doi:10. 3969/j. issn. 1006-8023. 2024. 01. 006

3 种浸提液对 2 年生樟子松幼苗生理指标的影响

王浩宇[1],刘建功[2],袁泓昌[3],段文标[1*],朱帅威[1],牟森先[1]
(1. 东北林业大学 林学院, 哈尔滨 150040;2. 内蒙古电子信息职业技术学院,呼和浩特 010070;
3. 内蒙古国华园林绿化有限责任公司,内蒙古 锡林郭勒 026000)

摘　要:为探讨柠条枯枝、苔草枯叶和青杨枯叶是否存在抑制樟子松幼苗生长的化感物质,研究樟子松人工林内天然更新的障碍因子,采用盆栽试验,设置质量浓度为 1∶50、1∶250、1∶500、1∶1 000 浸提液处理,运用单因素方差分析、双因素方差分析和最小显著极差法,探究 3 种类型浸提液对樟子松 2 年生幼苗生理特性的影响。研究结果表明,1)质量浓度为 1∶50 时,柠条枯枝浸提液对幼苗净光合速率、叶绿素含量、丙二醛含量和过氧化氢酶活性表现为显著的抑制作用,分别较对照低 34. 52%、35. 58%、30. 50%、40. 28%;2)苔草枯叶浸提液对幼苗净光合速率、蒸腾速率、叶绿素含量和丙二醛含量表现为低质量浓度 1∶1 000 时促进而高质量浓度 1∶50 抑制的趋势,在质量浓度为 1∶1 000 时有显著的促进作用,分别较对照高出 37. 71%、49. 22%、18. 51%、6. 13%;3)青杨枯叶浸提液在质量浓度为 1∶50 时对净光合速率、丙二醛含量、过氧化氢酶活性和超氧化物歧化酶活性有显著的抑制性,分别低于对照 36. 88%、18. 24%、45. 10%、20. 48%。其中,柠条枯枝和青杨枯叶所有质量浓度浸提液对幼苗的可溶蛋白质有促进作用。4)质量浓度对 2 年生樟子松幼苗对净光合速率、蒸腾速率、叶绿素含量、丙二醛含量测定、过氧化氢酶活性和过氧化物酶活性的离差平方和均大于供体,其余反之。5)浸提液对樟子松幼苗生长阶段的影响由大到小排序为苔草、青杨、柠条。因此,在综合比较之下,可将苔草打碎作为肥料来促进 2 年生樟子松幼苗的生长。

关键词:樟子松;浸提液;幼苗生长;化感作用;生理指标
中图分类号:U414　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1006-8023(2024)01-0044-11

Effects of Three Extracts on Physiological Indexes of 2-year-old *Pinus sylvestris* var. *mongolica* Seedlings

WANG Haoyu[1], LIU Jiangong [2], YUAN Hongchang [3], DUAN Wenbiao [1*], ZHU Shuaiwei [1], MU Miaoxian[1]
(1. College of Forestry Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; 2. Inner Mongolia Electronic Information Vocational Technical College, Hohhot Inner Mongolia 010070, China; 3. Inner Mongolia Guohua Landscaping Co. LTD, Xilingol Inner Mongolia 026000, China)

Abstract: In order to investigate the presence of allelopathic substances that inhibit the growth of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* seedlings, and to study the obstacles to natural renewal in *P. sylvestris* var. *mongolica* plantations, the effects of three types of extract on seed germination and the growth of 2-year-old seedlings were investigated by using pot plant experiments with mass concentrations of 1∶50, 1∶250, 1∶500 and 1∶1 000 extracts, and univariate analysis of variance, two-way ANOVA and least significant range method were used to explore the effects of three types of extracts on seed germination and growth of 2-year-old seedlings. The results showed that: 1) In the pot experiment of 2-year old *P. sylvestris* var. *mongolica* seedlings, it was found that the extract of *Caragana korshinskii* Kom significantly inhibited the net photosynthetic rate, chlorophyll content, malondialdehyde content and catalase activity of seedlings when the concentration was 1∶50. They were 34. 52%, 35. 58%, 30. 50% and 40. 28% lower than the control. 2) When the concentration was 1∶50, the extract of dead leaves of *Carex* spp. showed a trend of promoting the net photosynthetic rate, transpiration rate, chlorophyll content and malondialdehyde content of seedlings at the low concentration of 1∶1 000 and inhibiting the high concentration of 1∶50, and had a significant promoting effect at the concentration of 1∶1 000. They were 37. 71%, 49. 22%, 18. 51% and 6. 13% higher than the control. 3) The net photosynthetic rate, malondialdehyde content, catalase activity and superoxide dismutase activity were significantly inhibited when the concentration was 1∶50, which were 36. 88%, 18. 24%, 45. 10% and 20. 48% lower than the control, respectively. Among them, all the extracts of *C. korshinskii* Kom and *Poplus* spp. could promote the soluble protein of seedlings. 4) The sum of squared dispersions of 2-year-old *P. sylvestris* var. *mongolica* seedlings for net photosynthetic rate, transpiration rate, chlorophyll content, determination of malondialdehyde content, catalase activity and peroxidase activity

收稿日期:2023-05-06
基金项目:省部级基金(2020CG0074)。
第一作者简介:王浩宇,硕士研究生。研究方向为水土保持与荒漠化防治。E-mail: why547657494@126. com
*通信作者:段文标,博士,教授,博士生导师。研究方向为水土保持与荒漠化防治、森林气象等。E-mail: dwbiao88@126. com
引文格式:王浩宇, 刘建功, 袁泓昌, 等. 3 种浸提液对 2 年生樟子松幼苗生理指标的影响[J]. 森林工程, 2024,40(1):44-54.
WANG H Y, LIU J G, YUAN H C , et al. Effects of three extracts on physiological indexes of 2-year-old *pinus sylvestris* var. *mongolica* seedlings[J]. Forest Engineering, 2024,40(1):44-54.

were greater than that of the donor, and vice versa. 5) The effect of extracts on the growth stage of *P. sylvestris* var. *mongolica* seedlings was ranked as *C.* spp. > *P.* spp. > *C. korshinskii* Kom. Therefore, we can break up the *C.* spp. as fertilizer to promote the growth of *P. sylvestris* var. *mongolica*.

Keywords: *Pinus sylvestris* var. *mongolica*; leaching solution; seedling growth; allelopathy; physiological indicators

0　引言

樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)是欧洲赤松的地理变种之一,又称为海拉尔松,主要分布在东北亚地区[1]。沙地樟子松在中国主要呈现为狭长地带,分布于呼伦贝尔沙地、海拉尔和红花尔基等东北地区,是阻挡风沙的一道天然屏障[2]。樟子松由于具有较强的耐寒、耐旱、耐贫瘠土壤和较速生等优良特性[3-4],因此,在我国干旱半干旱的北方地区,其已成为营造防风固沙林、农田、草场防护林、水土保持林和用材林的主要树种。随着樟子松人工林大面积的营造,其已经暴露出生长衰退、自然更新困难甚至无法完成自然更新过程等问题[5],这种现象受到众多学者的关注[6-7]。而从化感作用方面探讨柠条((*Caragana korshinskii* Kom))、苔草(*Carex*)、青杨(*Poplus*)所产生的化感物质对樟子松更新影响的研究相对较少,之所以选择该 3 种植物,是因为这 3 种植物在林地中为主要的优势植物,且樟子松人工林混有数量不等的散生柠条、苔草和青杨,可能是当时造林地中就有柠条、苔草和青杨这些植物;或者之前曾经是柠条林和青杨林,造林时没有对林地进行彻底的清理。同时,在踏查时,发现样地中有苔草生长的地方很少有 2 年生樟子松幼苗,所以猜测可能是落地的樟子松种子被架空在苔草上,所以本研究选择柠条、苔草和青杨 3 种植物作为供体,研究对受体樟子松幼苗生理情况的影响。

化感作用是指活体植物和微生物可以通过释放化感物质,直接或间接地影响生态群落中自身及其他植物(含微生物)生长发育的现象[8],其主要传播介质是农林土壤。植物的种间作用是化感作用的类型之一,指其释放的化感物质到环境中能够抑制其他植物幼苗生长,从而对生态系统群落中的物种组成与分布格局产生影响,大多数化感作用表现为有害的抑制作用,但种间相互有益的促进作用也是客观存在的[9-13]。研究表明,柠条枯枝、苔草枯叶和青杨枯叶分解释放大量的化感物质,会对受体的生理指标产生影响,加快林分更新[14-16]。在自然环境中,当化感物质累积到一定量后,就会抑制其他植物的幼苗生长,进一步影响植物间的竞争力,加剧人工林连载障碍。国内外已有研究表明,植物组织浸提液对其他植物的种子萌发和幼苗生长有显著的化感作用。在白骨壤(*Avicennia marina*)与桐花树(*Aegiceras corniculatum*)叶片浸提液处理下,其种子萌发和幼苗生长受到显著影响[17]。红树植物拉关木(*Laguncularia racemosa*)不同质量浓度的根茎叶浸提液对红树植物木榄(*Bruguiera gymnorhiza*)的丙二醛、相对电导率等指标产生明显的“V”字形变化规律,而叶绿素含量表现为“低促高抑”[18]。近年来,已知青杨枯叶浸提液的化感作用比其他部位更强,柠条的根茎叶对植物的化感作用已有报道,但枯枝对植物的化感作用的报道比较少。

基于此,本研究通过对 2 年生樟子松幼苗施加柠条枯枝、苔草和杨树枯叶浸提液,检测幼苗生理状况,从而探究 3 种类型浸提液的化感作用强度,为营造合适的乔灌草结构的樟子松人工林提供一定的科学依据,从而提升其幼苗保存率和生长率,克服樟子松纯林自然更新的困难。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

研究区位于内蒙古自治区锡林郭勒盟的南端——多伦县大宝生态园(116°29′21.03″ E,42°08′22.55″ N)。气候属中温带半干旱向半湿润过渡的大陆性气候,年均气温 1.6 ℃,年均降水量 386.2 mm,降水集中在生长季 6—8 月,其中 7 月降雨最多;≥10 ℃年平均积温 1 970 ℃,无霜期 95 d,年平均蒸发量 1 761 mm,海拔 1 150~1 800 m。土壤以风沙土和栗钙土为主,其次为棕钙土。植被依次分布着疏林草地、灌丛和荒漠草原,建群树种主要有榆树(*Ulmus pumila* L.)、柠条、盐蒿(*Artemisia halodendron*)、克氏针茅(*Stipa krylovii*)、冰草(*Agropyron cristatum*)和冷蒿(*Artemisia frigida*)等。

1.2　研究方法

1.2.1　样品的采集

2021 年 7 月初在浑善达克沙地东南缘多伦县大宝生态园的樟子松人工林内采集林下的苔草枯叶、青杨枯叶和柠条枯枝,带回实验室备用。受试的 2 年生樟子松幼苗是内蒙古国华园林绿化有限责

任公司培养的容器苗。

1.2.2 水浸提取液的制备

将野外采集来的柠条枝条、苔草枯叶和青杨枯叶置放于试验室阴凉通风处自然风干,按照枯叶、枝条与蒸馏水1∶50(即1 g风干后的样品浸没在50 mL蒸馏水中),使用蒸馏水浸泡48 h后利用2层(300目)纱布过滤,然后用滤纸过滤,最后用0.45 μm微孔膜抽滤,所得滤液为试验样品所提取的水浸提液。装进经过灭菌的棕色玻璃瓶中,在2 ℃低温下的冰箱保存;试验开始时,再用蒸馏水将母液稀释为5、10、20倍,稀释后分别为1∶250、1∶500、1∶1 000,同时以蒸馏水为对照CK(0 g/mL)。

1.2.3 2年生樟子松幼苗盆栽试验

选择根系、苗高相近的苗木,栽植前用自来水清洗根部。栽培基质选用由大宝生态园内带回试验室的沙土。

2021年8月将2年生的樟子松容器苗栽植到花盆中(外壁红色,内壁黑色,上口径10 cm,高9 cm,下口径7 cm)进行缓苗,并浇透水,每个花盆种植1株;试验共有柠条枯枝、苔草枯叶和青杨枯叶各自4个质量浓度梯度(1∶50、1∶250、1∶500、1∶1 000)以及蒸馏水作为对照的13种处理,每处理6个重复,共78个花盆,78株樟子松幼苗。

缓苗期管理,每隔7 d浇灌一次自来水,经过两周的时间,缓苗期结束。

缓苗期结束后,8月中旬开始每隔7 d分别向每盆中浇灌柠条枯枝、苔草和青杨枯叶各自不同质量浓度的浸提液110 mL,对照浇灌等量蒸馏水,于2022年1月底结束试验。然后测定幼苗的生理指标:幼苗针叶的过氧化氢酶活性,超氧化物歧化酶活性,过氧化物酶活性的测定,幼苗针叶的根系活力、可溶性蛋白质含量、丙二醛含量(浸提液的制备同上)。

温室内培养条件见表1,幼苗培养基质土壤化学性质如下:pH为6.15±0.07,全碳含量为(4.41±1.05) mg/g,全氮含量为(1.01±0.07)mg/g,全磷含量为(104.15±9.59)mg/kg,速效磷含量为(29.77±6.22)mg/g。

表1 室内培养条件

Tab.1 Indoor culture conditions

月份 Month	平均最高温度/℃ Mean highest temperature	平均最低温度/℃ Mean minimum Temperature	平均湿度(%) Mean humidity
8月 August	33.35±2.21	22.00±2.56	35.00±4.00
9月 September	25.83±3.61	18.57±3.30	36.00±4.00
10月 October	22.10±4.39	16.10±3.78	40.00±3.00

1.3 2 年生樟子松幼苗生理指标的测定

①幼苗根系活力(RA)采用TTC法测定;②幼苗针叶丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸法;③可溶性蛋白(SP)含量采用考马斯亮蓝G-250染色法测定,同路文静[19]。④叶绿素测定采用丙酮乙醇等体积混合;⑤光合速率测定同陈立新等[20]。⑥幼苗过氧化氢酶(CAT)活性采用紫外分光光度法;⑦超氧化物歧化酶(SOD)活性采用NBT(氮蓝四唑)光还原法;⑧过氧化物酶(POD)活性测定采用愈创木酚法。以上方法均参考植物生理学试验教程[19]的方法进行测定。光合作用测定采用LI-6400(Li-COR,USA),选择2年生樟子松幼苗生长健康的针叶,测定净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)。

1.4 2 年生樟子松幼苗化感效应指数的计算

采用Williamson化感效应指数(response index,RI,式中记为R_I)[21]度量化感作用的类型和强度,设C为对照值;T为处理值,当$T \geqslant C$时,$R_I = 1-C/T$,当$T \leqslant C$时,$R_I = T/C-1$。。$R_I<0$为抑制作用,$R_I>0$为促进作用,绝对值大小与作用强度一致。

化感综合效应指数(MR,式中记为M_R)为同一处理下樟子松幼苗多个测定指标的对照抑制或促进百分率的算术平均值[22]。计算公式为

$$M_R = \frac{\sum_j^n R_I}{n}。$$

式中:M_R为化感综合效应指数;n为该类数据RI的总个数。$M_R>0$表示促进作用,反之为抑制作用。

1.5 数据统计与分析

使用Microsoft Excel和SPSS软件进行数据整理和分析,以“平均值±标准差”来表示数据,并采用单因素方差分析(one-way ANOVA)、双因素方差分

析(Two-way ANOVA)和最小显著极差法(LSD)比较组内的差异,显著性水平设定为 $\alpha=0.05$。

2　结果与分析

2.1　不同类型浸提液对 2 年生樟子松幼苗光合生理指标的影响

3 种浸提液处理对 2 年生樟子松幼苗的净光合作用和蒸腾速率有显著的影响,表现为随着浸提液质量浓度的升高,促进效果逐渐变弱甚至产生显著的抑制($P<0.05$,下同)。经 3 种浸提液处理后幼苗净光合速率的平均值由大到小排序为苔草、柠条、青杨;幼苗蒸腾速率的平均值由大到小排序为苔草、柠条、青杨。

由表 2 计算可知,当柠条枯枝和青杨枯叶浸提液在质量浓度为 1∶50 时,对其净光合速率显著低于对照,分别低于对照 34.52%和 36.88%;当苔草枯叶浸提液在质量浓度为 1∶500 和 1∶1 000 时,对其净光合速率有显著的促进作用,分别高于对照 32.51%和 37.71%。当 3 种类型浸提液在质量浓度为 1∶1 000 时,对其蒸腾速率有显著的促进作用,分别高于对照 28.91%、49.22%和 46.09%。

表 2　不同类型浸提液对樟子松幼苗光合生理指标的影响

Tab. 2 Effects of different types of extracts on photosynthetic physiological indicators of *P. sylvestris* var. *mongolica* seedlings

浸提液类型 Type of extract	质量浓度梯度 Concentration gradient	净光合速率/(μmol·m^{-2}·s^{-1}) Net photosynthetic rate	蒸腾速率/(mmol·m^{-2}·s^{-1}) Transpiration rate
DBCK	1∶50	5.54±1.08c	1.12±0.14c
	1∶250	7.05±0.47bc	1.47±0.14ab
	1∶500	9.59±0.11a	1.64±0.03a
	1∶1 000	9.71±1.42a	1.65±0.13a
	0	8.46±0.43ab	1.28±0.07bc
DLCS	1∶50	6.75±0.98c	1.12±0.14c
	1∶250	8.75±0.68b	1.65±0.09b
	1∶500	11.21±0.83a	1.87±0.03a
	1∶1 000	11.65±1.48a	1.91±0.07a
	0	8.46±0.43bc	1.28±0.07c
DLPS	1∶50	5.34±1.83b	1.21±0.10b
	1∶250	7.32±0.19a	1.27±0.26b
	1∶500	8.71±0.71a	1.48±0.09b
	1∶1 000	8.83±0.73a	1.87±0.22a
	0	8.46±0.43a	1.28±0.07b

注:DBCK 为柠条枯枝(dead branches of *C. Korshinskii*)、DLCS 为苔草枯叶(dead leaves of *C.* spp.)、DLPS 为杨树枯叶(dead leaves of *P.* spp.)。表中数据为平均值±标准差,其后不同小写字母表示处理间差异达 5%显著水平,下同。

Note: DBCK is dead branches of *C. Korshinskii*, DLCS is dead leaves of *C.* spp., DLPS is dead leaves of *P.* spp. The data in the table are the mean ±standard deviation, and then different lowercase letters indicate that the difference between treatments reaches a significant level of 5%, the same below.

2.2　不同类型浸提液对 2 年生樟子松幼苗叶绿素含量的影响

由表 3 计算可知,3 种浸提液处理对 2 年生樟子松幼苗的叶绿素含量有一定的影响,表现主要呈现低质量浓度促进、高质量浓度抑制的趋势。经 3 种浸提液处理后幼苗叶绿素含量的平均值由大到小排序为青杨、苔草、柠条。其中,柠条枯枝浸提液在质量浓度为 1∶50 时对樟子松幼苗的叶绿素含量有显著的抑制性,分别低于对照 35.58%。

表 3　不同类型浸提液对 2 年生樟子松幼苗叶绿素含量的影响

Tab. 3 Effects of different types of extracts on chlorophyll content of 2-year-old *P. sylvestris* var. *mongolica* seedlings　　mg·g^{-1}

浸提液类型 Type of extract	1∶50	1∶250	1∶500	1∶1 000	0
DBCK	5.36±1.27c	6.61±0.71bc	8.15±0.77ab	9.42±1.22a	8.32±0.59ab
DLCS	6.16±1.68c	7.39±1.06bc	8.80±1.29ab	9.86±0.94a	8.32±0.59abc
DLPS	6.74±0.37c	7.26±0.35bc	8.57±1.52ab	9.90±1.00a	8.32±0.59abc

2.3 不同类型浸提液对2年生樟子松幼苗生理指标的影响

3种浸提液处理对2年生樟子松幼苗的可溶蛋白质、丙二醛含量有一定的影响,表现主要呈现高质量浓度促进、低质量浓度抑制的趋势。经3种浸提液处理对2年生樟子松幼苗的可溶蛋白质含量、丙二醛含量有一定的影响,表现主要呈现出高质量浓度促进、低质量浓度抑制的趋势。经3种浸提液处理后可溶蛋白质含量的平均值由大到小排序为青杨、柠条、苔草;丙二醛含量的平均值由大到小排序为青杨、柠条、苔草;根系活力的平均值由大到小排序为青杨、柠条、苔草。

由表4计算可知,3种浸提液在质量浓度为1∶50时,对可溶蛋白质有显著的促进作用,分别高于对照70.89%、44.30%和122.78%;且柠条枯枝和青杨枯叶浸提液所有质量浓度对幼苗可溶蛋白质含量的影响均有一定的促进作用。3种浸提液在质量浓度为1∶50时,对其幼苗丙二醛含量有显著的抑制性,分别低于对照30.50%、44.21%和18.24%,在质量浓度为1∶1 000时,对其幼苗丙二醛含量有一定的促进作用,但不显著。苔草枯叶浸提液在对其幼苗根系活力表现为"N"字形走向,质量浓度为1∶500时对其有显著的促进作用,高于对照37.06%,在质量浓度为1∶1 000时,显著低于对照54.13%;青杨枯叶浸提液在质量浓度为1∶250和1∶500时,对其幼苗根系活力有显著的促进作用,高于对照445.08%和384.44%。

表4 不同类型浸提液对2年生樟子松幼苗生理指标的影响

Tab.4 Effects of different types of extracts on physiological indicators of 2-year-old *P. sylvestris* var. *mongolica* seedlings

浸提液类型 Type of extract	质量浓度梯度/(g·mL^{-1}) Concentration gradient	可溶蛋白质/(mg·g^{-1}) Soluble protein	丙二醛/(μmol·g^{-1}) Malondialdehyde content	根系活力/(g·mL^{-1}) Root activity
DBCK	1∶50	1.35±0.34a	38.67±4.57c	56.97±11.6a
	1∶250	1.20±0.12a	43.15±2.56c	44.93±3.90ab
	1∶500	1.04±0.19ab	49.19±1.69b	46.55±9.94ab
	1∶1 000	0.81±0.08b	56.68±3.00a	33.60±5.40b
	0	0.79±0.14b	55.64±3.40a	45.76±3.71ab
DLCS	1∶50	1.14±0.08a	31.04±3.46d	35.07±6.01cd
	1∶250	0.83±0.13b	38.83±3.49c	52.79±9.30ab
	1∶500	0.87±0.08b	45.72±1.87b	64.72±13.50a
	1∶1 000	0.72±0.23b	59.32±3.34a	20.99±3.03d
	0	0.79±0.14b	55.64±3.40a	45.76±3.71bc
DLPS	1∶50	1.76±0.27a	45.49±2.78c	76.58±3.63b
	1∶250	1.38±0.12b	46.88±2.73c	249.43±70.74a
	1∶500	1.35±0.17bc	51.26±2.56bc	221.68±53.43a
	1∶1 000	1.00±0.22cd	58.84±6.64a	68.63±4.74b
	0	0.79±0.14d	55.64±3.4ab	45.76±3.71b

2.4 不同类型浸提液对2年生樟子松幼苗酶活性的影响

3种浸提液处理对2年生樟子松幼苗的酶活性有一定的影响,不同类型浸提液对酶活性的影响各不相同。经3种浸提液处理后过氧化氢酶活性的平均值由大到小排序为柠条、苔草、青杨;超氧化物歧化酶活性的平均值由大到小分别为青杨、苔草、柠条;过氧化物酶活性的平均值由大到小分别为柠条、青杨、苔草。

由表5计算可知,3种浸提液在质量浓度为1∶50时,对其幼苗过氧化氢酶活性有显著的抑制性,分别低于对照40.28%、38.41%、45.10%;不同质量浓度的柠条枯枝浸提液对其幼苗的过氧化氢酶活性有一定的影响,随着质量浓度的升高过氧化氢酶活性呈现先增加后减少的趋势;而苔草和青杨枯叶浸提液在不同质量浓度对其幼苗的过氧化氢酶活性均表现为抑制作用。不同质量浓度的柠条枯枝浸提液对其幼苗的超氧化物歧化酶活性均表现为显著的抑制性,随着浸提液质量浓度的增加超氧化物歧化酶活性而逐渐减少,且分别低于对照65.15%、50.03%、42.34%、12.58%;苔草和青杨枯叶浸提液在质量浓度为1∶50时对其幼苗超氧化物歧化酶活性有显著的抑制性,显著低于对照27.15%和20.48%。不同质量浓度的柠条枝条浸提液对其幼苗的过氧化物酶活性影响显著,在质量浓度为1∶50和1 000时,分别显著高于对照902.63%和413.44%;苔草枯叶浸提液在质量浓度为

1∶250 时,对其幼苗的过氧化物酶活性有显著的促进作用,显著高于对照 290.60%;青杨枯叶浸提液在质量浓度为 1∶50 时对其幼苗的过氧化物酶活性有显著的促进作用,显著高于对照 1 584.45%。

表 5　不同类型浸提液对 2 年生樟子松幼苗酶活性的影响

Tab. 5 Effect of different types of extracts on enzyme activity of 2-year-old *P. sylvestris* var. *mongolica* seedlings

浸提液类型 Type of extract	质量浓度梯度/(g·mL^{-1}) Concentration gradient	过氧化氢酶活性/(U·g^{-1}) Catalase activity	超氧化物歧化酶活性/(U·g^{-1}) Superoxide dismutase activity	过氧化物酶活性/(U·g^{-1}) Peroxidase activity
DBCK	1∶50	168.36±20.73^{c}	5.07±0.63^{d}	213.36±64.42^{a}
	1∶250	219.63±30.85^{bc}	7.27±0.93^{c}	109.26±39.84^{b}
	1∶500	288.98±68.34^{b}	8.39±0.66^{c}	51.45±8.87^{bc}
	1∶1 000	369.15±37.4^{a}	12.72±0.45^{b}	278.36±39.96^{a}
	0	281.90±2.03^{b}	14.55±1.05^{a}	21.28±8.97^{c}
DLCS	1∶50	173.61±17.44^{b}	10.60±0.54^{b}	32.20±15.59^{bc}
	1∶250	234.22±6.04^{ab}	14.27±0.75^{a}	83.12±8.52^{a}
	1∶500	251.99±44.92^{a}	13.04±0.97^{a}	63.56±29.51^{ab}
	1∶1 000	177.93±57.00^{b}	14.29±0.64^{a}	50.45±31.23^{abc}
	0	281.90±2.03^{a}	14.55±1.05^{a}	21.28±8.97^{c}
DLPS	1∶50	131.39±21.68^{c}	11.57±1.29^{c}	358.45±114.05^{a}
	1∶250	187.64±29.62^{b}	14.42±0.55^{b}	73.59±9.38^{b}
	1∶500	196.30±32.63^{b}	17.48±2.20^{a}	41.89±24.70^{b}
	1∶1 000	239.32±47.79^{ab}	15.40±1.81^{ab}	15.75±0.59^{b}
	0	281.90±2.03^{a}	14.55±1.05^{b}	21.28±8.97^{b}

2.5　质量浓度和供体对 2 年生樟子松幼苗生理影响的双因素方差分析

由表 6 可知,在浸提液处理下,供体、质量浓度以及质量浓度×供体的交互作用均对根系活力、过氧化氢酶活性、超氧化物歧化酶活性和过氧化物酶活性产生极显著影响($P<0.01$)。供体对净光合速率、蒸腾速率、叶绿素含量、可溶蛋白质和丙二醛含量测定产生极显著影响($P<0.01$);质量浓度对净光合速率、蒸腾速率、可溶蛋白质和丙二醛含量测定产生极显著影响($P<0.01$);质量浓度以及供体对蒸腾速率、叶绿素含量和丙二醛含量测定产生显著影响($P<0.05$)。就单因素而言,质量浓度对净光合速率、蒸腾速率、叶绿素含量、丙二醛、过氧化氢酶活性和过氧化物酶活性的离差平方和均大于供体,其余反之。

表 6　质量浓度和供体对 2 年生樟子松幼苗生理影响的双因素方差分析

Tab. 6 Two factor ANOVA analysis of the physiological effects of concentration and donor on 2-year-old *P. sylvestris* var. *mongolica* seedlings

处理类型 Treatment type	因子 Factor	自由度 df	净光合速率 Net photosynthetic rate	蒸腾速率 Transpiration rate	叶绿素含量 Chlorophyll content	可溶蛋白质 Soluble protein	丙二醛 Malondialdehyde content	根系活力 Root activity	过氧化氢酶活性 Catalase activity	超氧化物歧化酶活性 Superoxide dismutase activity	过氧化物酶活性 Peroxidase activity
浸提液 Extract	供体	2	30.99**	40.19**	20.23**	17.57**	52.71**	21.00**	17.91**	36.77**	27.26**
	质量浓度	4	13.10**	6.13**	1.78	17.68**	9.59**	67.66**	11.42**	89.54**	17.43**
	质量浓度×供体	8	1.23	3.02*	2.62*	1.67	2.54*	14.40**	5.25**	10.77**	18.38**

注:* 代表影响显著,** 代表影响极显著,供体代表 3 种植物的浸提液。

Note: * Represents significant impact, and ** represents extremely significant impact, the donor represents the extract of three plants.

2.6　3 种浸提液对 2 年生樟子松幼苗的化感指数分析

2.6.1　对光合生理的化感作用平均敏感指数分析

由表 7 可知,柠条枯枝浸提液对樟子松幼苗的蒸腾速率表现显著的促进作用。柠条枯枝浸提液对樟子松净光合速率和叶绿素含量表现为抑制作用,其中浸提液对叶绿素含量的抑制性最强,其次是净光合速率。幼苗的各个根系指标的平均敏感指数由大到小排序为蒸腾速率、净光合速率、叶绿素含量。

苔草枯叶浸提液对樟子松幼苗的蒸腾速率和净光合速率表现为促进作用,一级敏感指数值分别 0.19

和0.09。浸提液对樟子松幼苗的叶绿素含量表现为抑制性。幼苗的各个根系指标的平均敏感指数由大到小排序为蒸腾速率、净光合速率、叶绿素含量。

青杨枯叶浸提液对樟子松幼苗的蒸腾速率表现为显著的促进作用。浸提液对樟子松幼苗的净光合速率和叶绿素含量都表现为抑制作用,其中浸提液对樟子松幼苗净光合速率抑制性最强,叶绿素含量受到的影响较小。幼苗的各个光合生理指标的平均敏感指数由大到小排序为蒸腾速率、叶绿素含量、净光合速率。

表7 不同类型浸提液对2年生樟子松幼苗光合生理的化感作用平均敏感指数分析

Tab. 7 Average sensitivity index analysis of allelopathic effects of different types of extracts on photosynthetic physiology of 2-year-old *P. sylvestris* var. *mongolica* seedlings

光合生理指标 Photosynthetic physiological index	浸提液类型 Type of extract	质量浓度梯度和化感效应指数 Concentration gradient and response index				平均敏感指数 The average of sensitivity index
		1∶50	1∶250	1∶500	1∶1 000	
净光合速率 Net photosynthetic rate	DBCK	-0.35	-0.17	0.12	0.13	-0.07
	DLCS	-0.20	0.03	0.25	0.27	0.09
	DLPS	-0.37	-0.13	0.03	0.04	-0.11
蒸腾速率 Transpiration rate	DBCK	-0.13	0.13	0.22	0.22	0.11
	DLCS	-0.13	0.22	0.32	0.33	0.19
	DLPS	-0.05	-0.01	0.14	0.32	0.10
叶绿素含量 Transpiration rate	DBCK	-0.36	-0.21	-0.02	0.12	-0.12
	DLCS	-0.26	-0.11	0.05	0.16	-0.04
	DLPS	-0.19	-0.13	0.03	0.16	-0.03

2.6.2 对生理指标的化感作用平均敏感指数分析

由表8可知,柠条枯枝浸提液对樟子松幼苗的可溶蛋白质和过氧化物酶活性表现为促进作用,其中对过氧化物酶活性的促进作用最强。浸提液对樟子松其他4个指标表现为抑制作用,其中浸提液对超氧化物歧化酶活性的抑制性最强,其次是丙二醛含量,对根系活力和过氧化氢酶活性的影响较小。幼苗的各个生理指标的平均敏感指数由大到小

表8 不同类型浸提液对2年生樟子松幼苗生理指标的化感作用平均敏感指数分析

Tab. 8 Analysis of the average sensitivity index of allelopathic effects of different types of extracts on physiological indicators of 2-year-old *P. sylvestris* var. *mongolica* seedlings

幼苗生理指标 Seedling physiological index	浸提液类型 Type of extract	质量浓度梯度 Concentration gradient 和化感效应指数				平均敏感指数 The average of sensitivity index
		1∶50	1∶250	1∶500	1∶1 000	
可溶蛋白质 Soluble protein	DBCK	0.41	0.34	0.24	0.02	0.26
	DLCS	0.31	0.05	0.09	-0.09	0.09
	DLPS	0.55	0.43	0.41	0.21	0.40
丙二醛 Malondialdehyde content	DBCK	-0.30	-0.22	-0.12	0.02	-0.16
	DLCS	-0.44	-0.30	-0.18	0.06	-0.22
	DLPS	-0.18	-0.16	-0.08	0.05	-0.09
根系活力 Root activity	DBCK	0.20	-0.02	0.02	-0.27	-0.02
	DLCS	-0.23	0.13	0.29	-0.54	-0.09
	DLPS	0.40	0.82	0.79	0.33	0.59
过氧化氢酶活性 Catalase activity	DBCK	-0.40	-0.22	0.02	0.24	-0.09
	DLCS	-0.38	-0.17	-0.11	-0.37	-0.26
	DLPS	-0.53	-0.33	-0.30	-0.15	-0.33
超氧化物歧化酶活性 Superoxide dismutase activity	DBCK	-0.65	-0.50	-0.42	-0.13	-0.43
	DLCS	-0.27	-0.02	-0.10	-0.02	-0.10
	DLPS	-0.20	-0.01	0.17	0.06	0.00
过氧化物酶活性 Peroxidase activity	DBCK	0.90	0.81	0.59	0.92	0.80
	DLCS	0.34	0.74	0.67	0.58	0.58
	DLPS	0.94	0.71	0.49	-0.26	0.47

排序为过氧化物酶活性、可溶蛋白质、根系活力、过氧化氢酶活性、丙二醛含量、超氧化物歧化酶活性。

苔草枯叶浸提液对樟子松幼苗的可溶蛋白质和过氧化氢酶活性表现为促进作用，其中对过氧化氢酶活性的促进作用最强。浸提液对樟子松其他 4 个指标表现为抑制作用，其中浸提液对超氧化物歧化酶活性的抑制性最强，其次是过氧化氢酶活性，对根系活力的影响较小。幼苗的各个生理指标的平均敏感指数由大到小排序为过氧化物酶活性、可溶蛋白质、根系活力、丙二醛含量、过氧化氢酶活性、超氧化物歧化酶活性。

对樟子松幼苗的可溶蛋白质、根系活力和过氧化物酶活性表现为促进作用，其中对根系活力的促进作用最强。浸提液对樟子松幼苗的丙二醛含量和过氧化氢酶活性都表现为抑制作用，其中浸提液对樟子松幼苗过氧化氢酶活性抑制性最强，根系活力受到的影响较小。幼苗的各个生理指标的平均敏感指数由大到小排序为根系活力、过氧化物酶活性、可溶蛋白质、超氧化物歧化酶活性、丙二醛含量、过氧化氢酶活性。

3　讨论

研究表明，化感物质可能会影响受体植物叶片的净光合速率、蒸腾速率和减少叶绿素含量，进而影响植物的光合作用[23]。本试验发现 3 种浸提液对 2 年生樟子松幼苗的净光合速率、蒸腾速率和叶绿素含量的影响基本为 2 种规律：在质量浓度为 1∶1 000 时，这 3 种浸提液对 3 种指标有显著的促进作用；在质量浓度为 1∶50 时对三者有显著的抑制，这与多杰吉等[24]的研究结果一致，植物的光合作用受浸提液质量浓度高低的影响。除此之外，化感作用对植物生长有很大的影响，会对细胞膜系统造成伤害，从而影响呼吸作用和对水分的吸收，最终这些变化会影响植物的光合作用和光合速率。可能是因为化感物质通过降低植物叶片的光合作用和叶绿素含量等生理指标而降低了被处理植株的蒸腾速率[25]。浸提液在低质量浓度时对樟子松幼苗的净光合速率、蒸腾速率和叶绿素含量指标有促进作用，说明樟子松可以通过混交的方式来增强本物种在生态群落中的竞争力和适应力。

植物根系活力可以通过化感效应的强度来反映植物体[26]。本试验中，不同供体植物对樟子松幼苗根系活力的影响各不相同，其中，柠条枯枝和苔草枯叶浸提液对 2 年生樟子松幼苗根系活力的影响不大，表现为一定的抑制作用，这可能是因为浸提液中具有抑制根系生长的化感物质，随着质量浓度的增加，植物根系胞受到破坏，影响到了根系吸收营养物质和水分[27]。但青杨枯叶浸提液在质量浓度为 1∶250 和 1∶500 时对根系活力表现为显著的促进作用，这可能是因为浸提液中具有特殊的化感物质能够促进其根系的生长，随着质量浓度的升高，其根系生长又受到了一定的抑制性，可能是由于浸提液中的化感物质含量大于了幼苗的承受范围，促进作用便逐渐减弱。

可溶性蛋白质含量的高低反映了植物的新陈代谢是否正常，植物受到胁迫时，细胞会累积水溶性化合物来保护细胞结构[28]，这类化合物的大量形成，一方面表明植物受到了一定的逆境胁迫，另一方面这些物质作为渗透调节物质又缓解了植物的逆境胁迫[29-30]。本试验中所有处理可溶性蛋白含量均不小于对照，说明樟子松幼苗在处理质量浓度范围内仍可通过可溶性蛋白调节渗透势，避免细胞受逆境胁迫而水分失衡。

通过测定丙二醛（MDA）含量可了解膜脂过氧化的程度，间接反映膜系统受损程度以及植物的抗逆性[31]。本试验中柠条枯枝、苔草和青杨枯叶浸提液在质量浓度为 1∶50 时均对幼苗丙二醛含量表现为显著的抑制性；在质量浓度为 1∶1 000 时均对其表现为促进作用。这说明了高质量浓度浸提液使植物体内的膜脂氧化，造成了植物细胞膜受到损伤。全威等[32]研究发现，油菜浸提液均能够提高反枝苋（*Amaranthus retroflexus*）、狗尾草（*Setaria viridis*）、藜（*Chenopodium album*）和野稷（*Panicum miliaceum*）4 种杂草叶片的丙二醛含量，与本研究结果一致。说明了该 3 种浸提液能够改善樟子松的丙二醛含量，从而促进幼苗的生长。

过氧化氢酶、超氧化物歧化酶和过氧化物酶是植物体内几种主要的抗氧化酶，植物受损伤时可清除体内多余的活性氧，减轻活性氧对植物的损伤[33]。

过氧化氢酶能够将植物体内的 H_2O_2 分解为氧气和水，使得植物体免受 H_2O_2 的侵害[34-35]。本试验中，柠条浸提液对幼苗过氧化氢酶表现为高质量浓度抑制低浓度促进，李志华等[36]研究发现，黑麦草（*Lolium perenne* cv. *barspectra*）、草地早熟禾（*Poa pratensis* cv. *barian*）、翦股颖（*Agrostis Palustris* cv. *regent*）和白三叶（*Trifolium repeus* cv. *haifa*）的茎叶浸

提液对植物萝卜(*Raphanus sativus* cv. *sijihong*)、高羊茅(*Festuca arundinacea* cv. *vegas*)、苜蓿(*Medicago sativa* cv. *derby*)和红三叶(*Trifolium pratense* cv. *common*)的苗干重、根干重、苗长和根长等表现为低促高抑;耿广东等[37]研究发现,低质量浓度的西瓜水浸液对黄瓜和西瓜地上方面表现为促进作用,高质量浓度则对其表现为抑制作用。这可能是由于低质量浓度浸提液中的化感物质质量浓度低于养分物质质量浓度;而苔草和青杨枯叶浸提液对幼苗过氧化氢酶均表现为抑制性,可能是因为作用于幼苗过氧化氢酶活性的浸提液中化感物质数量未能够达到临界值,再或者是由于樟子松对两者浸提液存在拮抗作用,使其化感作用减弱。过氧化物酶可以加快 H_2O_2 的分解,进而防止因植物体内积累过多的过氧化物而导致细胞中毒。本研究中,青杨枯叶浸提液质量浓度为1∶500时,对幼苗过氧化物酶表现为促进作用,柠条枯枝和苔草枯叶所有浸提液均表现为抑制作用。这与李玫等[38]所研究的无瓣海桑(*Sonneratia apetala*)对乡土红树植物的化感作用表现为"低促高抑"现象不同,可能是因为青杨枯叶与柠条枯枝、苔草枯叶浸提液相比,前者所含的过氧化物酶数量较少。超氧化物歧化酶广泛存在于真核细胞与原核细胞的细胞质、线粒体和叶绿体中,可清除生物体内超氧阴离子自由基,有效地防御氧自由基对机体的伤害,具有抗衰老、提高机体对外界环境的适应能力[39]。除青杨枯叶浸提液在质量浓度为1∶1 000时对幼苗超氧化物歧化酶有一定的抑制作用,其他柠条枯枝、苔草和青杨枯叶浸提液的所有质量浓度均能促进幼苗的超氧化物歧化酶,说明浸提液中含有一定的化感物质,对樟子松幼苗中过氧化物酶活性有明显促进作用,增加其清除氧自由基的能力,从而有效地防止活性氧对机体的伤害。

4 结论

本试验通过对2年生樟子松幼苗柠条枯枝、苔草和青杨枯叶浸提液处理的响应开展试验以及结合化感效应指数分析,发现3种浸提液均能对其够产生促进或抑制作用,在质量浓度范围内对幼苗生理的大多指标的影响具有低质量浓度促进、高质量浓度抑制的作用趋势。其中,3种浸提液均具有一定的化感作用潜力,能够产生影响樟子松更新生长的化感物质,但影响最为显著的是苔草枯叶浸提液,最有利于2年生樟子松幼苗的生长。从化感作用的角度为沙地樟子松人工林管理提供参考依据,在林地经营中应维持合理的乔灌草结构来促进更新苗生长。此外,量化苔草枯叶浸提液所产生的化感效应还需要开展更多的实地试验。

【参 考 文 献】

[1] 党宏忠,张学利,韩辉,等. 樟子松固沙林林-水关系研究进展及对营林实践的指导[J/OL]. 植物生态学报:1-13[2022-09-04].
DANG H Z, ZHANG X L, HAN H, et al. Research advances on forest-water relationships in *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations for sand dune immobilization and guidance to forest management practices[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 1-13[2022-09-04].

[2] 王思琪,武曙红,朱晓梅,等. 我国樟子松人工林天然更新研究进展[J]. 世界林业,2018,31(3):58-62.
WANG S Q, WU S H, ZHU X M, et al. Research Progress in Natural Regeneration of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* Plantation[J]. World Forestry Research, 2018, 31(3):58-62.

[3] 王贺新,陈英敏. 辽西丘陵山地樟子松、油松抗旱性研究[J]. 林业科技通讯,1988(8):19-23.
WANG H X, CHEN Y M. Study on drought resistance of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* and *Pinus tabulaeformis* in hilly mountains of Western Liaoning[J]. Forest Science and Technology, 1988(8):19-23.

[4] 白洁冰,王志刚,陈飞,等. 食松、油松和樟子松抗旱水分生理比较研究[J]. 西北林学院学报,2008(1):10-13.
BAI J B, WANG Z G, CHEN F, et al. Water Physiology of *Pinus edulis Engelm*, *P. labulaeforis* and *Pinus sylvestris* var. *mongolica* under drought stress[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2008(1):10-13.

[5] 宋立宁,朱教君,郑晓. 基于沙地樟子松人工林衰退机制的营林方案[J]. 生态学杂志,2017,36(11):3249-3256.
SONG L N, ZHU J J, ZHENG X. Forestation and management scheme of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations in sandy lands based on their decline mechanisms[J]. Chinese Journal of Ecology, 2017, 36(11):3249-3256.

[6] 朱教君,曾德慧,康宏樟,等. 沙地樟子松人工林衰退机制[M]. 北京:中国林业出版社,2005.
ZHU J J, ZENG D H, KANG H Z, et al. Decline mechanism of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation in sandy land[M]. Beijing: China Forestry Press, 2005.

[7] 曾德慧,尤文忠,范志平,等. 樟子松人工固沙林天然更新障碍因子分析[J]. 应用生态学报,2002(3):257-261.
ZENG D H, YOU W Z, FAN Z P, et al. Analysis of natu-

ral regeneration barriers of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation on sandy land[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002(3):257-261.

[8] 王丹丹. 植物的化感物质及其作用机制[J]. 生物技术世界,2014(11):50-50。
WANG D D. Allelopathic substances in plants and their mechanisms of action[J]. Biotechnology World, 2014(11): 50-50.

[9] FAROOQ M, JABRAN K, CHEEMA Z A, et al. The role of allelopathy in agricultural pest management[J]. Pest Management Science, 2011, 67(5):493-506.

[10] 张红玉. 紫茎泽兰入侵过程中生物群落的交互作用[J]. 生态环境学报,2013,22(8):1451-1456.
ZHANG H Y. The interaction between biological communities in the process of invasion of *Ageratina adenophora*[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, 22(8): 1451-1456.

[11] 万方浩,刘万学,郭建英,等. 外来植物紫茎泽兰的入侵机理与控制策略研究进展[J]. 中国科学:生命科学,2011,41(1):13-21.
WAN F H, LIU W X, GUO J Y, et al. Research progress on invasion mechanism and control strategy of alien plant *Zeeland adenophorum*[J]. Scientia Sinica(Vitae), 2011, 41(1):13-21.

[12] 林文雄,何海斌,熊君,等. 水稻化感作用及其分子生态学研究进展[J]. 生态学报,2006(8):2687-2694.
LIN W X, HE H B, XIONG J, et al. Advances in the investigation of rice allelopathy and its molecular ecology[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006(8):2687-2694.

[13] 杨国庆,万方浩,刘万学. 入侵杂草紫茎泽兰的化感作用研究进展[J]. 植物保护学报,2008(5):463-468.
YANG G Q, WAN F H, LIU W X. Alleopathy research progress on an invasive weed, *Ageratina adenophora* Sprengel[J]. Journal of Plant Protection, 2008(5):463-468.

[14] 曾淼. 柠条锦鸡儿叶浸提液对 4 种冰草化感作用的初步研究[J]. 水土保持研究,2016,23(3):321-327.
ZENG M. Preliminaryresearch on the allelopathic effects of aqueous extracts from *Caragana korshinskii* leaves on four *Agropyron cristatum*[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(3):321-327.

[15] 荆晓玲. 鄱阳湖洲滩灰化苔草浸提液对微囊藻和栅藻生长及竞争的影响[D]. 南昌:江西师范大学,2020.
JING X L, The effect of the extract of *Carex cinerea on* the growth and competition of *Microcystis* and *Scenedesmus* in the beach of Poyang Lake[D]. Nanchang: Jiangxi Normal University, 2020.

[16] 张妍. 杨树对紫花苜蓿种子萌发的化感效应[J]. 辽宁林业科技,2022(1):22-24,57.
ZHANG Y. Allelopathic effects of poplar on *Medicago sativaseeds* germination[J]. Liaoning Forestry Science and Technology, 2022(1):22-24,57.

[17] 郎涛,甘可盈,符益健,等. 红树植物白骨壤叶片凋落物浸提液对桐花树胚轴萌发与幼苗生长的化感作用[J]. 植物生理学报,2022,58(5):929-936.
LANG T, GAN K Y, FU Y J, et al. Allelopathic effects of leaf litter leachates from *Avicennia marina* on hypocotyl germination and growth of *Aegiceras corniculatum*[J]. Plant Physiology Journal, 2022, 58(5):929-936.

[18] 王秀丽,卢昌义,周亮,等. 外来红树植物拉关木对木榄的化感作用[J]. 厦门大学学报(自然科学版),2017,56(3):339-345.
WANG X L, LU C Y, ZHOU L, et al. Allelopathiceffects of exotic mangrove species *Laguncularia racemosa* on *Bruguiera gymnorhiza*[J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 2017, 56(3):339-345.

[19] 路文静. 植物生理学实验教程[M]. 北京:中国林业出版社,2012.
LU W J. Experimental course of plant physiology[M]. Beijing: China Forestry Press, 2012.

[20] 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.
CHEN L X, LI S B, QIAO L, et al. Influence of leaf litter and soil leaching liquor on seed germination and seedling growth of *Pinus koraiensis*[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2016, 40(2):81-87.

[21] 步凡. 凋落物与土壤浸提液对红松种子萌发及生长的化感作用[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2014.
BU F. Allelopathiceffects of litter and soil extracts on *Pinus koraiensis* seed germination and seedling growth[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2014.

[22] 蒲旭斌. 泡核桃叶水浸提液对草珊瑚的化感作用研究[D]. 南宁:广西大学,2022.
PU X B. Allelopathy ofaqueous extract from *Juglans sigillata* leaves on *Sarcandra glabr*[D]. Nanning: Guangxi University, 2022.

[23] 师小平,陈银萍,闫志强,等. 植物化感作用研究进展[J]. 生物技术通报,2020,36(6):215-222.
SHI X P, CHEN Y P, YAN Z Q, et al. Research progress on plant allelopathy[J]. Biotechnology Bulletin, 2020, 36(6):215-222.

[24] 多杰吉,廖超英,高智辉,等. 毛乌素沙地沙柳对花棒和柠条的化感作用[J]. 西北林学院学报,2015,30(4):39-44.
DUO J J, LIAO C Y, GAO Z H, et al. Allelopathy

effects of *Salix cheilophila* on *Hedysarum scoparium* and *Caragana korshinskii* in MU Us desert[J], Journal of Northwest Forestry University, 2015, 30(4):39-44.

[25] 郁继华,张韵,牛彩霞,等. 两种化感物质对茄子幼苗光合作用及叶绿素荧光参数的影响[J]. 应用生态学报,2006,17(9):1629-1632.
YU J H, ZHANG Y, NIU C X, et al. Effects of two allelopathic substances on photosynthesis and chlorophyll fluorescence parameters of eggplant seedlings[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(9):1629-1632.

[26] 李玲,李娘辉,蒋素梅,等. 植物生理学模块实验指导[M]. 北京:科学出版社,2009.
LI L, LI N H, JIANG S M, et al. Plant physiology module experiment guidance[M]. Beijing: Science Press, 2009.

[27] 柴强,黄高宝. 植物化感作用的机理、影响因素及应用潜力[J]. 西北植物学报,2003,23(3):509-515.
CHAI Q, HUANG G B. Review on action mechanism affecting factors and applied potential of allelopathy[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2003, 23(3):509-515.

[28] ZHIFANG G, LOESCHER W H. Expression of a celery mannose 6-phosphate reductase in *Arabidopsis thalianaenhances* salt tolerance and induces biosynthesis of both mannitol and a glucosyl-mannitol dimer[J]. Plant-Cell Environ, 2003,26(2): 275-283.

[29] 余叔文,汤章城. 植物生理和分子生物学[M]. 北京:科学出版社,1992.
YU S W, TANG Z C. Plant physiology and molecular biology [M]. Beijing: Science Press,1992.

[30] 丁龙,赵慧敏,曾文静,等. 五种西北旱区植物对干旱胁迫的生理响应[J]. 应用生态学报,2017. 28(5):1455-1463.
DING L, ZHAO H M, ZENG W J, et al. Physiological responses of five plants in northwest China arid area under drought stress[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017. 28(5):1455-1463.

[31] 李子芳,吴锡冬. 植物丙二醛含量测定试验设计方案[J]. 天津农业科学,2016,22(9):49-51.
LI Z F, WU X D. Experimental design scheme for the effect of drought stress on content of malondialdehyde of indoor ornamental plants[J]. Tianjin Agricultural Sciences, 2016, 22(9):49-51.

[32] 全威,郑成忠,东保柱,等. 油菜对4种杂草种子的化感抑制效应及田间应用[J]. 河南农业科学,2022,51(7):102-111.
QUAN W, ZHENG C Z, DONG B Z, et al. Allelopathic inhibition effect of Brassica campestris L. aqueous extract on four kinds of weeds and field application[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2022,51(7):102-111.

[33] 郜海燕,陈杭君,陈文烜,等. 采收成熟度对冷藏水蜜桃果实品质和冷害的影响[J]. 中国农业科学,2009,42(2):612-618.
GAO H Y, CHEN H J, CHEN W X, et al. Effects of harvest maturity on quality and chilling injury of juicy peaches during low temperature storage[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(2):612-618.

[34] AIRES E S, ARAGAO C A, DANTAS B F, et al. Light intensity modulates the accumulation of carbohydrates, antioxidant enzymes and production of iceberg lettuce under tropical conditions[J]. Horticulturae, 2021, 7(12): 553.

[35] 朱秀红,王明昆,张威,等. 葎草化感活性对白花泡桐种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 西部林业科学,2022,51(4)1-10
ZHU X H, WANG M K, ZHANG W, et al. Effects of *Humulus scandens* allelopathy on seed germination and seedling growth of *Paulownia* fortune[J]. Journal of West China Forestry Science, 2022, 51(4)1-10.

[36] 李志华,沈益新,薛萍,等. 黑麦草、草地早熟禾、剪股颖和白三叶的化感作用初探[J]. 中国草地,2003,25(1):31-38.
LI Z H, SHEN Y X, XUE P, et al. Preliminary Study on the allelopathy of italian ryegrass, kentucky blue grass, creeping bent grass and white clover[J]. Chinese Journal of Grassland, 2003,5(1):31-38.

[37] 耿广东,程智慧,孟焕文,等. 西瓜化感作用及其机理研究[J]. 果树学报,2005,22(3):247-251.
GENG G D, CHENG Z H, MENG H W, et al. Studu on allelopathy and its mechanism of watermelon (*Citrullus lanatus*)[J]. Journal of Fruit Science, 2005,22(3):247-251.

[38] 李玫,廖宝文,郑松发,等. 无瓣海桑对乡土红树植物的化感作用[J]. 林业科学研究,2004(5):641-645.
LI M, LIAO B W, ZHENG S F, et al. Allelopathic effects of *Sonneratia apetala* aqueous extracts on growth performance of some indigenous mangroves[J]. Forest Research, 2004(5):641-645.

[39] 彭晓邦. 板栗叶水浸液对商洛黄芩幼苗酶活性的影响[J]. 陕西农业科学,2015,61(7):29-32.
PENG X B. The effect of chestnut leaf water extract on enzyme activity of Huangqin seedlings in Shangluo [J] Agricultural Science, 2015, 61 (7): 29-32.