北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

不同经营世代刺槐根际土浸提液对自身种子萌发和幼苗生长的影响

张玉倩 彭祚登

Effects of extracts from rhizosphere soil of *Robinia pseudoacacia* of different management generations on seed germination and seedling growth

Zhang Yuqian, Peng Zuodeng

引用本文:
张玉倩, 彭祚登. 不同经营世代刺槐根际土浸提液对自身种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(7):77–89. doi: 10.12171/j.1000–1522.20230080
Zhang Yuqian, Peng Zuodeng. Effects of extracts from rhizosphere soil of *Robinia pseudoacacia* of different management generations on seed germination and seedling growth[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(7):77–89. doi: 10.12171/j.1000–1522.20230080

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230080

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同林龄杉木人工林根际土添加对其幼苗菌根侵染及生长的影响

Effects of rhizosphere soil addition of different aged Chinese fir plantation on the mycorrhizal colonization and growth of its seedlings

北京林业大学学报, 2020, 42(12): 74–82. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200044

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

Effects of litter extracts from *Castanopsis kawakamii* natural forest on seed germination and radicle growth of Chinese fir

北京林业大学学报, 2020, 42(4): 51–59. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190292

Pb、Cd复合胁迫对桑树种子萌发及幼苗生长的影响

Effects of lead and cadmium combined stress on seed germination and seedling growth of mulberry

北京林业大学学报, 2020, 42(4): 32–40. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190244

人工促进更新措施对落叶松种子萌发和早期生长的影响

Effects of artificial promotion measures on seed germination and early growth of *Larix principis–rupprechtii*

北京林业大学学报, 2023, 45(4): 24–35. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210486

豫西浅山区不同世代刺槐林土壤养分与结构特征

Soil nutrient and structure characteristics of *Robinia pseudoacacia* in different generations in the shallow mountain areas of western Henan Province, central China

北京林业大学学报, 2020, 42(3): 54–64. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190263

刺槐苗木碳水生理参数对长期干旱及复水的响应变化

Changes in response of carbon and water physiological parameters of *Robinia pseudoacacia* seedlings to long–term drought and rehydration

北京林业大学学报, 2023, 45(8): 43–56. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220096

DOI:10.12171/j.1000−1522.20230080

不同经营世代刺槐根际土浸提液对自身种子萌发和幼苗生长的影响

张玉倩　彭祚登
（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）

摘要:【目的】探究豫西浅山丘陵区不同经营世代刺槐和不同质量浓度根际土浸提液对刺槐种子萌发和幼苗生长发育过程的影响，揭示刺槐多代经营培养下根系分泌物对刺槐更新的化感效应，为刺槐破解连栽障碍和实现可持续经营提供理论依据。**【方法】**选取刺槐不同经营世代林（一代、二代、三代林）为研究对象，以裸地为对照，各设置 3 块样地进行基本林分调查，分别制备 1、5、10、50、100 mg/mL 不同质量浓度刺槐根际土浸提液，进行刺槐种子萌发和幼苗生长试验，并测定种子萌发和幼苗生长等相应指标。**【结果】**刺槐根际土浸提液会对刺槐种子萌发产生一定影响，根据化感综合效应指数来看，在一代林中，随着根际土浸提液质量浓度的增加，对刺槐种子萌发的抑制作用逐渐增强；在二代、三代林中，仅在二代林 5 mg/mL 时表现出促进作用，其余质量浓度均表现为抑制作用；在三代林中，随着根际土浸提液质量浓度的增加，对刺槐种子萌发的抑制作用均表现为先减弱后增强的趋势。刺槐根际土浸提液会对刺槐幼苗生长产生一定影响，根据化感综合效应指数来看，在一代林与三代林中，均随着浸提液质量浓度的增加，对刺槐幼苗生长由抑制作用转为促进作用再转为抑制作用，一代林和三代林在 100 mg/mL 时均为抑制作用，且抑制作用最强；在二代林中，不同质量浓度刺槐根际土浸提液对刺槐幼苗生长均为促进作用；裸地中，随着浸提液质量浓度的增加，对刺槐幼苗生长的抑制作用先增强后减弱，在 50 mg/mL 时达到最大值。**【结论】**多代经营的刺槐林根系分泌物会在一定程度上抑制刺槐种子萌发，但对于种子萌发以后的幼苗生长阶段并不存在抑制作用，甚至有利于其生长。

关键词：刺槐；根际土；种子萌发；幼苗生长；化感效应
中图分类号：S792.26　**文献标志码：**A　**文章编号：**1000−1522(2024)07−0077−13
引文格式：张玉倩，彭祚登. 不同经营世代刺槐根际土浸提液对自身种子萌发和幼苗生长的影响［J］. 北京林业大学学报，2024，46(7)：77−89. Zhang Yuqian, Peng Zuodeng. Effects of extracts from rhizosphere soil of *Robinia pseudoacacia* of different management generations on seed germination and seedling growth［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(7): 77−89.

Effects of extracts from rhizosphere soil of *Robinia pseudoacacia* of different management generations on seed germination and seedling growth

Zhang Yuqian　Peng Zuodeng
(School of Forestry, Key Laboratory for Silviculture and Conservation of Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract:［**Objective**］This paper explores the effects of different management generations of *Robinia pseudoacacia* and varied concentrations of rhizosphere soil extracts on the germination of *R. pseudoacacia* seeds and the growth and development of seedlings in the shallow mountains and hilly areas of western Henan Province of northern China, reveals the allelopathic effects of root exudates on *R. pseudoacacia* regeneration under multi generation management and cultivation so as to provide a theoretical basis for *R. pseudoacacia* to overcome continuous planting obstacles and achieve sustainable management.

收稿日期: 2023−04−10　**修回日期:** 2023−05−25
基金项目: 国家重点研发计划（2017YFD0600503）。
第一作者: 张玉倩。主要研究方向：森林培育。Email: 2754769032@qq.com　地址：100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学林学院。
责任作者: 彭祚登，博士，教授。主要研究方向：森林培育、林木种苗培育。Email: zuodengpeng@sina.com　地址：同上。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn; http://journal.bjfu.edu.cn

［**Method**］This study selected different generations of *R. pseudoacacia* forests (first generation, second generation, and third generation forests) as the research object, using bare land as the control, set up three sample plots for basic stand investigation, preparing 1, 5, 10, 50, and 100 mg/mL of *R. pseudoacacia* rhizosphere soil extracts with different mass concentrations, conducting *R. pseudoacacia* seed germination and seedling growth experiments, and measuring corresponding indicators such as seed germination and seedling growth. ［**Result**］The extract of *R. pseudoacacia* rhizosphere soil had a certain impact on the germination of *R. pseudoacacia* seeds. According to the allelopathic comprehensive effect index, in the first generation forest, the inhibitory effect on germination of *R. pseudoacacia* seeds gradually increased with the increase of concentration of rhizosphere soil extract in different management generations. In the second and third generation forests, only a promoting effect was observed at 5 mg/mL in the second generation forest. The remaining mass concentrations exhibited inhibitory effects. In the third generation forest, as the concentration of rhizosphere soil extract increased, the inhibitory effect on the germination of *R. pseudoacacia* seeds showed a trend of first weakening and then strengthening. The extract of *R. pseudoacacia* rhizosphere soil had a certain impact on the growth of seedlings of *R. pseudoacacia*. According to the comprehensive effect index of allelopathy, in both the first and third generations of forests, the growth of *Robinia pseudoacacia* seedlings changed from inhibitory effect to promoting effect and then to inhibitory effect with the increase of leaching solution concentration. Both the first and third generations of forests had inhibitory effect at 100 mg/mL, and the inhibitory effect was the strongest. In second-generation forests, different concentrations of *Robinia pseudoacacia* rhizosphere soil extracts had a promoting effect on the growth of *Robinia pseudoacacia* seedlings; In bare soil, as the concentration of extract increased, the inhibitory effect on the growth of *Robinia pseudoacacia* seedlings first increased and then decreased, reaching its maximum value at 50 mg/mL. ［**Conclusion**］The root exudates of multiple generations of *R. pseudoacacia* forests will to some extent inhibit the germination of *R. pseudoacacia* seeds, but there is no inhibitory effect on the seedling growth stage after seed germination, and it may even be beneficial for its growth.

Key words: *Robinia pseudoacacia*; rhizosphere soil; seed germination; seedling growth; allelopathic effect

人工纯林连栽表现出的生产力低下现象，是人工林培育所面临的重要问题[1]。刺槐（*Robinia pseudoacacia*）原产地为北美[2]，二十世纪初期引入我国，是一种优良的用材、能源利用、水土保持、生态林建设树种[3−5]，其花、叶、果实、根部、木材均具有很高的综合利用价值[6−7]。由于其根系发达、萌蘖能力强，皆伐后萌芽、萌蘖更新是刺槐人工林最主要的更新方式[8]，但连续萌蘖所形成的二代林、三代林存在生长迟缓、干形不良，生态功能和生产力逐代下降等问题[9−10]。此前对于这种现象大多归因于连栽导致的地力衰退，但研究表明，随着刺槐林经营世代的增加，土壤中养分含量逐渐增加，土壤结构得到改善，土壤生物学活性也得到有效提高[11−12]。

化感作用通常是指一种植物通过向体外分泌代谢过程中的某种化学物质，而对其他植物或自身直接或间接产生的影响，这种影响同时又分为抑制作用和促进作用，所以推测化感作用是导致连栽障碍和影响林分更新的重要因素之一[13]。化感物质释放到环境中通常通过 4 种方式：根系释放、凋落物分解、淋溶和挥发[14]。其中根系释放是影响植物根系活动和地下种子更新情况的主要途径，也是当前化感作用研究比较多的领域。研究表明，许多植物间均存在根系释放化感作用，杉木（*Cunninghamia lanceolata*）根际土中存在可抑制杉木种子萌发的化感物质，且随着连栽代数增加，抑制作用愈加明显[15]；臭椿（*Ailanthus altissima*）根水浸提液对臭椿幼苗生长均表现出抑制作用[16]；油松（*Pinus tabuliformis*）根系提取液对油松种子生长的综合效应存在低浓度促进高浓度抑制现象[17]；半夏（*Pinellia ternata*）连栽会导致土壤酸化、酶活性下降和营养失衡，尤其是其根系分泌的酚酸类、醌类、醛类等化感物质在土壤中积累，严重影响其植株生长[18]；三七（*Panax notoginseng*）分泌的酚酸类和皂苷类物质是主要的自毒物质，会对三七的生长发育产生不同程度的抑制作用并导致连作障碍[19]。刺槐的化感作用研究主要集中于根际土和枯落物等浸提液对受体植物种子萌发和幼苗生长的影响。研究发现，刺槐根系分泌物对高羊茅（*Festuca elata*）、结缕草（*Zoysia japonica*）、一串红

（*Salvia splendens*）等常见园林植物均会产生一定的抑制作用[20]。刺槐凋落叶腐解液对甜瓜（*Cucumis melo*）种子活力指数有促进作用，对绿豆（*Phaseolus radiatus*）和油菜（*Brassica campestris*）种子萌发呈现抑制作用[21]。刺槐腐殖质浸提液对刺槐种子萌发和幼苗生长均具有一定的抑制作用，且因林分林龄不同而存在差异[22]。刺槐林下凋落物浸提液对自身种子萌发和胚生长呈抑制作用，且随着经营世代增加，抑制作用逐渐增强[23−24]。刺槐根系、根际土浸提液对刺槐种子萌发、胚生长及幼苗生长都存在低促高抑的化感作用[25−26]。

虽然对于刺槐化感作用已有相关研究，但不同经营世代刺槐根系分泌物化感作用现象并未见报道。因此，本研究选取相同年龄下的实生一代林及萌生二代林、三代林作为研究对象，研究不同经营世代林和不同质量浓度根际土浸提液对刺槐种子萌发和幼苗生长发育过程的影响，以期揭示刺槐多代经营培养下品质下降、林下实生更新困难与刺槐化感作用的联系，为刺槐破解连栽障碍及实现可持续经营提供理论依据。

1　研究区概况与研究方法

1.1　研究区概况

研究地点位于洛宁县国有吕村林场，洛宁县地处河南省洛阳市西部，土壤为幼褐土，地带性植被为温带落叶阔叶林，属于大陆性季风气候，年平均气温 13.9 ℃，日照 2 006 h，年均无霜期 212 d，年均降水量 568 mm。

1.2　研究方法

1.2.1　样地选择

2020 年 8 月，在对刺槐人工林立地条件、生长条件等进行调查后，选取海拔、坡度、林龄尽可能相同的刺槐一代林、二代林、三代林，并选择荒坡草地作为裸地对照。其中一代林为实生苗造林所形成，二代林、三代林分别为一代林、二代林皆伐后萌蘖所形成。在每个经营世代林分及对照裸地分别设置 3 个 20 m × 20 m 的样地并进行基本信息调查，样地信息表见表 1。

林地内主要地下植被为天名精（*Carpesium abrotanoides*）、求米草（*Oplismenus undulatifolius*）、铁线莲（*Clematis florida*）、白屈菜（*Chelidonium majus*）、酢浆草（*Oxalis corniculata* ）、萝藦（*Metaplexis japonica*）、铁苋菜（*Acalypha australis*）、老鹳草（*Geranium wilfordii*）、荆条（*Vitex negundo* var. *heterophylla*）、茜草（*Rubia cordifolia*）、酸浆（*Physalis alkekengi*）、垂序商陆（*Phytolacca americana*）、益母草（*Leonurus japonicus*）等。

1.2.2　根际土采集

2021 年 5 月，对样地内的乔木进行每木检尺，用标准木法在每个样地内选择一株标准木，在距离树干 30 cm 处作为取样点，因刺槐为浅根系树种，故采取土样时挖至刺槐细根处，将直径小于 0.3 mm 的根系和根际土一同收集，装于自封袋中带回实验室，自然风干后将根系的附土抖下，研磨、过 100 目筛。在每个对照裸地样地中随机选取 1 个点，去除表面杂草并取得裸地土，将 3 个地点的土样混匀自然风干后进行研磨，过 100 目筛。

1.2.3　根际土浸提液的制备

取一代、二代、三代刺槐林根际土和裸地对照土壤 50 g，按 1 g 土对应 10 mL 水的比例浸泡于烧杯中，室温浸提 48 h（置于 25 ℃ 摇床中，180 r/min 振荡 12 h，静置 12 h，再振荡 12 h，最后静置 12 h），取上清液用滤纸过滤，得到质量浓度为 100 mg/mL 的刺槐根际土浸提原液，并将原液分别稀释成 1、5、10、50、100 mg/mL 的溶液，并以 0 mg/mL 的蒸馏水作为对照，装于具塞棕色玻璃瓶中，存于 4 ℃ 冰箱中待用。

1.2.4　种子萌发和幼苗生长试验

2022 年 4 月，采用培养皿滤纸法进行种子萌发试验，采用盆栽法进行幼苗生长试验。筛选籽粒饱满、大小均匀且无虫蛀的刺槐种子，先用 0.5% 的高锰酸钾溶液对种子进行浸泡消毒 2 h，将消毒后的种

表 1　样地林分基本信息

Tab. 1　Basic information of forest stands in sample plots

林分类型 Stand type	地理坐标 Geographical coordinate	林龄/a Forest age/year	平均海拔 Average altitude/m	平均坡度 Average gradient/(°)	平均胸径 Mean DBH/cm	平均树高 Mean tree height/m	平均活枝下高 Average height under living branch/m	平均郁闭度 Average canopy density
一代林 First generation forest	34°28′00″N, 111°29′48″E	15	665.00	18.33	9.71	10.11	5.59	0.47
二代林 Second generation forest	34°27′53″N, 111°29′58″E	15	645.67	13.67	10.02	9.86	4.51	0.37
三代林 Third generation forest	34°26′02″N, 111°29′18″E	16	677.00	22.33	7.25	8.61	4.65	0.53
裸地 Bare land	34°26′35″N, 111°29′56″E		649.23	10.22				

子用蒸馏水洗净后，在 75 ℃ 的水中浸种 24 h 至水自然冷却，用以破除种子硬实。

种子萌发试验。在直径为 9 cm 的培养皿底部，衬 2 层直径 9 cm 的定性滤纸，分别加入 10 mL 不同质量浓度梯度的浸提液，将 50 粒种子均匀摆放其中，盖上皿盖放置于 25 ℃、16 h 光照时长、相对湿度 80% 的光照培养箱中。每天根据发芽床干湿情况，加入适量相应的浸提液，以不淹没种子为标准。以蒸馏水（0 mg/mL）和裸地土浸提液为对照，每个处理设 3 个重复。每 24 h 记录种子的萌发数，以胚根或胚轴突破种皮 1 ~ 2 mm 为标准，连续 3 d 无种子萌发时，结束发芽试验，计算种子发芽率、发芽势、发芽速度指数、发芽指数和活力指数。从每个培养皿中随机选取 10 株幼苗，用精度 0.01 mm 的游标卡尺测量其胚轴、胚根长，用精度为 0.000 1 g 的电子天平称量其胚轴和胚根的鲜质量和干质量。

幼苗生长试验。幼苗生长试验于北京林业大学三顷园苗圃塑料大棚中进行，该大棚南北通风，顶部及东西两侧覆盖塑料膜用以遮雨。用带托盘的塑料花盆（口径 20 cm，底径 14 cm，高 14 cm）作为容器，每盆中装入等量基质，浇透水保持湿润。将催芽处理过后的刺槐种子均匀播种于花盆中，每盆播种 20 粒，每个处理设 3 个重复，初期浇灌自来水，1 个月后间苗至每盆 3 株幼苗，测量其苗高、地径，并开始浇灌不同质量浓度梯度的浸提液，对照组浇灌蒸馏水和裸地土浸提液，每盆幼苗每隔 7 d 浇灌浸提液 100 mL，试验 3 个月结束。使用游标卡尺测量幼苗苗高、地径和主根长，采用丙酮乙醇浸提法测定幼苗中叶绿素（叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素 a/b、叶绿素总量）含量，寄送样品至青岛科创质量检测有限公司，测定幼苗根系的超氧化物歧化酶（SOD）、过氧化物酶（POD）和过氧化氢酶（CAT）活性。

1.3 数据处理

使用 Excel 2019 进行数据汇总处理，计算发芽率（R_G）、发芽势（P_G）、发芽速度指数（I_{GS}）、发芽指数（I_G）、活力指数（I_V）、化感效应指数（I_R）和化感效应综合指数（SE），相关公式如下。

$$R_G = G/N \times 100\%$$

式中：G 为种子发芽数，N 为供试种子总数。

$$P_G = P/N \times 100\%$$

式中：P 为发芽高峰时累计发芽的种子数，N 为供试种子总数。

$$I_{GS} = 2 \times (5 \times X_1 + 4 \times X_2 + 3 \times X_3 + 2 \times X_4 + 1 \times X_5)$$

式中：X_1，X_2，…，X_5 指第 1，2，…，5 天种子发芽数，本试验中种子发芽数最多为 5 d，所以按 5 d 计算。

$$I_G = \sum (X_n/n)$$

式中：X_n 指第 n 天种子发芽数。

$$I_V = I_G a$$

式中：a 指苗长。

$$I_R = 1 - (C/T)\ \ (T \geqslant C)$$

$$I_R = T/C - 1 (T < C)$$

式中：C 为蒸馏水处理下对照值，T 为不同世代不同质量浓度浸提液处理值；当 $I_R > 0$ 时为促进作用，$I_R < 0$ 时为抑制作用，绝对值的大小与作用强度一致。

$$SE = \left(\sum I_{Rx} \right) / x$$

式中：当计算种子萌发的 SE 时，I_{Rx} 为种子萌发的发芽率、发芽势、发芽速度指数、活力指数、胚芽长、胚芽鲜质量、胚芽干质量、胚根长、胚根鲜质量、胚根干质量这 10 个指标的化感效应指数，x 为 10；当计算幼苗生长的 SE 时，I_{Rx} 为幼苗生长的苗高生长量、地径生长量、叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量、叶绿素 a/b、叶绿素总量、超氧化物歧化酶活性、过氧化物酶活性和过氧化氢酶活性这 9 个指标的化感效应指数，x 为 9，其中 SE > 0 为促进，SE < 0 为抑制，绝对值的大小与作用强度一致。

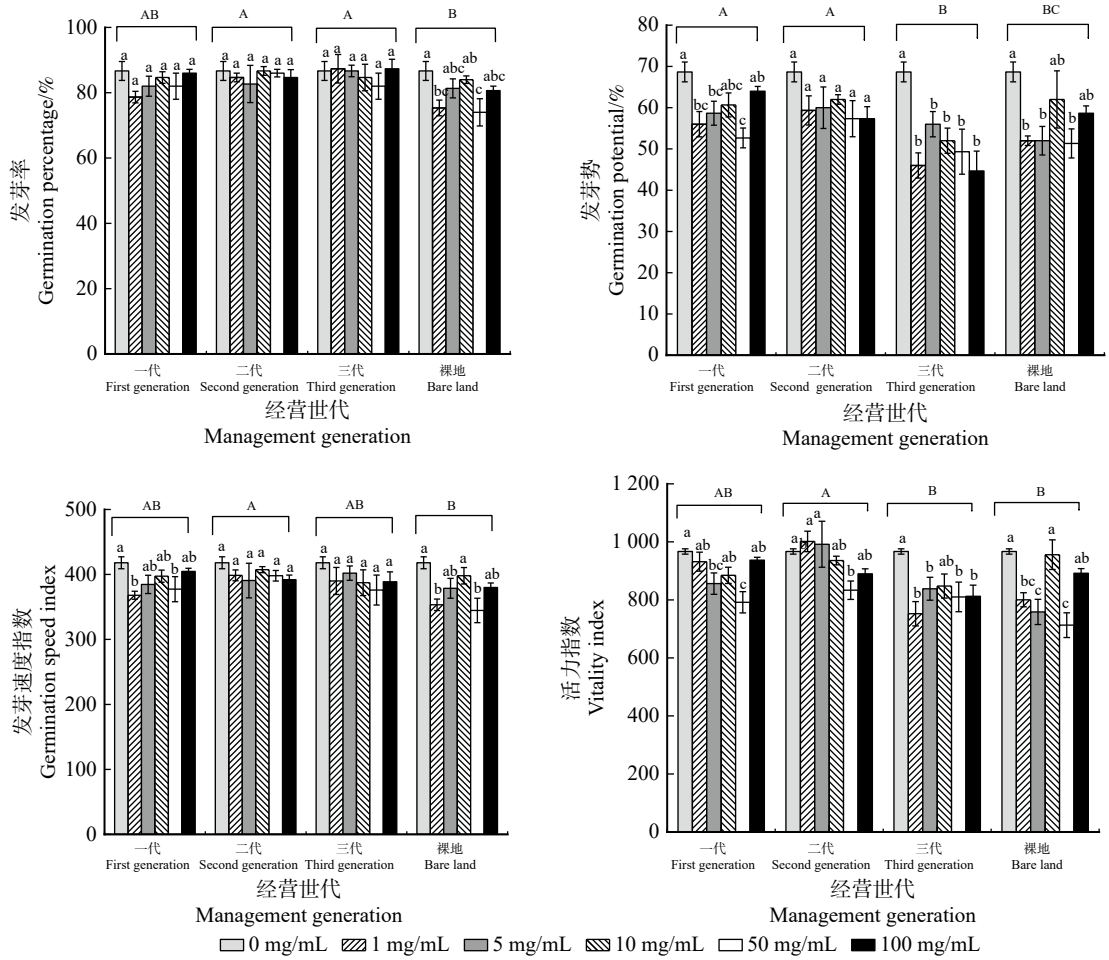
使用 SPSS 23 进行单因素方差 ANOVA 分析，通过最小显著差数检验（邓肯）法检验各指标在不同处理间的差异，$P < 0.05$ 为差异显著，并采用 origin 2022 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 不同经营世代和不同浓度刺槐根际土浸提液对自身种子萌发的影响

2.1.1 对种子发芽的影响

二代林根际土浸提液处理的发芽率、发芽势、发芽速度指数和活力指数均显著高于裸地对照（$P < 0.05$，图 1）。在一代林中，不同质量浓度（1、5、10、50、100 mg/mL）浸提液处理下的发芽率、发芽势、发芽速度指数和活力指数均低于 0 mg/mL（对照），其中 1 mg/mL 的发芽率和发芽速度指数均为最低，分别比对照降低了 9.23% 和 11.96%，活力指数则随着质量浓度的提高表现出先下降后升高后下降后升高的趋势，在 50 mg/mL 时达到最低值，并显著低于除 5 mg/mL 质量浓度浸提液处理外的其他质量浓度浸提液处理（$P < 0.05$）。在二代林中，不同质量浓度处理下的发芽率、发芽势和发芽速度指数均低于对照，但并不存在显著差异；活力指数则随着质量浓度的



不同小写字母表示同种经营世代不同质量浓度间差异显著（$P < 0.05$）；不同大写字母表示不同经营世代间差异显著（$P < 0.05$）。下同。
Different lowercase letters indicate significant differences between varied mass concentrations in the same generation ($P < 0.05$). Different capital letters indicate significant differences between varied management generations ($P < 0.05$). The same below.

图 1　不同根际土浸提液处理对刺槐种子发芽的影响

Fig. 1　Effects of different rhizosphere soil extracts on germination of *Robinia pseudoacacia* seeds

提高先升高后下降后升高，在 1 mg/mL 时达到最高，50 mg/mL 时达到最低。三代林中，发芽率、发芽速度指数虽在不同质量浓度处理下有差别，但与对照相比差异并不显著；发芽势与活力指数呈现出随着质量浓度提高先降低后增高后降低的趋势，除 10 mg/mL 处理外，不同质量浓度处理下活力指数均显著低于对照（$P < 0.05$），活力指数在 1 mg/mL 时达到最低值，发芽势在 100 mg/mL 时达到最低值。

2.1.2　对种子胚芽生长的影响

不同经营世代根际土浸提液处理对刺槐种子胚芽鲜质量和胚芽干质量的影响存在差异（图 2）。其中，裸地土浸提液处理的胚芽鲜质量和干质量综合各处理质量浓度的平均值最高，分别为 0.117 5、0.012 2 g；三代林根际土浸提液处理的胚芽鲜质量平均值和二代林根际土浸提液处理的胚芽干质量平均值最低，分别为 0.103 4 g 和 0.010 1 g，比裸地土浸提液处理下平均值分别显著下降了 12.01% 和 5.18%（$P < 0.05$），且不同质量浓度根际土浸提液的胚芽鲜质量平均值随着经营代数的增加而逐渐降低。胚芽长度无论是在不同经营世代根际土浸提液处理间，还是不同质量浓度处理间，均无显著差异。在一代林中，不同质量浓度处理下的胚芽鲜质量均高于对照，胚芽干质量均低于对照，但均不显著。在二代林中，各质量浓度处理下的胚芽鲜质量并无显著差异，胚芽干质量随着浸提液质量浓度的增加呈现出先降低后增高再降低的趋势，在 100 mg/mL 时达到最低，除 1 mg/mL 处理外均显著低于对照（$P < 0.05$）。在三代林中，100 mg/mL 处理对胚芽鲜质量抑制作用显著，而胚芽干质量在不同质量浓度间并无显著差异；在裸地中，除 5 mg/mL 浓度处理外，与对照相比，不同质量浓度的裸地土浸提液均对刺槐种子胚芽鲜质量和干质量呈现出促进的作用。

2.1.3　对种子胚根生长的影响

三代根际土浸提液处理下的胚根长和胚根鲜质量与裸地土浸提液处理存在显著差异（$P < 0.05$），胚根干质量与一代土浸提液处理下存在显著差异（$P <$

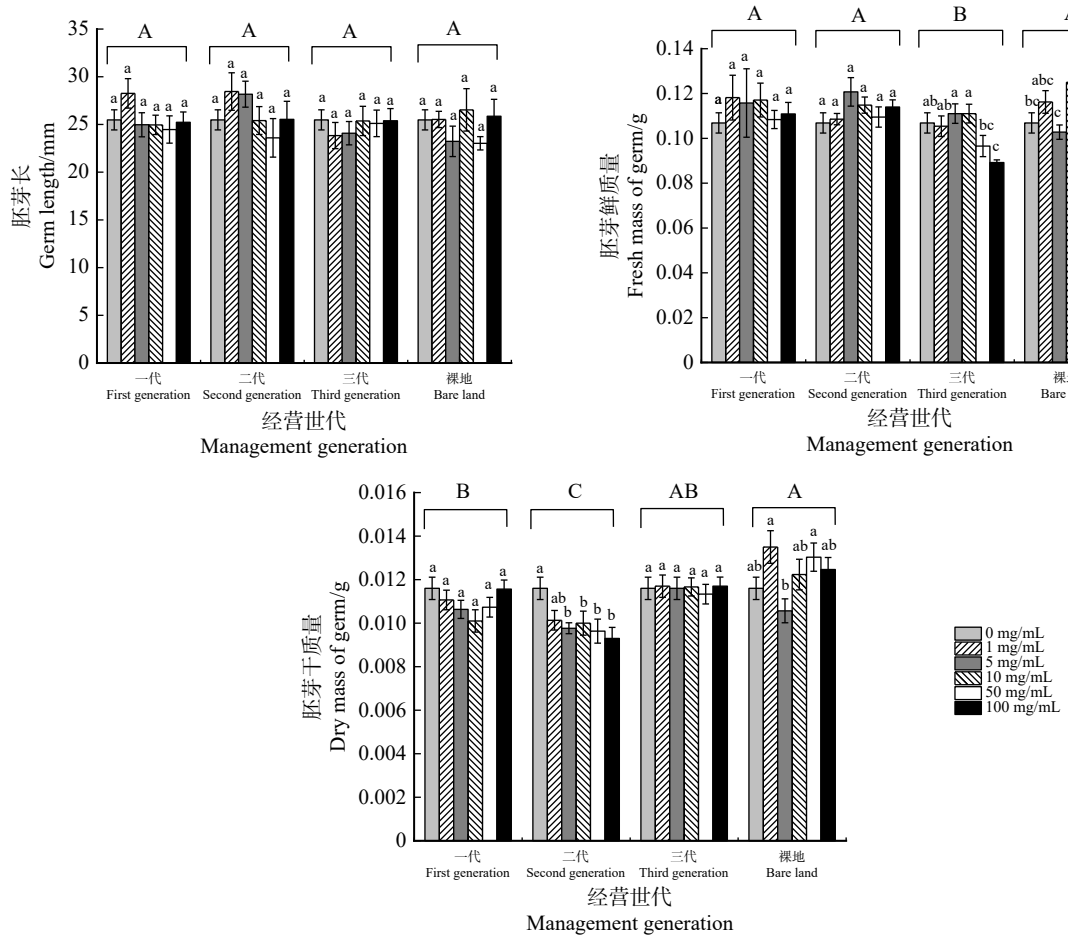


图 2 不同根际土浸提液处理对刺槐种子胚芽生长的影响

Fig. 2 Effects of different rhizosphere soil extracts on growth of *R. pseudoacacia* seed germ

0.05，图 3）。其中，一代、二代、三代林中，不同质量浓度梯度根际土浸提液处理下的胚根长平均值均高于裸地土，分别为 52.882、54.318、58.110 mm。裸地土不同浓度浸提液处理下的胚根鲜质量平均值最高，显著高于三代林平均值（$P < 0.05$）。针对胚根长，在一代林中，与对照相比，仅在 100 mg/mL 处理下对胚根长抑制作用显著；在三代林中，随着浸提液质量浓度的提高，胚根长呈现出先增高后降低的趋势，在 100 mg/mL 时达到最低值，不同质量浓度的裸地土浸提液对胚根伸长与对照相比也均为抑制作用，但仅在 1 mg/mL 和 100 mg/mL 处理下抑制作用显著。针对胚根鲜质量，一代林和二代林中，不同质量浓度根际土浸提液处理之间均无显著差异；三代林中，胚根鲜质量随着质量浓度的提高先增加后降低；裸地土中，10、50、100 mg/mL 质量浓度处理时与对照相比促进作用显著（$P < 0.05$）。针对胚根干质量，每种经营世代下，不同质量浓度浸提液之间与对照并无显著差异，推测质量浓度变化并不会对胚根干质量产生显著影响。

2.1.4 对种子萌发的化感效应综合指数

通过刺槐种子萌发过程的发芽率、发芽势、发芽速度指数、活力指数、胚芽长、胚芽鲜质量、胚芽干质量、胚根长、胚根鲜质量、胚根干质量这 10 个指标计算化感效应综合指数，不同刺槐经营世代和不同质量浓度根际土浸提液对刺槐种子萌发的化感效应综合指数如图 4 所示。除二代根际土 5 mg/mL 质量浓度和裸地土 10 mg/mL 质量浓度处理外，不同经营世代不同浓度处理下的化感效应综合指数均为负值，也就是与对照处理相比，对种子萌发是抑制作用，抑制作用平均强度从大到小依次是三代林、一代林、裸地、二代林（图 4）。在一代林中，随着根际土浸提液质量浓度的增加，对刺槐种子萌发的抑制作用逐渐增强，在 50 mg/mL 和 100 mg/mL 时抑制作用相近均较强，化感效应综合指数分别为−0.839 8 和−0.841 0。在二代、三代林中，仅在二代林 5 mg/mL 时表现出促进作用，综合化感效应指数为 0.037 4，在三代林中，随着根际土浸提液质量浓度的增加，对刺槐种子萌发的抑制作用均表现为先减弱后增强的趋势，二代、三代林中抑制作用最强的质量浓度分别为 50、100 mg/mL，综合化感效应指数分别达−0.704 0、−1.384 4。在裸地中，1 mg/mL 和 5 mg/mL 质量浓度处理下为抑制作用，在 10 mg/mL 时由抑制转为促进

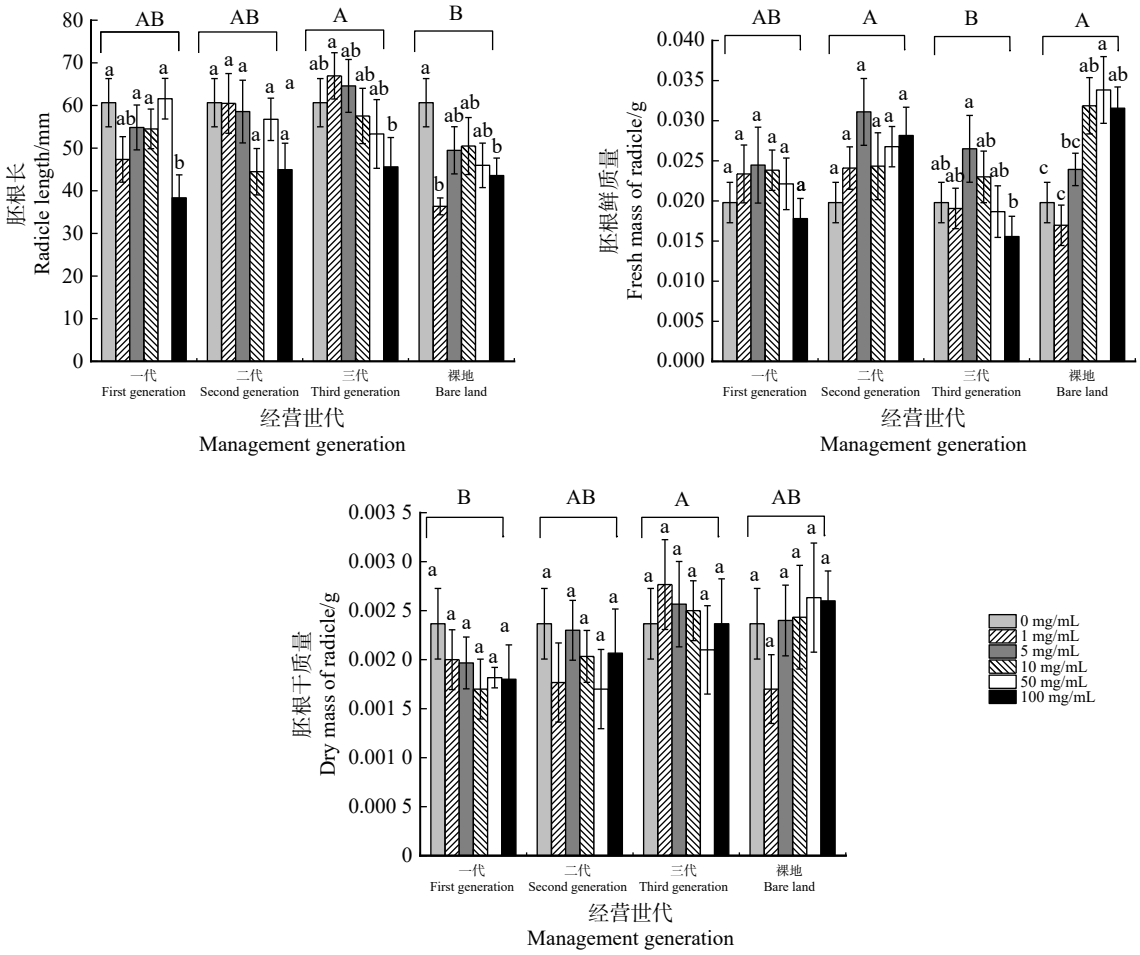


图 3　不同根际土浸提液处理对刺槐种子胚根生长的影响

Fig. 3　Effects of different rhizosphere soil extracts on radicle growth of *R. pseudoacacia* seeds

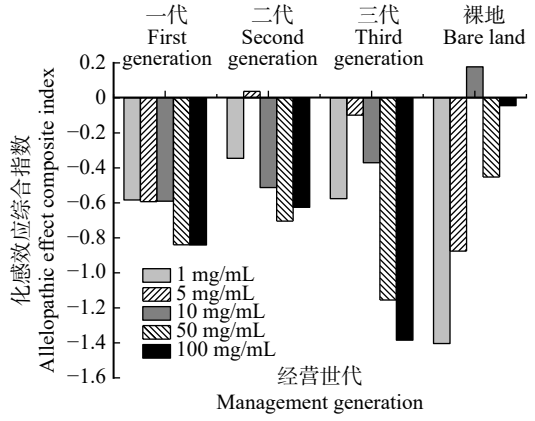


图 4　不同根际土浸提液处理对刺槐种子萌发的化感效应综合指数

Fig. 4　Comprehensive index of allelopathic effect of different rhizosphere soil extracts on seed germination of *R. pseudoacacia*

作用，在 50 mg/mL 时再次转为抑制作用。

2.2　不同经营世代和不同浓度刺槐根际土浸提液对自身幼苗生长的影响

2.2.1　对刺槐幼苗生长的影响

不同经营世代根际土浸提液处理下的刺槐幼苗苗高生长量和地径生长量具有一定程度的差异，一代、二代林浸提液处理下的苗高生长量、地径生长量均显著高于裸地对照（$P < 0.05$，图 5），表明与裸地相比，不同经营世代的根际土浸提液对刺槐幼苗生长均具有促进作用。针对苗高生长量，一代林中除 5 mg/mL 时显著高于对照（$P < 0.05$）外，其他质量浓度之间差异并不显著，二代林中苗高生长量随着浸提液质量浓度的增加呈现出先增加后降低的趋势，除 100 mg/mL 达到最低时低于对照外，其余质量浓度下苗高生长量均高于对照，三代林和裸地对照浸提液的质量浓度变化对苗高生长量的影响差异均不显著。针对地径生长量，各经营世代中仅在三代林 5 mg/mL 时与对照相比显著降低（$P < 0.05$），其余三个世代中各质量浓度与对照相比并无显著差异。

2.2.2　对刺槐幼苗叶绿素含量的影响

不同经营世代根际土浸提液处理对刺槐幼苗叶绿素含量均有一定影响（图 6）。其中二代林处理的各项指标平均值均为最大值，叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素总量和叶绿素 a/b 分别为 13.593 1、5.809 7、19.402 8 mg/g 和 2.348 1，裸地对照处理的各项指标均为最小值，叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素总量和叶绿素 a/b 分别为 7.161 8、3.308 1、10.469 9 mg/g 和 2.125 8，与裸地对照相比，一、二、三代林浸提液处理对刺槐幼苗叶绿素的影响均为促进作用。针对叶绿素 a，不

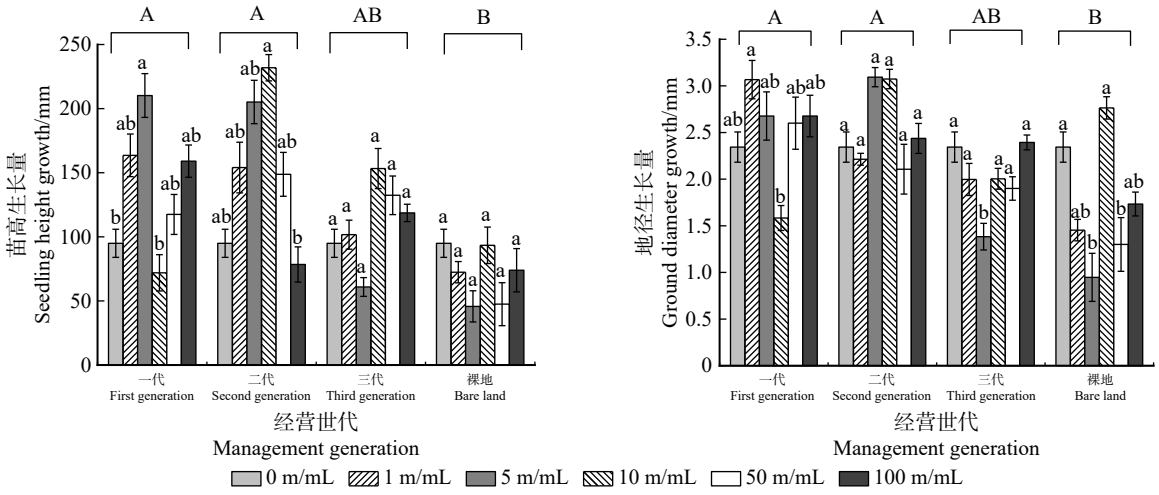


图 5 不同根际土浸提液处理对刺槐幼苗生长的影响

Fig. 5 Effects of different rhizosphere soil extracts on growth of *R. pseudoacacia* seedlings

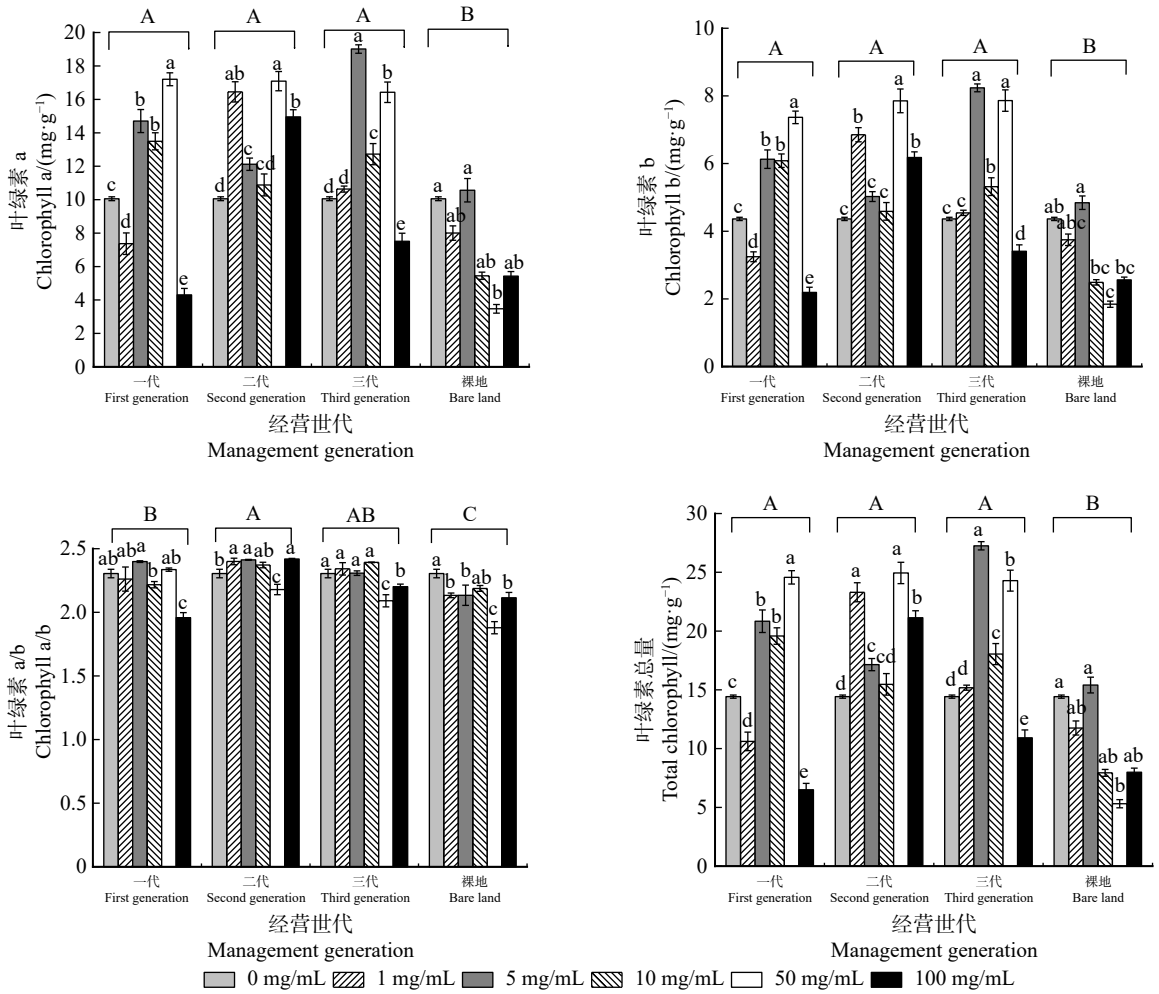


图 6 不同根际土浸提液处理对刺槐幼苗叶绿素含量的影响

Fig. 6 Effects of different rhizosphere soil extracts on chlorophyll contents of *R. pseudoacacia* seedlings

同质量浓度浸提液处理下的刺槐幼苗存在显著差异（$P < 0.05$），其中一代林 1 mg/mL、100 mg/mL 以及三代林 100 mg/mL 叶绿素 a 含量均显著低于对照，分别为 10.057 3、4.307 2、7.511 2 mg/g，其他一、二、三代林质量浓度处理中除二代 10 mg/mL、三代 1 mg/mL 外，与对照相比，均具有显著促进作用（$P < 0.05$）；裸地土浸提液对叶绿素 a 含量除 5 mg/mL 外均具有抑制作用，在 50 mg/mL 时抑制作用达到最强。叶绿素 b 含量与叶绿素总量的变化趋势与叶绿素 a 含量变化趋势较为一致，在一代林中，均在 50 mg/mL

处理时达到最大值，叶绿素 b 含量与叶绿素总量分别为 7.366 0 和 24.570 5 mg/g；二代林中，1、50、100 mg/mL 质量浓度处理下的叶绿素 b 含量和叶绿素总量均具有显著促进作用（$P < 0.05$），其他质量浓度处理与对照相比并无显著差异；裸地土浸提液处理中除 50 mg/mL 时叶绿素 b 含量与叶绿素总量显著低于对照外（$P < 0.05$），其他质量浓度处理下与对照相比并无显著差异。在所有质量浓度处理下，叶绿素 a/b 的值均高于 1.5，在三代林中，浸提液质量浓度较高时叶绿素 a/b 的值相对较低；在裸地土中，不同质量浓度处理下的叶绿素 a/b 值均低于对照，在 50 mg/mL 时达到最低值。

2.2.3　对刺槐幼苗保护酶活性的影响

不同经营世代浸提液处理间的刺槐幼苗根系中 POD、SOD 和 CAT 活性差异并不显著（图 7）。不同质量浓度一代林浸提液对 POD 活性影响不显著，二代林在 5 mg/mL、10 mg/mL、50 mg/mL 质量浓度处理下 POD 活性显著低于对照 0 mg/mL（$P < 0.05$），三代林除 100 mg/mL 质量浓度处理下的 POD 活性与对照无显著差异外，其余质量浓度处理下均显著低于对照（$P < 0.05$），裸地土浸提液仅在 10 mg/mL 处理下对 POD 活性抑制作用显著。在三代林中随着浸提液质量浓度的增加对 POD 活性抑制作用先增强后减弱，且在 5 mg/mL 时抑制作用达到最强。不同质量浓度根际土浸提液对刺槐幼苗根系 SOD 活性的影响仅在三代林 50 mg/mL 浸提液中存在显著抑制作用（$P < 0.05$），其余各组处理与对照相比差异并不显著。无论是在不同经营世代根际土浸提液处理间，还是不同质量浓度处理间，CAT 活性均无显著差异，推测不同经营世代和不同质量浓度的根际土浸提液并不会对刺槐幼苗 CAT 活性产生影响。

2.2.4　对刺槐幼苗生长的化感效应综合指数

不同刺槐经营世代及不同质量浓度根际土浸提液对刺槐幼苗生长的化感效应综合指数如图 8 所示。在一代林与三代林中，化感效应综合指数变化较为一致，均随着浸提液质量浓度的增加，对刺槐幼苗生长由抑制作用转为促进作用再转为抑制作用，一代林和三代林促进作用最强分别在 5 mg/mL 和 50 mg/mL 时，化感效应综合指数分别为 0.161 4 和 0.106 7，在 100 mg/mL 时均为抑制作用，且抑制作用最强。在二代林中，不同质量浓度刺槐根际土浸提液对刺槐幼苗生长均为促进作用，但 100 mg/mL

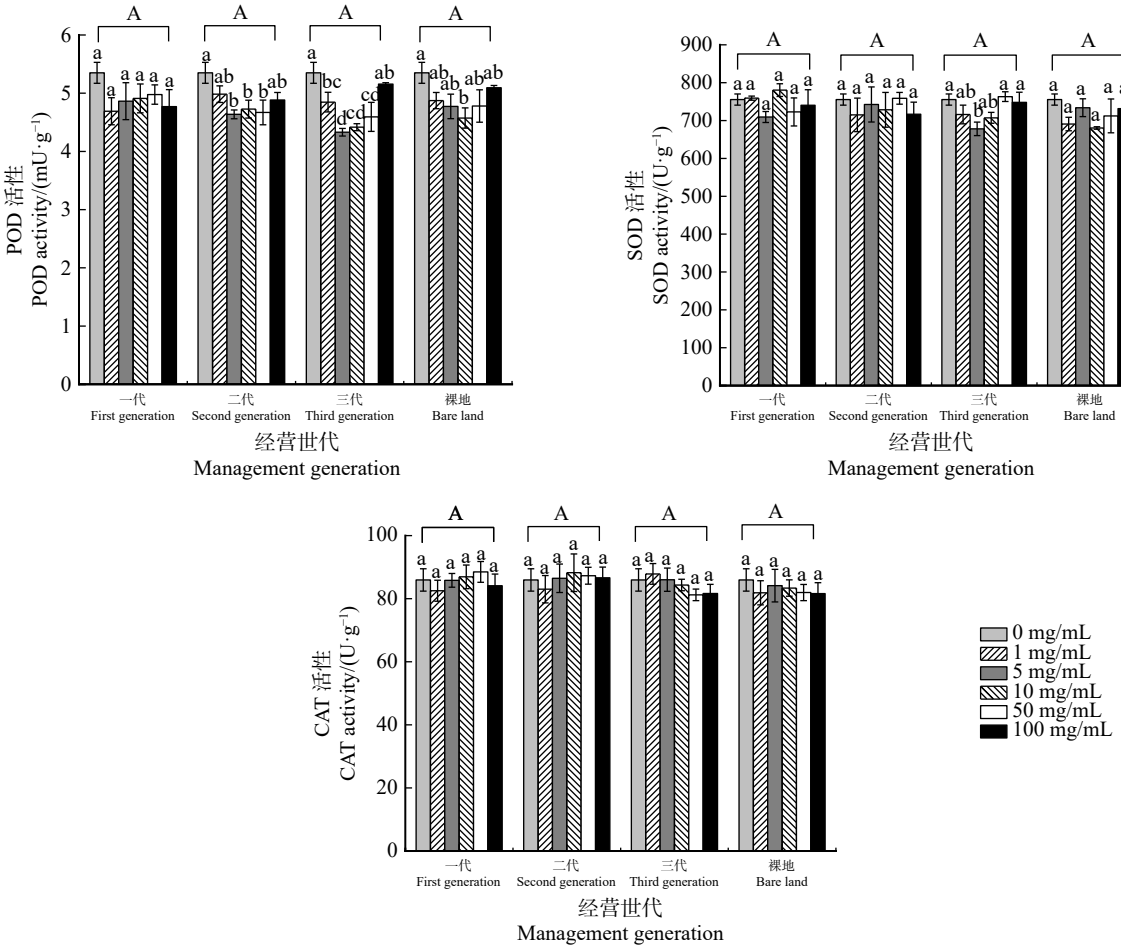


图 7　不同根际土浸提液处理对刺槐幼苗保护酶活性的影响

Fig. 7　Effects of different rhizosphere soil extracts on protective enzyme activities of *R. pseudoacacia* seedlings

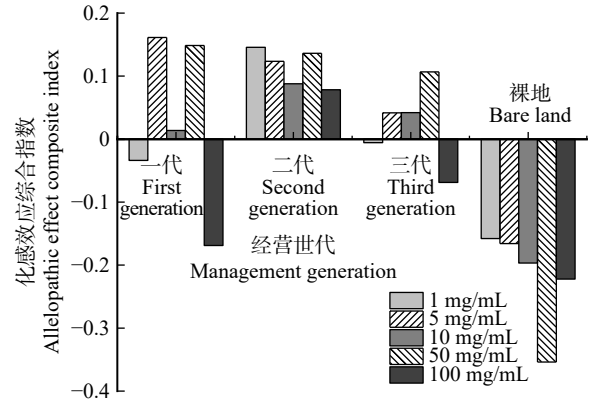


图 8 不同根际土浸提液处理对刺槐幼苗生长的化感效应综合指数

Fig. 8 Comprehensive index of allelopathic effects of different rhizosphere soil extracts on growth of *R. pseudoacacia* seedlings

质量浓度浸提液处理下促进作用最弱。裸地中，随着浸提液质量浓度的增加，对刺槐幼苗生长的抑制作用先增强后减弱，在 50 mg/mL 时达到最大值，化感效应综合指数为−0.353 8。

3 讨 论

3.1 不同经营世代及不同浓度刺槐根际土浸提液对自身种子萌发的影响

种子萌发对植物生长发育至关重要，也是植物生命周期中的重要环节[27−28]。本研究发现，不同经营世代及不同质量浓度刺槐根际土浸提液对自身种子萌发过程的发芽势、发芽速度指数、活力指数均有不同程度的抑制作用。刺槐根际土浸提液能够显著延缓其自身种子的萌发速度，当种子吸水膨胀而萌发时，浸提液中的化感物质会通过渗透作用进入种子中并通过某种作用方式影响其细胞的有丝分裂和伸长[29]，抑制其发芽速率，但对刺槐种子的最终发芽率影响并不大，这与已有研究美国杜鹃（*Rhododendron maximum*）和山月桂（*Kalmia latifolia*）叶片提取液对苇状羊茅（*Festuca arundinacea*）种子萌发的影响一致[30]。本研究中，刺槐根际土浸提液对刺槐种子胚根伸长的影响大于胚芽，这是由于在刺槐种子萌发中，坚硬的种皮阻碍了化感物质对种子的直接影响，而与浸提液直接接触的根尖则对化感物质的表现更为明显[29]。胚芽的生长来自胚根的营养输送，当胚根生长受到一定胁迫时，必然会影响胚芽的水分和营养供给，导致胚芽生长受到影响[24]。胚根及胚芽的鲜质量与干质量状况能够反映化感物质对受体植物体内水分状况及干物质的积累情况[31]，本研究中，不同处理下的刺槐幼苗鲜质量与干质量均存在不同程度的差异，这可能是叶绿素含量受到影响，而导致幼苗体内生物量的积累或消耗[32]。

本研究表明，刺槐根际土浸提液对刺槐种子萌发具有质量浓度效应，一般表现为低浓度抑制作用低或呈现轻微促进作用，而高浓度抑制作用强，这与前人研究一致[23,26]。这是由于当浸提液浓度低时，化感物质含量较少，对受体产生的胁迫作用适当，而当浓度过高时，化感物质会破坏受体结构而抑制受体植物的萌芽生长[33]。不同经营世代间刺槐根际土浸提液的化感作用也具有显著差异，根据化感效应综合指数来看，对刺槐种子萌发的抑制作用影响为三代 > 一代 > 二代。研究表明，随着刺槐经营世代的逐渐增加，其土壤中营养物质也逐渐增加[12]，那么刺槐根际土浸提液中则同时存在有化感物质和营养物质，在三代林中，刺槐根际土中化感物质积累较多，则表现出较强的抑制作用，而二代林中则可能由于土壤中营养成分提高但并未积累很多的化感物质，则抑制作用较弱。与裸地土对比，一代林、三代林根际土浸提液对刺槐种子萌发均表现出抑制作用，而裸地土浸提液自身也具有一定的抑制作用，这可能是由于裸地中并未有刺槐林所产生的营养物质，同时裸地中生长有大量可能具备化感作用的荒草，导致其浸提液对刺槐种子萌发呈现抑制作用。

3.2 不同经营世代及不同浓度刺槐根际土浸提液对自身幼苗生长的影响

叶片中叶绿素的含量在植物光合作用中发挥着至关重要的作用，当叶片中光合色素含量较低时，会导致光能吸收及传递受阻，最终导致光合效率变低[34−35]，影响其生物量的积累，而当叶绿素含量较高时，则会促进光合作用。在本研究中，除一代林中 1、100 mg/mL 和三代林 100 mg/mL 根际土浸提液处理外，其余各处理组叶绿素含量均高于对照 0 mg/mL，且各经营世代叶绿素含量均高于裸地对照，这可能是由于刺槐根际土中存在的营养物质在一定程度上促进了刺槐叶绿素的合成，这也是导致不同处理下刺槐苗高和地径生长量高于裸地对照的原因之一。在叶绿素总含量较高时，低的叶绿素 a/b 更有利于叶片光合速率，而当叶绿素总含量较低时，高的叶绿素 a/b 更能促进叶片光合作用[36]。在本研究中，二代林处理下的叶绿素总量较高，一代林处理下的叶绿素总量较低，而两种处理下叶绿素 a/b 值相近，推测叶绿素 a/b 属于较低的水平，所以，在二代林中更有利于刺槐幼苗的光合作用。

不同经营世代刺槐根际土浸提液处理刺槐幼苗后，其 POD 酶活性显著降低，SOD 酶和 CAT 酶活性并无显著影响，与裸地土处理对比，仅二代林、三代林处理下的 POD 酶活性比裸地处理下低，其余处理下的 POD、SOD 和 CAT 酶均高于裸地对照。当植物遭受逆境胁迫时，会产生大量活性氧，引发一系列生

化反应，造成细胞膜脂过氧化，导致细胞的损伤[37−38]，SOD 会清除植物体内的 O_2^-并产生 H_2O_2[39−40]，POD 和 CAT 则会将细胞中过量的 H_2O_2 转化成 O_2 和 H_2O 从而降低活性氧对细胞的毒害作用[41]。在本研究中，POD 活性受到抑制而 SOD 和 CAT 活性不变时则无法及时清除 SOD 产生的 H_2O_2，使细胞内活性氧代谢平衡遭到破坏，导致细胞内 H_2O_2 积累而造成细胞膜脂过氧化，引发一系列的生理生化反应，给刺槐幼苗带来伤害。与裸地相比下，不同经营世代 SOD 活性均增强，则会产生过量的 H_2O_2，而此时二代林和三代林中 POD 活性的降低将会破坏细胞被活性氧的代谢平衡，因此二代林与三代林处理下刺槐幼苗受到的伤害更深。

3.3　不同经营世代及不同浓度刺槐根际土浸提液对自身种子萌发和幼苗生长的综合化感效应

本研究表明，不同经营世代根际土浸提液对刺槐种子萌发较多呈现抑制作用，对刺槐幼苗生长则较多呈现促进作用，并且存在浓度效应，较高浓度的浸提液对刺槐种子萌发的抑制作用高于较低浓度，一代和三代浸提液处理中在 100 mg/mL 时对幼苗生长的促进作用转为抑制作用。此结果与大多数使用水浸提研究植物化感作用的结果相似[42−44]，在浸提液高浓度时作用效果高于低浓度。这是由于当浸提液浓度较低时，含有的化感物质较少，对受体种子或幼苗产生的适当的胁迫作用，恰好促进了其生长或对其生长影响不大，而当浓度较高时，含有的化感物质太多，可能超过了其受体植物的耐受范围，从而破坏植物体内细胞结构从而影响其生长[17]。本研究中随着经营世代的增加，对刺槐种子萌发和胚生长的抑制作用呈现先减弱后增强的趋势，三代林中抑制作用最强，由于刺槐的更新属于皆伐后萌蘖的方式，二代林、三代林生长中保留原来的根系，则可能导致土壤中化感物质的积累，另外衰老腐烂的根系经土壤微生物的作用也可能释放出更多的化感物质，所以可能导致三代林中化感物质较多[9]。化感物质的分泌同样受到林分密度的制约[45]，在前期样地调查中发现，三代刺槐林密度较高，则可能产生更多化感物质。有研究表明，刺槐林中随着经营世代的增加，其土壤中养分含量和微生物含量都得到了一定的提升[11−12]，则二代林中化感抑制作用减弱则可能是由于根际土中对刺槐种子萌发和幼苗生长有利的营养物质起到一定的促进作用，也可能是由于微生物的活动使部分化感物质分解转化为无毒物质。

刺槐根际土浸提液对刺槐种子萌发呈现抑制作用而对刺槐幼苗生长无影响或呈现促进作用。随着刺槐生长到幼苗时期，对外界环境的抗逆性逐渐增强，或是由于一些外界原因比如栽植幼苗的基质土可能会在一定程度上稀释其化感作用，土壤微生物也会在分解化感物质成为一些没有活性的小分子物质或者将一些小分子化感物质转化为没有活性的大分子物质从而影响其化感效果[46]。

4　结　　论

（1）除二代林 5 mg/mL 和裸地 10 mg/mL 质量浓度处理下对刺槐种子萌发具有促进作用外，不同经营世代和不同质量浓度刺槐根际土浸提液对刺槐种子萌发均具有抑制作用，不同林分间抑制作用强度从大到小依次是三代林、一代林、裸地、二代林。在一代林中，随着根际土浸提液质量浓度的增加，其对刺槐种子萌发的抑制作用逐渐增强；二代林中，根际土浸提液对刺槐种子萌发的影响由抑制转为促进再转为抑制作用；三代林中，随着根际土浸提液质量浓度的增加，其对刺槐种子萌发的抑制作用均表现为先减弱后增强的趋势。

（2）除裸地以外，不同经营世代对刺槐幼苗生长均存在促进作用，促进作用强度从大到小依次是二代林、一代林、三代林。在一代林与三代林中，综合化感效应均随着浸提液质量浓度的增加，对刺槐幼苗生长由抑制转为促进作用再转为抑制作用，在二代林中随着浸提液质量浓度逐渐增高，促进作用也由逐渐减弱转为增强再减弱。

参　考　文　献

[1] 孙长忠, 沈国舫. 对我国人工林生产力评价与提高问题的几点认识 [J]. 世界林业研究, 2001, 14(1): 76−80.
Sun C Z, Shen G F. Some opinions on the evaluation and improvement of plantation productivity in China[J]. World Forestry Research, 2001, 14(1): 76−80.

[2] 茹桃勤, 李吉跃, 张克勇, 等. 国外刺槐 (*Robinia pseudoacacia*) 研究 [J]. 西北林学院学报, 2005, 20(3): 102−107.
Ru T Q, Li J Y, Zhang K Y, et al. Review on research of Black Locust (*Robinia pseudoacacia*) in abroad[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2005, 20(3): 102−107.

[3] 伍征明. 刺槐的经济价值与造林技术 [J]. 湖南林业科技, 2002, 29(1): 79−80.
Wu Z M. The economic value and afforestation techniques of *Robinia pseudoacacia*[J]. Hunan Forestry Science & Technology, 2002, 29(1): 79−80.

[4] 丁鹏. 刺槐的利用价值与嫁接技术 [J]. 现代农业科技, 2015, 50(19): 173−177.
Ding P. Utilization value and grafting technology of locust[J]. Xiandai Nongye Keji, 2015, 50(19): 173−177.

[5] 高洪真, 毕君. 刺槐蜜源林培育技术研究 [J]. 东北林业大学学报, 1998, 26(4): 29−32.
Gao H Z, Bi J. The cultivation technique of black locust nectariferous forest[J]. Journal of Northeast Forestry University,

1998, 26(4): 29−32.

[6] 王秀芳. 刺槐四倍体饲料型无性系区域化试验初步研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2003.
Wang X F. The preliminary research of tetraploid fodder clones of *Robinia pseudoacacia* in regional trial[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2003.

[7] 商立志. 刺槐薪炭林营造及管理 [J]. 河北林业科技, 2009, 37(4): 129.
Shang L Z. Plantation and management of *Robinia pseudoacacia* fuel forest[J]. The Journal of Hebei Forestry Science and Technology, 2009, 37(4): 129.

[8] 陈一鹗, 刘康, 李文华. 皆伐萌蘖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 refoeming of locust forest[J]. Bulletion of Soil and Water Conservation, 1995, 15(6): 64−68.

[9] 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.
Geng 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.

[10] 张长庆, 张文辉. 黄土高原不同立地条件下刺槐人工林种群的无性繁殖与更新 [J]. 西北农林科技大学学报 (自然科学版), 2009, 37(1): 135−144.
Zhang C Q, Zhang W H. A study on asexual reproduction and regeneration of *Robinia pseudoacacia* plantations in different habitats in hilly area of the Loess Plateau[J]. Journal of Northwest A& F University, 2009, 37(1): 135−144.

[11] 王雅慧, 彭祚登, 李云. 豫西浅山区不同世代刺槐林土壤生物学特性 [J]. 中南林业科技大学学报, 2021, 41(3): 140−148.
Wang Y H, Peng Z D, Li Y. Soil biological characteristics of different generations of *Robinia pseudoacacia* forests in western Henan[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2021, 41(3): 140−148.

[12] 王雅慧, 彭祚登, 李云. 豫西浅山区不同世代刺槐林土壤养分与结构特征 [J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(3): 54−64.
Wang Y H, Peng Z D, Li Y. Soil nutrient and structure characteristics of *Robinia pseudoacacia* in different nerations in the shallow mountain areas of western Henan Province, central China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2020, 42(3): 54−64.

[13] 马艳丽. 化感作用在林业中的研究现状 [J]. 林业科技, 2012, 37(6): 48−52.
Ma Y L. Research status of allelopathy in forestry[J]. Forestry Science & Technology, 2012, 37(6): 48−52.

[14] 崔磊, 赵秀海, 张春雨. 化感作用研究动态及展望 [J]. 浙江林业科技, 2006, 26(1): 65−70.
Cui L, Zhao X H, Zhang C Y. Research trends and prospects of allelopathy[J]. Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology, 2006, 26(1): 65−70.

[15] 马祥庆, 刘爱琴, 黄宝龙. 杉木人工林自毒作用研究 [J]. 南京林业大学学报, 2000, 24(1): 15−19.
Ma X Q, Liu A Q, Huang B L. A study on self-poisoning effects of Chinese fir plantation[J]. Journal of Nanjing Forestry University, 2000, 24(1): 15−19.

[16] 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.

[17] 王仙, 魏天兴, 朱金兆, 等. 黄土丘陵区油松根系化感效应研究 [J]. 北京林业大学学报, 2015, 37(4): 82−89.
Wang X, Wei T X, Zhu J Z, et al. Allelopathic effect of *Pinus tabuliformis* root in loess hilly area[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2015, 37(4): 82−89.

[18] 赵源, 邓蓉, 黄钧. 半夏连作障碍成因及防治研究进展 [J]. 应用与环境生物学报, 2022, 28(4): 1102−1108.
Zhao Y, Deng R, Huang J. Research advances on causes and prevention for the continuous cropping obstacle of *Pinellia ternata*[J]. Journal of Applied and Environmental Biology, 2022, 28(4): 1102−1108.

[19] 刘雨艳, 保丽美, 魏云林, 等. 连作三七根际土壤自毒物质与微生物互作研究进展 [J]. 中药材, 2022, 45(1): 242−247.
Liu Y Y, Bao L M, Wei Y L, et al. Research progress on the interaction between self toxic substances and microorganisms in the rhizosphere soil of continuous cropping *Panax notoginseng*[J]. Journal of Chinese Medicinal Materials, 2022, 45(1): 242−247.

[20] 李轲, 杨柳. 刺槐根际土壤水浸提液对 5 种常见园林植物种子萌发及幼苗生长的化感作用 [J]. 种子, 2019, 38(6): 115−120.
Li K, Yang L. Allelopathic effects of aqueous extracts from rhizosphere soil of *Robinia pseudoacacia* Linn on seed germination and seeding growth of five kinds of common garden plants[J]. Seed, 2019, 38(6): 115−120.

[21] 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 effects of decomposed liquid of *Robinia pseudoacacia* leaf litter on three crops[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2021, 36(2): 116−122.

[22] 荆蓉, 彭祚登, 李云, 等. 刺槐林腐殖质浸提液对自身种子萌发和幼苗生长的影响 [J]. 西北农林科技大学学报 (自然科学版), 2023, 51(7): 1−15.
Jing R, Peng Z D, Li Y, et al. Effects of humus extracts from *Robinia pseudoacacia* forests on seed germination and seedling growth[J]. Journal of Northwest A& F University, 2023, 51(7): 1−15.

[23] 刘冬杰, 刘增文. 刺槐枯落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.

[24] 荆蓉, 彭祚登, 李云, 等. 刺槐林下凋落物浸提液对刺槐种子萌发和胚生长的化感作用 [J]. 浙江农林大学学报, 2023, 40(1): 97−106.
Jing R, Peng Z D, Li Y, et al. Allelopathy of the litter extracts from *Robinia pseudoacacia* forest on its seed germination and embryo growth[J]. Journal of Zhejiang A& F University, 2023, 40(1): 97−106.

[25] 王仙. 黄土丘陵区油松和刺槐根部化感效应研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2015.
Wang X. Allelopathic effects of *Pinus tabuliformis* root and *Robinia pseudoacacia* root research in loess hilly area[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2015.

[26] 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.
Wang H. Study on *Robinia pseudoacacia* autointoxication and interspecific allelopathy between *Robinia pseudoacacia* and its associated tree species[D]. Baoding: Agricultural University of Hebei, 2009.

[27] Barrero J M, Downie A B, Xu Q. A role for barley CRYPTOCHROME1 in light regulation of grain dormancy and germination[J]. The Plant Cell, 2014, 26(3): 1094−1104.

[28] Yushi I, Yuka K, Shao-Hui Z, et al. Regulation of soybean seed germination through ethylene production in response to reactive oxygen species[J]. Annals of Botany, 2013, 111(1): 95−102.

[29] 贾梅花, 王哲, 刘金福, 等. 格氏栲天然林凋落物对马尾松种子萌发的影响 [J]. 林业科学研究, 2021, 34(1): 128−136.
Jia M H, Wang Z, Liu J F, et al. Effects of *Castanopsis kawakamii* forest litter on seed germination of *Pinus massoniana*[J]. Forest Research, 2021, 34(1): 128−136.

[30] McEwan W R, Arthur-Paratley G L, Rieske K L, et al. A multi-assay comparison of seed germination inhibition by *Lonicera maackii* and co-occurring native shrubs[J]. Flora-Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants, 2009, 205(7): 475−483.

[31] 王丽红, 赵东平. 山羽藓对青海云杉种子萌发和幼苗生长的化感作用 [J]. 分子植物育种, 2020, 18(1): 316−322.
Wang L H, Zhao D P. The allelopathy of *Abietinella abietina* on seed germination and seedling growth of *Picea crassifolia*[J]. Molecular Plant Breeding, 2020, 18(1): 316−322.

[32] 梁薇薇, 陈立新, 段文标, 等. 酚酸物质对红松种子萌发及苗木生长和生理特性的影响 [J]. 生态学报, 2021, 41(4): 1583−1592.
Liang W W, Chen L X, Duan W B, et al. Effects of phenolic acids on seed germination and seedling growth and physiological characteristics of *Pinus koraiensis*[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(4): 1583−1592.

[33] 王仙, 魏天兴, 朱金兆, 等. 黄土丘陵区油松根际土化感效应研究 [J]. 中国农学通报, 2015, 31(4): 7−13.
Wang X, Wei T X, Zhu J Z, et al. Allelopathic effect of *Pinus tabuliformis* root in loess hilly area[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(4): 7−13.

[34] Chen F, Liu K, Xie Z, et al. Effects of decomposing leaf litter of *Leucaena leucocephala* on photosynthetic traits of *Cynodon dactylon* and *Medicago sativa*[J]. New Forests, 2018, 49(5): 667−679.

[35] Li X, Meng Q, Jiang G, et al. The susceptibility of cucumber and sweet pepper to chilling under low irradiance is related to energy dissipation and water-water cycle[J]. Photosynthetica: International Journal for Photosynthesis Research, 2003, 41(2): 259−265.

[36] 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, Xu Z J, et al. Study on photosynthetic rate and chlorophyll content[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2001, 32(4): 247−249.

[37] 魏婧, 徐畅, 李可欣, 等. 超氧化物歧化酶的研究进展与植物抗逆性 [J]. 植物生理学报, 2020, 56(12): 2571−2584.
Wei J, Xu C, Li K X, et al. Research progress of superoxide dismutase and plant stress resistance[J]. Plant Physiology Journal, 2020, 56(12): 2571−2584.

[38] 刘冰, 梁婵娟. 生物过氧化氢酶研究进展 [J]. 中国农学通报, 2005, 21(5): 223−224.
Liu B, Liang C J. Recent advances of catalase in organism[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2005, 21(5): 223−224.

[39] 袁牧, 王昌留, 王一斐, 等. 超氧化物歧化酶的研究进展 [J]. 中国组织化学与细胞化学杂志, 2016, 25(6): 550−558.
Yuan M, Wang C L, Wang Y F, et al. Progress in the research of superoxide dismutase[J]. Chinese Journal of Histochemistry and Cytochemistry, 2016, 25(6): 550−558.

[40] Scandalios G J. Oxidative stress: molecular perception and transduction of signals triggering antioxidant gene defenses[J]. Brazilian Journal of Medical and Biological Research, 2005, 38(7): 995.

[41] Ashraf M. Biotechnological approach of improving plant salt tolerance using antioxidants as markers[J]. Biotechnology Advances, 2008, 27(1): 84−93.

[42] 于东立, 郭韶鑫, 冯志培, 等. 短尾铁线莲不同部位水浸提液对刺槐幼苗根系生长及生理特性的化感作用 [J]. 河南农业大学学报, 2022, 56(2): 228−235.
Yu D L, Guo S X, Feng Z P, et al. Allelopathic effects of water extracts from different parts of *Clematis brevicaudata* on root growth and physiological characteristics of *Robinia pseudoacacia* seedlings[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2022, 56(2): 228−235.

[43] 曹兵, 宋丽华, 张涛. 臭椿根浸提液对刺槐幼苗生长的化感效应 [J]. 西北农业学报, 2009, 18(3): 156−159.
Cao B, Song L H, Zhang T. Allelopathic effect of water extracts from *Ailanthus altissima* root on growth of *Robinia pseudoacacia* seedling[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2009, 18(3): 156−159.

[44] 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 Agricultural Science, 2008, 36(2): 526−528.

[45] Rivoal A, Fernandez C, Greff S, et al. Does competition stress decrease allelopathic potential?[J]. Biochemical Systematics and Ecology, 2011, 39(4−6): 401−407.

[46] Nishanth T C P B, Baoshan X. Bioavailability of allelochemicals as affected by companion compounds in soil matrices[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2008, 56(10): 3706−3713.

（责任编辑　赵田芸
责任编委　马履一）