张鹏飞,韩丽丽,关望辉,等. 山药不同部位水浸提液对万寿菊和苜蓿的化感效应[J]. 江苏农业科学,2025,53(8):169 - 176.
doi:10.15889/j.issn.1002 - 1302.2025.08.022

山药不同部位水浸提液对万寿菊和苜蓿的化感效应

张鹏飞, 韩丽丽, 关望辉, 胡晓丽, 许爱玲, 王晓民
(山西农业大学棉花研究所,山西运城 044000)

摘要:为探究山药根际土浸提液和根茎研磨液对万寿菊和苜蓿的化感作用,并筛选出适宜与山药进行轮间作的作物,采用生物测试法,以万寿菊和苜蓿为受体材料,研究山药根际土浸提液和根茎研磨液在 0.05、0.1、0.2、0.5、1.0 g/mL 质量浓度下对 2 种作物种子萌发、幼苗生长及生理指标的影响。结果表明:山药根际土浸提液和根茎研磨液对 2 种作物种子萌发过程体现为化感抑制作用,且根茎研磨液的抑制作用更强。山药根际土浸提液显著抑制了 2 种作物种子根长和鲜重,但对苜蓿幼苗的芽长有不同程度的促进作用。山药根际土浸提液降低了万寿菊和苜蓿可溶性糖、可溶性蛋白等渗透调节物质含量,且存在"低促高抑"的浓度效应,万寿菊幼苗的 SOD、POD 和 CAT 等抗氧化酶活性整体较苜蓿低,MDA 含量则高于苜蓿。化感综合效应分析表明,山药根际土浸提液对苜蓿的化感抑制作用(SE = -0.113)小于万寿菊(SE = -0.284),可能较适合与山药进行轮间作。

关键词:山药;水浸提液;万寿菊;苜蓿;化感效应;轮间作
中图分类号:S632.104;S344.1;S344.2　　**文献标志码:**A　　**文章编号:**1002 - 1302(2025)08 - 0169 - 08

山药为百合目薯蓣科薯蓣属的 1 年生或多年生缠绕性藤本植物,其富含的多糖、皂苷、尿囊素、甾醇类、抗氧化剂活性成分具有补脾养胃、生津益肺、补肾涩精等功效[1-2]。目前市场上的山药以人工栽培为主,主要分布于山西、河南交界处的华北以及华东、华南等地。人工栽培的山药易受炭疽病、褐斑病、花叶病毒以及根结线虫的侵染,在同一地块栽培连作障碍严重,严重影响了山药的产量与品质[3]。

化感作用是植物或微生物的代谢分泌物对自身或环境中其他植物、微生物直接或间接的有害作用[4],地黄、太子参、兰州百合、玉竹、三七等中药材因其药用成分多为次生代谢产物,因而化感效应更明显,连作障碍的消减策略是药用植物可持续发展的关键[5-9]。已有研究报道了药用植物对其他作物的化感效应,试图从化感作用的角度筛选与药用植物适宜轮间作的作物。独一味与油菜间作、白术与白菜轮间作、半夏与玉米轮间作、地黄与远志—牛膝轮作都能一定程度上减轻药用植物的连作障碍[10-14],因此,根据作物种间多样性和化感效应强度选择适宜的轮间作作物缓解连作障碍是可行的。

万寿菊富含的黄酮类以及石竹烯、法尼烯、柠檬烯等萜类化合物能抑制镰孢菌丝生长,增加生防菌毛壳菌属丰度,改变土壤真菌群落组成,有效缓解苹果连作障碍[15],可降低当归和烤烟根结线虫发病率[16-17]。苜蓿作为豆科作物,与山药间作后可显著提高山药田 0 ~ 40 cm 土层土壤综合肥力和酶活性[18],与苹果、高粱轮作后可缓解其连作障碍[19-20]。目前关于山药连作障碍的研究多集中于抗重茬药剂筛选、肥料施用以及微生物菌剂修复等方面[21-23],从化感效应角度筛选适宜轮间作作物的报道还较少。因此,本试验以药用价值较高的万寿菊和常见豆科作物苜蓿种子为研究对象,采用生物测试法研究山药根际土浸提液和根茎研磨液对 2 种作物种子发芽率、发芽势、发芽指数及其化感效应的影响,并进一步研究了山药根际土浸提液对万寿菊和苜蓿幼苗生长状况、渗透调节物质、抗氧化酶活性和丙二醛含量的影响,分析不同浓度水浸液对受试作物的化感作用强度,对万寿菊、苜蓿与山药进行轮间作的可行性进行评估,以期为建立合理的

收稿日期:2024 - 03 - 25
基金项目:国家中药材产业技术体系建设专项山药运城综合试验站项目(编号:CARS - 21);山西省高等学校科技创新项目(编号:2023L054);运城市科技计划(编号:YCKJ - 2023014、YCKJ - 2023039)。
作者简介:张鹏飞(1990—),男,山西运城人,博士,助理研究员,主要从事药用植物连作障碍发生机理与消减技术研究。E - mail:pengfeizhang0303@163.com。
通信作者:王晓民,硕士,副研究员,主要从事山药育种与栽培研究。E - mail:mhswxm@163.com。

山药轮间作体系提供参考。

1　材料与方法

1.1　材料

试验于 2023 年 12 月在山西农业大学棉花研究所生理生化实验室进行。供试土壤和山药根茎均采自山西农业大学棉花研究所南花农场山药种植基地(地理位置 110°54′E、35°1′N,海拔 353 m)。按随机多点混合取样原则,在 10 月山药成熟期共采挖 30 株山药。山药根茎挖出后,剧烈摇晃根茎以去除其表面附着的土壤,然后将紧紧黏附在根茎表面的根际土壤用刷子轻轻刷掉并充分混匀后通过 2 mm 的网筛过滤,过滤后的根际土壤用无菌离心管收集[5],迅速置于液氮中冻存。新鲜山药带回实验室洗净备用。受体植物万寿菊和苜蓿种子由江苏沭阳学浩苗木场提供。

1.2　水浸液制备

1.2.1　山药根际土浸提液制备　取山药根际土壤,过 1 mm(14 目)筛,然后将 500 g 土壤加入到 500 mL 蒸馏水中,充分搅拌,置于摇床上 25 ℃、140 r/min 条件下浸提 24 h,用纱布过滤后得到粗浸提液,将粗滤液置于离心机 4 ℃、4 000 r/min 离心 10 min,取上清液,用 0.45 μm 滤膜过滤后得到 1.0 g/mL 山药根际土壤浸提液母液,再用蒸馏水将母液稀释成 0.05、0.1、0.2、0.5 g/mL 浓度的溶液,将 5 个浓度的溶液标记好后置于 4 ℃冰箱内保存备用。以蒸馏水为对照。

1.2.2　山药根茎研磨液制备　取山药新鲜根茎,蒸馏水润洗后切碎,放入研钵中,加入少许石英砂充分研磨,按根茎和水 1∶1 的重量比多次加入蒸馏水进行洗转,使用无菌纱布过滤,然后将滤液置于离心机 4 ℃、10 000 r/min 离心 15 min,取上清液,用 0.45 μm 滤膜过滤后得到 1.0 g/mL 山药根茎研磨液母液,再用蒸馏水将母液稀释成 0.05、0.1、0.2、0.5 g/mL 浓度的溶液,将 5 个浓度的溶液标记好后置于 4 ℃冰箱保存备用。以蒸馏水为对照[10]。

1.3　种子萌发试验

选取大小一致、颗粒饱满无病害的万寿菊和苜蓿种子,用 5% 次氯酸钠溶液浸泡 1 min,经蒸馏水反复冲洗后播于铺有 2 层灭菌滤纸的 90 mm 无菌培养皿中。每个培养皿均匀放入 50 粒种子,加入上述不同浓度水浸提液各 5 mL,对照加 5 mL 蒸馏水,3 次重复,置于 25 ℃恒温培养箱中,每天光照 14 h、暗培养 10 h,湿度 85%。以胚根或胚轴突破种皮达 1 ~ 2 mm 为发芽标准进行记录,每隔 24 h 观察记录种子的发芽情况,并补充水浸提液或蒸馏水保持滤纸湿润。连续 3 d 不再有新的种子萌发视为萌发过程结束。

1.4　指标测定与计算

记录受试种子每天萌发数,计算发芽率、发芽势、发芽指数;萌发结束后每个重复随机选取 5 株幼苗,测定幼苗根长、芽长及鲜重等生长参数。

发芽率 =(发芽种子总数/供试种子总数)× 100%;　(1)

发芽势 =(种子开始萌发之日起 5 d 内发芽种子数/供试种子数)×100%;　(2)

发芽指数(GI) = $\sum(G_t/D_t)$。　(3)

式中:G_t 为处理第 t 天种子发芽数;D_t 为相应种子发芽时间,d。

采用 Williamson and Richardson 方法计算化感效应指数(RI)、种子萌发化感效应指数(SE_1)和综合化感效应指数(SE_2)[24]。计算公式如下:

$$RI = 1 - C/T(T \geqslant C) \text{或} RI = T/C - 1(T < C)。\quad (4)$$

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,$RI = 0$ 为无影响,绝对值表示化感作用强度。

$$SE_1 = (RI_1 + RI_2 + RI_3)/3;\quad (5)$$

$$SE = (RI_1 + RI_2 + RI_3 + RI_4 + RI_5 + RI_6)/6。\quad (6)$$

式中:$RI_1 \sim RI_6$ 分别代表发芽率、发芽势、发芽指数、根长、芽长、鲜重的化感效应指数的算术平均值。

培养 15 d 后取健康生长的万寿菊和苜蓿幼苗,测定可溶性糖、可溶性蛋白、丙二醛(MDA)含量及过氧化物酶(POD)、超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)等抗氧化酶活性。

1.5　数据统计分析

采用 SPSS 23.0 软件对不同处理进行单因素方差(ANOVA)分析,显著性水平设置为 $\alpha = 0.05$。用 Duncan's 检验法进行多重比较。所得数据均用“平均值 ± 标准差”表示。采用 Origin 2021 软件作图。

2　结果与分析

2.1　山药根际土浸提液和根茎研磨液对万寿菊和苜蓿种子萌发的影响

由表 1 可知,不同浓度的山药根际土浸提液和根茎研磨液对万寿菊和苜蓿种子发芽率影响不同。

万寿菊发芽率随浸提液浓度的增加呈下降趋势,下降幅度大于苜蓿,且在 0.5、1.0 g/mL 浓度下显著低于对照,分别降低了 28.17%、29.09%。根际土浸提液处理后,除 0.05 g/mL 浓度处理的苜蓿发芽率较对照有所提升外,其他浓度处理均降低了发芽率,0.5 g/mL 浓度处理的发芽率显著低于对照($P<0.05$);万寿菊和苜蓿种子发芽率随根茎研磨液浓度的增加呈下降趋势,除 0.05 g/mL 浓度下苜蓿的发芽率外,其他发芽率均显著低于对照,且在 0.2 g/mL 浓度下二者的发芽率仅有 20% 左右。

发芽势反映种子发芽整齐度和质量优劣。山药根际土浸提液处理下,万寿菊种子发芽势除在 0.05 g/mL 浓度处理(较对照显著减少 29.72%)外,其他处理的发芽势随浓度的上升呈下降趋势,在 0.5、1.0 g/mL 浓度下的发芽势分别较对照显著减少了 16.97%、27.38%。苜蓿种子发芽势在 0.2 g/mL 浸提液浓度下达到最大值,随后在 0.5 g/mL 浓度下发芽势较对照显著减少了 11.72%($P<0.05$)。根茎研磨液处理下,除 0.05、1.0 g/mL 浓度处理外,其他处理 2 种作物种子发芽势随根茎研磨液浓度的增加均呈下降趋势,且显著低于对照($P<0.05$)。

发芽指数反映了种子活力。万寿菊在根际土浸提液各浓度处理下的发芽指数均低于对照,表现为抑制作用。苜蓿的发芽指数在 0.05 ~ 0.2 g/mL 根际土浸提液浓度下高于对照,但差异不显著,表现为促进作用,而后随着浓度的上升有所下降,较对照分别降低 13.37%($P<0.05$)和 9.47%。万寿菊和苜蓿发芽指数在根茎研磨液各处理浓度下均显著低于对照,且随浓度的上升呈下降趋势,特别是 0.2 g/mL 浓度处理下的发芽指数较 0.1 g/mL 浓度分别显著降低了 63.83%($P<0.05$)和 73.40%($P<0.05$)。

2.2　山药根际土浸提液对万寿菊和苜蓿幼苗生长的影响

由表 2 可知,与对照相比,不同浓度山药根际土浸提液均显著抑制了万寿菊和苜蓿种子根长($P<0.05$)。万寿菊种子根长随浸提液浓度的增加呈下降趋势,在 0.5、1.0 g/mL 浓度下的根长较对照分别降低了 3.34、3.70 cm;而苜蓿种子根长随浓度的变化规律不明显。

万寿菊种子芽长随山药根际土浸提液浓度的增加呈下降趋势,除 0.05 g/mL 浓度处理外,芽长均显著低于对照($P<0.05$)。与万寿菊种子芽长相反,不同浓度浸提液均能增加苜蓿种子芽长,高浓度(0.5、1.0 g/mL)促进效果显著,较对照分别增加了 44.13%、28.17%。

万寿菊和苜蓿在不同浓度浸提液处理后的幼苗鲜重均低于对照,表现为明显的抑制作用。其中万寿菊幼苗鲜重随浸提液浓度的增加呈下降趋势,高浓度(0.5、1.0 g/mL)处理下的鲜重较对照分别显著降低 20.00%、25.00%。苜蓿幼苗鲜重在各处理下均显著低于对照($P<0.05$),除 0.05 g/mL 浓度处理与 0.1 g/mL 浓度处理之间差异显著外,各浓度处理之间差异不显著。

2.3　山药根际土浸提液和根茎研磨液对万寿菊和苜蓿化感效应指数的影响

为综合分析山药根际土浸提液和根茎研磨液对万寿菊和苜蓿种子萌发的化感效应,通过计算 2 种作物种子发芽率、发芽势、发芽指数 3 个指标的 *RI* 值,得出种子萌发化感效应指数,结果如图 1 所示。山药根际土浸提液和根茎研磨液对 2 种作物种子萌发化感效应指数均为负值,整体表现为抑制作用。但 2 种浸提液对万寿菊和苜蓿种子萌发抑制程度存在较大差异。根际土浸提液各浓度对万寿菊种子萌发化感效应指数在 −0.289 ~ −0.091 之间,显著抑制了万寿菊种子萌发;而根际土浸提液浓度在 0.05 ~ 0.2 g/mL 范围时,苜蓿种子萌发化感效应指数在 −0.022 ~ −0.011 之间,表明苜蓿种子萌发对低浓度的根际土浸提液化感作用不敏感。山药根茎研磨液对苜蓿种子萌发的抑制程度稍大于万寿菊,化感效应指数在 −0.992 ~ −0.129 之间,反映出根茎研磨液比根际土浸提液对 2 种作物种子萌发具有更强烈的化感抑制作用。

由于根茎研磨液对万寿菊和苜蓿种子萌发化感抑制作用强,少许萌发的种子也不能正常生长,无法统计二者种子的芽长、根长和鲜重,故本试验只进一步研究了山药根际土浸提液对 2 种作物幼苗生长的影响。为进一步分析根际土浸提液对万寿菊和苜蓿综合化感效应,通过计算 2 种作物发芽率、发芽势、发芽指数、根长、芽长、鲜重 6 个指标的 *RI* 值,得出综合化感效应指数,结果如图 2 所示。不同浓度的根际土浸提液对万寿菊和苜蓿综合化感效应指数均为负值,表现为抑制作用,抑制程度随浸提液浓度的增加呈先减弱后增强趋势。总体来看,山药根际土浸提液对苜蓿($SE=-0.113$)的化感抑

表 1　山药根际土水浸液和根茎研磨液对万寿菊和苜蓿种子萌发的影响

处理	浓度(g/mL)	万寿菊						苜蓿					
		发芽率		发芽势		发芽指数		发芽率		发芽势		发芽指数	
		数值(%)	RI_1	数值(%)	RI_2	数值(%)	RI_3	数值(%)	RI_1	数值(%)	RI_2	数值(%)	RI_3
根际土水浸液	0(CK)	73.33 ±2.31a	0	70.67 ±4.16a	0	47.14 ±2.52a	0	74.00 ±2.00ab	0	74.00 ±2.00ab	0	47.18 ±0.60ab	0
	0.05	70.67 ±1.15a	−0.03	49.67 ±6.43b	−0.33	32.96 ±4.56c	−0.30	76.67 ±4.62a	0.03	66.67 ±8.12bc	−0.10	48.11 ±1.58a	0.02
	0.1	68.67 ±1.67a	−0.06	70.00 ±0.00a	−0.05	43.06 ±3.27ab	−0.09	71.33 ±4.16abc	−0.04	70.67 ±5.29abc	−0.05	48.62 ±5.03a	0.02
	0.2	63.33 ±10.07ab	−0.13	60.00 ±10.58ab	−0.19	39.79 ±5.87abc	−0.16	68.00 ±5.29bc	−0.08	76.00 ±4.62a	0.02	48.60 ±3.82a	0.03
	0.5	52.67 ±6.43b	−0.28	58.68 ±5.03b	−0.22	38.38 ±6.19bc	−0.19	65.33 ±2.31c	−0.12	65.33 ±2.31c	−0.12	40.87 ±1.83c	−0.13
	1.0	52.00 ±5.00b	−0.29	51.32 ±4.08b	−0.31	34.22 ±3.23c	−0.27	68.67 ±4.16bc	−0.07	67.33 ±5.17bc	−0.09	42.71 ±3.03bc	−0.10
根茎研磨液	0(CK)	73.21 ±6.58a	0	56.67 ±6.11a	0	42.47 ±4.52a	0	74.00 ±2.00a	0	74.00 ±2.00a	0	47.18 ±0.60a	0
	0.05	50.00 ±10.00b	−0.32	49.33 ±9.02ab	−0.14	34.34 ±6.37b	−0.19	66.00 ±9.17a	−0.11	65.33 ±8.17b	−0.12	39.73 ±4.22b	−0.16
	0.1	44.67 ±4.16b	−0.39	42.00 ±5.29b	−0.26	30.25 ±1.86b	−0.29	46.67 ±6.11b	−0.37	43.33 ±6.11c	−0.41	24.36 ±5.14c	−0.48
	0.2	21.33 ±2.31c	−0.71	20.00 ±4.00c	−0.65	10.94 ±1.51c	−0.74	18.67 ±4.16c	−0.75	18.67 ±4.16d	−0.75	6.48 ±1.73d	−0.86
	0.5	16.00 ±0.00c	−0.78	16.00 ±0.00c	−0.72	7.22 ±0.19c	−0.83	3.33 ±3.06d	−0.95	2.32 ±0.31e	−0.98	0.86 ±1.08e	−0.98
	1.0	18.67 ±7.02c	−0.74	18.67 ±7.02c	−0.67	8.62 ±2.28c	−0.80	0.67 ±0.01d	−0.99	0.67 ±0.01e	−0.99	0.12 ±0.21e	−0.10

注:同列数据后不同小写字母表示相同处理不同浓度间差异显著($P<0.05$)。表 2 同。

表 2　山药根际土水浸液对万寿菊和苜蓿幼苗生长的影响

处理	浓度(g/mL)	万寿菊						苜蓿					
		根长		芽长		鲜重		根长		芽长		鲜重	
		数值(cm)	RI_4	数值(cm)	RI_5	数值(g)	RI_6	数值(cm)	RI_4	数值(cm)	RI_5	数值(g)	RI_6
根际土水浸液	0(CK)	5.17 ±0.29a	0	3.50 ±0.50a	0	0.20 ±0.02a	0	5.67 ±0.29a	0	2.13 ±0.48c	0	0.33 ±0.02a	0
	0.05	3.67 ±0.29b	−0.29	2.93 ±0.12ab	−0.16	0.19 ±0.03ab	−0.05	3.57 ±0.31b	−0.37	2.51 ±0.42bc	0.13	0.24 ±0.02c	−0.26
	0.1	2.47 ±0.25c	−0.52	2.50 ±0.87bc	−0.29	0.18 ±0.02abc	−0.18	2.63 ±0.42c	−0.54	2.40 ±0.61bc	0.08	0.27 ±0.02bc	−0.20
	0.2	2.33 ±0.42cd	−0.55	1.93 ±0.12cd	−0.45	0.17 ±0.01abc	−0.19	3.60 ±0.01b	−0.37	2.52 ±0.30bc	0.15	0.28 ±0.00b	−0.16
	0.5	1.83 ±0.29de	−0.65	1.67 ±0.29d	−0.52	0.16 ±0.01bc	−0.20	2.30 ±0.20c	−0.59	3.07 ±0.60a	0.28	0.29 ±0.01b	−0.13
	1.0	1.47 ±0.46e	−0.72	1.33 ±0.15d	−0.62	0.15 ±0.00c	−0.26	1.93 ±0.15c	−0.66	2.73 ±0.63ab	0.19	0.27 ±0.01b	−0.17

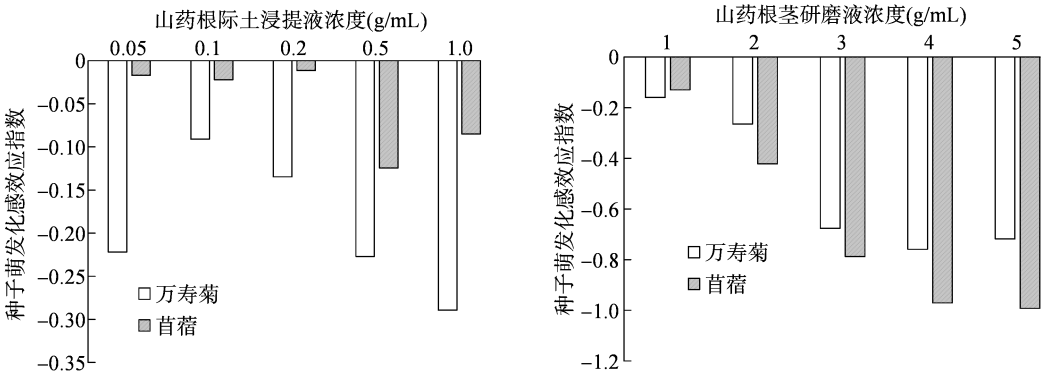


图1　山药根际土浸提液和根茎研磨液对万寿菊和苜蓿种子萌发化感效应指数的影响

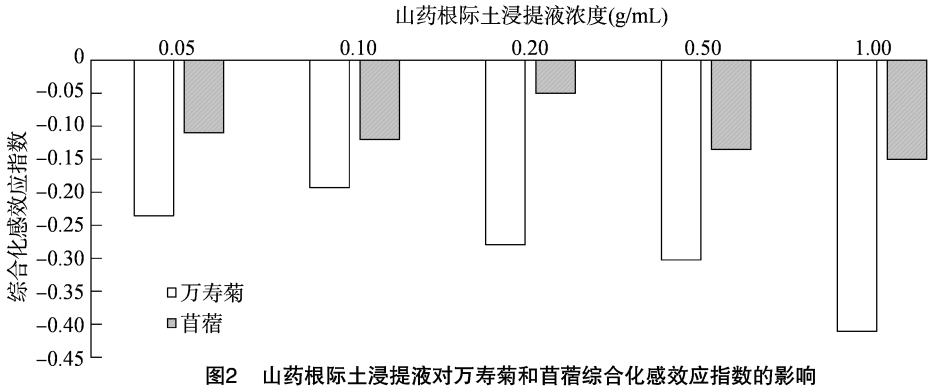
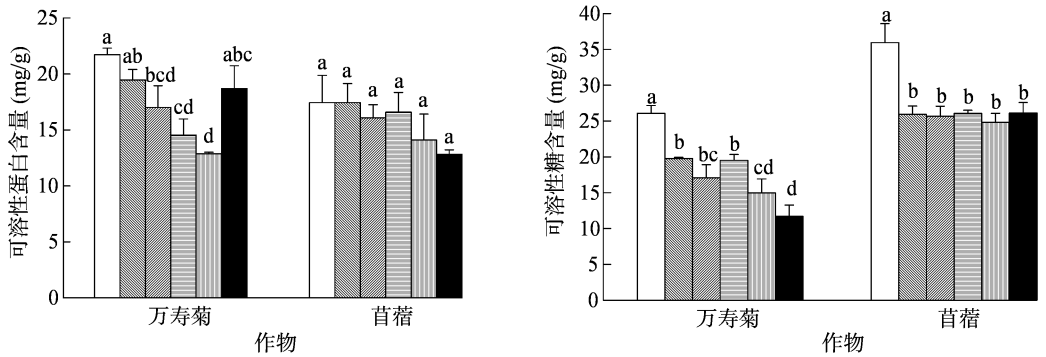


图2　山药根际土浸提液对万寿菊和苜蓿综合化感效应指数的影响

制作用小于万寿菊($SE = -0.284$),表明苜蓿可能较适合与山药进行轮间作。

2.4　山药根际土浸提液对万寿菊和苜蓿幼苗渗透调节物质含量的影响

可溶性糖和可溶性蛋白是植物体内重要的渗透调节物质,植物受胁迫后,这些物质含量会发生显著变化。如图 3 所示,添加不同浓度的山药根际土浸提液后,万寿菊和苜蓿的可溶性糖含量显著低于对照($P < 0.05$),显示出较强的抑制作用。万寿菊的可溶性糖含量除 0.2 g/mL 浓度处理外,随浸提液浓度的增加均呈下降趋势,至 1.0 g/mL 时较对照降低了 55.16%;而各浓度处理下的苜蓿可溶性糖含量变化不明显。浸提液浓度在 0.05 ~ 0.5 g/mL 范围时,万寿菊可溶性蛋白含量随浓度的增加呈逐渐下降趋势,至 0.5 g/mL 时较对照降低了 40.77%,而在 1.0 g/mL 时又有显著的升高;苜蓿在各浓度处理下的可溶性蛋白含量与对照没有显著差异。



柱上不同小写字母表示同种作物不同浓度间差异显著(P<0.05)。下图同

图3　山药根际土浸提液对万寿菊和苜蓿幼苗渗透调节物质含量的影响

2.5　山药根际土浸提液对万寿菊和苜蓿幼苗抗氧化酶活性和 MDA 含量的影响

山药根际土浸提液对万寿菊和苜蓿抗氧化酶活性和 MDA 含量具有不同影响。总体来讲,不同浸提液浓度处理下的苜蓿幼苗 SOD、POD、CAT 抗氧化酶活性显著高于万寿菊幼苗,而 MDA 含量则呈现相反趋势(图 4)。就酶活性的变化趋势而言,万寿菊幼苗的 SOD 活性在 0.05 g/mL 浓度下较对照降低了 29.52%,随后随浸提液浓度的增加呈先上升后下降的趋势,在 0.2 g/mL 浓度下达到最高,与对照无显著差异;苜蓿幼苗的 SOD 活性随浸提液浓度的增加呈先上升后下降趋势,在 0.2 g/mL 浓度下最高,较对照显著上升了 61.93%($P<0.05$)。万寿菊和苜蓿幼苗 POD 活性在低浓度(0.05 ~ 0.2 g/mL)范围内随浸提液浓度的增加逐渐上升,而在高浓度(0.5、1.0 g/mL)范围内则呈下降趋势,呈现“低促高抑”的浓度效应。万寿菊幼苗的 CAT 活性随浸提液浓度的增加呈先下降后上升趋势,在 0.1 g/mL 浓度下达到最低值,较对照显著降低了 43.60%($P<0.05$);苜蓿幼苗的 CAT 活性随浸提液浓度的增加呈先上升后下降趋势,在 0.2 g/mL 浓度下达到最高。万寿菊幼苗的 MDA 含量随浸提液浓度的增加呈先下降后上升的趋势,在 0.1 g/mL 浓度时最低,较对照显著下降了 17.22%($P<0.05$);苜蓿幼苗的 MDA 含量随浸提液浓度的增加变化不明显,处于相对稳定的状态。

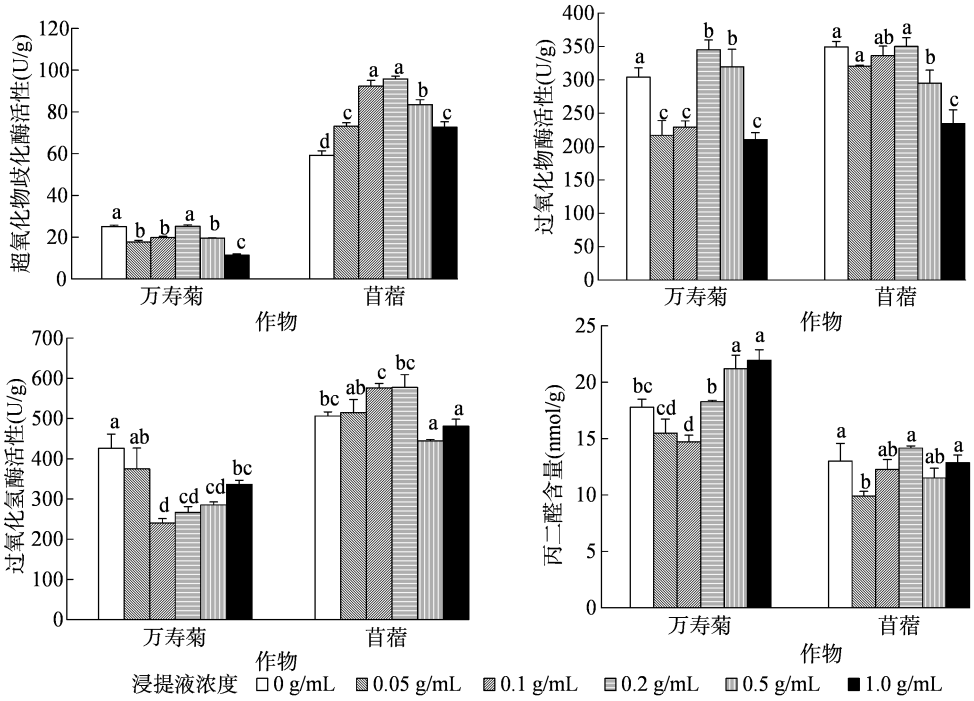


图4　山药根际土浸提液对万寿菊和苜蓿幼苗抗氧化酶活性及膜脂过氧化的影响

3　讨论

由于植物在种子萌发和幼苗生长阶段对外界环境的变化比较敏感[25],且这 2 个阶段常用于分析植物的化感作用[26],因此本研究选用了这 2 个阶段来研究山药根际土浸提液和根茎研磨液对万寿菊和苜蓿的化感作用。受试植物种子萌发、幼苗生长以及生理的变化不仅受到供体植物化感作用部位、浸提液浓度的影响,也跟受试植物种类相关。本研究中,山药根茎研磨液较根际土浸提液对万寿菊和苜蓿种子萌发有更强的化感抑制作用,与孙雪冰等关于山药对玉米的化感强度为根系分泌物 > 植株腐解液 > 根际土浸提液[27]、灯盏花对玉米化感效应强度为根 > 茎 = 叶[28]研究结果一致,说明植株不同部位的化感效应存在差异。浸提液浓度的增加对种子萌发不仅有单一的化感抑制作用,同时对苜蓿种子发芽势和发芽指数还存在低浓度促进、高浓度抑制(“低促高抑”)的浓度效应,体现出了化感效应多样性并存的现象,这与兰州百合[7]、川党参自毒效应[29],地枇杷对玉米、黄瓜、白菜[30]以及地黄、半夏对远志种子萌发[13]的化感效应研究结果相似。不同受试植物种子萌发对相同的浸提液浓度响应也不同,种子萌发化感效应指数(图 1)表明,苜蓿种子萌发对 0.05 ~ 0.2 g/mL 低浓度的根际土浸提液

化感作用不敏感,而万寿菊种子萌发在各浓度下则被显著抑制,这与郭英姿等关于车前草、藜、泥胡菜 3 种杂草浸提液对万寿菊种子萌发的抑制强度高于波斯菊的研究结果[31]相一致,可能与受体植物对化感胁迫的耐受程度和适应性有关。山药根际土浸提液对万寿菊和苜蓿幼苗生长的影响大于种子萌发阶段,幼苗根长、芽长、鲜重的化感效应指数 *RI* 值整体大于种子萌发阶段各项指标的 *RI* 值,说明化感物质对受试作物的影响具有累积效应,可能由于万寿菊和苜蓿在种子萌发阶段受到了化感抑制,从而减少了对水分和养分的吸收,最终影响幼苗的发育[32]。浸提液处理能增加苜蓿种子芽长,且在 0.5、1.0 g/mL 高浓度下促进效果显著,各浸提液浓度下苜蓿幼苗鲜重也显著高于万寿菊,表明苜蓿在幼苗生长阶段受到的化感作用也小于万寿菊。

化感作用会抑制受体作物超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)等植物保护酶系统酶的活性[33],从而导致受体作物细胞膜内活性氧产生与积累,引起膜脂过氧化和膜损伤,丙二醛(MDA)含量可指示膜脂过氧化强度和膜损伤程度[34]。本研究发现,山药根际土浸提液处理下的万寿菊幼苗 SOD、POD 和 CAT 活性整体较苜蓿低,其在各浓度浸提液下的 MDA 含量显著高于苜蓿,表明山药根际土浸提液对万寿菊的化感作用强于苜蓿,可能由于万寿菊幼苗对浸提液胁迫较为敏感,其植株抗氧化酶活性被逐渐钝化,抗氧化系统受到破坏,导致幼苗失去了氧化损伤保护体系,细胞结构完整性受到活性氧(ROS)的攻击,最终导致幼苗生长变弱甚至死亡。而植物对逆境胁迫也有一个主动适应的过程,山药根际土浸提液对万寿菊和苜蓿 SOD、POD 活性以及苜蓿 CAT 活性的影响均表现为低浓度促进、高浓度抑制的浓度效应,可能由于在低浓度浸提液处理下,受体植物体内活性氧自由基含量的增加作为胁迫信号诱导 SOD、POD 和 CAT 等基因的表达,增强抗氧化酶活性抵抗胁迫损伤[13],然而抗氧化酶活性的升高由于清除活性氧能力不足无法改善氧化应激[35],在高浓度处理下化感诱导的植株体内出现了膜脂过氧化,表现为 MDA 含量的升高,从而加剧了细胞膜损伤。

化感作用也会使受体作物体内可溶性糖和可溶性蛋白等渗透调节物质含量发生很大的变化。本研究发现,万寿菊幼苗的可溶性糖和可溶性蛋白含量随山药根际土浸提液浓度的增加呈显著下降趋势,可能由于浸提液中的化感物质刺激了万寿菊活性氧的产生,导致 H_2O_2 积累,而 H_2O_2 会氧化细胞内蛋白质等生物大分子,导致可溶性蛋白含量降低[31,36];同时化感作用也会降低万寿菊幼苗组织内淀粉酶活性,淀粉难以水解为可溶性糖,不能转化为氨基酸形成蛋白质[37]。而浸提液处理下的苜蓿可溶性蛋白含量与对照没有显著差异,说明苜蓿体内细胞受化感胁迫程度低,细胞膜受损较小。

4　结论

山药根际土浸提液和根茎研磨液对万寿菊和苜蓿种子萌发过程整体表现为化感抑制作用,根茎研磨液较根际土浸提液对 2 种作物种子萌发化感抑制作用更强。山药根际土浸提液会降低万寿菊和苜蓿可溶性糖、可溶性蛋白等渗透调节物质,万寿菊幼苗的 SOD、POD 和 CAT 等抗氧化酶活性整体较苜蓿低,MDA 含量则高于苜蓿。山药根际土浸提液对苜蓿($SE = -0.113$)的化感抑制作用小于万寿菊($SE = -0.284$)。因此,苜蓿较适合与山药进行轮间作。

参考文献:

[1]马　蕊,杨　珂,李文辉,等. 不同生长期怀山药化学成分分析[J]. 食品研究与开发,2019,40(13):84-92.

[2]冯学锋,黄璐琦,格小光,等. 山药道地药材形成源流考[J]. 中国中药杂志,2008,33(7):859-862.

[3]Mochizuki T, Iwamoto I, Atarashi A, et al. Rapid and low-cost diagnosis of Japanese yam mosaic virus infection in Chinese yam (*Dioscorea polystachya*) leaves by a print-capture RT-PCR[J]. Journal of General Plant Pathology,2017,83(4):189-196.

[4]Huang L F, Song L X, Xia X J, et al. Plant-soil feedbacks and soil sickness: from mechanisms to application in agriculture[J]. Journal of Chemical Ecology,2013,39(2):232-242.

[5]Wu L K, Wang J Y, Huang W M, et al. Plant-microbe rhizosphere interactions mediated by *Rehmannia glutinosa* root exudates under consecutive monoculture[J]. Scientific Reports,2015,5:15871.

[6]Wu H M, Qin X J, Wang J Y, et al. Rhizosphere responses to environmental conditions in *Radix pseudostellariae* under continuous monoculture regimes[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2019,270/271:19-31.

[7]黄钰芳,张恩和,张新慧,等. 兰州百合不同连作年限土壤中化感物质的检测及其自毒效应的研究[J]. 干旱地区农业研究,2021,39(2):62-68,94.

[8]陈　勇. 连作玉竹根际微生态特征及植株响应的基因表达分析[D]. 长沙:湖南农业大学,2020:101-102.

[9]赵林艳,徐武美,王豪吉,等. 施用生物炭对连作三七根际真菌群落与存活率的影响[J]. 生物技术通报,2023,39(7):219-227.

[10]谢田朋,崔治家,黄钰芳,等. 独一味对自身及两种高寒地区作物种子和幼苗的化感作用[J]. 中国草地学报,2023,45(7):30-40.

[11]周武先,段媛媛,罗孝荣,等. 白术化感物质存在的主要部位及其对小白菜的化感作用研究[J]. 中药材,2019,42(6):1222-1227.

[12]周武先,罗孝荣,段媛媛,等. 半夏对 3 种常见农作物的化感作用及其生理机制研究[J]. 南方农业学报,2019,50(7):1451-1459.

[13]雷瑞祥,杨冰月,魏艳妮,等. 3 种药用植物根际土壤水浸液对远志种子及其幼苗的化感作用[J]. 中国实验方剂学杂志,2020,26(23):161-170.

[14]Liu Y Z, Liu Y, Zeng C L, et al. Intercropping with *Achyranthes bidentata* alleviates *Rehmannia glutinosa* consecutive monoculture problem by reestablishing rhizosphere microenvironment [J]. Frontiers in Plant Science,2022,13:1041561.

[15]王晓芳,徐少卓,王　玫,等. 万寿菊生物熏蒸对连作苹果幼苗和土壤微生物的影响[J]. 土壤学报,2018,55(1):213-224.

[16]Xie G H, Cui H D, Dong Y, et al. Crop rotation and intercropping with marigold are effective for root-knot nematode (*Meloidogyne* sp.) control in angelica (*Angelica sinensis*) cultivation [J]. Canadian Journal of Plant Science,2016,97(1):26-31.

[17]徐天养,桑应华,徐俊驹,等. 万寿菊提取物对烤烟根结线虫发病率及产质量的影响[J]. 湖南农业科学,2022(12):35-39.

[18]张月萌,王倩姿,孙志梅,等. 间作豆科作物对山药田土壤化学和生物学性质的影响[J]. 应用生态学报,2018,29(12):4071-4079.

[19]吕　毅,宋富海,李园园,等. 轮作不同作物对苹果园连作土壤环境及平邑甜茶幼苗生理指标的影响[J]. 中国农业科学,2014,47(14):2830-2839.

[20]王劲松,樊芳芳,郭　珺,等. 不同作物轮作对连作高粱生长及其根际土壤环境的影响[J]. 应用生态学报,2016,27(7):2283-2291.

[21]张海燕,解备涛,董顺旭,等. 药剂处理对重茬山药病害的防治效果[J]. 山东农业科学,2015,47(10):79-82.

[22]He C, Zhang L, Li X N. Plant performance and soil fungal community impacts of enhancing *Dioscorea opposita* with spraying foliar fertilizer with different nutrient element combinations [J]. Agronomy,2022,12(9):2017.

[23]刘永录,李自刚. 复合微生物制剂对怀山药连作障碍的修复机制研究[J]. 河南农业科学,2010,39(11):90-93.

[24]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,2020,31(12):4153-4160.

[25]Matías L, González-Díaz P, Jump A S. Larger investment in roots in southern range-edge populations of Scots pine is associated with increased growth and seedling resistance to extreme drought in response to simulated climate change [J]. Environmental and Experimental Botany,2014,105:32-38.

[26]Zhang Z Z, Wu J H, Xi Y P, et al. Effects of autotoxicity on seed germination, gas exchange attributes and chlorophyll fluorescence in melon seedlings[J]. Journal of Plant Growth Regulation,2022,41(3):993-1003.

[27]孙雪冰,范鹤龄,黄小龙,等. 山药化感物质对山药和玉米种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 热带作物学报,2022,43(9):1853-1861.

[28]王田涛,关德军,杨　梅,等. 灯盏花不同部位水浸提液对 4 种作物的化感效应分析[J]. 南方农业学报,2021,52(8):2087-2095.

[29]周武先,熊琳珂,张雅娟,等. 化感作用对川党参种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 山东农业科学,2022,54(11):76-85.

[30]覃志茂,李得发,邵长芬. 地枇杷茎、叶水浸提液对 3 种作物种子萌发的影响[J]. 分子植物育种,2023:1-15(2023-06-20)[2024-07-08]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20230620.0838.002.html.

[31]郭英姿,王　政,贾文庆,等. 三种杂草浸提液对万寿菊和波斯菊的化感效应[J]. 植物生理学报,2023,59(9):1830-1840.

[32]Scavo A, Abbate C, Mauromicale G. Plant allelochemicals: agronomic, nutritional and ecological relevance in the soil system [J]. Plant and Soil,2019,442(1/2):23-48.

[33]李　璇,岳　红,王　升,等. 影响植物抗氧化酶活性的因素及其研究热点和现状[J]. 中国中药杂志,2013,38(7):973-978.

[34]Huang W W, Reddy G V P, Shi P J, et al. Allelopathic effects of *Cinnamomum septentrionale* leaf litter on *Eucalyptus grandis* saplings [J]. Global Ecology and Conservation,2020,21:e00872.

[35]Tang Z H, Guo F, Cui L, et al. Effects of allelochemicals on root growth and pod yield in response to continuous cropping obstacle of peanut[J]. Phyton,2023,92(1):17-34.

[36]陈　刚,李　胜. 植物生理学实验[M]. 北京:高等教育出版社,2016:22-25,36-39.

[37]李彦飞,初晓辉,李嘉懿,等. 大狼毒对紫花苜蓿种子萌发及幼苗生长的化感效应研究[J]. 草地学报,2022,30(2):394-402.