

DOI:10.11686/cyxb2024516

http://cyxb.magtech.com.cn

孙勤琳, 魏天兴, 李豪, 等. 沙棘叶片和根系浸提液对5种乔灌木植物的化感潜力. 草业学报, 2025, 34(11): 174—183.

SUN Qin-lin, WEI Tian-xing, LI Hao, et al. Allelopathic effects of *Hippophae rhamnoides* leaf and root extracts on five plant species. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(11): 174—183.

沙棘叶片和根系浸提液对5种乔灌木植物的化感潜力

孙勤琳^{1,2}, 魏天兴^{1,2*}, 李豪³, 叶小曼^{1,2}, 朱玲^{1,2}

(1. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2. 山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站, 北京 100083; 3. 南充市顺庆区市场监督管理局, 四川 南充 637000)

摘要: 为了解陕北黄土高原农牧交错区典型树种沙棘对其他植物的化感作用, 本研究以沙棘为对象, 采用生物测试法, 分析其叶和根浸提液对侧柏、油松、刺槐、柠条、沙棘5种植物幼苗阶段的影响。结果表明: 1) 不同浓度叶和根浸提液对5种植物幼苗阶段具有显著的化感作用($P < 0.05$), 且对5种植物的化感效应存在一定的差异。沙棘浸提液对沙棘和油松幼苗阶段的化感效应整体表现为抑制, 对刺槐和柠条幼苗阶段的化感效应整体表现为促进。2) 沙棘浸提液对植物幼苗阶段的抑制程度总体上为根 > 茎 > 种子萌发 > 鲜重。3) 沙棘叶浸提液对植物的抑制作用明显大于根浸提液。4) 从化感效应指数和综合化感效应指数来看, 沙棘浸提液对沙棘抑制率最大, $1.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 根浸提液对种子发芽的抑制率为46.0%, $5.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 叶浸提液对茎生长(苗高)的抑制率为34.7%, $10.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 根浸提液对根生长的抑制率为85.1%。5) 0.1 和 $0.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 叶浸提液对沙棘根长的抑制率达22.4%和29.0%, 5.0 和 $10.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 叶浸提液对沙棘根长的抑制率达80.6%和72.1%。在低浓度下, 对植物幼苗的生长没有明显的抑制作用; 在高浓度下, 则产生显著的抑制效果。因此, 在恢复黄土高原农牧交错区植被时, 应充分考虑树种间的化感作用关系, 避免将具有强烈抑制作用的树种配置在一起, 确保林分可持续发展。

关键词: 沙棘浸提液; 发芽率; 茎长; 根长; 化感效应

Allelopathic effects of *Hippophae rhamnoides* leaf and root extracts on five plant species

SUN Qin-lin^{1,2}, WEI Tian-xing^{1,2*}, LI Hao³, YE Xiao-man^{1,2}, ZHU Ling^{1,2}

1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Jixian National Forest Ecosystem Observation and Research Station, CNERN, Beijing 100083, China; 3. Nanchong Shunqing District Market Supervision and Administration Bureau, Nanchong 637000, China

Abstract: The aim of this study was to explore the allelopathic potential of *Hippophae rhamnoides* in the agro-pastoral ecotone of the Loess Plateau in northern Shaanxi, with an overall goal to provide a theoretical basis for vegetation restoration. Root and leaf extracts were prepared from *H. rhamnoides*, a typical shrub species on the Loess Plateau. Using the bioassay method, we determined the effects of these extracts on the seed germination and seedling growth of five plant species (*Platycladus orientalis*, *Pinus tabulaeformis*, *Robinia pseudoacacia*, *Caragana korshinskii*, and *H. rhamnoides*). 1) Different concentrations of leaf and root extracts had significant allelopathic effects on the seedlings of the five plant species ($P < 0.05$), although the nature of the allelopathic effects differed

收稿日期: 2024-12-27; 改回日期: 2025-03-12

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFF1300401, 2016YFC050170502)资助。

作者简介: 孙勤琳(2000—), 女, 山东临沂人, 在读硕士。E-mail: sunqinlin@bjfu.edu.cn

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: weitx@bjfu.edu.cn

among the five species. The *H. rhamnoides* extracts had an inhibitory effect on seedlings of *H. rhamnoides* and *P. tabulaeformis*, and a promoting effect on seedlings of *R. pseudoacacia* and *C. korshinskii*. 2) The degree of inhibition of *H. rhamnoides* extracts varied among plant organs, with the strongest inhibitory effect on root growth, followed by stem elongation, seed germination, and then fresh weight. 3) The *H. rhamnoides* leaf extract had a stronger inhibitory effect than the root extract. 4) In terms of the allelopathic response index and comprehensive allelopathic index, the *H. rhamnoides* extracts showed the strongest inhibitory effect on itself; the inhibition rates of germination rate, stem length, and root length of *H. rhamnoides* were 46.0%, 34.7%, and 85.1%, respectively. 5) The inhibition rates of the leaf extract at 0.1 and 0.5 g·L⁻¹ on the root length of *H. rhamnoides* were 22.4% and 29.0%, respectively, and those of the 5.0 and 10.0 g·L⁻¹ leaf extracts on the root length of *H. rhamnoides* were 80.6% and 72.1%, respectively. At low concentrations, the extracts had no obvious inhibitory effects on the growth of plant seedlings; but at high concentrations, they showed significant inhibitory effects. Therefore, when restoring the vegetation in the agro-pastoral ecotone of the Loess Plateau, the allelopathic relationships among tree species should be fully considered to avoid growing tree species together, with strong inhibitory effects. This management strategy will promote the stability and sustainability of mixed forest in this habitat.

Key words: *Hippophae rhamnoides* extracts; germination rate; stem length; root length; allelopathic effect

黄土高原地貌特征复杂,地形起伏破碎,是我国生态系统退化最为严重的地区之一^[1-2]。近年来,“三北”防护林、退耕还林等一系列生态工程,营造侧柏(*Platycladus orientalis*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、柠条(*Caragana korshinskii*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)等人工林,在提高生态环境方面取得了显著效果^[3-6]。沙棘作为我国北方干旱半干旱地区生态修复的先锋树种,具有极强的萌蘖能力和生态适应性,被广泛引种于黄土高原等生态脆弱区^[3-4]。然而,人工沙棘林大面积纯林化种植导致生态系统稳定性显著降低、林下植被稀疏、土壤退化和自然更新困难等问题^[7-8]。研究表明,沙棘纯林连作可能通过根系分泌物和凋落物分解释放酚酸类等化感物质,直接抑制邻近植物种子萌发与幼苗生长,加剧林下植被缺失和生物多样性丧失^[7-9]。这一过程不仅削弱人工林的生态功能,还可能引发土壤次生退化,形成“低质林分—化感抑制—系统退化”的恶性循环^[9-11]。因此,在改善沙棘人工林生态不稳定性、实现林分结构优化中,应考虑沙棘叶片和根系中所含的物质对关键造林树种及自身更新的影响机制。

植物在生长阶段会合成并释放一类特殊的化学物质——化感物质,这些物质对周围同种或异种植物的发芽速度、生长速度和生理过程产生一定作用^[12-14]。现有研究发现,化感物质还通过改变土壤微生物群落结构、影响土壤肥力和水土保持能力对幼苗定植产生影响^[13-14]。在定植阶段,植物受化感作用的影响最为显著,对外界环境胁迫最为敏感。“化感作用的应激假说”认为,植物化感作用的潜力会受到环境变化的影响,在植物受到胁迫时,植物的化感作用潜力会增加^[14]。化感作用的强弱与受体植物的种类、浸提液的浓度和化感物质的种类密切相关^[15],同一种植物的不同器官对同种或异种植物种子萌发和幼苗生长的化感效应表现出不同的强度和性质。沙蒿(*Artemisia ordosica*)的根、茎、叶和种子水浸提液对不同受体植物的作用效果不同,根浸提液对沙米(*Agriophyllum squarrosum*)、虫实(*Corispermum hyssopifolium*)的化感作用较强,而茎浸提液对草木樨状黄芪(*Astragalus melilotoides*)的作用更强^[16]。化感作用不仅影响其他植物的生理生长过程,也可能对植物自身产生“自毒作用”。自毒作用通过抑制种子萌发和幼苗生长,有效调节植物自身的种群密度,从而维持生态系统的稳定^[17]。研究发现,沙棘的自毒作用对其自身幼苗生长具有抑制作用,其强大的根系和耐旱能力使其能够在恶劣环境中生存,从而为其他植物的生长创造条件,增强生态系统的整体稳定性^[18-20]。因此,本研究聚焦于陕北黄土高原农牧交错区域人工沙棘林的叶和根浸提液对侧柏、油松、刺槐、柠条、沙棘5种植物生长初期的化感效应。通过种子萌发试验、幼苗生长监测,分析沙棘化感效应对上述5种植物幼苗阶段的具体影响,为研究沙棘林分结构提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试植物沙棘:2018年7—8月在陕西省延安市吴起县吴镇中部合沟流域(36°53′23″—36°55′07″ N, 108°12′20″—108°13′55″ E, 海拔1350~1585 m)内选择阳坡沙棘纯林、阴坡沙棘纯林、沙棘侧柏混交林、沙棘油松混交林(沙棘:侧柏=1:1、沙棘:油松=1:1)4种林地设置典型试验区,每个林地设置1个20 m×20 m样方,并在4个样地内选择叶片颜色鲜绿、大小适中、无衰老迹象的沙棘各3株。整株采集后,根据根系直径,分为4个等级:极细根(0~0.5 mm)、细根(1~2 mm)、中等根系(2~3 mm)和粗根(>4 mm)^[21],分级取样、称量其鲜质量,将根系烘干称其干质量。按照根系不同径级生物量在根系总生物量中的占比,分别选取不同径级根系,总计1.00 kg的沙棘根系样本制备根系浸提液。将叶片和根系,分别混合均匀,自然风干,粉碎成粉末备用。

供试植物种子:选择健康、大小均匀、颗粒饱满、无病虫害迹象的侧柏、油松、沙棘、柠条、刺槐种子。

1.2 试验方法

1.2.1 沙棘浸提液制备 称取沙棘叶和根粉末各40 g,按照固液比1:25加入蒸馏水,浸泡48 h后,采用超声波萃取30 min后,用离心机(LYNX 6000,赛默飞世尔公司)离心(7000 r·min⁻¹,15 min),采用微孔滤膜过滤^[22],所取得的溶液即为沙棘叶和根的原液。根据近年该研究区的调查数据^[23],沙棘枝叶生物量为3421.7~6928.7 kg·hm⁻²,地下生物量为2320.7~2605.4 kg·hm⁻²。而吴起县多年平均降水量为483.4 mm,折算后沙棘枝叶和根的水浸提液质量浓度分别为0.71~1.43 mg·mL⁻¹、0.48~0.54 mg·mL⁻¹。经过前期对多种浓度梯度处理液的预试验,将浸提液稀释至质量浓度为0.1(C₁)、0.5(C₂)、1.0(C₃)、2.5(C₄)、5.0(C₅)、10.0(C₆) g·L⁻¹。调节各浸提液pH值与蒸馏水一致(pH=6.58)。

1.2.2 沙棘化感作用测定 将侧柏、油松、沙棘、柠条、刺槐种子,分别用0.2%的KMnO₄溶液浸泡40 min后用蒸馏水冲洗干净,在温水里浸泡24 h后自然阴干备用。量取5 mL不同浓度的沙棘浸提液,分别加入放有双层滤纸、直径为9 cm的培养皿中,每个培养皿中均匀放置30粒乔灌植物种子,设置蒸馏水为对照组(CK),每个处理重复5次。将所有培养皿放入人工气候箱内培养,培养温度为20℃。试验开始后,每天对种子发芽数进行统计(以胚根或胚轴突破种皮1~2 mm为标准),15 d后随机抽取10株长势较好的幼苗测量茎长(苗高)、根长和鲜重,取平均值。

1.3 数据处理与分析

1.3.1 化感效应评价指标 统计发芽率(germination rate, GR)和抑制率(inhibition rate, IR),计算化感效应指数(allelopathic effect index, RI)^[24]和综合化感效应指数(synthetical allelopathic effect index, AI)^[25],具体计算公式如下:

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

$$\text{抑制率}(\%) = \frac{C - T}{C} \times 100 \quad (2)$$

$$\begin{cases} RI = 1 - \frac{C}{T} & T \geq C \\ RI = \frac{T}{C} - 1 & T < C \end{cases} \quad (3)$$

式中:C为对照值,T为处理值。 $RI > 0$ 为促进作用, $RI < 0$ 为抑制作用,绝对值的大小与化感作用强度一致。

$$AI = \frac{\text{发芽率}RI + \text{茎长}RI + \text{根长}RI + \text{鲜重}RI}{4} \quad (4)$$

式中:AI>0表示总体表现为促进作用,AI<0表示总体表现为抑制作用。

1.3.2 数据分析 本研究利用IBM SPSS statistics 27软件作为统计分析工具,采用单因素方差分析(One-way ANOVA)方法,结合Duncan差异显著性检验(设定P<0.05为显著性水平),对不同浓度沙棘浸提液作用于

各项指标的效果进行比较分析。通过双因素方差分析(Two-way ANOVA),检验沙棘浸提液的浓度与其作用部位之间的交互效应对化感受体材料各项参数的差异显著水平。借助 Origin 2022b 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 沙棘浸提液对植物种子萌发的影响

如表 1 所示,沙棘浸提液的浓度与其作用部位之间存在的交互效应,对种子的萌发均具有显著影响($P < 0.05$)。由图 1 可知,沙棘叶/根浸提液浓度的变化对植物种子萌发产生的化感效应各不相同。与 CK 相比,不同浓度沙棘浸提液处理下,沙棘发芽率呈下降趋势($P < 0.05$),低浓度对沙棘发芽率的抑制作用较强。随着浸提液浓度升高,侧柏发芽率呈先降低后升高趋势,刺槐发芽率呈先升高后降低趋势。

表 1 不同浓度沙棘叶和根浸提液对 5 种乔灌木种子萌发与幼苗生长影响的方差分析(P 值)

Table 1 Variance analysis (P) of the effects of different concentrations of *H. rhamnoides* leaf and root extracts on seed germination and seedling growth of 5 species of chestnut-irrigation plants

受体植物 Receptor plant	方差变异来源 ANOVA source	种子萌发指标 Seed germination indicator		幼苗生长指标 Seedling growth indicator	
		发芽率 Germination rate	茎长 Stem length	根长 Root length	鲜重 Fresh weight
侧柏 <i>P. orientalis</i>	AP	<0.001	<0.001	<0.001	0.685
	AD	<0.001	0.104	0.129	0.230
	AP×AD	<0.001	0.354	<0.001	0.354
油松 <i>P. tabuliformis</i>	AP	<0.001	<0.001	<0.001	0.288
	AD	<0.001	0.328	<0.001	0.047
	AP×AD	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
刺槐 <i>R. pseudoacacia</i>	AP	<0.001	<0.001	<0.001	0.004
	AD	<0.001	<0.001	<0.001	0.012
	AP×AD	<0.001	<0.001	<0.001	0.002
柠条 <i>C. korshinskii</i>	AP	<0.001	<0.001	<0.001	0.012
	AD	<0.001	<0.001	0.008	0.271
	AP×AD	<0.001	<0.001	0.003	<0.001
沙棘 <i>H. rhamnoides</i>	AP	0.010	<0.001	<0.001	0.008
	AD	<0.001	0.987	<0.001	0.003
	AP×AD	0.004	0.211	<0.001	<0.001

注: AP 为化感供体植物浸提液浓度;AD 为化感供体部位;AP×AD 表示化感供体植物浸提液浓度与化感供体部位之间的互作用效应。

Note: AP is the concentration of allelogenous donor plants extracts; AD was the allelopathic donor site. AP×AD representing the interaction effect between allelopathic donor plant extracts concentration and allelopathic donor site.

如表 2 所示,沙棘不同部位浸提液在不同浓度下对植物种子萌发的化感作用存在差异。沙棘浸提液对侧柏、油松(除 $0.1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 叶浸提液、 $10.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 根浸提液外)和沙棘的种子萌发表现化感抑制作用($RI < 0$),其中对沙棘的化感抑制作用最强。随着化感物质浓度的升高,叶浸提液对沙棘的抑制程度呈先减弱后增强的趋势,根浸提液则呈整体增强的趋势。沙棘叶浸提液对刺槐种子萌发具有促进作用($RI > 0$),且浓度越高化感促进作用越强(除 $10.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 浸提液外);沙棘根浸提液在低浓度时对刺槐种子萌发具有促进作用,高浓度时转为抑制作用。

2.2 沙棘浸提液对植物幼苗生长的影响

从表 1 可以看出,沙棘浸提液的浓度与其作用部位之间存在的交互效应,对幼苗生长具有影响。如图 2 所示,沙棘茎长和根长随着浸提液浓度升高呈降低趋势,柠条茎长和根长则呈先升高后降低趋势,低浓度处理下,柠条幼苗生长受到的促进作用较强,高浓度处理下,沙棘幼苗生长受到的抑制作用较强。高浓度($5.0, 10.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$)浸

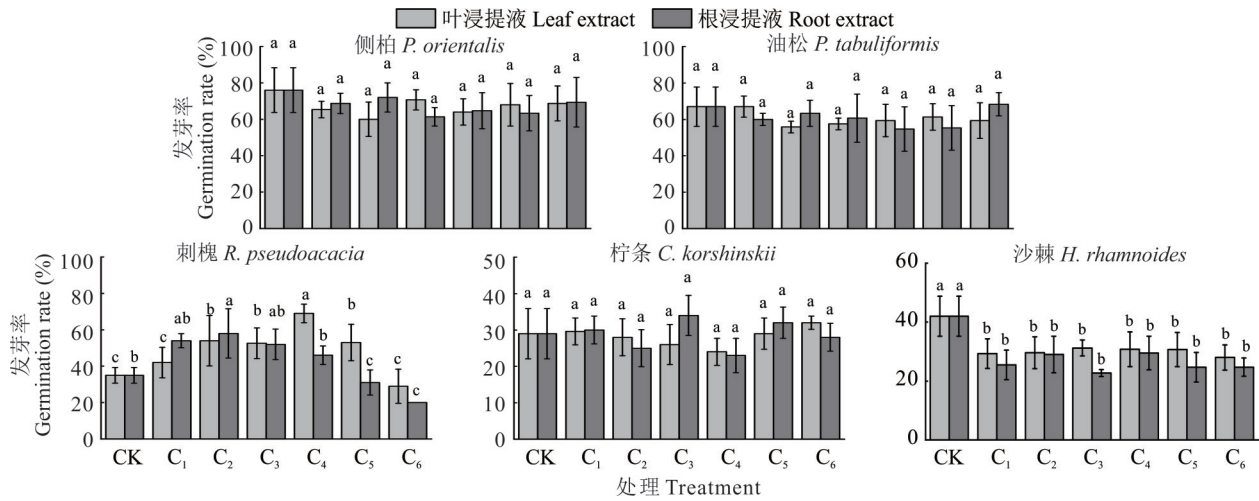


图1 不同浓度沙棘叶和根浸提液对5种乔灌植物发芽率的影响

Fig. 1 Effects of different concentrations of *H. rhamnoides* leaf and root extracts on germination rate of 5 species of chestnut-irrigation plants

不同小写字母表示同一浸提液不同浓度处理间差异显著 ($P < 0.05$)。Different lowercase letters indicate significant differences among different concentrations of the same extract ($P < 0.05$). C_1 : $0.1 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$; C_2 : $0.5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$; C_3 : $1.0 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$; C_4 : $2.5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$; C_5 : $5.0 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$; C_6 : $10.0 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$. 下同 The same below.

表2 不同浓度、不同部位沙棘浸提液对5种乔灌植物发芽率、茎长、根长、鲜重的化感效应指数

Table 2 Allelopathic effect index of different concentrations and different parts of *H. rhamnoides* extract on germination rate, stem length, root length and fresh weight of 5 species of chestnut-irrigation plants

项目 Items	受体植物 Receptor plant	叶浸提液浓度 Leaf extract concentration						根浸提液浓度 Root extract concentration					
		0.1 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	0.5 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	1.0 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	2.5 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	5.0 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	10.0 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	0.1 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	0.5 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	1.0 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	2.5 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	5.0 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	10.0 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$
发芽率 Germination rate	侧柏 <i>P. orientalis</i>	-0.140	-0.211	-0.070	-0.158	-0.105	-0.096	-0.096	-0.053	-0.193	-0.149	-0.167	-0.088
	油松 <i>P. tabuliformis</i>	0.000	-0.163	-0.138	-0.110	-0.080	-0.110	-0.100	-0.050	-0.090	-0.180	-0.170	0.024
	刺槐 <i>R. pseudoacacia</i>	0.160	0.357	0.370	0.492	0.563	0.344	0.380	0.400	0.330	0.232	-0.111	-0.429
	柠条 <i>C. korshinskii</i>	-0.100	-0.038	-0.100	-0.169	0.015	0.097	0.037	-0.123	-0.150	-0.192	0.088	-0.031
	沙棘 <i>H. rhamnoides</i>	-0.302	-0.295	-0.257	-0.267	-0.270	-0.333	-0.393	-0.310	-0.460	-0.298	-0.413	-0.413
茎长 Stem length	侧柏 <i>P. orientalis</i>	-0.043	-0.037	-0.017	0.037	0.096	0.070	-0.002	-0.010	0.001	0.040	0.048	0.026
	油松 <i>P. tabuliformis</i>	-0.128	-0.203	-0.111	-0.074	-0.047	-0.027	-0.204	-0.132	-0.021	-0.050	0.009	0.034
	刺槐 <i>R. pseudoacacia</i>	0.081	0.106	0.140	0.095	0.072	0.007	-0.066	0.053	0.093	-0.032	-0.178	-0.151
	柠条 <i>C. korshinskii</i>	0.283	0.223	0.153	0.224	0.268	0.158	0.214	0.303	0.210	0.202	0.084	0.030
	沙棘 <i>H. rhamnoides</i>	-0.048	-0.151	-0.281	-0.225	-0.347	-0.303	-0.147	-0.128	-0.208	-0.258	-0.269	-0.331
根长 Root length	侧柏 <i>P. orientalis</i>	-0.016	-0.145	-0.061	0.078	0.245	0.256	0.163	0.230	0.107	0.103	0.265	0.169
	油松 <i>P. tabuliformis</i>	0.027	-0.234	-0.258	-0.145	-0.177	-0.160	-0.271	-0.082	-0.030	0.101	0.201	0.221
	刺槐 <i>R. pseudoacacia</i>	0.024	0.130	0.090	-0.056	-0.403	-0.588	-0.400	-0.270	-0.212	-0.231	-0.245	-0.413
	柠条 <i>C. korshinskii</i>	0.259	0.360	0.192	0.103	0.077	-0.070	0.113	0.106	0.197	0.045	0.014	0.041
	沙棘 <i>H. rhamnoides</i>	-0.224	-0.290	-0.722	-0.683	-0.806	-0.721	-0.601	-0.669	-0.692	-0.721	-0.733	-0.851
鲜重 Fresh weight	侧柏 <i>P. orientalis</i>	0.012	0.093	0.036	0.046	0.066	0.110	0.070	0.084	0.087	0.045	0.068	0.056
	油松 <i>P. tabuliformis</i>	0.013	-0.222	-0.128	-0.087	-0.172	-0.122	-0.260	-0.047	-0.067	-0.081	0.042	-0.012
	刺槐 <i>R. pseudoacacia</i>	0.144	0.138	0.171	0.160	-0.046	0.032	-0.047	0.158	0.074	-0.015	0.006	0.083
	柠条 <i>C. korshinskii</i>	0.013	0.087	0.127	0.160	0.124	0.165	0.141	0.201	0.172	0.176	0.168	-0.024
	沙棘 <i>H. rhamnoides</i>	0.007	-0.047	-0.082	0.067	-0.039	-0.016	0.085	0.065	0.015	-0.016	0.005	0.167

提液对刺槐根生长的抑制作用具有显著影响($P < 0.05$)。刺槐茎长随着浸提液浓度升高呈先增加后降低趋势, $1.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 浸提液处理时, 刺槐茎长最长, 这说明在中等浓度处理下, 刺槐茎生长受到的促进作用较强。不同浓度沙棘浸提液对沙棘鲜重表现为抑制, 对其他植物鲜重的影响不规律。沙棘浸提液各个浓度处理均与 CK 差异不显著($P > 0.05$), 说明各植物幼苗鲜重对沙棘浸提液的化感效应不敏感。

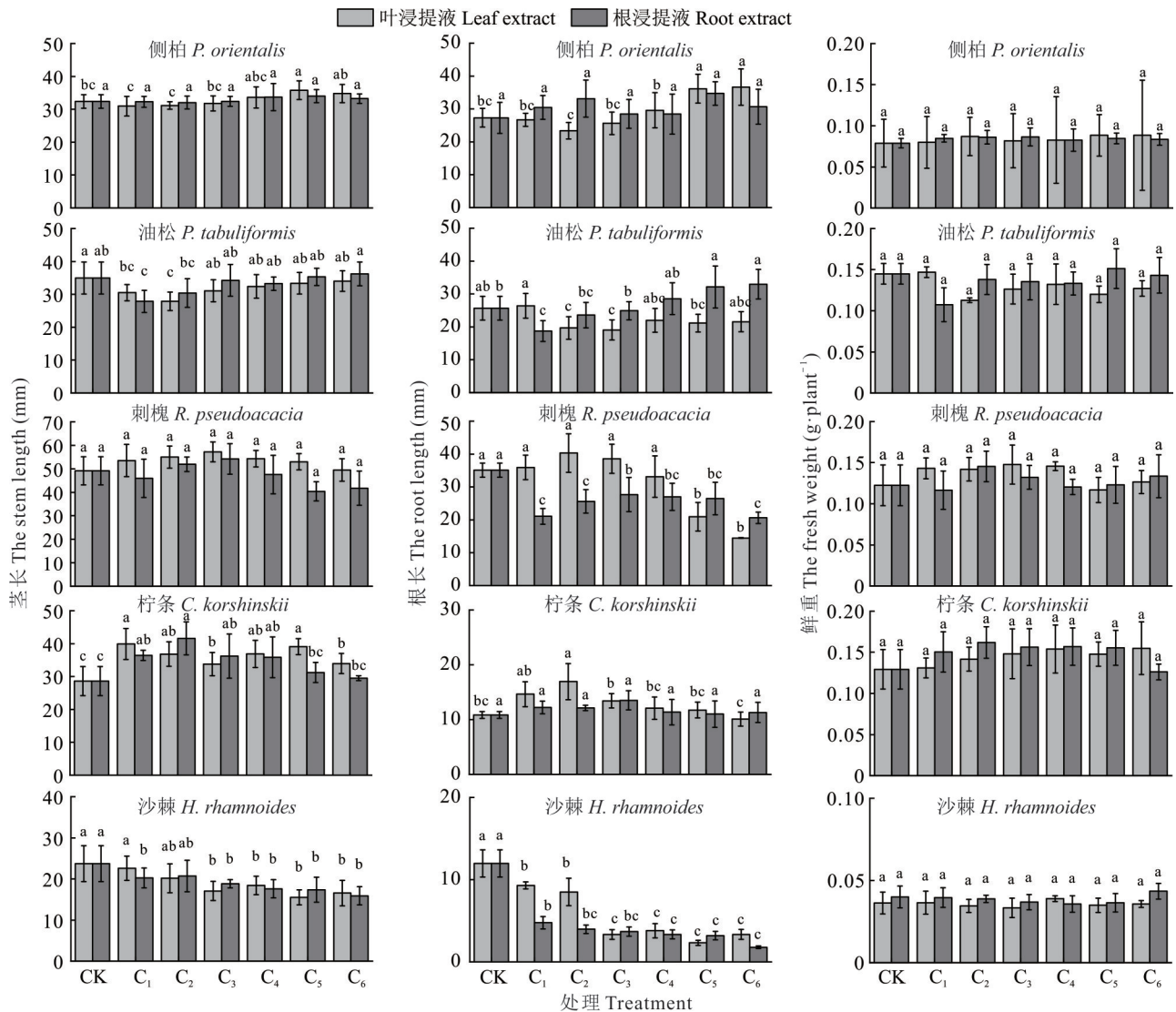


图 2 不同浓度沙棘叶和根浸提液对 5 种乔灌木植物茎长、根长、鲜重的影响

Fig. 2 Effects of different concentrations of *H. rhamnoides* leaf and root extracts on stem length, root length, and fresh weight of 5 species of chestnut-irrigation plants

如表 2 所示, 沙棘不同部位浸提液在不同浓度下对植物幼苗生长的化感作用具有差异。沙棘叶浸提液对油松、沙棘茎生长产生抑制作用($RI < 0$), 对刺槐、柠条茎生长产生促进作用($RI > 0$)。沙棘茎生长和根生长受到的抑制程度随着浸提液浓度的升高而逐渐增强, 柠条茎生长和根生长受到的促进程度则呈逐渐减弱趋势, 低浓度对柠条的促进作用较强, 高浓度对沙棘的抑制程度较强。沙棘叶/根浸提液对油松鲜重(除 $0.1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 叶浸提液、 $5.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 根浸提液外)产生抑制作用, 对侧柏、刺槐(除 $5.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 叶浸提液、 0.1 和 $2.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 根浸提液外)、柠条(除 $10.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 根浸提液外)鲜重产生促进作用。

2.3 沙棘浸提液化感综合效应指数

如图 3 和图 4 所示, 根据综合化感效应指数可知, 沙棘叶浸提液对油松和沙棘种子发芽及幼苗生长过程整体

产生抑制作用,随着浸提液浓度的提高,油松受到的抑制程度有所减弱,沙棘受到的抑制程度有所增强。根浸提液对沙棘具有抑制作用,随着浸提液浓度的增加,沙棘受到的抑制程度有所增强。沙棘叶浸提液对刺槐(除 $10.0 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$)和柠条表现为促进作用,随着浓度的增加,对刺槐和柠条的促进程度表现为先增强后减弱。沙棘根浸提液对侧柏和柠条表现为促进作用,随着浓度的增加,对柠条的促进程度逐渐减弱。低浓度的沙棘根浸提液对油松产生抑制作用,对刺槐产生促进作用;高浓度对油松转为促进作用,对刺槐转为抑制作用。

3 讨论

在林分更新过程中,一些树种通过释放促进生长的化感物质,为新生树种提供有利的生长环境,加速森林的更新和恢复过程^[26]。植物幼苗阶段受化感物质的影响程度,往往与化感物质的浓度水平密切相关。本研究结果表明,沙棘叶/根浸提液对植物幼苗阶段的化感效应具有质量浓度效应,低浓度($0.1 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 叶浸提液)对沙棘根长的化感抑制效应为 -22.40% ,高浓度($10.0 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 根浸提液)对沙棘根长的化感抑制效应为 -85.10% 。这说明在高浓度下,对植物幼苗生长产生显著的抑制作用;在低浓度下,对植物幼苗生长的抑制作用较弱,甚至转为促进作用^[27]。这与郑丽等^[28]的研究结果一致,紫茎泽兰(*Ageratina adenophora*)叶片不同浓度提取液对受体植物幼苗阶段的化感作用强度不同,质量浓度低时,化感作用弱,质量浓度高时,化感作用强。由于化感物质对幼苗生长的影响往往具有浓度依赖性,在低浓度时,化感物质可能不足以对植物幼苗生长产生显著的生理生化影响^[29],随着浓度的增加,化感物质的作用逐渐增强,达到一定程度时,对植物幼苗生长产生明显的抑制作用。

许多研究表明,化感物质可能通过影响植物体内的激素平衡、细胞分裂、细胞伸长^[29-30]等生理过程对种子发芽和植物生长产生影响。在同一质量浓度处理下,各指标对沙棘浸提液的敏感性总体表现为根生长 > 茎生长 > 发芽率 > 鲜重。与白花金纽扣(*Acmella radicans*)水浸提液对杂草种子根长抑制率最大,其次为茎生长和种子萌发的结论一致^[30]。沙棘浸提液对柠条的种子萌发和幼苗生长则表现出截然相反的化感效果,这说明植物不同部位对化感物质反应各异,可能是由于它们在生理结构和功能需求上存在差别,导致对化感物质的敏感性和反应程度有所不同。一些化感物质可能更倾向于影响植物的根系,因为根上的生长素受体数量通常多于茎,对生长素及其类似物(包括化感物质)的敏感性更高^[31]。这种选择性作用可能与化感物质的化学结构、分子大小、亲疏水性等特性有关。

在生态系统中,叶和根的化感作用是相互关联的,它们共同影响周围植物的生长发育。不同植物种类、不同生长阶段以及不同环境条件下,叶和根浸提液的化感作用强度和化感作用可能存在差异。本研究结果表明,沙棘

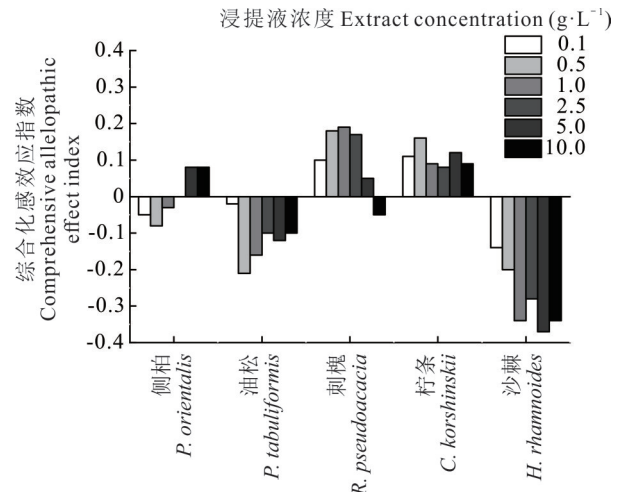


图3 沙棘叶浸提液对5种乔灌木的综合化感效应指数

Fig. 3 Comprehensive allelopathic effect index of *H. rhamnoides* leaf extract on 5 species of chestnut-irrigation plants

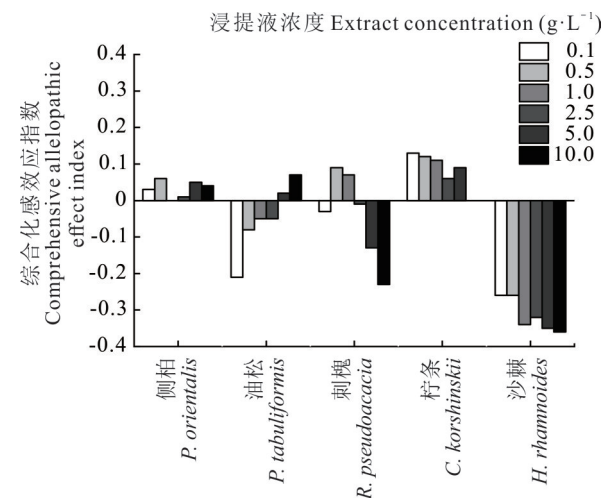


图4 沙棘根浸提液对5种乔灌木的综合化感效应指数

Fig. 4 Comprehensive allelopathic effect index of *H. rhamnoides* root extract on 5 species of chestnut-irrigation plants

叶浸提液对植物的化感效应大于根浸提液,这与陈丽萍等^[32]的研究结果一致,入侵植物牛膝菊(*Galinsoga parviflora*)叶片的化感潜力是根的1.15倍。叶片凋落后,化感物质通过分解、挥发、淋溶等方式释放到环境中,能更直接地作用于其他植物;而根系释放的化感物质主要通过根际土壤扩散,可能被土壤吸附或者稀释,从而降低其作用强度。沙棘叶浸提液对刺槐种子萌发具有促进作用,根浸提液具有低促高抑作用。产生这种差异的原因可能是叶浸提液中多种营养物质和生长促进物质可以调节种子内部激素水平,解除种子休眠,促进刺槐种子萌发;根浸提液中含有一些抑制物质,在低浓度下一些促进性物质可能刺激种子萌发,随着浓度的增加抑制性物质不断积累,从而抑制种子的生理活动,维持种子的休眠状态^[33]。

在森林树种配置过程中,通过合理搭配具有不同化感作用的树种,可以实现优势互补和生态协调^[34]。本研究表明,沙棘浸提液对沙棘、油松产生抑制作用,对刺槐和柠条产生促进作用。产生这种差异的主要原因可能是不同受体植物的生理生化和结构特征存在差异^[35],对化感物质胁迫的承受能力不同而产生不同的化感效应^[36]。综合对比叶/根浸提液对5种植物的综合化感效应指数,沙棘浸提液对沙棘化感抑制作用最强,这属于典型的自毒现象,对群落密度调控、生态位分化、土壤微生态平衡具有重要的生态学意义。沙棘通过自毒作用抑制自身生长,调节种群密度,更好地利用有限的水分和养分,增强对不良环境的适应能力,促使沙棘在资源有限的环境中维持种群的可持续性。这种自毒现象不仅影响沙棘自身的种群动态,还与其他物种间的相互作用密切相关。沙棘通过抑制其他植物的种子萌发和幼苗生长,维持自身的竞争优势,减少种间竞争,有利于在干旱和贫瘠的环境中在生态位竞争中占据优势,同时还可以促进生态位的分化,减少不同植物之间的直接竞争,有助于维持生态系统的多样性,促进不同物种的共存。

4 结论

本研究证实了沙棘叶和根浸提液对侧柏、油松、刺槐、柠条和沙棘种子萌发和幼苗生长存在化感效应,沙棘叶和根浸提液在 $0.1\sim 10.0\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 不同浓度下对植物生长阶段的化感强度不同,沙棘浸提液对沙棘自身的化感影响最为显著,其次为刺槐、柠条和油松,最弱为侧柏。从沙棘叶/根浸提液的化感效应来看,叶浸提液所产生的化感作用要明显强于根浸提液。整体来看,沙棘叶/根浸提液对沙棘、油松种子萌发和幼苗生长产生抑制作用,对刺槐、柠条种子萌发和幼苗生长产生促进作用;不同质量浓度浸提液对植物的化感效应存在差异,高浓度浸提液表现为抑制作用,随着浓度降低,抑制作用逐渐减弱,甚至转为促进作用。本研究表明,在陕北黄土高原农牧交错区人工沙棘林植被配置时,应充分考虑树种间的化感作用关系,避免将具有强烈抑制作用的树种配置在一起,实现林分结构优化,确保沙棘人工林的稳定性和可持续性。为了进一步确定沙棘的化感作用机制,今后需对相关的化感物质进行鉴定,并对其化感作用机理进行深入研究。

参考文献 References:

- [1] Wang X Y, Li Y Q, Gong X W, *et al.* Storage, pattern and driving factors of soil organic carbon in an ecologically fragile zone of northern China. *Geoderma*, 2019, 343: 155–165.
- [2] Sun J F, Li G D, Zhang Y, *et al.* Identification of priority areas for afforestation in the Loess Plateau region of China. *Ecological Indicators*, 2022, 140: 108998.
- [3] Zhang X X, Liu Z W, Zhu Z H, *et al.* Impacts of mixed litter decomposition from *Robinia pseudoacacia* and other tree species on C loss and nutrient release in the Loess Plateau of China. *Journal of Forestry Research*, 2016, 27(3): 525–532.
- [4] Li H J, Niu X, Wang B, *et al.* Coupled coordination of ecosystem services and landscape patterns: Take the Grain for Green Project in the Wuling Mountain Area as an example. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(13): 4316–4326.
李慧杰, 牛香, 王兵, 等. 生态系统服务功能与景观格局耦合协调度研究: 以武陵山区退耕还林工程为例. *生态学报*, 2020, 40(13): 4316–4326.
- [5] Wang Z Y, Yu Q R, Guo L, *et al.* Quantifying the impact of the Grain-for-Green Program on ecosystem health in the typical agro-pastoral ecotone: A case study in the Xilin Gol League, Inner Mongolia. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(16): 5631.
- [6] Liu Q F, Zhang Q, Yan Y Z, *et al.* Ecological restoration is the dominant driver of the recent reversal of desertification in the Mu

- Us Desert (China). *Journal of Cleaner Production*, 2020, 268: 122241.
- [7] Williams R A. Mitigating biodiversity concerns in *Eucalyptus plantations* located in South China. *Journal of Biosciences and Medicines*, 2015, 3: 1–8.
- [8] Sasikumar K, Vijayalakshmi C, Parthiban K T, *et al.* Allelopathic effects of four *Eucalyptus* species on cowpea (*Vigna unguiculata*). *Tropical Forest Science*, 2004, 16(4): 419–428.
- [9] Wang H Y, Liu J G, Yuan H C, *et al.* Effects of three extracts on seed germination and seedling growth of *Pinus sylvestris* var. *mongolica*. *Forest Engineering*, 2023, 39(3): 30–39.
王浩宇, 刘建功, 袁泓昌, 等. 3种浸提液对樟子松种子萌发和幼苗生长的影响. *森林工程*, 2023, 39(3): 30–39.
- [10] Yang S Y, Wang J R, Zhu Y Y, *et al.* Effects of mixed plantation of *Cunninghamia lanceolata* and *Phoebe chekiangensis* on root exudates and community structure of arbuscular mycorrhizal fungi. *Scientia Silvae Sinicae*, 2024, 60(9): 59–68.
杨淑雅, 王镜如, 朱滢滢, 等. 杉木与浙江楠混交对根系分泌物和丛枝菌根真菌群落结构的影响. *林业科学*, 2024, 60(9): 59–68.
- [11] Liu Z L, Wang Q C, Hao L F. Interspecific allelopathic effect of different organs, aqueous extracts of *Betula platyphylla* and *Larix olgensis* on their seed germination and seedling growth. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(12): 3138–3144.
刘忠玲, 王庆成, 郝龙飞. 白桦、落叶松不同器官水浸液对种子萌发和播种苗生长的种间化感作用. *应用生态学报*, 2011, 22(12): 3138–3144.
- [12] Yang L X, Wang P, Kong C H, *et al.* Effect of larch (*Larix gmelini* Rupr.) root exudates on manchurian walnut (*Juglans mandshurica* Maxim.) growth and soil juglone in a mixed-species plantation. *Plant and Soil*, 2010, 329(1/2): 249–258.
- [13] Xu Y, Chen X, Ding L, *et al.* Allelopathy and allelochemicals in grasslands and forests. *Forests*, 2023, 14(3): 562.
- [14] Reigosa M J, Pedrol N, Conzalez L, *et al.* Allelopathy: A physiological process with ecological implications. Dordrecht: Springer, 2006.
- [15] Lin X, Li X R, Li C Y, *et al.* Allelopathic effects of water leaching from different parts and rhizosphere soil on seed germination and seedling growth of *Radix astragali*. *Chinese Traditional Medicine*, 2024(4): 833–838.
林鑫, 李昕蓉, 李成义, 等. 红芪不同部位及根际土水浸液对其种子萌发及幼苗生长的化感作用. *中药材*, 2024(4): 833–838.
- [16] Deng W H, Zhao X R, Zhang J Q, *et al.* Allelopathic effects of aqueous extracts from *Artemisia ordosica* on four associated herbaceous plants. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(15): 5670–5678.
邓文红, 赵欣蕊, 张俊琦, 等. 沙蒿(*Artemisia ordosica*)水浸提液对4种伴生草本植物的化感作用. *生态学报*, 2019, 39(15): 5670–5678.
- [17] Wang Y T, Geng G. Allelopathy between plants and its research progress. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2023, 39(23): 17–22.
王月彤, 耿贵. 植物间化感作用及其研究进展. *中国农学通报*, 2023, 39(23): 17–22.
- [18] Fan J B, Xia J F, Yuan C P, *et al.* Study and experiences on seabuckthorn plantation and management in Mu Us Sandy Land. *International Sea Buckthorn Research and Development*, 2008, 6(3): 28–30.
范军波, 夏静芳, 袁成平, 等. 毛乌素沙地人工种植沙棘及管理经验浅谈. *国际沙棘研究与开发*, 2008, 6(3): 28–30.
- [19] Wang X, Bi Y L, Wang Y, *et al.* Effects of planting density of *Hippophae rhamnoides* and inoculation of AMF on understory vegetation growth and soil improvement. *Scientia Silvae Sinicae*, 2023, 59(10): 138–149.
王晓, 毕银丽, 王义, 等. 沙棘林密度和丛枝菌根真菌接种对林下植物和土壤性状的影响. *林业科学*, 2023, 59(10): 138–149.
- [20] Zhou W J, Wei T X, Liu G Q, *et al.* Coupling relationship between *Hippophae rhamnoides* community and soil factor in typical returning farmland to forest area in northern Shaanxi Province. *Science of Soil and Water Conservation*, 2020, 18(2): 1–9.
周文洁, 魏天兴, 刘广全, 等. 陕北典型退耕地沙棘群落与土壤因子的耦合关系. *中国水土保持科学*, 2020, 18(2): 1–9.
- [21] Wang X, Wei T X, Zhu J Z, *et al.* Allelopathic effect of *Pinus tabulaeformis* root in loess hilly area. *Journal of Beijing Forestry University*, 2015, 37(4): 82–89.
王仙, 魏天兴, 朱金兆, 等. 黄土丘陵区油松根系化感效应研究. *北京林业大学学报*, 2015, 37(4): 82–89.
- [22] Zhu L, Wei T X, Yu H, *et al.* Allelopathic potential of *Robinia pseudoacacia* root system and rhizosphere soil on 7 species of arbor, shrub, and grass plants. *Ecology and Environmental Sciences*, 2024, 33(9): 1406–1415.
朱玲, 魏天兴, 于欢, 等. 刺槐根系和根际土对7种乔灌木植物的化感潜力. *生态环境学报*, 2024, 33(9): 1406–1415.
- [23] Ma S W, Guo J Y, Lan D M, *et al.* Study on community restoration characteristics of different conversions of croplands to

- forestlands in Wuqi County. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016, 23(6): 204–209.
- 马少薇, 郭建英, 蓝登明, 等. 吴起县不同退耕还林地群落恢复特征研究. *水土保持研究*, 2016, 23(6): 204–209.
- [24] Bruce W G, Richardson D. Bioassays for allelopathy: Measuring treatment responses with independent controls. *Journal of Chemical Ecology*, 1988, 14(1): 181–187.
- [25] Wang X Q, Zhang R Q, Wang J X, *et al.* The effects of leaf extracts of four tree species on *Amygdalus pedunculata* seedlings growth. *Frontiers in Plant Science*, 2021, 11(1): 587579.
- [26] Lin W H, Zhan C A, Chen H Y, *et al.* Effects of allelopathy among tree species. *World Forestry Research*, 2011, 24(5): 13–17.
- 林文欢, 詹潮安, 陈红跃, 等. 林木种间的化感作用. *世界林业研究*, 2011, 24(5): 13–17.
- [27] Jia L M, Zhai M P, Yin W L, *et al.* The study on allelopathy in the mixture of *Pinus tabulaeformis* and *Quercus liaotungensis*. *Scientia Silvae Sinicae*, 1995, 31(6): 491–498.
- 贾黎明, 翟明普, 尹伟伦, 等. 油松、辽东栎混交林中生化他感作用的研究. *林业科学*, 1995, 31(6): 491–498.
- [28] Zheng L, Feng Y L. Allelopathic effects of *Eupatorium adenophorum* Spreng. on seed germination and seedling growth in ten herbaceous species. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(10): 2782–2787.
- 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. *生态学报*, 2005, 25(10): 2782–2787.
- [29] An G Q, Li J M, Lu H F, *et al.* Nitrogen-dependent luteolin effect on *Microcystis* growth and microcystin-pollution risk-novel mechanism insights unveiled by comparative proteomics and gene expression. *Environmental Pollution*, 2022, 311(10): 119848.
- [30] Yang K X, Wu X H, Zheng F P, *et al.* Allelopathic effects of aqueous extracts of the invasive plant *Acmella radicans* on seed germination and seedling growth of four weeds. *Acta Agrestia Sinica*, 2023, 31(12): 3759–3767.
- 杨轲欣, 吴晓涵, 郑凤萍, 等. 白花金钮扣水提液对4种杂草种子萌发和幼苗生长的化感作用研究. *草地学报*, 2023, 31(12): 3759–3767.
- [31] Zhao Z, Xue D Z, Liu X P, *et al.* Studies of the relationship between *Pinus tabulaeformis* and some tree species of the mixed forest. *Journal of Northwest Forestry College*, 1995, 10(S1): 62–66.
- 赵忠, 薛德自, 刘西平, 等. 几种混交树种树根、叶对油松生长的影响. *西北林学院学报*, 1995, 10(S1): 62–66.
- [32] Chen L P, Fan X T, Ma D W, *et al.* Allelopathic effects of *Galinsoga parviflora* Cav. on antioxidant enzyme systems in rape seedlings. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2008, 21(2): 332–334.
- 陈丽萍, 范雪涛, 马丹炜, 等. 入侵植物辣子草对油菜幼苗抗氧化系统的化感效应. *西南农业学报*, 2008, 21(2): 332–334.
- [33] Yuan S A, Guo F, Tang C P, *et al.* Allelopathic effects of the aqueous extracts of *Hippophae rhamnoides* L. subsp. *sinensis* on the germination of its seeds. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2015, 29(5): 116–121.
- 袁思安, 郭峰, 唐翠平, 等. 中国沙棘浸提液对其种子萌发的化感效应. *干旱区资源与环境*, 2015, 29(5): 116–121.
- [34] Li H. Allelopathic effects of *Hippophae rhamnoides* L. in the restoration of vegetation in the farming-pastoral ecotone of the Loess Plateau in Northern Shaanxi. Beijing: Beijing Forestry University, 2019.
- 李豪. 陕北黄土高原农牧交错区植被恢复中沙棘的化感效应研究. 北京: 北京林业大学, 2019.
- [35] Gao G L, Ding G D, Zhao Y Y, *et al.* Fractal approach to estimating changes in soil properties following the establishment of *Caragana korshinskii* shelterbelts in Ningxia, NW China. *Ecological Indicators*, 2014, 43: 236–243.
- [36] Xia Z C, Kong C H, Chen L C, *et al.* A broadleaf species enhances an autotoxic conifers growth through belowground chemical interactions. *Ecology*, 2016, 97: 2283–2292.