

扁蓿豆水浸提液对其种子萌发自毒作用研究

张小娟^{1,2,3,4}, 杨航^{1,2,3,4}, 张琪琳^{1,2,3,4}, 张鹏程^{1,2,3,4}, 宋建超^{1,2,3,4}, 鱼小军^{1,2,3,4}

(1. 甘肃农业大学草业学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 草业生态系统教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730070; 3. 甘肃省草业工程实验室, 甘肃 兰州 730070; 4. 中—美草地畜牧业可持续发展研究中心, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 为了明确扁蓿豆是否存在自毒效应, 以期为扁蓿豆科学种植提供理论依据。以扁蓿豆种子为受体, 采用室内培养皿种子萌发方法, 研究了不同质量浓度 (0、0.001、0.025、0.050、0.100 g/mL) 扁蓿豆 (*Medicago ruthenica*) 地上部分和地下部分水浸提液的自毒作用。结果表明, 扁蓿豆植株地上部分与根部水浸提液对其种子发芽率、发芽势、发芽指数、胚根长、胚芽长和单株鲜质量具有一定的抑制作用, 总体表现为在质量浓度 0.100 g/mL 下抑制作用最强。扁蓿豆地上部分水浸提液处理在 0.100 g/mL 质量浓度下发芽率较对照蒸馏水显著降低了 39.00% ($P < 0.05$), 种子发芽指数较对照蒸馏水降低了 82.00%; 根部水浸提液在 0.100 g/mL 质量浓度下胚根长较对照蒸馏水显著降低了 50.00%。各指标的化感效应指数与质量浓度均呈负相关。

关键词: 扁蓿豆; 水浸提液; 自毒作用; 种子萌发

中图分类号: S634.5

文献标志码: A

文章编号: 1001-1463(2022)08-0069-06

doi:10.3969/j.issn.1001-1463.2022.08.016

Study on Autotoxicity of Aqueous Extract of *Medicago ruthenica* on Its Seed Germination

ZHANG Xiaojuan^{1,2,3,4}, YANG Hang^{1,2,3,4}, ZHANG Qilin^{1,2,3,4}, ZHANG Pengcheng^{1,2,3,4}, SONG Jianchao^{1,2,3,4}, YU Xiaojun^{1,2,3,4}

(1. College of Pratacultural Science, Gansu Agricultural University, Lanzhou Gansu 730070, China; 2. Key Laboratory of Grassland Ecosystem, Ministry of Education, Lanzhou Gansu 730070, China; 3. Pratacultural Engineering Laboratory of Gansu Province, Lanzhou Gansu 730070, China; 4. Sino-U.S. Centre for Grassland Ecosystem Sustainability, Lanzhou Gansu 730070, China)

Abstract: To illustrate the autotoxicity in *Medicago ruthenica* seeds and to provide theoretical reference for the cultivation of *Medicago ruthenica*, the autotoxicity of different concentrations (0, 0.001, 0.025, 0.050 and 0.100 g/mL) of aqueous extracts from aboveground part and root of *Medicago ruthenica* were studied by indoor petridish seed germination method in laboratory. Results showed that the aqueous extracts from the aboveground part and root of *M. ruthenica* showed certain inhibitory effects on the seed germination rate, germination potential, germination index, radicle length, germ length and fresh quality of a single plant. The overall inhibitory effect was the strongest at the concentration of 0.100 g/mL. At the concentration of 0.100 g/mL, the germination rate using water extract aboveground was 39.00% lower than that of CK, i.e. distilled water only ($P < 0.05$), and the seed germination index was 82.00% lower than that of CK, at the concentration of 0.100 g/mL, the length of hypocotyl root using water extract from root was significantly reduced by 50.00% compared with that of CK, and the allelopathic effect index of each parameter was negatively correlated with the concentration.

Key words: *Medicago ruthenica*; Aqueous extract; Autotoxicity; Seed germination

连作障碍指在同一块土壤中连续栽培同种或同科作物时, 即使在正常栽培管理状况下, 也会出现生长势变弱、产量降低和品质下降的现象^[1], 自毒作用是导致连作障碍的一个重要因素^[2]。自毒作用是植物通过淋溶、残体分解和根系分泌物

向环境中释放化学物质, 对自身生长发育产生直接或间接抑制作用的现象^[3], 普遍存在于植物生长过程中。有研究表明, 在高于 0.15 g/mL 质量浓度的沙芥 (*Pugionium cornutum*) 叶、枝条水浸提液处理下, 沙芥种子发芽率、发芽指数、苗高、根

收稿日期: 2022-04-09; 修订日期: 2022-06-13

基金项目: 甘肃农业大学大学生创新创业训练计划项目(202102043)。

作者简介: 张小娟(2000—), 女, 甘肃康乐人, 本科在读, 研究方向为草学。Email: 2187245022@qq.com。

通信作者: 鱼小军(1977—), 男, 甘肃陇西人, 教授, 博士, 研究方向为草地生态、草种子的研究。Email: yuxj@gsau.edu.cn。

长、幼苗鲜质量及干质量均显著降低^[4]。卢红等^[5]的研究表明,随着广藿香(*Pogostemon cablin*)根、茎、叶水浸提液质量浓度升高,广藿香组培驯化苗的株高、根长和鲜质量均呈逐渐降低趋势。近年来,关于牧草种植过程中自毒作用的研究逐渐引起领域内学者的重视。有研究表明,在苜蓿(*Medicago sativa*)人工草地建植过程中,自毒作用引起的连作障碍导致幼苗死亡和产量下降^[6];荣思川等^[7]研究发现,5个苜蓿品种植株浸提液对紫花苜蓿品种甘农3号种子萌发和幼苗生长具有明显自毒效应,其效应因苜蓿品种、器官和浸提液质量浓度不同而存在显著差异;王启等^[8]研究发现,花椒叶浸提液对紫云英萌发和根长的抑制作用随质量浓度增大而增强。

扁蓿豆(*Medicago ruthenica*)又名花苜蓿、野苜蓿等,多年生豆科牧草,抗旱、抗寒,蛋白质含量高,适口性好,家畜过量采食不会发生膨胀病,是一种优质的蛋白质饲料^[8-10]。有关豆科牧草苜蓿的自毒效应较多,而扁蓿豆在生长过程中是否存在自毒效应的研究未见报道。我们以扁蓿豆种子为受体,研究了扁蓿豆不同部位、不同质量浓度水浸提液对其种子萌发和幼苗生长的影响,旨在明确扁蓿豆是否存在自毒效应,为扁蓿豆的科学种植提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试材料为扁蓿豆,植株采集于甘肃农业大学草业学院牧草种质资源圃。采集时先清理扁蓿豆植株周围枯枝落叶,挖取完整植株,清洗根系表面土壤及清除地上枝条间杂物。自然风干后分为地上部分和根系部分,粉碎后用自封袋封装,于4℃保存。

1.2 方法

1.2.1 浸提液制备 分别称取10g地上部分和10g根系干粉,分别置于150mL烧杯中,加入约80mL蒸馏水,用玻璃棒搅拌均匀,用蒸馏水少量多次冲洗干净烧杯内壁。编号后封口,置于冰箱冷藏浸泡48h后过滤定容至100mL,即为质量浓度0.10g/mL的扁蓿豆地上部分与根系水浸提液。利用逐步稀释法分别将扁蓿豆地上部分和根系的0.10g/mL母液稀释至质量浓度为0.001、0.025、0.050、0.100g/mL的水浸提液^[11-13]。

1.2.2 种子发芽实验 选取籽粒饱满的扁蓿豆种子,将种皮用砂纸打磨以打破其休眠。采用培养皿纸上发芽法,在直径9cm的一次性培养皿中铺2层滤纸,每个培养皿均匀摆放30粒种子,用0.001、0.025、0.050、0.100g/mL的地上部分和根系水浸提液分别将种子完全浸没,每个处理3次重复,以蒸馏水为对照(CK)。加盖后置于24℃、12h光照、12h黑暗的光照培养箱中,每天定时加入适量浸提液保证滤纸湿润。

1.3 指标测定

以胚芽突破种皮1~2mm为发芽标准,每日记录种子发芽数。日发芽种子数达到最高峰时计算发芽势。连续3d种子萌发总数不变时计算发芽率。试验7d后连续3d无种子萌发,故第10d为末次计数时间。发芽第10d时每皿随机取10株幼苗,在坐标纸上测胚芽和胚根长,并称量单株鲜质量。

$$\text{发芽势}(GP) = (S_H/S_T) \times 100\%$$

$$\text{发芽率}(GR) = (S_E/S_T) \times 100\%$$

式中, S_H 为单日种子发芽达到最高峰时种子发芽粒数, S_E 为试验发芽种子数, S_T 为试验总种子数^[14]。

$$\text{发芽指数}(GI) = G_i/D_i$$

式中, G_i 为发芽日数, D_i 为与 D_i 相对应的每天发芽种子数。

参照Williamson等^[15]的方法,计算化感作用效益指数(RI):

$$RI = 1 - C/T (T \geq C)$$

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

式中,T为测试项目的处理值,C为对照值。当 $RI > 0$ 时,表示存在促进效应;当 $RI < 0$ 时,表示存在抑制效应。

1.4 数据分析

采用Excel 2016软件对数据进行整理和作图,用SPSS 19.0进行单因素方差分析(One-way ANOVA)和数据处理。

2 结果与分析

2.1 扁蓿豆地上部分和根部水浸提液对其种子萌发及幼苗生长的影响

2.1.1 种子发芽势 由图1可知,随着地上部分水浸提液质量浓度的增加,扁蓿豆种子发芽势呈降低趋势。在0.050g/mL质量浓度处理下,发芽

势较对照蒸馏水(CK)降低 9.41%；发芽势在 0.100 g/mL 质量浓度下最低，较 CK 降低 50.38% ($P < 0.05$)。在根部水浸提液处理下，扁蓊豆种子发芽势在 0.001、0.050 g/mL 质量浓度处理下，分别较 CK 增加 3.48%、3.17%，在 0.100 g/mL 质量浓度处理下，较 CK 显著降低 11.26% ($P < 0.05$)。

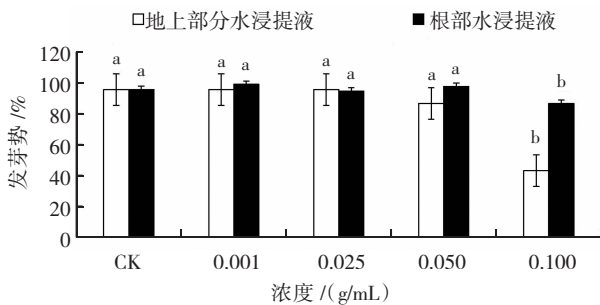


图1 扁蓊豆地上部分和根部水浸提液对其种子发芽势的影响

2.1.2 种子发芽率 由图2可知，扁蓊豆地上部分水浸提液在 0.001、0.025、0.050 g/mL 质量浓度处理下与 CK 无显著差异，0.100 g/mL 质量浓度下发芽率最低，较 CK 降低了39% ($P < 0.05$)。随着根部水浸提液质量浓度的提高，扁蓊豆种子发芽率呈先增后降的趋势，0.100 g/mL 质量浓度处理下较 CK 显著降低了 11% ($P < 0.05$)。

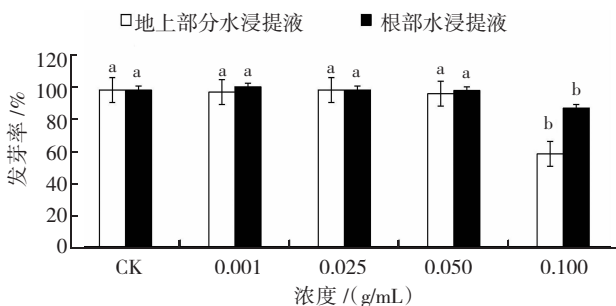


图2 扁蓊豆地上部分和根部水浸提液对其种子发芽率的影响

2.1.3 种子发芽指数 扁蓊豆地上部分和根系水浸提液不同程度影响其种子发芽指数(图3)。地上

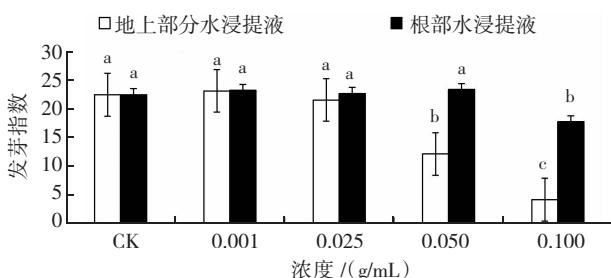


图3 扁蓊豆地上部分和根部水浸提液对种子发芽指数的影响

部分水浸提液处理下，随着质量浓度的增加，扁蓊豆种子发芽指数呈先增加后降低的趋势，在 0.050、0.100 g/mL 质量浓度处理下，扁蓊豆发芽指数分别较 CK 显著降低了 46.00%、82.00% ($P < 0.05$)；根部水浸提液 0.100g/mL 质量浓度处理下，扁蓊豆种子发芽指数较 CK 显著降低了21.00% ($P < 0.05$)。

2.1.4 胚芽长 由图4可知，扁蓊豆植株地上部分水浸提液对扁蓊豆幼苗胚芽长呈低质量浓度促进、高质量浓度抑制现象。0.001 g/mL 质量浓度处理对扁蓊豆幼苗胚芽生长有显著的促进作用，较 CK 增加了 28.00% ($P < 0.05$)；在 0.050 和 0.100 g/mL 质量浓度处理下，胚芽长分别较 CK 降低 10.59%、56.00% ($P < 0.05$)。扁蓊豆根部水浸提液对扁蓊豆幼苗胚芽的生长同样表现出“低促高抑”效应。在 0.001 g/mL 质量浓度处理下，胚芽长较 CK 显著增加了 12.20% ($P < 0.05$)；在 0.050、0.100 g/mL 质量浓度处理下，均表现为抑制效应，较 CK 分别显著降低 12.20%、25.90% ($P < 0.05$)。

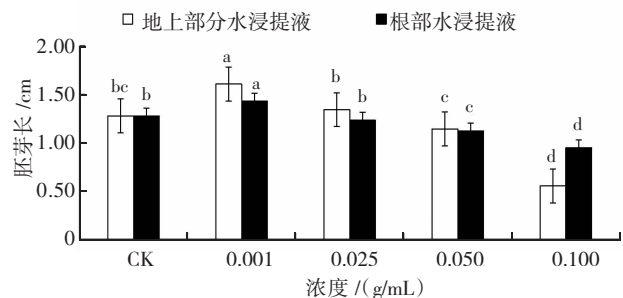


图4 扁蓊豆地上部分和根部水浸提液对其胚芽长的影响

2.1.5 胚根长 由图5可知，随着扁蓊豆地上部分水浸提液质量浓度的增加，扁蓊豆胚根长呈先增加后降低的趋势。0.001 g/mL 质量浓度处理的促长效果最显著，较 CK 增加了 26.00% ($P < 0.05$)；0.100 g/mL 质量浓度处理的抑制效果最显著，较 CK 降低了 37.00% ($P < 0.05$)。扁蓊豆根部水浸提液对其胚根的伸长也呈现“低促高抑”效应现象，

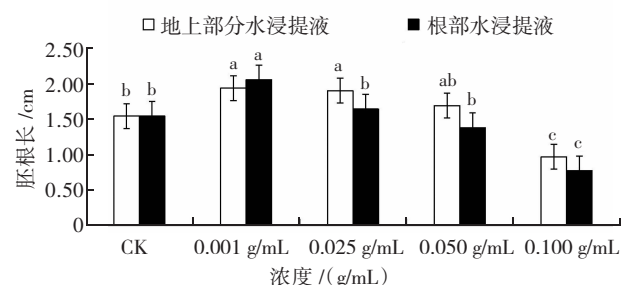


图5 扁蓊豆地上部分和根部水浸提液对其胚根长的影响

0.001 g/mL 质量浓度处理的促进效果显著, 较 CK 增加 33.00% ($P < 0.05$); 0.100 g/mL 质量浓度处理下抑制效果显著, 较 CK 降低 50.00% ($P < 0.05$)。

2.1.6 单株鲜质量 扁蓊豆地上部分和根系水浸提液亦会影响其幼苗单株鲜质量(图6)。扁蓊豆幼苗单株鲜质量随着扁蓊豆地上部分水浸提液质量浓度的增大呈现先升高后降低趋势, 0.001、0.025、0.050 g/mL 质量浓度处理下幼苗单株鲜质量较 CK 分别增加了 43.28%、31.74%、31.26% ($P < 0.05$); 根部水浸提液处理下, 0.100 g/mL 质量浓度处理的扁蓊豆幼苗单株鲜质量最小, 较 CK 显著降低 49.49% ($P < 0.05$)。

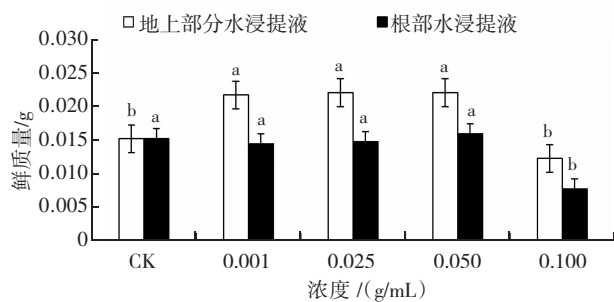


图6 扁蓊豆地上部分和根部水浸提液对其单株鲜质量的影响

2.2 扁蓊豆地上部分和根部水浸提液对化感指数的影响

2.2.1 种子发芽势 由图7可知, 扁蓊豆植株地上部分水浸提液对扁蓊豆种子发芽势均表现为抑制效应($RI < 0$), 且抑制效应随着质量浓度的增加而增强, 0.100 g/mL 质量浓度处理下抑制作用最大, 化感效应指数为 -0.55。扁蓊豆根部水浸提液对扁蓊豆种子发芽势抑制作用较地上部分水浸提液抑制作用小, 且在根部水浸提液质量浓度为 0.001、0.050 g/mL 质量浓度处理下表现为促进发芽效应($RI > 0$), 质量浓度为 0.100 g/mL 时则表现为抑制效应。

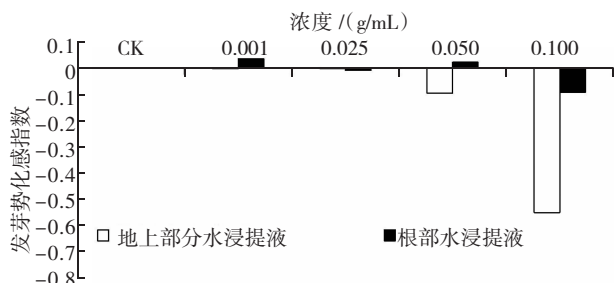


图7 扁蓊豆地上部分和根部水浸提液对其种子发芽势化感指数的影响

2.2.2 种子发芽率 由图8可知, 质量浓度 0.001、0.050 g/mL 和 0.100 g/mL 的扁蓊豆地上部分水浸提液处理对种子发芽率呈现抑制效应, 质量浓度为 0.100 g/mL 时抑制效果最明显, $RI = -0.41$ 。根部水浸提液在质量浓度为 0.001 g/mL 时对扁蓊豆种子发芽率表现为促进作用, 质量浓度为 0.100 g/mL 时表现为抑制效应。

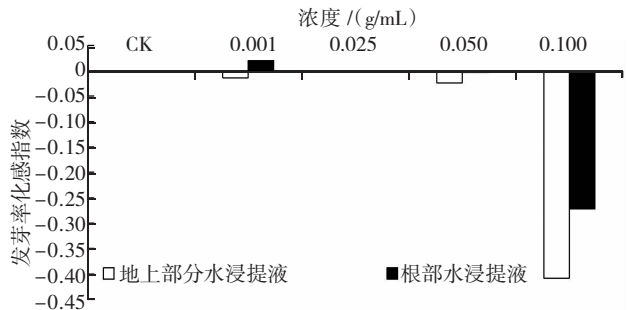


图8 扁蓊豆地上部分和根部水浸提液对其种子发芽率化感指数的影响

2.2.3 种子发芽指数 由图9可知, 0.001 g/mL 质量浓度扁蓊豆地上部分水浸提液处理对种子发芽指数呈正效应, 在 0.025、0.050、0.100 g/mL 质量浓度的地上部分水浸提液处理均对种子发芽指数呈现负效应。根部水浸提液在 0.001、0.025、0.050 g/mL 质量浓度下对种子发芽指数均呈现正效应, 在 0.100 g/mL 质量浓度处理下表现为负效应。

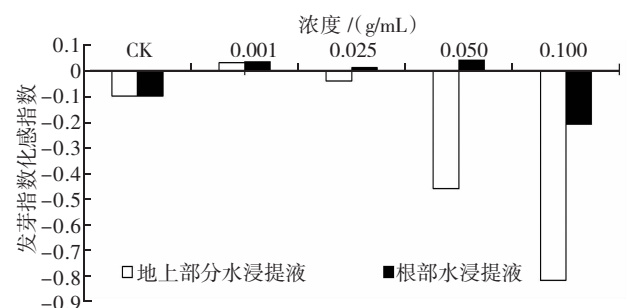


图9 扁蓊豆地上部分和根部水浸提液对其种子发芽指数化感指数的影响

2.2.4 胚芽长 由图10可知, 扁蓊豆地上部分水浸提液对胚芽长化感指数也存在低质量浓度促进高质量浓度抑制现象。在质量浓度为 0.001 g/mL 处理下化感指数为 0.21, 表现为正效应; 质量浓度为 0.050、0.100 g/mL 处理下化感指数为负, 表现为抑制效应。扁蓊豆根部水浸提液在 0.001 g/mL 的质量浓度处理下对胚芽长有促进效应, 在 0.025、0.050、0.100 g/mL 质量浓度下均对胚芽长的伸长产生负效应。

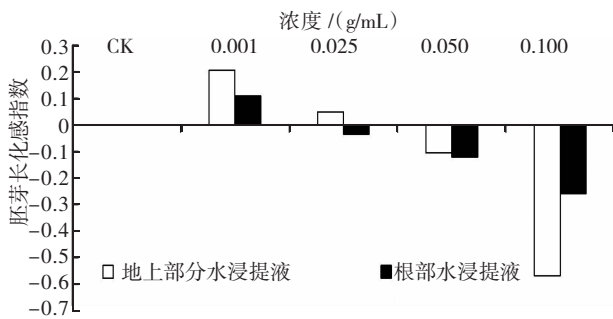


图10 扁蓊豆地上部分和根部水浸提液对胚芽生长化感指数的影响

2.2.5 胚根长 由图11可知,在扁蓊豆地上部分水浸液0.001、0.025、0.050 g/mL质量浓度处理下,扁蓊豆胚根长表现出正效应,且随着质量浓度增大正效应逐渐减小;地上部分水浸液质量浓度为0.100 g/mL时表现为抑制作用, $RI=-0.37$ 。根部水浸液在质量浓度为0.001、0.025 g/mL时对胚根的伸长有促进作用;质量浓度为0.001 g/mL时促进作用最大, $RI=0.25$;质量浓度为0.100 g/mL时 RI 为0.50。

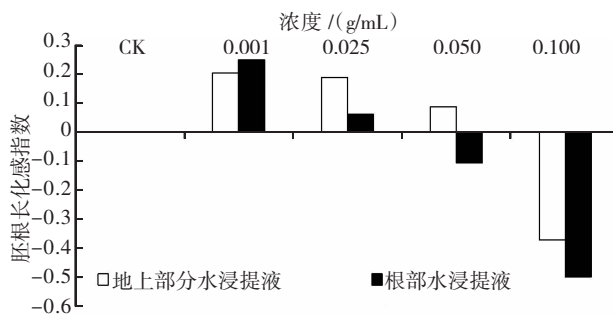


图11 扁蓊豆地上部分和根部水浸提液对其胚根生长化感指数的影响

2.2.6 单株鲜质量 由图12可知,扁蓊豆地上部分水浸液在0.001、0.025、0.050 g/mL质量浓度处理下对幼苗单株鲜质量呈现正效应;在0.100 g/mL质量浓度处理下呈负效应, RI 值为-0.19。扁蓊豆根部水浸液处理下,在0.100 g/mL质量浓度处

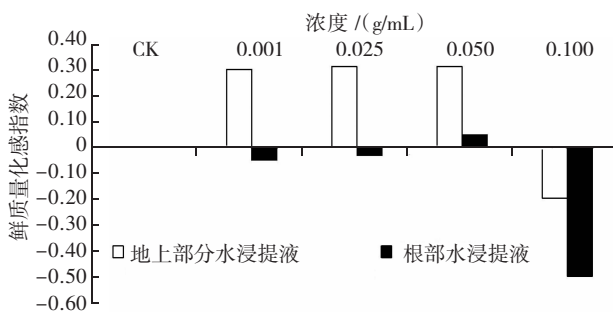


图12 扁蓊豆地上部分和根部水浸提液对其单株鲜质量化感指数的影响

理下化感负效用明显, RI 值为-0.50。

3 结论与讨论

扁蓊豆植株地上部分与根部水浸提液在高浓度下对其种子发芽率,发芽势,发芽指数,胚根长,胚芽长和单株鲜质量具有一定的抑制作用,总体表现为0.100 g/mL质量浓度下抑制作用最强。扁蓊豆地上部分水浸液处理在0.100 g/mL质量浓度下,种子发芽率较对照蒸馏水显著降低了39.00%,种子发芽指数较对照蒸馏水降低了82.00%;根部水浸液在0.100 g/mL质量浓度下胚根长较对照蒸馏水显著降低了50.00%。在低浓度下对其种子发芽率,发芽势,胚根长,胚芽长,和单株鲜重有一定的促进作用,具体表现为0.001 g/mL质量浓度处理下,对扁蓊豆幼苗胚芽生长有显著的促进作用;较对照蒸馏水增加了28.00%;在0.001 g/mL质量浓度处理下对胚根长促进效果显著,较对照蒸馏水增加了33.00%。总体表现为低质量浓度促进高质量浓度抑制效应。

在植株生长过程中,常有地上部分枯枝落叶,植物果实和残茬分解物等伴随降水或人为灌溉等途径进入植物生长环境中,进而不同程度的影响自身植物生长发育^[16]。自毒作用是植物种内竞争的一种特殊机制^[17],当自毒物质的含量达到一定程度或超过某一限值就会产生自毒效应^[18]。种子萌发期和胚芽胚根伸长期是对外界胁迫较为敏感的时期^[19],良好的种子萌发率是植物适应环境的先决条件^[20]。本研究表明,随着扁蓊豆植株地上部分和根部水浸液质量浓度的增加,对扁蓊豆种子发芽势,发芽率存在不同程度的“低促高抑”现象,这可能是自毒物质影响了 α 淀粉酶的活性,从而使得种子可溶性糖合成受到影响,影响了种子发芽势和发芽率^[12],本试验结果与王希等^[21]在异龄苜蓿水浸液对其种子萌发的自毒效应的研究相似。本试验中,地上部分水浸液对种子发芽率和发芽势的化感指数在高质量浓度下抑制效果高于根部水浸液,在0.100 g/mL质量浓度地上部分水浸液处理下发芽率显著降低了11.00%,这与汪玲玲等^[22]在铁棒锤地上部分水浸液对早熟禾发芽率的研究一致。在0.100 g/mL质量浓度处理下,地上部分水浸液处理后扁蓊豆种子发芽势化感指数为-0.55,而在根部水浸液处理下发芽势化

感指数为-0.09, 这表明扁蓿豆地上部分和根系中存在的自毒物质具有差异性, 这与鲍红春等^[4]在沙芥不同部位水浸液自毒作用研究的结论相似。

本研究过程中发现, 地上部分水浸提液处理下扁蓿豆种子萌发在前7天中呈现均匀增加趋势, 但根部水浸提液处理下扁蓿豆种子在前3天发芽数迅速增加, 后期出现增加缓慢甚至不增加的趋势, 而试验数据也表明, 在0.050 g/mL地上部分水浸提液处理下发芽率与对照蒸馏水无显著差异, 而发芽指数显著低于对照蒸馏水。

在本试验中, 胚芽长和胚根长在扁蓿豆地上部分和根系水浸液下处理下均随着质量浓度升高呈现先增高后下降趋势。胚芽长化感指数表明, 地上部分水浸提液在0.001、0.025 g/mL质量浓度处理下表现为正效应, 在0.050、0.100 g/mL处理下对胚芽长表现为负效应, 而根部水浸提液处理下在0.025、0.050、0.100 g/mL质量浓度下表现为负效应。这说明扁蓿豆胚芽长对根部水浸提液中自毒作用的响应更为敏感, 在较低质量浓度时表现出了抑制效应。在胚根长化感指数中也出现了同样的现象, 一方面说明扁蓿豆不同部位中自毒物质具有差异性, 另一方面也说明扁蓿豆幼苗不同部位对水浸提液的响应敏感程度不同。扁蓿豆不同部位水浸提液会影响其种子萌发和幼苗生长, 证明扁蓿豆存在自毒作用。但植物自毒作用是一个复杂的过程, 在此基础上应该进一步研究扁蓿豆水浸提液对幼苗中一些抗氧化酶和渗透调节物质的影响。

参考文献:

- [1] 崔宁, 陈为序, 李琦, 等. 基于土壤碳循环的丹参连作障碍机制研究[J]. 中国现代中药, 2021, 23(9): 1595-1600.
- [2] 张晓玲, 潘振刚, 周晓锋, 等. 自毒作用与连作障碍[J]. 土壤通报, 2007(4): 781-784.
- [3] 唐建军, 项田夫, 张禄源, 等. 植物次生代谢、离体培养条件下次生代谢物积累及其调控研究进展[J]. 中国野生植物资源, 1998, 17(4): 3-8.
- [4] 鲍红春, 郝丽珍, 张凤兰, 等. 沙芥不同部位水浸液自毒作用研究[J]. 中国草地学报, 2016, 38(2): 103-110.
- [5] 卢红, 李明, 李龙明. 广藿香植株水提液的化感自毒作用[J]. 北方园艺, 2021(16): 108-115.
- [6] JENNINGS J A, NELSON C J. Zone of Autotoxic influence around established alfalfa plants[J]. Agronomy Journal, 2002, 94(5): 1104-1111.
- [7] 荣思川, 王美宁, 向素梅, 等. 不同紫花苜蓿品种植株浸提液对种子萌发和幼苗生长的自毒效应[J]. 草原与草坪, 2016, 36(4): 6-15.
- [8] 王启, 何静, 张树衡, 等. 花椒叶浸提液对紫云英种子的化感作用[J]. 草原与草坪, 2021, 41(6): 46-51.
- [9] 吴建禹, 李俊, 李志勇, 等. 扁蓿豆荚果裂荚性的研究[J]. 中国草地学报, 2021, 43(9): 115-120.
- [10] 李海贤, 石凤翎. 我国扁蓿豆种子生产研究现状及提高产量的途径[J]. 草原与草坪, 2006, 25(3): 14-16.
- [11] 陶茸. 香豆素、咖啡酸对紫花苜蓿及轮作作物幼根形态和结构的影响及其生理变化[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2019.
- [12] 范丽花, 汪鹏斌, 王玉霞, 等. 猪毛蒿枯落物水浸提液对5种草地植物种子萌发的化感作用[J]. 中国草地学报, 2021, 43(1): 96-103.
- [13] 郑瑞, 师尚礼, 马史琛. 外源自毒物质对苜蓿、小麦生长发育的影响[J]. 草原与草坪, 2018, 38(6): 1-11.
- [14] 李锦锋, 铁云华, 王文. 不同盐分胁迫对白茎盐生草种子萌发的影响[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(18): 5885-5887; 5889.
- [15] WILLIAMSON G B, RICHARDSON D. Bioassays for allelopathy: Measuring treatment responses with independent controls[J]. Journal of chemical ecology (USA), 1988, 14(1): 181.
- [16] 尹国丽. 紫花苜蓿-小麦\玉米轮作土壤微生态特征与自毒效应消减[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2019.
- [17] 邢勇, 段小燕. 植物的自毒作用[J]. 生物学教学, 2002, 27(11): 6-7.
- [18] MIERSCH J, C JÜHLKE, STERNKOPF G, et al. Metabolism and exudation of canavanine during development of alfalfa (*Medicago sativa* L. cv. verko) [J]. Journal of Chemical Ecology, 1992, 18(11): 2117-2129.
- [19] 朱依晗, 刘宁芳, 胡龙兴, 等. 8份绿穗苜蓿种子萌发期耐盐碱性综合评价[J]. 草地学报, 2021, 29(10): 2176-2183.
- [20] 王立凤, 庞珊珊. 锌胁迫对蓝花鼠尾草种子萌发的影响[J]. 甘肃农业科技, 2021, 52(8): 25-28.
- [21] 王希, 沈禹颖, 高崇岳, 等. 异龄苜蓿水浸液对其种子萌发的自毒效应[J]. 草地学报, 2008(6): 609-612.
- [22] 汪玲玲, 鱼小军, 杨航. 铁棒锤地上部分水浸提液对7种草种子化感作用研究[J]. 草原与草坪, 2021, 41(6): 67-73.