

DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2020.000000

格氏栲天然林凋落物对马尾松种子萌发的影响

贾梅花^{1,2,3}, 王哲^{1,2,3}, 刘金福^{1,2,3*}, 晋梦然^{1,2,3}, 何中声^{1,2,3*},
邢聪^{1,2,3}, 施友文⁴, 沈彩霞⁴

(1. 福建农林大学林学院, 福建 福州 350002; 2. 福建农林大学海峡自然保护区研究中心, 福建 福州 350002; 3. 生态与资源统计福建省高校重点实验室, 福建 福州 350002; 4. 三明莘口格氏栲自然保护区管理站, 福建 三明 365000)

摘要: [目的] 为了解格氏栲天然林凋落物对主要伴生种马尾松更新的影响。[方法] 通过不同分解程度及浓度天然林凋落物浸提液探究马尾松种子萌发和胚根生长的化感效应。[结果] 表明: (1) 影响马尾松种子发芽的主要因素是凋落物分解程度, 与空白对照相比, 未、全分解层凋落物对马尾松种子萌发无显著作用; 半分解层抑制发芽率和发芽指数, 促进发芽势。(2) 影响胚根生长的主要因素是浸提液浓度和作用时间, 并受分解程度-浓度-时间综合作用, 未分解层对马尾松种子整个胚根生长期除极低浓度外, 随浓度降低促进作用增强, 1:100 浓度时促进作用最强; 半分解层呈低浓度和高浓度促进, 中间浓度抑制作用; 全分解层总体呈促进作用, 且随浓度降低促进作用减弱。(3) 对应分析表明不同分解程度-浓度对马尾松种子萌发影响不显著, 对胚根生长存在显著相关性。[结论] 不同分解程度凋落物浸提液对马尾松种子萌发作用较弱, 对胚根生长在低浓度下呈促进作用, 保证林内马尾松幼苗数量, 种间竞争加剧, 进而导致格氏栲自然更新受抑。

关键词: 凋落物浸提液; 化感作用; 马尾松; 种子萌发; 胚根生长; 格氏栲天然林

中图分类号: S792.17

文献标志码: A

文章编号: 1001-1498(2020)x-0001-09

格氏栲 (*Castanopsis kawakamii* Hay.) 是壳斗科 (Fagaceae) 常绿高大乔木, 是国家林业局《中国主要栽培珍贵树种参考名录 (2017 年版)》树种之一, 也是福建省珍稀种群野生植物拯救保护工程重要目标树种^[1]。在福建三明有约 700 hm² 以格氏栲为优势种的天然林^[1]。近年来, 格氏栲天然林冠层断层现象明显, 林窗数量增多, 幼苗天然更新能力弱, 种群老龄化现象严重, 加之病虫害和人为干扰, 导致格氏栲种群受到严重威胁^[2]。在格氏栲林下, 伴生树种幼苗比较多, 而格氏栲幼苗相对较少, 已有研究表明格氏栲凋落物浸提液对格氏栲种子萌发具有抑制效应^[3], 抑制格氏栲幼苗更新, 从而增加了伴生树种 (如: 马尾松 (*Pinus massoniana* Lamb.)、米槠 (*C. carlesii* (Hemsl.) Hay.) 和木荷

(*Schima superba* Gardn. et Champ.) 等) 的多度^[4], 使得整个群落正向物种丰富、组成复杂的方向演变。

密度制约效应在热带森林、亚热带森林及部分温带森林普遍存在^[5], 主要是通过提高优势种和近缘种死亡率或降低物种生长速率, 间接为其他伴生物种提供空间和资源, 促进物种共存^[6-7]。当同种个体之间面临有害生物对植物的侵害或资源空间缺乏时^[8], 物种通过次生代谢为媒介的化学手段 (化感作用) 分泌化学物质, 以抑制其邻体物种生长, 满足自身生长^[8]。化感物质主要包括酚类、萜类、生物碱等, 释放方式为挥发、雨雾淋溶、植物残体或凋落物腐解、植物根系分泌等^[9], 其中以凋落物为主产生的化感作用备受关注^[9-10]。凋落物在生物和非生物作用下, 不断将养分归还到土壤, 供绿色

收稿日期: 2020-02-29 修回日期: 2020-04-29

基金项目: 国家自然科学基金 (31700550; 31770678); 福建省自然科学基金 (2019J01367); 福建省林业科技推广项目 (2018TG14-2)

* 通讯作者: 刘金福, Email: fjljf@126.com 何中声, jxhzs85@fafu.edu.cn

植物吸收利用,是养分循环中连接植物与环境的“纽带”,也是化感物质主要来源之一,影响自身及其他植物,提高自身生长竞争能力,进而改变群落结构和布局^[10]。

种子是植物生长周期中重要阶段,对个体繁殖、种群扩散和群落结构组成具有重要意义,而种子萌发和胚根生长是植物生活史中对环境生态因子反应最为敏感阶段,反映其天然更新能力和竞争能力^[11]。考虑到化感作用是导致密度制约效应主要原因之一^[6],而格氏栲受到自毒作用^[3],有可能产生密度制约效应^[7],为伴生种生长发育提供了资源和空间。为此,通过探讨格氏栲天然林不同凋落物浸提液对主要伴生种马尾松种子萌发和胚根生长的影响,验证格氏栲天然林凋落物对马尾松的影响,旨在为未来格氏栲群落演替方向提供科学依据。

1 研究区概况

格氏栲自然保护区位于福建三明武夷山东支脉地带,属于典型低山丘陵地貌区,中心地理坐标 $26^{\circ}10'N$, $117^{\circ}27'E$,海拔高度在 $200\sim 600\text{ m}$,属典型亚热带季风性气候,年平均气温为 19.5°C ,年平均降水量约为 1500 mm ,年均空气相对湿度 79% 。红壤土或暗红壤土,凋落物层较厚。天然林林冠层呈波浪状,林冠层平均树高 15 m 左右,平均胸径约 30 cm ,郁闭度高达 0.8 。乔木层主要有格氏栲、马尾松、木荷、桂北木姜子(*Litsea subcoriacea* Yang et P. H. Huang)、杉木(*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.)和甜槠(*C. eyrie* (Champ.) Tutch.)等。灌木层主要有黄绒润楠(*Machilus grijsii* Hance)、狗骨柴(*Diplospora dubia* (Lindl.) Masam.)和赤楠(*Syzygium buxifolium* Hook. et Ar. n.);草本层植物有山姜(*Alpinia japonica* (Thunb.) Miq.)、黑莎草(*Gahnia tristis*)和狗脊(*Woodwardia japonica* (L. f.) Sm.)等。层间植物有飞龙掌血(*Toddalia asiatica* (L.) Lam.)、藤黄檀(*Dalbergia hancei*)和香花崖豆藤(*Millettia dielsiana* Harms)等^[12-13]。

2 实验材料与方法

2.1 实验材料

2018年3月在格氏栲自然保护区固定样地收集混合凋落物,取10块固定样地,每块样地按东、南、西、北、中5个方位收集。收集时按未分

解层(新鲜凋落物叶,颜色变化不明显,质地坚硬,外表无分解痕迹)、半分解层(颜色变黑,无完整外观轮廓,多数凋落物已粉碎,混合凋落物)及全分解层(被分解成琐屑叶肉已不能辨识原形,混合凋落物)3个层次分层取样^[14]。11~12月份,待马尾松结实盛期时,到江西吉安、鹰潭合作林场收集落地的第二代马尾松良种,脱粒并筛选种子约 1.5 kg ,存于 4°C 冰箱中备用。

2.2 试验方法及测定

2.2.1 浸提液制备 基于 Inderjit 和刘艳会等研究^[15-16],将格氏栲天然林凋落物烘干粉碎至 $1\sim 2\text{ cm}$,根据按 $1\text{ g}:5\text{ mL}^{-1}$ (1 g 干物质中加入 5 mL 蒸馏水)比例配制,常温下浸泡 48 h ,用干净纱布过滤,滤液再经真空泵过滤后,得到 $1:5$ 浓度液体。考虑到野外大部分凋落物处于未被浸提状态,结合国内外相关研究方法^[17-19],将 $1:5$ 稀释成 $1:10$ 、 $1:30$ 、 $1:50$ 、 $1:100$ 的不同浓度浸提液,分装、标记并密封保存,存于 4°C 冰箱中备用。

2.2.2 种子发芽实验 挑选大小均匀、饱满的马尾松种子,冲洗,消毒,再反复冲洗后浸种 24 h ,去除浮于水面的种子,其余均匀地放置在已消毒的双层滤纸覆盖培养皿中,每培养皿放 100 颗种子。将格氏栲天然林不同分解层-浓度发热凋落物浸提液加入培养皿中,每个培养皿加入 10 mL 浸提液,每个处理 3 次重复,并设 3 个空白组做对照(加入蒸馏水),参照格氏栲天然林空气温湿度,将其置于 25°C 光反应和 20°C 暗反应培养箱中循环培养 12 h ,光照强度为 $50\text{ }\mu\text{mol}\cdot(\text{cm}^2\cdot\text{s})^{-1}$ ^[20],相对湿度 $70\%\sim 80\%$ 。每天补充等量相应浓度的浸提液(对照组补充蒸馏水),使滤纸保持湿润状态。

2.2.3 测定方法 从安置种子当天开始,以胚根露出种皮 $1\sim 2\text{ mm}$ 为标准^[21],逐日记录发芽种子数和腐烂种子数,待种子发芽盛期,从不同浓度培养皿中选胚根长度基本一致的种子各 20 粒测量胚根长度并记录。连续 3 天种子发芽数不变时,结束发芽实验,胚根生长量基本不变时,结束胚根实验。计算种子发芽率、发芽势、发芽指数和化感效应指数^[22-23]。

各项指标计算公式如下:

发芽率/% = (发芽种子数/供试种子总数) \times 100%;

发芽势/% = 日平均发芽数达到最高那一天为止正常发芽种子数/供试种子总数 \times 100%;

$$\text{发芽指数} = \sum (Gt / Dt)$$

注: Dt 为发芽日数, Gt 为与 Dt 相对应的每天发芽种子数

化感指数 $RI = 1 - C/T$ (当 $T \geq C$ 时), 或 $RI = T/C - 1$ (当 $T < C$ 时)

注: C 为对照值, T 为处理值, $RI < 0$ 表示抑制作用, $RI > 0$ 表示促进作用, RI 绝对值大小与化感作用强度一致。

2.3 数据处理

用 Microsoft Excel 2019 对实验数据进行基本计算并绘图, 采用 SPSS v24 统计软件对实验数据进行统计分析。统计分析中, 双因素方差分析检验不同分解程度与浓度对种子发芽的影响, 用重复测量方差分析检验不同时期影响胚根生长, 用 Duncan 检验方法测定影响胚根生长各处理间显著差异性。用对应分析衡量马尾松种子发芽指标和胚根生长在不同分解层-浓度凋落物浸提液浓度各水平之间内在联系, 浓度与分解层之间距离越近, 化感作用越小; 反之化感作用越大^[24]。

3 结果分析

3.1 不同分解程度-浓度凋落物浸提液马尾松种子萌发的影响

格氏栲凋落物不同分解层对马尾松种子发芽率、发芽势和发芽指数呈极显著性差异, 但其凋落物浓度及其分解程度对马尾松种子萌发没有显著影响 (见表 1), 影响马尾松种子萌发的主要影响因素是凋落物分解程度。为此, 针对不同分解层处理下进一步分析马尾松种子发芽指标, 见表 2, 与空白对照相比, 未分解层和全分解层对马尾松种子发芽率、发芽势、发芽指数没有显著差异性, 半分解层对其发芽率和发芽指数具有显著抑制作用, 对发芽势具有显著促进作用。

不同分解层-浓度凋落物浸提液对马尾松种子发芽指标相关性不显著 (见图 1)。未分解浸提液浓度为 1:100 时, 对马尾松种子各发芽指标化感作用较小, 1:5 时对其化感作用最大; 半分解层浓度为 1:50 和 1:30 时对发芽率化感作用较弱,

表 1 分解层-浓度对马尾松种子发芽指标的双因素方差分析

Table 1 Two-way ANOVA analysis for decomposition layer – concentration on seed germination index of *P. massoniana*.

发芽指标 Germination indices	影响因素 Factors	df	F	P
发芽率 Germination rate/%	分解层 Decomposition layer	2	9.873 1	0.0004***
	浓度 Concentration	4	0.883 8	0.482 9
	分解层 × 浓度 Decomposition layer × Concentration	8	1.667	0.148
发芽势 Germination potential /%	分解层 Decomposition layer	2	9.963 9	0.0003 ***
	浓度 Concentration	4	0.902 8	0.472 0
	分解层 × 浓度 Decomposition layer × Concentration	8	2.887	0.016
发芽指数 Germination index	分解层 Decomposition layer	2	6.954 5	0.0027 **
	浓度 Concentration	4	0.367 9	0.830 0
	分解层 × 浓度 Decomposition layer × Concentration	8	1.832	0.110

注: *代表差异显著, **代表差异极显著, ***代表P值小于0.001, 下表同。

表 2 不同分解层对马尾松种子发芽指标的平均值与多重比较

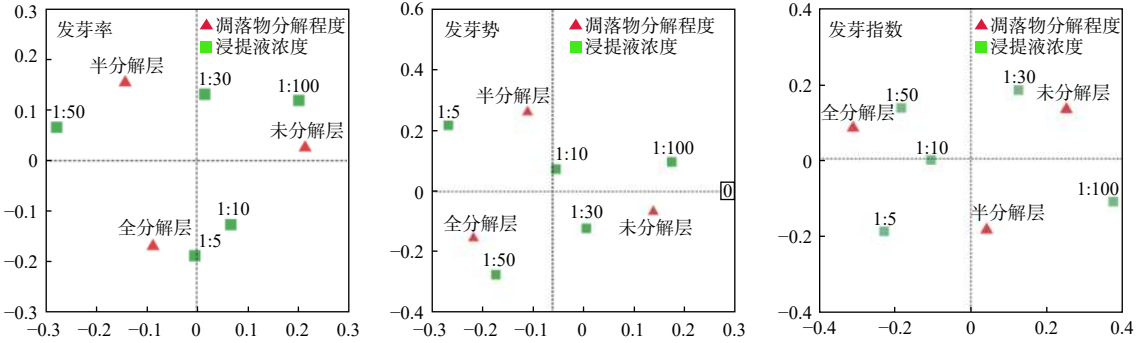
Table 2 Average and multiple comparison of seed germination indices of *P. massoniana* in different decomposition layer.

分解层 Decomposition layer	发芽率 Germination rate/%	化感指数 Allelopathy effect index	发芽势 Germination potential/%	化感指数 Allelopathy effect index	发芽指数 Germination index	化感指数 Allelopathy effect index
未分解层 Undecomposed layer	80.13 ± 4.98 ab	0.29	99.21 ± 8.91 ab	-0.028	53.40 ± 7.14 ab	0.041
半分解层 Semi-decomposed layer	73.27 ± 4.37 a	0.036	109.10 ± 10.87 a	-0.109	45.33 ± 7.06 a	-0.108
全分解层 Fully decomposed layer	79.13 ± 4.26 b	0.016	95.10 ± 7.15 b	-0.018	53.77 ± 06.12 b	-0.003
CK	77.53 ± 3.30 b	0.000	95.33 ± 3.08 b	0.000	54.75 ± 3.30 b	0.000

注: 同列字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$), Mean ± SE 表示平均值 ± 标准差, CK 为对照组。

1 : 5 时化感作用较强, 浓度为 1 : 5 和 1 : 10 对发芽势和发芽指数化感作用较弱, 1 : 50 时化感作用较强; 全分解层对发芽率在 1 : 5 和 1 : 10 时化感

作用较弱, 1 : 100 时化感作用较强, 对发芽势与发芽指数除 1 : 50 有较强的化感作用外其他浓度化感作用均相对较小。



注: 发芽率、发芽势和发芽指数的卡方统计量分别为 3.143、0.116、13.645, 对应的 P 值分别为 0.925、1.000、0.092, $P < 0.05$ 具有显著相关性, $P < 0.001$ 具有极显著相关性, 下同。

图 1 不同分解层-浓度对马尾松种子发芽指标的相应分析

Fig. 1 Corresponding analysis on germination index of *P. massoniana* seeds by different decomposition layer-concentration.

3.2 浸提液对马尾松种子胚根生长的影响

分解层、时间与分解层的交互作用、时间与浓度的交互作用及时间与分解程度和浓度的交互作用对胚根生长无明显差异, 浓度效应、时间效应和浓度与分解程度的交互作用对其有明显差异 (见表 3)。结果表明影响胚根生长的主效应是浓度、时间及分解程度与浓度的交互作用。

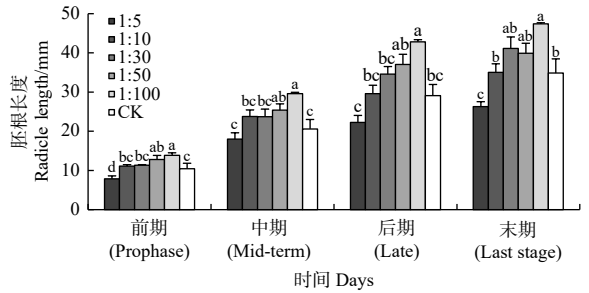
($P < 0.05$) ; 随时间变化, 胚根生长随时间而不断生长, 末期时 1 : 5 浓度呈显著抑制作用 (见图 2、表 4), 即表明不同浓度未分解层对种子胚根生长的影响在整个胚根生长期除极低浓度外, 随浓度降低促进作用增强, 1 : 100 浓度时促进作用最强。

表 3 分解层-浓度-时间对马尾松种子胚根生长的重复测量方差分析

Table 3 Analysis of variance of repeated measurements of seed radicle growth of *P. massoniana* By decomposition layer-concentration-time.

影响因素 Factors	df	F	P
分解层 Decomposition layer	2	1.236	0.292
浓度 Concentration	4	2.743	0.029*
时间 Time	1	53.199	0.000***
分解层 × 浓度 Decomposition layer × Concentration	8	5.537	0.000***
时间 × 分解层 Time × Decomposition layer	2	1.107	0.332
时间 × 浓度 Time × Concentration	4	1.369	0.244
时间 × 分解层 × 浓度 Time × Decomposition layer × Concentration	8	0.628	0.754

未分解 1 : 5 浓度外, 其他浓度处理组对胚根生长均呈现促进作用, 随着浓度降低促进作用增强, 浓度降低到 1 : 100 时, 具有显著促进作用



注: 同时期字母不同表示差异显著, ($P < 0.05$) CK 为对照组, 下同。

图 2 未分解层凋落物不同浓度浸提液对马尾松种子胚根生长的影响

Fig. 2 Effects of different concentrations of extracts from undecomposed litter on the radicle growth of *P. massoniana* seeds

随浓度变化, 半分解层对马尾松胚根生长浓度在 1 : 5 和 1 : 100 时, 具有显著促进作用 ($P < 0.05$), 浓度为 1 : 10、1 : 30 和 1 : 50 时, 具有显著抑制作用 ($P < 0.05$) ; 随时间变化, 浓度为 1 : 5 和 1 : 100 时, 胚根生长化感强度减小, 浓度为 1 : 10、1 : 50 和 1 : 30 时, 其化感强度先增大后减小或保持不变 (见图 3、表 5)。可见, 半分解层对马尾松胚根生长总体呈高低浓度促进, 中浓度抑制。

表 4 分解层凋落物浸提液对马尾松种子胚根长度化感指数的影响

Table 4 Effects of extracts from undecomposed litter on the allelopathic index of *P. massoniana* seed radicle length

未分解层 undecomposed	前期 Prophase	中期 Mid-term	后期 Late	末期 Last stage
1 : 5	-0.248	-0.127	-0.235	-0.246
1 : 10	0.058	0.133	0.016	0.004
1 : 30	0.077	0.13	0.159	0.152
1 : 50	0.181	0.189	0.214	0.127
1 : 100	0.244	0.304	0.321	0.265
CK	0.000	0.000	0.000	0.000

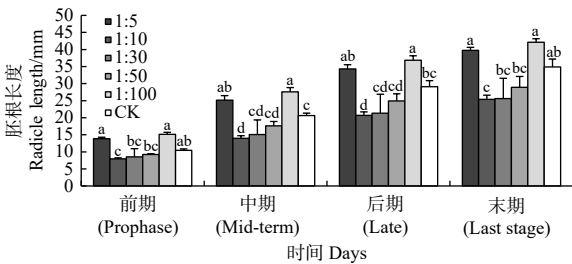


图 3 半分解层凋落物不同浓度浸提液对马尾松种子胚根生长的影响

Fig. 3 Effects of extracts from different concentrations of semi-decomposed litter on the radicle growth of *P. massoniana* seeds

表 5 半分解层凋落物浸提液对马尾松种子胚根长度化感效应指数的影响

Table 5 Effects of extracts from semi-decomposed litter on the allelopathic index of *P. massoniana* seed radicle length

半分解层 semi-decomposed	前期 Prophase	中期 Mid-term	后期 Late	末期 Last stage
1 : 5	0.326	0.222	0.179	0.124
1 : 10	-0.242	-0.323	-0.289	-0.271
1 : 30	-0.185	-0.267	-0.267	-0.265
1 : 50	-0.119	-0.146	-0.143	-0.17
1 : 100	0.450	0.340	0.211	0.173
CK	0.000	0.000	0.000	0.000

随浓度变化, 全分解层浓度为 1 : 5 时, 对胚根生长具有显著促进作用 ($P < 0.05$), 其他浓度处理总体上对其生长具有促进作用; 随时间变化, 化感作用强度无规律变化, 浓度为 1 : 10 和 1 : 50 时前期和后期化感作用强度的变化小 (见图 4、表 6)。表明全分解层对胚根生长影响总体呈现促进作用, 且随浓度降低促进作用减弱或保持不变。

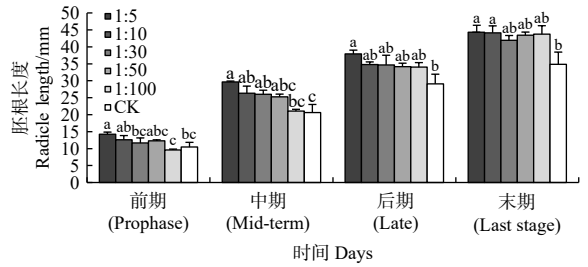


图 4 全分解层的凋落物不同浓度浸提液对马尾松种子胚根生长的影响

Fig. 4 Effects of extracts from different concentrations of litter on the radicle growth of *P. massoniana* seeds

表 6 全分解层凋落物浸提液对马尾松种子胚根长度化感效应指数的影响

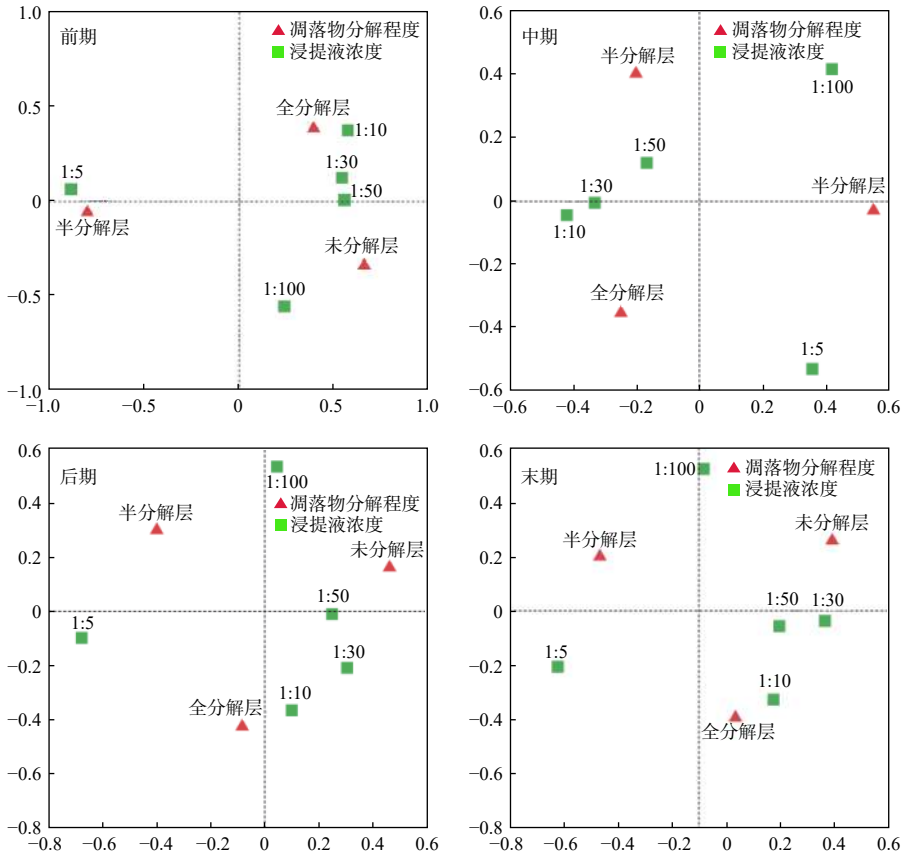
Table 6 Effects of litter extracts from fully decomposed layers on allelopathic index of *P. massoniana* seed radicle length.

全分解层 fully decomposed	前期 Prophase	中期 Mid-term	后期 Late	末期 Last stage
1 : 5	0.267	0.305	0.233	0.213
1 : 10	0.170	0.217	0.164	0.210
1 : 30	0.103	0.207	0.161	0.168
1 : 50	0.148	0.184	0.148	0.198
1 : 100	-0.082	0.021	0.145	0.203
CK	0.000	0.000	0.000	0.000

凋落物浸提液对马尾松种子胚根生长的综合影响, 见图 5。不同分解程度-浓度凋落物浸提液对马尾松种子胚根生长影响具有显著相关性。未分解层对马尾松种子胚根生长在前、中、后、末四个时期在 1 : 5 浓度的化感作用较强, 1 : 50 和 1 : 10 时化感作用较弱; 半分解层对其种子胚根生长前期化感作用在 1 : 5 时较弱, 其他浓度组较强, 中、后、末期时, 化感作用在 1 : 5 和 1 : 100 时化感作用较弱, 其他浓度组较强; 前期, 全分解层对其种子胚根生长除 1 : 5 浓度具有较强化感作用外, 其他浓度组化感作用均相对弱, 中、后、末期时, 除 1 : 100 浓度具有较强的化感作用外, 其他浓度化感作用均相对弱。

4 结论与讨论

凋落物分解是森林生态系统化学循环的主要环节之一, 对群落组成及分布具有重要作用^[25]。研究发现不同分解程度凋落物浸提液对马尾松种子发芽



注：前期、中期、后期、末期的卡方统计量分别为 1097.975、209.935、267.323、274.375，对应 P 值均为 0.000a。

图5 不同分解层-浓度在不同时期胚根生长的相应分析

Fig. 5 Corresponding analysis of different decomposition layers-concentration on the growth of radicle in different periods

指标呈极显著性差异，浓度、浓度与分解程度的交互作用不显著，可能由于凋落物不同分解时期所产生化感效应有所差异^[26]，影响其种子萌发的主要因素是凋落物分解程度。不同分解层凋落物浸提液对马尾松种子发芽指标总体呈抑制作用：未分解层及全分解层处理组对马尾松种子发芽指标与对照相比无显著作用；与空白对照组相比，半分解层处理组对马尾松种子发芽率和发芽指数呈显著抑制作用，对其发芽势呈显著促进作用，有可能在于未分解层化感物质积累少；全分解层部分化感物质已被分解，对马尾松种子发芽无显著影响。种子随半分解层化感物质释放不断积累，种子受到胁迫，呼吸作用增强，三磷酸腺苷（ATP）中高能键活跃，线粒体内膜活力强，代谢速率加快，促进种子生活力强度^[27-28]，部分种子达到化感强度临界值，在发芽之前，已发生劣变^[29]，促进了种子发芽势，抑制发芽率和发芽指数。

不同分解程度凋落物浸提液对马尾松种子萌发作用较弱，对胚根生长在低浓度下呈现促进作用，

重复测量方差分析表明浓度、时间及分解程度与浓度的交互作用是影响马尾松种子胚根生长主要因素。不同分解程度对胚根生长在低浓度为促进作用：（1）未分解层对马尾松种子胚根生长影响除 1:5 浓度外，随浓度降低促进作用增强，在高浓度下化感物质积累过多，影响植物对水吸收^[30]，抑制胚根对水分吸收，细胞器被破坏，进而抑制其生长。低浓度浸提液作为一种防御机制刺激幼苗初步发展，增加种子细胞分裂和组织的敏感性，从而促进胚根生长^[31]。本研究结果与陈立新等研究得出高浓度浸提液抑制红松种子萌发与胚根生长结果相一致^[32]。（2）半分解层对马尾松胚根长度影响总体呈低高浓度促进，中间浓度抑制作用，马尾松发芽周期短，其种子在低或高浓度浸提液提取物刺激下，利用胚根储存营养物质生长，从而削弱化感作用的影响^[31]，中间浓度有害物质积累多，影响受体细胞分裂和伸长，导致细胞排列紊乱，细胞器被破坏^[33-34]，抑制马尾松胚根生长。（3）全分解层对胚根生长影响总体呈现促进趋势，并随浓度升高促

进作用增强, 生物活性浓度决定化感物质毒性^[35], 全分解层凋落物与土壤接触时间长, 受土壤中微生物等作用影响较大, 部分化感物质被分解, 降低其化感物质活性^[36], 促进胚根生长。不同分解程度对胚根生长随时间变化总体呈促进作用: (1) 未分解及全分解层对种子胚根生长随着时间增加化感强度变化不规律。(2) 半分解层对马尾松胚根生长随时间增加, 化感强度减小或保持不变。胚根生长前中期, 凋落物中营养物质含量积累多于化感物质, 呼吸作用增强, 细胞内蛋白质活性增强, 代谢速率加快, 根尖分生区细胞分裂速度加快^[28], 到后、末期时, 化感物质和营养物质不断积累, 升高到一定量时, 化感物质之间或与营养物质之间, 随时间氧化分解使其化感物质浓度减小^[37]。

凋落物对马尾松种子发芽和胚根生长影响复杂, 从凋落物分解程度与浓度对马尾松种子发芽与胚根长度对应分析, 发现分解程度与浓度对种子发芽无显著相关性, 对胚根生长具有极显著相关性, 说明凋落物化感作用更明显作用于种子胚根生长, 胚根根尖直接接触化感物质, 而种子由于受到种皮保护, 使化感作用在胚根生长过程中更明显^[36]。

化感效应在植物种子萌发和幼苗生长阶段具有重要作用^[38]。格氏栲种内对资源和空间竞争剧烈, 通过凋落物化感物质使其发生自毒作用^[39], 进而产生密度制约效应, 抑制自身种子萌发和幼苗生长发育, 为马尾松等部分伴生种的生存提供空间和资源, 而天然林凋落物浸提液对伴生种马尾松种子萌发和胚根生长在一定程度上具有促进作用, 进一步表明整个群落正向物种丰富组成的复杂方向演变。

参考文献:

- [1] Liu J F, Hong W, Pan D M, *et al.* A study on multidimensional time series model of individual age's measurement in *Castanopsis kawakamii* population[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(4): 232-236.
- [2] 刘金福, 何中声, 洪伟, 等. 濒危植物格氏栲保护生态学研究进展[J]. 北京林业大学学报, 2011, 33(5): 136-143.
- [3] 王哲, 蓝亦琦, 何中声, 等. 凋落物浸提液对格氏栲种子萌发与胚根生长影响的研究[J]. 福建农林大学学报, 2020, 49(1): 51-58.
- [4] 何中声, 刘金福, 朱德煌, 等. 林窗对格氏栲天然林更新层物种生态位的影响[J]. 广西植物, 2012, 32(5): 624-629.
- [5] Carson W P, Anderson J T, Leigh E G J, *et al.* Challenges associated with testing and falsifying the Janzen-Connell hypothesis: a review and critique. In: Tropical Forest Community Ecology[M]. West Sussex: Wiley-Blackwell, 2008, 210-241.
- [6] 祝燕, 米湘成, 马克平. 植物群落物种共存机制: 负密度制约假说[J]. 生物多样性, 2009, 17(6): 594-604.
- [7] Jansen P A, Visser M D, Wright S J, *et al.* Negative density dependence of seed dispersal and seedling recruitment in a Neotropical palm[J]. Ecology Letters, 2014, 17(9): 1111-1120.
- [8] 江贵波, 曾任森. 入侵物种三裂叶螞蟥菊挥发物的化感作用研究[J]. 生态环境, 2007, 16(3): 12-26.
- [9] 万欢欢, 刘万学, 万方浩. 紫茎泽兰叶片凋落物对入侵地4种草本植物的化感作用[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(1): 130-134.
- [10] 刘芳黎, 张越, 吴富勤, 等. 自毒和森林凋落物化感作用对极小种群野生植物大树杜鹃种子萌发的影响[J]. 西北植物学报, 2017, 37(6): 1189-1195.
- [11] 薛晨阳, 高英美, 曲波, 等. 镉胁迫对瘤突苍耳、苍耳及其杂合体种子萌发与幼苗生长的影响[J]. 生态学报, 2020, 40(1): 345-355.
- [12] 何中声, 刘金福, 郑世群, 等. 林窗对格氏栲天然林更新层物种多样性和稳定性的影响[J]. 植物科学学报, 2012, 30(2): 133-140.
- [13] 冯雪萍. 格氏栲天然林林窗凋落物与土壤的生态化学计量特征研究[D]. 福州, 福建农林大学, 2017.
- [14] 赵畅, 龙健, 李娟, 等. 茂兰喀斯特原生林不同坡向及分解层的凋落物现存量和养分特征[J]. 生态学杂志, 2018, 37(2): 295-303.
- [15] Inderjit, Nilsen E T. Bioassays and field studies for allelopathy in terrestrial plants: Progress and Problems[J]. Critical Reviews in Plant Sciences, 2003, 22(3): 221-238.
- [16] 刘艳会, 刘金福, 马瑞丰, 等. 格氏栲天然林3种群落类型凋落物的持水性[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(24): 258-261.
- [17] 陈娟, 白尚斌, 周国模, 等. 毛竹浸提液对苦槠幼苗生长的化感效应[J]. 生态学报, 2014, 34(16): 4499-4507.
- [18] Sakadzo N, Innocent P, Simbarashe M, *et al.* Thorn apple (*Datura stramonium* L.) allelopathy on cowpeas (*Vigna unguiculata* L.) and wheat (*Triticum aestivum* L.) in Zimbabwe[J]. African Journal of Agricultural Research, 2018, 13(29): 1460-1467.
- [19] 庄正, 李艳娟, 刘青青, 等. 凋落物浸提液对杉木种子萌发及幼苗的影响[J]. 森林与环境学报, 2017, 37(1): 29-33.
- [20] 何中声. 格氏栲天然林林窗微环境特征及幼苗更新动态研究[D]. 福州, 福建农林大学, 2012.
- [21] 薛启, 王康才, 梁永富, 等. 藿香不同部位浸提液对其种子萌发及幼苗生长的化感作用[J]. 南京农业大学学报, 2017, 40(4): 611-617.
- [22] 何中声, 刘金福, 洪伟, 等. 不同处理对格氏栲种子发芽的影响[J]. 北京林业大学学报, 2012, 34(2): 66-70.
- [23] Zhou L, Fu Z S, Chen G F, *et al.* Research advance in allelopathy effect and mechanism of terrestrial plants in inhibition of *Microcystis aeruginosa*[J]. The journal of applied ecology, 2018, 29(5): 1715-1724.
- [24] 阳含熙, 杨周南, 卢泽愚. 植物群落数量分类的研究——三、相互平均法和指示种分析[J]. 自然资源, 1980, 1(3): 1-12.
- [25] 龙健, 张明江, 赵畅, 等. 土壤动物对茂兰喀斯特森林凋落物分

- 解过程中元素释放的作用[J]. 生态学杂志, 2019, 38(9): 2671-2682.
- [26] 孙庆花, 张 超, 刘国彬, 等. 黄土丘陵区草本群落演替中先锋种群茵陈蒿浸提液的化感作用[J]. 生态学报, 2016, 36(8): 2233-2242.
- [27] Steven M D, Malthus T J, Xu H, et al. Intercalibration of vegetation indices from different sensor systems[J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 88(4): 412-422.
- [28] Nevena M, Mariana S, Jelena S, et al. Physiological and cell ultrastructure disturbances in wheat seedlings generated by *Chenopodium murale* hairy root exudate[J]. Protoplasma, 2018, 255(6): 1683-1692.
- [29] Fry S C. Exudates Potassium not lepidimoid is the principal 'allelochemical' of cress-seed exudate that promotes amaranth hypocotyl elongation[J]. Annals of Botany, 2017, 120(4): 511-520.
- [30] Oyun M B. Allelopathic potentialities of *Gliricidia sepium* and *Aca-cia auriculiformis* on the germination and seedling vigor of maize (*Zea mays L.*)[J]. American Journal of Agriculture and Biological Sciences, 2006, 1(3): 44-47.
- [31] Rigon C A G, Salamoni A T, Cutti L, et al. Germination and initial development of canola and radish submitted to castor leaves aqueous extracts[J]. Comunicata Scientiae, 2016, 7(1): 104-111.
- [32] 陈立新, 李少博, 乔 璐, 等. 凋落物叶和土壤浸提液对红松种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2016, 40(2): 81-87.
- [33] 贺 维, 陈 刚, 陈 洪, 等. 美洲黑杨凋落叶分解初期对小白菜生长的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(7): 2067-2075.
- [34] Mahdaviikia F, Saharkhiz M J, Karami A. Defensive response of radish seedlings to the oxidative stress arising from phenolic compounds in the extract of peppermint (*Mentha × piperita L.*)[J]. Scientia Horticulturae, 2017, 214: 133-140.
- [35] Zhang X, Cui Q X, Zhao Y, et al. Allelopathic potential of *Koeleria bipinnata* var. *integrifoliola* on germination of three turf grasses[J]. Russian Journal of Plant Physiology, 2018, 65(6): 833-841.
- [36] Araniti F, Gulli T, Marrelli M, et al. *Artemisia arborescens L.* leaf litter: phytotoxic activity and phytochemical characterization[J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2016, 38(5): 128.
- [37] Valencia D S, Flores P A, Rodriguez L V, et al. Effect of host-bark extracts on seed germination in *Tillandsia recurvata*, an epiphytic bromeliad[J]. Journal of Tropical Ecology, 2010, 26(6): 571-581.
- [38] 王慧杰, 常顺利, 张毓涛, 等. 天山雪岭云杉森林群落的密度制约效应[J]. 生物多样性, 2016, 24(3): 252-261.
- [39] 刘忠玲, 王庆成, 郝龙飞. 白桦、落叶松不同器官水浸液对种子萌发和播种苗生长的种间化感作用[J]. 应用生态学报, 2011, 22(12): 3138-3144.

Effects of *Castanopsis kawakamii* Forest Litter on Seed Germination of *Pinus massoniana*

JIA Mei-hua^{1,2,3}, WANG Zhe^{1,2,3}, LIU Jin-fu^{1,2,3}, JIN Meng-ran^{1,2,3}, HE Zhong-sheng^{1,2,3},
XING Cong^{1,2,3}, SHI You-wen⁴, SHEN Cai-xia⁴

(1. College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, Fujian, China; 2. Cross-Strait Nature Reserve Research Center, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, Fujian, China; 3. Key Laboratory of Fujian Universities for Ecology and Resource Statistics, Fuzhou 350002, Fujian, China; 4. Administration Station of *Castanopsis kawakamii* Nature Reserve in Xinkou of Sanming, Sanming 365000, Fujian, China)

Abstract: [Objective] To understand the effect of litter of *Castanopsis kawakamii* natural forest on the competitive intensity of regeneration of *Pinus massoniana*. [Method] The allelopathic effects of litter extract of natural forest with different concentration and decomposition degree on seed germination and radicle growth of *P. massoniana* were studied. [Result] (1) The main factor affecting the germination of *P. massoniana* seeds was the degree of litter decomposition. Compared with the blank control, the litter of undecomposed layer and fully decomposed layer had no significant effect on the germination of *P. massoniana* seeds; the semi-decomposed layer inhibited the germination rate and germination index and promoted the germination potential. (2) The main factors affecting the growth of radicle were the concentration and action time of litter extract, and the effect of undecomposed layer on the whole radicle growth period of *P. massoniana* seeds was enhanced with the decrease of concentration, but increased with the decrease of concentration, and the promoting effect was the strongest at the concentration of $1 \leq 100$, and the effect of semi-decomposition layer was promoted by low concentration and high concentration, and the intermediate concentration was inhibited by the undecomposed layer. The fully decomposition layer showed promoting effect as a whole, and the promoting effect decreased with the decrease of concentration. (3) Correspondence analysis showed that different decomposition degree-concentration had no significant effect on seed germination of *P. massoniana*, but had significant correlation with radicle growth. [Conclusion] The result proves that the litter extract of different decomposition degree has a weak promoting or inhibiting effect on the seed germination of *P. massoniana*, promotes the growth of radicle at low concentration, and promotes the regeneration of *P. massoniana*, which will intensify the interspecific competition in the forest, and lead to the inhibition of the natural regeneration of *C. kawakamii*.

Keywords: litter extract; allelopathy; *Pinus massoniana*; seed germination; radicle; *Castanopsis kawakamii* natural forest