

阿魏酸和凹凸土对党参种子萌发、生长及幼苗叶绿素荧光参数的影响

冉瑞兰¹, 赛闹汪青¹, 孙 坤¹, 冯汉青^{1*}, 史小明², 胡芳弟³

(1 西北师范大学 生命科学学院, 兰州 730070; 2 兰州大学 生命科学学院, 兰州 730000; 3 兰州大学 药学院, 兰州 730000)

摘 要: 该研究以党参种子为实验材料, 通过设置不同浓度(0、0.01、0.05、0.2、0.5、1.0、2.0、3.0、5.0和10.0 mmol·L⁻¹)的阿魏酸以及具有不同凹凸棒粘土(凹土)/蛭石体积比(0/1、1/120、1/80、1/50和1/20)基质的室内培育试验, 分析基质中阿魏酸对党参种子萌发、生长及幼苗叶绿素荧光参数的影响, 以及基质中凹土含量对上述阿魏酸影响的缓解效应。结果表明, 当阿魏酸浓度高于1.0 mmol·L⁻¹时, 党参种子活力受到抑制, 种子萌发过程延缓。在播种前基质中施加不同浓度的阿魏酸, 党参幼苗生物量积累和叶片光化学反应水平在低浓度下得到促进, 在高浓度下受到抑制; 在幼苗生长过程中短期内施加不同浓度的阿魏酸, 党参幼苗叶片光化学反应水平会显著降低。在含有较高浓度阿魏酸的基质中添加不同体积比凹土, 能够有效缓解上述党参种子萌发和幼苗生长过程中所遭受的阿魏酸伤害, 且凹土在基质中的体积比为1/50时的缓解作用最为明显。可见, 环境中高浓度阿魏酸会显著抑制党参种子萌发、生长及幼苗叶片光化学反应水平, 添加适量凹土可有效缓解阿魏酸在不同生长阶段对党参所造成的胁迫伤害。

关键词: 党参; 阿魏酸; 凹凸棒粘土; 种子萌发; 生物量; 叶绿素荧光

中图分类号: Q945.79

文献标志码: A

Effect of Ferulic Acid and Attapulgite on Seed Germination, Growth and Seedling Chlorophyll Fluorescence of *Codonopsis pilosula*

RAN Ruilan¹, SAINAO Wangqing¹, SUN Kun¹, FENG Hanqing^{1*}, SHI Xiaoming², HU Fangdi³

(1 College of Life Sciences, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China; 2 College of Life Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 3 College of Pharmacy, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: By using the seeds of *Codonopsis pilosula* as the experimental material and by cultivating *C. pilosula* with different concentrations (0, 0.01, 0.05, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 5.0 and 10.0 mmol·L⁻¹) of ferulic acid (FA) and the growth medium with different volume ratios of attapulgite clay (attapulgite)/vermiculite (0/1, 1/120, 1/80, 1/50 and 1/20) under indoor condition, we analyzed the effects of FA in the growth medium on the seed germination, growth, and chlorophyll fluorescence of *C. pilosula*, and studied whether the negative effects of FA on *C. pilosula* could be alleviated by different concentrations of attapulgite presented in the growth medium. The results showed that when the concentration of FA was higher than 1.0 mmol·L⁻¹, the activity of *C. pilosula* seeds were inhibited and the germination of seeds was delayed. If FA was applied to the growth medium before cultivation, the biomass accumulation and

收稿日期: 2019-07-30; 修改稿收到日期: 2019-11-28

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC1706301); 甘肃省重点研发计划(18YF1NA051和17YF1NA064); 甘肃省高校基本科研业务费项目

作者简介: 冉瑞兰(1994-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为植物生理生态。E-mail: 1656480914@qq.com

* 通信作者: 冯汉青, 教授, 博士生导师, 主要从事植物生理学研究。E-mail: fenghanq@nwnu.edu.cn

photochemistry reaction of the *C. pilosula* seedlings were increased by lower concentrations of FA but were decreased by higher concentrations of FA. During the growth period of the seedlings, short-term treatment with different concentrations of FA also significantly decreased the photochemistry reaction of the seedlings. The attapulgitite presented with different volume ratios in the growth medium can effectively alleviate the negative effects of higher concentration of FA on *C. pilosula* during the germination and growth. And, the volume ratio of attapulgitite/medium at 1/50 seemed to be the most optimized content in alleviating these negative effects. These results indicate that high concentration of FA in environment can significantly inhibit the seed germination, growth, and photochemical reaction of *C. pilosula* seedling, while the addition of attapulgitite into the medium with appropriate ratio can alleviate the damage of FA that would emerge at different stages during *C. pilosula* growth.

Key words: *Codonopsis pilosula*; ferulic acid; attapulgitite; seed germination; biomass; chlorophyll fluorescence

药用植物党参[*Codonopsis pilosula* (Franch.) Nannf.]广泛种植于中国甘肃、陕西、山西等地,其干燥根为中国传统的补益药物,素有小人参之称。《本草纲目拾遗》引《翁有良辩误》云:“党参功用,可代人参”^[1]。党参等药用植物多为多年生,在同一地区多年生长不可避免地会引起其分泌的代谢物质在土壤中不断积累^[2];而在党参等药用植物的人工种植过程中,由于可利用土地资源不足,连茬种植时有发生,使得基质中的代谢物量不断增加。

3-甲氧基-4-羟基肉桂酸(阿魏酸, ferulic acid, FA)为桂皮酸的衍生物之一,是一种普遍存在于植物种子和叶片中的天然酚酸类化合物,是党参等药用植物中的重要活性物质之一,也是植物通过根系向环境释放的主要代谢物之一^[3]。有研究发现,阿魏酸等酚酸类物质能够影响种子的吸胀吸水,进而影响种子内部物质代谢及各种代谢关键酶的活性,从而导致萌发率降低、萌发时间延长;也有研究发现,阿魏酸等酚酸类物质在土壤中的积累会降低土壤中有效 N、K 等营养物质的含量,导致植物对养分吸收不平衡,从而使得植物生长受到抑制;此外,另有研究发现,阿魏酸可显著降低植物的光合作用水平、干物质积累和叶绿素合成^[4-7]。因此,党参等药用植物在多年生长或是连茬种植过程中,如何减少阿魏酸等代谢物积累对于植物的不利影响,可能是进一步提高党参等药用植物产量和品质的重要途径。然而,这方面的研究在国内外鲜有报道。

凹凸棒粘土(简称凹凸)因其特殊的微孔和微通道结构,具有大的比表面积,且凹凸的表面带有少量的永久性负电荷,使其具有很强的物理和化学吸附力。已有工作报道可利用合适比例的凹凸吸附土壤中酚酸酯等有机物^[8]。且已有研究者将凹凸用于沉淀药品中的无效成分,发现凹凸对药品中的阿魏酸具有良好的吸附效果^[9]。这些工作提示凹凸很有可

能通过吸附基质中的阿魏酸而减少阿魏酸对植物的不利影响。而且,较之活性炭的复杂生成过程和相对较高的价格,凹凸为环境中的天然组分,易获得,成本低,因此可作为一种有效的土壤添加物应用于实际生产。

基于以上原因,本研究以党参为实验材料,探究了阿魏酸对党参种子萌发、幼苗生长、叶绿素荧光参数等指标的影响,以及在培育基质中添加凹凸对阿魏酸所造成的不良影响的缓解作用。

1 材料和方法

1.1 材料培养

试验所用党参种子由甘肃中医药大学和政药用植物园提供,凹凸购自甘肃临泽锦诚凹凸棒矿区。试验所用党参幼苗为实验室条件下培育,培养温度为 23~25 ℃,相对湿度为 45%~47%,培养的基本培育基质为蛭石。实验中将基本基质培育或培养皿中培育且无阿魏酸处理组设定为 CK₁,而将基本基质培育,但仅受阿魏酸胁迫组设定为 CK₂。

1.2 试验设计

1.2.1 FA 处理种子 取低温春化的党参种子,蒸馏水冲洗后在 45 ℃下水浴 5 min。选取颗粒饱满的党参种子置于纱布上,并将纱布放置于培养皿中,分别用 0(CK₁)、0.01、0.05、0.2、0.5、1.0 和 2.0 mmol·L⁻¹ FA 溶液浸透纱布,每组 4 皿,每皿 100 颗种子。待种子开始萌芽后,每天于同一时间测定种子活力相关的发芽峰值、发芽指数、发芽系数、平均发芽天数和发芽值等指标。

1.2.2 FA 处理正常萌芽种子 播种时在基本培育基质中分别施加 0(CK₁)、0.05、0.5、1.0 和 5.0 mmol·L⁻¹ FA 溶液至基本培育基质完全浸透,将正常萌芽的党参种子点播于培育基质中,定期施加营养液以提供营养,播种 50 d 后每组选取 4~6 株长势基本一致的幼苗(下同),测定叶绿素荧光、生物

量和叶绿素含量等参数。

1.2.3 FA和凹土处理正常萌芽种子 用相同规格容器量取蛭石(密度为 $0.13\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)与凹土(密度为 $0.92\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$),分别以 $0/1(\text{CK}_2)$ 、 $1/120$ 、 $1/80$ 、 $1/50$ 和 $1/20$ (凹土/蛭石的体积比)比例进行混合。用 $5\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ FA溶液完全浸透基质后,将正常萌芽的党参种子点播于上述不同的基质中,以蒸馏水浸透基本基质培养幼苗为对照(CK_1),播种50 d后测定党参幼苗光叶绿素荧光参数、生物量和叶绿素含量的变化。

1.2.4 FA处理50 d龄幼苗 在基本培育基质中培育党参幼苗,待幼苗生长至50 d时,取60 mL浓度分别为 $0(\text{CK}_1)$ 、 0.05 、 0.5 、 1.0 、 3.0 、 5.0 和 $10.0\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ FA溶液浇灌基本培育基质,在浇灌后的第2、5、8天分别测定幼苗叶片叶绿素荧光参数的变化。

1.2.5 FA和凹土处理50 d龄幼苗 在凹土/蛭石的体积比分别为 $0/1(\text{CK}_2)$ 、 $1/120$ 、 $1/80$ 、 $1/50$ 和 $1/20$ 的育苗基质中培育党参幼苗,于苗龄50 d时用 $1\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ FA 60 mL浇灌基质,以等量蒸馏水浇灌的基本培养基质培养幼苗为对照(CK_1),5 d后测定幼苗叶片光系统II叶绿素荧光参数的变化。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 种子活力指标 种子活力指标发芽峰值、发芽指数、发芽系数、平均发芽天数和发芽值的测定参照颜启传等^[10]的方法进行。

(1)发芽峰值(peak value, PV)表示种子发芽高峰日累计全部发芽种子数与所需发芽天数之比值。 $PV = G_{\text{pt}}/D_{\text{pt}}$ 。G_{pt}指达到高峰日时的累计发芽种子数;D_{pt}指达到高峰值的发芽天数。

(2)种子发芽指数(germination index, GI)是指相应发芽天数所发芽种子数总和商值。 $GI = \sum(G_t/D_t)$ 。G_t是指在不同发芽日(*t*天)的发芽种子数,D_t是指相应发芽天数。

(3)发芽系数(coefficient of germination, CG),种子发芽系数高,表明种子发芽快且整齐,活力强。 $CG = 100 \times (A_1 + A_2 + \dots + A_n) / (A_1 t_1 + A_2 t_2 + \dots + A_n t_n)$ 。A为逐日发芽种子数,*t*为与A相应的天数。

(4)平均发芽天数(mean length of incubation time, MLIT)是指每粒种子发芽所需的天数。 $MLIT = (G_1 t_1 + G_2 t_2 + \dots + G_n t_n) / (G_1 + G_2 + \dots + G_n)$ 。G₁、G₂…G_n为逐日发芽种子数,*t*₁、*t*₂…*t*_n为相应发芽天数。

(5)发芽值(germination value, GV)是发芽峰值

与日平均发芽率(MDG)的乘积。 $GV = PV \times MDG$ 。

1.3.2 叶绿素荧光参数 采用脉冲调制式叶绿素荧光仪(PAM-2500, Waltz, 德国)测定^[11],所测材料在作用光下的实时荧光(*F_s*)达到稳态20 s后打开饱和脉冲光,测得最大荧光(*F_m'*),再打开远红外光,测得最小荧光(*F_o'*),根据公式计算如下参数:

光适应下最大光化学效率 $F_v'/F_m' = (F_m' - F_o')/F_m'$;

光适应下实际光化学效率 $Y(II) = (F_m' - F_s)/F_m'$;

光化学猝灭系数 $qP = (F_m' - F_s)/(F_m' - F_o')$ 或 $qL = (F_m' - F)/F_m' \times F_o'/F_s$;

光合电子传递速率 $ETR = [(F_m' - F_s)/F_m'] \times PAR \times 0.5 \times 0.84$,

非光化学猝灭系数 $NPQ = F_m/F_m' - 1$ 或 $qN = 1 - (F_m' - F_o')/(F_m - F_o) = 1 - F_v'/F_v$ 。

1.3.3 叶绿素含量 用丙酮浸提的方法进行测定^[12]。称取0.02 g叶片切碎,加入4 mL 80%丙酮提取液,避光浸提,待叶片变白后,取浸提液测定645和663 nm下光吸收值 A_{645} 和 A_{663} ,根据公式计算叶绿素总含量: $C_{\text{总}} = 20.29A_{645} + 8.05A_{663}$

1.3.4 生物量 生物量的测定采用破坏性收获法,用蒸馏水洗净收获植株上的杂质,将样品分为地上、地下两个部分,擦干样品表面水分,快速用电子天平测定地上、地下部分鲜重,用直尺测定地上部分高度及地下部分的长度。再将地上部分单株置于小信封中,在105℃烘箱杀青20 min,调节烘箱温度为80℃,烘干至恒重,称其干重。

1.4 数据处理

试验数据采用采用Excel 2007、Origin 9、SPSS统计与分析软件完成试验原始数据处理:计算平均值、标准差(*n*-1)、显著性差异检验(差异显著, $P < 0.05$),并完成图表绘制工作。

2 结果与分析

2.1 阿魏酸浸种对党参种子萌发的影响

种子活力是种子内在生命力强弱的属性,受到自身遗传、生长与贮藏环境以及贮藏年限的影响^[10]。种子活力大小常通过种子萌发率、萌发速度和萌发整齐度等进行衡量,本研究主要包括发芽峰值(PV)、发芽指数(GI)、发芽系数(CG)、平均发芽天数(MLIT)和发芽值(GV)。如表1所示,与对照 CK_1 相比,党参种子的PV、GI、CG、GV和MLIT等各萌发指标在 0.01 、 0.05 、 0.2 、 $0.5\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ FA处理下均未

发生显著的变化($P>0.05$);而 $1.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 FA 浸种处理使得党参种子 PV 和 GV 均较对照显著性降低($P<0.05$),但仍未对其 GI、CG、MLIT 产生显著性影响;当 FA 浓度达到 $2.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,党参种子的 PV、GI、CG 和 GV 均比对照显著性降低,而其 MLIT 则比对照显著性升高。上述结果表明,较高浓度($>1.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$)阿魏酸(FA)浸种对党参种子的萌发具有显著抑制作用。

2.2 育苗前阿魏酸和凹凸处理对党参幼苗生长的影响

在植物多年生长或是连茬种植过程中,阿魏酸通常在植物生长前便已存在。因此,本实验首先研究了在不同浓度阿魏酸浸透基质中,党参幼苗生长情况。其地上鲜重、地下鲜重、地上干重、地上高度、地下长度随着阿魏酸浓度增加均呈先升后降的变化趋势,并均在 $0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度下达到最大值,且与 CK_1 和其他处理存在显著差异($P < 0.05$);与 CK_1 相比,以上各生长指标均在 0.05 和 $0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度下不同程度增加,均在 1.0 和 $2.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度下不同程度地降低。各浓度处理幼苗地上

含水量则除 $0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度外均显著低于 CK_1 (表 2)。 $0.05 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ FA 显著促进党参幼苗地上部分干鲜重和地下部分长度,显著降低了地上部分含水量,但对地上部分高度和地下部分鲜重未产生显著影响; $0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ FA 处理对地上部分干鲜重及高度、地下部分鲜重及长度均有显著促进作用,但对地上部分含水无显著影响; 1.0 或 $5.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ FA 处理对地上部分干鲜重以及高度、地上部分含水量均显著性降低,而对地下部分鲜重及长度无显著性影响。可见, $0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ FA 对党参萌芽种子生长的促进效果最佳,而 $5.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ FA 处理的抑制作用最明显。

同时,在培养基质蛭石中添加不同比例凹凸,用 $5.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ FA 溶液完全浸透混合基质后,将正常萌芽的党参种子点播于上述不同的基质中,探究凹凸对受阿魏酸胁迫党参幼苗生物量积累的缓解效应。结果(表 3)显示,在基质中施加 $5.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ FA 的条件下,党参幼苗生物量(地上鲜重、地下鲜重、地上干重、地上高度、地下长度)随着混合基质中凹凸比例的增加均呈先上升后降低的变化趋势,并

表 1 不同浓度阿魏酸处理下党参种子萌发情况

Table 1 The seed germination of *Codonopsis pilosula* treated with different concentrations of ferulic acid

FA 浓度 FA concentration /($\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$)	发芽峰值 Peak value	发芽指数 Germination index	发芽系数 Coefficient of germination	发芽值 Germination value	平均发芽天数 Mean length of incubation time/d
0(CK_1)	20.08+0.91ab	28.97+1.24ab	29.27+0.65ab	1.85+0.14a	3.41+0.08b
0.01	21.23+0.83a	30.73+0.74a	30.15+0.23a	2.00+0.08a	3.36+0.04b
0.05	19.87+0.89ab	30.44+0.77a	29.93+0.31a	1.87+0.14a	3.38+0.04b
0.2	20.08+0.59ab	30.88+0.91a	30.63+0.22a	1.89+0.06a	3.26+0.02b
0.5	17.45+1.29bc	28.52+1.00ab	28.25+1.29ab	1.74+0.06a	3.54+0.17b
1.0	16.19+1.95c	26.96+0.70b	27.05+1.25b	1.47+0.16b	3.7+0.17b
2.0	5.22+1.97d	18.99+1.81c	19.67+2.01c	0.24+0.15c	5.14+0.55a

注:数值为 3 次或 3 次以上独立试验的平均值±标准差,同列不同字母表示处理间在 0.05 水平有显著性差异;下同

Note: Values are given as mean ± SD from three times or more independent experiments. The different normal letters within same column indicate a significant difference among treatment groups at 0.05 level; The same as below

表 2 不同浓度阿魏酸预处理下党参幼苗生物量积累的变化

Table 2 The seedling biomass of *C. pilosula* adding with different concentrations of ferulic acid before sowing seeds

FA 浓度 FA concentration /($\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$)	地上鲜重 Above ground fresh weight/g	地上干重 Above ground dry weight/g	地上含水量 Above ground water content	地上高度 Above ground height/cm	地下鲜重 Under ground fresh weight/g	地下长度 Under ground length/cm
0(CK_1)	0.40+0.04c	0.05+0.00b	0.87+0.01a	9.05+0.30b	0.15+0.08b	14.95+2.27c
0.05	0.61+0.07b	0.10+0.01a	0.85+0.00b	10.00+0.10b	0.18+0.02b	18.25+1.03b
0.50	0.76+0.09a	0.10+0.02a	0.87+0.01ab	11.8+1.07a	0.30+0.08a	22.08+1.82a
1.0	0.22+0.05d	0.03+0.01c	0.86+0.00b	6.78+0.51c	0.15+0.03b	15.50+1.4bc
5.0	0.10+0.00e	0.02+0.00c	0.85+0.01b	5.43+0.49d	0.10+0.01b	13.25+0.16c

均在体积比 1/80、1/50 时达到较大值;所有凹土处理幼苗生物量均不同程度高于蛭石对照(CK₂),1/80、1/50 体积比处理增幅均达到显著水平,它们幼苗生物量接近甚至显著高于 CK₁。各凹土处理幼苗地上含水量也均显著高于 CK₂。可见,添加不同比例的凹土均能够不同程度降低阿魏酸对党参幼苗生长的抑制,并以凹土在基质中体积比为 1/80、1/50 时的缓解作用最为明显。

2.3 育苗前阿魏酸和凹土处理对党参幼苗叶绿素含量的影响

由图 1 可知,育苗前基质中有 FA 存在时,党参幼苗叶片叶绿素含量在 0.05 和 0.5 mmol·L⁻¹ FA 处理下均比对照 CK₁ 显著上升,在 1.0 mmol·L⁻¹ FA 处理下无显著变化,而在 5.0 mmol·L⁻¹ FA 处理下较 CK₁ 显著降低。同时,与蛭石对照(CK₂)相比较,添加不同比例的凹土均能显著增加党参幼苗叶绿素含量,并以 1/50 体积比处理效果最佳,其叶绿素含量甚至恢复至无阿魏酸胁迫对照(CK₁)的水平。可见,适宜浓度阿魏酸能显著促进党参幼苗叶绿素合成,但浓度过高反而会抑制合成;添加不同比

例的凹土均能够不同程度降低阿魏酸对党参幼苗叶绿素含量的抑制,并以凹土体积比为 1/50 时的缓解作用最为明显。

2.4 阿魏酸和凹土处理对党参幼苗叶绿素荧光参数的影响

2.4.1 阿魏酸和凹土处理萌芽种子

播种时在培育基质中施加不同浓度 FA 溶液对党参幼苗叶绿素荧光参数存在显著影响(表 4)。其中,在 0.05 mmol·L⁻¹ FA 处理下,党参幼苗叶片电子传递速率 *ETR* 较 CK₁ 显著上升,且非光化学猝灭系数 *NPQ* 显著下降,其他指标没有发生明显变化;在 0.5 mmol·L⁻¹ FA 处理下,叶片 *ETR*、*qP*、*qL* 均较 CK₁ 显著升高,*qN* 和 *NPQ* 则显著降低,即 0.5 mmol·L⁻¹ FA 处理使得幼苗叶片 PS II 光化学活性显著升高;但当 FA 浓度达到 1.0 mmol·L⁻¹ 后会引起 PS II 的光化学损伤,在 1.0、5.0 mmol·L⁻¹ FA 处理下,叶片 *Y(II)*、*ETR*、*qP*、*F_v'/F_m'* 和 *qL* 与 CK₁ 相比显著降低,*NPQ* 和 *qN* 显著性升高;在 5.0 mmol·L⁻¹ FA 处理下,叶片 *Y(II)*、*ETR*、*qP*、*qL* 较 1.0 mmol·L⁻¹ 有显著降低,*NPQ* 显著升高,随

表 3 播种前阿魏酸存在下不同生长基质对党参幼苗生物量的影响

Table 3 Effect of different cultivation media on biomass of *C. pilosula* seedlings under the stress of FA that presented before sowing seeds

蛭石与凹土体积比 Ratio of vermiculite to attapulgite(v/v)	地上鲜重 Above ground fresh weight/g	地上干重 Above ground dry weight/g	地上含水量 Above ground water content	地上高度 Above ground height/cm	地下鲜重 Under ground fresh weight/g	地下长度 Under ground length/cm
CK ₁	0.14±0.011ab	0.02±0.001ab	0.90±0.005a	6.77±0.368bc	0.14±0.013b	14.03±0.858b
0/1(CK ₂)	0.05±0.028c	0.01±0.004c	0.76±0.027c	3.73±0.665d	0.07±0.018c	11.00±0.864c
1/120	0.08±0.027bc	0.01±0.003bc	0.87±0.012b	5.33±0.579c	0.10±0.028c	11.43±0.903c
1/80	0.15±0.038a	0.02±0.003a	0.87±0.002b	9.77±1.271a	0.18±0.083c	16.17±0.556a
1/50	0.14±0.033ab	0.02±0.004a	0.87±0.008b	7.80±0.216b	0.13±0.016a	16.53±0.262a
1/20	0.10±0.002abc	0.01±0.001bc	0.89±0.012ab	5.33±0.094c	0.10±0.013b	14.43±0.464b

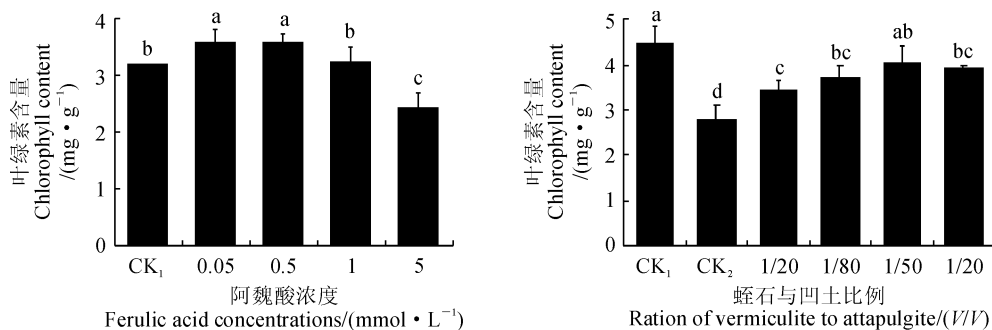


图 1 播种前不同浓度阿魏酸及其与凹土复合处理对党参幼苗叶绿素含量的影响

Fig. 1 Effects of adding ferulic acid and combination treatment with attapulgite before sowing seeds on chlorophyll content in leaves of *C. pilosula* seedling

FA 浓度升高,幼苗光化学损伤程度加深。可见,党参播种时基质中较低浓度的阿魏酸对幼苗叶片的光化学反应具有显著促进作用,并以 $0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 FA 处理促进效果最为明显,而高浓度 FA 则表现为显著抑制作用。

上述结果说明在党参播种时基质中较高浓度阿魏酸对幼苗光化学反应有显著抑制作用,因此本研究在 $5.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ FA 处理浓度下进一步探讨基质中添加不同比例凹凸土是否能够减轻阿魏酸的胁迫伤害程度。结果表明(表 5),播种时基质中存在 $5.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ FA (CK₂) 导致幼苗的光化学活性较未加 FA (CK₁) 时显著降低,分别以 1/120、1/80、1/50、1/20 的体积比例在基质中添加凹凸土,幼苗光化学活性的降低趋势有不同程度缓解。其中,以 1/20 加入凹凸土处理较其他比例加入缓解作用较弱,光化学活性虽较 CK₂ 显著升高,但仍显著低于 CK₁; 以 1/50 或 1/120 加入,叶片光化学活性指标与 CK₂ 相比均有显著缓解,除 *qP*、*qL* 外均升高至 CK₁ 对照水平;以 1/80 加入,叶片光化学活性指标除 F_v'/F_m' 外均有显著缓解,但 *ETR*、*qP*、*qL* 未恢复 CK₁ 水平。综合各个叶绿素荧光参数表现可知,凹凸土在基质中的比例为 1/50 或 1/120 时其对阿魏酸胁迫伤害的缓解作用最为明显。

2.4.2 凹凸土和阿魏酸处理 50 d 龄幼苗 上述研究表明,播种时基质中存在较高浓度的 FA 能够明显抑制党参的种子萌发、光化学反应活性以及生物量的积累。此外,在自然环境中,由于周围植物的分泌或是灌溉等因素,植物也可能在生长过程中遭受 FA 的胁迫。因此,本试验在党参幼苗苗龄为 50 d 时在基质施加了不同浓度的 FA,继而探索在党参生长过程中 FA 对幼苗的胁迫作用。如表 6 所示,在 0.05 、 0.5 、 1.0 、 3.0 、 5.0 、 $10.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ FA 处理 50 d 龄的党参幼苗 2、5、8 d 后,党参幼苗的叶绿素荧光参数 $Y(\text{II})$ 、 F_v'/F_m' 、*qP*、*ETR*、*qL* 随 FA 处理浓度的增大和处理时间的延长而降低,而 *qN*、*NPQ* 则随之升高。其中,在 FA 处理第 5 天时,与对照 CK₁ 相比,各浓度 FA 胁迫使得党参幼苗叶片 $Y(\text{II})$ 、 F_v'/F_m' 、*qP*、*ETR*、*qL* 依次降低为 25.22%~52.21%、14.79%~19.66%、5.64%~40.67%、27.30%~53.16%、6.84%~46.03%,却使 *qN* 和 *NPQ* 分别增加 168.66%~191.04% 和 48.82%~49.91%。说明随着 FA 处理液浓度升高,党参幼苗叶片叶绿体对光能的吸收和传递减弱,光合电子传递减缓,抑制了光合作用的原初反应,增加了通过非辐射性热耗散释放 PS II 吸收的过多能量,植物用于光合作用的光能减少,光合作用能力减弱。

表 4 播种前加不同浓度阿魏酸预处理对光参叶绿素荧光参数的影响

Table 4 Effects of adding different concentrations of ferulic acid on chlorophyll fluorescence before sowing seeds

FA 浓度 FA concentration ($\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$)	$Y(\text{II})$	<i>ETR</i>	<i>qP</i>	F_v'/F_m'	<i>qL</i>	<i>qN</i>	<i>NPQ</i>
CK ₁	0.42±0.02a	23.17±1.32c	0.66±0.03b	0.59±0.02a	0.46±0.05b	0.67±0.01b	0.31±0.01c
0.05	0.42±0.01a	25.73±0.73b	0.69±0.01ab	0.59±0.02a	0.48±0.01ab	0.64±0.04b	0.25±0.03d
0.50	0.45±0.01a	28.29±0.57a	0.73±0.01a	0.62±0.02a	0.52±0.02a	0.56±0.04c	0.19±0.02e
1.0	0.31±0.03b	19.6±1.77d	0.57±0.04c	0.54±0.03b	0.41±0.01c	0.72±0.02a	0.37±0.03b
5.0	0.25±0.02c	15.16±0.94e	0.46±0.01d	0.53±0.02b	0.29±0.02d	0.73±0.02a	0.41±0.04a

表 5 播种前阿魏酸预处理不同生长基质对幼苗叶绿素荧光参数的影响

Table 5 Effect of different growth media on chlorophyll fluorescence of seedlings under the stress of FA that presented before sowing seeds

蛭石与凹凸土体积比 Ratio of vermiculite to attapulgite(v/v)	$Y(\text{II})$	<i>ETR</i>	<i>qP</i>	F_v'/F_m'	<i>qL</i>	<i>NPQ</i>
CK ₁	0.44±0.01a	27.01±0.62a	0.76±0.01a	0.58±0.02a	0.59±0.01a	0.26±0.04bc
0/1(CK ₂)	0.26±0.02c	17.23±1.01c	0.54±0.02c	0.52±0.01b	0.36±0.01c	0.39±0.03a
1/120	0.41±0.04ab	25.11±2.41ab	0.71±0.03b	0.58±0.03a	0.51±0.02b	0.25±0.05bc
1/80	0.43±0.04ab	24.26±1.48b	0.71±0.01b	0.57±0.04ab	0.52±0.02b	0.25±0.07bc
1/50	0.44±0.01a	27.04±0.64a	0.73±0.01b	0.58±0.01a	0.52±0.01b	0.21±0.02c
1/20	0.40±0.03b	24.12±1.77b	0.70±0.03b	0.56±0.03ab	0.49±0.04b	0.30±0.04b

表 6 幼苗生长期不同浓度和时间 FA 处理对叶绿素荧光参数的影响
Table 6 Effect of different concentrations and time of FA treatment on chlorophyll fluorescence during growth of seedlings

处理时间 Treatments time/d	阿魏酸浓度 Ferulic acid concentration /(mmol·L ⁻¹)	叶绿素荧光参数 Chlorophyll fluorescence characteristics							
		Y(II)	F _v '/F _m '	qP	ETR	qL	NPQ	qN	
2	CK ₁	0.465±0.023a	0.596±0.010a	0.767±0.017a	28.421±1.359a	0.573±0.009a	0.222±0.016d	0.565±0.021c	
	0.05	0.340±0.043b	0.492±0.019b	0.608±0.011b	19.554±2.019b	0.469±0.011b	0.548±0.066c	0.814±0.027b	
	0.5	0.310±0.012bc	0.472±0.008bc	0.616±0.050b	18.901±0.733bc	0.483±0.005b	0.570±0.020bc	0.833±0.008bc	
	1.0	0.288±0.014c	0.462±0.007bc	0.595±0.017bc	17.281±1.075bcd	0.469±0.019b	0.575±0.021bc	0.844±0.008a	
	3.0	0.288±0.005c	0.474±0.011bc	0.595±0.045bc	17.090±0.983cd	0.458±0.036c	0.584±0.008bc	0.828±0.006bc	
	5.0	0.271±0.022c	0.468±0.010bc	0.575±0.034bc	16.396±1.233d	0.396±0.023c	0.627±0.052ab	0.850±0.009a	
	10.0	0.217±0.023d	0.447±0.047d	0.546±0.013c	13.359±1.366e	0.348±0.017d	0.666±0.014a	0.854±0.013a	
	5	CK ₁	0.452±0.007a	0.595±0.022a	0.745±0.012a	27.556±0.434a	0.541±0.030a	0.201±0.033b	0.553±0.039b
		0.05	0.338±0.026b	0.507±0.026b	0.703±0.016bc	20.032±1.832b	0.475±0.019ab	0.568±0.040a	0.827±0.025a
		0.5	0.325±0.018b	0.505±0.006b	0.678±0.004c	20.029±1.220b	0.504±0.004bc	0.540±0.017a	0.827±0.027a
1.0		0.308±0.029bc	0.478±0.020b	0.610±0.013d	18.016±0.782bc	0.457±0.012bc	0.553±0.033a	0.828±0.014a	
3.0		0.282±0.019c	0.489±0.009b	0.590±0.035d	17.191±1.168c	0.450±0.029c	0.585±0.046a	0.828±0.016a	
5.0		0.271±0.015c	0.493±0.005b	0.563±0.041d	17.387±1.323c	0.403±0.037d	0.580±0.018a	0.823±0.004a	
10.0		0.216±0.027d	0.486±0.012b	0.442±0.046e	12.907±1.278d	0.292±0.037e	0.584±0.024a	0.820±0.007a	
8		CK ₁	0.458±0.009a	0.575±0.003a	0.718±0.008a	25.193±0.174a	0.529±0.017a	0.289±0.020c	0.660±0.018d
		0.05	0.295±0.006b	0.515±0.026b	0.625±0.032b	18.947±1.619b	0.469±0.037b	0.465±0.074b	0.770±0.040c
		0.5	0.300±0.013b	0.513±0.024b	0.626±0.008b	18.588±0.880b	0.445±0.014bc	0.467±0.064b	0.782±0.027bc
	1.0	0.296±0.026b	0.475±0.004c	0.611±0.021b	17.808±0.837b	0.410±0.019cd	0.556±0.028a	0.798±0.028abc	
	3.0	0.290±0.020bc	0.495±0.008bc	0.596±0.005b	17.489±1.212b	0.426±0.008cd	0.518±0.031ab	0.804±0.011abc	
	5.0	0.266±0.015c	0.480±0.005c	0.483±0.050c	14.205±1.286c	0.390±0.032d	0.554±0.019a	0.822±0.009ab	
	10.0	0.182±0.012d	0.481±0.007c	0.379±0.023d	11.333±1.029d	0.239±0.014e	0.569±0.033a	0.825±0.008a	

表 7 生长过程中阿魏酸存在下不同基质对叶绿素荧光的影响
Table 7 Effect of different cultivation media on chlorophyll fluorescence of seedlings under the stress of FA that presented during growth

蛭石与凹土体积比 Ratio of vermiculite to attapulgite/(V/V)	Y(II)	ETR	qP	F _v '/F _m '	qL	qN	NPQ
CK ₂	0.22±0.01d	14.93±0.67d	0.42±0.02c	0.54±0.01c	0.22±0.02c	0.72±0.02a	0.38±0.03a
1/120	0.29±0.01c	17.80±0.79c	0.49±0.02b	0.57±0.02b	0.28±0.03b	0.70±0.04ab	0.34±0.05a
1/80	0.30±0.04c	16.37±1.91cd	0.49±0.05b	0.55±0.02bc	0.28±0.04b	0.71±0.03a	0.35±0.03a
1/50	0.40±0.00a	23.24±1.80ab	0.66±0.03a	0.59±0.01a	0.44±0.03a	0.66±0.03bc	0.28±0.02b
1/20	0.36±0.01b	21.33±1.30b	0.62±0.03a	0.55±0.01bc	0.44±0.03a	0.71±0.02a	0.34±0.02a

同时, $1.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ FA 处理 5 d 对党参幼苗各个叶绿素荧光参数均有显著性影响(表 6)。本研究继而在 $1.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理 5 d 下探讨了基质中添加不同比例凹凸土是否能够减少阿魏酸对党参幼苗生长造成的上述不良影响。结果(表 7)发现, 培育基质中添加不同比例凹凸土(凹凸土/蛭石的体积比分别为 0/1、1/120、1/80、1/50、1/20)对 $1.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ FA 的胁迫影响均有不同程度的缓解作用。其中, 凹凸土/蛭石为 1/20 时, 党参幼苗叶片 $Y(\text{II})$ 、 F_v'/F_m' 、 qP 、 qL 较 CK_2 显著升高, qP 、 qL 甚至升高到 CK_1 水平; 在凹凸土/蛭石为 1/50 时缓解效果最明显, 此时光反应中心 II 光化学活性各指标与 CK_2 相比均得到显著缓解, 并且达到了 CK_1 水平; 当以 1/80、1/120 加入凹凸土也有明显缓解作用, 但各指标均未达到 CK_1 对照水平。综合以上基质中添加不同比例凹凸土对播种时和幼苗期发生阿魏酸胁迫的缓解效果来看, 体积比 1/50 有最好的缓解效果。

3 讨 论

本研究发现, 低浓度 FA 未对党参种子萌发产生显著性影响, 而较高浓度 FA 对党参种子的萌发具有明显的抑制作用。有研究表明, 化感物质可通过抑制胚根和胚轴的伸长, 干扰植物激素及活性氧的合成与代谢, 阻碍种子萌发过程中的物质以及能量转换, 影响种子呼吸作用、细胞膜透性、细胞分裂生长和分化、基因转录与翻译、激素合成和平衡等导致种子萌发受阻^[13]。各种化感物质还可抑制蛋白酶和蛋白水解酶、过氧化氢酶、磷酸化酶、蔗糖酶、纤维素酶、琥珀酸脱氢酶等多种酶的代谢, 影响种子的萌发^[4]。咖啡酸、没食子酸和酚类物质的含量与苯丙氨酸解氨酶和肉桂酸-4-羟化酶活性密切相关, 抑制了这些酶活性, 调节苯丙氨酸等物质代谢^[14]。阿魏酸浓度过高会引起玉米种子中蛋白酶、糖酶等活性降低^[15]。因此, FA 处理下党参种子活力降低也可能是由于 FA 抑制了种子萌发过程中相关酶的活性所致。

在植物多年生长或是连茬种植过程中, 阿魏酸通常在植物生长前便已于植物的生长环境中存在和积累。因此, 本实验首先研究了播种时在培育基质中施加不同浓度的 FA 溶液对党参幼苗叶绿素荧光和生物量等参数的影响, 以模拟连作土壤中积累的 FA 对于植物的影响。结果表明, 在播种时基质中较低浓度阿魏酸对党参幼苗叶片的光化学反应和叶绿素合成具有促进作用, 而高浓度则表现为抑制作

用。李巧霞等^[16]的研究发现低浓度阿魏酸对莴苣幼根生长发育有一定的促进作用, 而高浓度的阿魏酸对莴苣幼根生长发育有抑制作用。用流式细胞仪检测发现, 高浓度阿魏酸对莴苣幼苗根尖分生区细胞的细胞周期具有阻滞作用。周宝利等^[17]、李轶修等^[18]的研究表明, 邻苯二甲酸二异丁酯等植物的代谢物同样对植物的生物量和叶绿素含量具有“低促高抑”的现象, 本研究结果与他们类似。此外, 在自然环境中, 由于周围植物的分泌或是灌溉等因素, 植物在生长过程中也可能遭受土壤环境中 FA 的胁迫。因此, 本试验在党参幼苗苗龄为 50 d 时对基质施加了不同浓度的 FA, 继而探索在党参生长过程当中 FA 对幼苗的作用。结果表明, 随着 FA 浓度的升高和时间的延长, 党参幼苗的光化学反应水平表现出降低的趋势。可见, 无论是在党参生长前还是在生长过程中基质中存在较高浓度阿魏酸均会对植物的正常生长生理产生不良影响。

目前, 如何改变 FA 对于植物的这些不利影响在国内外鲜有报道。凹凸棒粘土是一种有较好吸附性的天然环境材料, 以合适的比例在基质中加入凹凸土可显著缓解环境中有害物质对植物 PS II 光化学活性产生的不利影响^[19-21]。本研究以阿魏酸为例探究了凹凸土对化感物的吸附效果, 结果表明, 无论是党参在生长前还是在生长过程中基质中出现较高浓度阿魏酸, 只要在基质中添加一定比例的凹凸棒粘土即可有效缓解阿魏酸对植物的生理胁迫作用, 推测可能是由于凹凸棒粘土吸附了 FA 分子中芳环上酚羟基、羧基, 从而减少了 FA 进入植物体内的数量。但是在本研究中也注意到, 基质中凹凸土比例为 1/50 时的缓解作用明显高于凹凸土比例为 1/20。这可能是由于凹凸棒粘土添加过多会影响培育基质的透气性所致。尽管其具体原因有待进一步查明, 但这预示了凹凸土对于阿魏酸胁迫的缓解作用并未随着其在基质中比例的升高而不断上升, 其在基质中的比例是在实际应用中应考虑的重要环节。

综上所述, 低浓度阿魏酸未对党参种子萌发产生显著性影响, 而对所生长党参幼苗生物量积累、叶片的光化学反应和叶绿素合成具有促进作用, 而较高浓度 FA 对党参种子的萌发、生物量积累、叶片的光化学反应和叶绿素合成具有明显的抑制作用; 在较高浓度阿魏酸的基质环境中加入不同体积比例凹凸土可以有效缓解高浓度阿魏酸造成的这些不利影响, 且以凹凸土在基质中的体积比为 1/50 时的缓解作用最为明显。

参考文献:

- [1] 夏丹. 党参营养器官的发育解剖学研究[D]. 西安: 西北大学, 2009.
- [2] 马琳, 郜玉钢, 臧埔, 等. 植物生长调节剂对药用植物次生代谢物积累的影响[J]. 中兽药学, 2016, **14**(8): 834-837.
MA L, GAO Y G, ZANG P, *et al.* Effect of plant growth regulators on accumulation of secondary metabolites of medicinal plants [J]. *Central South Pharmacy*, 2016, **14**(8): 834-837.
- [3] 孟艳彬, 孙盛, 苏又凡. HPLC测定党参中阿魏酸的含量[J]. 承德医学院学报, 2003, **20**(2): 140-141.
MENG Y B, SUN S, SU Y F. Determination of ferulic acid in *Codonopsis pilosula* by HPLC[J]. *Journal of Chengde Medical College*, 2003, **20**(2): 140-141.
- [4] EINHELLIG F A. Allelopathy: current status and future goals[M]//ACS Symposium Series. Washington, DC: American Chemical Society, 1994: 1-24. doi: 10.1021/bk-1995-0582.ch001
- [5] LODHI M A K. Role of allelopathy as expressed by dominating trees in a lowland forest in controlling the productivity and pattern of herbaceous growth[J]. *American Journal of Botany*, 1976, **63**(1): 1.
- [6] BLUM U, DALTON B R. Effects of ferulic acid, an allelopathic compound, on leaf expansion of cucumber seedlings grown in nutrient culture[J]. *Journal of Chemical Ecology*, 1985, **11**(3): 279-301.
- [7] HARPER J R, BALKE N E. Characterization of the inhibition of K⁺ absorption in oat roots by salicylic acid[J]. *Plant Physiology*, 1981, **68**(6): 1349-1353.
- [8] 高军, 秦小健, 周海峰, 等. 凹凸对酞酸酯在土壤中吸附解吸的影响[J]. 江苏农业学报, 2016, **32**(6): 1344-1350.
GAO J, QIN X J, ZHOU H F, *et al.* Effects of attapulgit on sorption and desorption of soil for PAEs[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2016, **32**(6): 1344-1350.
- [9] 张国霞, 李平, 韩彪. 3种不同沉淀剂对养血扶正颗粒中阿魏酸与淫羊藿苷含量的影响[J]. 中国生化药物杂志, 2007, **27**(1): 46-48.
ZHANG G X, LI P, HAN B. The effects of three kinds of precipitator on the content of ferulic acid and icariin in Yangxuefuzheng granules[J]. *Chinese Journal of Biochemical Pharmacology*, 2007, **27**(1): 46-48.
- [10] 颜启传, 胡伟民, 宋文坚. 种子活力测定的原理和方法[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006.
- [11] DEMMIG-ADAMS B, ADAMS W W III. Xanthophyll cycle and light stress in nature: uniform response to excess direct sunlight among higher plant species[J]. *Planta*, 1996, **198**(3): 460-470.
- [12] ARNON D I. Copper enzymes in isolated chloroplasts. polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*[J]. *Plant Physiology*, 1949, **24**(1): 1-15.
- [13] 陈锋, 孟永杰, 帅海威, 等. 植物化感物质对种子萌发的影响及其生态学意义[J]. 中国生态农业学报, 2017, **25**(1): 36-46.
CHEN F, MENG Y J, SHUAI H W, *et al.* Effect of plant allelochemicals on seed germination and its ecological significance[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, **25**(1): 36-46.
- [14] 杨期和, 叶万辉, 廖富林, 等. 植物化感物质对种子萌发的影响[J]. 生态学杂志, 2005, **24**(12): 1459-1465.
YANG Q H, YE W H, LIAO F L, *et al.* Effects of allelochemicals on seed germination[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, **24**(12): 1459-1465.
- [15] DEVI S R, PRASAD M N V. Effect of ferulic acid on growth and hydrolytic enzyme activities of germinating maize seeds[J]. *Journal of Chemical Ecology*, 1992, **18**(11): 1981-1990.
- [16] 李巧峡, 安珂, 付亚娟, 等. 阿魏酸对莴苣幼苗根生长的影响[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2013, **49**(5): 688-692.
LI Q X, AN K, FU Y J, *et al.* Effects of ferulic acid on seedling root growth and development of lettuce[J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2013, **49**(5): 688-692.
- [17] 周宝利, 陈丰, 刘娜, 等. 邻苯二甲酸二异丁酯对茄子黄萎病及其幼苗生长的化感作用[J]. 西北农业学报, 2010, **19**(4): 179-183.
ZHOU B L, CHEN F, LIU N, *et al.* Allelopathy of diisobutyl phthalate to verticillium wilt and seedling growth of eggplant[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2010, **19**(4): 179-183.
- [18] 李轶修, 周宝利, 刘娜, 等. 邻苯二甲酸二丁酯对3种蔬菜作物种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 西北农业学报, 2009, **18**(2): 217-220, 224.
LI Y X, ZHOU B L, LIU N, *et al.* Effect of different concentration Dibutyl Phthalate (DBP) on the germination and seedlings growth of three vegetable seeds[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2009, **18**(2): 217-220, 224.
- [19] ZHANG M D, RAN R L, NAO W S, *et al.* Physiological effects of short-term copper stress on rape (*Brassica napus* L.) seedlings and the alleviation of copper stress by attapulgit clay in growth medium[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 171: 878-886.
- [20] ZHANG J, XIE S, HO Y S. Removal of fluoride ions from aqueous solution using modified attapulgit as adsorbent[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **165**(1-3): 218-222.
- [21] 赛阔汪青, 张牡丹, 马小俊, 等. 镉胁迫对黄芪幼苗的生理学影响及凹凸棒粘土对镉胁迫缓解作用的研究[J]. 中国中药杂志, 2018, **43**(15): 3115-3126.
SAINAO W Q, ZHANG M D, MA X J, *et al.* Physiological effects of cadmium stress on *Astragalus membranaceus* seedlings and alleviative effects of attapulgit clay on cadmium stress[J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2018, **43**(15): 3115-3126.