

DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2022.005.015

# 马尾松与乡土阔叶树种混合凋落叶分解的质量损失

张艳<sup>1,2</sup>, 李勋<sup>1</sup>, 宋思梦<sup>1</sup>, 张健<sup>2\*</sup>

(1. 四川民族学院, 横断山区生态修复与特色产业培育研究中心, 四川 康定 626001; 2. 四川农业大学林学院生态林业研究所, 生态林业工程重点实验室, 长江上游生态安全协同创新中心, 四川 成都 611130)

**摘要:** [目的] 了解马尾松凋落叶与不同乡土阔叶树种凋落叶的混合分解特征, 探明混合凋落叶的质量损失率与阔叶凋落叶的种类和所占比例之间的关系。[方法] 本文以针叶马尾松 (P) 与乡土阔叶树种香樟 (C)、檫木 (S) 以及香椿 (T) 凋落叶为研究对象, 采用凋落叶分解袋法在野外进行 2 a 的针阔混合分解实验, 通过将上述 4 个树种凋落叶按照 1 针 1 阔、1 针 2 阔和 1 针 3 阔组合 (即 PC、PS、PT、PSC、PST、PCT 和 PSCT) 且每种组合设置不同混合比例, 共得到 31 个混合处理, 研究这 31 个混合处理和 4 种纯凋落叶 (合计 35 种处理凋落叶) 的质量损失变化特征。[结果] 分解 2 a 后, PT、PC、PCT、PST 以及 PSCT 组合的质量损失率高于 PS 和 PSC 组合。混合凋落叶的质量损失率基本表现为协同效应且随分解时间的延长呈先增强后减弱的趋势, 在分解 18 个月时最强 (67.74%), 相对于其它混合处理, PT、PCT 和 PSCT 质量比分别为 6:4、7:2:1 和 7:1:1:1 时的质量损失率在 4 个分解时期均表现出较强的协同效应。PLS 回归分析表明, 凋落叶的分解系数  $k$  值和混合效应均与凋落叶的初始总酚含量、木质素含量、纤维素含量、C/N、C/P、木质素/N 以及木质素/P 表现为显著的负相关, 与初始 N 和 P 含量表现为显著的正相关。[结论] 总体上看, 阔叶所占比例为 30%~40% 时, 尤其是含有香椿 (T) 的混合凋落叶 (PT, PST, PCT 和 PSCT) 有利于促进马尾松凋落叶分解和林地养分循环。

**关键词:** 马尾松低效林; 质量损失; 乡土树种; 混合凋落叶分解; 协同效应

**中图分类号:** S718.55

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1001-1498(2022)05-0134-12

马尾松 (*Pinus massoniana* Lamb.) 人工纯林分布于我国多个地区, 南起广东雷州半岛 (21° 41' N), 北至陕西秦岭 (33° 56' N), 向西延伸至四川盆地中部<sup>[1]</sup>。马尾松能够在干旱、沙质和贫瘠的土壤中生长, 它生长迅速, 同时具有良好的制浆特性, 因此, 被认为是亚热带地区废弃区、严重侵蚀和边缘地带造林的优良树种<sup>[2]</sup>。研究表明, 人工纯林因树种单一且长期选择性地吸收、利用和归还 (主要是凋落物分解) 土壤养分, 导致林地土壤出现养分失衡、林分稳定性降低的现象<sup>[3]</sup>。随着林龄的增长,

马尾松人工林出现了土壤肥力下降、生物多样性退化等一系列生态安全问题<sup>[4-5]</sup>。可见, 林地生产力下降以及土壤退化已成为马尾松人工纯林可持续性经营的重大威胁<sup>[6]</sup>, 提高林地生产力、自肥能力以及土壤肥力对马尾松人工林可持续经营以及维持其生态功能具有重要意义。

凋落叶分解对森林生态系统养分循环具有重要作用, 不同树种凋落叶混合后的分解是促进还是抑制作用, 对于林地养分归还还具有重要影响。大量关于凋落叶混合分解的研究表明, 凋落叶混合后在分

收稿日期: 2022-03-01 修回日期: 2022-05-11

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31370628); 国家科技支撑计划项目 (2011BAC09B05) 和四川省科技支撑计划项目 (12ZC0017)

\* 通讯作者: 张健, 硕士, 教授, 主要研究方向: 森林培育、森林生态等。E-mail: sicauzhangjian@163.com

解过程中存在着明显的混合效应, 如果凋落叶混合分解表现为彼此抑制, 凋落叶向土壤归还养分的过程就会受到阻碍, 而当凋落叶混合分解表现为促进时, 可能有利于缓解林地土壤养分失衡现象, 而这2种现象被认为是凋落叶混合分解的非加和效应<sup>[7-9]</sup>。研究发现, 大多数针叶树种凋落叶在分解过程中会产生具有化感作用的化合物<sup>[10]</sup>, 这些化合物会抑制凋落叶的分解和养分的归还; 而乡土阔叶树种凋落叶分解有利于补充土壤肥力, 促进林木生长<sup>[11-13]</sup>。同时, 宽大的阔叶可改善针叶形态带来的生境缺陷和水分吸附特征, 从而有利于增加土壤动物活性, 促进凋落叶的分解<sup>[14]</sup>, 加速林地土壤养分的归还。因此, 与单一针叶凋落叶相比, 具有更高养分含量的混合凋落叶会加速分解并增加养分矿化, 进而增加氮释放和促进养分循环<sup>[15-16]</sup>。

不同树种凋落叶数量和性质的差异将通过改变混合凋落叶的基质质量从而影响森林地表土壤碳和氮库, 而树种混交比例的变化影响着凋落叶的数量。有研究表明, 马尾松、栲 (*Castanopsis fargesii* Franch.)、含笑 (*Michelia figo* Lour.) 混交林的年凋落叶量是纯马尾松林的 1.12~1.17 倍<sup>[17]</sup>。同时, 当前马尾松人工纯林改造中还存在混交比例不清楚、混交树种选择较少、适应性和生产力较低等问题<sup>[18-20]</sup>。因此, 了解不同树种组合以及不同比例下凋落叶的动态分解特征及质量损失混合效应, 对促进林地养分循环、维持土壤肥力以及马尾松林的可持续

经营有着重要意义。本研究通过开展马尾松与3个珍贵乡土阔叶树种香樟 (*Cinnamomum camphora* Presl.)、檫木 (*Sassafras tzumu* Hemsl.) 以及香椿 (*Toona sinensis* Roem.) 凋落叶混合分解特征的研究, 从物质循环的角度筛选出适宜的树种组合以及混合比例, 旨在为马尾松纯林的混交化改造提供理论依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区概况

本研究在四川农业大学的实验基地 (31°01'~31°02' N, 103°34'~103°36' E) 进行, 该基地位于四川省都江堰市, 属于青藏高原向四川盆地的一段过渡地带, 气候类型为亚热带季风湿润气候, 降水量 1 243.8 mm, 年平均气温 15.2 °C。样地区域土壤为黄壤, 在中国土壤分类系统中为铁铝土<sup>[21]</sup>。研究地点海拔约为 800 m, 林地内主要有马尾松、杉木 (*Cunninghamia lanceolata* Lamb. Hook.)、樟树 (*Cinnamomum camphora* Presl.) 和喜树 (*Camptotheca acuminata* Decne.)。本试验开始于 2016 年 8 月, 在马尾松、樟树等树种的混交林中选择 3 块样地, 每块样地大小均为 30 m × 30 m, 每个样地尽量保持地形地貌、海拔、母岩、土壤类型、坡度、坡位、林地情况以及林分密度等相近或相似, 样地间隔 ≥ 5 m。3 个样地详细情况见表 1。

表 1 样地基本信息 (平均值 ± 标准差)

Table 1 Basic information of three selected plots (mean ± SD)

样地 Sampling plots	土壤pH Soil pH	土壤全碳 Soil total carbon/(g·kg <sup>-1</sup> )	土壤全氮 Soil total nitrogen/(g·kg <sup>-1</sup> )	土壤密度 Soil bulk density/(g·cm <sup>-3</sup> )	海拔 Altitude/m	坡度 Slope/(°)	坡向 Aspect
1	4.60 ± 0.20	14.27 ± 2.01	0.73 ± 0.15	1.42 ± 0.03	811.22 ± 13.35	10.67 ± 5.31	S
2	4.10 ± 0.10	13.67 ± 2.11	0.70 ± 0.11	1.41 ± 0.11	824.94 ± 11.45	13.11 ± 6.31	SE
3	4.01 ± 0.10	14.11 ± 3.12	0.70 ± 0.21	1.42 ± 0.14	812.44 ± 12.35	16.23 ± 4.06	SE
平均 Average	4.27 ± 0.29	14.02 ± 0.31	0.71 ± 0.02	1.42 ± 0.01	818.08 ± 9.70	13.34 ± 2.79	/

### 1.2 试验设计

本试验于 2016 年 6 月从四川省宜宾市高县 (28°11' N, 104°48' E) 来复镇分别采集马尾松针叶 (P) 和 3 种阔叶树种: 檫木 (S)、香樟 (C) 和香椿 (T) 的凋落叶, 移除新鲜叶片和已处于分解阶段的叶片, 只保留新鲜的凋落叶, 对新鲜的凋落叶进行 2 周的室温风干处理后, 称取

15.00 ± 0.05 g 的凋落叶放入内部大小为 20 cm × 23 cm 的尼龙网分解袋中 (正面孔径 3 mm, 背面孔径 0.04 mm)。根据“混交林中主要树种的比例不应低于 60%”<sup>[22-23]</sup> 的标准, 本研究总共设置 35 种处理, 包括 4 种纯凋落叶处理和 31 种混合处理。混合处理按照 1 针 1 阔、1 针 2 阔和 1 针 3 阔进行组合, 其中, 1 针 1 阔组合均设置 3 个质量

比, 1 针 2 阔组合均设置 6 个质量比, 1 针 3 阔组合设置 4 个质量比, 文中字母后面的数字均表示不同树种凋落叶的质量比, 具体混合组合及混合比例见表 2。本次试验共计 1 610 袋 = (4 种纯凋落叶处理 + 31 种混合处理) × 4 个采样时期 × 3 个样地 × 3 个重复 + 350 (预防试验过程中凋落叶袋遗失, 每种处理多放置 10 袋)。于 2016 年 8 月中旬将这些凋落叶袋小心地转移到预先设置的 3 个样地 (海拔 811~824 m)。将装有凋落叶的 1 610 袋分解袋随机水平放置于样地表面, 样品袋之间距离为 2~5 cm, 从而避免样品之间相互干扰。按照预先设计的时间采集样品并带回实验室测定样品放置过程中的损失量。

### 1.3 样品与分析

分别于 2017 年 2 月 (6 个月)、2017 年 8 月 (12 个月)、2018 年 2 月 (18 个月) 以及 2018 年 8 月 (24 个月) 收集分解袋。每次分别在 3 个样地随机收集每种处理的分解袋 3 袋, 带回实验室先用镊子将凋落叶袋中大片碎片取出, 并用放大镜尽可能仔细地去除土壤颗粒物等杂质, 再将其置于 65 °C 烘箱干燥 48 h 后测定干质量, 从而评估分解后残留的凋落叶质量。初始凋落叶质量测定方法: C 含量采用  $K_2Cr_2O_7$  氧化- $FeSO_4$  滴定法 (GB 7857-87) 测定; N 和 P 含量分别采用微量凯氏定氮法 (GB 7173-87) 和钼锑比色法 (GB 7852-87) 测定; 木质素和纤维素含量采用改进的酸性洗涤法<sup>[24]</sup> 测定; 总酚和缩合单宁含量分别用福林酚比色法和香草醛-盐酸法<sup>[25-26]</sup> 测定。

### 1.4 计算与统计分析

(1) 凋落叶质量损失率 ( $R_t$ ):

$$R_t = (M_0 - M_t) / M_0 \times 100\%$$

式中:  $M_t$  表示当次凋落叶残留量;  $M_0$  表示凋落叶初始质量。

(2) 用修正的 Olson 指数衰减模型对凋落叶的分解过程进行模拟, 并计算出凋落叶的分解系数  $k$  值:

$$y = ae^{-kt}$$

式中:  $y$  表示凋落叶在经过分解时间  $t$  后的质量残留率;  $a$  为拟合参数,  $e$  为自然对数底,  $k$  表示分解常数;  $t$  表示凋落叶的分解时间。

(3) 通过单一物种凋落叶的质量损失率来计算混合凋落叶的预期质量损失率 ( $T$ ):

$$T = A \times n_1 + B \times n_2 + C \times n_3 \dots$$

式中:  $A$  是指  $A$  树种凋落叶在实际分解过程中的质量损失率,  $n_1$  是指  $A$  树种凋落叶在混合凋落叶中的比例;  $B$  是指  $B$  树种凋落叶在实际分解过程中的质量损失率,  $n_2$  是指  $B$  树种凋落叶在混合凋落叶中的比例, 依此类推。

(4) 混合凋落叶的混合效应用  $H$  表示, 计算公式如下:  $H_t = R_t - T_t$

式中:  $R_t$  为当次实际质量损失率 (观测值),  $T_t$  为当次预期质量损失率 (预期值)。

用重复测量方差分析 (Repeated measure ANOVA) 来检验不同树种组合、采样时期及其相互作用对凋落叶质量损失的影响, 通过 Levene's 法对方差同质性进行检验, 并通过 Log 对不满足该假设的数据进行转化。使用  $\alpha$  水平为 0.05 的独立  $t$  检验来确定凋落叶质量损失率的混合效应 (观测值和预期值之间的差异)。根据前人研究结果,

表 2 实验处理

Table 2 Design of this study for various treatments

混合处理 Mixed treatment	树种组合 Tree species combination	缩写 Abbreviation	混合比例 (质量比) Mixed proportion (Mass ratio)
对照 Control	马尾松/橡木/香樟/香椿	P/S/C/T	10:0
1 针 1 阔 <i>Pinus massoniana</i> + one native tree species	马尾松 + 香樟	PC	8:2、7:3、6:4
	马尾松 + 橡木	PS	8:2、7:3、6:4
	马尾松 + 香椿	PT	8:2、7:3、6:4
1 针 2 阔 <i>Pinus massoniana</i> + two native tree species	马尾松 + 橡木 + 香樟	PSC	8:1:1、7:2:1、7:1:2、6:2:2、6:3:1、6:1:3
	马尾松 + 香樟 + 香椿	PCT	8:1:1、7:2:1、7:1:2、6:2:2、6:3:1、6:1:3
	马尾松 + 橡木 + 香椿	PST	8:1:1、7:2:1、7:1:2、6:2:2、6:3:1、6:1:3
1 针 3 阔 <i>Pinus massoniana</i> + three native tree species	马尾松 + 橡木 + 香樟 + 香椿	PSCT	7:1:1:1、6:2:1:1、6:1:1:2、6:1:2:1

把混合效应分为加和效应(观测值与预期值之间无显著差异)和非加和效应(观测值与预期值之间存在显著差异)[9,27-29]。

采用指数回归拟合分解时间对凋落叶质量损失的影响。以凋落叶混合处理和采样时间为固定因子(凋落叶混合处理作为嵌套因子)进行单变量方差分析,并用嵌套的线性模型检验这2个因素对凋落叶质量损失率的影响。采用偏最小二乘回归(PLS)来分析凋落叶初始质量对分解系数 $k$ 值和混合效应的相对重要性。模型中单个预测因子的相对重要性以重要性变量(VIP)表示,VIP值 $>1$ 表示预测因子对因变量的贡献达到显著水平。数据统计分析使用SPSS软件(SPSS 25.0 for Windows; SPSS Inc., Chicago, IL, USA),数据整理和作图使用Excel 2010和Origin 2018软件。

## 2 结果

### 2.1 不同处理凋落叶的质量损失率

凋落叶分解指数模型拟合显示:分解系数 $k$ 值在4个单一树种凋落叶之间表现为香椿(1.15) $>$ 香樟(1.00) $>$ 檫木(0.93) $>$ 马尾松(0.42)。所有混合凋落叶的 $k$ 值均低于香椿(T)、香樟(C)和檫木(S),而高于马尾松(P),其中,PSCT6112(0.88)、PST622(0.84)、PST613(0.83)的 $k$ 值最高(表3)。由图1可知:35个处理凋落叶的质量损失率随分解时间的延长而增加;6个月后,凋落叶的平均质量损失率为(38.80 $\pm$ 5.36)%,12个月后为(52.11 $\pm$ 5.91)%,分解18个月至24个月,凋落叶质量损失率从(69.01 $\pm$ 5.93)%增加到(77.55 $\pm$ 5.64%)。

4个单一树种凋落叶的质量损失率变化见图1h。香椿凋落叶的质量损失率在4个分解时期均显著高于其它3种凋落叶( $P < 0.01$ )。马尾松凋落叶的质量损失率在分解18个月( $P < 0.01$ )和24个月( $P < 0.01$ )后均显著低于3个阔叶树种凋落叶。

1针1阔混合凋落叶的质量损失率总体表现为阔叶占比越高,质量损失越快,经过24个月的分解后,1针1阔组合凋落叶的质量损失率分别为PT 75.66%~83.84%,PS 71.28%~72.88%、PC 74.59%~81.80%(图1a~c),其中,PT64的质量损失率在分解6个月( $P < 0.001$ )

和24个月后( $P < 0.001$ )所有分解时期,PS64的质量损失率均高于PS82或PS73,但三者之间差异不显著( $P > 0.05$ );分解24个月后,PC64的质量损失率显著高于PC82和PC73( $P = 0.016$ ),但在其它分解时期三者间差异不显著( $P > 0.05$ )。

1针2阔混合凋落叶在分解24个月后的质量损失率分别为72.28%~81.98%(PST)、71.45%~78.73%(PSC)和70.12%~82.25%(PCT)(图1d~f)。总体上看,PST组合中,PST613的质量损失率在整个分解过程中均显著较高( $P < 0.05$ )。PSC组合中,6个混合比例之间的质量损失率在分解12个月( $P = 0.001$ )和18个月后( $P = 0.010$ )差异显著,其中,PSC811的质量损失率在整个分解过程中相对较低。PCT组合中,PCT811的质量损失率在4个采样时期均显著低于其他5个混合比例( $P < 0.05$ ),与之相反,PCT613的质量损失率则相对较高。

PSCT组合在经过24个月分解后的质量损失率达到77.96%~83.79%(图1g),其中,PSCT6112的质量损失率在经过24个月分解后相对较高( $P = 0.047$ ),但在其它3个分解时期,不同混合比例之间并无显著差异( $P > 0.05$ )。

### 2.2 凋落叶分解的混合效应

由图2可知:4个分解时期均有部分凋落叶的质量损失率表现出非加和效应,且表现为非加和效应中的协同效应(观测值-预测值 $>0$ ,且 $P < 0.05$ )。混合凋落叶在分解6、12、18、24个月后的协同效应分别为29.03%(9/31表示31个混合处理中有9个处理表现为协同效应,下同)、41.94%(13/31)、67.74%(21/31)和45.16%(14/31),协同效应随分解时间的延长表现为先增强,后减弱的趋势,尤其在分解18个月时最强。分解6个月后的PT64、PST613、PSC613、PCT(除811和631比例)、PSCT(7111和6211比例)表现为协同效应。分解12个月后的PT64、PC(除82比例)、PST(除811和631比例)、PSC(631和622比例)、PCT(721比例)、PSCT(除6112比例)表现为协同效应。分解18个月后,除PS、PSC(除811比例)、PCT622外其余组合均表现为协同效应。分解24个月后,PT、PC(82和64比例)、PST(622和613比例)、PSC613、PCT(除811、

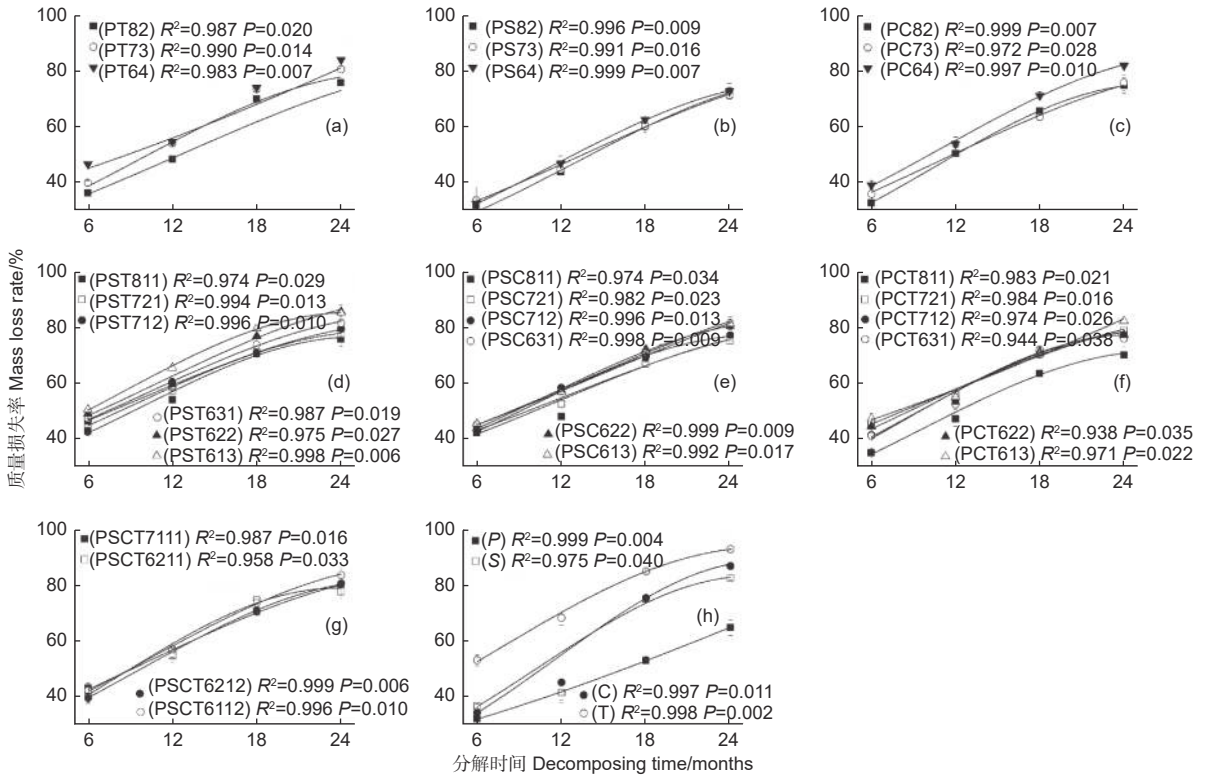
表 3 不同处理下调落叶分解系数、半分解和 95% 分解时间

Table 3 Decomposition constant, time of 50% and 95% decomposition of litter under different treatments

处理 Treatments	回归方程 Regression equation	分解系数 $k$ Decomposition constant $k$	半分解时间 Time of half decomposition/a	95%分解时间 Time of 95% decomposition/a
P	$y = 85.61e^{-0.42t}$	0.42	1.28	6.76
S	$y = 110.78e^{-0.93t}$	0.93	0.86	3.35
C	$y = 116.38e^{-1.00t}$	1.00	0.85	3.16
T	$y = 86.37e^{-1.15t}$	1.15	0.48	2.49
PT82	$y = 83.76e^{-0.57t}$	0.57	0.90	4.92
PT73	$y = 77.76e^{-0.58t}$	0.58	0.76	4.71
PT64	$y = 72.12e^{-0.56t}$	0.56	0.65	4.75
PS82	$y = 91.35e^{-0.55t}$	0.55	1.09	5.27
PS73	$y = 85.22e^{-0.45t}$	0.45	1.18	6.26
PS64	$y = 98.05e^{-0.60t}$	0.60	1.13	4.99
PC82	$y = 92.59e^{-0.66t}$	0.66	0.93	4.40
PC73	$y = 83.84e^{-0.58t}$	0.58	0.89	4.85
PC64	$y = 95.61e^{-0.80t}$	0.80	0.81	3.71
PST811	$y = 88.32e^{-0.60t}$	0.60	0.95	4.78
PST721	$y = 79.91e^{-0.52t}$	0.52	0.90	5.29
PST712	$y = 81.08e^{-0.60t}$	0.60	0.81	4.66
PST631	$y = 87.91e^{-0.71t}$	0.71	0.79	4.02
PST622	$y = 92.62e^{-0.84t}$	0.84	0.73	3.47
PST613	$y = 82.12e^{-0.83t}$	0.83	0.60	3.39
PSC811	$y = 90.91e^{-0.67t}$	0.67	0.89	4.33
PSC721	$y = 75.95e^{-0.51t}$	0.51	0.82	5.34
PSC712	$y = 85.26e^{-0.65t}$	0.65	0.82	4.34
PSC631	$y = 104.08e^{-0.81t}$	0.81	0.91	3.75
PSC622	$y = 78.80e^{-0.56t}$	0.56	0.81	4.91
PSC613	$y = 85.81e^{-0.65t}$	0.65	0.84	4.40
PCT811	$y = 82.88e^{-0.57t}$	0.57	0.89	4.94
PCT721	$y = 79.30e^{-0.65t}$	0.65	0.72	4.29
PCT712	$y = 82.94e^{-0.68t}$	0.68	0.75	4.14
PCT631	$y = 80.79e^{-0.64t}$	0.64	0.75	4.37
PCT622	$y = 77.31e^{-0.61t}$	0.61	0.71	4.48
PCT613	$y = 79.56e^{-0.72t}$	0.72	0.64	3.83
PSCT7111	$y = 81.37e^{-0.69t}$	0.69	0.71	4.06
PSCT6211	$y = 83.07e^{-0.70t}$	0.70	0.73	4.02
PSCT6121	$y = 81.46e^{-0.65t}$	0.65	0.76	4.33
PSCT6112	$y = 92.37e^{-0.88t}$	0.88	0.70	3.31

注：P：马尾松；C：香樟；S：檫木；T：香椿，字母后面的数字表示不同树种凋落叶的质量比

Notes: P, *Pinus massoniana* Lamb., C, *Cinnamomum camphora* Presl., S, *Sassafras tzumu* Hemsl., T, *Toona sinensis* Roem. The numbers behind letters represent the mass ratio of leaf litters of different tree species



注: P: 马尾松; C: 香樟; S: 榿木; T: 香椿, 字母后面的数字表示不同树种凋落叶的质量比

Notes: P: *Pinus massoniana* Lamb., C: *Cinnamomum camphora* Presl., S: *Sassafras tzumu* Hemsl., T: *Toona sinensis* Roem. The numbers behind letters represent the mass ratio of leaf litters of different tree species

图 1 不同处理下凋落叶分解过程中的质量损失率的变化 (平均值  $\pm$  标准偏差;  $n = 3$ )

Fig. 1 Mass rate loss during litter decomposition under different treatments (mean  $\pm$  SD;  $n = 3$ )

631 和 622 比例) 以及 PSCT (除 6211) 均表现为协同效应。总体上 PT64、PST613、PCT (除分解 12 个月时)、PSCT (除分解 6 个月时) 均表现出较强的协同效应。此外, 不同的混合比例对凋落叶的混合效应也有影响且随分解时间有所变化, 其中, PT64、PST622、PST613、PCT721、PSCT7111 和 PSCT6121 在分解 12、18、24 个月后均表现出协同效应; 而 PS82、PS73、PS64 和 PSC721 在整个分解过程中均表现为加和效应。可见阔叶比例为 30%~40% 时尤其是含有香椿 (T) 的混合凋落叶 (如 PT, PST, PCT 和 PSCT) 的协同效应尤为明显。

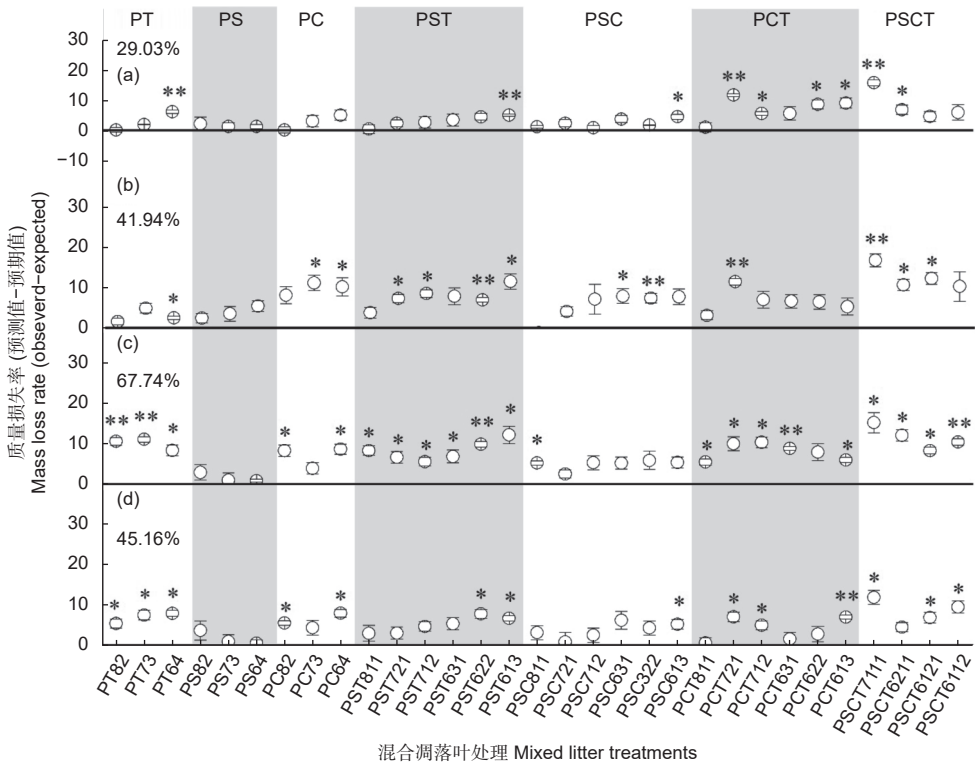
### 2.3 凋落叶分解系数 ( $k$ 值)、混合效应与凋落叶初始性质的相关性

PLS 回归分析表明: 凋落叶的分解系数  $k$  值与其初始性质有着密切的相关性 (图 3), 其中, 与初始 C、总酚含量、木质素含量、C/N、C/P、木质素/N 以及木质素/P 表现为显著的负相关, 与初始 N 含量表现为显著的正相关。

PLS 回归分析表明: 在分解过程中, 凋落叶的混合效应也受到不同树种凋落叶初始性质的影响 (表 4)。经过 6 个月分解后, 混合效应与纤维素含量、C/N、C/P、木质素/P 表现为显著的负相关, 而与 N、P 含量表现为显著的正相关。分解 12 个月后, 与木质素、纤维素含量、木质素/P 表现为显著的负相关, 而与 P 含量表现为显著的正相关。分解 18、24 个月后, 与 N 含量以及 N/P 表现为显著的正相关, 而与木质素 (除分解 24 个月)、纤维素 (除分解 18 个月)、总酚含量和木质素/N 表现为显著的负相关。而在整个分解过程中, 凋落叶的混合效应与 C 含量均无显著相关性。

## 3 讨论

凋落叶分解系数 ( $k$ ) 能直观地表达凋落叶分解速率。本研究结果表明, 所有混合凋落叶的分解系数  $k$  值均小于香椿、香樟和榿木, 而大于马尾松, 其中, PSCT6112 (0.88)、PST622 (0.84)、PST613 (0.83) 的  $k$  值最高 (表 3)。PT、PCT、

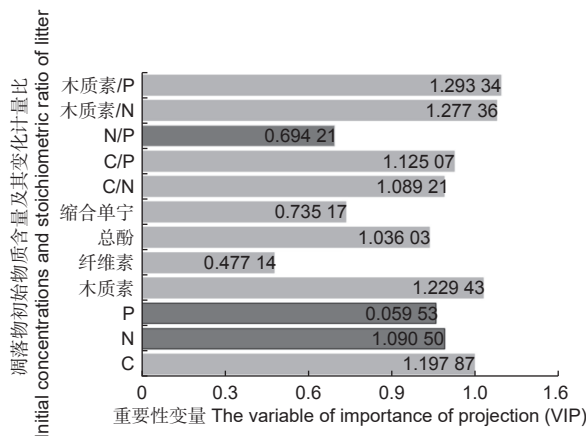


注：图中正值表示观测值>预期值，负值表示观测值<预期值；\*\*表示  $P < 0.001$ ，\*表示  $P < 0.05$ 。（a）分解 6 个月；（b）分解 12 个月；（c）分解 18 个月；（d）分解 24 个月。P：马尾松；C：香樟；S：檫木；T：香椿，字母后面的数字表示不同树种凋落叶的质量比

Notes: The insets show differences between the observed and the expected values for the given variables, where a positive value indicates an observed value > the expected value and vice versa; statistical significance levels: \*\*,  $P < 0.01$  and \*,  $P < 0.05$  for comparisons between the observed and expected values. (a) decompose for 6 months, (b) decompose for 12 months, (c) decompose for 18 months (d) decompose for 24 months. P, *Pinus massoniana* Lamb., C, *Cinnamomum camphora* Presl., S, *Sassafras tzumu* Hemsl., T, *Toona sinensis* Roem. The numbers behind letters represent the mass ratio of leaf litters of different tree species

图 2 31 个混合处理凋落叶质量损失率的混合效应 (平均值 ± 标准差)。

Fig. 2 Mixture effects on leaf litter mass loss for 31 different litter mixtures (Means ± SD)



注：VIP 值大于 1 表示预测因子对因变量变化的显著贡献；浅灰色柱子表示二者之间显著负相关，深灰色柱子表示二者之间显著正相关

Notes: VIP value >1 indicates the significant contribution of predictors to the change of dependent variables; light gray column indicates significant negative correlation, and dark gray column indicates significant positive

图 3 凋落叶初始化学特征与凋落叶的分解系数 k 值的偏最小二乘回归分析

Fig. 3 Results of the PLS regression analysis on the initial litter chemical characteristics of litter and decomposition coefficient k value

表 4 不同分解时期凋落叶质量损失率混合效应与养分含量之间的 PLS 回归分析

Table 4 Results of PLS regression analysis between the concentrations of litter quality and mixed effects of leaf litter mass loss rate (observed-expected) in different decomposition periods

凋落叶初始性质 Initial properties of litter	分解6个月 Incubated 6 months	分解12个月 Incubated 12 months	分解18个月 Incubated 18 months	分解24个月 Incubated 24 months
C	-0.74	-0.75	-0.74	-0.98
N	1.13	0.75	1.70	1.66
P	1.13	1.12	0.88	0.37
木质素 Lignin	-0.80	-1.23	-1.11	-0.48
纤维素 Cellulose	-1.07	-1.55	-0.43	-1.62
总酚 Total phenols	-0.49	-0.81	-1.00	-1.01
缩合单宁 Condensed tannins	-0.61	-0.18	-0.69	-0.97
C/N	-1.35	-0.85	-0.86	-0.39
C/P	-1.47	-0.83	-0.46	-0.76
N/P	0.53	0.91	1.45	1.02
木质素 /N Lignin/N	-0.97	-0.97	-1.02	-1.49
木质素 /P Lignin/P	-1.13	-1.35	-0.90	-0.48

注: 表中数值为标准化回归系数: >0表示正相关, <0表示负相关, 绝对值 >1表示凋落叶质量与混合效应显著相关

Notes: The values in the table are standardized regression coefficients: Values >0 indicate positive correlations, values <0 indicate negative correlations, and absolute values >1 indicates significant correlations of the litter quality with the mixture effects according to standardized regression coefficients

PST 以及 PSCT 树种组合的质量损失率高于 PS 和 PSC 树种组合。可见, 马尾松与香椿和香樟混合更有利于提高整个凋落叶的质量损失率, 促进了马尾松的分解。这是因为马尾松针叶凋落叶与阔叶凋落叶混合后改变了其初始理化性质, 尤其是具有较高质量的阔叶凋落叶香椿可为较低质量的马尾松针叶凋落叶提供养分, 满足了分解过程中微生物对养分的需求<sup>[30-31]</sup>, 促进了凋落叶的分解。PLS 回归分析也表明, 凋落叶的分解系数  $k$  值与初始 C、木质素含量、总酚含量、C/N、C/P、木质素/N 以及木质素/P 表现为显著的负相关, 而与初始 N 含量表现为显著的正相关。本研究中, 香椿和香樟凋落叶相对较高的 N、P 含量以及 N/P 比通常会提升凋落叶的分解速率<sup>[32]</sup>; 其次, 凋落叶中的难分解物质如木质素和总酚会通过阻碍酶类与不稳定的碳化合物接触以及抑制微生物酶的产生, 对分解者尤其是微生物产生毒害作用<sup>[33-34]</sup>, 从而致使凋落叶分解速率下降。相对于其它处理, PS 和 PSC 凋落叶中 C、木质素、总酚以及 C/N、C/P、木质素/N 和木质素/P 比值较高, 而 N、P 含量和 N/P 比值较低, 这可能是 PS 和 PSC 组合的质量损失率低于其他组合的原因。

凋落叶混合后在分解过程中存在着明显的混合

效应(非加和效应和加和性效应), 通常是通过  $t$  检验来分析观测值和预期值之间是否存在显著差异确定的, 即当二者之间无显著差异时表明凋落叶的分解表现为加和效应, 存在显著差异时则表明凋落叶的分解表现为非加和效应。非加和效应又分为协同效应与拮抗效应<sup>[9, 28-29]</sup>: 若混合凋落叶的实际测量的质量损失率(观测值)显著高于预期值, 则说明该混合凋落叶出现了协同效应; 反之, 则出现了拮抗效应。本研究中, 大多数混合凋落叶质量损失率在分解过程中均表现为非加和效应中的协同效应, 且协同效应随分解时间表现为先增强, 后减弱的趋势, 尤其是在分解 18 个月后混合凋落叶的协同效应出现最大值(67.74%), 其中, PT64、PST613、PCT(除分解 12 个月时)、PSCT(除分解 6 个月时)均表现出较强的协同效应。含有香椿(T)的混合凋落叶(如 PT、PST、PCT 和 PSCT)所占比例为 30%~40% 时的协同效应尤为明显。可见, 马尾松凋落叶与阔叶凋落叶混合尤其是混合香椿凋落叶后加速了凋落叶的质量损失, 促进了马尾松凋落叶的分解。

一方面, 凋落叶分解过程中土壤动物破碎、取食等会直接影响凋落叶的分解<sup>[35]</sup>, 凋落叶混合后增加了化合物的多样性, 能够满足不同分解者的需求



从而加速了凋落叶的质量损失<sup>[28,36]</sup>。本研究中, 香椿因其叶片面积宽大柔软有利于土壤动物附着其上定居繁衍进而破碎取食, 进一步有益于香椿与其他凋落叶完全混合而促进凋落叶间养分的转移<sup>[37-38]</sup>, 同时马尾松与叶片面积宽大的香椿混合可以改善水分吸附特征而增加土壤动物活性<sup>[14]</sup>, 最终加速了整个混合凋落叶的质量损失。另一方面, PLS 回归分析表明, 凋落叶的混合分解效应与其初始性质密切相关(表 4), 其中, 与纤维素和缩合单宁含量呈显著负相关, 与 N、P 含量呈正相关。在分解 18 个月和 24 个月后, 凋落叶分解的协同效应与 N 含量呈正相关, 而与 C 含量无显著相关性, 说明相对于 C 组分, N 组分更能促进或抑制混合凋落叶的分解<sup>[20, 39-40]</sup>。凋落叶中较高的 N 含量往往能加快凋落叶的分解速率<sup>[41-43]</sup>。在 4 个树种凋落叶中香椿凋落叶的 N 含量最高(表 5)。这可能是混合有香椿凋落叶的组合(所有的 PT 组合, 2/6 的 PST 组合: 表示 PST 组合的 6 个混合比例中有 2 个比例表现为协同效应, 下同, 3/6 的 PCT 组合和 3/4 的 PSCT 组合)且占比较大时的质量损失均表现出较强协同效应的原因。随着分解时间的延

长, 经过土壤动物的破碎、取食以及淋溶作用释放的养分有利于混合凋落叶中分解者的数量和活性增加, 进而促进凋落叶的分解<sup>[37,44]</sup> 协同效应增强。分解 24 个月后凋落叶质量损失的协同效应从 67.74% 下降到 45.16%, 这可能是由于凋落叶中营养物质(N、P 等)和可溶性碳水化合物(DOC 等)浓度的降低以及次生化合物(如木质素等)的增加导致分解后期凋落叶之间出现负互补效应<sup>[45]</sup>。此外, 在混合凋落叶分解研究中, 通常按照每种物种的质量比例(每种树种凋落叶的质量)进行搭配<sup>[28]</sup>。由于土壤动物群落组成和取食偏好的差异, 混合凋落叶之间比例不均可能导致微生物生物量<sup>[46]</sup>和功能的变化<sup>[47]</sup>或改变混合凋落叶中的小气候条件<sup>[32]</sup>从而分解缓慢。同时, 分解者(如土壤动物)的密度或数量与凋落叶的 N、P 含量显著相关<sup>[48]</sup>, 而不同树种凋落叶搭配及不同混合比例可能导致 N、P 含量的变化, 从而影响土壤动物群落结构及其对凋落叶分解的贡献。与其它处理相比, PS 组合质量损失的协同效应弱, 这可能是由于 PS 组合的 N、P 含量低, 而木质素、纤维素等含量高而造成的。

表 5 单一树种凋落叶初始质量特征(平均值±标准差)

Table 5 Initial litter quality characteristics of the species used in the experimental work (mean ± SD)

凋落叶初始性质 Initial properties of litter	马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	檫木 <i>Sassafras tzumu</i>	香樟 <i>Cinnamomum camphor</i>	香椿 <i>Toona sinensis</i>
C/(g·kg <sup>-1</sup> )	452.71±6.27 A	413.74±2.77 B	420.77±6.32 B	378.95±2.42 C
N/(g·kg <sup>-1</sup> )	6.07±0.41 C	6.37±0.40 BC	8.22±0.47 B	11.46±0.40 A
P/(g·kg <sup>-1</sup> )	0.92±0.02 C	0.88±0.02 BC	1.11±0.07 B	1.41±0.06 A
木质素 Lignin/(g·kg <sup>-1</sup> )	351.07±8.64 A	173.01±9.96 B	149.63±4.16 BC	134.4±6.02 C
纤维素 Cellulose/(g·kg <sup>-1</sup> )	136.46±12.72 A	96.83±4.54 B	144.72±5.81 A	99.19±3.51 B
总酚 Total phenol/(g·kg <sup>-1</sup> )	54.17±2.10 A	35.42±0.11 B	14.82±0.30 D	29.05±0.44 C
缩合单宁 Condensed tannin/(g·kg <sup>-1</sup> )	24.75±0.77 A	14.37±0.43 B	13.38±0.07 B	3.67±0.01 C
C/N	75.34±5.43 A	65.47±3.93 AB	51.52±2.81 B	33.16±1.33 C
C/P	492.79±16.40 A	472.55±11.19 AB	380.54±21.27 B	269.45±8.99 C
N/P	6.59±0.38 A	7.26±0.35 A	7.47±0.76 A	8.17±0.54 A
木质素/N Lignin/N	58.24±2.86 A	27.50±2.92 B	18.38±1.52 BC	11.76±0.67 C

注: 同一行不同大写字母表示不同树种凋落叶之间的初始质量特征差异显著 ( $P<0.05$ )

Note: Different capital letters in the same line indicated that the litter quality characteristics of different tree species were significantly different ( $P<0.05$ )

## 4 结论

马尾松与阔叶树种凋落叶混合后的质量损失率基本表现为协同效应且随分解时间的延长呈先增强后减弱的规律, 这种效应因树种组成和比例而有所

差异。混合组合中 PT、PCT、PCT 以及 PSCT 树种组合的质量损失率高于 PS 和 PSC 树种组合, 大多数含有香椿的混合凋落叶基本也表现为协同效应, 尤其 PT、PCT 和 PSCT 组合质量比分别为 6:4、7:2:1、7:1:1:1 时的质量损失率在 4 个分

解时期均表现出较强的协同效应。因此,在营造马尾松针阔混交林时可从凋落叶分解角度出发,选择香椿和香樟作为混交树种,且阔叶凋落叶占比为30%~40%时有助于促进林地养分循环,该研究结果可为马尾松纯林的混交化改造提供理论依据。

### 参考文献:

- [1] Fan H B, Liu W F, Wu J P, *et al.* Ecosystem carbon pools in mixed stands of hardwood species and masson pine[J]. *Journal of Tropical Forest Science*, 2013, 25(2): 154-165.
- [2] Kuang Y W, Sun F F, Wen D Z, *et al.* Tree-ring growth patterns of Masson pine (*Pinus massoniana* L.) during the recent decades in the acidification Pearl River Delta of China[J]. *Forest Ecology and Management*, 2008, 255(8): 3534-3540.
- [3] Mi C H, Liu Z W, Li Q, *et al.* Effect of litter decomposition on soil polarization in three typical planted pure coniferous forests in Loess Plateau, China[J]. *International Journal of Agriculture and Biology*, 2013, 15(4): 687-693.
- [4] 李明军, 杜明凤, 聂朝俊. 马尾松人工林地力维护研究进展[J]. *世界林业研究*, 2014, 27(5): 31-36.
- [5] 李 勋, 张丹桔, 张 艳, 等. 林窗边缘效应对马尾松和香樟凋落叶分解的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2017, 23(3): 570-578.
- [6] Zhang X, Liu Z, Zhu B, *et al.* Impacts of mixed litter decomposition from *Robinia pseudoacacia* and other tree species on C loss and nutrient release in the Loess Plateau of China[J]. *Journal of Forestry Research*, 2016, 27(3): 525-532.
- [7] Santos F M, Balieiro F D C, Fontes M A, *et al.* Understanding the enhanced litter decomposition of mixed-species plantations of *Eucalyptus* and *Acacia mangium*[J]. *Plant & Soil*, 2018, 423(1-2): 141-155.
- [8] Song F Q, Fan X X, Song R Q. Review of mixed forest litter decomposition researches[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(4): 221-225.
- [9] 李宜浓, 周晓梅, 张乃莉, 等. 陆地生态系统混合凋落物分解研究进展[J]. *生态学报*, 2016, 36(16): 4977-4987.
- [10] Chou C H. Allelopathic compounds as naturally occurring herbicides[J]. *Jircas International Symposium Series*, 1996, 4: 107-115.
- [11] Gnakambary Z, Bayala J, Malmer A, *et al.* Decomposition and nutrient release from mixed plant litters of contrasting quality in an agroforestry parkland in the south-Sudanese zone of West Africa[J]. *Nutrient cycling in agroecosystems*, 2008, 82(1): 1-13.
- [12] Mccann K S. The diversity-stability debate[J]. *Nature*, 2000, 405(6783): 228-233.
- [13] Nilsson M C, Wardle D A, Dahlberg. Effects of plant litter species composition and diversity on the boreal forest plant-soil system[J]. *Oikos*, 1999, 86: 16-26.
- [14] 田 龙, 扈梦梅, 杨晋宇. 森林经营对土壤动物影响研究进展[J]. *林业与生态科学*, 2021, 36(1): 1-7.
- [15] 卜 涛, 张水奎, 宋新章, 等. 几个环境因子对凋落物分解的影响[J]. *浙江农林大学学报*, 2013, 30(5): 740-747.
- [16] Zeng L, He W, Teng M, *et al.* Effects of mixed leaf litter from predominant afforestation tree species on decomposition rates in the three gorges reservoir, China[J]. *Science of the total Environment*, 2018, 639(15): 679-686.
- [17] 陈楚莹, 汪思龙. 人工混交林生态学[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [18] Gang W. Nutrient cycling characteristics of *Quercus acutissima* and *Pinus massoniana* mixed forest in the Three Gorge Reservoir area, China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1998, 10(3): 110-114.
- [19] Huang S D. Soil respiration with precipitation and litter treatments in *Schima superba* and *Pinus massoniana* mixed forest[J]. *Journal of Zhejiang A & F University*, 2012, 29(2): 218-225.
- [20] Wang H, Liu S, Wang J, *et al.* Mixed-species plantation with *Pinus massoniana* and *Castanopsis hystrix* accelerates C loss in recalcitrant coniferous litter but slows C loss in labile broadleaf litter in southern China[J]. *Forest Ecology and Management*, 2018, 422: 207-213.
- [21] 龚子同, 陈志诚, 赵文君, 等. 我国土壤系统分类中富铁铝土壤的分类[J]. *土壤与环境*, 2000, 9(2): 66-70.
- [22] 方升佐. 人工林培育: 进展与方法[M]. 北京: 中国林业出版社, 2018.
- [23] 吕树英. 关于营造混交林的几个基本观点[J]. *云南林业科技*, 2001, 1(1): 26-28.
- [24] Graca, M A S, Balocher F, GESSNER M O. Methods to study litter decomposition: a practical guide[M]. New York: Springer, 2005: 115.
- [25] Zhou H C, Wei S D, Zeng Q, *et al.* Nutrient and caloric dynamics in *Avicennia marina* leaves at different developmental and decay stages in Zhangjiang River Estuary, China[J]. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 2010, 87(1): 21-26.
- [26] Terrill T. Determination of extractable and bound condensed tannin concentrations in forage plants, protein concentrate meals and cereal grains[J]. *Journal of the Science of Food & Agriculture*, 2010, 58(3): 321-329.
- [27] Mao R, Zeng D H. Non-additive effects vary with the number of component residues and their mixing proportions during residue mixture decomposition: A microcosm study[J]. *Geoderma*, 2012, 170: 112-117.
- [28] Gartner T B, Cardon Z G. Decomposition dynamics in mixed-

- species leaf litter (review)[J]. *Oikos*, 2004, 104(2): 230-46.
- [29] Kominoski J S, Pringle C M, Ball B A, *et al.* Nonadditive effects of leaf litter species diversity on breakdown dynamics in a detritus-based stream[J]. *Ecology*, 2007, 88(5): 1167-1176.
- [30] Jonard M, Andre F, Ponette Q. Tree species mediated effects on leaf litter dynamics in pure and mixed stands of oak and beech[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2008, 38(3): 528-538.
- [31] Parrotta J A. Productivity, nutrient cycling, and succession in single and mixed-species plantations of *Casuarina equisetifolia*, *Eucalyptus robusta*, and *Leucaena leucocephala* in Puerto Rico[J]. *Forest Ecology & Management*, 1999, 124(1): 45-77.
- [32] Makkonen M, Berg M P, Logtestijn R V, *et al.* Do physical plant litter traits explain non-additivity in litter mixtures? A test of the improved microenvironmental conditions theory[J]. *Oikos*, 2013, 122(7): 987-997.
- [33] Austin A T, Ballare C L. Dual role of lignin in plant litter decomposition in terrestrial ecosystems[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010, 107(10): 4618-4622.
- [34] Pauly M, Keegstra K. Cell-wall carbohydrates and their modification as a resource for biofuels[J]. *The Plant Journal*, 2008, 54(4): 559-568.
- [35] Frouz J. Effect of soil macro and mesofauna on litter decomposition and soil organic matter stabilization[J]. *Geoderma*, 2017, 332: 161-172.
- [36] Srivastava D S, Cardinale B J, Downing A L, *et al.* Diversity has stronger top - down than bottom - up effects on decomposition[J]. *Ecology*, 2009, 90(4): 1073-1083.
- [37] Slade E M, Riutta T. Interacting effects of leaf litter species and macrofauna on decomposition in different litter environments[J]. *Basic & Applied Ecology*, 2012, 13(5): 423-431.
- [38] 王星丽, 殷秀琴, 宋 博, 等. 羊草草原主要凋落物分解及土壤动物的作用[J]. *草业学报*, 2011, 20(6): 143-149.
- [39] Meier C L, Bowman W D. Links between plant litter chemistry, species diversity, and below-ground ecosystem function[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, 105(50): 19780-19785.
- [40] Cizungu L, Staelens J, Huygens D, *et al.* Litterfall and leaf litter decomposition in a central African tropical mountain forest and Eucalyptus plantation[J]. *Forest Ecology and Management*, 2014, 326: 109-116.
- [41] Handa I T, Aerts R, Berendse F, *et al.* Consequences of biodiversity loss for litter decomposition across biomes[J]. *Nature*, 2014, 509(7499): 218-221.
- [42] Schimel J P, Hattenschwiler S. Nitrogen transfer between decomposing leaves of different N status[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2007, 39(7): 1428-1436.
- [43] Butenschoen O, Krashevskaya V, Maraun M, *et al.* Litter mixture effects on decomposition in tropical montane rainforests vary strongly with time and turn negative at later stages of decay[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 77: 121-128.
- [44] Zenglx, He W, Teng M J, *et al.* Effects of mixed leaf litter from predominant afforestation tree species on decomposition rates in the Three Gorges Reservoir, China[J]. *The Science of the Total Environment*, 2018, 639(15): 679-686.
- [45] Sinsabaugh R L, Antibus R K, Sinkins A E. An enzymic approach to the analysis of microbial activity during plant litter decomposition[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 1991, 34(1-4): 43-54.
- [46] Gonzalez G, Seastedt T R. Soil fauna and plant litter decomposition in tropical and subalpine forests[J]. *Ecology*, 2001, 82: 955-964.
- [47] Yang X, Jin C. Plant litter quality influences the contribution of soil fauna to litter decomposition in humid tropical forests, southwestern China[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(5): 910-918.
- [48] 王文君, 杨万勤, 谭 波, 等. 四川盆地亚热带常绿阔叶林不同物候期凋落物分解与土壤动物群落结构的关系[J]. *生态学报*, 2103, 33(18): 5737-5750.

# Mass Loss of Mixed Leaf Litter with *Pinus massoniana* and Native Broad-leaved Species

ZHANG Yan<sup>1,2</sup>, LI Xun<sup>1</sup>, SONG Si-meng<sup>1</sup>, ZHANG Jian<sup>2</sup>

(1. Research Center for Ecological Restoration and Characteristic Industry Cultivation in Hengduan Mountains Region, Sichuan Minzu College, Kangding 626000, Sichuan, China; 2. Key Laboratory of Forestry Ecological Engineering in Sichuan, Collaborative Innovation Center of Ecological Security in the Upper Reaches of Yangtze River, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, Sichuan, China)

**Abstract:** [Objective] To understand the mixed litters decomposition characteristics of *Pinus massoniana* and native broad-leaved trees, and the relationship between the mass loss rate of mixed litter with the species and proportion of broad-leaved litter. [Method] Based on the leaf litter of *Pinus massoniana* Lamb.(P), *Cinnamomum camphora* Presl.(C), *Sassafras tzumu* Hemsl.(S) and *Toona sinensis* Roem.(T), we conducted a two-year field needle-width mixed decomposition experiment of litter bags to study the mass loss of the pure litter of the above four tree species and their mixed litter, i.e., combining needles of one conifer with leaves of one, two or three broad-leaved species (i.e., PC, PS, PT, PSC, PST, PCT and PSCT, respectively), as well as including various ratios of these mixed litters in each treatment. There was a total of 35 treatments, including 31 mixed and 4 pure litter treatments. [Result] After two years of decomposition, the combinations of PT, PC, PCT, PST and PSCT had higher mass loss rates of than PS and PSC. The mass loss rate of leaf litters generally showed a synergistic effect and it increased from the 6th to 18th month, and then declined thereafter. It was the highest (67.74%) at the 18th month of decomposition. Compared with other mixed litters, the mass loss rate of PT64, PCT721 and PSCT7111 showed a strong synergistic effect in 4 incubation periods. The results of regression analysis showed that the decomposition coefficient  $k$  and mixing effect were negatively correlated with the initial contents of total phenolic, lignin, cellulose, the ratios of C/N, C/P, lignin/N, and lignin/P. In contrast, they were positively correlated with the initial contents of N and P. [Conclusion] Our results show that mixed litters with 30%-40% broad-leaved species, especially with the litter of *T. sinensis*, may benefit the litter mass loss of *P. massoniana* and promote the nutrient return to forest soils.

**Keywords:** inefficient *Pinus massoniana* forest; mass loss; indigenous tree species; mixed litter decomposition; synergistic effects

(责任编辑: 张 研)