

酚酸类物质对苜蓿种子萌发及 抗氧化酶活性的影响

宋 亮^{1, 2}, 潘开文^{1, *}, 王进闯¹, 马玉红³

(1. 中国科学院成都生物研究所, 成都 610041; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039;

3. 四川省阿坝藏族羌族自治州科学技术研究院, 汶川 623000)

摘要:实验选用紫花苜蓿体内的 4 种化感物质包括阿魏酸、香豆素、香草酸、香豆酸, 以 10^{-3} 、 10^{-4} 、 10^{-5} mol L⁻¹ 和 10^{-6} mol L⁻¹ 四个浓度, 采用培养皿试纸法和沙培法进行苜蓿种子萌发及幼苗生长试验, 研究了苜蓿种子萌发和幼苗生长以及抗氧化保护性酶活性的变化, 并就生物量、种子萌发和酶活性等三大指标的敏感性进行了讨论。结果表明, 4 种化感物质对苜蓿种子萌发及幼苗生长有明显的影响作用, 这种影响效应与化感物质的种类及浓度显著相关。其中, 10^{-3} mol L⁻¹ 的 4 种化感物质均表现出对苜蓿种子萌发有显著的抑制作用, 阿魏酸、香豆素和香草酸达到了极显著的抑制效果。当浓度为 10^{-3} mol L⁻¹ 时, 除香豆酸外, 其它 3 种化感物质均表现出对幼苗体内超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)和抗坏血酸酶(APX)活性有显著的抑制作用, 同时使幼苗体内丙二醛(MDA)的含量显著增加; 随着浓度的降低, 化感物质抑制作用减弱; 当浓度降低为 10^{-6} mol L⁻¹ 时, 阿魏酸、香豆素、香草酸则表现出了对上述各种酶活性的轻微促进作用。阿魏酸表现出的化感效应最强, 香豆素、香草酸次之, 香豆酸最弱。发芽指标受化感物质的影响最敏感、其次是生物量指标, 而酶活性指标相对较弱。

关键词:化感作用; 化感活性物质; 紫花苜蓿; 种子萌发; 抗氧化酶

文章编号:1000-0933(2006)10-3393-11 **中图分类号:**Q945, Q946.8, Q948 **文献标识码:**A

Effects of phenolic acids on seed germination and seedling antioxidant enzyme activity of alfalfa

SONGLiang^{1, 2}, PAN Kai-Wen^{1, *}, WANG Jin-Chuang¹, MA Yu-Hong³ (1. Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China; 3. Aba academy of Science and Technology, Wenchuan 623000, China). Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(10): 3393 ~ 3403.

Abstract: The perennial alfalfa (*Medicago sativa*) is presently used as a forage crop or cover plant to reduce soil erosion caused by wind and water and improve soil quality by nitrogen fixation in many regions of China. But when alfalfa is planted continuously in the same field, its yield will decrease. This is considered to be caused by alfalfa autotoxicity. Allelopathy is one of the important factors which reduce the production of alfalfa. It was reported that some allelochemicals in alfalfa could inhibit seed germination and seedling growth and change root morphology, but the antioxidant enzyme of alfalfa autotoxicity remains largely unknown.

According to previous studies, extracts of alfalfa roots, fresh leaves, and litter include phenolics such as vanillic and ferulic acid, *p*-hydroxybenzoic, *o*-coumaric, and *p*-coumaric acid. Ferulic acid, coumarin, vanillic acid and *p*-coumaric acid were used

基金项目:中国科学院-乐山市院地科技合作资助项目; 中国科学院西部之光联合学者资助项目; 中国科学院知识创新工程资助项目; 国家科技攻关项目子课题资助项目(2005BA807B09LA06, 2001BA606A-05-04, 2004BA606-05-03); 茂县生态站和瓦屋山生态站资助项目

收稿日期:2006-04-04; **修订日期:**2006-08-21

作者简介:宋亮(1981~), 男, 山东省枣庄市人, 硕士, 主要从事植物生态学研究. E-mail: songliang13@tom.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: pankw@cib.ac.cn or pkaiwen@yahoo.com.cn

Foundation item: The project was supported by The Linkage project of CAS and LeShan, the Talent Program in west China of CAS, National "Tenth Five-year Plan" Key Project (Grant No. 2001BA606A-05, 2004 BA606A-05-03 and 2005BA807B09LA06), the Maoxian Ecological Station and Mt. Wawu (SEBFW) Ecological Station of Chengdu Institute of Biology, CAS

Received date:2006-04-04; **Accepted date:**2006-08-21

Biography: SONGLiang, Master, mainly engaged in plant ecology. E-mail: songliang13@tom.com

to test their allelopathic effect on germination, growth and physiological characteristics of alfalfa in this study. The four allelochemicals were dissolved in distilled water to concentrations of $10^{-3} \text{ mol L}^{-1}$, from which, solutions of 10^{-4} , 10^{-5} , $10^{-6} \text{ mol L}^{-1}$ were prepared by adding distilled water. The distilled water was used as control. The objective of our research was to test the alteration of antioxidant defense system by using sand culture method. So as to better understand the allelopathic action mechanism of different allelochemicals.

The results showed that the four allelochemicals had significant allelopathic effects on seed germination, seedling growth and the activity of antioxidant enzyme, and that the physiological activities were significantly related with the concentration of the allelochemical. The seed germination of alfalfa was significantly inhibited under the treatment of $10^{-3} \text{ mol L}^{-1}$ of the four allelochemicals. Ferulic acid, coumarin and vanillic acid at $10^{-3} \text{ mol L}^{-1}$ significantly reduced the activities of superoxide dismutase, catalase, peroxidase and ascorbate peroxidase, while the content of MDA in alfalfa seedling was significantly increased. However, ferulic acid, coumarin and vanillic acid could increase the activities of antioxidant enzyme at $10^{-6} \text{ mol L}^{-1}$. In generally, the synthetic allelopathic effects of the four allelochemicals on the growth and antioxidant enzymes activities of seedling ranked, from the strongest to the weakest, in the order of ferulic acid, coumarin, vanillic acid and ρ -coumaric acid.

Key words: allelopathy; allelochemicals; alfalfa; seed germination; antioxidant enzyme

苜蓿 (*Medicago sativa*) 是一种优良的多年生豆科牧草和培肥植物,在我国很多地区广泛种植。在生产实践中发现,苜蓿连作出现重茬障碍,生产力逐渐下降^[1],研究表明这主要与苜蓿的自毒效应有关^[2,3]。

Chung 通过使用 7 种苜蓿品种的组织浸提液分别对自身进行处理,研究苜蓿自体毒素的作用,发现随着处理浓度增加到 40%,各受试苜蓿种子的萌发率显著降低,而且不同苜蓿品种的自我抑制程度不同,其中先锋 5427 品种的发芽受到的抑制最大,发芽率仅为 5.7%,品种 Dawn 受到的抑制最小,发芽率 45%。该研究表明不同苜蓿品种对自体毒素化合物的忍耐强弱不同,这为选择耐自体毒素的品种提供了依据^[4~7]。Read 在苜蓿自毒实验的生物检测中也发现:种过苜蓿的土壤以及苜蓿秸秆的浸提液能够显著抑制苜蓿种子的萌发,而且与未处理相比,处理苜蓿幼苗的根长显著变短,整株干重也显著下降^[8]。苜蓿的浸提液除了使苜蓿的萌发率降低外,还可以使苜蓿幼苗的畸化率显著增加,幼株变矮,侧根数目与对照相比也具有显著性的差异^[9,10],其中根部的各项指标与其它指标相比更敏感, 10^{-3} 、 $10^{-6} \text{ mol L}^{-1}$ 的单一化感物质(香豆素、香豆酸)及 1.5 g L^{-1} 、 0.5 g L^{-1} 的组织浸提液对苜蓿幼苗根部均有强烈的抑制作用。

酚酸类物质现在被公认为化感物质,苜蓿体内也含有大量的酚酸类物质,如:香豆素、邻香豆酸、羟基肉桂酸、阿魏酸等^[10]。Miller 和 Abdul 等研究表明:阿魏酸和苜蓿素等化感物质能显著抑制幼苗生长,而且使自身的发芽率下降^[11,12]。Chon 等对苜蓿幼苗施用香豆素、肉桂酸、香豆酸等单一酚酸类化感物质,发现单一化感物质除了使苜蓿的根、茎变短变小外,还使根部细胞仅发生横向生长,无纵向生长。其中,香豆素与其它酚酸类化感物质相比,表现出的化感作用最强烈,不同浓度的香豆素($10^{-3} \sim 10^{-6} \text{ mol L}^{-1}$)都能显著抑制苜蓿幼苗的生长,通过电镜观察还发现根尖的维管束形态分化异常,细胞发生明显分化,影响了根部皮层细胞生长分裂方式^[10],其作用强度还明显强于浸提液对苜蓿幼苗根尖生长分化的影响效应。可见,以前的研究大多集中在酚酸类物质对苜蓿化感物质的生测、受试苜蓿形态显微结构等方面,而对生理生化尤其是抗氧化酶活性等的研究较少。

此外,植物化感作用研究中所采用的生物检测指标很多,包括通过采用种子萌发的各项参数(如萌发率、萌发时间、萌发指数等)^[1,2],植株生物量和作物根部的形态学指标(如地上、地下干重、鲜重、株高、根尖的显微观察等)^[9,10],植株生理生化指标(如抗氧化物保护酶活性,细胞膜受损程度,ATP 酶、磷酸化酶、吲哚乙酸氧化酶等各种代谢酶活性等)^[13]来评价化感作用效应。就目前已发表的文献而言,以用种子萌发参数来评价化感效应的最多,其次是用植物生长指标(如生物量、株高),而通过用解剖结构和生理生化指标来评价化感作用的文献相对较少。各种评价指标的测定所需要的物力、人力和财力是不一样的,所以,筛选简单、快速、价廉而又能够全面地评价化感物质作用效应的生物检测指标具有一定的现实和科学意义。但是,尚未见有关化感作用

研究中生物检测评价指标筛选的文献报道。

因此,本实验选用 4 种酚酸类物质阿魏酸(Ferulic acid)、香豆素(Coumarin)、香草酸(Vanillic acid)、香豆酸(*p*-coumaric acid)处理苜蓿种子及幼苗,研究化感物质对苜蓿种子萌发以及幼苗体内抗氧化酶活性和细胞膜受损程度的影响作用,从生理生化尤其是抗氧化酶活性等角度,比较这四种酚酸类化感物质的化感效应强度,为进一步揭示苜蓿自毒作用产生的机制提供新的资料和依据。同时,对本文生物检测的各项指标的敏感性进行筛选评价,为植物化感作用研究中有关经济、全面、高效、合理的生物检测评价指标的选用提供参考。

1 材料与方法

1.1 实验材料

4 种化感物质阿魏酸、香豆素、香草酸、香豆酸均为分析纯,购于 sigma 公司,受试作物为紫花苜蓿(*Medicago sativa*)中的皇后(alfaqueen)品种。

1.2 化感物质处理液的配制

将阿魏酸、香草酸、香豆素、香豆酸用蒸馏水溶于容量瓶中配成 $10^{-3} \text{ mol L}^{-1}$ 的母液,然后将母液分别配制成 10^{-3} 、 10^{-4} 、 10^{-5} 、 $10^{-6} \text{ mol L}^{-1}$ 的处理液,实验前配制,蒸馏水作对照处理。化感物质类型及浓度梯度的设置是根据 Chon 等在苜蓿的化感作用研究中通过高效液相色谱(HPLC)测定苜蓿体内化感物质的类型、实际浓度、以及土壤中这些物质含量的常规变化范围等因素综合确定^[10,14]。

1.3 实验方法

1.3.1 苜蓿种子萌发实验 用 0.525 g L^{-1} 次氯酸钠对苜蓿种子消毒 15 min,然后用蒸馏水冲洗 4 次,每次 3min。将每 50 粒种子放入有两层滤纸 15cm 的培养皿中,每个处理一组,共 17 个处理(4 种类型化感物质,每种类型 4 个浓度梯度,蒸馏水处理作为对照)。种子置于人工智能气候箱中培养,条件为:24℃ 下,14h 光周期;22℃ 下,10h 暗周期;光强 $400 \mu\text{mol photo. nsm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ^[15]。种子放入以后将培养皿盖上盖,不同处理每天分别添加 2ml 各浓度化感物质溶液或蒸馏水,实验重复 3 次^[10]。

记录种子每天萌发的数量(以胚根突破种皮为准),根据文献报道^[7,10]和作者前期实验结果,确定 6d 后结束萌发实验,统计种子发芽指数、半数萌发时间及最终萌发率^[16]:

(1) 发芽指数(G_i)

$$G_i = \sum G_t / D_t$$

式中, G_t 为在 t 日内的发芽数, D_t 为相应的发芽日数。

(2) 半数萌发时间 种子萌发一半需要的时间(d)

(3) 最终萌发率(%)

最终萌发率(%) = (发芽终止时全部正常发芽的种子/供试种子数) $\times 100\%$

1.3.2 苜蓿幼苗生长实验 先加入 5ml 蒸馏水湿润滤纸,将消毒过的苜蓿种子置于垫有滤纸的培养皿中,放入人工气候箱中萌发 4~5d 后,用消毒过的镊子将刚刚萌发的种子挑出(以胚根突破种皮为准),采用国际上常用的沙培法进行培养^[17]。在每盘培养皿(直径 15cm)中,先放入 50g 洗净的石英沙,然后放置 15 粒催芽种子,处理液的类型和浓度与 1.3.1 种子萌发实验的相同,每个培养皿中分别加入 4 种类型 4 个浓度梯度处理液 5ml,蒸馏水作为对照处理,每个处理 3 次重复,然后将培养皿放入人工智能气候箱中进行生长实验。人工气候箱培养条件同 1.3.1^[10],以后每隔 1d 各补充相应处理液 2ml。10d 以后实验结束,收取活的苜蓿幼苗,测量单株地上和地下鲜重,取幼苗测定叶片中各种抗氧化酶活性及丙二醛含量,实验重复 3 次。

超氧化物歧化酶(SOD)活性参照 Giannopolitis 等的方法^[18],抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性参照 Nakano 等的方法^[19],过氧化氢酶(CAT)活性参照 Cakmak 等的方法^[20],过氧化物酶(POD)参照李合生等的方法^[21],丙二醛(MDA)含量参照 Gossett 等的方法进行测定^[22]。

1.4 数据处理

采用 SPSS(10.0)统计软件进行单因素方差、LSD、相关性和偏相关分析。

2 结果与分析

2.1 化感物质对苜蓿种子萌发的影响

4 种化感物质均对苜蓿种子的萌发产生化感效应。在 4 种化感物质的最高浓度即 $10^{-3} \text{ mol L}^{-1}$ 下,苜蓿种子的最终萌发率与对照相比显著降低 ($p < 0.05$),其中阿魏酸、香豆素及香草酸表现出极显著的抑制作用 ($p < 0.01$),阿魏酸、香豆素、香草酸和香豆酸分别使苜蓿种子的最终萌发率降低了 64 %、47 %、51 %、16 %。随着化感物质浓度的降低,抑制作用逐渐减弱,但当浓度降低到 $10^{-6} \text{ mol L}^{-1}$ 时,阿魏酸、香豆素及香草酸又表现出对苜蓿种子萌发的显著促进作用 ($p < 0.05$),分别使萌发率增加了 17 %、13 %、14 %,而香豆酸在 $10^{-6} \text{ mol L}^{-1}$ 时对苜蓿种子萌发无明显的影响(表 1)。

4 种化感物质在 $10^{-3} \text{ mol L}^{-1}$ 时均显著降低种子萌发速率,推迟种子半数萌发时间,其中阿魏酸、香豆素及香草酸使苜蓿种子在实验结束时也没有达到半数萌发状态,仅有香豆酸处理在 4.5d 时达到半数萌发,与对照相比,显著后延 ($p < 0.05$)。化感物质对发芽指数和半数萌发时间的影响趋势与最终萌发率的变化趋势相同,当浓度较高时表现出抑制,浓度较低时表现出促进,如阿魏酸、香豆素、香草酸在 $10^{-6} \text{ mol L}^{-1}$ 时分别使苜蓿种子的萌发速率增加了 20.3 %、17.1 %、17.3 %,香豆酸的则影响不显著。

综上所述,4 种化感物质均对苜蓿种子的萌发表现出了化感效应,大体上包括推迟萌发时间、抑制和促进萌发等。一般来说,在 $10^{-3} \text{ mol L}^{-1}$ 时表现出较强的化感抑制效应,达到显著或极显著水平,随着化感物质浓度的降低,化感作用的强度也逐渐减弱,如在浓度为 $10^{-5} \text{ mol L}^{-1}$ 时,化感物质基本上不表现出化感效应,而当浓度为 $10^{-6} \text{ mol L}^{-1}$ 时,部分化感物质则在一定程度上表现出对苜蓿种子萌发的促进作用(表 1)。

表 1 化感物质对苜蓿种子萌发的影响

Table 1 Effects of allelochemicals on the seed germination of alfalfa				
处理 Treatment	浓度 Concentration (mol L^{-1})	发芽指数 Germination index	半数萌发时间 Time of half germination (d)	最终萌发率 Final germination (%)
阿魏酸 Ferulic acid	10^{-3}	13.85 $\pm$ 0.69F	—	27.33 $\pm$ 0.96E
	10^{-4}	38.12 $\pm$ 0.90D	2.7 $\pm$ 0.12C	68.67 $\pm$ 1.01C
	10^{-5}	43.30 $\pm$ 0.85D	2.4 $\pm$ 0.13DE	80.67 $\pm$ 1.04B
	10^{-6}	50.43 $\pm$ 1.53A	2.2 $\pm$ 0.10E	90.00 $\pm$ 1.12A
香豆素 Coumarin	10^{-3}	18.7 $\pm$ 1.41F	—	40.67 $\pm$ 1.03D
	10^{-4}	36.72 $\pm$ 1.71E	3.2 $\pm$ 0.13B	67.33 $\pm$ 1.05C
	10^{-5}	41.03 $\pm$ 2.16D	2.6 $\pm$ 0.15DF	76.00 $\pm$ 1.27B
	10^{-6}	49.10 $\pm$ 1.14AC	2.4 $\pm$ 0.08DE	86.67 $\pm$ 1.05A
香草酸 Vanilic acid	10^{-3}	17.37 $\pm$ 1.04DF	—	37.33 $\pm$ 1.13D
	10^{-4}	35.25 $\pm$ 1.42E	3.5 $\pm$ 0.10A	70.00 $\pm$ 0.95C
	10^{-5}	42.22 $\pm$ 0.74D	2.5 $\pm$ 0.15DE	78.00 $\pm$ 1.02B
	10^{-6}	49.17 $\pm$ 1.65A	2.3 $\pm$ 0.12EF	87.33 $\pm$ 1.16A
香豆酸 Coumaric acid	10^{-3}	30.12 $\pm$ 1.03E	4.5 $\pm$ 0.15A	64.00 $\pm$ 1.04C
	10^{-4}	41.07 $\pm$ 1.19D	2.9 $\pm$ 0.11C	73.33 $\pm$ 0.93B
	10^{-5}	39.32 $\pm$ 0.63D	2.7 $\pm$ 0.10C	72.00 $\pm$ 1.12BC
	10^{-6}	45.33 $\pm$ 1.28B	2.5 $\pm$ 0.12DE	78.00 $\pm$ 1.02B
CK	0	41.93 $\pm$ 1.16D	2.3 $\pm$ 0.15EF	76.67 $\pm$ 1.03B

表中数据为平均值 $\pm$ SD ($n = 3$),不同的字母表示浓度间显著性差异,通过 LSD 检验获得, Data are mean values $\pm$ SD ($n = 3$), Different letters indicate significant differences between concentrations for each of the measure parameters, using LSD tests.

2.2 化感物质对苜蓿幼苗鲜重的影响

与对照相比, 10^{-3} mol L^{-1} 浓度的 4 种化感物质均显著降低苜蓿地下生物量 ($p < 0.01$), 其中, 阿魏酸降低幅度最大, 为 33.8%; 香豆素、香草酸和香豆酸分别降低了 24.3%、27.0% 和 25.7%。除香豆酸外, 另外 3 种化感物质在 10^{-4} mol L^{-1} 时也显著降低苜蓿幼苗地下生物量 ($p < 0.05$), 与对照相比, 分别降低了 21.6%、14.9% 和 20.3%, 同样是阿魏酸表现出的化感抑制效应最强。此外, 10^{-6} mol L^{-1} 的阿魏酸、香豆素和香草酸还表现出对苜蓿幼苗地下生物量的显著促进作用 ($p < 0.05$), 分别增加了 20.3%、24.3% 和 21.6% (表 2)。

地上生物量的变化趋势则不如地下生物量明显, 仅有 10^{-3} mol L^{-1} 和 10^{-4} mol L^{-1} 的阿魏酸以及 10^{-3} mol L^{-1} 的香豆素显著抑制苜蓿幼苗地上生物量 ($p < 0.05$), 分别降低了 27.3%、18.2% 和 14.1%, 其它种类和浓度的化感物质既没有表现出显著的抑制效应也没有表现出显著的促进作用。

植物幼苗的鲜重是表征其生物量的一个常用指标, 且对外界环境胁迫较为敏感, 因而被用作生物测定的指标^[23]。化感物质处理苜蓿幼苗后, 随浓度的增加, 幼苗的地上及地下鲜重与对照相比逐渐降低。总体而言, 与地上生物量相比, 地下生物量对化感物质更为敏感, 化感物质在高浓度时表现出抑制效应, 在低浓度时为促进作用。

2.3 化感物质对苜蓿幼苗体内抗氧化酶活性影响

2.3.1 对苜蓿幼苗体内过氧化物酶(POD)活性影响

低浓度及高浓度的阿魏酸对苜蓿幼苗叶片中 POD 活性都表现出明显的影响效应, 其中 10^{-3} mol L^{-1} 和 10^{-4} mol L^{-1} 的阿魏酸对 POD 活性产生了极显著的抑制作用 ($p < 0.01$), POD 活性与对照相比分别下降了 35.1% 和 26.5%, 10^{-6} mol L^{-1} 的阿魏酸表现出显著的促进作用 ($p < 0.05$), POD 活性增加了 15.2% (图 1)。香豆素对 POD 活性表现出显著抑制 ($p < 0.01$), 其中 10^{-3} mol L^{-1} 香豆素使 POD 降低最大, 为 34.8%, 其余两个浓度的香豆素分别使 POD 降低了 21.8%、30.3%, 但 10^{-6} mol L^{-1} 的香豆素与对照相比, 对 POD 的影响不显著。 10^{-3} mol L^{-1} 的香草酸表现出极显著的抑制作用, 而在 10^{-5} mol L^{-1} 的低浓度处理时则表现出明显的促进作用。仅有 10^{-3} mol L^{-1} 的香豆酸表现出明显的抑制作用, 而其余浓度的香草酸均无明显的化感效应。

2.3.2 对苜蓿幼苗体内超氧化物歧化酶(SOD)活性的影响 化感物质对苜蓿幼苗体内的 SOD 活性的促进作用表现得更为明显 (图 2)。其中, 阿魏酸和香豆素在 10^{-5} mol L^{-1} 时, 对 SOD 活性的促进作用最大, 与对照相比分别增加了 87.2%、86.8%, 差异极显著 ($p < 0.01$)。此外, 香草酸在 10^{-4} mol L^{-1} 、香豆酸在 10^{-3} mol L^{-1} 和 10^{-4} mol L^{-1} 时, 都表现出了促进作用,

表 2 化感物质对苜蓿幼苗生物量的影响
Table 2 Effects of allelochemicals on the biomass of alfalfa seedling

处理 Treatment	浓度 Concentration (mol L^{-1})	单株地下鲜重 Belowground FW per plant (mg)	单株地上鲜重 Aboveground FW per plant (mg)
阿魏酸 Ferulic acid	10^{-3}	0.49 $\pm$ 0.150D	0.72 $\pm$ 0.156D
	10^{-4}	0.58 $\pm$ 0.040C	0.81 $\pm$ 0.068C [*]
	10^{-5}	0.74 $\pm$ 0.035B	1.07 $\pm$ 0.040A
	10^{-6}	0.89 $\pm$ 0.035A	1.06 $\pm$ 0.115A
香豆素 Coumarin	10^{-3}	0.56 $\pm$ 0.101CD	0.85 $\pm$ 0.060C
	10^{-4}	0.63 $\pm$ 0.010C	1.05 $\pm$ 0.057A
	10^{-5}	0.74 $\pm$ 0.032B	1.06 $\pm$ 0.075A
	10^{-6}	0.92 $\pm$ 0.070A	1.03 $\pm$ 0.101A
香草酸 Vanillic acid	10^{-3}	0.54 $\pm$ 0.116D	0.98 $\pm$ 0.061B
	10^{-4}	0.59 $\pm$ 0.068C	0.98 $\pm$ 0.050B
	10^{-5}	0.73 $\pm$ 0.015B	1.03 $\pm$ 0.075A
	10^{-6}	0.90 $\pm$ 0.075A	1.07 $\pm$ 0.085A
香豆酸 Coumaric acid	10^{-3}	0.55 $\pm$ 0.101CD	0.98 $\pm$ 0.061B
	10^{-4}	0.74 $\pm$ 0.010B	0.99 $\pm$ 0.056A
	10^{-5}	0.73 $\pm$ 0.032B	1.06 $\pm$ 0.075A
	10^{-6}	0.78 $\pm$ 0.070B	1.05 $\pm$ 0.101A
CK	0	0.74 $\pm$ 0.026B	0.99 $\pm$ 0.023AB

表中数据为平均值 $\pm$ SD ($n = 3$), 不同的字母表示浓度间显著性差异, 通过 LSD 检验获得, Datas are mean values $\pm$ SD ($n = 3$), Different letters indicate significant differences between concentrations for each of the measure parameters, using LSD tests

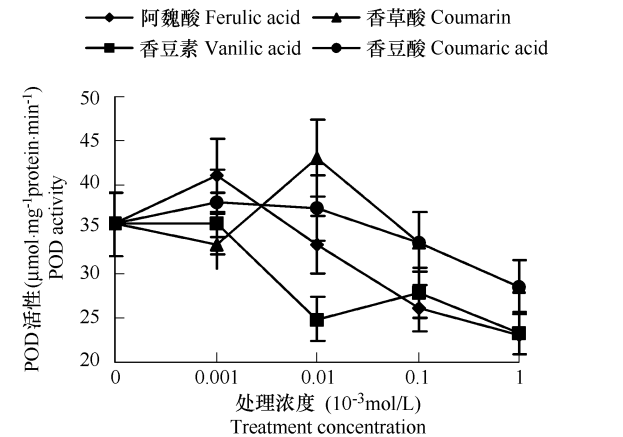


图 1 化感物质对苜蓿幼苗叶片中 POD 活性的影响
Fig.1 Effect of allelochemicals on activity of POD in alfalfa seedling leaves

其中香豆酸在 $10^{-4} \text{ mol L}^{-1}$ 时,促进作用达到极显著的水平 ($p < 0.01$)。

随着化感物质浓度的增加,SOD 活性逐渐降低,化感物质表现出对其活性的抑制作用。 $10^{-3} \text{ mol L}^{-1}$ 的阿魏酸、香豆素和香草酸都表现出明显的抑制作用;与对照相比,SOD 活性依次降低了 87.9 %、33.2 %和 25.4 % (图 2)。

$10^{-6} \text{ mol L}^{-1}$ 浓度的 4 种化感物质以及 $10^{-5} \text{ mol L}^{-1}$ 的香草酸、香豆酸对 SOD 活性未表现出明显的化感效应,这有可能是施用的化感物质的浓度未达到苜蓿幼苗启动应激机制所需阈值的原因所致。

2.3.3 对苜蓿幼苗体内过氧化氢酶(CAT)活性的影响

不同类型及浓度的化感物质对苜蓿幼苗叶片中 CAT 活性的化感效应仅有阿魏酸 $10^{-3} \text{ mol L}^{-1}$ 以及香草酸 $10^{-5} \text{ mol L}^{-1}$ 对其影响达到显著水平 ($p < 0.05$),而其余类型及浓度的化感物质未表现出明显的作用(图 3)。其中, $10^{-3} \text{ mol L}^{-1}$ 的阿魏酸表现出抑制作用,与对照相比,CAT 活性降低了 37.5 %; $10^{-5} \text{ mol L}^{-1}$ 的香草酸表现出促进作用,与对照相比,CAT 活性增加了 12.1 %。

2.3.4 对苜蓿幼苗体内抗坏血酸酶(APX)活性的影响 APX 活性在阿魏酸、香豆素、香草酸 $10^{-4} \text{ mol L}^{-1}$ 和 $10^{-3} \text{ mol L}^{-1}$ 两个浓度下与对照相比都显著降低 ($p < 0.05$),在香豆酸 $10^{-3} \text{ mol L}^{-1}$ 的浓度下明显降低,香豆素在 $10^{-4} \text{ mol L}^{-1}$ 下,使 APX 活性降低最多,达到 35.9 % (图 4)。

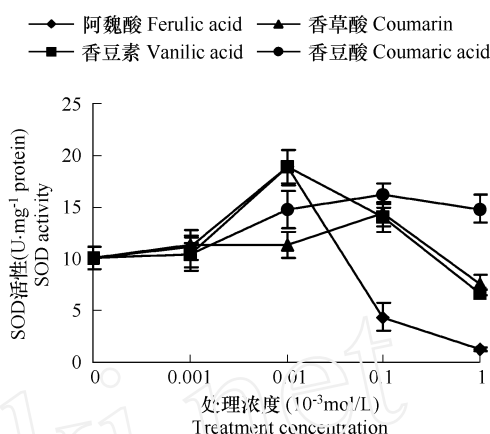


图 2 化感物质对苜蓿幼苗叶片中 SOD 活性的影响

Fig. 2 Effect of allelochemicals on activity of SOD in alfalfa seedling leaves

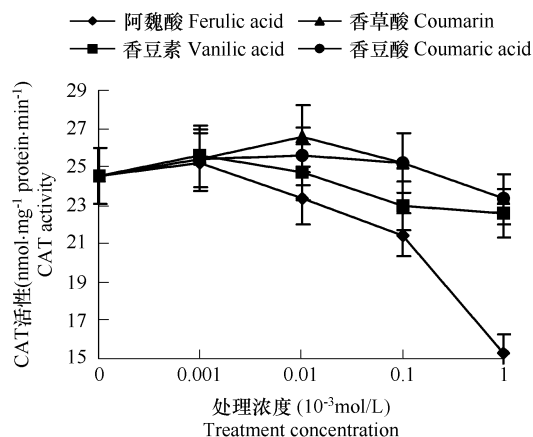


图 3 化感物质对苜蓿幼苗叶片中 CAT 活性的影响

Fig. 3 Effect of allelochemicals on activity of CAT in alfalfa seedling leaves

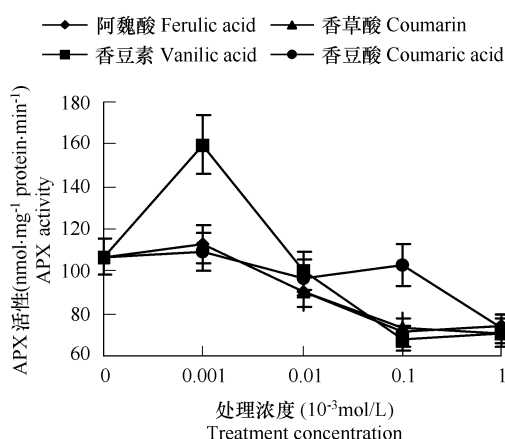


图 4 化感物质对苜蓿幼苗叶片中 APX 活性的影响

Fig. 4 Effect of allelochemicals on activity of APX in alfalfa seedling leaves

在不同处理方式中,仅有香豆素的 $10^{-6} \text{ mol L}^{-1}$ 浓度的处理使 APX 活性显著增加,增加了 49.6 %,其它类型及浓度的化感物质与对照相比没有表现出显著的化感效应(图 4)。

2.4 对苜蓿幼苗叶片中丙二醛(MDA)含量的影响

苜蓿幼苗的叶片在化感物质的有些浓度的处理下,膜脂过氧化明显加重(图 5) ($p < 0.01$)。苜蓿叶片中 MDA 含量在阿魏酸、香豆素、香草酸和香豆酸 $10^{-3} \text{ mol L}^{-1}$ 下,急剧增加,显示苜蓿在此时受到的伤害最大,与对照相比差异极显著 ($p < 0.01$),分别增加了 162.9 %、107.9 %、108.0 %和 22.4 %。此外, $10^{-6} \text{ mol L}^{-1}$ 阿魏酸以及 $10^{-4} \text{ mol L}^{-1}$ 使苜蓿幼苗叶片中 MDA 含量出现明显减少,与对照比分别减少了 24.7 %和 20.7 % (图 5)。

2.5 生物检测评价指标的筛选分析

2.5.1 单项敏感指标的筛选评价 结合单因素的方差分析和 LSD 多重比较的结果(表 1、表 2、图 1~图 5)可以看出:

(1)生理指标 在香豆酸的作用下,各生理指标按敏感大小排序为 $POD > SOD > MDA > APX > CAT$;在香草酸的作用下,各生理指标按敏感大小排序为 $SOD > APX > MDA > POD > CAT$;在香豆素的作用下,各生理指标按敏感大小排序为 $APX > POD > SOD > MDA > CAT$;在阿魏酸的作用下,各生理指标按敏感大小排序为 $MDA > SOD > POD > APX > CAT$ 。

(2)生物量指标 在香豆酸、香草酸、香豆素、阿魏酸的分别作用下,生物量的敏感指标都排列为:地下生物量 > 总生物量 > 地上生物量。

(3)种子发芽指标 在香豆酸、香草酸、香豆素、阿魏酸的分别作用下,种子发芽的敏感指标都排列为:最终萌发率、发芽指数 > 半数萌发时间。

2.5.2 综合敏感指标的筛选评价 上述分析给出了每类指标中的敏感指标,此处同样采用单因素方差分析和 LSD 多重比较的方法,根据其敏感程度来综合排列各类因子(表 1~表 2、图 1~图 5)。

在香豆酸的作用下,各种指标按敏感大小排序为:发芽指数 > 最终萌发率、半数萌发时间、 SOD 、 POD > 地下生物量、总生物量、 MDA 、 APX > CAT 、地上生物量;在香草酸的作用下,各种指标按敏感大小排序为:发芽指数、地下生物量 > 最终萌发率、总生物量 > 半数萌发时间、 APX 、 SOD > MDA 、 POD 、 CAT 、地上生物量;在香豆素的作用下,各种指标按敏感大小排序为:发芽指数、最终萌发率、地下生物量 > APX 、 SOD 、 POD 、总生物量、地上生物量、半数萌发时间 > MDA 、 CAT ;在阿魏酸的作用下,各种指标按敏感大小排序为:发芽指数、最终萌发率、地下生物量、 MDA > SOD 、 POD > 半数萌发时间、总生物量、地上生物量、 APX > CAT 。上述结果表明:尽管化感物质的种类不同,但种子萌发阶段的指标如发芽指数、最终萌发率是最敏感的,其次,总体而言是生物量指标如地下生物量等,再次是植物体内酶活性指标如 SOD 等。

3 讨论

3.1 酚酸类化感物质对苜蓿种子萌发及植株生物量的影响

4 种化感物质对苜蓿种子萌发均表现出“高浓度抑制,低浓度促进”的效应。随着化感物质浓度的降低,苜蓿种子萌发时间逐渐缩短,萌发速率加快,种子最终萌发率也显著提高($p < 0.05$)。其原因可能是化感物质影响了种子萌发所需要的关键酶类以及细胞分裂^[15,24],如磷酸化酶、纤维素酶等,使种子萌发过程中缺乏必需的能量以及合成代谢所需的中间产物,从而降低种子活力,抑制其萌发。此外,化感物质能够改变萌发时种皮的渗透性以及种子的吸水作用,使种子内部物质的渗透大量增加,这些渗透物质可能会刺激真菌病原体的生长,从而造成烂种,导致不能萌发^[25]。

Chon 等研究发现,相对于地上部分,根部对化感物质的反应更敏感^[10],本实验显示,4 种化感物质对幼苗前期生长的影响作用主要表现为对幼根活动的抑制,而对地上部分的作用相对不明显(表 2)。这与早期的实验结果一致^[10,26],出现这种现象的原因是因为根为直接接触、吸收化感物质的器官,更容易受到伤害,而地上部分靠根部吸收营养物质满足需要,只有当根受害达到一定程度,水分和养分不能正常供给时,地上部分才表现出受害症状。同时,这种抑制效应也与化感物质的浓度相关,即随化感物质浓度的增加,抑制作用的强度也增大,国内外同行也得到了相同的结果^[27,28]。

3.2 酚酸类化感物质对苜蓿幼苗体内保护酶活性及生物膜系统的影响

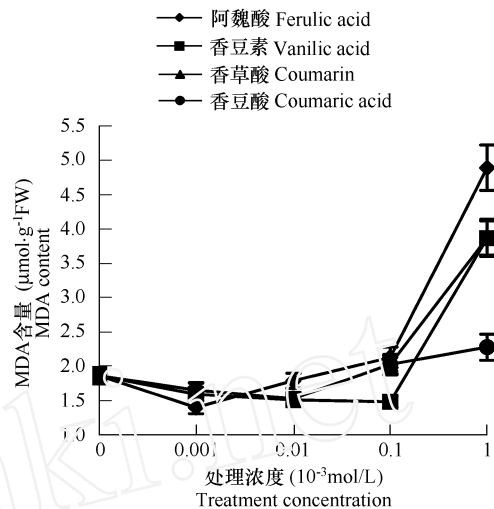


图 5 化感物质对叶片中 MDA 含量的影响 ($p < 0.05$)

Fig. 5 Effect of allelochemicals on the content of MDA in alfalfa seedling leaves

Roshchina 等对高等作物(如大豆、小麦、生菜、莴苣等)的化感作用研究指出,对羟基苯甲酸、香草酸、丁香酸、阿魏酸等多酚类化合物会破坏膜的功能。他认为这与化感物质抑制受体植物 SOD 和 CAT 酶活性,导致体内活性氧增多,造成膜质过氧化,从而破坏膜的结构有关^[29]。实验中部分较低浓度的化感物质使保护性酶活性显著升高($p < 0.05$) (图 1~图 4),这与林文雄等发现水稻叶片浸提液明显抑制杂草体内保护性酶活性的结论不同,这可能是由于实验中化感物质类型以及化感物质施用量不同造成的,同时实验受体的不同也有可能是引起实验结果有差异的重要原因。苜蓿幼苗体内酶活性的升高可能是其受到化感胁迫后,因体内过氧化产物增多而启动的一种应激机制^[30],即氧化胁迫诱导了苜蓿体内抗氧化能力的增加。但是,这种适应性的反应只能够在一定受害程度内发挥作用,当苜蓿体内氧化产物累积到一定水平时,各种酶不能正常发挥作用,导致酶活性下降,这与本文中部分较高浓度化感物质处理能够显著抑制保护酶活性的实验结果一致(图 1~图 4)。当保护性酶活性显著降低时($p < 0.05$),不能有效清除苜蓿幼苗在化感胁迫下生成的自由基,使其内部 $O_2^{\cdot-}$ 的增加速率大于保护性酶清除 $O_2^{\cdot-}$ 的速率;同时,随着 $O_2^{\cdot-}$ 在体内的累积,植物受害逐渐加重,又会使各种保护性酶随之失活,从而出现一系列的连锁效应^[31~34]。

MDA 是生物膜系统脂质过氧化产物之一,其含量高低指示脂质过氧化强度和膜系统的伤害程度^[35],化感胁迫下, $O_2^{\cdot-}$ 含量的增加使幼苗受害严重,体内 MDA 含量也因此增加,而 SOD 等保护性酶的活性也因为 $O_2^{\cdot-}$ 含量的变化而改变。本实验中幼苗体内 MDA 含量的分析结果与各种保护性酶活性的分析结果相吻合。当各种保护性酶的活性较高时,MDA 含量就低,苜蓿幼苗受害程度轻,反之,MDA 含量就高,苜蓿幼苗伤害增强(图 1~图 5)。

3.3 不同酚酸类化感物质作用特点的差异

4 种化感活性物质虽然都表现出化感效应,但其作用强度有所不同。根据种子萌发、生物量以及保护性酶活性的综合结果显示,阿魏酸化感效应最强,香豆素、香草酸次之,香豆酸最弱。这与 Chon 等在苜蓿化感作用研究中所得出的香豆素的作用效应强于香豆酸的作用效应的结论相同^[10],且苜蓿幼苗根尖在 $10^{-3} \text{ mol L}^{-1}$ 的香豆素下,其维管束显著膨胀,作用效果明显强于苜蓿浸提液对自身幼苗的作用,但由于与本文所选实验参数有差别,一个侧重于组织形态,本文侧重于抗氧化酶活性等生理特征,因此,两者实验结论的比较仅能在一定程度上说明问题。但 Yu 等在黄瓜的自毒试验中却发现阿魏酸等单一化感物质在 $10^{-4} \text{ mol L}^{-1}$ 时不仅未表现出对黄瓜幼苗的毒害作用,而且在一定程度上还促进了黄瓜幼苗体内各种保护性酶(SOD、POD)的活性,其中阿魏酸对各酶活性促进较大,而香豆酸对细胞膜的破坏较显著^[36],这与本文所得的阿魏酸化感效应最强,香豆酸化感效应最弱的结论不同,这有可能是因为在实验中虽然选用的实验参数相同但是由于受试物种及处理浓度不同,不同物种体内的这些指标对单一化感物质的反应不同所造成。因此可以看出,评价不同化感物质的作用潜力大小通常与选用指标的敏感性以及受试物种相关,不同的指标或受试物种有可能会得出不同的结论,故为了正确认识不同化感物质的作用潜力以及它们的作用方式,还需要更进一步地研究。

而对于不同化感物质之间的作用强度的差异可能是不同的化感物质针对生物膜上的靶位点不同造成的^[37],化感物质通过受体将不同化感胁迫信息传送到植物体内,从而引起植物形态、离子吸收、激素平衡、细胞分裂、保护酶活性等生理过程的变化^[13,38],其作用方式的差异可能是造成 4 种化感物质表现出不同化感效应强度的原因。

3.4 生物检测评价指标的筛选分析

3.4.1 单项敏感性指标的筛选评价 结合单因素方差分析和 LSD 多重比较的结果,根据受试植物各生物检测指标对酚酸类物质种类及其浓度的敏感性来筛选敏感指标(表 1~表 2、图 1~图 5)。分析结果表明:

(1) 在所用到的几种化感物质中,受试植物的生物量和种子发芽指标的敏感性都是一致的,并未因化感物质的种类的不同,其敏感性排序随其发生变化。

(2) 对酶活性而言,各种酶活性指标的敏感性排序因化感物质种类的不同而有所差异,这有可能是因不同化感物质对不同保护性酶的作用方式的不同,作用于受体作物后产生不同的胁迫信息,从而导致了不同酶活

性在不同化感物质作用下所表现出的差异^[13,38],但总的来说 SOD、POD 是受试植物在 4 种化感物质分别作用下,较为敏感的生理指标。

3.4.2 综合敏感性指标的筛选评价 上述单项敏感指标的筛选分析了每类指标中的敏感指标,通过采用相关分析方法,对上述指标进行典型相关分析,根据其敏感程度来综合排列各类因子(表 1~表 2、图 1~图 5)。

除了 SOD 和 APX 不显著相关外,其余的各指标都两两显著相关。在偏相关分析中,如果控制化感物质种类,那么,总生物量、地下生物量、地上生物量、发芽指数、SOD 等指标受化感物质的浓度的影响较为敏感;如果控制化感物质浓度,那么,CAT、SOD、POD、地上生物量等指标受化感物质种类的影响显著敏感。所以,在植物化感效应生物检测研究中,应根据研究条件和目的来确定检测指标。就本文的研究结果而言,发芽指标的检测是一种快速、高效、方便、低价的检测指标,生物量检测也较为简单、方便、有效。只有深层次的系统研究才需要配合一些生理指标如 SOD 等的检测,以希望获得更好的效果,阐释其作用机理。

3.5 结语

(1) 产生自毒性化合物的特性是苜蓿的遗传特性,不同品种间差别较大,开展相关品种选育工作,可以避免因连作而产生的自毒现象。通过对化感作用机制、遗传规律的研究,使用遗传控制、基因转移等技术,将化感特征转移到需要的植物上,使该植物获得抗虫、抗病、抗害的能力,这将是有关化感作用的更深层次的研究。同时,由于某些地区长时间种植单一品种的苜蓿,需要引进优良品种进行更新换代,如何在较短时间内成功建植,或者与其他单一种植的作物进行轮作、套作,以避免连作障碍的产生将具有现实的意义。

(2) 本文通过室内模拟实验,研究了阿魏酸等 4 种化感物质对苜蓿种子萌发、幼苗生长以及抗氧化酶活性的影响,这与野外实际情况还有较大的差异,因为在自然条件下,化感物质在土壤上要转移、转化和被微生物降解,可能会改变化感强度^[39~41]。因此,设计合理的野外实验对于进一步正确理解苜蓿的自毒机制将具有更重要的意义。

(3) 本文就选择生物检测指标从敏感性角度进行了一些讨论,并筛选出了一些敏感指标,这些指标为植物化感研究中生物检测的指标选择提供了参考,但这些指标的敏感性在其它不同受试植物以及不同化感物质种类的实验和研究中是否具有同样的规律有待进一步研究。

References:

- [1] Philippe S, Craig C S, Michael A S, *et al.* Alfalfa Autotoxicity: Effects of Reseeding Delay, Original Stand Age, and Cultivar. *Agron. J.*, 2002, 94: 775 ~ 781.
- [2] Li Z H, Shen Y X, Ni J, *et al.* A preliminary study on the allelopathy of legumes. *Pratacultural Sci.*, 2002, 19(8): 28 ~ 31.
- [3] Miller R W. Germination and growth inhibitors of alfalfa. *J. Nat. Prod.*, 1988, 51: 328 ~ 330.
- [4] Chung I M, Miller D A. Differences in autotoxicity among seven alfalfa cultivars. *Agron J.* 1995, 87: 596 ~ 600.
- [5] Chon S U, Jang H G, Kim D K. Allelopathic potential in lettuce (*Lactuca sativa* L.) plants. *Sci. Horticul.*, 2005, 106: 309 ~ 317.
- [6] Hall M H, Henderlong P R. Alfalfa autotoxic fraction characterization and initial separation. *Crop Sci.*, 1989, 29: 425 ~ 428.
- [7] Dornbos D L. Medicago delays alfalfa seed germination and seedling growth. *Crop Sci.*, 1990, 30: 162 ~ 166.
- [8] Read J J, Jensen E H. Phytotoxicity of water-soluble substances from alfalfa and barley soil extracts on four crop species. *J. Chem. Ecol.*, 1989, 15: 619 ~ 628.
- [9] Liu J P, Zhang X Q, Luo P, *et al.* The Effect of Lixivium of Limnograss on Germination and Growth of Legumina Forages. *Seed*, 2005, 24(7): 5 ~ 8.
- [10] Chon S U, Choib S K, Jung S. Effects of alfalfa leaf extracts and phenolic allelochemicals on early seedling growth and root morphology of alfalfa and barnyard grass. *Crop prot.*, 2002, 21: 1077 ~ 1082.
- [11] Miller R W. Germination and growth inhibitors of alfalfa. *J. Nat. Prod.*, 1988, 51: 328 ~ 330.
- [12] Abdul R A, Habib S A. Allelopathic effect of alfalfa (*Medicago sativa* L.) on bladygrass (*Imperatacylindrica*). *J. Chem. Ecol.*, 1989, 15: 2289 ~ 2300.
- [13] Li S T, Zhou J M, Wang H Y, *et al.* Allelopathic Mechanism of Plants. *Rural Eco-Environment*, 2001, 17(4): 52 ~ 55.
- [14] Chon S U, Kim J D. Biological activity and quantification of suspected allelochemicals from alfalfa plant parts. *Agron J. and Crop Sci.*, 2002, 188: 281 ~ 285.

- [15] Wang J C, Pan K W, Wu N, *et al.* Preliminary study on varietal differences in allelopathic potential of Chinese prickly ash (*Zanthoxylum piperitum*). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(7): 1591 ~ 1598.
- [16] Wang D L, Zhu X R. Allelopathy research of *Ambrosia trifida*. *Acta Phytocologica Sinica*, 1996, 20(4): 330 ~ 337.
- [17] Li Z H, Shen Y X. Studies on Allelopathic Effects of the Aqueous Extracts of Roots of Different Varieties of *Medicago sativa* L. *Chin. Grassland*, 2005, 27(4): 39 ~ 46.
- [18] Gannopolitis N, Ries S K. Superoxide dismutase . Occurrence in higher plants. *Plant Physiol.*, 1977, 59: 309 ~ 314.
- [19] Nakano Y, Asada K. Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate specific peroxidase in spinach chloroplasts. *Plant Cell Physiol.*, 1981, 22: 679 ~ 690.
- [20] Cakmak I, Marschner H. Magnesium deficiency and high light intensity enhance activities of superoxide dismutase ascorbate peroxidase, and glutathione reductase in bean leaves. *Plant Physiol*, 1992, 98: 1222 ~ 1227.
- [21] Gong P B. Experiment techniques. In: Li H S ed. Principles and techniques of plant physiological biochemical experiment. Beijing: Higher Education Press, 2000. 164 ~ 165.
- [22] Gossett D R, Millhollon E P. Lucas Antioxidant response to NaCl stress in salt-tolerant and salt-sensitive cultivars of cotton. *Crop Sci.*, C. 1994, 34: 706 ~ 714.
- [23] Wang S L, Chen L C, Liao L P, *et al.* Effects of three kinds of allelochemicals on growth of Chinese fir seedlings. *Chin. J. Appl. Environ. Biol.* 2002, 8(6): 588 ~ 59.
- [24] Mao M H, Yu F L, Kong L S. Allelopathy effects of *Artemisia ordosica*. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(5): 670 ~ 676.
- [25] He Z Y. Absorb, germination and growth. In: He Z Y ed. Physiology and Biochemistry of seeds in relation to germination. Jiangsu: Jiangsu Scientific and Technological Press, 1979. 92 ~ 93.
- [26] Chung I M, Miller D A. Effect of alfalfa plant and soil extracts on germination and seedling growth. *Agron. J.*, 1995, 87: 762 ~ 767.
- [27] Turk M A, Tawaha AM. Allelopathic effect of black mustard (*Brassicajuncea* L.) on germination and growth of wild oat (*Avena fatua* L.). *Crop Prot.*, 2003, 22: 673 ~ 677.
- [28] Djurdjevic L, Dinic A, Pavlovic P, *et al.* Allelopathic potential of *Allium ursinum* L. *Biochem. Syst. and Ecol.*, 2004, 32: 533 ~ 544.
- [29] Roshchina V V, Roshchina V D. eds. The Excretory Function of Higher Plant. New York: Springerling, 1993. 213 ~ 215.
- [30] Scandalios L G. Oxygen stress and superoxide dismutase. *Plant Physiol*, 1993, 101: 7 ~ 12.
- [31] Politycka B. Peroxidase activity and lipid peroxidation in roots of cucumber seedlings influenced by derivatives of cinnamic and benzoic acids. *Acta Physiol. Plant*, 1996, 18: 365 ~ 370.
- [32] Shalata A, Tal M. The effects of salt stress on lipid peroxidation and antioxidants in the leaf of the cultivated tomato and its wild salt-tolerant relative *Lycopersicon pennellii*. *Physiol. Plant*, 1998, 104: 169 ~ 174.
- [33] Deltoro V I, Gimeno C, Calatayud A, *et al.* Effects of SO₂ fumigations on photosynthetic CO₂ gas exchange, chlorophyll a fluorescence emission and antioxidant enzymes in lichens *Evernia prunastri* and *Ramalina farinacea*. *Physiol. Plant*, 1999, 105: 648 ~ 654.
- [34] Su F Y, Yan H Z, Yao S, *et al.* Cinnamic acid causes oxidative stress in cucumber roots, and promotes incidence of *Fusarium* wilt. *Environ. and Exp. Bot.*, 2005, online.
- [35] Smirnoff N ed. Antioxidant systems and plant response to the environment. Oxford: Bios Scientific Press, 1995. 217 ~ 243.
- [36] Yu J Q, Matsui Y. Effects of root exudates of cucumber (*Cucumis sativus*) and allelochemicals on uptake by cucumber seedlings. *J. Chem. Ecol.*, 1997, 23: 817 ~ 827.
- [37] Chen P K, Leather G R. Plant growth regulatory activities of artemisinin and its related compounds. *J. Chem. Ecol.*, 1990, 16(6): 1867 ~ 1876.
- [38] Kong C H, Xu T, Hu F, *et al.* Allelopathy under environmental stress and its induced mechanism. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(5): 849 ~ 854.
- [39] Han Q H, Ma Y Q. A brief introduction to the researches on allelochemicals in wheat straw. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 1994, 2(4): 71 ~ 76.
- [40] Kong C H, Xu X H, Chen J J, *et al.* Allelopathy of *Ageratum conyzoides* . Transformation of main allelochemical in the soil. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(8): 1189 ~ 1195.
- [41] Wang J C, Pan K W, Li F H. The status and prospects of allelopathy in molecular level and soil ecosystem. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, 23(6): 125 ~ 130.

参考文献:

- [2] 李志华, 沈益新, 倪建华, 等. 豆科牧草化感作用初探. *草业科学*, 2002, 19(8): 28 ~ 31.
- [9] 刘金平, 张新全, 罗波, 等. 扁穗牛鞭草浸出液对豆科牧草种子萌发及幼苗生长的影响. *种子*, 2005, 24(7): 5 ~ 8.

- [13] 李寿田,周建民,王火焰,等.植物化感作用机理的研究进展.农村生态环境,2001,17(4):52~55.
- [15] 王进闯,潘开文,吴宁.花椒品种间化感效应差异的研究.生态学报,2005,25(7):1591~1598.
- [16] 王大力,祝心如.三裂叶豚草的化感作用研究.植物生态学报,1996,20(4):330~337.
- [17] 李志华,沈益新.不同品种紫花苜蓿根水浸液化感作用效应的研究.中国草地,2005,27(4):39~46.
- [21] 巩普遍.实验技术.见:李合生主编.植物生理生化实验原理和技术.北京:高等教育出版社,2000.164~165.
- [23] 汪思龙,陈龙池,廖利平,等.几种化感物质对杉木幼苗生长的影响.应用与环境生物学报,2002,8(6):588~59.
- [24] 马茂华,于凤兰,孔令韶.油蒿(*Artemisia ordosica*)的化感作用研究.生态学报,1999,19(5):670~676.
- [25] 何泽瑛.吸胀、萌发和生长.见:何泽瑛主编.种子萌发的生理生化.江苏:江苏科学技术出版社,1979.92~93.
- [38] 孔垂华,徐涛.环境胁迫下植物的化感作用及其诱导机制.生态学报,2000,20(5):849~854.
- [39] 韩庆华,马永清.小麦秸秆中生化他感化合物的研究概况.中国生态农业学报,1994,2(4):71~76.
- [40] 孔垂华,徐效华,陈建军,等.胜红蓟化感作用研究.主要化感物质在土壤中的转化.生态学杂志,2002,22(8):1189~1195.
- [41] 王进闯,潘开文,李富华.分子水平和土壤系统化感作用研究现状与展望.生态学报,2004,23(5):125~130.

《中国学术期刊文摘》中文版和英文版 2007 年征订启事

《中国学术期刊文摘》分中文版(简称 CSAC)和英文版(简称 CSAE)两种,各自收录了我国高水平学术期刊中基础科学、医学、农业科学和工程技术领域约 40 个学科的论文文摘,全景展现我国的科研成果与进展。

作为综合性科技类检索刊物,《中国学术期刊文摘》致力于将我国科学技术各领域的原创性学术成果全面、快速地向科技工作者交流、传播,其中 CSAE 是我国第一份综合性英文版科技类学术检索刊物。

《中国学术期刊文摘》由中国科学技术协会主管,科技导报社主办并负责编辑、出版、发行,对科研单位、高等院校、图书馆以及广大科技工作者检索和了解我国的科技研究成果、学术研究动向具有重要的参考价值。

《中国学术期刊文摘(中文版)》刊号为 CN 11-3501/N,ISSN 1005-8923,2007 年为半月刊,大 16 开,国内定价 38.00 元/册,全年定价 912 元,邮发代号:82-707。

《中国学术期刊文摘(英文版)》刊号为 CN 11-5411/N,ISSN 1673-4084,2007 年改为月刊,大 16 开,国内定价 15.00 元/册,全年定价 180 元,邮发代号:80-487。

欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆订阅。

通讯地址:北京市海淀区学院南路 86 号科技导报社(邮编 100081)

联系电话:010-62103122

联系人:姚玉琴

征订信箱:wzbjb@cast.org.cn

单位主页:http://www.csac.org.cn

户 名:科技导报社

账 号:0200001409089017271

开户银行:工商银行百万庄支行