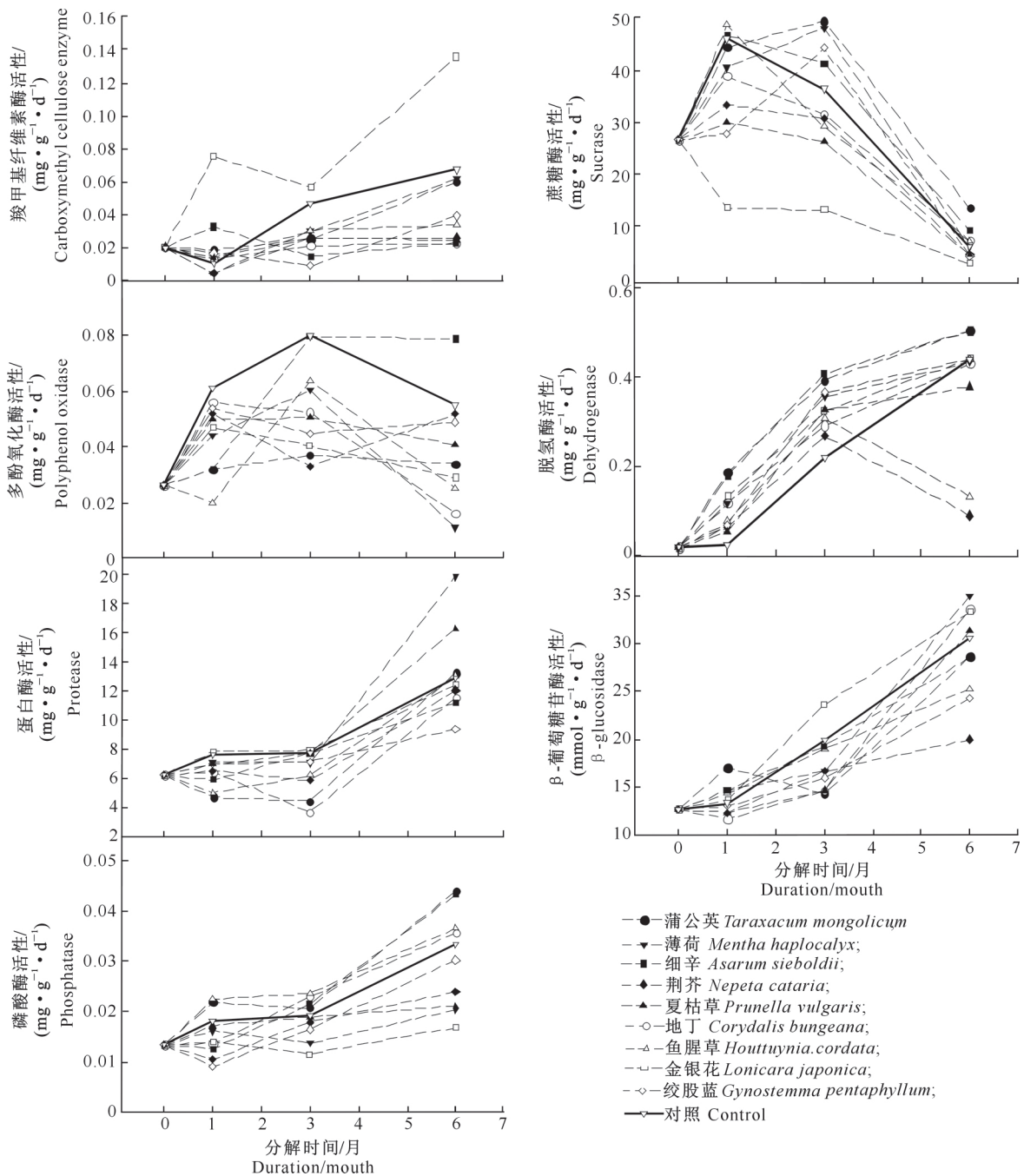


图 1 不同药材植物淋出物对油松枯落物分解过程中土壤酶活性的影响

Fig. 1 Effects of different treatments on soil enzyme activities during litter decomposition of *P. tabuli formis*

#### 2.4 药材植物淋出物中次生代谢物质鉴定

通过 GC/MS 分析,药材植物茎叶淋出物中存在大量的次生代谢物质(表 3),主要为酚酸类、萜类、脂肪酸、醇类和酰胺类物质,其中包括苯二甲酸

酯(一种酚酸类物质)和叶绿醇、薄荷醇(脑)、香芹酮等单萜、倍半萜和二萜物质,以及角鲨烯、谷甾醇、二羟基维生素 D 等甾醇及其衍生物。

表 3 不同药材植物淋出物中的次生代谢物质

Table 3 Secondary metabolites of different medicinal plants extracts

药材植物 Medicinal plants	化学物质 Chemicals	分子式 Molecular formula	分子量/u Molecular weight
蒲公英 <i>Taraxacum mongolicum</i>	4-[2,2,6-三甲基-7-氧杂二环[4.1.0]庚-1-基]-3-丁烯-2-酮 4-[2,2,6-trimethyl-7-oxabicyclo[4.1.0]hept-1-yl]-3-buten-2-one	C <sub>13</sub> H <sub>20</sub> O <sub>2</sub>	208.30
	邻苯二甲酸二丁酯 Dibutyl phthalate	C <sub>16</sub> H <sub>22</sub> O <sub>4</sub>	278.34
	24,25-二羟基维生素 D <sub>3</sub> 24,25-dihydroxyvitamin D <sub>3</sub>	C <sub>27</sub> H <sub>44</sub> O <sub>3</sub>	400.66
地丁 <i>Corydalis bungeana</i>	叶绿醇 Phytol	C <sub>20</sub> H <sub>40</sub> O	296.53
	硬脂醛 Stearic aldehyde	C <sub>18</sub> H <sub>36</sub> O	268.48
	邻苯二甲酸正丁异辛酯 Butyl octyl phthalate	C <sub>20</sub> H <sub>30</sub> O <sub>4</sub>	334.45
薄荷 <i>Mentha haplocalyx</i>	<i>DL</i> -薄荷醇 Centhol	C <sub>10</sub> H <sub>20</sub> O	156.27
	香芹酮 Carvone	C <sub>10</sub> H <sub>14</sub> O	150.22
	4,6,6-三甲基-2h-吡喃-2-酮 3,6-Dihydro-4,6,6-trimethyl-2h-pyran-2-one	C <sub>8</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	140.18
	新癸酸 Neodecanoic acid	C <sub>10</sub> H <sub>20</sub> O <sub>2</sub>	172.26
	邻苯二甲酸二丁酯 Dibutyl phthalate	C <sub>16</sub> H <sub>22</sub> O <sub>4</sub>	278.34
	绿花白千层醇 (+)-viridiflorol	C <sub>15</sub> H <sub>26</sub> O	222.37
	疣孢菌醇 Verrucarol	C <sub>15</sub> H <sub>22</sub> O <sub>4</sub>	266.33
鱼腥草 <i>Houttuynia cordata</i>	喇叭茶醇 Ledol	C <sub>20</sub> H <sub>32</sub> O	288.47
	1-甲基-4-(2-甲基环氧乙烷基)-7-氧杂双环[4.1.0]庚烷 1-methyl-4-(2-methyloxiranyl)-7-oxabicyclo[4.1.0]heptane	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub> O <sub>2</sub>	168.23
	邻苯二甲酸二丁酯 Dibutyl phthalate	C <sub>16</sub> H <sub>22</sub> O <sub>4</sub>	278.34
细辛 <i>Asarum sieboldii</i>	邻苯二甲酸二丁酯 Dibutyl phthalate	C <sub>16</sub> H <sub>22</sub> O <sub>4</sub>	278.34
	十八甲基环九硅氧烷 Cyclononasiloxane, octadecamethyl	C <sub>18</sub> H <sub>54</sub> O <sub>9</sub> Si <sub>9</sub>	685.40
金银花 <i>Lonicera japonica</i>	邻苯二甲酸正丁异辛酯 Butyl octyl phthalate	C <sub>20</sub> H <sub>30</sub> O <sub>4</sub>	334.45
	异胆酸乙酯 Ethyl iso-allocholate	C <sub>26</sub> H <sub>44</sub> O <sub>5</sub>	436.64
荆芥 <i>Nepeta cataria</i>	薄荷酮 Menthone	C <sub>10</sub> H <sub>18</sub> O	154.25
	棕榈酸 Palmitic acid	C <sub>16</sub> H <sub>32</sub> O <sub>2</sub>	256.42
	邻苯二甲酸二异辛酯 Diisooctyl phthalate	C <sub>24</sub> H <sub>38</sub> O <sub>4</sub>	390.56
	十四酸十四酯 Pystyl myristate	C <sub>28</sub> H <sub>56</sub> O <sub>2</sub>	424.74
绞股蓝 <i>Gynostemma pentaphyllum</i>	Beta-谷甾醇 Beta-sitosterol	C <sub>29</sub> H <sub>50</sub> O	414.71
	叶绿醇 Phytol	C <sub>20</sub> H <sub>40</sub> O	296.53
	棕榈酸 Palmitic acid	C <sub>16</sub> H <sub>32</sub> O <sub>2</sub>	256.42
	二十七烷醇 1-heptacosanol	C <sub>27</sub> H <sub>56</sub> O	396.73
	油酸酰胺 Oleamide	C <sub>18</sub> H <sub>35</sub> NO	281.48
	角鲨烯 Squalene	C <sub>30</sub> H <sub>50</sub>	410.72
夏枯草 <i>Prunella vulgaris</i>	Beta-谷甾醇 Beta-sitosterol	C <sub>29</sub> H <sub>50</sub> O	414.71
	环鸦片甾烯醇 Cyclolau-denol	C <sub>32</sub> H <sub>56</sub> O	216.57
	叶绿醇 Phytol	C <sub>20</sub> H <sub>40</sub> O	296.53
	4-胆甾烯-3-酮 3-oxo-4-cholestene	C <sub>27</sub> H <sub>44</sub> O	384.64
	角鲨烯 Squalene	C <sub>30</sub> H <sub>50</sub>	410.72
	Beta-谷甾醇 Beta-sitosterol	C <sub>29</sub> H <sub>50</sub> O	414.71

### 3 讨 论

#### 3.1 药材植物淋出物对枯落物分解的影响

本试验结果表明,蒲公英、地丁、薄荷、鱼腥草、金银花和荆芥的茎叶淋出物(浸提液)显著抑制了油松枯落物的分解,而在抑制枯落物分解的药材淋出物中检测出了酚酸类和萜类物质,这与张重义等<sup>[15]</sup>和 Inderjit<sup>[16]</sup>关于酚酸类物质抑制纤维素分解的结果一致。由于枯落物的分解是多种酶共同作用的复杂过程<sup>[14]</sup>,因此药材植物对枯落物分解的抑制作用可能是通过土壤酶活性的改变来实现的。林瑞余等<sup>[17]</sup>研究发现,一些水稻分泌的酚类衍生物抑制了

土壤中多酚氧化酶和纤维素分解酶的活性;吕可等<sup>[18]</sup>的研究也发现,含有多种次生代谢物的花椒树茎叶浸提液抑制了土壤中蔗糖酶和蛋白酶的活性。与上述研究结果相似,本试验结果表明,部分含有酚类衍生物的药材植物茎叶淋出物在枯落物分解试验初期抑制了土壤磷酸酶(地丁)和蛋白酶活性(蒲公英、地丁和鱼腥草),而在分解试验中后期抑制了土壤多酚氧化酶活性(蒲公英、地丁和金银花);部分含有萜类物质的药材植物(金银花、绞股蓝和夏枯草)茎叶淋出物在分解初期抑制了蔗糖酶活性,而在分解试验中后期抑制了羧甲基纤维素酶(金银花、荆芥、绞股蓝和夏枯草)和 $\beta$ -葡萄糖苷酶(荆芥和绞股

蓝)活性。

土壤微生物作为胞外酶的主要来源,直接或间接参与了枯落物的分解过程,而药材植物茎叶淋出物中的次生代谢物会影响微生物的生物活性和群落结构。如胡开辉等<sup>[19]</sup>和孟庆会等<sup>[20]</sup>研究表明,水稻分泌的酚酸类物质及从高粱中提取的萜类物质可显著抑制真菌生长,而真菌具有较高的胞外酶活性,且酶种类全面,其数量和种类的减少可能会导致枯落物分解相关酶的种类减少,活性下降,并削弱多种酶的协同分解能力<sup>[21]</sup>。李倩等<sup>[22]</sup>研究发现,倍半萜内脂类物质会降低微生物的碳利用率,可能会对微生物的生长产生抑制。

此外,药材植物茎叶淋出物中的次生代谢物还可能通过改变土壤酸碱性从而影响土壤酶活性。本试验选取的药材植物淋出物中检测出多种脂肪酸和酚酸类物质,会导致土壤 pH 降低。土壤 pH 的降低可能抑制了对 pH 敏感的酶促反应<sup>[23]</sup>,从而降低了解底物的可利用性,继而抑制土壤微生物的活性<sup>[24]</sup>。

### 3.2 药材植物淋出物对枯落物养分释放过程的影响

本试验结果表明,药材植物淋出物抑制枯落物分解速率的同时,也显著抑制了其养分释放,这与何帆等<sup>[25]</sup>的研究结果一致。然而枯落物分解过程某些阶段中存在残留物养分富集现象。N 和 P 的富集可能是由于参与分解的微生物固定吸收土壤环境中可利用 N 和 P<sup>[26]</sup>,导致枯落物 N 和 P 释放规律改变,这与孙星等<sup>[27]</sup>关于还田秸秆分解中 N 和 P 富集的现象相类似。枯落物分解过程中残留物 Cu、Zn 和 Mn 的富集也与微生物的固定有关<sup>[28]</sup>。马志良等<sup>[29]</sup>研究发现,Cu 和 Mn 分别为漆酶和锰过氧化物酶(两种重要的木质素分解酶)的活性中心;陈红跃等<sup>[30]</sup>研究发现,Zn 与土壤磷酸酶活性具有正相关性。因此微生物从土壤中固定相应元素合成相应的酶,这可能会导致土壤微生物对 Cu、Zn 和 Mn 的需求增大,因而从环境中固定并造成了富集。

与一些药材植物淋出物抑制枯落物分解及养分释放相反,夏枯草茎叶淋出物显著促进了油松枯落物的分解及 N、P 的释放,这与孔维栋等<sup>[31]</sup>的研究结果相类似。其原因可能是夏枯草淋出物中检测出一些糖类有机物,可能为微生物提供了养分,提高了其生理活性。

## 4 结 论

油松林下 9 种常见药材植物茎叶淋出物富含各

种次生代谢物质,其会通过影响土壤酶活性,改变林下枯落物分解的外部环境,进而影响枯落物的分解与养分释放。蒲公英、地丁、薄荷、鱼腥草、金银花和荆芥的茎叶淋出物显著抑制了油松枯落物的分解;蒲公英和鱼腥草茎叶淋出物显著抑制了枯落物 C、N、P、Cu、Zn 和 Mn 的释放,地丁和薄荷茎叶淋出物显著抑制了枯落物 C、N、P、Cu 和 Zn 的释放,金银花显著抑制了油松枯落物 C、P、Cu、Zn 和 Mn 的释放,荆芥显著抑制了油松枯落物 C、Cu 和 Mn 的释放。蒲公英、地丁、薄荷、鱼腥草和金银花淋出物显著降低了土壤多酚氧化酶的活性,金银花降低了土壤中羧甲基纤维素酶活性,荆芥茎叶淋出物均显著降低了土壤中羧甲基纤维素酶和  $\beta$ -葡萄糖苷酶的活性。因此蒲公英、地丁、薄荷、鱼腥草、金银花和荆芥 6 种药材植物可能会通过抑制相应的土壤酶活性而抑制枯落物的分解和养分释放,进而抑制林地环境的养分循环,降低了其生态环境的稳定性,建议在油松林下应尽量避免或降低密度套种这 6 种药材植物。

### [参考文献]

- [1] 田大伦,沈 燕,康文星,等. 连栽第 1 和第 2 代杉木人工林养分循环的比较 [J]. 生态学报,2011,31(17):5025-5032.  
Tian D L, Shen Y, Kang W X, et al. Characteristics of nutrient cycling in first and second rotations of Chinese fir plantations [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(17): 5025-5032.
- [2] 张希彪,上官周平. 黄土丘陵区油松人工林与天然林养分分布和生物循环比较 [J]. 生态学报,2006,26(2):373-382.  
Zhang X B, Shanguan Z P. Nutrient distributions and bio-cycle patterns in both natural and artificial *Pinus tabulae formis* forests in Hilly Loess Regions [J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(2): 373-382.
- [3] 刘增文,段而军,付 刚,等. 一个新概念:人工纯林土壤性质的极化 [J]. 土壤学报,2007,44(6):1119-1126.  
Liu Z W, Duan E J, Fu G, et al. A new concept: soil polarization in planted pure forest [J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(6): 1119-1126.
- [4] 刘增文,段而军,付 刚,等. 秦岭北山几种典型人工纯林土壤性质极化问题研究 [J]. 土壤,2008,40(6):997-1001.  
Liu Z W, Duan E J, Fu G, et al. Soil polarizations of several typical artificial pure forests in north mountain of Qinling [J]. Soils, 2008, 40(6): 997-1001.
- [5] 孙雪婷,李 磊,龙光强,等. 三七连作障碍研究进展 [J]. 生态学杂志,2015,34(3):885-893.  
Sun X T, Li L, Long G Q, et al. The progress and prospect on consecutive monoculture problems of *Panax notoginseng* [J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(3): 885-893.
- [6] 谢开云,赵 云,李向林,等. 豆-禾混播草地种间关系研究进展



- [J]. 草业学报, 2013, 22(3): 284-296.
- Xie K Y, Zhao Y, Li X L, et al. Relationships between grasses and legumes in mixed grassland; a review [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2013, 22(3): 284-296.
- [7] 郭兰萍, 黄璐琦, 蒋有绪, 等. 药用植物栽培种植中的土壤环境恶化及防治策略 [J]. 中国中药杂志, 2006, 31(9): 714-717.
- Guo L P, Huang L Q, Jiang Y X, et al. Soil deterioration during cultivation of medicinal plants and ways to prevent it [J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2006, 31(9): 714-717.
- [8] Zhou B, Kong C H, Li Y H, et al. Crabgrass (*Digitaria sanguinalis*) allelochemicals that interfere with crop growth and the soil microbial community [J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2013, 61(22): 5310-5317.
- [9] Ushio M, Balsler T C, Kitayama K. Effects of condensed tannins in conifer leaves on the composition and activity of the soil microbial community in a tropical montane forest [J]. *Plant and Soil*, 2013, 365(1): 157-170.
- [10] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 农业出版社, 2000: 116-151.
- Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 116-151.
- [11] 关松荫. 土壤酶及其研究法 [M]. 北京: 农业出版社, 1986: 274-320.
- Guan S Y. Soil enzyme and research technology [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1986: 274-320.
- [12] 邬彩霞, 刘苏娇, 赵国琦. 黄花草木樨水浸提液中潜在化感物质的分离、鉴定 [J]. 草业学报, 2014, 23(5): 184-192.
- Wu C X, Liu S J, Zhao G Q. Isolation and identification of the potential allelochemicals in the aqueous extract of yellow sweet clover (*Melilotus officinalis* L.) [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2014, 23(5): 184-192.
- [13] Berg B, McClaugherty C. Plant litter decomposition, humus formation, carbon sequestration [M]. 3rd ed. Berlin: Springer, 2014.
- [14] 张瑞清, 孙振钧, 王冲, 等. 西双版纳热带雨林凋落叶分解的生态过程: III. 酶活性动态 [J]. 植物生态学报, 2008, 32(3): 622-631.
- Zhang R Q, Sun Z J, Wang C, et al. Ecological process of leaf litter decomposition in tropical rainforest in Xishuangbanna, SW China: III. enzyme dynamics [J]. *Journal of Plant Ecology*, 2008, 32(3): 622-631.
- [15] 张重义, 林文雄. 药用植物的化感自毒作用与连作障碍 [J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(1): 189-196.
- Zhang Z Y, Lin W X. Continuous cropping obstacle and allelopathic autotoxicity of medicinal plants [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2009, 17(1): 189-196.
- [16] Inderjit. Experimental complexities in evaluating the allelopathic activities in laboratory bioassays; a case study [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(2): 256-262.
- [17] 林瑞余, 于翠平, 戎红, 等. 苗期不同化感潜力水稻根际土壤酶活性分析 [J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(2): 302-306.
- Lin R Y, Yu C P, Rong H, et al. Rhizospheric soil enzyme activity of allelopathic rice at seedling stage [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16(2): 302-306.
- [18] 吕可, 潘开文, 王进闯, 等. 花椒叶浸提液对土壤微生物数量和土壤酶活性的影响 [J]. 应用生态学报, 2006, 17(9): 1649-1654.
- Lü K, Pan K W, Wang J C, et al. Effects of *Zanthoxylum bungeanum* leaf extract on soil microbe quantity and enzyme activities [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(9): 1649-1654.
- [19] 胡开辉, 罗庆国, 汪世华, 等. 化感水稻根际微生物类群及酶活性变化 [J]. 应用生态学报, 2006, 17(6): 1060-1064.
- Hu K H, Luo Q G, Wang S H, et al. Effects of allelopathic rice on rhizosphere microbial flora and enzyme activity [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(6): 1060-1064.
- [20] 孟庆会, 黄红娟, 刘艳, 等. 假高粱挥发油化学成分及其化感潜力 [J]. 植物保护学报, 2009, 36(3): 277-282.
- Meng Q H, Huang H J, Liu Y, et al. Chemical compositions and allelopathic potential of volatile oil from *Sorghum halepense* (L.) Pers. [J]. *Journal of Plant Protection*, 2009, 36(3): 277-282.
- [21] Osono T. Ecology of ligninolytic fungi associated with leaf litter decomposition [J]. *Ecological Research*, 2007, 22(6): 955-974.
- [22] 李倩, 袁玲, 杨水平, 等. 土壤微生物对黄花蒿凋落物或青蒿素的响应 [J]. 草业学报, 2015, 24(9): 121-129.
- Li Q, Yuan L, Yang S P, et al. Responses of soil microorganisms to *Artemisia annua* leaf litter or artemisinin [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2015, 24(9): 121-129.
- [23] 赵静, 韩甜甜, 谢兴斌, 等. 酸化梨园土壤酶活性与土壤理化性质之间的关系 [J]. 水土保持学报, 2011, 25(4): 115-120.
- Zhao J, Han T T, Xie X B, et al. Relationship between soil enzymatic activity and soil property in selected acidified pear orchards [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(4): 115-120.
- [24] Baath E, Arnebrant K. Growth rate and response of bacterial communities to pH in limed and ash treated forest soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1994, 26(8): 995-1001.
- [25] 何帆, 王得祥, 雷瑞德. 秦岭火地塘林区四种主要树种凋落叶分解速率 [J]. 生态学杂志, 2011, 30(3): 521-526.
- He F, Wang D X, Lei R D. Decomposition rate of four dominant tree species leaf litters in Qinling Huoditang forests [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(3): 521-526.
- [26] Rice E, Pancholy S. Inhibition of nitrification by climax ecosystems; III. inhibitors other than tannins [J]. *American Journal of Botany*, 1974, 61(10): 1095-1103.
- [27] 孙星, 刘勤, 王德建, 等. 长期秸秆还田对土壤肥力质量的影响 [J]. 土壤, 2007, 39(5): 782-786.
- Sun X, Liu Q, Wang D J, et al. Effect of long-term straw application on soil fertility [J]. *Soils*, 2007, 39(5): 782-786.
- [28] Berg B, McClaugherty C. Plant litter [M]. 2nd ed. Berlin: Springer, 2007.

(下转第 45 页)

- Liaoning Province, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(4): 695-703.
- [9] Peña-Claros M, Peters E M, Justiniano M J, et al. Regeneration of commercial tree species following silvicultural treatments in a moist tropical forest [J]. Forest Ecology & Management, 2008, 255(3/4): 1283-1293.
- [10] 王中磊, 高贤明. 锐齿槲栎林的天然更新: 坚果、幼苗库和径级结构 [J]. 生态学报, 2005, 25(5): 986-993.  
Wang Z L, Gao X M. The regeneration of *Quercus aliena* var. *acuteserrata*: acorn status, seedling pool and size structure [J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(5): 986-993.
- [11] Mühlenberg M, Appelfelder J, Hoffmann H, et al. Structure of the montane taiga forests of West Khentii, Northern Mongolia [J]. Journal of Forest Science, 2012(2): 45-56.
- [12] Dobrowolska D. Effect of stand density on oak regeneration in flood plain forests in Lower Silesia, Poland [J]. Forestry, 2008, 81(4): 511-523.
- [13] 张明霞, 王得祥, 康冰, 等. 秦岭华山松天然次生林优势种群的种间联结性 [J]. 林业科学, 2015, 51(1): 12-21.  
Zhang M X, Wang D X, Kang B, et al. Interspecific associations of dominant plant populations in secondary forest of *Pinus armandii* in Qinling mountains [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2015, 51(1): 12-21.
- [14] 韩文娟, 袁晓青, 张文辉. 油松人工林林窗对幼苗天然更新的影响 [J]. 应用生态学报, 2012, 23(11): 2940-2948.  
Han W J, Yuan X Q, Zhang W H. Effects of gap size on seedling natural regeneration in artificial *Pinus tabulaeformis* plantation [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(11): 2940-2948.
- [15] 于倩, 谢宗强, 熊高明, 等. 神农架巴山冷杉(*Abies fargesii*) 林群落特征及其优势种群结构 [J]. 生态学报, 2008, 28(5): 1931-1941.  
Yu Q, Xie Z Q, Xiong G M, et al. Community characteristics and population structure of dominant species of *Abies fargesii* forests in Shennongjia National Nature Reserve [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(5): 1931-1941.
- [16] 彭舜磊, 王得祥. 秦岭火地塘林区华山松人工林与天然次生林群落特征比较 [J]. 西北植物学报, 2009, 29(11): 2301-2311.  
Peng S L, Wang D X. Comparison of community characteristics of plantation and secondary forest of *Pinus armandii* in Huoditang forest region of Qinling mountain [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2009, 29(11): 2301-2311.
- [17] 兰国玉, 雷瑞德, 安锋, 等. 秦岭中段华山松群落动态初步研究 [J]. 西北林学院学报, 2005, 20(3): 48-52.  
Lan G Y, Lei R D, An F, et al. Study on community dynamic of *Pinus armandii* in the Qinling mountains [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2005, 20(3): 48-52.
- [18] Brewer S W, Webb M A H. Ignorant seed predators and factors affecting the seed survival of a tropical palm [J]. Oikos, 2001, 93(1): 32-41.
- [19] 王贺新, 李根柱, 于冬梅, 等. 枯枝落叶层对森林天然更新的障碍 [J]. 生态学杂志, 2008, 27(1): 83-88.  
Wang H X, Li G Z, Yu D M, et al. Barrier effect of litter layer on natural regeneration of forests: a review [J]. Chinese Journal of Ecology, 2008, 27(1): 83-88.
- [20] 柴宗政, 王得祥, 郝亚中, 等. 秦岭中段华北落叶松人工林演替动态 [J]. 林业科学, 2014, 50(2): 14-21.  
Chai Z Z, Wang D X, Hao Y Z, et al. Succession dynamics of *Larix principis-rupprechtii* plantation in intermediate section of Qinling mountains [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2014, 50(2): 14-21.

(上接第 38 页)

- [29] 马志良, 高顺, 杨万勤, 等. 不同季节亚热带常绿阔叶林 6 个树种凋落叶钙、镁、锰的释放特征 [J]. 应用生态学报, 2015, 26(10): 2913-2920.  
Ma Z L, Gao S, Yang W Q, et al. Seasonal release characteristics of Ca, Mg and Mn of foliar litter of six tree species in subtropical evergreen broadleaved forest [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(10): 2913-2920.
- [30] 陈红跃, 闫雪燕, 陈明洁, 等. 不同大气污染区林木根区土壤重金属和酶活性研究 [J]. 生态环境, 2006, 15(3): 513-518.  
Chen H Y, Yan X Y, Chen M J, et al. Heavy metal contents and enzymatic activities of soil in tree root zone at different air-polluted areas [J]. Ecology and Environment, 2006, 15(3): 513-518.
- [31] 孔维栋, 刘可星, 廖宗文. 有机物料种类及腐熟水平对土壤微生物群落的影响 [J]. 应用生态学报, 2004, 15(3): 487-492.  
Kong W D, Liu K X, Liao Z W. Effects of different organic materials and their composting levels on soil microbial community [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(3): 487-492.