

刺槐林下枯落物浸提液对自身幼苗生长的化感效应

荆 蓉¹, 彭祚登^{1*}, 李 云², 王少明³

(1. 北京林业大学 林学院森林培育与保护教育部重点实验室, 北京 100083; 2. 北京林业大学 生物与技术学院, 北京 100083;
3. 河南省洛阳市国有洛宁县全宝山林场, 河南 洛宁 471716)

摘 要:探究刺槐不同林分的枯落物浸提液对刺槐自身幼苗生长的影响,旨在阐明刺槐林下实生苗更新困难问题。以刺槐幼苗为研究对象,采用盆栽与生物检测相结合的方法,分析刺槐一代幼龄林、一代中龄林、一代成熟林、二代幼龄林、二代中龄林、二代成熟林、三代幼龄林、三代中龄林、三代成熟林下枯落物浸提液对刺槐幼苗生长指标、叶绿素含量以及根系保护性酶活性的影响。研究结果显示,大部分刺槐林分下的枯落物浸提液对幼苗生长指标和根系保护性酶具有抑制作用,对叶绿素含量具有促进作用。在三代林中,随着刺槐年龄的增加枯落物浸提液对幼苗根系保护性酶的抑制作用呈增加趋势,化感综合效应指数从-0.049下降至-0.182;在中龄林和成熟林中,随着刺槐经营世代的增加其对幼苗生长指标以及根系保护性酶的抑制作用呈上升趋势。在一代和二代林中,随着刺槐年龄的增加枯落物浸提液对幼苗生长指标以及根系保护性酶的抑制作用呈下降趋势,幼苗生长化感综合效应指数的变化范围-0.095~0.067,根系保护性酶化感综合效应指数的变化范围-0.165~0.021。

关键词:刺槐;枯落物;幼苗生长;化感作用

中图分类号:S792.26

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2023)04-0027-07

Allelopathic Effects of the Extracts From Understory Litter of *Robinia pseudoacacia* on the Growth of *Robinia* Seedlings

JING Rong¹, PENG Zuo-deng^{1*}, LI Yun², WANG Shao-ming³

(1. The Key Laboratory for Silviculture and Conservation of Ministry of Education, School of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. School of Biological Sciences and Biotechnology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
3. Quanbaoshan State-Owned Forest Farm of Luoning County, Luoning 471716, Henan, China)

Abstract: The objective of this study were to explore the allelopathic effects of the extracts of the litters collected from different *Robinia pseudoacacia* stands on the growth of *Robinia* seedlings to clarify the difficulty of seedling regeneration under the *R. pseudoacacia* forest. Taking the seedlings of *R. pseudoacacia* as the research objects, the pot experiment was carried out to analyze the effects of litter extracts on the growth index, chlorophyll and root protective enzyme activity of the seedlings under the first generation young forest, the first generation middle-aged forest, the first generation mature forest, the second generation young forest, the second generation middle-aged forest, the second generation mature forest, the third generation young forest, the third generation middle-aged forest and the third generation mature forest. Under most forest types, litter extracts had inhibitory effects on seedling growth indexes and root protective enzymes, and promoted chlorophyll content. In the third generation forest, with the increase of age, the inhibitory effect of litter extracts on protective enzyme of seedling root showed an increasing trend, synthetic effect of allelopathy (SE) decreased from -0.049 to -0.182. In the middle-aged forest and ma-

收稿日期:2022-06-10 修回日期:2022-09-07

基金项目:“十三五”国家重点研发计划(2017YF0600503)。

第一作者:荆 蓉。研究方向:森林培育。E-mail:jingrong0221@163.com

* 通信作者:彭祚登,教授。研究方向:森林培育,城市林业。E-mail:zuodeng@sina.com

ture forest, the inhibitory effect to the seedling growth indices and protective enzymes of seedling roots increased with the increase of management generations, the variation range of SE of seedling morphology was -0.095 to 0.067 , and the variation range of SE of root protective enzymes was -0.165 to 0.021 .

Key words: *Robinia pseudoacacia*; litter; seedling growth; allelopathy

刺槐(*Robinia pseudoacacia*)系豆科刺槐属落叶乔木,其具有适应性强、易繁殖、生长快、固氮等特性,是我国广泛栽培的阔叶乔木树种之一。伐后萌蘖更新是生产中刺槐的主要更新方式^[1],利用刺槐具有根系发达、萌蘖能力强等特性,快速更新成为林分。但随着皆伐后萌蘖再皆伐再萌蘖的连作,在二代、三代刺槐萌生的人工林中出现生产力下降、生长迟缓以及树干弯曲等连栽障碍^[2],影响了刺槐人工林的综合效益。在近自然条件下,刺槐实生苗更新困难,种子萌发率低以及幼苗生长存活率较低^[3]。刺槐林天然掉落的种子主要分布在枯落物层,枯落物层会加速种子损失率^[4],枯落物分解过程中产生的次生代谢产物^[5],对种子萌发和幼苗生长具有抑制作用,枯落物的化感作用是影响林木天然更新和幼苗生长的重要因子^[6-7]。

何斐等^[8]研究表明刺槐凋落叶浸提液对绿豆具有较强的抑制作用,对油菜具有较弱的抑制作用,对甜瓜具有较弱的促进作用。何佩云等^[9-10]研究表明刺槐枯落物的浸提液对马尾松光合色素含量表现为促进作用,对质膜相对透性的影响随着浸提液浓度的升高,由促进作用转变为抑制作用,对马尾松苗木的净光合速率和蒸腾速率表现为一定的抑制作用,对马尾松幼苗的地径、苗高、主根长、地上部和地下部分鲜重均表现为促进效应。王辉^[11]研究表明刺槐枯落物的浸提液对刺槐种子萌发呈低浓度促进高浓度抑制的趋势。刘冬杰等^[12]研究表明在黄土高原地区刺槐枯落物叶浸提液对刺槐自身种子萌发和幼苗生长具有抑制作用。但针对刺槐在世代经营过程中,其枯落物对自身幼苗生长的化感作用鲜有报道。本研究主要探究不同经营世代以及不同林龄刺槐人工林不同浓度的枯落物浸提液对幼苗生长的影响,以期揭示连作刺槐林下实生苗更新困难的机制,为刺槐人工林的高效培育与可持续经营提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验林位于河南省洛阳市洛宁县马店镇国有吕村林场,地处豫西山区,洛河中游,地理位置 $34^{\circ}05' - 34^{\circ}37' \text{N}$, $111^{\circ}07' - 111^{\circ}49' \text{E}$,海拔 $600 \sim 820 \text{ m}$ 。属我国典型的暖温带大陆性季风气候,春

季干旱多风,夏季炎热多雨,秋季凉爽,冬季寒冷干燥,四季分明,雨热同期。年平均气温为 13.9°C ,最高气温达 42°C ,最低气温达 -21°C ,年平均降雨量 570 mm ,年平均空气相对湿度 69% ,年平均无霜期为 212 d ,日照达 $2\,006 \text{ h}$ 。土壤类型主要为褐土,厚度达 $60 \sim 100 \text{ cm}$ 。

1.2 样地设置以及试验材料

选取刺槐一代幼龄林(F1)、一代中龄林(F2)、一代成熟林(F3)、二代幼龄林(F4)、二代中龄林(F5)、二代成熟林(F6)、三代幼龄林(F7)、三代中龄林(F8)、三代成熟林(F9)设置样地,样地面积为 $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$,每种林分设置 3 个重复,共计 27 块样地。林下主要植被包括茜草(*Rubia cordifolia*)、铁苋菜(*Acalypha australis*)、堇菜(*Viola verecunda*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、益母草(*Leonurus artemisia*)、求米草(*Oplismenus undulatifolius*)等。

2020 年秋季末期,在刺槐人工林的样地中进行取样,在每块样地随机设立 3 个 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 小样方收集林下枯落物,去除杂质,自然风干。

1.3 浸提液制备

枯落物浸提液浓度设置,需考虑枯落物与降雨量比例的问题^[13],参考晋梦然等^[14]的方法。根据调查刺槐人工林枯落物的现存量约为 $80 \sim 220 \text{ g/m}^2$,该地区年平均降雨量 570 mm ,换算得枯落物浸提液质量浓度大约为 $1:2.5 \sim 1:10$ 。将自然风干的枯落物按 $1:2.5$ 比例加入适量蒸馏水, 180 rpm 回旋式振荡 1 h ,使用滤纸进行过滤,得原液。考虑野外在非雨季,凋落物处于干燥未被浸提的状态^[14],将原液稀释 2、4、8、16 倍,得 0.4 g/mL (C1)、 0.2 g/mL (C2)、 0.1 g/mL (C3)、 0.05 g/mL (C4)、 0.025 g/mL (C5)的浸提液,将浸提液放入 4°C 冰箱保存备用。

1.4 幼苗生长试验

2021 年春季盆栽实验在北京林业大学三顷园苗圃的塑料大棚中进行,该大棚通风透气,遮挡雨水。采用塑料花盆作为容器,每个花盆中加入等量基质土壤,浇透水。除去刺槐种子中干瘪空粒和杂质,将刺槐种子用 0.5% 高锰酸钾溶液浸泡 2 h 消毒后,蒸馏水冲洗干净,将其浸泡 $75 \sim 80^{\circ}\text{C}$ 的热水至自然冷却浸泡 24 h ,后对种子进行层积催芽,待胚根突破种皮 $1 \sim 2 \text{ mm}$,进行播种。每盆均匀播种 20

粒种子,初期浇灌自来水,待苗木生长1个月后,每盆中保留3株,使用精度为0.01 cm的游标卡尺测量苗高、地径,之后开始用浸提液处理,对照组用蒸馏水进行浇灌,每隔3 d浇灌不同浓度的50 mL枯落物浸提液和蒸馏水,每个处理重复3次,共46个处理,总计138个盆栽。浸提液处理3个月后结束盆栽试验,使用游标卡尺测量幼苗苗高、地径以及主根长。

采用丙酮乙醇浸提法测定叶片叶绿素含量,使用试剂盒测定超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)活性,每个处理重复3次。

1.5 数据处理

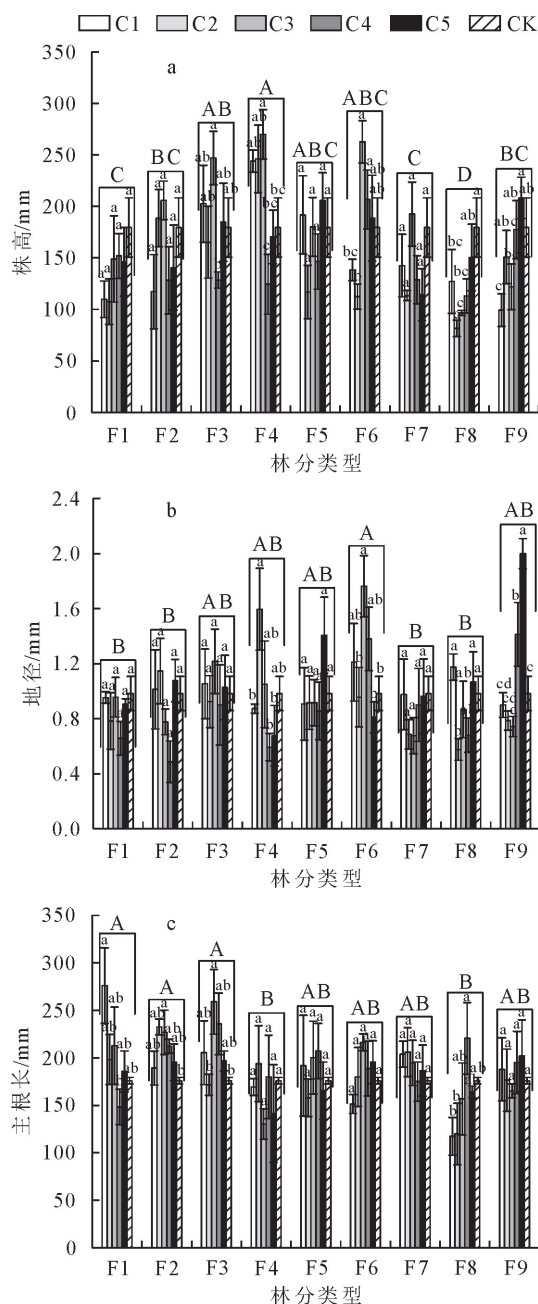
化感综合效应指数(SE)反映化感效应的强弱,指同一处理下对同一受体各测试项目化感效应指数的算术平均值。化感效应指数(RI), $RI=1-CK/T$ ($T \geq CK$), $RI=T/CK-1$ ($T < CK$) (针对其他指标); $RI=CK/T-1$ ($T \geq CK$), $RI=1-T/CK$ ($T < CK$) (针对叶绿素a/b),CK为对照值,T为处理值。当 $RI > 0$ 时,表示促进作用;当 $RI < 0$ 时,表示抑制作用。RI绝对值越大,化感效应强度也越大^[15]。

用Excel2019对数据基本汇总,用SPSS23.0软件进行数据分析,采用方差分析、多重比较分析不同处理之间的差异,数值为“平均值±标准误”,显著性水平定为 $\alpha=0.05$ 。用Origin2017软件作图。

2 结果与分析

2.1 不同林分及不同质量浓度枯落物浸提液对自身幼苗苗高、地径、主根长的影响

由图1可以看出,不同刺槐林分下的枯落物浸提液对幼苗苗高、地径、主根长的影响差异显著,其中三代中龄林(F8)枯落物浸提液处理的幼苗苗高、地径以及主根长达到最低值。对于幼苗苗高(图1a),在一代成熟林(F3)、二代幼龄林(F4)、二代成熟林(F6)、三代中龄林(F8)和三代成熟林(F9)中,不同浓度处理间存在显著性差异,总体呈现中质量浓度处理促进其苗高生长。对于幼苗地径(图1b),二代林中幼龄林(F5)和成熟林(F6)分别C2和C3浓度处理地径值最高,较CK分别增加了62.4%和79.3%,三代林的中龄林(F8)和成熟林(F9)中分别C2处理其值最低和C5处理其值最高,较CK分别显著降低了41.4%和增加了103.4%。对于幼苗主根长(图1c),在一代幼龄林(F1)、中龄林(F2)和成熟林(F3)中,分别在C1、C3、C3质量浓度处理其主根长达最大值,较CK分别增加了56.9%、29.0%、47.2%。在三代中龄林(F8)中,C4处理的幼苗主根长较C1、C2处理分别显著增加了88.0%和84.1%。



不同小写字母表示同一林分下不同质量浓度间差异显著 ($P < 0.05$);不同大写字母表示不同林分处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

图1 刺槐枯落物浸提液对自身幼苗生长指标的影响

Fig. 1 Allelopathic effects of *R. pseudoacacia* litter extract on the growth index of its own seedlings

2.2 不同林分及不同质量浓度枯落物浸提液对自身幼苗叶绿素含量的影响

由图2可以看出,不同刺槐林分枯落物浸提液处理的幼苗叶绿素a含量、叶绿素b含量、叶绿素总量、叶绿素a/b差异显著,其中叶绿素a含量、叶绿素b含量、叶绿素总量3个指标在一代幼龄林(F1)处理时其值较低,在二代幼龄林(F4)、二代中龄林(F5)、三代幼龄林(F7)处理时其值较高,而叶绿素a/b在一代幼龄林(F1)处理时其值较高,在二代幼龄林(F4)、二代

中龄林(F5)、三代成熟林(F9)枯落物浸提液处理时其比值较低。在一代幼龄林(F1)、中龄林(F2)和成熟林(F3)中,高质量浓度浸提液处理的叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量、叶绿素总量值较低,而叶绿素 a/b 值较高。在二代幼龄林(F4)、中龄林(F5)和成熟林(F6)

中,中质量浓度处理的叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量、叶绿素总量值较高,而叶绿素 a/b 值较低。在三代幼龄林(F7)、中龄林(F8)和成熟林(F9)中,低质量浓度浸提液处理的叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量、叶绿素总量值较高,而叶绿素 a/b 值较低。

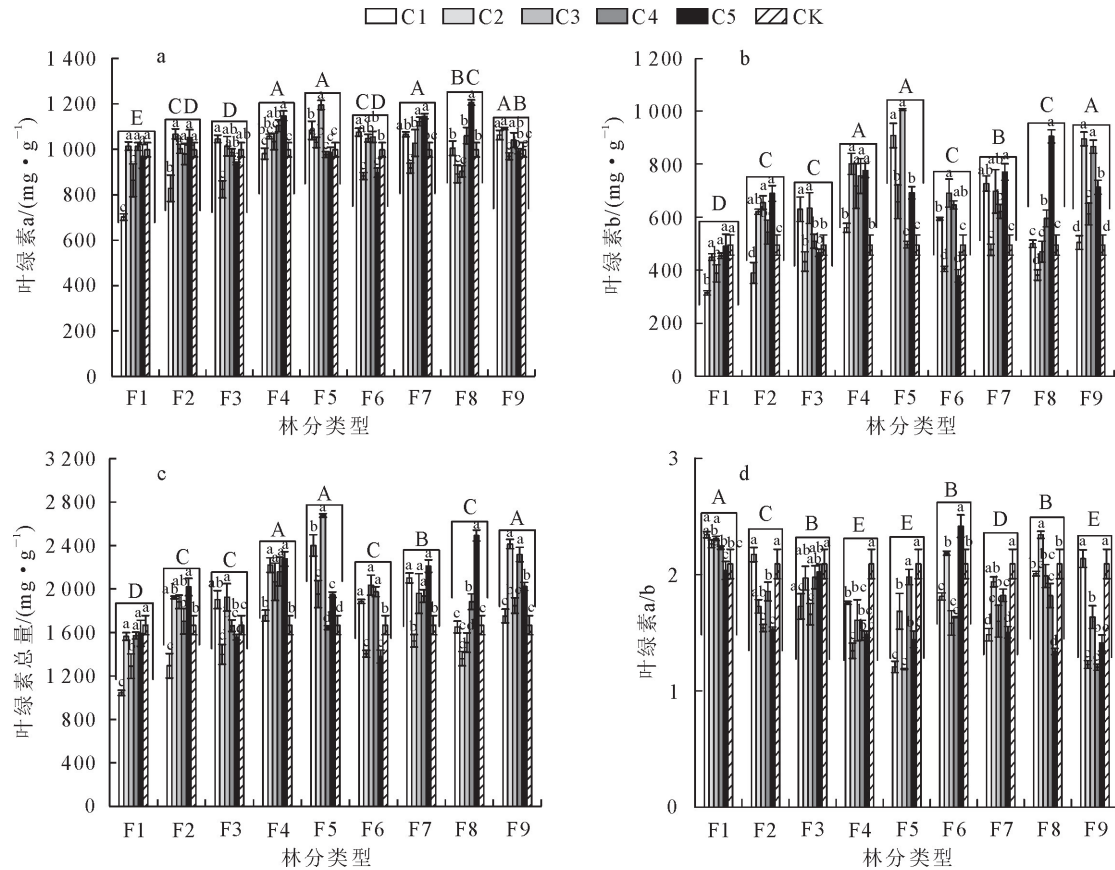


图2 刺槐枯落物浸提液对自身幼苗叶绿素含量的影响

Fig. 2 Allelopathic effects of *R. pseudoacacia* litter extract on the chlorophyll content of its own seedlings

2.3 不同林分及不同浓度枯落物浸提液对自身幼苗根系保护性酶活性的影响

由图3可以看出,不同刺槐林分枯落物浸提液处理的幼苗根系SOD、POD、CAT活性之间差异显著,其中三代成熟林(F9)处理的SOD和CAT活性达最低值,而POD活性在三代成熟林(F9)处理时达最高值。对于SOD活性(图3a),一代幼龄林(F1)、中龄林(F2)和成熟林(F3)中,分别C2、C4、C4处理的SOD活性达最大值,分别较CK增加了18.5%、9.1%、29.7%,二代幼龄林(F4)、中龄林(F5)和成熟林(F6)中C1处理的SOD活性值均较低,分别较CK显著降低了59.1%、50.4%、37.6%,三代幼龄林(F7)、中龄林(F8)和成熟林(F9)下高质量浓度或中质量浓度处理的其酶活性较低。对于POD活性(图3b),在一代幼龄林(F1)、一代中龄林(F2)、二代幼龄林(F4)和三代中龄林(F8)中,不同质量浓度处理之间POD活性存在显著性差异,高质量浓度或中质量浓度处理的其POD

酶活性较低。对于CAT酶活性(图3c),在一代成熟林(F3)、二代中龄林(F5)和三代幼龄林(F7)中,不同质量浓度处理之间CAT活性存在显著性差异,分别在C3、C1、C3和C4处理的CAT活性较CK处理呈显著增加。

2.4 不同刺槐林分枯落物浸提液对幼苗生长的化感效应综合指数

不同刺槐林分枯落物浸提液对幼苗生长指标、叶绿素含量、根系保护性酶的化感效应综合指数,见图4。不同刺槐林分枯落物浸提液对自身生长指标的综合影响,一代林和二代林中,随着林龄的增加,枯落物浸提液对幼苗生长的抑制作用逐渐转为促进作用;三代林中,中龄林枯落物浸提液对幼苗生长指标的抑制作用较强,SE达-0.20;在中龄林和成熟林下,枯落物浸提液对幼苗生长指标的抑制作用随着刺槐经营世代的增加而增加。大部分刺槐林分下的枯落物浸提液促进幼苗叶绿素含量,在一代林中,随着刺槐林龄的增加,枯落物浸提液对叶绿素含量

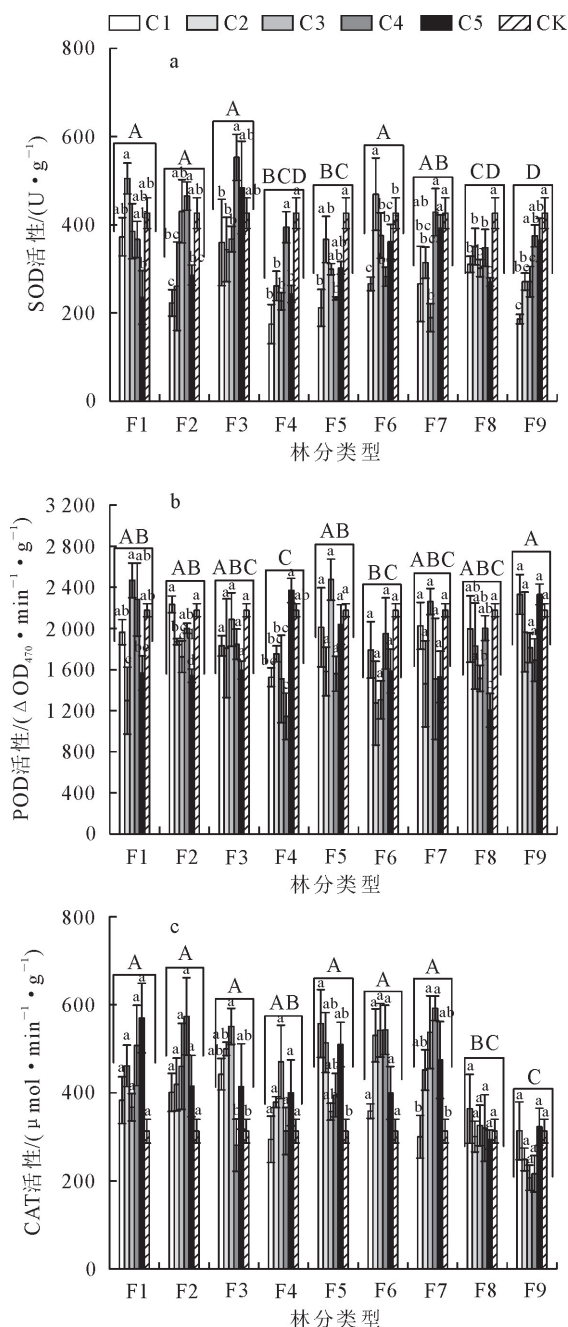
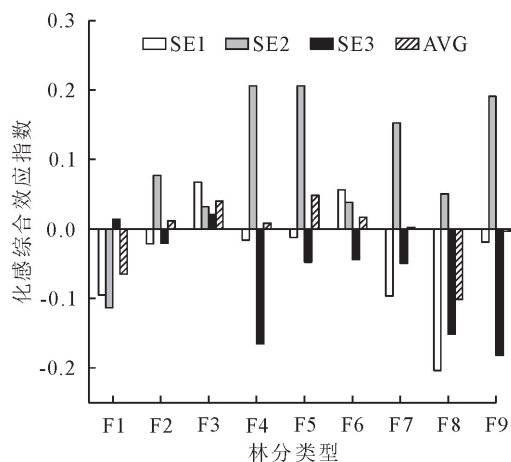


图3 刺槐枯落物浸提液对自身幼苗根系保护性酶活性的影响

Fig. 3 Allelopathic effects of *R. pseudoacacia* litter extract on the activity of protective enzymes in the root system of its own seedlings

的由抑制作用转为促进作用;二代林中,随着刺槐林龄的增加,枯落物浸提液对叶绿素含量的促进作用呈下降趋势;三代林中,中龄林枯落物浸提液对叶绿素含量的促进作用最小,SE为0.05。大部分刺槐林分下枯落物浸提液对幼苗根系酶活性具有抑制作用。在一代林中,中龄林的枯落物浸提液对根系酶活性具有抑制作用,SE为一0.02,幼龄林和成熟林下的枯落物浸提液对自身根系酶活性具有促进作用,SE分别为0.01和0.02;在二代林中,随着刺槐

生长年限的增加,枯落物浸提液对自身根系酶活性的抑制作用呈下降趋势;在三代林中,随着刺槐林龄的增加,枯落物浸提液对自身根系酶活性的抑制作用呈上升趋势;在中龄林和成熟林下,随着刺槐经营世代的增加,其对幼苗根系保护性酶的抑制作用呈上升趋势。



SE1 代表幼苗生长指标的化感综合效应指数;SE2 代表幼苗叶绿素指标的化感综合效应指数;SE3 代表幼苗根系酶活性指标的化感综合效应指数;AVG 代表幼苗生长指标、叶绿素指标、根系酶活性指标化感综合效应指数的平均数。

图4 不同林分类型刺槐枯落物浸提液对幼苗生长指标、叶绿素、保护性酶的化感效应指数

Fig. 4 Allelopathic effect index of different stand types of *R. pseudoacacia* litter extract on seedling growth indexes, chlorophyll and protective enzymes

3 结论与讨论

刺槐枯落物浸提液对幼苗生长的抑制作用具有浓度效应,大部分在低质量浓度处理呈较弱的抑制作用,高质量浓度和中质量浓度呈较强的抑制作用,此结构与何裴等^[8]、刘东杰等^[12]研究结果一致,由于浸提液中含有化感物质,影响植株对水分的吸收,高浓度浸提液处理的植物水势较低,水分胁迫严重,影响幼苗生长^[16]。刺槐枯落物浸提液对刺槐幼苗株高、地径、主根长以及根系保护性酶活性呈抑制作用,对叶绿素含量呈促进作用。根系对于枯落物浸提液更加敏感,化感物质处理能够显著抑制根长^[17],尾巨桉叶片提取液对幼苗生长的抑制作用,也表现出胚根比胚轴对化感效应更敏感^[16],由于植物根系为植物和土壤之间的关键纽带,是吸收和运输水分与养分的主要器官,而地上部分的营养物质主要来源于根系的吸收,当根系受害程度达到一定时,水分和营养物质不能满足地上部分的需求,地上部分才表现出抑制作用^[18],因此浸提液对幼苗叶绿素含量的影响呈促进作用,何佩云等^[9]研究表明刺

槐枯落物浸提液对马尾松苗木的叶绿素含量的影响也呈促进作用。但一定质量浓度的刺槐枯落物浸提液会造成叶绿素含量的下降,从而导致光合效率下降抑制植物生长。王辉^[11]研究表明刺槐根际土浸提液随着质量浓度的增加,叶绿素含量呈明显下降趋势。化感物质容易影响豆科植物中的叶绿素镁卟啉合成过程^[7],因而化感物质对豆科植物叶绿素含量的影响较大。在一定范围之内,叶绿素含量的增加对光合速率具有促进作用,但当叶绿素总量达到一定程度时,叶绿素 a/b 的比值是影响光合速率的决定性因子,低的叶绿素 a/b 的值促使植物对可见光谱有效吸收^[19],提高光合速率。刺槐根际土浸提液会影响刺槐幼苗细胞的超氧化物歧化酶以及过氧化氢酶^[11],核桃凋落叶对油菜抗氧化酶活性产生影响^[20],黑杨凋落叶浸提液也会影响小白菜活性氧代谢^[21],本研究低质量浓度处理的根系保护性酶活性高于对照组,由于化感物质会导致植物体内氧化性损伤,当植物受到逆境胁迫时,体内会产生自由基对植物体内膜系统造成一定的伤害,植物会启动抗氧化保护酶系统,清除植物体内的自由基,避免植物生物膜结构和功能遭到一定破坏^[22],从而减轻对植物的损害,但随着浸提液质量浓度的增加,化感物质对根系的胁迫超出幼苗根系自身保护酶体系的保护范围,则表现出低于对照组的酶活性。总之,枯落物浸提液中包含营养物质和化感物质^[21],营养物质对自身幼苗生长具有一定的促进作用,一些化感物质对自身幼苗生长具有一定的抑制作用,当营养物质的促进作用大于化感物质的抑制作用,则浸提液表现促进植物生长,反之亦然,在化感临界值以下表现促进植物生长,高于其临界值则表现抑制作用^[23]。

同一植物在不同生长时期具有不同的化感效应^[24]。在三代林下,随着年龄的增加枯落物浸提液对幼苗根系保护性酶的抑制作用呈增加趋势;在中龄林和成熟林下,随着刺槐经营世代的增加,其对幼苗生长指标以及根系保护性酶的抑制作用呈上升趋势。随着杨树生长年限的增加,根系浸提液对莴苣种子萌发的抑制作用逐渐增强^[25]。化感作用与土壤养分具有一定的相关性,研究表明胜红蓟在营养元素缺乏的胁迫条件下表现出极强的化感抑制作用^[26]。当刺槐生长到一定世代和年龄时,土壤中营养元素消耗,但在三代林下各龄级林分密度相差不大,在龄级中随着经营世代的增加林分密度呈上升趋势,植物之间竞争加剧,释放大量的化感物质,其化感作用增强。但在一代和二代林下,随着刺槐年龄的增加枯落物浸提液对幼苗生长指标以及根系保护性酶的抑制作用呈下降趋势,朱美秋等^[27]研究表

明 5 年生臭椿根系水浸提液对受体植物的抑制作用大于 43 年生臭椿根系水浸提液。刺槐为速生树种,在幼龄林时期植物间的竞争较为激烈,尤其是萌生二代的幼龄林能够萌蘖出大量萌条,植物为适应其快速生长的需求,分泌化感物质抑制其自身的幼苗生长,随着生长年限的增加,个体生长发育趋于稳定,植物间竞争减缓,当植物进入成熟期后自身群体为能继续繁衍而分泌较少的化感物质^[27],从而化感抑制作用减缓。其次,在适宜的生长环境中或低密度林分中,植物之间生存竞争较小,将光合产物用于自身的生长发育,化学防御物质的投入减少^[28],产生的化感物质较少,化感作用的强度较弱^[16]。

综上所述,刺槐枯落物浸提液对自身幼苗生长指标以及根系生长具有一定的抑制作用,对幼苗叶绿素含量具有一定的促进作用,根系对于浸提液更加敏感。在刺槐生长到一定阶段时,枯落物浸提液对自身生长指标以及根系生长的抑制作用随着生长年限或经营世代的增加而增加。

参考文献:

- [1] 陈一颢,刘康,李文华. 皆伐萌孽更新是改造刺槐林的有效途径[J]. 水土保持通报,1995,15(6):64-68.
CHEN Y E, LIU K, LI W H. Clear-cutting and root-sprout regeneration is an efficient way for large-scale refoaming of locust forest[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1995, 15(6):64-68. (in Chinese)
- [2] 耿兵,王华田,王延平,等. 刺槐萌生林与实生林的生长比较[J]. 中国水土保持科学,2013,11(2):59-64.
GEN B, WANG H T, WANG Y P, et al. Comparative study of coppice and seeding forest of *Robinia pseudoacacia* L. [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2013, 11(2):59-64. (in Chinese)
- [3] 王希才. 刺槐林的天然更新[J]. 山西林业科技, 1995(1):30-34.
- [4] 康迪. 黄土高原人工刺槐林群落演化特征及稳定性综合评价[D]. 杨陵:西北农林科技大学,2017.
- [5] 李强,周道玮,陈笑莹. 地上枯落物的累积、分解及其在陆地生态系统中的作用[J]. 生态学报,2014,34(14):3807-3819.
LI Q, ZHOU D W, CHEN X Y. The accumulation, decomposition and ecological effects of above-ground litter in terrestrial ecosystem[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(14):3807-3819. (in Chinese)
- [6] KOCACE A, TERZI. Allelopathic effects of walnut leaf extracts and juglone on seed germination and seedling growth[J]. The Journal of Horticultural Science and Biotechnology, 2001, 76(4):436-440.
- [7] 孔垂华,胡飞,王朋. 植物化感(相生相克)作用[M]. 北京:高等教育出版社,2016.
- [8] 何斐,崔鸣,孙娅,等. 刺槐凋落叶腐解液对 3 种作物的化感效应[J]. 西北林学院学报,2021,36(2):116-122.
HE F, CUI M, SUN Y, et al. Allelopathic effect of decomposed

- liquid of *Robinia pseudoacacia* leaf litter on three crops[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2021, 36(2): 116-122. (in Chinese)
- [9] 何佩云,丁贵杰. 刺槐、木荷水浸液对马尾松幼苗生理活性的化感效应[J]. 种子, 2007, 26(10): 4-6.
HE P Y, DING G J. Effect of allelopathy of the aqueous extracts of *Robinia pseudoacacia* and *Schima confertiflora* on physiological activities of *Pinus massoniana* seedling[J]. Seed, 2007, 26(10): 4-6. (in Chinese)
- [10] 何佩云. 刺槐、木荷水浸液对马尾松幼苗生长的化感效应[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(2): 526-528.
HE P Y. Allelopathic effects of aqueous infusion of *Robinia pseudoacacia* and *Schima superba* on the growth of *Pinus massoniana* seedling[J]. Journal of Anhui Agri. Sci., 2008, 36(2): 526-528. (in Chinese)
- [11] 王辉. 刺槐自毒作用及与主要伴生树种化感作用研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2009.
- [12] 刘冬杰, 刘增文. 刺槐枯落物叶浸提液对种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 西北林学院学报, 2011, 26(3): 129-131.
LIU D J, LIU Z W. Effects of *Robinia pseudoacacia* litter extract on seed germination and seedling growth[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2011, 26(3): 129-131. (in Chinese)
- [13] INDERJIT, ERIK T N. Bioassays and field studies for allelopathy in terrestrial plants: progress and problems[J]. Crit. Rev. Plant Sci., 2003, 22(3-4): 221-238.
- [14] 晋梦然, 王哲, 李梦佳, 等. 格氏栲天然林凋落物浸提液对杉木种子萌发和胚根生长的影响[J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(4): 51-59.
JIN M R, WANG Z, LI M J, et al. Effects of litter extracts from *Castanopsis kawakamii* natural forest on seed germination and radicle growth of Chinese fir[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2020, 42(4): 51-59. (in Chinese)
- [15] BRUCE W, DONALD R. Bioassays for allelopathy: measuring treatment responses with independent controls[J]. Journal of Chemical Ecology, 1988, 14(1): 181-187.
- [16] 王小雪, 刘芸, 邵呈龙, 等. 5种经济植物对幼龄尾巨桉叶片提取液的化感敏感性[J]. 林业科学, 2011, 47(11): 188-193.
WANG X, LIU Y, SHAO C L, et al. Allelopathic sensitivity of five economic species to aqueous leaf extract of *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* with different ages[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2011, 47(11): 188-193. (in Chinese)
- [17] 鄢邵斌, 王朋. 化感物质对植物根系形态属性影响的 meta 分析[J]. 应用生态学报, 2020, 31(7): 2168-2174.
YAN S B, WANG P. Effects of allelochemicals on morphological traits of roots: a meta-analysis[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(7): 2168-2174. (in Chinese)
- [18] 宋亮, 潘开文, 王进闯, 等. 酚酸类物质对苜蓿种子萌发及抗氧化酶活性的影响[J]. 生态学报, 2006, 26(10): 3393-3403.
SONG L, PAN K W, WANG J C, et al. Effects of phenolic acids on seed germination and seedling antioxidant enzyme activity of alfalfa[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(10): 3393-3403. (in Chinese)
- [19] 孟军, 陈温福, 徐正进, 等. 水稻剑叶净光合速率与叶绿素含量的研究初报[J]. 沈阳农业大学学报, 2001, 32(4): 247-249.
MENG J, CHEN W F, XUN Z J, et al. Study on photosynthetic rate and chlorophyll content[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2001, 32(4): 247-249. (in Chinese)
- [20] 张如义, 熊朝勇, 王仕林, 等. 油菜生长过程对核桃凋落叶化感作用的响应[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(5): 126-133.
ZHANG R Y, XIONG C Y, WANG S L. Responses of physiological process of rape to the allelopathy of walnut leaf litters[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(5): 126-133. (in Chinese)
- [21] 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.
HE W, CHEN G, CHEN H, et al. Effects of decomposing leaf litter of *Populus deltoides* on the growth and physiology of *Brassica chinensis* [J]. Acta Ecologica, 2015, 35(7): 2067-2075. (in Chinese)
- [22] EINHELLING F A, RASMUSSEN J A. Effects of three phenolic acids on chlorophyll content and growth of soybean and grain sorghum seedlings[J]. Journal of Chemical Ecology, 1979, 5(5): 815-824.
- [23] CHOU S U, NELSON C J. Allelopathy in Compositae plants. A review[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2010, 30(2): 349-358.
- [24] LU F, ZHENG L, CHEN Y, et al. Soil microorganisms alleviate the allelopathic effect of *Eucalyptus grandis* × *E. urophylla* leachates on *Brassica chinensis*[J]. Journal of Forestry Research, 2017, 28(6): 1203-1207.
- [25] 万开元, 陈防, 陶勇, 等. 杨树对莴苣的化感作用[J]. 东北林业大学学报, 2009, 37(1): 21-23.
WANG K Y, CHEN F, TAO Y, et al. Allelopathy of *Populus* to *Lactuca sativa*[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2009, 37(1): 21-23. (in Chinese)
- [26] KONG C, HU F, XU X. Allelopathic potential and chemical constituents of volatiles from *Ageratum conyzoides* under stress[J]. Journal of Chemical Ecology, 2002, 28(6): 1173-1182.
- [27] 朱美秋, 刘春鹏, 邓明静, 等. 臭椿根系水浸提液的化感效应[J]. 森林与环境学报, 2015, 35(3): 284-288.
ZHU M Q, LIU C P, DENG M J, et al. Allelopathy of aqueous extracts obtained from roots of *Ailanthus altissima* [J]. Journal of Forest and Environment, 2015, 35(3): 284-288. (in Chinese)
- [28] 李金金, 张健, 张阿娟, 等. 不同密度巨桉人工林林下植物多样性及根际土壤化感物质[J]. 应用生态学报, 2020, 31(7): 2175-2184.
LI J J, ZHANG J, ZHANG A J, et al. Understory plant species diversity and allelochemicals in rhizosphere soils of *Eucalyptus grandis* plantations with different densities[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(7): 2175-2184. (in Chinese)