

黄腐酸对雾培马铃薯幼苗抗旱性的影响

邱孟柯¹, 回振龙^{2,3}, 黄晓鹏¹, 吴劲锋^{1*}

(1. 甘肃农业大学工学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃农业大学生命科学技术学院, 甘肃 兰州 730070;

3. 甘肃省干旱生境作物学重点实验室, 甘肃农业大学, 甘肃 兰州 730070)

摘 要: 试验以马铃薯 (*Solanum tuberosum*) 幼苗为研究对象, 采用雾培装置进行不同黄腐酸用量和干旱胁迫处理 (分别为 CK, 不加黄腐酸和 PEG; 10% PEG; 0.01% FA + 10% PEG; 0.03% FA + 10% PEG; 0.05% FA + 10% PEG 和 0.10% FA + 10% PEG), 分析其对马铃薯生长发育及抗性生理的影响。结果表明, 在干旱胁迫下, 雾培马铃薯幼苗的成活率、叶绿素含量、膜稳定指数、根系活力、匍匐茎数、结薯率和产量呈下降趋势, 而丙二醛 (MDA)、过氧化氢 (H_2O_2)、脯氨酸、可溶性糖含量和过氧化氢酶 (CAT) 活性及超氧阴离子 (O_2^-) 产生速率呈上升趋势, 过氧化物歧化酶 (SOD) 和过氧化物酶 (POD) 活性先增加后下降, 说明雾培马铃薯幼苗在干旱胁迫下生长发育受到显著抑制, 正在遭受逆境胁迫。经黄腐酸处理后, 幼苗的成活率、匍匐茎数、结薯率和产量则得到了提高, 而叶绿素含量、膜稳定指数和根系活力仍呈下降趋势, 但较单一干旱胁迫的下降趋势缓慢, 而 MDA 含量、SOD 和 POD 活性及产生速率呈先升高后下降的趋势, 脯氨酸、可溶性糖、 H_2O_2 含量及 CAT 活性呈上升趋势, 其中 H_2O_2 含量上升趋势较单一干旱胁迫缓慢, 说明黄腐酸处理后使干旱胁迫下雾培马铃薯幼苗的生长发育得到了促进, 减轻了干旱胁迫对幼苗造成的伤害, 提高了植株的整体抗旱性, 而这种抗性与黄腐酸浓度呈明显相关性, 0.05% FA 对植株的保护效应最显著, 而 0.10% FA 则协同 PEG 加剧了对幼苗的伤害作用。

关键词: 雾培马铃薯; 幼苗; 黄腐酸; 聚乙二醇 6000; 干旱胁迫; 生长生理; 抗性

中图分类号: S532; S332.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2013)03-0155-07

Influences of fulvic acid on drought resistance of aeroponic potato seedlings

QIU Meng-ke¹, HUI Zhen-long^{2,3}, HUANG Xiao-peng¹, WU Jin-feng¹

(1. College of Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

2. College of Life Science and Technology, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

3. Gansu Provincial Key Laboratory of Aridland Crop Science, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: Using potato (*Solanum tuberosum*) seedlings as research objects, effects of different treatments of fulvic acid and drought stress (CK, 10% PEG, 0.01% FA + 10% PEG, 0.03% FA + 10% PEG, 0.05% FA + 10% PEG, and 0.10% FA + 10% PEG) on growth and drought-resistant physiological parameters of aeroponic potato were studied. The results showed that seedling survival rate, chlorophyll content, membrane stability index, root vigor, number of procumbent stems, tuber rate and output of aeroponic potato tended to decrease, malondialdehyde (MDA) content, hydrogen peroxide (H_2O_2) content, proline content, soluble sugar content, catalase (CAT) activity and production rate of superoxide anion (O_2^-) tended to increase, and activity of superoxide dismutase (SOD) and peroxidase (POD) increased firstly and then decreased under drought stress. Thus the growth and development of aeroponic potato seedlings were inhibited significantly under drought stress. Under the treatments of fulvic acid and drought stress, seedling survival rate, number of procumbent stems, tuber rate and output increased, while chlorophyll content, membrane stability index and root vigor still tended to decrease but their decrease rate was smaller than that under treatment of single drought stress; MDA content, SOD activity and POD activity increased firstly and then decreased; Proline content, soluble sugar content, H_2O_2 content and catalase (CAT) activity increased, in which the increase rate of H_2O_2 content was lower than that under the treatment of single drought stress. Therefore, application of fulvic acid could promote growth and develop-

收稿日期: 2012-12-05

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51065001); 甘肃省高校研究生导师科研项目 (1002-10)

作者简介: 邱孟柯 (1987—), 男, 江苏江阴人, 硕士, 主要从事农业工程技术与材料磨损的研究。E-mail: helloqmk@qq.com。

* 通信作者: 吴劲锋 (1962—), 男, 湖南湘潭人, 教授, 硕士生导师, 主要从事农产品加工与质粒环膜优化设计的研究。E-mail: wujf@gsau.edu.cn。

ment of aeroponic potato seedlings under drought stress, and improve overall drought resistance of plants. The resistance was significantly associated with concentration of fulvic acid. The protective effect of 0.05% FA was the most significant, but 0.10% FA even brought cooperatively injury to potato seedlings with PEG stress.

Keywords: aeroponic potato; seedling; fulvic acid; PEG - 6000; drought stress; growth and physiological parameter; resistance

近年来,利用雾培法生产脱毒马铃薯(*Solanum tuberosum*)微型种薯是发展起来的一项无土栽培的技术。雾培又称气培,即喷雾栽培的简称,它是无土栽培的方式之一,其不用固体基质而是直接将营养液喷雾到植物根系上,供给其所需的营养和氧^[1-4]。随着脱毒马铃薯微型种薯的设施和工厂化发展,根际间歇喷雾栽培方式与目前普遍使用的以蛭石、草炭、珍珠岩等为基质的无土栽培方式比较,可以很大程度上提高脱毒小薯的产量,具有重要的生产实际应用价值和理论研究意义^[5]。

植物在干旱环境下维持可利用水分是其存活的关键^[6-7],目前作物抗旱性的方法有多种,但是通常对植物的抗旱性研究的方法有两种,一种是土壤干旱,另一种则是模拟渗透胁迫。土壤干旱的研究常因为土壤系统自身的胁迫效应和渗透胁迫效应难以区分而造成困扰。因此,近几十年来,越来越多的人认为利用 PEG 模拟植物的干旱逆境是可行的。聚乙二醇 6000(PEG - 6000,以下简称 PEG)是一种亲水性非常强的惰性高分子聚合物,常作为理想的渗透调节剂来被应用于模拟干旱胁迫,PEG 渗透胁迫法具有简单易行,条件容易控制,重复性好,试验周期短的优点,它能模拟干旱逆境的原因是可阻塞植物系统的输导组织^[8-9]。在 PEG 的渗透胁迫下,必然会引起植物体内一系列的抗性反应,来增强植物的抗旱能力^[10-11]。

黄腐酸(fulvic acid, FA)是腐植酸的一个组份,具有分子量较小、易被植物吸收、功能团含量较多、生理活性较大、可溶于水、水溶液呈弱酸性等特点,可作为一种抗逆蒸腾剂物质应用。已在小麦、玉米、甘薯、油菜等数十种作物上应用,它可以增强农作物的抗旱、抗干热风能力,同时还具有促进作物生长、提高作物产量和品质的作用,并表现出明显的抗逆增产效果,取得了较好的经济效益^[12-13]。黄腐酸在农业生产上的作用主要表现在两个方面,一是减少作物叶片蒸腾速率,使植株和土壤保持较多的水分,同时促进根系发育,增强根系活力,使作物吸收较多水分和养料,达到提高作物抗旱能力的目的;二是提高多种合成酶活性和叶绿素含量,使光合作用加强,从而提高作物品质与产量^[14-16]。目前关于

黄腐酸对雾培马铃薯幼苗抗旱性影响的研究还鲜见报道。

因雾培马铃薯在培育过程中其根系一直暴露在空气中,难免会对植株造成一定的干旱胁迫,所以本研究把黄腐酸应用到雾培马铃薯中,研究了黄腐酸处理后雾培马铃薯幼苗植株生长发育和抗性生理的变化,旨在认识黄腐酸对雾培马铃薯幼苗抗旱性的调控机制,以期在缺水季节或缺水时间段内通过增施黄腐酸来改善雾培马铃薯幼苗的抗旱性提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 供试材料

马铃薯品种为大西洋(Atlantic)脱毒苗(不含马铃薯 X、Y、S、卷叶和纺锤块茎类病毒),苗龄 18 d。

1.2 试验设计

本试验于 2012 年 3—5 月在甘肃农业大学温室内进行。本试验汽雾法栽培方式同修英涛等^[17]试验,其栽培系统主要由栽培槽、雾化喷头、水泵、定时器、电磁阀、压力表、流量计、过滤器、输液管道和贮液桶等组成。汽雾法栽培箱长×宽×高=600 cm×60 cm×70 cm。栽培箱等距分为 6 段,每段培养箱体的四周用黑色 PVC 塑料膜覆盖,保持培养箱内不透光且各培养箱体之间处理液不渗漏。每段为一个处理,可定植脱毒苗 4 株,设置了 3 次重复,共定植 12 株。选择高度在 15 cm、长势一致的幼苗,洗净根系,定植于雾培生长箱内,株行距=15 cm×20 cm。营养液的配制采用改良的 Hoagland 营养液配方,加入黄腐酸和 10% PEG 溶液进行调控,共设计 6 个梯度,分别为 0(无黄腐酸和 PEG 处理)、10% PEG(无黄腐酸处理)、0.01% FA + 10% PEG、0.03% FA + 10% PEG、0.05% FA + 10% PEG 和 0.10% FA + 10% PEG(各浓度单位为 $w \cdot v^{-1}$),相应标记为对照(CK)、处理 I、处理 II、处理 III、处理 IV 和处理 V。将试验幼苗分为 6 组,分别先用上述不同黄腐酸浓度(0%、0%、0.01%、0.03%、0.05%、0.10%)的营养液(不加入 PEG)预培养 3 d,然后再进行干旱胁迫模拟试验,即在除 CK 组外的 5 个处理中各添加 10% PEG 溶液培养,试验期间温室昼温 21℃~30℃,夜

温 12℃~16℃。胁迫的时间为 8 d, 试验中营养液喷淋的频率为每间隔 3 min 喷雾 20 s, 分别于隔天上午 10:00 采样并进行生理指标测定。

1.3 测定指标与方法

在 6 个处理后分别于 0(胁迫前), 2, 4, 6 和 8 d 后采生长状况一致的幼苗叶片和相同部位的根系进行生理指标测定。

叶绿素含量: 乙醇提取法^[18]; 丙二醛(MDA)含量: 硫代巴比妥酸法^[18]; 膜稳定指数(MSI): 参照 Sairam^[19]的方法, $MSI = (1 - C_1/C_2) \times 100\%$; 过氧化氢(H₂O₂)含量: 硫酸钛光度法^[18]; 脯氨酸含量: 茚三酮显色法^[18]; 可溶性糖含量: 蒽酮显色法^[18]; 超氧化物歧化酶(SOD)活性: 分光光度法^[18]; 过氧化物酶(POD)活性: 愈创木酚氧化法^[18]; 过氧化氢酶(CAT)活性: 紫外吸收法^[20]; 超氧阴离子(O₂⁻)产生速率: 羟胺氧化法^[21]; 根系活力: TTC 法^[18]。

于处理后 10 d 统计幼苗的成活率(成活率 = 成活的幼苗数/定植的幼苗数), 并在收获后目测匍匐茎个数和单株总薯数, 电子天平称量单株总薯重以及计算结薯率(结薯率 = 结薯植株数/定植的植株

数)。
1.4 数据处理
各项实验重复 3~5 次, 单因素设计, 数据采用 EXCEL 和 SPSS 17.0 统计分析软件进行相关数据分析。

2 结果与分析

2.1 黄腐酸对干旱胁迫下雾培马铃薯幼苗叶片抗性的影响

2.1.1 黄腐酸对干旱胁迫下雾培马铃薯幼苗叶片叶绿素含量的影响
随着试验时间的延长, 除对照外, 其它 5 个处理组叶片中叶绿素的含量在不断减少, 整体呈下降趋势, 处理 I 和 V 下降趋势最显著, 而处理 IV 下降最缓慢。增施黄腐酸可以有效地缓解干旱胁迫下雾培马铃薯幼苗叶片中叶绿素含量的减少, 尤以处理 IV 效果显著高于其它各处理, 效果最佳, 说明 0.05% FA 对幼苗叶片叶绿素降解的保护作用最强, 而 0.10% FA 则会协同 PEG 加重对叶绿素的降解(表 1)。

表 1 黄腐酸对干旱胁迫下雾培马铃薯幼苗叶片叶绿素含量的影响/(mg·g⁻¹)
Table 1 Influences of fulvic acid on chlorophyll contents in seedling leaves of aeroponic potato under drought stress

处理 Treatment	胁迫时间 Stress time/d				
	0	2	4	6	8
CK	2.61 ± 0.006e	2.63 ± 0.002e	2.64 ± 0.007c	2.68 ± 0.013b	2.70 ± 0.013a
I	2.99 ± 0.049d	2.79 ± 0.003c	2.44 ± 0.019e	2.14 ± 0.021e	1.83 ± 0.002e
II	3.31 ± 0.004b	2.85 ± 0.003b	2.68 ± 0.006b	2.33 ± 0.015c	2.19 ± 0.005b
III	3.13 ± 0.013c	2.75 ± 0.017d	2.56 ± 0.004d	2.26 ± 0.010d	2.13 ± 0.014c
IV	3.43 ± 0.013a	3.25 ± 0.017a	3.06 ± 0.004a	2.87 ± 0.002a	2.73 ± 0.014a
V	3.11 ± 0.008c	2.75 ± 0.017d	2.56 ± 0.004d	2.16 ± 0.010e	1.93 ± 0.014d

注: 同列不同字母者为差异显著(P<0.05)。下同。
Note: The different small letters in same columns mean significant difference at P<0.05. Hereinafter the same.

2.1.2 黄腐酸对干旱胁迫下雾培马铃薯幼苗叶片丙二醛和过氧化氢含量及膜稳定指数的影响
在干旱胁迫期间, 处理 I 和 V 幼苗叶片的 MDA 含量随胁迫时间的延长呈升高趋势。而处理 II、III、IV 幼苗叶片的 MDA 含量则随胁迫时间的延长呈先升高后降低的趋势, 在胁迫第 4 d 时, 处理 II、III、IV 幼苗叶片的 MDA 含量达到峰值, 4 d 后, 叶片 MDA 含量逐渐降低, 尤以处理 IV 在第 6 天、第 8 天时下降最显著(表 2)。除对照外, 不同处理的幼苗叶片 H₂O₂ 含量则随着胁迫时间的增加整体呈上升趋势, 处理 IV 的 H₂O₂ 含量上升最缓慢(表 3)。结果说明, 处理 II、III、IV 均可在一定程度上减少 MDA 和 H₂O₂ 含量的

增加, 相反, 处理 V 中 0.10% FA 则会协同 PEG 加重幼苗的膜脂过氧化速度。表明 0.01%、0.03% 和 0.05% FA 可减少干旱胁迫下幼苗脂质过氧化产物的积累及细胞的衰老和解体, 其中 0.05% FA 处理的效果最明显。随着干旱胁迫时间的延长, 各处理的膜稳定指数整体呈下降趋势, 尤以处理 I 和 V 下降最明显, 而处理 II、III、IV 均可在一定程度上缓解膜稳定指数的下降趋势, 其中处理 IV 的保护作用最明显(表 4), 说明增施黄腐酸可明显降低幼苗叶片细胞膜的渗透率, 减轻干旱胁迫对叶片质膜造成的伤害, 提高幼苗叶片的膜稳定指数。

表 2 黄腐酸对干旱胁迫下雾培马铃薯幼苗叶片丙二醛含量的影响/($\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$)

Table 2 Influences of fulvic acid on MDA contents in seedling leaves of aeroponic potato under drought stress

处理 Treatment	胁迫时间 Stress time/d				
	0	2	4	6	8
CK	2.35 ± 0.451e	2.33 ± 0.070e	2.40 ± 0.063f	2.55 ± 0.216f	2.37 ± 0.375f
I	2.52 ± 0.397d	7.59 ± 0.332d	13.36 ± 0.222e	16.47 ± 0.386b	21.44 ± 0.391a
II	2.67 ± 0.046b	7.60 ± 1.165d	17.16 ± 0.283a	11.68 ± 0.402c	8.58 ± 0.326c
III	2.76 ± 0.411a	10.47 ± 0.743c	16.67 ± 0.769c	10.55 ± 0.649d	6.62 ± 0.348d
IV	2.77 ± 0.397a	10.81 ± 0.620b	17.00 ± 0.302b	6.55 ± 0.486e	3.62 ± 0.348e
V	2.59 ± 0.122c	11.47 ± 0.444a	16.00 ± 0.749d	18.21 ± 0.095a	20.28 ± 0.269b

表 3 黄腐酸对干旱胁迫下雾培马铃薯幼苗叶片过氧化氢含量的影响/($\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$)

Table 3 Influences of fulvic acid on H₂O₂ contents in seedling leaves of aeroponic potato under drought stress

处理 Treatment	胁迫时间 Stress time/d				
	0	2	4	6	8
CK	5.05 ± 0.012e	5.06 ± 0.026f	5.07 ± 0.051e	5.06 ± 0.046e	5.01 ± 0.021f
I	5.24 ± 0.017d	7.67 ± 0.029a	9.20 ± 0.168a	11.63 ± 0.040a	13.37 ± 0.037a
II	5.25 ± 0.066d	6.45 ± 0.576d	7.30 ± 0.082c	9.33 ± 0.062c	10.45 ± 0.079d
III	5.30 ± 0.044c	6.93 ± 0.077c	7.77 ± 0.031b	9.74 ± 0.037b	11.50 ± 0.180c
IV	5.33 ± 0.052b	6.07 ± 0.026e	6.97 ± 0.031d	7.74 ± 0.037d	8.40 ± 0.043e
V	5.37 ± 0.014a	6.98 ± 0.025b	7.79 ± 0.004b	9.76 ± 0.013b	12.46 ± 0.021b

表 4 黄腐酸对干旱胁迫下雾培马铃薯幼苗叶片膜稳定指数的影响/%

Table 4 Influences of fulvic acid on membrane stability index in seedling leaves of aeroponic potato under drought stress

处理 Treatment	胁迫时间 Stress time/d				
	0	2	4	6	8
CK	90.61 ± 0.006c	90.23 ± 0.059a	89.64 ± 0.004a	88.68 ± 0.012a	86.74 ± 0.047a
I	89.47 ± 0.027d	80.74 ± 0.051e	72.43 ± 0.025d	66.15 ± 0.011f	61.84 ± 0.006e
II	92.31 ± 0.007a	87.85 ± 0.007c	82.67 ± 0.017b	73.34 ± 0.009d	67.18 ± 0.009d
III	90.13 ± 0.010c	86.75 ± 0.013d	81.56 ± 0.015c	76.26 ± 0.010c	70.15 ± 0.015c
IV	91.43 ± 0.010b	88.25 ± 0.013b	82.06 ± 0.009b	79.87 ± 0.013b	74.75 ± 0.015b
V	89.12 ± 0.018d	80.75 ± 0.017e	72.56 ± 0.009d	67.17 ± 0.013e	60.09 ± 0.007f

2.1.3 黄腐酸对干旱胁迫下雾培马铃薯幼苗叶片渗透调节物质含量的影响 干旱胁迫下,处理Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ的幼苗叶片中的脯氨酸与可溶性糖含量均大于处理Ⅰ、Ⅴ和对照组,且随着处理时间的延长,呈上升的趋势。以处理Ⅳ上升趋势最显著($P < 0.05$) (图 1),说明增施黄腐酸后可提高雾培马铃薯幼苗植株整体的抗逆性。

2.1.4 黄腐酸对干旱胁迫下雾培马铃薯幼苗叶片抗氧化酶活性的影响 干旱胁迫下,除对照组外,其它处理组的雾培马铃薯幼苗叶片中的 SOD 和 POD 活性随着胁迫时间的延长呈先升高后下降趋势。在胁迫第 4 天时,各处理组幼苗叶片的 SOD 和 POD 活

性达到峰值,8 d 时,叶片 SOD 和 POD 活性显著下降,其中以处理Ⅳ叶片的抗旱性效果最佳(图 2A、2B)。CAT 活性则随着胁迫时间的延长整体呈上升趋势,处理Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ幼苗叶片的 CAT 活性均高于处理Ⅰ,表明一定浓度的黄腐酸对雾培马铃薯幼苗叶片的细胞膜系统具有保护作用,尤以 0.05% FA 处理效果最明显(图 2C)。

2.1.5 黄腐酸对干旱胁迫下雾培马铃薯幼苗叶片超氧阴离子产生速率的影响 在胁迫过程中,雾培马铃薯幼苗叶片 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 的产生速率变化为:各处理组幼苗叶片的产生速率均较对照大,随处理时间的延长,各处理的产生速率整体都呈先增大、后减小的趋

势。处理 I、V 幼苗叶片 O_2^- 产生速率较处理 II、III、IV 的都大,且变化较为剧烈,处理 IV 对抑制幼苗脂质过氧化作用显著优于其它各处理(图 3)。

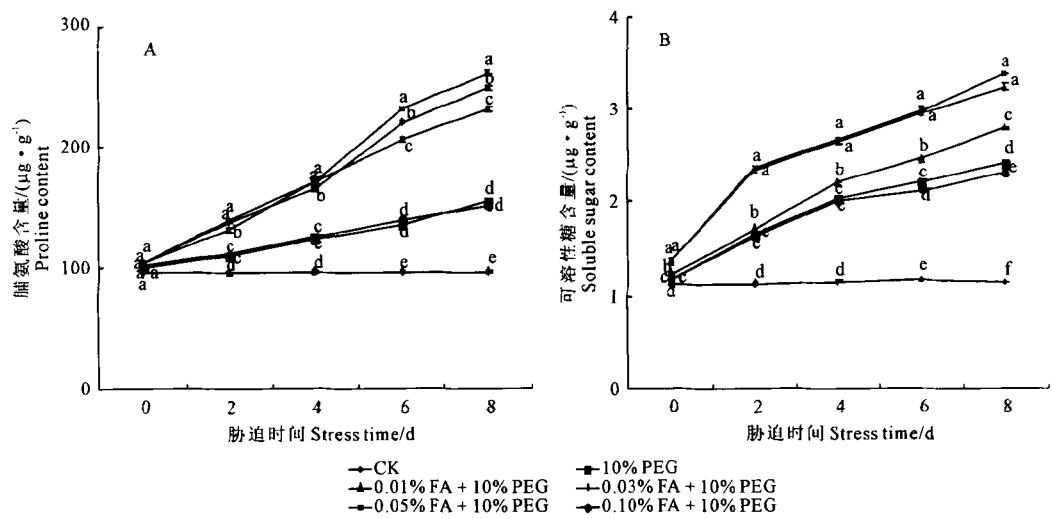


图 1 黄腐酸对干旱胁迫下雾培马铃薯幼苗叶片渗透调节物质含量的影响

Fig.1 Influences of fulvic acid on osmoregulation substance contents in seedling leaves of aeroponic potato under drought stress

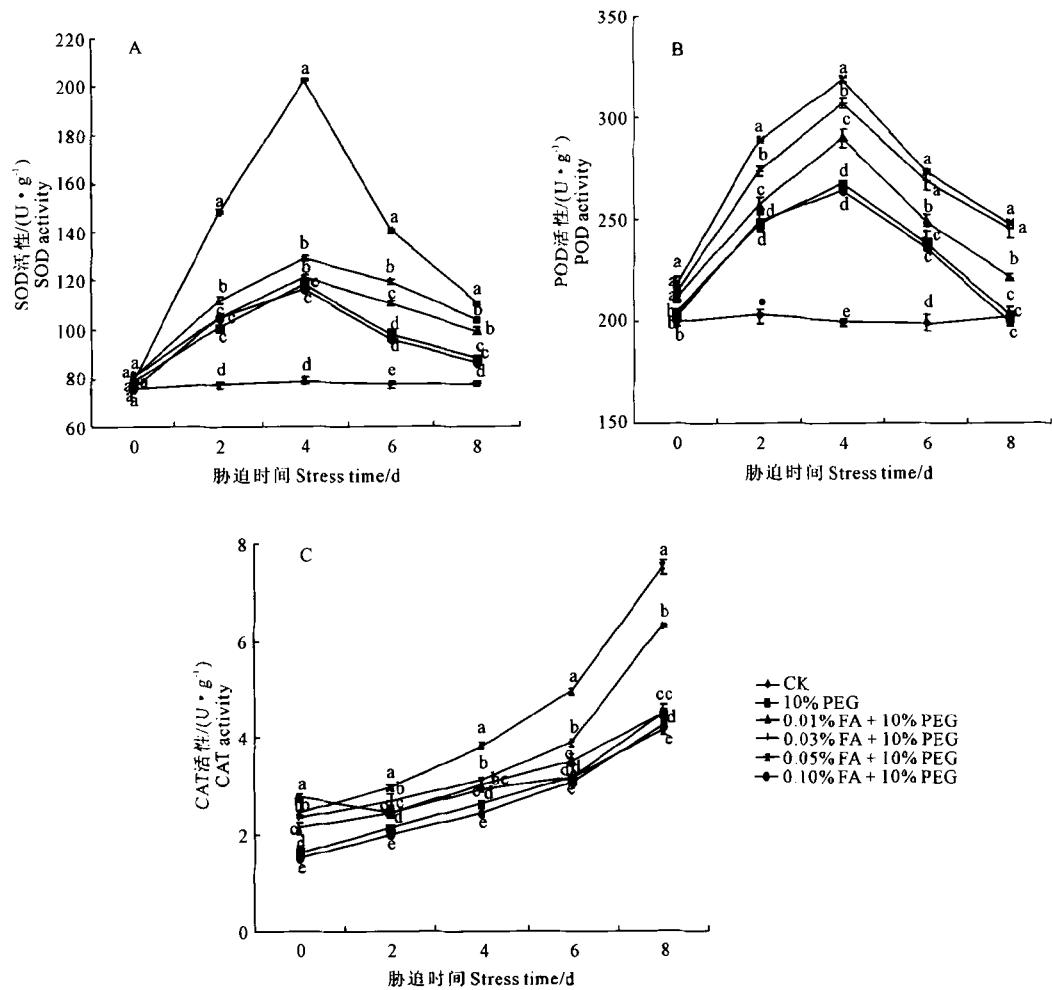


图 2 黄腐酸对干旱胁迫下雾培马铃薯幼苗叶片抗氧化酶活性的影响

Fig.2 Influences of fulvic acid on autioxidant enzyme activities in seedling leaves of aeroponic potato under drought stress

2.1.6 黄腐酸对干旱胁迫下雾培马铃薯幼苗根系活力的影响 在干旱胁迫期间,除对照组外,处理组幼苗根系活力均随着胁迫时间的延长呈下降趋势,但处理Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ根系活力下降趋势明显慢于处理Ⅰ、Ⅴ,其中处理Ⅳ效果最佳,表明增施 0.05% FA 更有利于抑制雾培马铃薯幼苗根系活力的降低(图 4)。

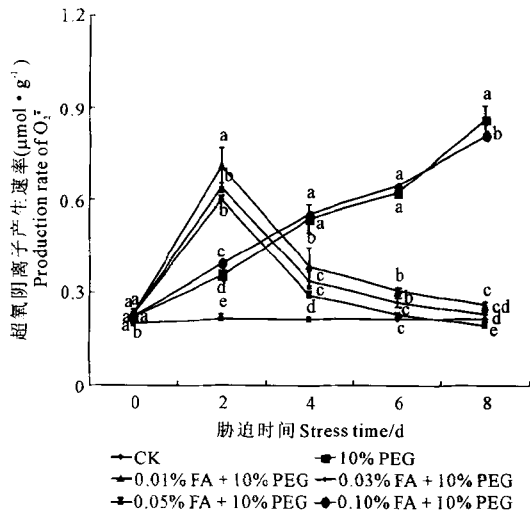


图 3 黄腐酸对干旱胁迫下雾培马铃薯幼苗叶片超氧阴离子产生速率的影响

Fig.3 Influences of fulvic acid on production rate of $O_2\cdot^-$ in seedling leaves of aeroponic potato under drought stress

2.2 黄腐酸对干旱胁迫下雾培马铃薯幼苗成活率和植株结薯率的影响

在干旱胁迫期间,经黄腐酸处理后 10 d,幼苗的成活率处理Ⅳ组达到最高,100% 成活,而在Ⅰ组的成活率仅为 66.67%,植株的匍匐茎数、单株总薯数、单株总薯重以及结薯率均以处理Ⅳ效果最佳,说明在喷施黄腐酸溶液后对植株成活率、结薯率、产量等有一定的促进作用,以 0.05% FA 处理最优(表 5)。

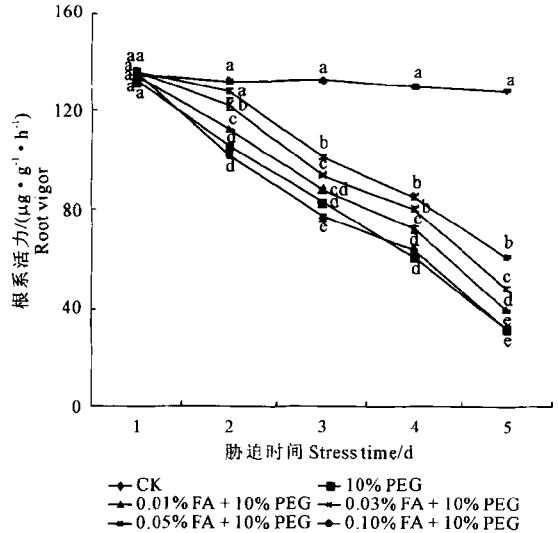


图 4 黄腐酸对干旱胁迫下雾培马铃薯幼苗根系活力的影响

Fig.4 Influences of fulvic acid on root vigor of seedlings of aeroponic potato under drought stress

表 5 黄腐酸对干旱胁迫下雾培马铃薯幼苗成活率和植株结薯率的影响

Table 5 Influences of fulvic acid on seedling survival rate and tuber rate of aeroponic potato under drought stress

处理 Treatment	成活率/% Seedling survival rate	结薯率/% Tuber rate	匍匐茎数 Number of procumbent stems	单株总薯数 Tuber number per plant	单株总薯重/g Tuber weight per plant
CK	83.33 ± 14.43bc	75.00 ± 25.000bc	8.00 ± 1.000c	5.33 ± 1.528c	11.22 ± 1.639c
Ⅰ	66.67 ± 14.43d	58.33 ± 14.434d	5.67 ± 0.577d	2.67 ± 0.577d	5.19 ± 1.045d
Ⅱ	91.67 ± 14.43b	66.67 ± 14.434c	8.33 ± 1.155c	5.67 ± 1.528c	12.16 ± 2.388b
Ⅲ	91.67 ± 14.43b	83.33 ± 14.434b	11.67 ± 0.577b	8.33 ± 0.577b	18.25 ± 0.734ab
Ⅳ	100.00 ± 0.00a	91.67 ± 14.434a	13.67 ± 0.577a	11.33 ± 0.577a	24.81 ± 1.711a
Ⅴ	75.00 ± 25.00c	50.00 ± 25.000e	5.67 ± 1.155d	3.00 ± 1.000d	5.12 ± 1.629d

3 讨 论

植物在受到干旱胁迫的情况下,其植物体内会发生一系列的生理生化反应,而在施用黄腐酸后,可很大程度上减轻逆境对植株造成的伤害^[22-23]。黄腐酸不仅可以减少植株叶片的水分蒸发速率,还可提高植株体内的酶活性与光合作用,从而减轻活性氧对植株的膜脂伤害,使植物增加抗逆性^[24-26]。

叶绿素是植物进行光合作用的主要色素,同时它也是一种复合酯类,其含量的变化不仅影响光合

作用的强弱,也可反应植株遭受到的胁迫程度。植物细胞在受到逆境胁迫的情况下也会发生膜脂过氧化反应,细胞膜的稳定指数下降,其中 MDA 便是其膜脂过氧化反应的终产物,而且由于体内活性氧代谢加强,同样引发 H_2O_2 含量的累积,它们的含量和细胞膜的稳定程度可以反映植物遭受逆境伤害的程度^[27]。游离脯氨酸则是植物体内一种重要的氨基酸,通常情况下含量很低,但在遭遇干旱、盐碱、冻害和衰老等逆境胁迫时便在植株体内大量积累,且积累量一般与植物的抗逆性正相关^[28-29]。细胞内的

活性氧水平的升高可对植株造成氧化胁迫,引起一系列对细胞结构的破坏,而在逆境的胁迫下,植物自身也形成了一系列的抗氧化剂和抗氧化酶来抵抗活性氧的侵害^[30]。超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)同是植物细胞内重要的保护酶,能与其它抗氧化酶和抗氧化物质协同作用,共同防御活性氧及自由基,保护植物免受它们的伤害^[31]。而根的生长发育情况和活力水平不仅影响地上部的生长和营养状况及产量,也影响植物个体的生命活动^[32]。本试验雾培马铃薯幼苗经黄腐酸处理后,叶片叶绿素含量下降速度较10% PEG处理缓慢(表1),相对抑制了幼苗叶片MDA和H₂O₂含量的累积和细胞膜稳定指数的下降(表2,3,4),增加了植株体内的脯氨酸和可溶性糖的含量(图1)和抗氧化酶活性(图2),降低了活性氧产生速率(图3),同时抑制了根系活力的下降(图4),提高了幼苗的成活率、结薯率、产量以及匍匐茎个数(表5),在一定程度上缓解了干旱造成的胁迫,对提高雾培马铃薯幼苗抵抗干旱胁迫逆境有着积极的作用。0.01%、0.03%和0.05% FA均可促进雾培马铃薯幼苗的抗旱性,尤以0.05% FA处理效果显著优于其它各处理,而0.10% FA处理则协同PEG加剧了对植株的伤害作用。

总之,通过施加黄腐酸在一定程度上可以改善雾培马铃薯幼苗的抗旱性,这对减轻和预防幼苗根系暴露在空气中造成的干旱和干旱地区的培育工作具有重要的意义,试验结果表明施加外源黄腐酸浓度为0.05%时处理效果最佳,减轻了干旱胁迫对幼苗的伤害,提高了植株整体的抗旱能力。

参考文献:

- [1] 尹作全,沈德茹,于洪涛,等.脱毒小薯无基质喷雾栽培技术研究初报[J].马铃薯杂志,1999,13(1):24-25.
- [2] 杨元军,孙慧生,王倍伦,等.马铃薯脱毒小薯雾培结薯特点及增产效果[J].园艺学报,2002,29(4):333-336.
- [3] 孙周平,李天来,姚莉,等.汽雾培马铃薯根际CO₂环境对马铃薯生长及其光合作用的影响[J].园艺学报,2004,31(4):59-63.
- [4] 卢泳全,秦昕,陈颖.早熟马铃薯品种生产中几种主要栽培技术的对比试验[J].马铃薯杂志,2000,14(1):22-24.
- [5] 于海业,乔建磊,肖英奎,等.钙素对雾培马铃薯幼苗抗冷性的影响分析[J].农业机械学报,2010,41(12):72-75.
- [6] 王德权,周宇飞,陆璋镛,等.水分胁迫下持绿型高粱根系形态及其活力研究[J].干旱地区农业研究,2012,30(2):73-76.
- [7] 山仑.科学应对农业干旱[J].干旱地区农业研究,2011,29(2):1-5.
- [8] 王瑾,刘桂茹,杨学举.PEG胁迫下不同抗旱性小麦品种幼苗形态及主要理化特性的比较[J].河北农业大学学报,2005,28(5):6-10.
- [9] 朱教君,康宏樟,李智辉.不同水分胁迫方式对沙地樟子松幼苗光合特性的影响[J].北京林业大学学报,2006,28(2):57-60.
- [10] 龚子端,李高阳.PEG干旱胁迫对植物的影响[J].河南林业科技,2006,26(3):21-23.
- [11] 左利萍,李毅,焦健.渗透胁迫下河北杨叶片的生理响应及相关分析[J].林业科学,2008,44(8):56-61.
- [12] 李捷,杨小鹏,冯建军.不同条件下黄腐酸对春小麦生长和水分利用的影响[J].干旱地区农业研究,2002,20(2):52-55.
- [13] 韩玉竹,李阳春,刘晓静.黄腐酸对紫花苜蓿种子活力的影响[J].种子,2009,28(7):50-52.
- [14] 丁希武,杜吉到,张树文,等.FA旱地龙对寒地大田作物增产的研究[J].辽宁农业科学,2000,(1):49-50.
- [15] 卢林纲.黄腐酸及其在农业上的应用[J].现代化农业,2001,(5):9-10.
- [16] 赵永峰,吴林科,周皓蕾,等.黄腐酸在马铃薯上的应用效果初报[J].甘肃农业科技,2002,(5):41-42.
- [17] 修英涛,曹嘉颖,孙周平,等.不同无土栽培方式对马铃薯脱毒小薯繁育的影响[J].辽宁农业科学,2003,(2):1-3.
- [18] 邹琦.植物生理学实验指导[M].北京:中国农业出版社,2000:72-75,173-174,166-167,161-162,111-112,163-165,168-170.
- [19] Sairam R K, Siiukla D S, Saxena D C, et al. Stress induced injury and antioxidant enzymes in relation to drought tolerance in wheat genotypes[J]. Biologia Plantarum, 1997/1998,40(3):357-364.
- [20] Dhindsa R S, Plumb D P, Thorpe T A. Leaf senescence correlated with increased levels of membrane permeability and lipid peroxidation and decreased levels dismutase and catalase[J]. Journal of Experimental Botany, 1982,32:91-101.
- [21] 王爱国,罗广华.植物的超氧物自由基与羟胺的定量关系[J].植物生理通讯,1990,(6):55-57.
- [22] 王奇书,王栓株,王天力.腐植酸类物质及对植物的生理作用[J].腐植酸,2001,(3):33-40.
- [23] 沈玉龙,李炳焕.生物技术黄腐酸微肥的生产与应用[J].化工进展,2002,21(1):63-65.
- [24] 郑平,王兴滨,王天立,等.黄腐酸类物质在农业与医药中的应用[M].北京:化学工业出版社,1993:373.
- [25] Kock D E. Influence of humic acids on plant growth[J]. Science, 1955,121:473-474.
- [26] 李捷,李凤民,刘洪升.黄腐酸拌种对春小麦产量和水分利用效率的影响[J].应用生态学报,2000,11(5):727-730.
- [27] 李朝周.CoCl₂对Na₂CO₃胁迫下苜蓿幼苗叶片细胞膜的保护作用[J].草业学报,2007,16(3):49-54.
- [28] 李明,王根轩.干旱胁迫对干草幼苗保护酶活性及脂质过氧化作用的影响[J].生态学报,2002,22(4):503-507.
- [29] 回振龙,马兰,李朝周.CoCl₂对酸胁迫下多花黑麦草种子萌发及幼苗抗性的影响[J].草业科学,2012,29(5):753-758.
- [30] 焦健,李朝周,黄高宝.钴对干旱胁迫下大豆幼苗叶片的保护作用及其机理[J].应用生态学报,2006,17(5):796-800.
- [31] 焦健,李朝周,黄高宝.乙烯产生抑制剂对高温胁迫下蚕豆幼苗叶片的保护作用[J].植物生态学报,2006,30(3):465-471.
- [32] 宋广树,孙蕾,杨春刚,等.吉林省水稻幼苗期低温处理对根系活力的影响[J].中国农学通报,2012,28(3):33-37.