

林 超,邱黛玉,陈 垣,等. 党参根际土壤浸提液对其种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 江苏农业学报, 2022, 38(4): 900-906.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2022.04.005

党参根际土壤浸提液对其种子萌发和幼苗生长的影响

林 超^{1,2,3}, 邱黛玉^{1,2,3}, 陈 垣^{1,2,3}, 沈鹏瑞⁴, 胡芳弟⁵

(1. 甘肃省干旱生境作物学重点实验室, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃农业大学农学院, 甘肃 兰州 730070; 3. 甘肃省中药材规范化生产技术创新重点实验室, 甘肃 兰州 730070; 4. 西安利君制药有限责任公司, 陕西 西安 710000; 5. 兰州大学药学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 为探明党参根际土壤浸提液对党参种子萌发和幼苗的自毒机制, 通过不同浓度梯度下的不同生长期党参根际土壤浸提液处理党参种子及幼苗, 进行自毒效应分析。结果表明: 在不同浓度处理下, 党参种子萌发和幼苗生长均表现出持续抑制的趋势, 党参繁殖期根际土壤浸提液母液的自毒综合效应最高, 为-0.682, 党参幼苗叶片过氧化物酶(POD)、超氧化物歧化酶(SOD)活性在自毒胁迫下随浸提液浓度的升高表现为先升后降, 丙二醛(MDA)含量呈持续上升趋势。根际土壤自毒物质分析结果表明共有 13 种单体化合物可能为自毒物质, 其中 5-羟甲基糠醛相对含量较高。总之, 党参根际土壤浸提液的自毒作用随着浸提液浓度的提高而增强, 且表现为繁殖期的自毒效应最强。

关键词: 党参; 自毒机制; 生理活性

中图分类号: S567.23⁺9.01

文献标识码: A

文章编号: 1000-4440(2022)04-0900-07

Effects of aqueous extracts from rhizosphere soil of *Codonopsis pilosula* on seed germination and seedling growth

LIN Chao^{1,2,3}, QIU Dai-yu^{1,2,3}, CHEN Yuan^{1,2,3}, SHEN Peng-rui⁴, HU Fang-di⁵

(1. Gansu Provincial Key Laboratory of Aridland Crop Science, Lanzhou 730070, China; 2. Agronomy College, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 3. Key Laboratory of Herbal Medicine Standardization Production Technology Innovation, Lanzhou 730070, China; 4. Xi'an Lijun Pharmaceutical Co., Ltd., Xi'an 710000, China; 5. School of Pharmacy, Lanzhou University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In order to explore the autotoxicity mechanism of aqueous extracts from rhizosphere soil of *Codonopsis pilosula* on seed germination and seedling growth, the seeds and seedlings of *C. pilosula* were treated with aqueous extracts under different concentrations from rhizosphere soil at different growth stages, and the autotoxicity effect was analyzed. The results showed that the seed germination and seedling growth of *C. pilosula* were continuously inhibited under different water extract treatments. The autotoxic comprehensive effect of *Codonopsis pilosula* rhizosphere soil water extract during the breeding period was the highest, which was -0.682. Under autotoxicity stress, the activities of peroxidase (POD) and superoxide dismutase (SOD) in leaves of *C. pilosula* seedlings increased firstly and then decreased with the increase of extract concentration, while the content of malondialdehyde (MDA) increased continuously. The analysis of autotoxic substances in rhizosphere soil showed that there were 13 kinds of monomers which might be autotoxic substances, and the relative content of 5-hydroxymethylfurfural was higher. In conclusion,

the autotoxicity of the aqueous extract from the rhizosphere soil of *C. pilosula* increased with the increasing concentration of the extracts, and the autotoxicity was the strongest in the breeding period.

Key words: *Codonopsis pilosula*; autotoxicity mechanism; physiological activity

收稿日期: 2021-09-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(31960395); 国家重点研发计划项目(2018YFC1706301)

作者简介: 林 超(1996-), 女, 甘肃陇南人, 硕士研究生, 主要从事药用植物资源利用研究。(E-mail) 2361262172@qq.com

通讯作者: 邱黛玉, (E-mail) gsqdy@163.com

党参为桔梗科多年生草本植物党参[*Codonopsis pilosula* (Franch.) Nannf.]、素花党参[*Codonopsis pilosula* Nannf. var. *modesta* (Nannf.) L. T. Shen]或川党参[*Codonopsis tangshen* Oliv.]的干燥根^[1]。因其具有补气、养血的功效,也被称为“小人参”。近年来,随着市场需求的增加,在党参产区连作现象较为严重,而连作容易破坏土壤中的生物和化学循环的平衡,从而使土壤养分和酸碱度发生变化,进一步造成作物产量和品质的恶化^[2-4]。有研究者发现三七连作土壤会显著降低三七种子发芽率,随着连作年限的增加三七幼苗各生长指标逐渐下降,化感作用是导致三七连作障碍的主要原因^[5]。当归根际土壤水浸液也会严重抑制其种子萌发和幼苗生长^[6]。

党参在长期连作状态下容易造成种内竞争激烈,自毒物质在土壤中过度积累,尤其是在植物根际容易形成高浓度的微环境,土壤理化性质、微生态系统受到严重干扰,导致土壤有害病原菌增多,植物生长发育不良^[7-9]。黄芪、当归、半夏等药用植物的栽培实践中病害严重,产量和质量下降,很大程度上影响了中药材产业的可持续性发展^[10-12]。目前在党参化感作用的研究中,对于化感物质的鉴别较少。为此,本试验通过室内生物测量法研究党参根际土壤水浸液对自身生长变化和幼苗抗氧化酶系统的影响,通过气相色谱-质谱联用仪(GC-MS)测定筛选出疑似党参化感自毒物质,为研究旱作农业区连作党参化感自毒机理提供思路。

1 材料与方法

1.1 试验材料

党参种子采购于当地药材市场,经甘肃农业大学农学院教授陈垣鉴定为党参(*Codonopsis pilosula*)。试验用土壤为甘肃省陇南市宕昌地区重茬地的党参根际土壤,pH 8.16,速效钾 169.86 mg/kg,速效磷 25.56 g/kg,硝态氮 30.18 mg/kg,铵态氮 18.01 mg/kg,有机质 12.47 g/kg。取样时间为生长初期(5月30日)、繁殖期(7月29日)、收获期(9月28日),采用五点法取样,取3个生长时期党参根际土壤,室温下阴干,过4号筛。

1.2 试验方法

1.2.1 材料处理 采用双因素随机区组试验设计,根际土壤取样时间分别为:党参生长初期、繁殖期和

收获期。精密称取经阴干过筛的党参各生长时期根际土 100 g,加入到 500 ml 无菌去离子水中,振荡并浸泡 48 h 后于台式离心机上以 3 600 r/min 离心 15 min。将上清液进行过滤,得到党参根际土壤浸提液母液(X1),留存备用。将 X1 稀释 2 倍得到党参根际土壤浸提液 X2,稀释 4 倍得到根际土壤浸提液 X3,设置蒸馏水处理为空白对照(CK)。

1.2.2 种子发芽试验 采用培养皿滤纸法,设置蒸馏水培养为空白对照(CK),不同浓度根际土壤浸提液处理为处理组,共计 10 个处理,各 3 次重复,共 30 个培养皿。种子用 15% NaClO₃溶液浸泡消毒 15 min,清水冲洗后放置于培养皿中,每皿各 50 粒。培养皿直径为 90 cm,底部放置 2 层滤纸,然后加入各处理浸提液 5 ml。光照培养箱的光照周期为 12 h 光照/12 h 黑暗,光照度为 4 000 μmol/(m²·s),温度为 25 ℃。定期补充相应浓度浸提液,维持滤纸湿润即可。

1.2.3 幼苗生长试验 采用小杯法测定,将生长 7 d 的幼苗移至组培瓶中继续生长,并加入相应浓度的浸提液 5 ml,继续放回上述培养箱中培养。第 20 d,测定党参幼苗的茎长、根长和总鲜质量以及幼苗生理指标。采用 Williamson 等^[13]的方法计算化感效应敏感指数(RI),公式为:

$$\begin{cases} RI = 1 - C/T & (T \geq C \text{ 时}) \\ RI = T/C - 1 & (T < C \text{ 时}) \end{cases}$$

C 为空白对照指标的均值,T 为处理组的均值。 $RI > 0$ 为化感促进作用, $RI < 0$ 为化感抑制作用, $|RI|$ 可用于判断化感作用强度。

自毒综合效应(SE):该值为种子发芽率、发芽势及幼苗根长、茎长、鲜重等各测定指标 RI 的平均值, $SE > 0$ 为化感促进, $SE < 0$ 为化感抑制,绝对值的大小表示化感作用强弱。

1.3 测定指标

发芽率 = 发芽种子数(第 7 d)/供试种子数 × 100%;发芽势 = 发芽种子数(第 5 d)/供试种子数 × 100%;茎长:从地上部分与地下部分的分界线开始,量至茎尖;根长:从地上部分与地下部分的分界线开始,量至根部最底端;鲜质量:每个处理 3 个培养皿中幼苗总鲜质量。

采用氮蓝四唑(NBT)光化学还原法测定超氧化物歧化酶(SOD)活性,采用愈创木酚法测定过氧化物酶(POD)活性,采用双组分分光光度法测定丙二

醛(MDA)含量^[14]。

1.4 自毒物质检测

自毒物质检测仪器为气相色谱三重四级杆串联质谱联用仪(Agilent 7000D),毛细管柱为 HP-5MS (30.00 m×0.25 mm×0.25 μm)。质谱条件:电子轰击(EI)源,轰击电压 70 eV,扫描范围 m/z 35~600 amu,离子源温度 230 ℃,四极杆温度 150 ℃,载气为 He,流量为 1 ml/min。测试条件:进样口温度 250 ℃,初始柱温 50 ℃。以 5 ℃/min 程序升温至 210 ℃,保持 2 min。

对照 NIST 质谱数据库计算机检索系统分析质谱图,进行未知物的鉴定。采用峰面积归一法计算各成分相对含量。

1.5 数据处理

试验数据通过 Excel 2019 软件进行作图,SPSS 25.0 进行方差分析(ANOVA)和显著性差异分析(Duncan's 法, $\alpha=0.05$)。

表 1 党参不同生长时期根际土壤浸提液对自身的自毒效应

Table 1 Autotoxic effects of aqueous extracts from rhizosphere soil of *C. pilosula* at different growth stages

不同生长时期的 根际土壤浸提液	不同浓度 浸提液	发芽率 RI	发芽势 RI	根长 RI	茎长 RI	总鲜质量 RI	自毒综合 效应(SE)
生长初期浸提液	X1	-0.179±0.012c	-0.404±0.015d	-0.496±0.071abcd	-0.542±0.055ab	-0.375	-0.399
	X2	-0.088±0.009b	-0.275±0.015c	-0.449±0.021ab	-0.486±0.024a	-0.649	-0.389
	X3	-0.025±0.016a	-0.208±0.011b	-0.424±0.044a	-0.480±0.047a	-0.874	-0.402
繁殖期浸提液	X1	-0.740±0.007gf	-0.864±0.020g	-0.611±0.057d	-0.697±0.018c	-0.498	-0.682
	X2	-0.382±0.011e	-0.717±0.008f	-0.578±0.013cd	-0.609±0.010bc	-0.562	-0.570
	X3	-0.354±0.004e	-0.283±0.028c	-0.487±0.020abc	-0.552±0.028ab	-0.596	-0.454
收获期浸提液	X1	-0.257±0.002d	-0.879±0.005g	-0.557±0.014bcd	-0.506±0.012a	-0.475	-0.535
	X2	-0.239±0.006d	-0.547±0.006e	-0.499±0.016abcd	-0.557±0.021ab	-0.517	-0.472
	X3	-0.221±0.007cd	-0.162±0.004a	-0.505±0.009abcd	-0.548±0.005ab	-0.668	-0.421

X1:党参根际土壤浸提液母液;X2:母液稀释 2 倍的浸提液;X3:母液稀释 4 倍的浸提液。 RI :化感效应敏感指数。同一列小写字母表示各时期浸提液不同处理间差异显著($P<0.05$)。

2.2 根际土壤浸提液对党参幼苗抗氧化酶活性和 MDA 含量的影响

由图 1 可知,在党参自毒物质胁迫下,党参叶片 SOD 活性升高,而随着自毒物质的不断积累超出了植物自身调节范围,造成活性氧在植物体内过量积累, SOD 活性降低,党参叶片在自毒效应下的抗氧化能力减弱。党参根际土壤浸提液对党参幼苗叶片 SOD 活性的化感效应存在浓度梯度差异,党参生长初期的根际土壤浸提液抑制作用表现为 X1 处理>X2 处理>X3 处理,繁殖期的根际土壤浸提液和收获期的根际土壤浸提液与生长初期的根际土壤浸提液

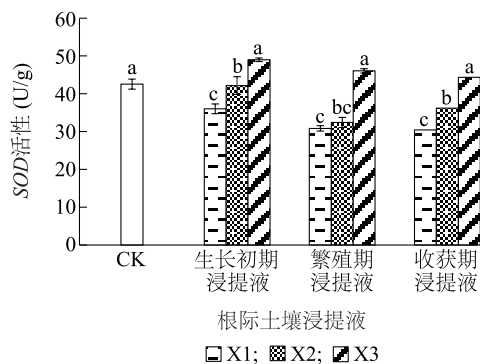
2 结果与分析

2.1 党参生长对其根际土壤浸提液的响应动态

自毒综合效应指数(SE)反映化感自毒作用的强弱。从表 1 中可以看出,同一处理中党参生长表现出明显的浓度梯度效应,即随着浸提液浓度逐渐升高,其对党参种子萌发和幼苗生长的抑制作用增强,浸提液母液抑制作用最强。在同一质量浓度(浸提液母液)条件下,繁殖期 $|SE|$ >收获期 $|SE|$ >生长初期 $|SE|$,表明党参幼苗生长在繁殖期根际土壤浸提液的处理下表现出较强的敏感性,对党参生长初期根际土壤浸提液敏感性较弱;党参茎长 $|RI|$ >根长 $|RI|$,说明党参根际土壤浸提液对自身抑制作用主要体现在幼苗生长方面。综上所述,党参 3 个生长发育时期中,繁殖期根际土壤水浸液对其种子发芽和幼苗生理生长表现出较强的抑制作用,该作用与水浸液浓度呈同向增长。

表现相同;在同一浓度下各时期党参根际土壤浸提液对党参幼苗的抑制作用表现为繁殖期根际土壤浸提液>收获期根际土壤浸提液>生长初期根际土壤浸提液。分析发现添加不同时期党参根际土壤浸提液后党参幼苗叶片 SOD 活性变化呈现一定规律,繁殖期 X1 浓度根际土壤浸提液处理的党参幼苗 SOD 活性最低,说明对党参幼苗的损害作用最大,较对照降低了 27.51%;生长初期 X3 浓度根际土壤浸提液处理的 SOD 活性最高,较对照升高了 15.15%。

党参幼苗 POD 活性对党参各生长时期根际土壤浸提液表现出不同的响应(图 2)。与对照相比,



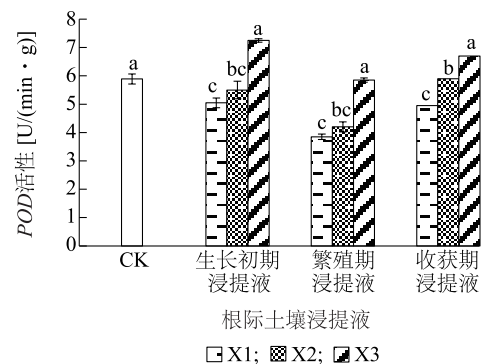
X1、X2、X3 见表 1 注,CK 为蒸馏水空白对照。同一生长时期根际土壤浸提液不同小写字母表示不同浓度处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 1 党参不同生长时期根际土壤浸提液对党参幼苗 SOD 活性的影响

Fig.1 Effects of rhizosphere soil extracts of *C. pilosula* at different growth stages on superoxide dismutase (SOD) activity of *C. pilosula* seedlings

在 X3 处理下党参不同生长时期根际土壤浸提液均能提高其幼苗 POD 活性,生长初期根际土壤浸提液 X3 处理下党参幼苗 POD 活性达到最高,为 $7.25 \text{ U}/(\text{min} \cdot \text{g})$;而在 X1、X2 浓度下党参不同生长时期根际土壤浸提液使党参幼苗体内 POD 活性降低,繁殖期根际土壤浸提液 X1 处理下党参幼苗 POD 活性降至最低,为 $3.85 \text{ U}/(\text{min} \cdot \text{g})$,说明在高浓度条件下党参幼苗的保护细胞受损,在党参自毒效应下的调节作用减弱。在同一浓度下党参不同生长时期根际土壤浸提液对其幼苗毒害作用表现为繁殖期根际土壤浸提液>收获期根际土壤浸提液>生长初期根际土壤浸提液,因此在党参生长初期产生的自毒胁迫较其他生长时期弱。

由图 3 可知,化感自毒物质能显著提高植物体内 MDA 含量,造成其活性氧过度积累,对植物产生毒害作用,不同生长时期党参根际土壤浸提液不同浓度处理的党参幼苗 MDA 含量变化表现一致。与对照相比,党参繁殖期根际土壤浸提液 X1 处理下,党参幼苗 MDA 含量高达 $1.1046 \mu\text{mol/g}$,说明高浓度党参根际土壤浸提液对植物的毒害作用较大。党参生长初期根际土壤浸提液处理下,与 CK 相对, X1、X2、X3 处理 MDA 含量分别增长了 67.60%、41.59%、26.09%;繁殖期根际土壤浸提液处理下, MDA 含量分别增长了 132.93%、108.28%、101.60%;收获期根际土壤浸提液处理下,MDA 含

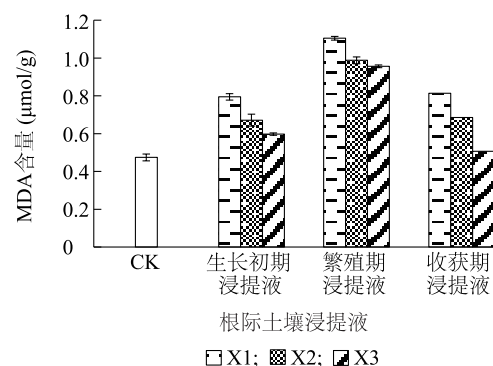


X1、X2、X3 见表 1 注,CK 为蒸馏水空白对照。同一生长时期根际土壤浸提液不同小写字母表示不同浓度处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 2 党参不同生长时期根际土壤浸提液对党参幼苗 POD 活性的影响

Fig.2 Effects of rhizosphere soil extracts of *C. pilosula* at different growth stages on peroxidase (POD) activity of *C. pilosula* seedlings

量分别增长了 71.59%、44.50%、6.79%。党参不同生长时期根际土壤浸提液 X1、X2、X3 处理下 MDA 含量均较对照高,说明党参叶片细胞膜受伤害程度随着浸提液浓度的增大不断增加。整体而言,党参不同生长时期根际土壤浸提液的自毒效应对党参叶片 MDA 含量的增大程度表现为繁殖期根际土壤浸提液>收获期根际土壤浸提液>生长初期根际土壤浸提液,表明党参繁殖期自毒物质分泌旺盛,对其自身的毒害作用较强。



X1、X2、X3 见表 1 注,CK 为蒸馏水空白对照。同一生长时期根际土壤浸提液不同小写字母表示不同浓度处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 3 党参不同生长时期根际土壤浸提液对党参幼苗 MDA 含量的影响

Fig.3 Effects of rhizosphere soil extracts of *C. pilosula* at different growth stages on malondialdehyde (MDA) content of *C. pilosula* seedlings

2.3 党参根际土壤中的自毒物质

GC-MS 分析结果(图 4、表 2)显示,党参根际土壤浸提液中共发现异戊醛、甲酸、冰醋酸等 13 种物质,可能为党参化感自毒物质,其中相对含量较高的是 5-羟甲基糠醛和冰醋酸,分别占全部组分的 43.64% 和 24.12%,硝酸异山梨酯和糠醇所占比例最少,为 0.54%。

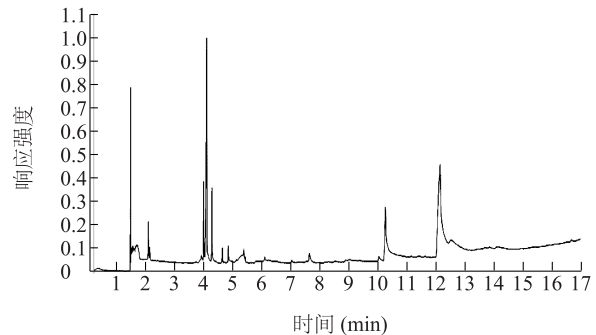


图 4 党参根际土壤浸提液的总离子流色谱图

Fig.4 Total ion flow chromatogram of water extract from rhizosphere soil of *C. pilosula*

表 2 党参根际土壤浸提液的化学组分

Table 2 Chemical composition of water extract from rhizosphere soil of *C. pilosula*

保留时间 (min)	有机化合物	分子式	相对分子质量	相对含量 (%)
2.12	异戊醛	C ₅ H ₁₀ O	86.13	1.74
4.01	甲酸	CH ₂ O ₂	46.03	3.27
4.12	冰醋酸	C ₂ H ₄ O ₂	60.05	24.12
4.30	羟基丙酮	C ₃ H ₆ O ₂	74.08	7.92
4.66	二氧化丁二烯	C ₄ H ₆ O ₂	86.09	0.95
4.87	2,3-丁二醇	C ₄ H ₁₀ O ₂	90.12	0.91
5.40	糠醇	C ₅ H ₆ O ₂	98.10	0.54
7.65	苯乙醛	C ₈ H ₈ O	120.15	1.64
10.04	硝酸异山梨酯	C ₆ H ₈ N ₂ O ₈	236.14	0.54
10.26	2,3-二氢-3,5-二羟基-6-甲基-4(H)-吡喃-4-酮	C ₆ H ₈ O ₄	144.13	11.90
12.15	5-羟甲基糠醛	C ₆ H ₆ O ₃	126.11	43.64
12.52	乙基 B-D-葡萄糖醛酸	C ₈ H ₁₄ O ₇	222.19	1.91
16.67	松三糖水合物	C ₁₈ H ₃₂ O ₁₆	504.44	0.91

3 讨论

3.1 不同浓度党参根际土壤浸提液对党参的化感作用

植物经生物途径向根际环境释放化学信号,又由根系吸收贮存于植物体内,从而促进或抑制自身和种内植物的生长发育^[15-16]。苏一诺等^[17]用不同浓度的苜蓿器官和根际土壤浸提液处理苜蓿种子,其种子萌发和幼苗生长明显受抑,且抑制作用与浓度变化存在密切联系,根际土壤浸提液的抑制效应显著。霍鸿浩等^[18]研究黄花蒿根、茎、叶不同浓度浸提液对小白菜和萝卜种子萌发的影响,认为其对两种蔬菜种子萌发均产生抑制作用,随着浓度的增加,抑制作用增强。

在兰州百合、当归、核桃和多花黄精等作物的化感作用研究中也表现出类似的效应^[19-22]。本试验通过研究党参不同生长时期、不同浓度根际土壤浸提液处理党参种子和幼苗,发现同一处理中党参幼苗生长抑制表现出明显的浓度梯度效应,随着浸提液浓度的增加,不同生长时期根际土壤浸提液对党参种子萌发和幼苗生长表现出持续抑制的现象。造成党参种子萌发和幼苗生长表现出持续抑制的现象。造成党参种子萌发和幼苗生长,使植物根系吸水、吸肥能力降低,长势变弱。

3.2 根际土壤浸提液对党参相关酶活性的影响

SOD 和 POD 可清除植物细胞中多余的活性

氧^[23-27]。长期处于活性氧胁迫下,膜功能及结构容易受损,抗氧化酶活性受到抑制^[28]。不同浓度半夏浸提液对3种农作物玉米、萝卜和白菜SOD、POD活性的影响表现为低浓度促进,高浓度抑制,MDA含量与浸提液浓度呈正相关^[29]。本研究结果表明,随着浸提液浓度变化,党参幼苗SOD和POD活性变化一致,在稀释4倍浓度下与对照未达到显著差异水平,浓度增大到稀释2倍和母液时与对照差异显著,与上述研究结论一致。原因可能是在外界低浓度自毒胁迫下,为应对短期内活性氧含量的迅速增加,党参抗氧化酶活性随之升高,以维持党参的正常生理代谢,而在高浓度自毒环境胁迫下,活性氧的代谢超过了党参的最大承受范围,抗氧化酶活性反而降低;MDA含量增加显示细胞膜结构和生理功能受到破坏,使得细胞内容物渗出、根系活力降低,最终抑制了党参幼苗的生长。

3.3 党参根际土壤中潜在化感物质

植物可以通过释放化感物质对周围植物产生毒害作用。有研究者发现,化感物质的种类和作物种类、释放途径存在密切关系,酚酸类和酯类物质是自毒物质的主要来源^[30-31]。三七根系分泌物中酚酸类物质会积累在土壤中,对三七生长产生影响^[32]。邻苯二甲酸和对羟基苯甲酸抑制玉米根长、芽长、根鲜质量^[33]。胡颓子根系分泌物中共鉴定出33种物质,分为酸、酯、烃等7大类,这些组分中有21种化合物已经被证实是具有化感作用的物质^[34]。本试验共检测出7类13种化学物质,主要以醛类、酸类为主,其中5-羟甲基糠醛和冰醋酸的相对含量最高,硝酸异山梨酯和糠醇相对含量最低。检测出的物质中冰醋酸为已知的酚酸类化感自毒物质,对植物种子萌发、植株生长、土壤酶活性和基本理化性质产生影响^[35]。在后续的研究中对5-羟甲基糠醛和冰醋酸单体化合物进行了生物检测,测试其化感效应,结果显示两种物质均对党参植株生长产生抑制作用,说明5-羟甲基糠醛和冰醋酸可能为党参的化感自毒物质。

4 结论

党参根际土壤浸提液明显抑制自身种子发芽率、发芽势,减慢幼苗根长、茎长和鲜质量的生长。抗氧化酶SOD、POD对不同浓度根际土壤浸提液的响应为先升高而后随着浸提液浓度增大逐渐降低,

任一浓度下MDA含量均升高。使用GC-MS对根际土浸提液进行鉴定,发现5-羟甲基糠醛和冰醋酸可能为党参的化感自毒物质。

参考文献:

- [1] 国家药典委员会.中华人民共和国药典[M].北京:中国医药科技出版社,2020:293.
- [2] 董晓民,高晓兰,刘伟,等.桃连作障碍中自毒作用的研究进展[J].黑龙江农业科学,2021,320(2):123-127.
- [3] CHONG W L, GUO Z C, JIAN L Z, et al. The comprehensive changes in soil properties are continuous cropping obstacles associated with American ginseng (*Panax quinquefolius*) cultivation[J]. Scientific Reports, 2021, 11(1):32-34.
- [4] 周武先,刘翠君,何银生,等.3种改良剂对连作川党参生长及土壤生化性质的影响[J].农业资源与环境学报,2020,35(12):1-13.
- [5] 张子龙,王文全,杨建忠,等.三七连作土壤对其种子萌发及幼苗生长的影响[J].土壤,2010,42(6):1009-1014.
- [6] 朱慧,马瑞君,吴双桃,等.当归根际土对其种子萌发和幼苗生长的影响[J].生态学杂志,2009,28(5):833-838.
- [7] 杨航,祁娟,刘文辉,等.异龄老芒麦根际土壤中脂肪酸类物质检测及根际土壤的自毒效应研究[J].草地学报,2021,29(1):52-59.
- [8] LIU Q, SUN X, ZHANG L, et al. Regulation mechanism of p-hydroxybenzoic acid on grapevine root secretion characteristics[J]. Scientia Horticulturae, 2019, 23(2):254-256.
- [9] 李敏,闫兴富,马丽,等.酚酸类化感自毒物质对枸杞种子萌发的抑制作用[J].生态学报,2020,40(6):2072-2079.
- [10] 郎多勇,付雪艳,荣佳旺,等.蒙古黄芪根围土壤水浸液对自身种子发芽及生理特性的影响[J].中药材,2015,38(1):11-13.
- [11] 黄文静,孙晓春,王楠,等.当归根际土壤水浸液对黄芪和工业大麻幼苗生长的化感作用[J].中国麻业科学,2018,40(2):63-69.
- [12] 罗敏,徐广,谭秋生,等.连作半夏化感作用初步研究[J].亚太传统医药,2020,16(4):67-69.
- [13] WILLIAMSON G B, RICHARDSON D. Bioassays for allelopathy: measuring treatment responses with independent controls[J]. Journal of Chemical Ecology, 1988, 14:181-187.
- [14] 陈刚,李胜.植物生理学实验[M].北京:高等教育出版社,2016:61-70.
- [15] 赵培强,王伟红,赵庆芳.五种中草药对黄芪化感作用的研究[J].北方园艺,2013,5(22):160-163.
- [16] 蒋丽,郭瑞齐,管仁伟,等.西洋参连作障碍原因分析及对策[J].辽宁中医杂志,2020,47(10):122-124.
- [17] 苏一诺,杨智明,蔡金婷,等.连作对紫花苜蓿萌发及成苗效应的影响[J].黑龙江畜牧兽医,2018(21):167-171.
- [18] 霍鸿浩,罗世琼,杨占南,等.黄花蒿浸提液对2种蔬菜种子萌发及幼苗生长的化感效应[J].西南农业学报,2019,32(2):309-315.

- [19] 黄钰芳,张恩和,张新慧,等. 兰州百合连作土壤水浸液自毒作用研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2020,48(7):84-93.
- [20] 金彦博,郭凤霞,陈 垣,等. 三种作物根际土壤水浸液对当归的化感效应[J].核农学报,2018,32(11):2248-2257.
- [21] 张如义,胡红玲,胡庭兴,等. 核桃凋落叶对萝卜种子发芽和幼苗生长的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2016,44(12):163-171.
- [22] 龙建吕,陈松树,王华磊,等. 多花黄精植株及根际土水浸液对其种子萌发和种芽生长的影响[J].中药材,2021,5(2):269-272.
- [23] 王银杰,张永侠,刘清泉,等. 德国鸢尾花瓣衰老过程中主要生理指标的变化[J].江苏农业科学,2020,48(24):153-155,214.
- [24] 张一冉,王雅楠,杨 杨,等. 脱落酸与水杨酸处理调节李果实抗冷性及氧化酶活性[J].江苏农业学报,2020,36(2):471-476.
- [25] 方伟敏,弓淑桦,何卜卜,等. NaCl胁迫对宁夏枸杞组培苗抗氧化酶及相关基因表达模式的影响[J].江苏农业科学,2021,49(7):57-62.
- [26] 邓 平,赵 英,王 霞,等. 水杨酸对 NaHCO_3 胁迫下桂西北喀斯特地区青冈栎种子萌发的影响[J].南京林业大学学报(自然科学版),2021,45(4):114-122.
- [27] 刘 玲,杨俊文,陈 成,等. 羧基化多壁碳纳米管单一及其与镉复合处理对水稻幼苗叶片毒性效应的研究[J].植物资源与环境学报,2020,29(1):37-43.
- [28] 龙期良,李 勇,高 原,等. 酚酸类物质对人参种子的化感作用研究[J].中国现代中药,2016,18(1):92-96.
- [29] 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.
- [30] 杨珊珊,王 茜,胡庭兴,等. 3种农作物(玉米、黄瓜、豇豆)对银木凋落叶化感作用的生理响应[J].应用与环境生物学报,2018,24(2):292-298.
- [31] 董沁方. 百合(*Lilium*)植株水浸液及根系分泌物的化感作用研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2006.
- [32] 李浩成,左应梅,杨绍兵,等. 三七根系分泌物在连作障碍中的生态效应及缓解方法[J].中国农业科技导报,2020,22(8):159-167.
- [33] 马 倩,郭 伟,薛盈文,等. 邻苯二甲酸与对羟基苯甲酸对玉米种子萌发的影响[J].植物生理学报,2020,56(2):294-300.
- [34] 孙 颖,李 江,雷小林,等. 胡颓子根系分泌物中潜在化感物质分析[J].中南林业科技大学学报,2020,40(3):8-12,52.
- [35] 谢星光,陈 晏,卜元卿,等. 酚酸类物质的化感作用研究进展[J].生态学报,2014,34(22):6417-6428.

(责任编辑:张震林)