

马尾松凋落叶水提液对 4 种牧草种子萌发与幼苗生长的化感效应

蒋贻朗¹, 朱献国², 陈平¹, 曹洪麟³, 洪岚^{1*} (1. 仲恺农业工程学院园艺园林学院, 广东广州 510225; 2. 安徽省黄山市农业委员会, 安徽黄山 245000; 3. 中国科学院华南植物园/退化生态系统植被恢复与管理重点实验室, 广东广州 510650)

摘要 [目的] 筛选适宜在我国南方马尾松林下间作的优质牧草品种。[方法] 采用生物测定法研究 2.0%、1.0%、0.5%、0.2% 和 0.1% 共 5 个浓度的马尾松凋落叶水提液对羽扇豆、大翼豆、杂交狼尾草、多年生黑麦草这 4 种牧草种子萌发和幼苗生长的化感效应。[结果] 马尾松凋落叶水提液对不同受体植物的化感综合效应各异。不同浓度的马尾松凋落叶水提液对多年生黑麦草和大翼豆均表现为抑制作用, 而羽扇豆和杂交狼尾草则对不同浓度的马尾松凋落叶水提液表现出低抑高促。马尾松林下供试豆科牧草的适应性依次为羽扇豆>大翼豆; 禾本科为杂交狼尾草>多年生黑麦草; 4 种牧草为羽扇豆>杂交狼尾草>多年生黑麦草>大翼豆。但是, 羽扇豆在不同浓度下表现出的综合化感效应指数都在 0 附近且差值最小, 说明马尾松凋落叶的化感作用对羽扇豆的影响最小。[结论] 从化感作用角度来说, 在我国南方马尾松林下首选羽扇豆进行间作。

关键词 马尾松林; 牧草; 化感作用; 化感效应综合指数

中图分类号 S 791.248 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2018)25-0096-05

Allelopathic Effects of Aqueous Extract of *Pinus massoniana* (Masson pine) Litter Leaf on Four Pasture Species

JIANG Yi-lang¹, ZHU Xian-guo², CHEN Ping¹ et al (1. College of Horticulture and Landscape Architecture, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou, Guangdong 510225; 2. Huangshan Agriculture Commission, Huangshan, Anhui 245000)

Abstract [Objective] The high-quality pasture species suitably interplanted with *Pinus massoniana* (Masson pine) in southern China were screened. [Method] The allelopathic effects of aqueous extract from *P. massoniana* leaves at five different concentrations (2.0%, 1.0%, 0.5%, 0.2% and 0.1%) on seed germination and seedling growth of four important pasture species (*Lupinus polyphyllus*, *Macroptilium atropurpureum*, *Penisetum americanum* × *P. purpureum* and *Lolium perenne*) were investigated by biological assay. [Result] The allelopathic synthesis effects of aqueous extract from *P. massoniana* leaves were different among tested receptor plants. *M. atropurpureum* and *L. perenne* showed allelopathic inhibiting effect of aqueous extract from *P. massoniana* leaves at all concentrations. However, although *L. polyphyllus* and *P. americanum* × *P. purpureum* showed allelopathic inhibiting effect at low concentration, they showed obvious allelopathic promoting effect at high concentration. As for all tested pasture species in *P. massoniana* forest, their adaptability from strong to weak in order was *L. polyphyllus* > *M. atropurpureum* in Leguminosae, *P. americanum* × *P. purpureum* > *L. perenne* in Gramineae, and *L. polyphyllus* > *P. americanum* × *P. purpureum* > *L. perenne* > *M. atropurpureum* for the whole. Moreover, the allelopathic effects of *L. polyphyllus* under different concentrations were near 0, and the difference was the smallest, indicating that *L. polyphyllus* was least affected by the allelopathic effects of *P. massoniana* leaves. [Conclusion] From the perspective of allelopathy, *L. polyphyllus* is the most preferable interplanting pasture species in *P. massoniana* forests in southern China.

Key words *Pinus massoniana* forest; Pasturage; Allelopathy; Allelopathic effect synthesis index

马尾松 (*Pinus massoniana* Lamb.) 是我国特产的速生丰产树种, 在南方 16 省区广为栽培^[1-2]。目前, 1/4 以上的马尾松林存在严重的林下水土流失和土地退化现象, 成为南方红壤区退化面积最大的森林类型^[3]。林下草本植物匮乏, 是造成马尾松林下水土流失的最主要和最直接原因^[4-5]。当前在国家和广东省大力发展林下经济^[6-7]的背景下, 结合马尾松林郁闭度的特点, 以林草模式 (如种植优质牧草^[7]) 实现马尾松林生态系统的恢复、保护和可持续利用, 可提高林地空间的高效复合利用率, 从而获得经济和生态效益的双丰收。筛选适宜在我国南方马尾松林下间作的优质牧草品种, 不仅可以在原有松林的经济价值基础上增加牧草生产力, 还可以增加土壤肥力, 利于松林生长。但是关于马尾松林下人工种植优质适生牧草鲜有研究。研究表明, 森林群落的植物组成及其分布, 不仅与植物的生物学特性、生境条件相关, 而且与其森林系统的化感作用效应存在密切联系^[8]。建立马尾松林下间种牧草的模式必须考虑马尾松对牧草的化感作用, 这是筛选适合马尾松林下种植的优质适生牧草品种并合理利

用的关键。目前对农作物与杂草间化感作用的研究较为深入和系统, 而对林木化感作用的研究相对较少^[9]。

关于马尾松林的研究主要集中在对林下植被的分布特征^[10-11], 林下植被恢复的影响因素^[12-13] 以及植被恢复措施^[14-16] 的探讨上, 对马尾松林的化感效应研究近年来也有所增加^[1, 17]。如曾冀等^[2] 以西南桦和萝卜为靶标植物, 研究了马尾松的鲜叶、枯落叶 (未分解、半分解) 和林下表土水浸提液的化感活性。段剑^[18] 研究了马尾松根系分泌物的物质组成及其化感作用, 探明了马尾松根系分泌物的主要化感物质种类及其对林下群落植物组成和分布的影响机制。张腾^[19] 以马尾松和杉木的鲜叶和枯落叶为供体材料, 以莴苣、萝卜和水稻等为受体植物, 分析了两种树木的化感作用潜力。然而, 这些研究所用的受体植物多为通用的水稻和蔬菜类, 而鲜见以牧草作为受体植物的研究案例。

笔者针对以上问题, 选取羽扇豆、大翼豆、杂交狼尾草、多年生黑麦草为受体植物, 开展马尾松凋落叶浸提液对其种子发芽与幼苗生长的化感效应研究, 旨在为筛选马尾松林下适宜间作的豆科和禾本科牧草提供与林草化感作用相关的研究基础, 以期初步筛选出适宜在我国南方马尾松林下间作的优质牧草品种, 因地制宜地建立马尾松林-人工草地的开发利用模式, 合理开发我国南方丰富的草地资源, 对林草复合系统的牧草生产优化布局 and 合理套种具有重要意义, 并为

基金项目 广东省自然科学基金项目 (2015A030313597)。

作者简介 蒋贻朗 (1991—), 男, 安徽岳西人, 硕士研究生, 研究方向: 植物化感作用。朱献国 (1972—), 男, 安徽黟县人, 农艺师, 从事种子管理工作。蒋贻朗和朱献国为共同第一作者。* 通讯作者, 副教授, 博士, 硕士生导师, 从事植物生态学研究。

收稿日期 2018-05-11

马尾松林下有针对性的植被恢复工作提供基础数据和科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料 马尾松凋落叶片采集于鼎湖山国家级自然保护区的50年马尾松纯林。鼎湖山位于广东省肇庆市境东北部,距肇庆市区18 km,位于23°10'N、112°31'E,地处北回归线以南,属于亚热带季风气候,雨量充沛,日照充足。年平均降雨量为1 800 mm左右;年平均气温为21℃左右,年日照总量2 225.4 h,年无霜期360 d,年平均相对湿度83%,土壤多为山地黄壤与赤红壤。试验所用受体植物共4种(表1),4种牧草品种包括豆科牧草2种和禾本科牧草2种。

表1 供试受体牧草品种
Table 1 Tested receptor pasture species

序号 No.	种名 Species	拉丁学名 Latin name	科名 Family name	代码 Code
1	羽扇豆	<i>Lupinus polyphyllus</i>	豆科	YS
2	大翼豆	<i>Macroptilium atropureum</i> (DC.) Urb.	豆科	DY
3	杂交狼尾草	<i>Pennisetum americanum</i> × <i>P. purpureum</i>	禾本科	ZL
4	多年生黑麦草	<i>Lolium perenne</i> L.	禾本科	DH

1.2 方法

1.2.1 马尾松叶片水提液配制。参照张丹丹等^[20]的方法,首先将采集的马尾松凋落叶片用清水洗净表面灰尘,再用蒸馏水清洗2~3次,在室温条件下阴干备用。在常温条件下用蒸馏水作为抽提溶剂提取马尾松凋落叶片的水提液。将上述阴干的马尾松凋落叶片研磨成粉末,按100 mL蒸馏水1 g干物质的比例浸泡,置于摇床上250 r/min浸提48 h,转移至50 mL离心管中8 000 r/min离心10 min,取上清液即得1.0%的马尾松凋落叶片水提液母液,4℃保存备用。

1.2.2 种子萌发试验。采用培养皿滤纸法^[21]测定化感作用对种子萌发的影响。选取籽粒饱满、大小一致的受体牧草植物种子,置于铺有两层滤纸的培养皿中,培养皿直径为15 cm,每个培养皿放置50粒种子。设置5个马尾松凋落叶片水提液浓度处理,分别是2.0%、1.0%、0.5%、0.2%和0.1%,对照组用蒸馏水处理,各处理均设置4个重复。将培养皿放置在恒温25℃、湿度80%、12 h/d光照周期的培养箱中进行发芽试验。每天同一时间记录各培养皿中的发芽种子数,直到不再萌发结束试验。根据公式(1)和(2)分别计算种子最终发芽率(final germination, FG)和发芽速率(germination speed, GS)。根据Williamson和Richardson的方法^[22],用公式(3)计算化感效应指数(response index, RI)。具体计算公式如下。

$$FG = \frac{\text{发芽种子总数}}{\text{供试种子总数}} \times 100\% \quad (1)$$

$$GS = \sum (Gt/Dt) \quad (2)$$

式中, Gt 为逐日发芽种子数, Dt 为相应发芽天数。

$$T \geq C \text{ 时, } RI = 1 - C/T; T < C \text{ 时, } RI = (T/C) - 1 \quad (3)$$

式中, C 为对照值, T 为处理值。RI表示化感作用强度, $RI > 0$

时表示促进作用, $RI < 0$ 时表示抑制作用,其绝对值大小反映化感作用的强弱。

1.2.3 幼苗生长试验。种子在培养皿中生长7 d后,测定受体植物幼苗的胚根长、胚轴长,并计算胚轴长和胚根长的化感效应指数(RI)^[23]。最后计算马尾松凋落叶片水提液对每个物种的化感效应综合指数(synthesis effect, SE),即同一处理浓度对同一受体4个测量指标的化感抑制率(inhibitory rate, IR)的算术平均值^[23]。SE > 0表示抑制效应,SE < 0为促进效应,SE的绝对值表示综合作用强度的大小。

化感抑制率(IR) = $(1 - T/C) \times 100\%$,其中 C 为对照值, T 为处理值^[24]。化感抑制率表示化感物质对受体植物的化感作用大小,正值表示抑制作用,负值表示促进作用,其绝对值的大小表示化感作用的强弱。将最终发芽率、发芽速率、胚轴长和胚根长的化感抑制率这4项指标进行综合分析,得出化感作用的综合效应。

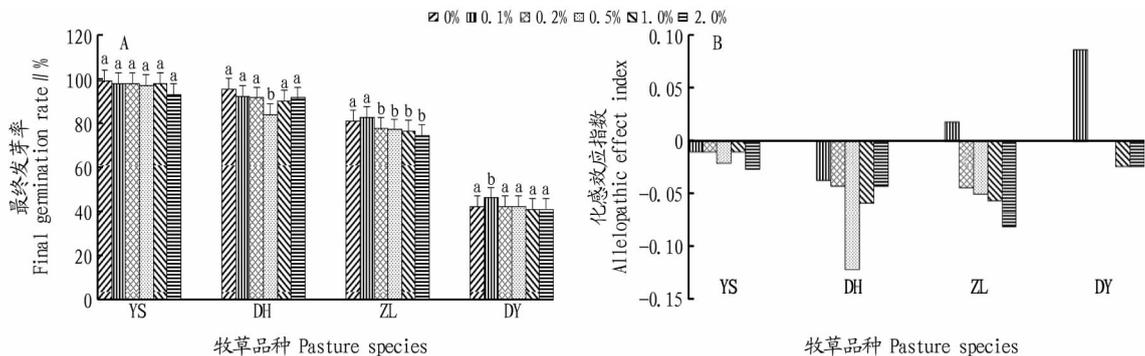
1.3 统计分析 所有差异显著性检验均用统计软件SPSS(version 22.0, SPSS Inc., Chicago, IL, USA)进行, $P < 0.05$ 时表示有统计学意义。其中,以单因素方差分析法(One-way ANOVA)解析各指标在不同处理间差异显著性。差异显著时以LSD(least significant difference)法对各处理的均值进行多重比较。所有图形用Microsoft Excel 2010软件绘制。

2 结果与分析

2.1 马尾松凋落叶片水提液对受体植物种子萌发的影响

2.1.1 马尾松凋落叶片水提液对受体种子最终发芽率的影响。不同浓度的马尾松凋落叶片水提液对牧草种子的最终发芽率影响不同(图1A、B)。在供试浓度范围内(0.1%~2.0%),羽扇豆在马尾松凋落叶片水提液表现出的最终发芽率均低于对照组,有抑制作用但不显著;各浓度水提液对多年生黑麦草均表现出抑制作用,其中0.5%浓度表现出显著抑制作用,最终发芽率为对照组的87.9%;杂交狼尾草在0.1%浓度时最终发芽率最高,促进作用不显著,在0.2%~2.0%水提液中随浓度升高,最终发芽率逐渐降低,都表现出显著抑制作用;大翼豆在0.1%水提液中最终发芽率显著增高,为对照组的109.5%,在0.2%~2.0%水提液中随浓度升高,最终发芽率均降低。

2.1.2 马尾松凋落叶片水提液对受体植物种子发芽速率的影响。经马尾松凋落叶片水提液处理的4种牧草品种发芽速率均低于其对照组,不同浓度的受体所产生的抑制作用也有不同,并且从整体上表现出随着水提液浓度的升高抑制作用增强(图2A)。结合化感效应指数分析(图2B),水提液对羽扇豆的发芽速率所产生的影响最小,5种浓度的水提液对羽扇豆发芽速率产生的抑制作用均不显著;多年生黑麦草、杂交狼尾草、大翼豆在0.1%~2.0%水提液中均表现出显著的抑制作用,多年生黑麦草发芽速率在0.5%水提液中达到最低;杂交狼尾草发芽速率随着水提液浓度的升高抑制作用显著增强;大翼豆在不同浓度水提液中均表现出显著的抑制作用,其中0.5%浓度下的发芽速率达到最低。

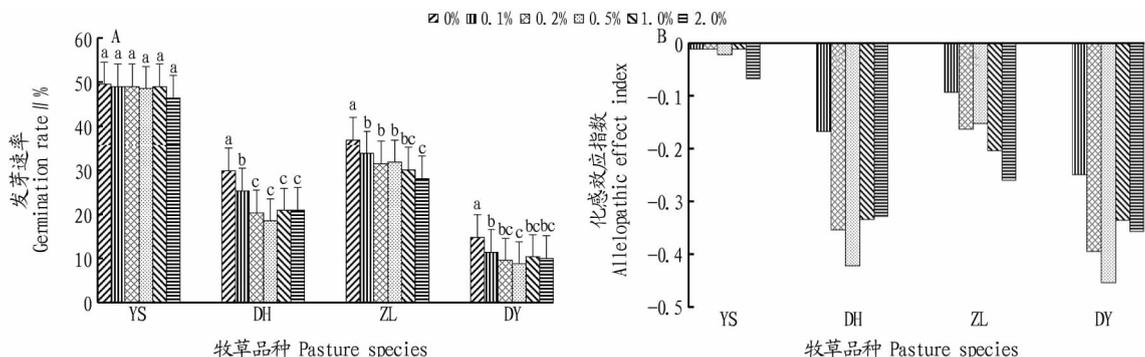


注:小写字母不同表示同个品种不同处理间差异显著($P < 0.05$)

Note: Different small letters mean significant differences among all treatments of the same variety ($P < 0.05$)

图1 马尾松凋落叶水提液对受体植物最终发芽率(A)及其化感效应指数(B)的影响

Fig. 1 Influence of aqueous extract from *Pinus massoniana* Lamb. litter leaf on final germination rate (A) and allelopathic effect index (B) of receptor pasture species



注:小写字母不同表示同个品种不同处理间差异显著($P < 0.05$)

Note: Different small letters mean significant differences among all treatments of the same variety ($P < 0.05$)

图2 马尾松凋落叶水提液对受体植物发芽速率(A)及其化感效应指数(B)的影响

Fig. 2 Influence of aqueous extract from *Pinus massoniana* Lamb. litter leaf on germination speed (A) and allelopathic effect index (B) of receptor pasture species

2.2 马尾松凋落叶水提液对受体植物幼苗生长的影响

2.2.1 马尾松凋落叶水提液对受体植物幼苗地上部分生长的影响。通过胚轴长来分析水提液对地上部分生长的影响,发现马尾松凋落叶不同浓度的水提液对羽扇豆胚轴生长表现出不同程度的抑制作用;不同浓度水提液对多年生黑麦草胚轴生长均有促进作用,其中0.2%浓度显著促进生长;0.1%、0.2%和0.5%水提液抑制杂交狼尾草胚轴生长,其中0.5%时显著抑制,在1.0%和2.0%浓度时促进胚轴生长;大翼豆在0.1%和0.2%浓度下表现出抑制作用,在0.5%、1.0%和2.0%浓度下均促进作用不显著(图3A、B)。

2.2.2 马尾松凋落叶水提液对受体植物幼苗地下部分生长的影响。水提液浓度为0.1%~2.0%时对羽扇豆胚根长均有显著的促进作用,在2.0%浓度下促进作用最强,胚根长为对照组的127.6%;多年生黑麦草胚根长在这5种浓度下均表现为促进作用,在浓度为0.2%、0.5%时表现出显著的促进作用;杂交狼尾草胚根长在0.1%、0.2%、0.5%浓度水提液中抑制作用不显著,在1.0%、2.0%浓度下表现出显著促进作用,胚根长分别为对照组118.9%、128.4%;大翼豆胚根长在0.1%、0.2%浓度下表现出抑制作用,其中0.1%浓度时为显著抑制,在0.5%、1.0%和2.0%浓度下表现为促进作用,

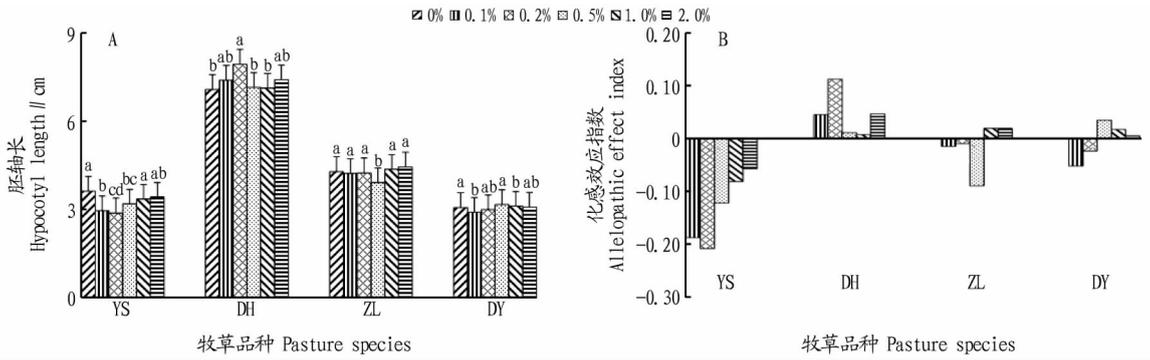
0.5%时为显著促进。

2.3 马尾松凋落叶水提液对受体植物化感作用的综合效应从化感作用的综合效应(表2)可以看出,羽扇豆在0.1%、0.2%和0.5%水提液浓度下为微弱的抑制作用,在1.0%、2.0%浓度下受到的马尾松化感作用表现出促进作用;多年生黑麦草在0.1%~2.0%这5种马尾松凋落叶提取液浓度下受到的化感作用均表现为抑制作用;杂交狼尾草在浓度0.1%、0.2%、0.5%和1.0%时的化感作用表现为抑制作用,在浓度2.0%时的化感作用表现为微弱的促进作用;大翼豆在0.1%~2.0%这5种马尾松凋落叶提取液浓度时受到的化感作用均表现为抑制作用。

表2 马尾松凋落叶水提液对受体植物化感作用的综合效应

Tab. 2 Synthesis allelopathy effect of aqueous extract from *Pinus massoniana* Lamb. litter leaf on receptor pasture species

牧草品种 Pasture species	水提液浓度 Concentration of aqueous extract//%				
	0.1	0.2	0.5	1.0	2.0
YS	0.85	2.04	0.07	-2.23	-2.43
DH	2.43	2.94	10.18	8.84	6.61
ZL	3.13	5.20	7.51	0.83	-0.14
DY	7.50	8.73	4.85	8.73	7.64

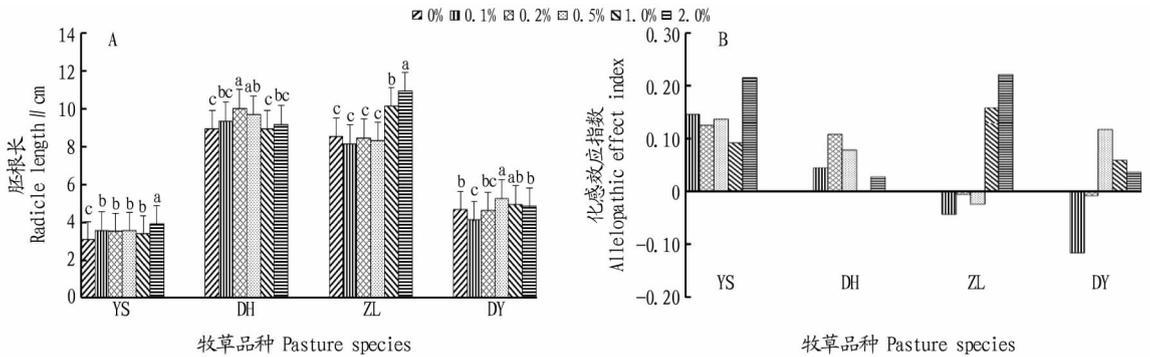


注:小写字母不同表示同个品种不同处理间差异显著($P<0.05$)

Note: Different small letters mean significant differences among all treatments of the same variety ($P<0.05$)

图 3 马尾松凋落叶水提液对受体植物胚轴长(A)和其化感效应指数(B)的影响

Fig. 3 Influence of aqueous extract from *Pinus massoniana* Lamb. litter leaf on hypocotyl length (A) and allelopathic effect index (B) of receptor pasture species



注:小写字母不同表示同个品种不同处理间差异显著($P<0.05$)

Note: Different small letters mean significant differences among all treatments of the same variety ($P<0.05$)

图 4 马尾松凋落叶水提液对受体植物胚根长(A)和其化感效应指数(B)的影响

Fig. 4 Influence of aqueous extract from *Pinus massoniana* Lamb. litter leaf on radicle length (A) and allelopathic effect index (B) of receptor pasture species

3 讨论

林草复合种植模式可以充分利用林内资源,提高林下植被覆盖度,因而是人工林种植模式中最能兼顾生态效益、经济效益和社会效益的重要经营管理模式之一^[25]。开发和利用我国南方草地资源,合理配置物种对林草复合种植模式的建立具有决定性影响^[20]。该研究中,马尾松凋落叶水提液对受体植物生长的影响与其浓度密切相关,不同受体植物对马尾松凋落叶化感物质的敏感性不同。

在种子萌发阶段,马尾松凋落叶水提液对受体植物种子萌发具有一定的抑制作用,并且对受体植物发芽速率的抑制作用大于对最终发芽率的影响,印证了发芽速率作为衡量化感作用的指标比最终发芽率更敏感^[26]。随着凋落叶水提液浓度提高,牧草种子的发芽率显著降低,这说明较高浓度水提液的化感作用显著提高了种子的死亡率,从发芽阶段就减少了马尾松林下出土的牧草苗数,降低了牧草在群落中的多度。而凋落叶水提液浓度相对较低时,对种子发芽的化感作用主要表现在抑制发芽速率,发芽时间延长,出苗延后,影响牧草对地上和地下资源的竞争能力^[27]。大翼豆在 0.1% 的水提液中最终发芽率显著增高,而在高浓度的水提液中均受到抑制也说明了化感作用的复杂性,其机制有待于进一步

研究。

化感物质对胚根生长的抑制导致植株根系变小,吸水、吸肥能力降低,对胚轴生长的抑制导致植株矮小、瘦弱,影响其对光的竞争,这些均会直接影响未来植株的生长发育及其在群落中的地位和作用^[27]。马尾松凋落叶水提液对这 4 种牧草胚轴和胚根生长的影响并不一致,这可能是因为马尾松凋落叶水提液中的化感物质由多种化合物组成,其中既有生长抑制物质也有生长促进物质。马尾松凋落叶不同浓度的水提液对羽扇豆的胚轴生长表现出不同程度的抑制作用,且随水提液浓度上升抑制作用减弱,而对胚根生长均有显著的促进作用;对于多年生黑麦草,不同浓度水提液均促进其胚轴和胚根的生长;马尾松凋落叶不同浓度的水提液并非完全抑制这些牧草种子发芽和幼苗生长,而且在一定浓度下还表现出促进作用,这与皇甫超河等^[23]对黄顶菊化感作用的研究结果类似。而水提液对杂交狼尾草和大翼豆胚轴和胚根生长的化感作用基本表现为低抑高促,这说明马尾松凋落叶水提液的化感物质与植物生长调节剂的作用有相似之处^[28]。不同受体植物的化感敏感程度不同,说明不同植物对马尾松凋落叶水提液化感作用的抗性不同,这可能与受体植物的自身生物学特性有关。

从该研究结果来看,马尾松凋落叶化感物质非常复杂,可能同时存在促进和抑制2种作用的物质。在特定浓度条件或其他环境因素条件下,可以使化感作用表现出促进或抑制作用,同时不同的化感物质可能存在一定的选择性和针对性。因此,对于马尾松凋落叶水提液化感作用机制需要通过化感效应活性物质的提取及鉴别工作加以揭示。

4 结论

根据马尾松凋落叶水提液化感作用对各牧草最终发芽率、发芽速率、株高和根长的影响,以及综合效应指数分析,不同牧草在马尾松树下生长的适应性表现为:豆科牧草为羽扇豆>大豆>禾本科牧草为杂交狼尾草>多年生黑麦草。就4种牧草总体而言则为羽扇豆>杂交狼尾草>多年黑麦草>大豆。而且羽扇豆在不同浓度下表现出的综合化感效应指数数值最小,都在0附近,说明马尾松凋落叶的化感作用对羽扇豆的影响最小,所以这4种牧草中,最适宜在马尾松树下生长的牧草品种为豆科的羽扇豆。

参考文献

- [1] 曹光球,林思祖,王爱萍,等. 马尾松根化感物质的生物活性评价与物质鉴定[J]. 应用与环境生物学报,2005,11(6):686-689.
- [2] 曾冀,赵志刚,郭文福,等. 马尾松化感作用的生物测定[J]. 林业实用技术,2009(11):33-34.
- [3] 赵其国. 我国南方当前水土流失与生态安全中值得重视的问题[J]. 水土保持通报,2006,26(2):1-8.
- [4] 何圣嘉,谢锦升,杨智杰,等. 南方红壤丘陵区马尾松林下水土流失现状、成因及防治[J]. 中国水土保持科学,2011,9(6):65-70.
- [5] 徐义保,查轩,黄少燕. 南方红壤丘陵区马尾松林下水土流失研究进展[J]. 亚热带水土保持,2011,23(4):40-43.
- [6] 陈静,张虹鸥,吴旗韬. 广东山区林下经济发展初探[J]. 林业经济问题,2014,34(3):268-274,280.
- [7] 顾晓君,曹黎明,叶正文,等. 林下经济模式研究及其产业发展对策[J]. 上海农业学报,2008,24(3):21-24.
- [8] 彭少麟,邵华. 化感作用的研究意义及发展前景[J]. 应用生态学报,2001,12(5):780-786.
- [9] 王树起,韩晓增,乔云发. 根系分泌物的化感作用及其对土壤微生物的

- [10] 黄登银. 不同密度马尾松林下植被和土壤性质[J]. 防护林科技,2009(2):21-23.
- [11] 康冰,刘世荣,史作民,等. 南亚热带人工马尾松林下植物组成特征及主要木本种群生态位研究[J]. 应用生态学报,2005,16(9):1786-1790.
- [12] 康冰,刘世荣,蔡道雄,等. 马尾松人工林林分密度对林下植被及土壤性质的影响[J]. 应用生态学报,2009,20(10):2323-2331.
- [13] 徐义保,查轩,黄少燕. 南方红壤丘陵区马尾松林下水土流失研究进展[J]. 亚热带水土保持,2011,23(4):40-43.
- [14] 郭晓敏,牛德奎,刘苑秋,等. 江西省不同类型退化荒山生态系统植被恢复与重建措施[J]. 生态学报,2002,22(6):878-884.
- [15] 郭志民. 退化马尾松群落恢复与重建途径的研究[J]. 林业科技,2000,25(6):1-3.
- [16] 刘满强,胡锋,何园球,等. 退化红壤不同植被恢复下土壤微生物量季节动态及其指示意义[J]. 土壤学报,2003,40(6):937-944.
- [17] 王爱萍,林思祖,杜玲,等. 马尾松根分泌物对杉木种子的化感效应[J]. 福建林学院学报,2003,23(3):232-235.
- [18] 段剑. 马尾松根系分泌物的化学组成及其化感作用研究[D]. 南昌:江西农业大学,2014.
- [19] 张腾. 马尾松和杉木对植物的化感作用研究[D]. 杭州:浙江大学,2016.
- [20] 张丹丹,沈浩,杨季云,等. 芒果叶片水提液对我国南方6种牧草的化感作用[J]. 南方农业学报,2015,46(1):160-165.
- [21] 曾任森. 化感作用研究中的生物测定方法综述[J]. 应用生态学报,1999,10(1):123-126.
- [22] BRUCE WILLIAMSON G, RICHARDSON D. Bioassays for allelopathy: Measuring treatment responses with independent controls[J]. Journal of chemical ecology,1988,14(1):181-187.
- [23] 皇甫超河,陈冬青,王楠楠,等. 外来入侵植物黄顶菊与四种牧草间化感交互作用[J]. 草业学报,2010,19(4):22-32.
- [24] LIN W X, KIM K U, SHIN D H. Rice allelopathic potential and its modes of action on Barnyardgrass (*Echinochloa crus-galli*) [J]. Allelopathy journal,2000,7(2):215-224.
- [25] 钟宇,张健,杨万勤,等. 不同土壤水分条件下生长的巨桉对紫花苜蓿的化感作用[J]. 草业学报,2009,18(4):81-86.
- [26] 韩丽梅,王树起,鞠会艳,等. 大豆根茬腐解产物的鉴定及化感作用的初步研究[J]. 生态学报,2000,20(5):771-778.
- [27] 郑丽,冯玉龙. 紫茎泽兰叶片化感作用对10种草本植物种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 生态学报,2005,25(10):2782-2787.
- [28] 方芳,郭水良,黄华,等. 开花期加拿大一枝黄花水浸提液对3种作物种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 植物研究,2007,27(5):569-573.

(上接第95页)

- [11] LANDA CONTRERAS R, TREJO TÉLLEZ L I, GÓMEZ MERINO F C, et al. Concentración de cationes en frijol común en respuesta a aluminio[J]. Terra latinoamericana,2010,28(2):119-127.
- [12] 李佩琴. 林下植被去除和凋落物添加对杉木林土壤关键生态过程的影响[D]. 南昌:江西农业大学,2017.
- [13] 陈荣府,沈仁芳. 水稻(*Oryza sativa* L.)铝毒害与耐性机制及铝毒害的缓解作用[J]. 土壤,2004,36(5):481-491.
- [14] 张蜀秋. 植物生理学实验技术教程[M]. 北京:科学出版社,2011.
- [15] 蔡永萍. 植物生理学实验指导[M]. 北京:中国农业大学出版社,2014.
- [16] JIANG M Y, JING J H. Generation of hydroxyl radical in plants and its relation to the initiation of lipid peroxidation[J]. Plant physiology communications,1993,29(4):300-305.
- [17] SONG Y J, DIAO Q N, QI H Y. Putrescine enhances chilling tolerance of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) through modulating antioxidant systems[J]. Acta physiologiae plantarum,2014,36(11):3013-3027.
- [18] GÜÇLÜ K, KİBRİSLİ OĞLU G, ÖZYÜREK M, et al. Development of a fluorescent probe for measurement of peroxy radical scavenging activity in biological samples[J]. J Agric Food Chem,2014,62(8):1839-1845.

- [19] 陈志刚,张红蕊,周晓红,等. 铝胁迫对黑麦草根抗氧化酶活性和丙二醛含量的诱导特征研究[J]. 土壤通报,2012(2):391-395.
- [20] 曾韶西,王柔. 低温光照下与黄瓜子叶叶绿素降低有关的酶促反应[J]. 植物生理学报,1991(2):177-182.
- [21] LECKIE D G, GOUGEON F A. Stand delineation and composition estimation using semi-automated individual tree crown analysis[J]. Remote sensing of environment,2003,85(3):355-369.
- [22] 魏颖颖,王凤龙,钱玉梅,等. 烟草和黄瓜花叶病毒互作中过氧化氢酶的动态变化[J]. 植物病理学报,2005,35(4):359-361.
- [23] 房玉林,宋士任,张艳芳,等. 不同品种葡萄抗霜霉病特性与叶片 POD、PPO 活性关系的研究[J]. 西北植物学报,2007,27(2):392-395.
- [24] ZHAO F Y, GUO S L, ZHANG H, et al. Expression of yeast SOD2 in transgenic rice results in increased salt tolerance[J]. Plant science,2006,170(2):216-224.
- [25] MIRZAEI M, MOIENI A, GHANATI F. Effects of drought stress on the lipid peroxidation and antioxidant enzyme activities in two canola (*Brassica napus* L.) cultivars[J]. Journal of agricultural science & technology,2013,15(3):593-602.
- [26] 李西,王丽华,刘尉,等. 三种暖季型草坪草对二氧化硫抗性的比较[J]. 生态学报,2014(5):1189-1197.