

## 杉木林下药用植物淋出物对林木枯落物分解及土壤酶活性的影响

潘永柱<sup>1</sup>, 高佳钰<sup>2</sup>, 官王飞<sup>3</sup>

(1. 丽水市林业技术推广总站, 浙江 丽水 323000; 2. 浙江省林业技术推广总站, 浙江 杭州 310020;

3. 丽水经济技术开发区生态林业发展中心, 浙江 丽水 323000)

**摘要:** 以浙江丽水松阳县杉木 *Cunninghamia lanceolata* 林林下 7 种常见药用植物三叶崖爬藤 *Tetrastigma hemsleyanum*、多花黄精 *Polygonatum cyrtoneura*、蒲公英 *Taraxacum mongolicum*、薄荷 *Mentha canadensis*、蕺菜 *Houttuynia cordata*、白及 *Bletilla striata*、灵芝 *Ganoderma lucidum* 为对象, 通过水浸法提取其茎叶淋出物浸提液, 并将其配制成浓度为 85 mg·mL<sup>-1</sup> 浸提液, 使用喷雾器每次喷浇 250 mL 浸提液于培养钵中的林木枯落物, 每隔 2 周喷浇一次, 喷浇周期分别为 1 个月、3 个月、6 个月, 研究药用植物淋出物对杉木枯落物分解的影响, 以及通过土壤酶活性检测研究对其存在的潜在化感影响。结果表明: 蒲公英、薄荷、鱼腥草浸提液对杉木枯落物处理后, 其养分碳、氮、磷、钾、铜、锌、锰残余量均有升高趋势, 表明这三种植物抑制了杉木枯落物分解、延长其分解周转期, 土壤酶(蔗糖酶、羧甲基纤维素酶、 $\beta$ -葡萄糖苷酶、脱氢酶、多酚氧化酶、蛋白酶、磷酸酶)活性显著降低, 其他 4 种植物淋出物均能够显著加速分解残留物及提升土壤酶活性, 因此建议杉木林下应该尽力避免种植蒲公英、薄荷、鱼腥草, 同时通过降低套种密度减少药材植物的化感影响。

**关键词:** 林下经济; 林药复合; 植物淋出物; 枯落物分解; 土壤酶活性

**中图分类号:** S714 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3776(2024)02-0043-07

## Effect of Leachates from understory Medicinal Plants on Decomposition of Forest Litter and Soil Enzyme Activities

PAN Yongzhu<sup>1</sup>, GAO Jiayu<sup>2</sup>, GUAN Wangfei<sup>3</sup>

(1. Lishui Forestry Extension Station of Zhejiang, Lishui 323000, China; 2. Zhejiang Forestry Extension Administration, Hangzhou 310020, China;

3. Ecological Forestry Development Center of Lishui Economic-Technological Development Area, Lishui 323000, China)

**Abstract:** Stems and leaves were collected from *Tetrastigma hemsleyanum*, *Polygonatum cyrtoneura*, *Taraxacum mongolicum*, *Mentha canadensis*, *Houttuynia cordata*, *Bletilla striata*, *Ganoderma lucidum* cultivated under *Cunninghamia lanceolata* plantation in Songyang county, Zhejiang Province. Leachates were extracted by water leaching method. Experiment was conducted on spraying 250 ml of leachates on *C. lanceolata* litter every two weeks within one month, 3 months and 6 months for studying its effect on decomposition of litter and soil enzyme activities. The results showed that the residual amounts of nutrients such as carbon, nitrogen, phosphorus, potassium, copper, zinc and manganese increased in litter treated by leachates from *T. mongolicum*, *M. canadensis* and *H. cordata*, indicating their inhibition of decomposition of litter and extended its decomposition turnover time. The activities of soil enzymes (sucrase, carboxymethyl cellulase,  $\beta$ -glucosidase, dehydrogenase, polyphenol oxidase, protease and phosphatase) were significantly decreased. The left 4 species leaches could significantly accelerate the decomposition of residues and enhance soil

收稿日期: 2023-06-03; 修回日期: 2023-12-15

基金项目: 2023 年丽水市科技计划项目(〔2023〕GYX15); 2024 年中央财政林业科技推广示范资金项目(浙财资环〔2023〕75 号)

作者简介: 潘永柱, 高级工程师, 从事森林培育及林业技术推广工作; E-mail: 775998403@qq.com。通信作者: 官王飞, 工程师, 从事森林培育工作; E-mail: 470468212@qq.com。

enzyme activity. The result suggested that *T. mongolicum*, *M. canadensis* and *H. cordata* should be avoided under *C. lanceolata* forest.

**Key words:** understory economy; forest medicine compound; plant leachates; litter decomposition; soil enzyme activity

松阳县地处浙西南山区,素有“八山一水一分田”之称,依托丰富的林地资源,优良的生态环境和林业产业发展优势,充分挖掘林下空间,不断摸索林下套种黄精 *Polygonatum* sp.、三叶崖爬藤(别名三叶青,本文称之为三叶青) *Tetrastigma hemsleyanum* 等林药复合套种模式,不仅能够解决土壤退化等问题,还能提高经济效益<sup>[1]</sup>。对于发展林药套种复合经营模式,选择适合的药材种植种类就极为重要,而决定林药是否适合套种的关键就是林药种间关系。因此,植物化感作用作为林药种间关系之一,具有重要的研究意义<sup>[2]</sup>。

植物化感作用的研究在我国国内学者的研究中占据着重要地位,主要侧重于通过植物向环境中释放化感物质来实现化感作用<sup>[3-4]</sup>。植物释放的化感物质,对土壤理化性质、土壤酶活性和微生物群落生长产生着重要影响,是影响林木枯落物分解的关键因素<sup>[5]</sup>。林下药用植物与林木复合系统开发一直是我国林业经济可持续发展与森林生态系统多维度梯次科学利用的有效途径之一,研究化感作用及其影响对这种复合系统发展的影响与存在风险,并采取创新措施解决该问题成为了当前的热点话题。已有的相关研究中,岳超等发现药材植物淋出物与杉木枯落物分解及土壤酶活性状态相关性及其水平变化对林药复合模式的成功与可持续发展具有重要研究意义和价值<sup>[6]</sup>。林洁等的研究表明,根据土壤活性的具体酶活性,可判断土壤酶活性的微观变化,并对实验分析有重要的意义<sup>[7]</sup>。邹军等通过植物的光合作用与林下种植复合模式的研究,发现土壤酶较少游离在土壤中,相反主要是吸附在土壤有机质和矿质胶体上,并且以复合物状态存在<sup>[8]</sup>。总体而言,许多研究认为,在林药复合生态系统中,药用植物释放的化感物质会对林木枯落物的分解产生影响<sup>[9-11]</sup>。林木枯落物是生态系统物质循环的重要组成部分,对恢复土壤肥力、维持生态系统运转、生物多样性系统稳定性具有重要影响意义<sup>[12-17]</sup>。目前,对于林木枯落物的研究主要集中在基质质量和混合分解等方面,较少涉及化感问题。

杉木 *Cunninghamia lanceolata* 作为我国最重要的造林树种之一,分布广泛且生产潜力较高。多花黄精 *Polygonatum cyrtoneura* 作为药食同源的药材,其性味甘甜,食用爽口,其肉质根状茎肥厚,含有大量淀粉、糖分、脂肪、蛋白质、胡萝卜素、维生素和其他多种营养成分,生食、炖服既能充饥,又有健身之用<sup>[18]</sup>。三叶青根据《本草纲目》记载,微苦,归肝、肺经,具有清热解毒,消肿止痛,化痰散结的功效,且全年可采,对各种热症、水肿、蛇伤有独特的疗效,除此之外,三叶青也具有有良好的抗癌作用,被称为“植物抗生素”,加工后可制作成抗癌产品,有一定的经济价值<sup>[19]</sup>。蒲公英 *Taraxacum mongolicum* 具有清热解毒,利尿散结的作用。薄荷 *Mentha canadensis* 具有疏散风热,清利头目,利咽,透疹,疏肝行气的功能。蕺菜(别名鱼腥草,本文称之为鱼腥草) *Houttuynia cordata* 具有清热解毒,消痈排脓,利尿通淋的功能。白及 *Bletilla striata* 具有收敛止血、消肿生肌的功效。灵芝 *Ganoderma lucidum* 具有补气安神,止咳平喘的功能。本研究以杉木林下枯落物为研究对象,选择当地较为常见的这 7 种林下药用植物,研究其淋出物对杉木林下枯落物分解及土壤的化感影响,为松阳地区杉木林选择合适的林药复合发展模式提供科学参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究地概况

研究区位于浙江省丽水市松阳县境内,地理坐标在 28°14′~28°37′N, 119°10′~119°42′E 之间。松阳县地处浙江省西南部,自西向东最宽处为 53.7 km,自北向南最宽处为 40.2 km,土地面积为 1 406 km<sup>2</sup>。松阳县境内多维低山、丘陵地带,以松古盆地为主,呈现出两边高中部低的地势,山地地形占总体面积的 76%,河流水系为瓯江水系。气候分布为中亚热带季风气候,年均气温为 17.8 ℃,无霜期为 259 d,年平均降水量为 1 750 mm,温暖湿润,四季分明,年日照时数为 1 840 h。浙江省丽水市松阳县林下种植的药用植物主要有三叶青、多花黄精、蒲公英、薄荷、鱼腥草、白及、灵芝等<sup>[20-22]</sup>。

### 1.2 试验方法

1.2.1 药材植物茎叶淋出物制备 取样杉木林区林下 7 种药材植物茎叶样品,采用蒸馏水为配置液,将不同药材植物分别与蒸馏水配置,配置浓度为  $85 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ ,浓度相当于  $8.5 \text{ g}$  植物茎叶样本浸泡在  $100 \text{ mL}$  配置液中,整合这种液体 10 次共计  $1\,000 \text{ mL}$ ,此容量的目的在于能够模仿最大雨季降水量下的林下药材植物生物化感作用,浸泡时间设置为  $48 \text{ h}$ ,浸提液经过离心过滤  $30 \text{ min}$ ,保留最后的  $500 \text{ mL}$ ,置入  $1\,000 \text{ mL}$  样本瓶于冰箱内,储存温度  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  低温保存,待取用。

1.2.2 杉木枯落物分解试验 称取杉木林下原始土壤  $13.5 \text{ kg}$ ,采用北京旭鑫盛科 ST-A200 土壤振动筛分仪,利用电磁驱动产生三维抛掷运动效果筛分土壤样品,筛分规格为  $0.5 \text{ mm}$ ,过筛后的土壤按照平均分配原则,平均分配后装入规格为  $25 \text{ cm} \times 25 \text{ cm}$  的 7 个袋子密存;林下枯落物回收  $750 \text{ g}$ ,枯落物分别按照每个  $100 \text{ g}$  规格装入 7 个培养钵(预留  $50 \text{ g}$  储备),每个培养钵均使用制备好的浸提液进行喷雾器喷洒,喷浇药材植物茎叶制备的浸提液到林下枯落物试验样品中,对照喷浇等量蒸馏水;将喷洒过浸提液的试验培养钵装入土壤试验袋子,土壤包裹严密。按照上述操作流程,每次喷洒浸提液数量为  $250 \text{ mL}$ ,每隔 2 周喷浇一次,喷洒周期分别为 1 个月、3 个月、6 个月<sup>[2]</sup>,期间保持枯落物中浸提液湿润状态,试验室恒温保持在  $24.6 \sim 27.6\text{ }^{\circ}\text{C}$  区间不变,湿度控制在  $60\%$ ,6 个月后试验结束。

### 1.3 样品采集与分析

试验样品采集后,在分解过程中,按照 3 次回收分解袋(回收时间分别是 1 个月、3 个月、6 个月时),同时也按照 3 次回收土壤样本。回收时将培养钵中的枯落物叶分解残余物取出,将土壤样品取出并置于土壤振动筛分仪中,按照  $0.25 \text{ mm}$  比例重新筛分。筛分后将回收的枯落物分解残余物置于  $0.25 \text{ mm}$  土壤中,去除杂物和其他物品,自然风干至恒重后,测定分解残留质量及养分含量。

养分测定: C 含量采用重铬酸钾容量法-加热法测定; N、P、K 采用硫酸氢和氧化氢混合物加热溶解通过 AA3 流动分析仪、紫外分光光度计、火焰光度计测定; Cu、Zn、Mn 采用干灰化、原子吸收光度计法测定。

土壤酶活性测定: 蔗糖酶和羧甲基纤维素酶活性采用二硝基水杨酸比色法测定;  $\beta$ -葡萄糖苷酶采用硝基酚比色法测定; 脱氢酶采用三苯基四唑氯化物比色法测定; 多酚氧化酶活性采用邻苯三酚比色法测定; 蛋白酶活性采用茚三酮比色法测定; 磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法测定。

### 1.4 数据处理

枯落物分解速率计算采用 SPSS 26.0 软件,依据国内学者之前研究的衰减模型  $R=ae^{-bt}+ce^{-dt}$  (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)<sup>[2]</sup>对不同药材植物的浸提液进行分析,将浸提液浇淋到枯落物中并测算枯落物的残留量(换算为残余率进行分解测算)。将上述模型的双要素进行拟合分析,得出分解周转期(干物质分解  $95\%$ ,也就是残留量衰减到  $5\%$  的历时,  $T_{0.95}$ )和分解半衰期(干物质分解  $50\%$ ,也就是残留量衰减至  $50\%$  的历时,  $T_{0.50}$ ),通过计算可以直观计算出两个分解时间数值,采用 SPSS 26.0 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,利用软件 Prism 9.21 对计算所得数值进行绘图,通过实证分析查看其抑制水平与相关性。

## 2 结果与分析

### 2.1 药材植物水浸提液对杉木枯落叶分解速率的影响

根据杉木枯落叶分解过程中残余物的质量变化,建立分解模型并计算出枯落叶质量分解周转期和半衰期(表 1)。药材植物水浸提液对杉木枯落叶分解速率的影响中,蒲公英(分解周转期  $T_{0.95}=44.541^{**}$  年、分解半衰期  $T_{0.50}=9.115^{**}$  年)、薄荷(分解周转期  $T_{0.95}=67.435^{**}$  年、分解半衰期  $T_{0.50}=14.776^{**}$  年)、鱼腥草(分解周转期  $T_{0.95}=54.887^{**}$  年、分解半衰期  $T_{0.50}=13.224^{**}$  年)相比 CK 药材植物水浸提液等量蒸馏水处理标准值(分解周转期  $T_{0.95}=27.113$  年、分解半衰期  $T_{0.50}=5.114$  年)周期有了显著延长,表明这三种药材植物水浸提液抑制了杉木枯落物的分解,因此导致分解周转期和分解半衰期的延长。

表 1 7 种药材植物淋出物处理的杉木枯落物分解周转期和半衰期  
Tab. 1 C. lanceolate litter decomposition turnover and half-life time of leachates from 7 medicinal plants

| 药材植物     | 枯落物分解函数关系                               | $T_{0.95}/a$ | $T_{0.50}/a$ |
|----------|---|--------------|--------------|
| CK 对照标准值 | $R=0.113e^{-13.4552t}+0.784e^{-0.045t}$ | 27.113       | 5.114        |
| 三叶青      | $R=0.164e^{-11.145t}+0.8993e^{-0.033t}$ | 24.513*      | 4.154*       |
| 多花黄精     | $R=0.112e^{-9.224t}+0.8776e^{-0.1123t}$ | 21.334**     | 3.992**      |
| 蒲公英      | $R=0.254e^{-14.554t}+0.896e^{-0.011t}$  | 44.541**     | 9.115**      |
| 薄荷       | $R=0.193e^{-7.6654t}+0.887e^{-1.245t}$  | 67.435**     | 14.776**     |
| 鱼腥草      | $R=0.118e^{-28.556t}+0.908e^{-0.143t}$  | 54.887**     | 13.224**     |
| 白及       | $R=0.102e^{-9.556t}+0.146e^{-0.196t}$   | 21.542*      | 4.132*       |
| 灵芝       | $R=0.118e^{-19.887t}+0.911e^{-0.113t}$  | 20.991**     | 3.991*       |

注: CK 代表与药材植物水浸提液等量的蒸馏水处理水平;  $R$  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% 历时;  $T_{0.50}$  为干物质分解 50% 历时。\*表示数值与 CK 标准值有相关性、显著相关性, 且显著性差异(  $P<0.05$  ), \*\*表示极显著性相关(  $P<0.01$  )。

如表 1 可知, 7 种药材植物淋出物处理的杉木枯落物分解周转期和半衰期统计中, 其中 CK 对照标准值为分解周转期  $T_{0.95}$ =27.113 年、分解半衰期  $T_{0.50}$ =5.114 年; 其中三叶青、多花黄精、白及、灵芝的年限均低于 CK 标准值, 分别是三叶青分解周转期  $T_{0.95}$ =24.513\*年、分解半衰期  $T_{0.50}$ =4.154\*年; 多花黄精分解周转期  $T_{0.95}$ =21.334\*\*年、分解半衰期  $T_{0.50}$ =3.992\*\*年; 白及分解周转期  $T_{0.95}$ =21.542\*年、分解半衰期  $T_{0.50}$ =4.132\*年; 灵芝分解周转期  $T_{0.95}$ =20.991\*\*年、分解半衰期  $T_{0.50}$ =3.991\*年。7 种药材植物淋出物处理的杉木枯落物分解周转期和半衰期实证绘图分析, 结果如图 1 所示。

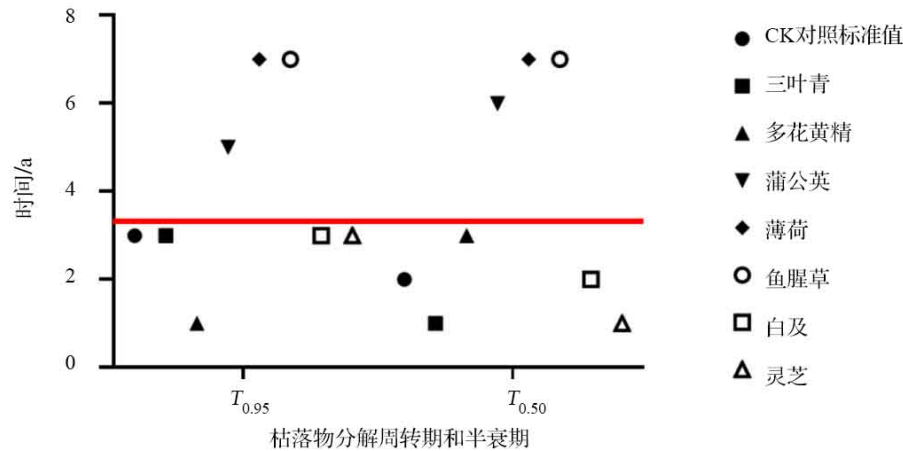


图 1 7 种药材植物淋出物处理的杉木枯落物分解周转期和半衰期散点分布实证结果

Fig. 1 Scatter plot of C. lanceolata litter decomposition turnover and half-life time of leachates from 7 medicinal plants

如图 1 内容, 结合数据分析可知, 红线标准值以上分布的蒲公英、薄荷、鱼腥草均超过了分解周转期和半衰期 CK 标准值。其他药材植物: 三叶青分解周转期降低了 2.6 年、降低分解率为 9%, 分解半衰期降低了 0.96 年、降低分解率为 19.2%; 多花黄精分解周转期降低了 5.779 年、降低分解率为 21.4%, 分解半衰期降低了 1.122 年、降低分解率为 21.9%; 白及分解周转期降低了 5.571 年、降低分解率为 20.6%, 分解半衰期降低了 0.982 年、降低分解率为 19.1%; 灵芝分解周转期降低了 6.122 年、降低分解率为 22.6%, 分解半衰期降低了 1.123 年、降低分解率为 21.9%。通过数据分析可见, 该 4 种药材植物淋出物的浸提液均降低了杉木枯落物的分解周转期和分解半衰期, 其中分解周转期降低最多的为灵芝, 降低了 22.6%; 分解半衰期降低最多的为多花黄精和灵芝, 降低均为 21.9%。三叶青、白及为显著相关, 多花黄精、灵芝为极显著性相关。

2.2 7 种药材植物淋出物处理的杉木枯落物养分残留量

通常而言, 在林木枯落叶分解过程中, 残余物中不同养分的释放动态因自身性质、微生物活动和环境状况

而存在很大差异，7 种药材植物淋出物处理的杉木枯落物养分残留量统计情况如表 2 所示。对照 CK 代表标准值（药材植物水浸提液等量的蒸馏水处理），C、N、P、K、Cu、Zn 和 Mn 依次分类检测分解量。

表 2 7 种药材植物淋出物处理的杉木枯落物养分残留量统计（平均值）  
Tab. 2 Nutrient residues in *C. lanceolata* litter treated by leachates from 7 medicinal plants ( mean )

| 药材植物  | 分解时间/月 | C/ ( mg·g <sup>-1</sup> ) | N/ ( mg·g <sup>-1</sup> ) | P/ ( mg·g <sup>-1</sup> ) | Cu/ ( mg·g <sup>-1</sup> ) | Zn/ ( mg·g <sup>-1</sup> ) | Mn/ ( mg·g <sup>-1</sup> ) |
|-------|--------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 对照 CK | 1      | 289.25                    | 94.65                     | 111.21                    | 119.99                     | 132.63                     | 64.44                      |
|       | 3      | 225.32                    | 64.72                     | 113.61                    | 88.99                      | 77.81                      | 54.45                      |
|       | 6      | 111.54                    | 53.81                     | 93.51                     | 65.67                      | 55.67                      | 45.33                      |
| 三叶青   | 1      | 267.98                    | 88.75                     | 99.32                     | 101.34                     | 110.89                     | 50.21                      |
|       | 3      | 197.54                    | 56.34                     | 88.23                     | 78.65                      | 65.34                      | 45.87                      |
|       | 6      | 108.34                    | 41.11                     | 45.88                     | 54.98                      | 41.09                      | 39.87                      |
| 多花黄精  | 1      | 211.45                    | 65.44                     | 89.34                     | 90.23                      | 78.92                      | 45.78                      |
|       | 3      | 111.45                    | 43.56                     | 67.45                     | 70.98                      | 45.67                      | 38.91                      |
|       | 6      | 56.34                     | 23.88                     | 45.33                     | 43.35                      | 28.92                      | 29.33                      |
| 蒲公英   | 1      | 425.91                    | 5.11                      | 4.33                      | 6.54                       | 14.53                      | 68.98                      |
|       | 3      | 467.32                    | 35.39                     | 25.46                     | 22.76                      | 24.56                      | 71.98                      |
|       | 6      | 473.21                    | 196.14                    | 195.89                    | 182.54                     | 86.54                      | 99.43                      |
| 薄荷    | 1      | 311.11                    | 110.98                    | 123.98                    | 123.23                     | 133.65                     | 78.65                      |
|       | 3      | 286.13                    | 114.45                    | 131.43                    | 131.22                     | 134.22                     | 88.98                      |
|       | 6      | 319.23                    | 134.89                    | 141.54                    | 142.11                     | 136.76                     | 101.43                     |
| 鱼腥草   | 1      | 290.23                    | 111.45                    | 121.23                    | 121.23                     | 137.23                     | 67.89                      |
|       | 3      | 299.43                    | 119.23                    | 129.23                    | 129.34                     | 141.23                     | 71.89                      |
|       | 6      | 301.22                    | 122.32                    | 132.12                    | 131.34                     | 148.99                     | 72.34                      |
| 白及    | 1      | 149.56                    | 93.43                     | 101.22                    | 100.98                     | 122.32                     | 60.23                      |
|       | 3      | 111.23                    | 66.56                     | 78.45                     | 76.45                      | 58.22                      | 40.45                      |
|       | 6      | 84.45                     | 43.45                     | 54.33                     | 34.22                      | 22.33                      | 28.76                      |
| 灵芝    | 1      | 188.43                    | 90.23                     | 90.89                     | 108.99                     | 113.45                     | 60.95                      |
|       | 3      | 109.22                    | 51.22                     | 60.98                     | 70.98                      | 40.54                      | 43.32                      |
|       | 6      | 78.45                     | 32.11                     | 43.55                     | 54.33                      | 20.98                      | 29.22                      |

由表 2 可知，蒲公英、薄荷、鱼腥草三种药材植物淋出物处理的杉木枯落物养分残留量呈现升高趋势，这证明三种药材植物的淋出物处理的杉木枯落物分解后的养分残留量不降反升，如表 1 分析可知，其分解年限延长，其淋出物浸提液化感作用未能促进分解反而延长了分解周期，堆积了更多的残留物。由表 2 还可知，7 种药材植物水浸提液对杉木枯落物分解过程中养分释放（残留量）的影响各不相同。一般情况下在林木枯落物分解过程中，残余物不同养分的释放是动态变化的，其中主要包括对本身化感作用反应的不同区分，包括周边环境生物群落、微生物活动、环境状况等各种差异。

2.3 7 种药材植物淋出物对杉木枯落物土壤酶活性的影响

杉木枯落物分解过程中土壤酶活性变化结果如表 3。根据表 3 可知，蒲公英、薄荷、鱼腥草三种药材植物淋出物处理的土壤中的蔗糖酶、羧甲基纤维素酶、β-葡糖苷酶、脱氢酶、多酚氧化酶、蛋白酶、磷酸酶活性在 1 个月、3 个月、6 个月时间均表现出逐步降低趋势，土壤酶活性的降低证明蒲公英、薄荷、鱼腥草三种药材植物的淋出物浸提液对土壤酶活性具有抑制作用。抑制作用实证研究分析如表 3 所示。由表 3 可知，蔗糖酶和脱氢酶在杉木枯落物分解中期活性较高，羧甲基纤维素酶、β-葡糖苷酶、多酚氧化酶和蛋白酶在杉木枯落物分解中期和分解后期活性较高，磷酸酶在杉木枯落物分解前期活性较高。

由土壤酶活性结果可知，蒲公英、薄荷、鱼腥草 3 种药材植物淋出物浸提液降低了土壤酶活性，这三种淋出物对于土壤酶活性的影响相似，在杉木枯落物分解中期降低了蔗糖酶活性，在杉木枯落物分解中后期降低了羧甲基纤维素酶、β-葡糖苷酶、脱氢酶、多酚氧化酶、蛋白酶的酶活性。其余 4 种淋出物对于土壤酶活性的抑制作用明显较弱，对于蔗糖酶在杉木枯落物分解中期抑制作用均较为明显，在杉木枯落物分解后期三叶青和灵芝淋出物提高了蔗糖酶活性。三叶青淋出物浸提液在杉木枯落物分解后期提升了羧甲基纤维素酶的活性，而白及和灵芝淋出物浸提液在杉木枯落物分解中期提升了羧甲基纤维素酶的活性，在杉木枯落物分解后期有一定的抑制作用。白及淋出物浸提液降低了β-葡糖苷酶在杉木枯落物分解中期的活性，三叶青、多花黄精、灵芝淋出物浸提液在杉木枯落物分解后期提升了β-葡糖苷酶的活性。三叶青、多花黄精、白及以及灵芝淋出物浸提液均在杉木枯落物分解后期提高了脱氢酶活性。三叶青以及多花黄精淋出物浸提液在杉木枯落物分解中期抑制了多

酚氧化酶活性。三叶青、白及和灵芝淋出物浸提液在杉木枯落物分解后期提升了蛋白酶的活性。三叶青、多花黄精、白及和灵芝淋出物浸提液在杉木枯落物分解后期提升了磷酸酶的活性。

表 3 7 种药材植物淋出物对杉木枯落物土壤酶活性影响统计  
Tab. 3 Effect of leachates from 7 medicinal plants on soil enzyme activities of *C. lanceolata* stand

| 酶种类            | 试验周期/月 | 土壤酶活性/( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ ) |       |       |       |       |       |       |       |
|----------------|--------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                |        | CK  | 三叶青   | 多花黄精  | 蒲公英   | 薄荷    | 鱼腥草   | 白及    | 灵芝    |
| 蔗糖酶            | 1      | 28.94   | 19.23 | 18.98 | 34.54 | 38.43 | 43.41 | 12.32 | 18.11 |
|                | 3      | 51.26   | 25.56 | 21.22 | 22.21 | 29.12 | 26.54 | 29.32 | 29.32 |
|                | 6      | 43.31   | 56.98 | 45.67 | 12.23 | 14.32 | 13.22 | 45.56 | 55.43 |
| 羧甲基纤维素酶        | 1      | 0.018   | 0.015 | 0.019 | 0.055 | 0.038 | 0.065 | 0.034 | 0.045 |
|                | 3      | 0.068   | 0.066 | 0.066 | 0.032 | 0.023 | 0.034 | 0.089 | 0.090 |
|                | 6      | 0.050   | 0.089 | 0.101 | 0.024 | 0.016 | 0.022 | 0.108 | 0.113 |
| $\beta$ -葡萄糖苷酶 | 1      | 21.89   | 33.23 | 23.43 | 45.43 | 43.32 | 39.87 | 21.23 | 19.33 |
|                | 3      | 43.56   | 56.45 | 45.45 | 32.11 | 34.45 | 29.32 | 29.32 | 46.54 |
|                | 6      | 46.68   | 76.54 | 76.85 | 18.32 | 21.98 | 21.23 | 45.65 | 76.98 |
| 脱氢酶            | 1      | 4.18  | 3.43  | 5.44  | 6.54  | 4.56  | 4.57  | 4.35  | 3.44  |
|                | 3      | 8.97  | 6.54  | 7.88  | 5.44  | 3.91  | 2.11  | 9.11  | 6.77  |
|                | 6      | 5.77  | 11.34 | 12.45 | 3.21  | 1.22  | 1.21  | 11.43 | 12.23 |
| 多酚氧化酶          | 1      | 0.013   | 0.009 | 0.008 | 0.045 | 0.047 | 0.045 | 0.012 | 0.067 |
|                | 3      | 0.087   | 0.034 | 0.018 | 0.033 | 0.032 | 0.021 | 0.067 | 0.098 |
|                | 6      | 0.075   | 0.089 | 0.067 | 0.011 | 0.021 | 0.011 | 0.103 | 0.115 |
| 蛋白酶            | 1      | 3.04  | 2.22  | 1.23  | 4.33  | 4.54  | 3.99  | 1.22  | 3.54  |
|                | 3      | 5.32  | 4.55  | 3.45  | 3.12  | 3.98  | 3.12  | 3.54  | 7.54  |
|                | 6      | 7.85  | 9.76  | 7.66  | 2.12  | 3.11  | 2.12  | 9.66  | 9.88  |
| 磷酸酶            | 1      | 0.03  | 0.01  | 0.02  | 0.04  | 0.03  | 0.04  | 0.02  | 0.03  |
|                | 3      | 0.02  | 0.03  | 0.04  | 0.03  | 0.02  | 0.02  | 0.04  | 0.05  |
|                | 6      | 0.02  | 0.06  | 0.08  | 0.02  | 0.01  | 0.01  | 0.06  | 0.07  |

### 3 讨论与结论

#### 3.1 药材植物淋出物浸提液对枯落物分解速率的影响

药材植物中的蒲公英、薄荷、鱼腥草浸提液处理对杉木林枯落物的中期和后期分解产生了抑制作用，原因可能是浸提液中所含有的邻苯二甲酸二丁酯影响了土壤性质，研究表明，邻苯二甲酸二丁酯能引起土壤微生物量及酶活性的变化，对分解中的丝状真菌活性存在显著抑制作用<sup>[23]</sup>，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<sup>[24]</sup>； $\beta$ -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，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<sup>[25]</sup>；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<sup>[26]</sup>；有机酸也可通过影响土壤 pH 值，进而影响土壤酶活性。这 3 种药材植物对蔗糖酶、蛋白酶活性为低浓度促进和高浓度抑制，其他酶活性均为抑制酶活性关系。已有的研究表明，在分解过程中，多酚氧化酶和脱氢酶主要在后期起到分解作用<sup>[27]</sup>。因此，根据分析相关酶活性受到抑制主要原因是这 3 种药材植物浸提液处理前期分解与中期、后期分解均能够改变分解周期的化感作用原因导致的。

#### 3.2 药材植物淋出物浸提液对枯落物分解残留物释放养分的影响

在枯落物的分解过程中，枯落物 C 的释放在整个时间阶段中数量最多，在前期和中期主要是纤维素和半纤维素的分解，在后期主要是木质素的分解<sup>[25]</sup>，枯落物 N、P 含量变化结果呈现陡峭变化，在分解过程中 N、P 的释放与蛋白酶和磷酸酶有一定程度的相关性，但是也并不是完全一致的，土壤微生物的生理需求对这两种营养素的需求变化出现“富集”现象，将成为引发土壤酶活性突变的原因<sup>[28]</sup>。在本研究中，蒲公英的 N、P 含量在前中期较低，可能是由于微生物诱导合成蛋白酶和磷酸酶以满足自身代谢需要的原因<sup>[25]</sup>，从而进一步完成分解过程，而在同时期，蛋白酶和磷酸酶活性相对有所提高，这一结果与含量相吻合，可能是由于诱导合成作用<sup>[26]</sup>。

本试验中以蒲公英、薄荷、鱼腥草浸提液的处理对杉木枯落物分解过程中残余物的 C、N、P、K、Cu、Zn 和 Mn 残留量变化结果呈现出残留物升高的趋势与走向，抑制了分解效果，延长了分解周转期与半衰期，呈现出显著抑制效果，其他 4 种药材植物分解后的残留物下降，说明其分解有序进行，残留物下降可以帮助更好地

提升分解速度。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。土壤酶活性的分解中残留受影响的也包括淀粉酶、蔗糖酶和纤维素酶等水解酶类,脱氢酶、 $\beta$ -葡萄糖苷酶、多酚氧化酶等氧化还原酶均受到后期分解残留物的影响较大。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<sup>[26]</sup>。

### 3.3 结论

综合上述 7 种杉木林下药用植物中,其中蒲公英、薄荷、鱼腥草 3 种药材植物浸提液对杉木枯落物分解的 C、N、P、K、Cu、Zn 和 Mn 残余量有增加效果,抑制了解,延长了分解周期,通过土壤酶活性的变化进而影响枯落物分解速率和养分释放,证明 3 种药材植物淋出物浸提液对土壤酶活性有显著抑制作用,因此,建议在杉木林下尽量避免种植蒲公英、薄荷、鱼腥草,另外,可以通过降低套种密度减少药材植物的化感影响,以便于维持土壤肥力以及生态系统中物质循环的稳定生态系统,但是在这过程中要兼顾经济效益,因此对于之后如何选择合适的套种密度就成为一个重要的问题和下一步研究重点。

### 参考文献

- [1] 叶红嫣. 蹚出山区共同富裕新路子——松阳县大力发展林下经济实现“一亩山万元钱”[J]. 浙江国土资源, 2022(04): 57–58.
- [2] 卢玉鹏, 许纪元, 张晓曦, 等. 林下药材植物淋出物对太白杨枯落物分解及土壤酶活性的影响[J]. 土壤学报, 2017, 54(03): 749–758.
- [3] 郭丽君, 羽健宾, 李钰婷, 等. 氯吡啶对葛根 *Ptexp1* 基因表达的影响及其与产量品质形成的关系[J]. 分子植物育种, 2021(03): 50–59.
- [4] 谢婷婷, 刘明辉, 袁中勋, 等. 不同泥沙埋深对几种一年生草本枯落物分解及养分动态特征的影响[J]. 生态学报, 2020(21): 90–97.
- [5] 闵小莹, 熊康宁, 申小云, 等. 喀斯特石漠化地区植物对于干旱胁迫的适应性研究进展[J]. 世界林业研究, 2020(03): 110–115.
- [6] 岳超, 张文婷, 赵维良, 等. 化学模式分析联合指纹图谱评价不同基原枳壳药材的质量[J]. 中国现代应用药学, 2021(23): 80–89.
- [7] 林洁, 梁增艳, 赵致, 罗春丽, 等. 不同透光率和生长调节剂浓度对三七的影响[J]. 河南农业科学, 2021(01): 78–86.
- [8] 邹军, 喻理飞, 李媛媛, 等. 喀斯特区不同岩性发育的土壤上植物-枯落物-土壤系统 13C 值变化特征[J]. 水土保持学报, 2020(01): 30–39.
- [9] 田奥, 李苇洁, 王加国, 等. 关岭县石漠化地区立地因子对白刺花群落特征的影响[J]. 西部林业科学, 2021(03): 34–41.
- [10] 张伟, 董文渊, 钟欢, 等. 不同混交类型对箬竹生长及土壤养分空间差异的影响[J]. 西部林业科学, 2020(06): 70–75, 84.
- [11] 陈小雪, 李红丽, 董智, 等. 不同火烧强度迹地林下灌草层物种多样性及其与土壤因子的关系[J]. 西北植物学报, 2020(01): 130–140.
- [12] 徐道炜, 刘金福, 何中声, 等. 毛竹向杉木林扩张对土壤活性有机碳及碳库管理指数影响[J]. 西部林业科学, 2019(05): 22–28, 36.
- [13] 罗笑, 罗扬, 陈瑞芳, 等. 喀斯特地区林地地类变化对地形因子的响应——以贵州龙里县为例[J]. 西部林业科学, 2019(06): 146–155.
- [14] 刘葵, 黄万斌, 何梦铃, 等. 基于 GIS 和 MaxEnt 的弥勒市林下三七仿野生种植适生区分析[J]. 西部林业科学, 2022(01): 56–61.
- [15] 王亚茹, 林鑫宇, 惠昊, 等. 杨树人工林类型对土壤磷组分的影响[J]. 生态学杂志, 2021(06): 23–34.
- [16] 张鹏飞, 孙志高, 陈冰冰, 等. 闽江口芦苇与短叶荳空间扩展对湿地土壤磷赋存形态的影响[J]. 生态学报, 2020(21): 5–12.
- [17] 郑曼曼, 王超, 沈仁芳. 碳酸钙和根际作用对酸性红壤解磷微生物丰度的影响[J]. 土壤, 2020(04): 90–98.
- [18] 李金花, 周守标. 黄精属植物资源利用和经济价值评估[J]. 安徽农学通报, 2006, 03(10): 77.
- [19] 江山市政协文史和学习委员会. 江山中草药图鉴[M]. 北京, 中医古籍出版社, 2020: 054.
- [20] Zsolt KOTROCZÓ, Zsuzsa VERES, István FEKETE, et al. Soil enzyme activity in response to long-term organic matter manipulation[J]. Soil Biol Biochem, 2020(6): 80–87.
- [21] MATHILDE CHOMEL, CATHERINE FERNANDEZ, ANNE BOUSQUET MELOU, et al. Secondary metabolites of *Pinus halepensis* alter decomposer organisms and litter decomposition during afforestation of abandoned agricultural zones[J]. J Ecol, 2019(2): 102–110.
- [22] 叶森土, 许艳, 张川英, 等. 浙江省松阳县公益林乔木层生物量影响因素分析[J]. 安徽农业科学, 2022, 50(09): 108–110, 113.
- [23] ROY RN, LASKAR S, SEN SK. Dibutyl phthalate, the bioactive compound produced by *Streptomyces albidoflavus* [J]. Microbiological Research, 2006, 161: 121–126.
- [24] 王志刚, 赵晓松, 徐伟慧, 等. 黑土微生物量和酶活性对邻苯二甲酸二丁酯污染的响应[J]. 生态毒理报, 2015, 10(6): 199–205.
- [25] 严海元, 辜夕容, 申鸿. 森林凋落物的微生物分解[J]. 生态学杂志, 2010, 29(9): 1827–1835.
- [26] 周宝利, 韩琳, 尹玉玲, 等. 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[J]. 沈阳农业大学学报, 2010, 41(3): 275–278.
- [27] SINSABAUGH RL, CARREIRO MM, ALVAREZ S. Enzyme and microbial dynamics of litter decomposition// Burns RG, Dick RP. Enzymes in the environment: Activity, ecology, and applications[M]. New York: Marcel Dekker Inc, 2002: 249–265.
- [28] 胡霞, 吴宁, 吴彦, 等. 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[J]. 应用生态学报, 2012, 23(5): 1226–1232.
- [29] 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.
- [30] 卢玉鹏, 许纪元, 张晓曦, 等. 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[J]. 植物生态学报, 2017, 41(06): 639–649.