

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw201507008

沈玉聪,张红瑞,张子龙,等. 酚酸类物质对三七幼苗的化感影响[J]. 广西植物, 2016, 36(5):607-614

SHEN YC,ZHANG HR,ZHANG ZL,et al. Allelopathic effects of phenolic acids on *Panax notoginseng* seedlings[J]. Guihaia, 2016, 36(5):607-614

酚酸类物质对三七幼苗的化感影响

沈玉聪¹, 张红瑞¹, 张子龙^{2*}, 高致明¹

(1. 河南农业大学 农学院·河南省高校中药资源开发与利用工程技术研究中心, 郑州 450002;

2. 北京中医药大学 中药学院·中药材规范化生产教育部工程研究中心, 北京 100102)

摘要: 该文研究了不同浓度的阿魏酸、对香豆酸、丁香酸、对羟基苯甲酸、香草酸 5 种酚酸类物质对三七幼苗生长和生理的影响。结果表明:处理后,三七幼苗的苗高、根长、可溶性蛋白质含量、根系活力、CAT 以及 POD 活性均有所降低。其中,阿魏酸各处理组幼苗的苗高及 POD 活性均显著降低,50、100 mg · L⁻¹的对香豆酸以及 100 mg · L⁻¹的香草酸处理组幼苗苗高也分别比对照显著降低 16.19%、16.67%和 29.29%;对香豆酸、丁香酸以及对羟基苯甲酸各处理组幼苗根长均显著低于对照;香草酸处理组幼苗的根系活力也显著低于对照,且幼苗的 CAT 活性在 10、50、100 mg · L⁻¹丁香酸、对羟基苯甲酸以及香草酸处理下也达到了显著降低水平。此外,1 mg · L⁻¹阿魏酸以及 100 mg · L⁻¹香草酸处理组幼苗的叶绿素含量也均显著降低;中高浓度的阿魏酸、对香豆酸、丁香酸、对羟基苯甲酸增加了三七幼苗的 MDA 含量,而香草酸在 0.1、1、10、100 mg · L⁻¹浓度下显著降低幼苗的 MDA 含量;丁香酸、香草酸、对羟基苯甲酸以及中高浓度的对香豆酸增加了三七幼苗的 SOD 活性,且香草酸各处理组均达到了显著性水平。综上结果表明,5 种酚酸类物质对三七幼苗均具有一定的化感抑制作用,但各酚酸物质的作用方式及强度并不完全一致,阿魏酸的化感影响较大,这为进一步研究三七的化感自毒作用提供了一定的理论参考。

关键词: 阿魏酸, 对香豆酸, 丁香酸, 对羟基苯甲酸, 香草酸, 生理影响

中图分类号: Q945, S567 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3142(2016)05-0607-08

Allelopathic effects of phenolic acids on *Panax notoginseng* seedlings

SHEN Yu-Cong¹, ZHANG Hong-Rui¹, ZHANG Zi-Long^{2*}, GAO Zhi-Ming¹

(1. College of Agriculture, Henan Agricultural University, Research Center for the Development and Utilization of Resources of Traditional Chinese Medicine Engineering Technology in Colleges and Universities, Zhengzhou 450002, China; 2. School of Chinese Pharmacy, Beijing University of Chinese Medicine, Chinese Herbal Medicine Standardized Production Engineering Research Center of the Education Ministry, Beijing 100102, China)

Abstract: This article studied the effects of ferulic acid, P-coumaric acid, syringic acid, P-hydroxybenzoic acid and vanillic acid at different concentrations on the growth and physiology of *Panax notoginseng* seedlings. The results showed that shoot height, root length, soluble protein content, root activity, CAT and POD activity of *P. notoginseng* seedlings decreased. Among them, shoot height and POD activity of seedlings were decreased obviously by ferulic acid; and the shoot height of 50, 100 mg · L⁻¹ P-coumaric acid and 100 mg · L⁻¹ vanillic acid were 16.19%, 16.67% and 29.29% dramatically lower than that of the control group. The root length of seedlings were also reduced signifi-

收稿日期: 2015-08-11 修回日期: 2015-12-08

基金项目: 国家自然科学基金(81102751) [Supported by the National Science Foundation of China(81102751)]。

作者简介: 沈玉聪(1989-), 女, 河南邓州人, 硕士研究生, 主要从事药用植物栽培研究, (E-mail) hnautem@126.com。

*通讯作者: 张子龙, 博士, 副研究员, 主要从事药用植物资源与栽培研究, (E-mail) zhangzilong76@163.com。

cantly by P-coumaric acid, syringic acid and P-hydroxybenzoic acid, and the root activity of vanillic acid were reduced significantly as well, meanwhile the CAT activity of seedlings were decreased by 10, 50, 100 mg · L⁻¹ Syringic acid, P-hydroxybenzoic acid and vanillic acid. In addition, the content of chlorophyll of seedlings were also reduced obviously by 1 mg · L⁻¹ ferulic acid and 100 mg · L⁻¹ vanillic acid. Furthermore, the content of MDA increased at higher concentrations of ferulic acid, P-coumaric acid, syringic acid and P-hydroxybenzoic acid, while it decreased significantly at 0.1, 1, 10 and 100 mg · L⁻¹ concentrations of vanillic acid. Besides that, the SOD activity of seedlings increased when treated with syringic acid, vanillic acid, P-hydroxybenzoic acid and higher concentrations of P-coumaric acid, moreover vanillic acid increased them significantly. The results showed that five phenolic acids had some certain allelopathic inhibitory effects on *P. notoginseng* seedlings, but the effects were not completely consistent. Among them, ferulic acid had greater influence. These provides some theoretical reference for further research of allelopathic autotoxicity of *P. notoginseng*.

Key words: ferulic acid, P-coumaric acid, syringic acid, P-hydroxybenzoic acid, vanillic acid, physiological effects

三七为五加科植物,是我国常用大宗中药材之一,具有扩张血管、降低血压、抗血栓、止血活血补血等作用(张玉军, 2009)。近几年,随着三七的应用越来越广泛,市场需求量不断增大,但制约三七产量及种植面积的关键因素即连作障碍问题并没有得到有效解决。已有研究(游佩进等, 2009a, b, c; 张子龙等, 2010)表明,三七连作土壤或根区土壤水提液不仅对萝卜、白菜、莴苣种子及幼苗生长产生一定化感作用,而且会对三七自身种子萌发及幼苗生长产生化感影响,但具体机理并不清楚。植物中所发现的化感物质主要来源于植物的次生代谢产物,分子量较小,结构简单,主要分为水溶性有机酸、醌类、苯甲酸及其衍生物、肉桂酸及其衍生物、香豆素类、类黄酮类、嘌呤和核苷等 14 类(张学文等, 2007)。其中,酚类和类萜类化合物是高等植物的主要化感物质(张重义等, 2009)。朱琳等(2014)从种植过三七的土壤中分离得到 26 个挥发性成分,并认为邻苯二甲酸二异丁酯等物质是导致三七产生化感作用的重要原因;周家明等(2012)从连作三七土壤提取液中检测到阿魏酸、胡萝卜苷等 7 个化合物;吴立洁(2014)也从三七根际土壤中分离出阿魏酸、对香豆酸等六种酚酸类物质。

近年来,关于酚酸类物质化感作用的研究较多, Yan et al(2010)从山猪菜中分离出八种酚酸,并表明这八种酚酸对拟南芥种子萌发具有较强的抑制活性;吕卫光等(2013)在西瓜残体腐解物以及根系分泌物中检测到 4 种酚酸物质,并表明这些酚酸物质对西瓜的种子萌发以及根系生长均有不同程度的影响;吴宗伟等(2009)的研究表明重茬地黄根际土壤中的阿魏酸等酚酸物质对水培地黄的根长以及抗氧化酶 SOD 等生长生理指标都有一定的抑制作用;吴

立洁(2014)研究发现三七根际土壤中存在的阿魏酸、对香豆酸等六种酚酸类物质对三七的发芽率、苗高、根长等生长指标均有一定的影响;孙玉琴等(2008)的研究也表明阿魏酸对三七等植物种子的发芽具有一定的抑制作用。但阿魏酸、对香豆酸等酚酸类物质对三七幼苗生理方面影响的报道很少。抗氧化酶 CAT、POD 等一系列生理指标能够在一定程度上反映植物的健康状况,因此,本研究分析了三七根际土壤中存在的阿魏酸、对香豆酸、丁香酸、对羟基苯甲酸、香草酸对三七幼苗生长生理的影响,以期从生长和生理两方面揭示酚酸类物质对三七幼苗的化感作用影响,也为从生理机制角度探讨三七的自毒作用提供参考和依据。

1 材料与方 法

1.1 材 料

三七种子由文山三七研究院栽培研究所提供。阿魏酸、对香豆酸、丁香酸、对羟基苯甲酸、香草酸均购自 Sigma 公司。

1.2 试 验 设 置

三七种子经过处理后用湿沙(含水量 25% 左右)埋藏,40 d 后挑选刚萌发的大小一致的种子,用 3% 的次氯酸钠溶液消毒 5 min 后用蒸馏水冲洗干净,放入盛有 40 g 石英砂的培养皿中,每个培养皿 30 粒,分别加入 0.01、0.1、1、10、50、100 mg · L⁻¹ 的阿魏酸、对香豆酸、丁香酸、对羟基苯甲酸、香草酸处理液各 15 mL,对照用蒸馏水代替,盖上培养皿盖保持湿度,每个处理重复 3 次。在室内(室温 17~20 ℃)自然光下进行培养,培养皿中每隔 12 h 加入 15 mL 1/2 霍格兰营养液保持湿度。

1.3 指标测定

处理 25 d 后取三七幼苗叶片对各项生理指标进行测定。丙二醛含量采用硫代巴比妥酸法(孔祥生等, 2008); SOD 活性采用氮蓝四唑法(孔祥生等, 2008); CAT 活性采用过氧化氢法(孔祥生等, 2008); POD 活性采用愈创木酚法(李玲, 2009); 可溶性蛋白质含量采用考马斯亮蓝 G-250 染色法(孔祥生等, 2008); 可溶性糖含量采用苯酚法(孔祥生等, 2008); 叶绿素含量采用叶绿素仪进行检测。根系活力采用氯化三苯基四氮唑法(孔祥生等, 2008)。苗高和根长用直尺进行测量。

1.4 数据分析

用 Williamson(1988) 提出的化感效应指数 RI ($RI=1-C/T$, C 为对照值, T 为处理值) 来衡量化感强度的大小。

当 $RI>0$ 时为促进作用; 当 $RI<0$ 时为抑制作用, RI 绝对值代表化感作用强度的大小。

参考张子龙等(2014) 的方法计算平均化感指数来比较各测定指标间的化感作用强弱。

$$MSI_R = \frac{\sum_{j=1}^n a_j}{n}$$

式中, R 为平均敏感指数 (M) 的级别或层次, a 为数据项, n 为该级别或层次数据 (RI) 的总个数。当 $MSI>0$ 时为促进, 当 $MSI<0$ 时为抑制, 绝对值的大小与作用强度(敏感性)一致。

数据采用 DPS v7.05 版数据分析软件进行单因素试验统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同浓度酚酸类物质对三七幼苗生长的影响

2.1.1 对三七幼苗苗高的影响 由表 1 可知, 0.01~100 mg·L⁻¹ 各浓度酚酸类物质处理后三七幼苗的苗高均低于对照。其中, 阿魏酸各处理组均达到显著降低水平 ($P<0.05$), 50、100 mg·L⁻¹ 的对香豆酸及 100 mg·L⁻¹ 的香草酸处理组也分别比对照显著降低 16.19%、16.67% 和 29.29% ($P<0.05$), 0.1~100 mg·L⁻¹ 的丁香酸及 1、50、100 mg·L⁻¹ 的对羟基苯甲酸处理组也均达到显著降低水平 ($P<0.05$)。

2.1.2 对三七幼苗根长的影响 不同浓度酚酸类物质处理后, 三七幼苗根长均有所降低(表 2)。0.01~100 mg·L⁻¹ 的对香豆酸、丁香酸以及对羟基苯甲酸各处理组幼苗根长均显著低于对照 ($P<0.05$); 0.1~

100 mg·L⁻¹ 的阿魏酸和香草酸各处理组也均达到了显著性水平 ($P<0.05$)。

2.2 不同浓度酚酸类物质对三七幼苗各项生理指标的影响

2.2.1 对三七幼苗可溶性蛋白质含量的影响 5 种酚酸及其不同浓度处理均降低三七幼苗可溶性蛋白含量(表 3)。阿魏酸和对香豆酸浓度为 0.01 mg·L⁻¹ 时, 三七幼苗的可溶性蛋白质含量显著低于对照的含量 ($P<0.05$), 分别比对照降低 28.70% 和 17.52%。10、50 mg·L⁻¹ 的丁香酸处理显著降低三七幼苗的可溶性蛋白质含量 ($P<0.05$), 分别较对照降低 17.65% 和 16.87%。在对羟基苯甲酸处理组中, 三七幼苗的可溶性蛋白质含量在 10、100 mg·L⁻¹ 浓度处理下显著低于对照 ($P<0.05$)。与对照相比, 香草酸各浓度处理均没有显著降低三七幼苗可溶性蛋白的含量 ($P>0.05$)。

2.2.2 对三七幼苗叶绿素含量的影响 由表 4 可以看出, 不同浓度的 5 种酚酸类物质处理后, 三七幼苗中的叶绿素含量变化不一。在阿魏酸处理组中, 1 mg·L⁻¹ 的浓度处理具有显著的抑制作用 ($P<0.05$), 抑制达到了 30.25%; 其余浓度处理的三七幼苗, 叶绿素含量与对照无显著差异 ($P>0.05$)。对香豆酸浓度为 0.01、50 mg·L⁻¹ 时能显著降低三七幼苗叶绿素含量 ($P<0.05$)。对羟基苯甲酸在浓度为 1 和 100 mg·L⁻¹ 时对三七幼苗叶绿素含量也具有显著的抑制作用 ($P<0.05$)。香草酸仅在高浓度 100 mg·L⁻¹ 时具有显著抑制作用 ($P<0.05$)。

2.2.3 对三七幼苗根系活力的影响 由表 5 可知, 不同浓度的 5 种酚酸均降低了三七幼苗的根系活力, 0.01~100 mg·L⁻¹ 的香草酸各处理组幼苗根系活力均显著低于对照 ($P<0.05$); 0.1~100 mg·L⁻¹ 的对羟基苯甲酸和 0.1~100 mg·L⁻¹ 的丁香酸各处理组也均达到了显著性水平 ($P<0.05$); 0.1、50 mg·L⁻¹ 的阿魏酸和 0.1、50、100 mg·L⁻¹ 的对香豆酸都显著降低三七幼苗的根系活力 ($P<0.05$)。

2.2.4 对三七幼苗丙二醛(MDA)含量的影响 由表 6 可知, 在中高浓度 10、50、100 mg·L⁻¹ 的阿魏酸、对香豆酸、丁香酸、对羟基苯甲酸处理下, 三七幼苗中的 MDA 含量均比对照高, 但均不显著 ($P>0.05$); 在香草酸处理组中, 0.01~100 mg·L⁻¹ 的各浓度处理组均比对照含量低, 并且 0.1、1、10、100 mg·L⁻¹ 的处理组达到了显著性水平 ($P<0.05$)。

2.2.5 对三七幼苗过氧化氢酶(CAT)活性的影响 由

表 1 不同浓度酚酸类物质处理对三七幼苗苗高的影响 (cm)

Table 1 Effects of phenolic acids at different concentrations on shoot height of *Panax notoginseng* seedlings

化感物质 Allelochemical	处理浓度 Treatment concentration ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)						
	0	0.01	0.1	1	10	50	100
阿魏酸 Ferulic acid	4.20±0.070a	3.03±0.025de	2.73±0.075e	3.50±0.100bc	3.65±0.150b	3.24±0.210cd	3.27±0.065cd
对香豆酸 P-coumaric acid	4.20±0.070a	3.77±0.400ab	3.69±0.015ab	3.71±0.040ab	3.72±0.150ab	3.52±0.015b	3.50±0.000b
丁香酸 Syringic acid	4.20±0.070a	4.03±0.000a	3.15±0.080c	3.42±0.115bc	3.58±0.005b	3.24±0.135c	3.25±0.150c
对羟基苯甲酸 P-hydroxybenzoic acid	4.20±0.070a	4.00±0.100ab	3.87±0.035abc	3.39±0.240cd	3.70±0.13abcd	3.59±0.185bcd	3.34±0.210d
香草酸 Vanillic acid	4.20±0.070a	4.17±0.100a	4.19±0.135a	3.99±0.015a	4.13±0.025a	4.17±0.000a	2.97±0.035b

注: 同一行中不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

Note: Different letters in same line mean significant differences ($P < 0.05$). The same below.

表 2 不同浓度酚酸类物质处理对三七幼苗根长的影响 (cm)

Table 2 Effects of phenolic acids at different concentrations on root length of *Panax notoginseng* seedlings

化感物质 Allelochemical	处理浓度 Treatment concentration ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)						
	0	0.01	0.1	1	10	50	100
阿魏酸 Ferulic acid	1.33±0.025a	1.26±0.010a	0.80±0.000b	0.51±0.040c	0.93±0.125b	0.97±0.065b	0.78±0.025b
对香豆酸 P-coumaric acid	1.33±0.025a	0.85±0.050cd	0.73±0.000d	0.99±0.085bc	0.75±0.050d	0.89±0.015bcd	1.02±0.050b
丁香酸 Syringic acid	1.33±0.025a	0.79±0.040c	0.97±0.035b	0.95±0.020b	0.84±0.060bc	0.83±0.025bc	0.87±0.065bc
对羟基苯甲酸 P-hydroxybenzoic acid	1.33±0.025a	1.02±0.050b	0.80±0.050bc	0.83±0.125bc	0.87±0.065bc	0.89±0.060bc	0.76±0.110c
香草酸 Vanillic acid	1.33±0.025a	1.28±0.050ab	0.92±0.050cd	0.78±0.050e	1.18±0.025b	0.95±0.020c	0.81±0.040de

注: 均值差的显著性水平为0.05。下同

Note: The mean difference is significant at the 0.05 level. The same below.

表 3 不同浓度酚酸类物质处理对三七幼苗可溶性蛋白质含量的影响 ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)Table 3 Effects of phenolic acids at different concentrations on soluble protein content of *Panax notoginseng* seedlings

化感物质 Allelochemical	处理浓度 Treatment concentration ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)						
	0	0.01	0.1	1	10	50	100
阿魏酸 Ferulic acid	15.47±0.925a	11.03±1.415b	13.45±0.190a	14.16±0.325a	14.17±0.330a	13.83±0.615a	13.57±0.365a
对香豆酸 P-coumaric acid	15.47±0.925a	12.76±0.480b	13.35±0.960ab	13.64±0.220ab	13.51±0.295ab	13.37±1.525ab	13.23±0.330ab
丁香酸 Syringic acid	15.47±0.925a	13.91±0.300ab	14.54±0.165ab	14.46±0.235ab	12.74±0.165b	12.86±1.320b	13.73±0.680ab
对羟基苯甲酸 P-hydroxybenzoic acid	15.47±0.925a	14.30±0.425ab	13.22±0.140ab	13.71±1.045ab	13.10±0.240b	14.21±0.790ab	12.42±0.725b
香草酸 Vanillic acid	15.47±0.925a	14.44±0.790a	14.32±0.300a	14.12±0.070a	14.93±0.145a	13.87±1.140a	14.44±0.290a

表 7 可知, 0.01~100 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 各浓度酚酸类物质处理后三七幼苗中过氧化氢酶的活性均低于对照。其

中 10、50、100 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的丁香酸、对羟基苯甲酸和香草酸处理组均达到了显著降低水平 ($P < 0.05$), 1、10

表 4 不同浓度酚酸类物质处理对三七幼苗中叶绿素含量的影响 (用 SPAD 值表示)

Table 4 Effects of phenolic acids at different concentrations on chlorophyll content of *Panax notoginseng* seedlings

化感物质 Allelochemical	处理浓度 Treatment concentration ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)						
	0	0.01	0.1	1	10	50	100
阿魏酸 Ferulic acid	27.60±1.180ab	26.40±0.000abc	26.73±3.575abc	19.25±3.550c	27.23±1.575ab	28.80±3.100a	19.85±0.000bc
对香豆酸 P-coumaric acid	27.60±1.180ab	22.80±1.700c	29.20±1.400ab	24.85±1.050bc	30.35±1.200a	22.58±2.175c	29.23±0.375ab
丁香酸 Syringic acid	27.60±1.180ab	30.08±1.625a	24.85±0.550ab	21.83±1.275b	26.18±5.425ab	24.65±0.600ab	28.55±2.450ab
对羟基苯甲酸 P-hydroxybenzoic acid	27.60±1.180ab	25.78±0.025bc	30.63±0.225a	22.70±0.000c	30.10±1.150a	28.23±2.275ab	23.35±0.350c
香草酸 Vanillic acid	27.60±1.180ab	30.73±1.325a	28.65±1.850ab	29.58±0.125ab	25.05±2.55bc	25.58±0.525bc	21.75±1.650c

表 5 不同浓度酚酸类物质处理对三七幼苗根系活力的影响 ($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)Table 5 Effects of phenolic acids at different concentrations on root activity of *Panax notoginseng* seedlings

化感物质 Allelochemical	处理浓度 Treatment concentration ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)						
	0	0.01	0.1	1	10	50	100
阿魏酸 Ferulic acid	730.42±18.550a	721.94±12.190a	669.48±11.660c	702.34±2.115ab	724.59±1.060a	670.54±2.120bc	728.30±2.650a
对香豆酸 P-coumaric acid	730.42±18.550a	724.06±3.710a	621.79±0.000c	728.83±3.180a	727.77±2.120a	678.49±10.070b	671.07±9.010b
丁香酸 Syringic acid	730.42±18.550a	694.92±7.420abc	709.76±9.535ab	532.77±2.120d	521.64±4.770d	673.72±18.020bc	671.07±6.890c
对羟基苯甲酸 P-hydroxybenzoic acid	730.42±18.550a	682.20±7.420ab	662.06±2.120b	600.07±18.545c	565.10±28.085c	673.19±5.830b	656.24±12.185b
香草酸 Vanillic acid	730.42±18.550a	636.63±6.360b	582.58±7.420c	577.28±10.600c	572.51±14.310c	516.34±1.590d	526.94±7.950d

表 6 不同浓度酚酸类物质处理对三七幼苗 MDA 含量的影响 ($\text{nmol} \cdot \text{g}^{-1}$)Table 6 Effects of phenolic acids at different concentrations on MDA content of *Panax notoginseng* seedlings

化感物质 Allelochemical	处理浓度 Treatment concentration ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)						
	0	0.01	0.1	1	10	50	100
阿魏酸 Ferulic acid	31.10±2.320ab	20.02±3.100b	27.73±4.045ab	26.86±0.000ab	32.16±6.140ab	31.67±7.195ab	38.67±8.340a
对香豆酸 P-coumaric acid	31.10±2.320a	31.06±2.015a	39.42±3.045a	29.89±2.070a	32.65±3.760a	34.80±4.755a	37.13±5.405a
丁香酸 Syringic acid	31.10±2.320a	22.26±1.750a	37.34±4.040a	34.84±6.250a	35.62±6.320a	31.74±6.235a	30.20±5.465a
对羟基苯甲酸 P-hydroxybenzoic acid	31.10±2.320ab	38.70±0.565a	31.66±3.435ab	25.88±3.160b	33.58±4.015ab	34.95±4.230ab	36.74±5.585ab
香草酸 Vanillic acid	31.10±2.320a	29.23±1.435ab	25.06±0.730bc	25.94±1.960bc	26.10±0.595bc	29.03±1.215ab	22.50±0.100c

$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的阿魏酸处理组也分别显著低于对照组 48.20% 和 47.64% ($P < 0.05$), 而对香豆酸各浓度处理组均不显著 ($P > 0.05$)。

2.2.6 对三七幼苗过氧化物酶 (POD) 活性的影响

由表 8 可知, 0.01 ~ 100 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 各浓度酚酸类物质

处理后三七幼苗中过氧化物酶的活性均比对照低。其中, 阿魏酸处理组均显著低于对照 ($P < 0.05$); 0.01 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的对香豆酸和香草酸处理组分别显著低于对照 48.48%、22.56% ($P < 0.05$); 对羟基苯甲酸各浓度处理组除了 1 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 外均达到了显著性水平

表7 不同浓度酚酸类物质处理后三七幼苗中过氧化氢酶活性的变化 ($U \cdot g^{-1} \cdot min^{-1}$)Table 7 Change of catalase activity of *Panax notoginseng* seedlings under the treatment of phenolic acids with different concentrations

化感物质 Allelochemical	处理浓度 Treatment concentration ($mg \cdot L^{-1}$)						
	0	0.01	0.1	1	10	50	100
阿魏酸 Ferulic acid	880.00± 55.000a	585.00± 35.000ab	710.00± 90.000ab	460.00± 20.000b	465.00± 50.000b	635.00± 35.000ab	550.00± 70.000ab
对香豆酸 P-coumaric acid	880.00± 55.000a	465.00± 5.000a	455.00± 21.000a	610.00± 23.000a	730.00± 10.000a	525.00± 14.0000a	625.00± 65.000a
丁香酸 Syringic acid	880.00± 55.000a	500.00± 30.000b	645.00± 15.000ab	575.00± 45.000b	570.00± 50.000b	595.00± 75.000b	560.00± 90.000b
对羟基苯甲酸 P-hydroxybenzoic acid	880.00± 55.000a	780.00± 70.000ab	570.00± 10.000bc	675.00± 95.000abc	495.00± 5.000c	605.00± 65.000bc	520.00± 30.000bc
香草酸 Vanillic acid	880.00± 55.000a	685.00± 35.000ab	505.00± 65.000b	560.00± 70.000b	625.00± 15.000b	535.00± 35.000b	600.00± 55.000b

表8 不同浓度酚酸类物质处理后三七幼苗中过氧化物酶活性的变化 ($U \cdot g^{-1} \cdot min^{-1}$)Table 8 Change of peroxidase activity of *Panax notoginseng* seedlings under the treatment of phenolic acids with different concentrations

化感物质 Allelochemical	处理浓度 Treatment concentration ($mg \cdot L^{-1}$)						
	0	0.01	0.1	1	10	50	100
阿魏酸 Ferulic acid	656.00± 44.000a	322.00± 14.000c	394.00± 22.000bc	468.00± 20.000b	404.00± 40.000bc	400.00± 32.000bc	476.00± 84.000b
对香豆酸 P-coumaric acid	656.00± 44.000a	338.00± 38.000b	426.00± 26.000ab	474.00± 2.000ab	396.00± 48.000ab	398.00± 54.000ab	394.00± 46.000ab
丁香酸 Syringic acid	656.00± 44.000a	538.00± 2.000abc	628.00± 20.000ab	586.00± 50.000abc	486.00± 22.000bc	432.00± 10.000c	512.00± 24.000abc
对羟基苯甲酸 P-hydroxybenzoic acid	656.00± 44.000a	410.00± 38.000b	436.00± 44.000b	464.00± 52.000ab	410.00± 22.000b	536.00± 20.000ab	428.00± 60.000b
香草酸 Vanillic acid	656.00± 44.000a	508.00± 52.000b	528.00± 36.000ab	538.00± 70.000ab	570.00± 14.000ab	534.00± 2.000ab	562.00± 34.000ab

表9 不同浓度酚酸类物质处理后三七幼苗中超氧化物歧化酶活性的变化 ($U \cdot g^{-1}$)Table 9 Change of SOD activity of *Panax notoginseng* seedlings under the treatment of phenolic acids with different concentrations

化感物质 Allelochemical	处理浓度 Treatment concentration ($mg \cdot L^{-1}$)						
	0	0.01	0.1	1	10	50	100
阿魏酸 Ferulic acid	325.82± 32.000a	337.46± 46.545a	346.18± 8.730a	343.28± 23.275a	298.18± 50.910a	290.91± 66.91a	340.36± 32.000a
对香豆酸 P-coumaric acid	325.82± 32.000bcd	286.55± 24.725d	306.91± 16.000cd	429.10± 65.455abc	442.19± 14.545ab	466.91± 36.360a	442.18± 40.730ab
丁香酸 Syringic acid	325.82± 32.000a	336.00± 39.270a	331.64± 43.635a	450.91± 2.910a	398.55± 98.905a	408.73± 42.180a	427.64± 58.185a
对羟基苯甲酸 P-hydroxybenzoic acid	325.82± 32.000b	401.46± 58.185ab	417.46± 36.365ab	411.64± 65.455ab	429.09± 16.000ab	456.73± 2.910a	414.55± 10.185ab
香草酸 Vanillic acid	325.82± 32.000b	429.09± 45.090a	448.00± 20.360a	455.28± 39.275a	481.46± 21.815a	452.36± 13.090a	472.73± 7.275a

 $(P < 0.05)$ 。

2.2.7 对三七幼苗超氧化物歧化酶(SOD)活性的影响 由表9可知,0.01~100 $mg \cdot L^{-1}$ 各浓度不同酚

酸类物质处理后三七幼苗中超氧化物歧化酶的活性变化不一。其中,丁香酸、对羟基苯甲酸和香草酸处理组的酶活性整体比对照高,且香草酸各浓度处理

表 10 不同酚酸对三七幼苗的化感作用差异

Table 10 Allelopathic differences of *Panax notoginseng* seedlings under the treatments of different phenolic acids

化感物质 Allelochemical	三级 敏感 指数 M_3	二级敏感指数 M_2					一级敏感指数 M_1					
		农艺 性状 Agronomic Character	生理 指标 Physiological indexes	苗高 Seeding height	根长 Root length	可溶性 蛋白质 含量 Soluble protein content	叶绿 素含 量 Chlorophyll content	根系 活力 Root activity	MDA 含量 MDA content	CAT 活性 CAT activity	POD 活性 POD activity	SOD 活性 SOD activity
阿魏酸 Ferulic acid	-0.35	-0.47	-0.24	-0.31	-0.64	-0.13	-0.16	-0.04	-0.12	-0.59	-0.62	0.00
对香豆酸 P-coumaric acid	-0.26	-0.35	-0.18	-0.15	-0.55	-0.13	-0.06	-0.06	0.08	-0.59	-0.64	0.15
丁香酸 Syringic acid	-0.26	-0.38	-0.14	-0.23	-0.53	-0.10	-0.08	-0.17	-0.01	-0.54	-0.26	0.16
对羟基苯甲酸 P-hydroxybenzoic acid	-0.25	-0.36	-0.14	-0.16	-0.55	-0.12	-0.05	-0.15	0.05	-0.48	-0.48	0.23
香草酸 Vanillic acid	-0.19	-0.24	-0.15	-0.08	-0.39	-0.05	-0.04	-0.29	-0.19	-0.52	-0.22	0.29

注: M_1 中 $n=18$, 表示每品种有 1 个处理, 每处理有 6 个浓度, 每浓度有 3 个重复。 M_2 中, 三七幼苗农艺性状 (包括苗高、根长), $n=18 \times 2=36$; 幼苗生理指标 (包括可溶性蛋白质含量、叶绿素含量、根系活力等 7 个指标), $n=18 \times 7=126$, M_3 中酚酸的综合化感作用 (包括幼苗农艺性状和幼苗生理指标两方面), $n=36+126=162$ 。

Note: $n=18$ in M_1 means that there are 6 concentrations in every treatment and every treatment has 3 repetitions. Agronomic characters of *Panax notoginseng* seedlings include shoot height and root length ($n=18 \times 2=36$) in M_2 , while physiological indexes include 7 indicators such as soluble protein content, chlorophyll content, root activity and so on ($n=18 \times 7=126$). Comprehensive effects of phenolic acids include both of agronomic characters and physiological indexes in M_3 ($n=36+126=162$).

组均达到显著性水平 ($P<0.05$); 对香豆酸处理组的酶活性在低浓度 $0.01 \sim 0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理下略低于对照, 变化并不明显 ($P>0.05$), 但在中高浓度 $1 \sim 100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理下高于对照, 且 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理组明显比对照高出 43.30% ($P<0.05$); 阿魏酸处理组的酶活性在低浓度 $0.01 \sim 1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理下略高于对照 ($P<0.05$)。

2.3 不同酚酸对三七幼苗的化感作用差异

计算三七幼苗对于各酚酸物质化感作用的平均敏感指数, 结果见表 10。由表 10 可知, 一、二、三级敏感指数大部分为负值, 说明 5 种酚酸对三七幼苗有化感抑制作用。由一级敏感指数 M_1 可知, 所有酚酸对三七幼苗的苗高、根长、可溶性蛋白质含量、叶绿素含量、根系活力、CAT 活性、POD 活性都有抑制作用。由二级敏感指数 M_2 可知, 5 种酚酸对三七幼苗的农艺性状和生理指标均表现为抑制作用, 且对农艺性状的抑制作用较大。由三级敏感指数 M_3 可知, 三七幼苗对阿魏酸的化感抑制作用更敏感。

3 讨论

目前普遍认为一种活体植物产生并以挥发、淋溶、分泌和分解等方式向环境释放次生代谢物而影

响邻近伴生植物生长发育的化学生态学现象叫做植物的化感作用, 当对自身生长产生抑制作用时称为植物的化感自毒作用 (郭巧生, 2009)。本研究发现, 5 种酚酸对三七幼苗的苗高和根长均具有一定的抑制作用, 且大部分达到显著性水平, 表明 5 种酚酸均能够影响三七幼苗的正常生长。

植物体内的可溶性蛋白质是构成光合与其它生理生化过程的活性基础, 叶片中可溶性蛋白质含量的高低可以反映出植物生理生化的状态 (玄晓丽等, 2012)。 $0.01 \sim 100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 5 种酚酸能够在一定程度上抑制三七幼苗可溶性蛋白质的合成, 使新蛋白的合成速度低于蛋白质的降解速度, 从而降低三七幼苗的可溶性蛋白质含量, 并且 $0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的阿魏酸和对香豆酸、 10 和 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的丁香酸、 10 以及 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的对羟基苯甲酸作用较显著。

叶绿素含量高低及根系活力是衡量植物生长状况的重要指标。本研究中 5 种酚酸均能够降低三七幼苗的根系活力, 影响根的正常发育, 这与王璞等 (2001) 研究的阿魏酸、对羟基苯甲酸、香草酸对棉花根系活力的影响一致。5 种酚酸处理后三七幼苗的叶绿素含量虽变化不一, 但抑制作用仍较为明显, $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的阿魏酸、 0.01 和 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的对香豆酸、 1 和 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的对羟基苯甲酸、 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的香

草酸均能显著降低三七幼苗的叶绿素含量,这可能是因为这5种酚酸类物质在一定浓度下能破坏叶绿体的结构,从而抑制叶绿素的合成,并导致已合成的叶绿素分解加快(玄晓丽等,2012)。

植物在正常生命活动过程中,细胞中存在活性氧的产生和清除间的平衡,在逆境胁迫下,活性氧产生会增加,并引起膜脂过氧化导致膜系统受损,最终使植物组织受到破坏(詹嘉红等,2011)。植物细胞内的SOD、POD、CAT等抗氧化酶可以在一定程度上抵御环境因子造成的氧化胁迫,SOD能将超氧阴离子自由基歧化为 H_2O_2 ,POD、CAT则负责 H_2O_2 的清除(王松华等,2004)。本研究中,各酚酸类物质处理后,三七幼苗的POD和CAT的活性均有所降低;丁香酸、香草酸和对羟基苯甲酸处理组三七幼苗的SOD活性有所增加,且香草酸处理组较为显著;低浓度 $0.01 \sim 1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的对香豆酸对三七幼苗SOD活性的影响不大,但中高浓度 $1 \sim 100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理能较明显增加幼苗的SOD活性;阿魏酸处理对三七幼苗的SOD活性影响不明显。这表明在加入各酚酸类物质后,三七幼苗体内的活性氧增加,从而引起三七幼苗的适应性反应,增加体内的SOD活性,但可能由于三七幼苗对不同种类酚酸物质的敏感度不同,因而SOD活性的增加量也不同;同时,POD和CAT的活性均下降,说明SOD歧化活性氧产生的 H_2O_2 超出了POD和CAT的清除能力,这可能会导致过氧化物的过度积累,从而对三七幼苗产生危害。

植物器官衰老或在逆境下受到伤害,往往发生膜脂过氧化反应,丙二醛是膜脂过氧化的产物之一,通常利用它来表示细胞膜脂过氧化程度和植物对逆境条件反应的强弱(李合生,2009)。实验结果表明,与对照相比,中高浓度 $10, 50, 100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的阿魏酸、对香豆酸、丁香酸、对羟基苯甲酸能够增加三七幼苗的MDA含量,表明三七幼苗在这几种物质处理下POD、CAT活性降低导致了细胞膜脂过氧化程度的加剧,最终表现为MDA含量的增加,造成膜结构的损伤;而香草酸各浓度处理项均能够降低三七幼苗的MDA含量,并未对三七幼苗产生伤害,表明 $0.01 \sim 100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的香草酸对三七幼苗的膜结构并未产生损伤,这可能是因为三七幼苗在香草酸的作用下通过产生其他抗氧化酶等适应性机制抵御了过氧化物对幼苗膜结构的伤害。

通过综合敏感指数来看,5种酚酸对三七幼苗均有化感抑制作用,但三七幼苗对5种酚酸的敏感

度不同,对阿魏酸的敏感度最大,这与吴立洁(2014)的研究结果一致,且阿魏酸在三七根际土壤中的含量较高,因此推测阿魏酸可能为三七自毒的主要物质之一。酚酸在土壤中会以多种状态存在,Krogmeier et al(1989)的研究表明阿魏酸等酚酸物质虽然在发芽纸上进行发芽测试时对玉米、小麦等植物的种子萌发和幼苗生长有所影响,但在土壤中对其并无影响,因此,本试验还有待进行田间试验进行进一步的考证。

参考文献:

- GUO QS, 2009. Medicinal plant cultivation [M]. Beijing: Higher Education Press: 62–63. [郭巧生, 2009. 药用植物栽培学 [M]. 北京: 高等教育出版社: 62–63.]
- KONG XS, YI XF, 2008. The experiment technology on plant physiology [M]. Beijing: China Agriculture Press: 71–72, 129–135, 161, 257–261. [孔祥生, 易现峰, 2008. 植物生理学实验技术 [M]. 北京: 中国农业出版社: 71–72, 129–135, 161, 257–261.]
- LI HS, 2000. The experiment principle and technique on plant physiology and biochemistry [M]. Beijing: Higher Education Press: 260. [李合生, 2000. 植物生理生化实验原理和技术 [M]. 北京: 高等教育出版社: 260.]
- LI L, 2009. The experiment guidance on plant physiology module [M]. Beijing: Science Press: 97–98. [李玲, 2009. 植物生理学模块实验指导 [M]. 北京: 科学出版社: 97–98.]
- LV WG, YANG GC, LI SX, et al, 2013. Effects of phenolic acids on watermelon seed germination, seedling growth and physiological and biochemical properties [J]. Acta Agric Shanghai, 29 (2): 1–4. [吕卫光, 杨广超, 李双喜, 等, 2013. 几种酚酸物质对西瓜种子萌发、幼苗生长和生理生化特性的影响 [J]. 上海农业学报, 29 (2): 1–4.]
- MJ Krogmeier, JM Bremner, 1989. Effects of phenolic acids on seed germination and seedling growth in soil [J]. Biol & Fert Soils, 8: 116–122.
- SUN YQ, CHEN ZJ, WEI ML, et al, 2008. Preliminary study on effects of ferulic acid allelopathic on *Panax notoginseng* [J]. Spec Wild Econ Anim & Plant Res, (2): 39–41. [孙玉琴, 陈中坚, 韦美丽, 等, 2008. 阿魏酸对三七化感作用的初步研究 [J]. 特产研究, (2): 39–41.]
- WANG P, ZHAO XQ, 2001. Effect of allelochemicals on cotton seed germination and seedling growth [J]. J Chin Agric Univ, 6(3): 26–31. [王璞, 赵秀琴, 2001. 几种化感物质对棉花种子萌发及幼苗生长的影响 [J]. 中国农业大学学报, 6(3): 26–31.]
- WANG SH, YANG ZM, LÜ B, et al, 2004. Response of *Brassica juncea* L. to copper-induced oxidative stress [J]. J Nanjing Agric Univ, 27(1): 24–27. [王松华, 杨志敏, 吕波, 等, 2004. 印度芥菜对Cu诱导的氧化胁迫响应 [J]. 南京农业大学学报, 27(1): 24–27.]
- Williamson BG, Richardson D, 1988. Bioassays for allelopathy: measuring treatment responses with independent controls [J]. J Chem Ecol, 14(1): 181–187.
- WU LJ, 2014. Study of allelopathic effects and intervention measures of phenolic acids from root-zone soil of *Panax notoginseng* [D]. Beijing: Beijing University of Chinese Medicine: 19–26. [吴立洁, 2014. 三七根际土壤中酚酸类物质化感作用及 (下转第 631 页 Continue on page 631)