网络出版时间:2026-02-04 DOI:10.13207/j.jnwafu.2026.08.017

沙蒿对3种伴生植物种子萌发与幼苗生长的化感作用

赵彦坤[1,3],柴成武[3],王方琳[2,3],胡小柯[2],何芳兰[2,3]

(1 武威市石羊河林业总场,甘肃 武威 733000;2 甘肃省治沙研究所 甘肃省荒漠化防治重点实验室,甘肃 武威 733000;
3 甘肃省治沙研究所 甘肃河西走廊森林生态系统定位观测研究站,甘肃 兰州 730073)

[摘 要] 【目的】研究沙蒿次生物质的化感效应,揭示沙蒿与伴生物种的相互关系并为其在植被恢复中的合理配置提供参考。【方法】以沙蒿为供体植物,选择伴生植物藜(*Chenopodium album* L.)、虎尾草(*Chloris virgata* Sw.)、盐生草(*Halogeton glomeratus*)为受体植物,研究3种受体植物种子萌发、幼苗生长及生理指标对不同质量浓度(5,25,50和100 mg/L)沙蒿植株水浸提液的响应特征。【结果】3种受体植物种子萌发率均随浸提液质量浓度的升高而降低,但响应程度不同。种子萌发阶段对化感物质的敏感性高于幼苗生长阶段,并以藜的敏感性最高,在浸提液质量浓度为100 mg/L时完全不能萌发;虎尾草在浸提液质量浓度为100 mg/L时萌发指标降至最低(萌发率19.91%);盐生草受低浓度浸提液影响较小,在浸提液质量浓度为100 mg/L时仍保持较高的萌发率(49.34%)。浸提液对3种受体植物种子萌发率的抑制程度大于萌发速率,对根长、根干质量的抑制程度大于苗高、苗干质量。3种植物相对电导率(REC)、丙二醛(MDA)含量随浸提液质量浓度升高而增加,叶绿素(Chl)含量随浸提液质量浓度升高而降低,但敏感性在不同植物间有一定差异。藜的REC在各质量浓度浸提液处理下均高于CK,虎尾草和盐生草REC仅在高质量浓度处理时显著升高;虎尾草、盐生草MDA含量的增幅显著高于藜。【结论】沙蒿植株水浸提液对3种伴生植物种子萌发和幼苗生长的化感抑制作用大小表现为藜>虎尾草>盐生草;沙蒿水浸提液的化感抑制作用具有浓度依赖性和受体植物特异性,其作用机制可能通过加剧受体植物膜质过氧化、损伤细胞膜并抑制光合作用等方式来实现。

[关键词] 沙蒿;化感作用;伴生植物;种子萌发;幼苗生长

[中图分类号] S718.53;Q948.12+2.1 [文献标志码] A [文章编号] 1671-9387(2026)08-0162-08

Allelopathy of *Artemisia desertorum* Spreng. on seed germination and seedling growth of three associated plants

ZHAO Yankun[1,3], CHAI Chengwu[3], WANG Fanglin[2,3], HU Xiaoke[2], HE Fanglan[2,3]

(1 *Shiyanghe Forestry General Farm of Wuwei City, Wuwei, Gansu* 733000, *China*; 2 *Key Experiment of Desertification Prevention and Control in Gansu Province, Gansu Desert Control Research Institute, Wuwei, Gansu* 733000, *China*; 3 *Gansu Hexi Corridor Forest Ecosystem Research Station, Gansu Desert Control Research Institute, Lanzhou, Gansu* 730070, *China*)

Abstract: 【Objective】 The study aims to investigate the allelopathic effects of *Artemisia desertorum* secondary metabolites, elucidating its ecological interactions with associated species and its effective utilization in vegetation restoration. 【Method】 *A. desertorum* was used as the donor plant. Three associated species, namely *Chenopodium album* L., *Chloris virgata* Sw. and *Halogeton glomeratus*, were selected as recipient plants. The responses in seed germination, seedling growth, and physiological indicators of these three species were exam-

[收稿日期] 2025-08-28 [修回日期] 2025-11-11
[基金项目] 甘肃省林业和草原科技创新项目(LCCX2025004);中国工程院战略研究与咨询项目(2024-DFZD-32);甘肃省第二批陇原青年英才项目((2023)11);甘肃省重点研发计划项目(25YFFA073)
[作者简介] 赵彦坤(1988—),男,汉族,甘肃会宁人,高级工程师,主要从事荒漠植物生理生态及林业工程。E-mail:842376086@qq.com.
[通信作者] 王方琳(1985—),女,汉族,甘肃天水人,主要从事植物生理生态和荒漠化防治研究。E-mail:wangfanglin2008@163.com.

ined under different concentrations of *A. desertorum* aqueous extract (5, 25, 50, and 100 mg/L). 【Result】The seed germination rates of the three recipient plants all decreased with increasing extract concentration, but the extent of response varied. The germination stage was more sensitive to allelopathic substances than the seedling growth stage, with *C. album* L. showing the highest sensitivity-completely unable to germinate at an extract concentration of 100 mg/L. In contrast, *C. virgata* Sw. exhibited the lowest germination index at 100 mg/L (19.91% germination rate), while *H. glomeratus* was less affected by low concentrations, maintaining a relatively high germination rate (49.34%) at 100 mg/L. The inhibition by the extract was greater on germination rate than on germination speed, and stronger on root length and root dry mass than on shoot height and shoot dry mass. With increasing extract concentration, relative electrical conductivity (REC) and malondialdehyde (MDA) content of the three species increased, while chlorophyll content decreased. However, sensitivities differed among species. *C. album* L. consistently exhibited higher REC compared to the control across all concentrations, whereas *C. virgata* Sw. and *H. glomeratus* showed significant REC elevation only at high concentrations. The increase in MDA content was significantly greater in *C. virgata* Sw. and *H. glomeratus* than in *C. album* L. 【Conclusion】 The allelopathic inhibition of water extract from *A. desertorum* on seed germination and seedling growth of the three associated plants followed the order: *C. album* L. > *C. virgata* Sw. > *H. glomeratus*. This allelopathic inhibition by *A. desertorum* extract was concentration-dependent and species-specific. The mechanism might involve the induction of membrane lipid peroxidation, cell membrane damage, and the suppression of photosynthesis in the recipient plants.

Key words: *Artemisia desertorum*; allelopathy; associated plants; seed germination; seedling growth

生态系统中一种活的或死的植物通过茎叶挥发、雨雾淋溶、根系分泌或枯落物分解等多种途径向环境中释放次生代谢物，从而促进或抑制自身或邻近植物生长、发育及分布的化学生态学现象被称为化感作用(allelopathy)[1]。国内外对化感作用的研究历史悠久，早在公元前350年，古希腊哲学家THEOPHRASTUS就观察到鹰嘴豆能抑制棘的生长并消灭杂草[2]。此后，相关研究不断深入，RICE[3]将化感物质分为14类；BAIS等[4]研究发现，化感物质可改变土壤微生物群落的组成和功能，进而影响植物性能；中国科学院东北地理所与德国康斯坦茨大学等单位合作揭示，化感的抑制作用会随物种间进化距离的增加而增强[5]。中国古代农耕中就有化感作用应用的雏形；2001年《植物化感作用及其应用》的出版，推动了相关研究的快速发展；近年来，化感作用研究已在植被群落演替、恢复以及牧草、药材和农作物等合理种植、杂草控制、病虫害防治、减少连作障碍和自毒危害等应用研究方面取得显著成果[6-8]。研究表明，在逆境条件下，当植物通过物理手段不能满足自身生长的需要时，以次生代谢物质为媒介的化学方法则上升为重要的竞争手段[9]。因此，长期生长在土壤瘠薄、气候恶劣生境中的荒漠植物是更值得深入研究的化感植物资源。

沙蒿(*Artemisia desertorum* Spreng.)是流动沙丘生境下的主要防风固沙植物，根系发达，繁殖能力强[10]。在荒漠区恶劣的自然条件下，沙蒿常以较大单株生长或成片聚集分布，并常常演替成为群落优势种或建群种，对周围植物的生长有明显影响[11]。有研究表明，沙蒿能通过根系分泌、雨水淋溶等途径，向周围环境释放萜类、酚酸类等化感物质，这些物质会对周围伴生植物种子萌发和幼苗生长产生作用，进而影响沙地植被的物种组成和群落演替[12]；然而，目前关于不同伴生植物对沙蒿化感物质响应的系统性研究还相对匮乏。因此，本研究选择荒漠地区常见的沙蒿伴生植物藜(*Chenopodium album* L.)、虎尾草(*Chloris virgata* Sw.)、盐生草(*Halogeton glomeratus* (M. Bieb.) C. A. Mey.)为受体植物，研究沙蒿植株水浸提液对其种子萌发、幼苗生长的影响及沙蒿的化感效应，旨在探明沙蒿化感作用对不同伴生物种的影响差异，确定3种受体植物对沙蒿化感胁迫的敏感值和响应规律，揭示沙蒿化感作用在沙地植物群落种间竞争中的生态意义，为沙地生态系统的植被恢复、物种多样性保护和科学管理提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　供试材料

供体植物为2年生盆栽沙蒿带根植株，于2022

年9月采自甘肃省治沙研究所荒漠化与风沙灾害防治重点实验室试验苗圃样地,受体植物种子均为甘肃民勤绿洲边缘野外当年采收的藜、虎尾草、盐生草种子。

1.2 研究方法

1.2.1 *浸提液的制备* 将沙蒿植株带回实验室冲洗干净,晾干后用粉碎机粉碎,之后称取粉末500 g加入5 000 mL蒸馏水封口并在室温(20~25 ℃)下浸泡,其间每隔7~8 h摇动5 min;浸泡72 h后在40 ℃下超声波浸提30 min[3],将浸提液用纱布过滤后采用定量滤纸过滤,最后用单元0.45 μm的微孔滤膜过滤,得到的上清液为质量浓度100 mg/L的浸提母液;试验处理液质量浓度设置参考高珊等[13]方法,使用时分别稀释至质量浓度为5,25,50,100(原液)mg/L,置于4 ℃冰箱保存备用。

1.2.2 *种子萌发试验* 在直径9 cm的培养皿中铺双层滤纸(培养皿和滤纸均做高温消毒处理),每皿放入饱满且大小一致的藜、虎尾草、盐生草种子各50粒,之后分别加入各处理浸提液10 mL(使用前先将浸提液在室温下放置30 min,以免骤冷对试验结果产生影响),对照(CK)加等量蒸馏水,每处理重复5次;置于人工气候箱进行暗培养,设置白天温度25 ℃、夜晚20 ℃,湿度60%;其间每天用胶头滴管吸出培养皿中多余的液体,并补充1 mL较大质量浓度的浸提液(或蒸馏水),以保持培养皿中浸提液质量浓度及水分状况恒定;每天调查各处理种子的萌发数量,连续3 d不再有新种子萌发时结束试验,计算种子萌发率、萌发势、萌发指数、活力指数[14]。

$$\text{萌发率}(\%)=(\text{萌发种子数}/\text{供试种子数})\times 100\%; \quad (1)$$

$$\text{萌发势}(\%)=(\text{萌发试验期限最初}1/3\text{时间种子萌发数}/\text{试验种子总数})\times 100\%; \quad (2)$$

$$\text{萌发指数}(\mathrm{GI})=\sum(G_t/D_t); \quad (3)$$

$$\text{活力指数}(\mathrm{VI})=S\times GI。 \quad (4)$$

式中:G_t指在t日内每日萌发的种子个数,D_t指相应的萌发观测时间(d),S为种苗生长量(长度或质量)。

1.2.3 *幼苗生长试验* 幼苗生长试验参考韦琦等[15]的方法。将100 mL烧杯装满干净河沙,均匀注入10 mL不同质量浓度沙蒿浸提液,使沙子完全湿润,摇匀后在沙子上部铺两张滤纸压平作为培养床,用镊子将30粒经催芽后萌动的受体植物种子分别移到滤纸上,再分别注入沙蒿浸提液各5 mL,CK加等量蒸馏水,每处理重复5次;然后置于人工气候箱中培养,设光照时间12 h、光强3 500 lx(其他培养条件同种子萌发试验),15 d后从烧杯中随机取出20株幼苗,测定苗高、根长、苗干质量、根干质量。其中,苗干质量与根干质量在105 ℃下杀青5 min,80 ℃下烘干至质量恒定后测定。总叶绿素(Chl)含量采用丙酮法测定,相对电导率(REC)用电导率仪(CD400)测定,丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸显色法测定[16]。

1.3 数据处理

采用Excel 2007和SPSS19.0对同一质量浓度不同植物间的数据进行处理和方差分析。化感抑制率(allelopathic inhibition rate,RI)指浸提液对各个测试项目促进或抑制率的算数平均值,RI>0表示浸提液对受体植物具有抑制作用,RI<0表示浸提液对受体植物具有促进作用,RI绝对值大小表示抑制(促进)作用强度的强弱[12]。在生理指标中,所测REC和MDA含量的数值越大,说明抑制作用越强。

$$\text{化感抑制率}(\mathrm{RI},\%)=(1-T/C)\times 100\%。 \quad (5)$$

式中:T指处理值;C为对照值。

2 结果与分析

2.1 沙蒿植株水浸提液对3种受体植物种子萌发的影响

表1显示,3种受体植物种子萌发率、萌发势、萌发指数及活力指数均随沙蒿水浸提液质量浓度升高而降低。藜种子萌发率、萌发势、萌发指数及活力指数在沙蒿浸提液质量浓度为5 mg/L时均略有升高,但与CK间均无显著差异($P>0.05$,下同),在浸提液浓度为25,50 mg/L时,上述各萌发指标均与CK及5 mg/L浸提液处理间存在显著差异($P<0.05$),但在浸提液质量浓度为100 mg/L时藜种子不能萌发。同时,虎尾草种子萌发也受到沙蒿浸提液的较强抑制。浸提液质量浓度为5 mg/L时,虎尾草种子萌发率为94.87%,萌发势为72.24%,与CK无显著差异,但其萌发指数和活力指数均与CK有显著差异;随着浸提液浓度增大,虎尾草及其他种子萌发指标均急剧降低,其中在浸提液质量浓度为50 mg/L时,虎尾草种子萌发率、萌发指数、活力指数分别为26.39%,6.37,62.34,均低于同质量浓度下的其余两种受体植物,并均与CK差异显著。相比较而言,盐生草种子萌发受较低质量浓度浸提液

的抑制作用较小。在浸提液质量浓度为5和25 mg/L时，盐生草种子萌发率和萌发指数均与CK间无显著差异，但萌发势和活力指数均显著低于CK；在浸提液质量浓度为50和100 mg/L时，盐生草种子萌发指标均显著降低并与CK有显著差异；3种受体植物相比，当浸提液质量浓度为100 mg/L时，盐生草种子的萌发率、萌发指数、活力指数均达到最大值，分别为49.34%，5.62和62.98。

表1　沙蒿水浸提液对3种受体植物种子萌发的影响

Table 1　Effects of *Artemisia desertorum* aqueous extract on seed germination of three recipient plant species

受体植物 Recipient plant	浸提液质量浓度/(mg·L^{-1}) Concentration of aqueous extract	萌发率/% Germination rate	萌发势/% Germination potential	萌发指数 Germination index	活力指数 Vigor index
藜 *Chenopodium album* L.	CK	98.15±1.78 a	78.03±1.22 a	9.70±0.29 a	171.54±0.36 a
	5	99.84±1.81 a	78.59±0.95 a	9.78±1.28 a	172.21±1.24 a
	25	83.79±2.26 b	70.94±1.34 b	8.41±2.30 b	136.52±1.17 b
	50	56.68±1.09 c	61.28±1.28 c	7.83±1.58 c	89.35±2.03 c
	100	—	—	—	—
虎尾草 *Chloris virgata* Sw.	CK	98.25±2.03 a	74.18±0.84 a	9.14±0.33 a	143.06±0.55 a
	5	94.87±1.24 a	72.24±1.22 a	8.98±2.14 b	135.15±1.25 b
	25	51.17±1.48 b	66.81±1.56 b	7.12±1.12 c	84.46±0.58 c
	50	26.39±2.61 c	42.37±0.94 c	6.37±0.81 d	62.34±0.79 d
	100	19.91±2.08 d	30.28±0.57 d	3.84±1.91 e	31.09±1.27 e
盐生草 *Halogeton glomeratus*	CK	99.57±1.21 a	62.55±1.07 a	9.70±1.09 a	172.86±0.38 a
	5	99.38±0.56 a	51.28±1.26 b	9.35±2.14 a	149.22±2.17 b
	25	97.45±1.81 a	48.36±0.69 c	9.28±0.52 a	119.16±1.29 c
	50	71.37±1.26 b	36.32±1.33 d	8.42±0.69 b	98.51±0.84 d
	100	49.34±1.64 c	19.33±0.88 e	5.62±0.39 c	62.98±1.33 e

注：同列同一物种数据后的不同小写字母表示不同处理间在0.05水平存在显著差异，下同。

Note: Different lowercase letters after the datas within a column for the same species indicate significant differences among treatments at $P<0.05$ level. The same below.

2.2　沙蒿水浸提液对3种受体植物幼苗生长的影响

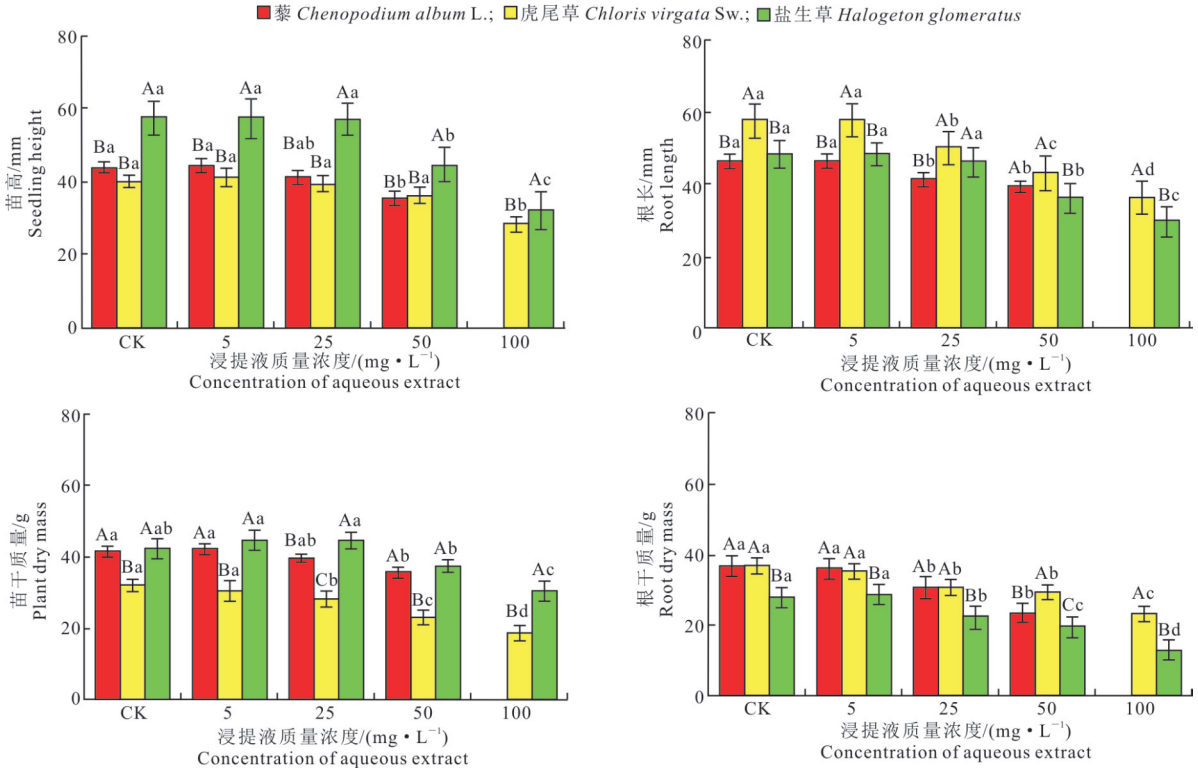
由图1可见，3种受体植物地上及地下部分生长对沙蒿水浸提液表现出不同的化感适应性。3种植物苗高均随浸提液质量浓度升高而减小，盐生草苗高在整个浸提液处理过程中总体上大于藜和虎尾草，且在不同质量浓度浸提液处理下均差异显著。藜苗高在CK条件下为43.66 mm，在5，25 mg/L浸提液处理时与CK无显著差异，在浸提液质量浓度为50 mg/L时较CK显著降低18.39%。虎尾草苗高在CK条件下为39.52 mm，在浸提液质量浓度为5，25，50 mg/L时与CK无显著差异，而在100 mg/L时较CK显著降低28.75%。盐生草苗高在CK条件下为57.34 mm，在浸提液质量浓度为5，25 mg/L时与CK无显著差异，在浸提液质量浓度为50，100 mg/L时较CK分别显著降低22.78%，43.53%。

在根长方面，虎尾草根长在不同质量浓度浸提液处理过程中总体上大于藜和盐生草，且在CK及5 mg/L处理时3种植物间差异较大，而在20和50 mg/L处理时差异较小。藜根长在CK条件下为46.75 mm，在浸提液质量浓度为5 mg/L时与CK无显著差异，在25，50 mg/L时较CK分别显著降低11.47%，15.96%。虎尾草根长在CK条件下为57.94 mm，在浸提液质量浓度为5 mg/L时与CK无显著差异，在25～100 mg/L时较CK显著降低13.17%～37.09%。盐生草根长在CK条件下为48.27 mm，在浸提液质量浓度为5，25 mg/L时与CK无显著差异，在50，100 mg/L时较CK分别显著降低25.05%和38.12%。

在苗干质量方面，藜和盐生草苗干质量在CK及整个浸提液处理过程中均大于虎尾草，3种植物苗干质量均随浸提液质量浓度升高而减小。藜苗干质量在CK条件下为0.416 g，在浸提液质量浓度为5，25 mg/L时与CK无显著差异，在浸体液质量浓度为50 mg/L时较CK显著降低14.57%。虎尾草苗干质量在CK条件下为0.316 g，在浸提液质量浓度为5 mg/L时与CK无显著差异，在浸提液质量浓度为25～100 mg/L时较CK显著降低12.35%～41.98%。盐生草苗干质量在CK条件下为0.423 g，在浸提液质量浓度为5，25 mg/L时与CK无显著差异，在浸提液质量浓度为50，100 mg/L时比CK分别显著降低13.35%和28.43%。

由图1还可知，在根干质量方面，藜和虎尾草根干质量在CK及不同质量浓度浸提液处理过程中总

体上大于盐生草,3种植物根干质量均随浸提液质量浓度升高而逐渐减小。藜根干质量在CK条件下为0.368 g,在浸提液质量浓度为5 mg/L时与CK无显著差异,在浸提液质量浓度为25~50 mg/L时比CK显著降低16.25%~37.25%。虎尾草和盐生草根干质量在CK条件下分别为0.368,0.280 g,在浸提液质量浓度为5 mg/L时均与CK无显著差异,在浸提液质量浓度为25~100 mg/L时分别比CK显著降低16.14%~37.49%,20.51%~54.84%。



不同小写字母表示同一物种不同处理间差异显著,不同大写字母表示相同处理下不同物种间差异显著。

Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments for the same species, while different uppercase letters indicate significant differences among species within the same treatment.

图1 沙蒿水浸提液对3种受体植物幼苗生长的影响

Fig. 1 Effects of *Artemisia desertorum* aqueous extract on seedling growth of three recipient plant species

2.3 沙蒿植株水浸提液对3种受体植物幼苗生理指标的影响

由表2可以看出,3种受体植物生理指标对沙蒿浸提液的敏感性不同。3种受体植物幼苗相对电导率(REC)均随着浸提液质量浓度升高而呈逐渐增加趋势,但增幅不同。藜幼苗REC在各处理下均显著高于CK,增幅为7.5%~17.8%;虎尾草幼苗REC仅在5 mg/L浸提液处理下与CK无显著差异,在25~100 mg/L浸提液处理下比CK显著升高16.0%~20.8%;盐生草幼苗REC在5和25 mg/L浸提液处理下均与CK无显著差异,在50和100 mg/L浸提液处理下分别比CK显著升高8.1%和20.7%。3种受体植物叶绿素(Chl)含量均随浸提液质量浓度升高而降低。在浸提液质量浓度为5 mg/L时,3种受体植物Chl含量与CK相比均无显著差异,而在其余处理下均显著低于CK。其中,藜幼苗Chl含量在25~50 mg/L浸提液处理下比CK显著降低12.5%~26.9%,虎尾草和盐生草幼苗Chl含量在25~100 mg/L浸提液处理下分别比CK显著降低25.6%~55.8%和22.8%~62.0%。藜、虎尾草和盐生草幼苗MDA含量均随浸提液质量浓度升高而增大,但增幅存在较大差异。其中,藜幼苗MDA含量在5 mg/L浸提液处理下与CK无显著差异,在50 mg/L浸提液处理下比CK显著增加16.6%;虎尾草和盐生草幼苗MDA含量在5~100 mg/L浸提液处理下均比CK显著升高,增幅分别为39.3%~59.2%和23.3%~24.9%;在25,50,100 mg/L浸提液处理间也均存在显著性差异。

2.4 沙蒿浸提液的化感抑制效应

表3表明,沙蒿植株水浸提液对3种受体植物种子萌发与幼苗生长的化感抑制效应不尽相同。其中,不同质量浓度浸提液对3种受体植物种子萌

发均产生了不同程度的抑制，抑制率随浸提液质量浓度升高而逐渐增强；浸提液对藜、虎尾草、盐生草种子萌发的平均化感抑制率分别为 41.39%，30.29% 和 18.21%。在幼苗生长阶段，沙蒿植株水浸提液质量浓度为 5 mg/L 时，其仅对盐生草幼苗生长略有促进作用，其余质量浓度处理均表现为抑制，且化感抑制作用随浸提液质量浓度升高而增强；沙蒿浸提液对 3 种受体植物幼苗生长总体抑制作用的大小表现为藜（32.87%）＞虎尾草（17.01%）＞盐生草（16.87%）。另外，5 mg/L 的沙蒿植株水浸提液对藜幼苗生理指标表现为促进作用，化感抑制率为－1.94%，其他浸提液处理对 3 种受体植物的幼苗生理指标均产生抑制效应，且抑制作用均随浸提液质量浓度升高而增强；沙蒿植株水浸提液对虎尾草幼苗生理指标的综合化感抑制作用最强（49.17%），其次为藜（33.84%）和盐生草（33.20%）。

表 2　沙蒿植株水浸提液对 3 种受体植物幼苗生理特性的影响

Table 2　Effects of *Artemisia desertorum* aqueous extract on physiological characteristics of three recipient plant species

受体植物 Recipient plant	浸提液质量浓度/(mg·L^{-1}) Concentration of aqueous extract	相对电导率(REC)/% Relative conductivity	叶绿素含量(Chl)/(mg·g^{-1}) Chlorophyll content	丙二醛含量(MDA)/(μmol·g^{-1}) Malondialdehyde content
藜 *Chenopodium album* L.	CK	4.68±1.29 c	1.04±1.13 a	4.27±0.99 b
	5	5.06±1.21 b	1.19±1.05 a	4.29±1.27 b
	25	5.32±2.21 b	0.91±1.65 b	5.01±1.65 a
	50	5.69±0.86 a	0.76±1.27 c	5.12±0.76 a
	100	—	—	—
虎尾草 *Chloris virgata* Sw.	CK	4.15±0.16 d	0.43±0.28 a	2.56±0.27 d
	5	4.09±1.22 d	0.40±0.33 a	4.22±0.33 c
	25	4.47±1.08 c	0.32±1.11 b	4.36±0.98 c
	50	4.94±1.12 b	0.26±1.02 c	5.89±1.16 b
	100	5.24±1.04 a	0.19±0.05 d	6.28±1.25 a
盐生草 *Halogeton glomeratus*	CK	3.87±0.69 c	0.79±1.67 a	4.01±1.28 d
	5	3.92±1.18 c	0.68±1.33 a	5.23±0.14 c
	25	3.99±1.02 c	0.61±0.91 b	5.97±1.41 c
	50	4.21±1.76 b	0.54±1.62 c	6.65±1.33 b
	100	4.88±1.24 a	0.30±0.69 d	7.36±1.27 a

表 3　沙蒿植株水浸提液对 3 种受体植物种子萌发与幼苗生长、生理指标的化感抑制率

Table 3　Allelopathic inhibition rates of *Artemisia desertorum* aqueous extract on seed germination, seedling growth, and physiology index of three recipient plant species

受体植物 Recipient plant	浸提液质量浓度/(mg·L^{-1}) Concentration of aqueous extract	化感抑制率(RI)/% Allelopathic inhibition rate		
		种子萌发 Seed germination	幼苗生长 Seedling growth	幼苗生理指标 Seedling physiology index
藜 *Chenopodium album* L.	CK	—	—	—
	5	0.66	0.14	－1.94
	25	14.19	9.79	14.50
	50	50.73	21.56	22.80
	100	100.00	100.00	100.00
平均抑制率/% Average inhibition rate		41.39	32.87	33.84
虎尾草 *Chloris virgata* Sw.	CK	—	—	—
	5	5.98	0.63	23.46
	25	8.80	10.61	34.53
	50	44.22	20.46	62.88
	100	62.18	36.33	75.80
平均抑制率/% Average inhibition rate		30.29	17.01	49.17
盐生草 *Halogeton glomeratus*	CK	—	—	
	5	2.68	－2.25	15.21
	25	5.67	5.27	24.92
	50	23.73	23.16	35.43
	100	40.78	41.31	57.22
平均抑制率/% Average inhibition rate		18.21	16.87	33.20

3 讨 论

本研究表明,沙蒿植株水浸提液对藜、虎尾草、盐生草3种受体植物种子萌发、幼苗生长、幼苗生理指标总体表现为抑制作用,且抑制作用随浸提液质量浓度升高而增强,并不存在假苍耳(*Cyclachaena xanthiifolia*)、黑沙蒿(*Artemisia ordosica*)等化感植物与受体植物间所具有的'低促高抑'现象[7,13],说明不同植物或同一植物的不同生长发育阶段对化感物质的敏感性不同[17]。此外,有研究表明,植物幼苗生长阶段比种子萌发阶段的化感敏感性更强[18],但本研究中3种受体植物种子萌发阶段对沙蒿化感物质的敏感性均大于幼苗生长阶段。种子萌发阶段,沙蒿浸提液对藜、虎尾草种子萌发率的抑制作用均大于萌发指数,且浸提液质量浓度越高抑制效果越明显;而对虎尾草、盐生草种子萌发的抑制作用主要表现在高质量浓度(50~100 mg/L)处理,低质量浓度(5~25 mg/L)浸提液仅对种子萌发指数具有抑制作用,浸提液对受体植物种子萌发率的抑制程度大于萌发速率,说明萌发率可能是衡量沙蒿化感作用更敏感的指标,这与郑丽等[19]的研究结果"萌发指数是较为敏感的指标"这一结果并不一致,可能与植物种类不同有关。另外,化感物质对受体植物种子萌发抑制作用的大小,与浸提液质量浓度、受体植物种类密切相关[18]。低质量浓度的沙蒿浸提液对虎尾草、盐生草种子萌发的抑制作用较小,主要表现为延缓其萌发速度;而沙蒿化感物质可直接导致藜种子胚芽难以突破种皮而腐烂,说明即使较低质量浓度的浸提液已经对藜种子萌发产生了抑制,因此藜在种子萌发阶段对沙蒿化感物质的敏感性最强,这可能与各类受体植物对化感物质的代谢不同有关。

王玉芝[17]研究表明,高质量浓度的蒿属(*Artemisia*)植物浸提液会影响受体植物植株的分解代谢并妨碍营养元素的运输,从而影响幼芽、幼根的生长及生物量分配,使受体植物的正常生长发育受到抑制,这与本试验中沙蒿浸提液对3种受体植物的影响相似。比较同种受体植物幼苗苗高和根长、苗干质量与根干质量对化感物质的敏感性差异,可以看出,5~25 mg/L沙蒿浸提液对3种受体植物地下根长的抑制均大于苗高、对根干质量的抑制大于苗干质量,但50~100 mg/L浸提液对受体植物地上部分的抑制作用均逐渐增强。这种现象可能是由于在幼苗生长过程中,幼苗根部直接与溶解在土壤中的沙蒿化感物质接触,所以受到不同程度的抑制;或者化感物质可能主要通过挥发作用对受体植物地上部分生长产生影响,即空气中低水平的化感物质对受体植物茎叶生长略有促进作用,这与高玉莲等[20]的研究结果相似。

沙蒿浸提液对藜幼苗3种生理指标的抑制作用效果总体一致,而对虎尾草、盐生草幼苗生理指标的影响均表现为MDA含量>Chl含量>REC,各质量浓度浸提液对MDA含量的抑制显著高于其他生理指标,说明沙蒿浸提液可能通过增强受体植物幼苗细胞膜质过氧化程度,导致细胞酶和膜的损伤而影响其正常生长。因此,对幼苗膜系统的破坏可能是沙蒿化感效应的生物起点。

此外,本试验所用的浸提液仅仅是沙蒿新鲜植株的水粗提物,试验均在恒温培养箱内进行,可保证光照、温度等条件的一致,避免自然条件下各种外界因素的干扰,试验结果能较好地解释其浸提液对受体植物种子萌发与幼苗生长的化感作用,但自然环境中化感物质的释放与积累可能受降水量、土壤、光照等诸多环境因素的影响,因此其化感作用能否表现出实际效应,化感物质的具体成分、释放途径及其不同器官、枯落物等的化感效应还有待进一步研究。

4 结 论

1)沙蒿植株水浸提液对藜、虎尾草、盐生草3种受体植物的种子萌发、幼苗生长及生理指标均表现为抑制作用,且抑制强度随浸提液质量浓度升高而增强,100 mg/L浸提液会完全抑制藜种子萌发,体现了不同植物或同一植物不同生长阶段对化感物质的敏感性差异,也可能与高质量浓度浸提液中化感物质的累积效应有关。

2)3种受体植物种子萌发阶段对化感物质的敏感性高于幼苗生长阶段。藜对化感物质的敏感性最强,低质量浓度即可抑制其萌发;虎尾草、盐生草主要在高质量浓度下受到抑制,低质量浓度仅会延缓其萌发速度,这种差异与受体植物对化感物质的代谢能力有关。总体上浸提液对萌发率的抑制程度大于萌发速率,对根长的抑制作用大于苗高,对根干质量的抑制大于苗干质量,这是因为受体植物幼苗根部与浸提液直接接触,更易吸收浸提液中的抑制性物质。

3)沙蒿植株水浸提液对3种受体植物幼苗生理

指标，即MDA含量、Chl含量、REC均会产生影响，进一步说明沙蒿浸提液引起受体植物幼苗膜质过氧化程度增强，导致细胞膜受损。而叶绿素含量降低，又说明浸提液使受体植物幼苗的光合作用受到了抑制，进而影响幼苗的正常生长。

[参考文献]

[1] 孙垂华，娄永根．化学生态学前沿[M]．北京：高等教育出版社，2010.
KONG C H，LOU Y G. Chemical ecology[M]. Beijing：Higher Education Press，2010.

[2] MACÍAS F A，MEJÍAS F J，MOLINILLO J M，et al. Recent advances in allelopathy for weed control：from knowledge to applications[J]. Pest Management Science，2019，75(9)：2413-2436.

[3] RICE E L. Allelopathy[M]. New York：Academic Press，1984：1-267.

[4] BAIS H P，VEPACHEDU R，GILROY S，et al. Allelopathy and exotic plant invasion：from molecules and genes to species interactions[J]. Science，2003：301(5638)：1377-1380.

[5] HIERRO J L，CALLAWAY R M. The ecological importance of allelopathy[J]. Annual Review of Ecology，Evolution and Systematics，2021，52：25-45.

[6] 王红妮，王学春，赵长坤，等．油菜秸秆还田对水稻根系、分蘖和产量的影响[J]．应用生态学报，2019，30(4)：1243-1252.
WANG H N，WANG X C，ZHAO C K，et al. Effects of oilseed rape straw incorporation on root，tiller and grain yield of rice[J]. Chinese Journal of Applied Ecology，2019，30(4)：1243-1252.

[7] 姚树宽，李凤兰，彭丽娜，等．假苍耳不同部位水浸提液对五种十字花科植物化感作用的研究[J]．草业学报，2018，27(9)：56-66.
YAO S K，LI F L，PENG L N，et al. A study of the allelopathic effect of extracts from different parts of *Iva xanthiifolia* on five Brassicaceae species[J]. Acta Prataculturae Sinica，2018，27(9)：56-66.

[8] 高玉莲，李睿光，常静，等．油菜对3种作物种子萌发和幼苗生长的化感作用[J]．应用生态学报．2020，27(5)：1154-1161.
GAO Y L，LI R G，CHANG J，et al. Allelopathic effects of rapeseed on seed germination and seedling growth of three crops[J]. Chinese Journal of Applied Ecology，2020，27(5)：1154-1161.

[9] 郭英姿，贾文庆，何松林，等．花叶滇苦菜浸提液对3种花卉种子萌发和幼苗生长的化感作用[J]．草业学报，2022，31(9)：96-106.
GUO Y Z，JIA W Q，HE S L，et al. Allelopathic effects of extracts of *Sonchus asper* on seed germination and seedling growth of three herbaceous flower species[J]. Acta Prataculturae Sinica，2022，31(9)：96-106.

[10] 刘瑛心．中国沙漠植物志(第3卷)[M]．北京：科学出版社，1992.
LIU Y X. Desert flora of China (Vol. 3)[M]. Beijing：Science Press，1992.

[11] 马全林，卢琦，张德魁，等．沙蒿与油蒿灌丛的防风阻沙作用[J]．生态学杂志，2012，31(7)：1639-1645.
MA Q L，LU Q，ZHANG D K，et al. Windbreak effect of *Artemisia ordosica* and *Artemisia ordosica* shrub[J]. Chinese Journal of Ecology，2012，31(7)：1639-1645.

[12] 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[J]．生态学报，2019，39(15)：5670-5678.
DENG W H，ZHANG X R，ZHANG J Q，et al. Allelopathic effects of aqueous extracts from *Artemisia ordosica* on four associated herbaceous plants[J]. Acta Ecologica Sinica，2019，39(15)：5670-5678.

[13] 高姗，廖超英，刘瑞顺，等．黑沙蒿对羊柴及柠条的化感作用[J]．中国沙漠，2015，35(3)：1-7.
GAO S，LIAO C Y，LIU R S，et al. Allelopathic effects of *Artemisia ordosica* Krasch on *Hedysarum mongolicum* and *Caragana korshinskii*[J]. Journal of China Desert，2015，35(3)：1-7.

[14] 尹思成，马逸驰，王先云，等．3种淡水微藻相互间化感作用的实验研究[J]．生态毒理学报，2020，15(6)：223-233.
YIN S C，MA Y C，WANG X Y，et al. Study on the allelopathy of three kinds of freshwater microalgae[J]. Asian Journal of Ecotoxicology，2020，15(6)：223-233.

[15] 韦琦，曾任森．胜红蓟地上部化感作用的分离与鉴定[J]．植物生态学报，1997，21(4)：360-366.
WEI Q，ZENG R S. Isolation and identification of allelopathy from the aerial parts of *Ageratum conyzoides*[J]. Chinese Journal of Plant Ecology，1997，21(4)：360-366.

[16] 李玲．植物生理学模块实验指导[M]．北京：科学出版社，2009：78-82.
LI L. Plant physiology module experimental guidance[M]. Beijing：Science Press，2009：78-82.

[17] 王玉芝．冷蒿茎叶浸提液对几种植物种子萌发及幼苗生长的影响[D]．呼和浩特：内蒙古农业大学，2008.
WAGY Z. Effects of extracts from stems and leaves of *Artemisia frigid* Willd. on some seeds germination and seedlings growth[D]. Huhhot：Inner Mongolia Agricultural University，2008.

[18] 杨期和，叶万辉，廖富林，等．植物化感物质对种子萌发的影响[J]．生态学杂志，2005，24(12)：1459-1465.
YANG Q H，YE W H，LIAO F L，et al. Effects of allelochemicals on seed germination[J]. Chinese Journal of Ecology，2005，24(12)：1459-1465.

[19] 郑丽，冯玉龙．紫茎泽兰叶片化感作用对10种草本植物种子萌发和幼苗生长的影响[J]．生态学报，2005，25(10)：2782-2787.
ZHENG L，FNG Y L. Allelopathic effects of *Eupatorium adenophorum* Spreng. on seed germination and seedling growth in ten herbaceous species[J]. Chinese Journal of Ecology，2005，25(10)：2782-2787.

[20] 高玉莲，常静，王贻卉，等．瑞香狼毒根提取物对3种作物种子萌发和幼苗生长的化感作用[J]．草业学报，2021，30(10)：83-91.
GAO Y L，CHANG J，WANG Y H，et al. Allelopathic effects of *Stellera chamaejasme* on seed germination and growth of three crops[J]. Acta Prataculturae Sinica，2021，30(10)：83-91.

（责任编辑：裴阿卫）