



DCPTA 对干旱胁迫下玉米幼苗生长和抗氧化酶系统的影响

谢腾龙¹, 孟 瑶², 郝卫平³, 顾万荣¹, 曾 兴¹, 孙静怡¹, 李 晶¹, 魏 淦¹

(1 东北农业大学, 哈尔滨 150030; 2 黑龙江省农垦科学院, 哈尔滨 150038; 3 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081)

摘要: 以玉米自交系‘昌 7-2’幼苗为材料, 采用水培方式研究了模拟不同干旱胁迫程度(10%、12.5%、15%、17.5%、20%、22.5%、25% PEG-6000) 及 15% PEG-6000 干旱胁迫下不同浓度(5, 10, 15, 20, 25, 30 mg/L) 植物生长调节剂 2-(3,4-二氯苯氧基)三乙胺(DCPTA) 对玉米幼苗生长和抗氧化酶系统的影响, 以筛选出玉米苗期抗旱性鉴定的适宜 PEG-6000 浓度, 为玉米自交系苗期的抗旱性鉴定提供依据。结果表明: 不同浓度 PEG-6000 处理后, 玉米幼苗地上部和根部的干重、鲜重、叶片相对含水量及叶绿素(SPAD) 含量均下降, 叶片抗氧化酶 SOD、POD、CAT 的活性增强, 丙二醛(MDA) 含量升高, 渗透调节物质可溶性蛋白、脯氨酸的积累量增加。且当 PEG-6000 浓度达 15% 时, 以上各指标变化均与清水对照差异显著; 在 15% PEG-6000 浓度模拟干旱胁迫下, 不同浓度 DCPTA 处理均使玉米幼苗上述抗氧化酶活性增强, 渗透调节物质含量增加, 叶片相对含水量、叶绿素(SPAD) 含量和生物量提高, 而 MDA 含量降低, 并以 15 和 20 mg/L 浓度效果较佳。研究认为, 室内水培条件下采用 PEG-6000 模拟干旱鉴定玉米苗期抗旱性的适宜浓度可初步确定为 15%; DCPTA 处理可促进干旱胁迫下玉米幼苗的生长, 并通过提高抗氧化酶活性和渗透调节物质含量来增强其抗旱性, 其适宜浓度为 15 和 20 mg/L。

关键词: 玉米; 幼苗阶段; 干旱胁迫; 2-(3,4-二氯苯氧基)三乙胺(DCPTA); 水培

中图分类号: Q945.78; S513 文献标志码: A

Effect of DCPTA on the Growth and Antioxidant Enzyme Systems of Maize Seedlings under Drought Stress

XIE Tenglong¹, MENG Yao², HAO Weiping³, GU Wangrong¹,
ZENG Xing¹, SUN Jingyi¹, LI Jing¹, WEI Shi¹

(1. Northeast Agricultural University, Harbin, 150030, China; 2. Heilongjiang Land Reclamation Academy of Sciences, Harbin, 150038, China; 3. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Under hydroponic conditions, Chang7-2 were used to study the effect of different PEG-6000 concentrations(10 %, 12.5 %, 15 %, 17.5 %, 20 %, 22.5 %, 25 %) and different concentrations (5, 10, 15, 20, 25, 30 mg / L) plant growth regulator 2-(3,4-dichlorophenoxy1)-triethylamino(DCPTA) under 15.0% PEG-6000 simulated drought stress on maize seedling growth and antioxidant enzyme systems. The results

收稿日期: 2015-11-28; 修改稿收到日期: 2016-03-28

基金项目: 中国博士后基金(2012M510913); 黑龙江省博士后基金(LBH-Z12036); 黑龙江省青年科学基金(QC2015032); 东北农业大学“青年才俊”项目(14QC24); 2015 哈尔滨市应用技术研究与开发项目(2015RQQXJ046)

作者简介: 谢腾龙(1988-), 男, 博士, 主要从事作物逆境生理及调控研究。E-mail: 251007911@qq.com

* 通信作者: 顾万荣, 博士, 副研究员, 主要从事玉米逆境生理生态及其化学调控技术的研究。E-mail: wanronggu@163.com

showed that, biomass index(dry and fresh weight of shoot and root), leaf relative water content(RWC) and SPAD value decreased after the PEG-6000 treatment, antioxidant enzyme (SOD, POD, CAT) activities, malondialdehyde (MDA) content and osmotic adjustment substance (soluble protein, proline) accumulation increased, when PEG-6000 concentration reached 15%. The indices significantly different from control; The treatment by addition of DCPTA to the hydroponic solution induced an increase in drought tolerance during subsequent exposure to 15% PEG-6000 water stress. This was evidenced by the indices (biomass, RWC, SPAD, antioxidant enzyme activities, MDA content and osmotic adjustment substances) of maize seedling. We can concluded preliminarily that the appropriate PEG-6000 concentration for the identification of maize drought tolerance in seedling stage was 15%; DCPTA could enhance drought tolerance of maize seedling by modulating growth, increasing osmotic adjustment substance accumulation and antioxidant enzyme activities. The appropriate concentration was 15 and 20mg/L.

Key words: maize; seedling stage; drought stress; 2-(3,4-dichlorophenoxy)-triethylamino(DCPTA); hydroponics

干旱因其发生频率高、分布面积大、时空分布不均匀、持续时间长的特点,严重影响着农业生产,最突出的表现是作物产量下降^[1-4],每年因干旱造成的粮食减产近乎于其他所有非生物胁迫因子的总和^[5],严重威胁中国粮食安全^[6-8]。据统计,仅2013年中国农作物因旱受灾 $1.12 \times 10^7 \text{ hm}^2$ 、成灾 $6.93 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 、绝收 $1.50 \times 10^6 \text{ hm}^2$,造成粮食损失2 064万t、经济作物损失404亿元,直接经济损失125亿元^[9]。玉米是全球种植最广泛的作物之一,是中国极其重要的粮食、饲料、经济兼用作物。进入21世纪以来,干旱发生频次和程度呈加剧趋势,严重影响玉米的生长发育和产量^[10]。因此,研究提高玉米抗旱性的措施,对于保障中国玉米的增产稳产具有十分重要的意义。

伴随科学技术水平的提升和农业生产的需求,通过作物化控技术来调控作物的生长发育进程已逐步成为农业生产中重要的措施之一。近年来,植物生长调节剂因其显著、高效的调节效应已被广泛地应用于农业生产中^[11]。在提高作物抗逆能力方面,植物生长调节剂如烯效唑、甜菜碱、亚精胺能通过改变植物生长发育和生理活性来增强作物对环境适应性和资源利用能力。叔胺类活性物质2-(3,4-二氯苯氧基)三乙胺[2-(3,4-dichlorophenoxy)-triethylamino,DCPTA]具有调控作物生长的作用,并已在棉花、豆类、甜菜、玉米、小麦、水稻、油菜、烟草等作物上证实^[12],但这些研究主要集中在非生物胁迫环境下生理效应方面,关于其对作物抗逆性影响的报道较少。由于聚乙二醇(PEG-6000)高渗溶液模拟干旱具有易操作、重复性好的特点已普遍用于植物的抗旱性研究^[13-15],而有关其在室内水培条件下玉米苗期抗旱性鉴定的适宜浓度目前尚无定论。

因此,本试验以玉米自交系‘昌7-2’为材料,采用水培方式研究了不同模拟干旱胁迫程度(10%、12.5%、15%、17.5%、20%、22.5%、25% PEG-6000)及15% PEG-6000模拟干旱胁迫下不同浓度(5、10、15、20、25、30mg/L)DCPTA处理后幼苗相应生理指标的变化规律,以期筛选出适用于室内水培条件下玉米自交系苗期抗旱性鉴定的适宜PEG-6000浓度,为鉴定玉米自交系苗期的抗旱性提供依据,同时筛选出15% PEG-6000干旱胁迫条件下提高玉米幼苗抗旱能力较为明显的DCPTA浓度,为其在玉米生产上的实际应用提供理论与技术依据。

1 材料和方法

1.1 实验材料

PEG-6000(聚乙二醇)由天津天泰精细化学品有限公司提供,DCPTA(98%可湿性粉剂)由郑氏化工集团提供。‘昌7-2’是近年来中国玉米育种及种子生产的一个代表性骨干自交系,以其为亲本的玉米单交种在中国已大面积推广应用。本实验选用玉米自交系为实验材料具有农艺性状整齐一致,遗传基础单纯的特点,结果可靠,同时可为后续以‘昌7-2’为材料探究DCPTA影响玉米抗旱性的分子机制选择PEG-6000浓度及DCPTA浓度提供依据。

1.2 实验设计

将饱满一致的种子消毒处理(5% NaClO溶液浸泡5 min后用蒸馏水洗净)后置于24~26℃培养箱黑暗中萌发,待生根长苗后移入盛有1/2 Hoagland培养液的育苗盆中,在幼苗长至三叶一心时对其进行处理。

1.2.1 水培条件下玉米苗期抗旱性鉴定的PEG-6000浓度筛选

实验共设7个胁迫梯度,即采用

10%、12.5%、15%、17.5%、20%、22.5%、25% PEG-6000 的 1/2Hoagland 培养液进行模拟干旱胁迫, 分别标记为 P1、P2、P3、P4、P5、P6、P7, 以 0% 为对照组(CK)。

1.2.2 15% PEG-6000 模拟干旱胁迫下 DCPTA 浓度筛选 配制 5、10、15、20、25、30 mg/L 6 个浓度 DCPTA 的 1/2Hoagland 培养液, 处理 24 h 后加入 PEG-6000 使其浓度为 15%, 分别标记为 D1、D2、D3、D4、D5、D6。

每一处理设置 3 次重复, 每天于 8:00、20:00 补充育苗盆内的水分并调节 pH 使其值稳定在 6.3±0.1, 以保持幼苗生长环境渗透势、DCPTA 浓度和 pH 恒定。干旱处理 4 d 后取样测定相关指标。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 幼苗干、鲜重 用蒸馏水将幼苗冲洗干净, 将根部和地上部分开, 并擦干水分称取根部和地上部鲜重; 再将鲜样品置于 105 °C 烘箱中杀青 20 min 后转至 80 °C 烘箱烘至恒重, 称取根部和地上部的干重。

1.3.2 叶片相对含水量 称取叶片鲜重(m_x)后, 将其浸没于蒸馏水中, 并在黑暗条件下放置 24 h 后称饱和重(m_b), 再将其置于 80 °C 恒温烘箱中烘至恒重后称其干重(m_g), 根据以下公式计算叶片相对含水量(RWC):

$$RWC(\%) = [(m_x - m_g) / (m_b - m_g)] \times 100\%$$

1.3.3 幼苗抗氧化酶活性和丙二醛含量 超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶

(CAT)活性的测定参照王学奎^[16]的方法, 分别采用氮蓝四唑法、愈创木酚法和高锰酸钾滴定法进行测定; 丙二醛(MDA)含量参照郝再彬^[17]的方法采用 TBA 显色法进行测定。

1.3.4 叶绿素含量 采用 CCM-200⁺ 叶绿素测定仪进行测定, 以 SPAD 值代表叶绿素相对含量。

1.4 数据处理

数据分析采用 Microsoft Excel 2007、DPS (V7.05) 数据分析系统。

2 结果与分析

2.1 PEG-6000 和 DCPTA 对玉米幼苗生物量的影响

地上部和根部的鲜重、干重是评价幼苗抗逆性的常用量化指标。由表 1 可知, P1 处理玉米幼苗地上部的鲜重、干重较 CK 分别下降 3.86%、3.56%, 而其根部、鲜重分别提高了 6.65%、5.39%, 但都未达到显著水平; 随 PEG-6000 浓度的继续升高, 各干旱胁迫程度处理玉米幼苗地上部、根系的干重和鲜重均呈逐渐下降趋势, 且 P3 及更高浓度处理与 CK 差异均达到显著水平; P5、P6、P7 处理间的根部干、鲜重和地上部干重差异不显著, P6、P7 处理间的地上部分鲜重差异不显著。可见, 低浓度(10% 以下)的 PEG-6000 对幼苗根系生长具有一定促进作用, 玉米幼苗对轻度干旱胁迫具有一定适应性; 但 PEG-6000 浓度达到 15% 时幼苗的生长明显受到抑制。

表 1 PEG-6000 和 DCPTA 处理下玉米幼苗地上部和根系生物量的变化

Table 1 The fresh weight, dry weight of shoot and root under PEG-6000 and DCPTA treatments

代号 Code	处理 Treatments	鲜重 Fresh weight/g		干重 Dry weight/g	
		地上部 Shoot	根部 Root	地上部 Shoot	根部 Root
CK	0% PEG-6000	0.829±0.012 a	1.188±0.009 ab	0.140±0.003 a	0.110±0.007 ab
P1	10% PEG-6000	0.797±0.021 ab	1.252±0.046 a	0.135±0.009 ab	0.117±0.014 a
P2	12.5% PEG-6000	0.766±0.011 bc	1.180±0.013 ab	0.126±0.003 abc	0.106±0.011 abc
P3	15% PEG-6000	0.727±0.032 cd	1.006±0.088 c	0.116±0.006 cd	0.086±0.006 cde
P4	17.5% PEG-6000	0.683±0.008 de	0.803±0.123 d	0.102±0.011 de	0.075±0.004 de
P5	20% PEG-6000	0.649±0.029 e	0.679±0.027de	0.091±0.005 ef	0.070±0.003 de
P6	22.5% PEG-6000	0.584±0.012 f	0.590±0.071 e	0.087±0.003 f	0.068±0.006 e
P7	25% PEG-6000	0.542±0.007 f	0.559±0.023 e	0.084±0.002 f	0.067±0.002 e
D1	15% PEG-6000+5 mg/L DCPTA	0.763±0.004 bc	1.055±0.013 bc	0.123±0.004 bc	0.091±0.008bcd
D2	15% PEG-6000+10 mg/L DCPTA	0.784±0.005ab	1.095±0.030 bc	0.133±0.003ab	0.100±0.005abc
D3	15% PEG-6000+15 mg/L DCPTA	0.803±0.006 ab	1.185±0.006 ab	0.135±0.001 ab	0.109±0.012 ab
D4	15% PEG-6000+20 mg/L DCPTA	0.804±0.006 ab	1.186±0.011ab	0.134±0.004ab	0.110±0.003 ab
D5	15% PEG-6000+25 mg/L DCPTA	0.788±0.007 b	1.139±0.026abc	0.128±0.003 abc	0.104±0.002 abc
D6	15% PEG-6000+30 mg/L DCPTA	0.781±0.009 b	1.083±0.048 bc	0.126±0.005 abc	0.098±0.008abc

注: 数据以平均值±标准差表示; 同列不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平; 下同。

Note: Data are expressed as mean±standard deviation; Different normal letters within same column indicate significant difference among treatments at 5% level; The same as below.

同时,在 15% PEG-6000 胁迫下,随着 DCPTA 浓度的增加,玉米幼苗地上部和根系的干重、鲜重均呈先上升后下降的趋势,并均在 D4 处理下达到最大值,且 DCPTA 处理大多不同程度地高于 P3 处理。其中,与 P3 处理相比,D2~D6 处理地上部鲜重、D2~D4 处理地上部干重以及 D3~D4 处理根系干、鲜重均显著增加,尤其是 D2~D4 处理地上部鲜重、D2~D6 处理地上部干重、D1~D6 处理根系鲜重、D2~D6 处理根系干重均与相应用对照(CK)无显著差异,且 D3、D4 处理各生物量指标数值接近于 P1 处理(10% PEG-6000)。说明适宜浓度的 DCPTA 能显著缓解玉米幼苗生长受到的的干旱伤害,并以 15 和 20 mg/L DCPTA 处理效果最佳,均能显著缓解 15.0% PEG-6000 模拟干旱胁迫对玉米幼苗生长的抑制作用。

2.2 PEG-6000 和 DCPTA 对玉米幼苗叶片相对含水量的影响

叶片的相对含水量(RWC)可反映植物体在逆境环境下水分的亏缺程度。由图 1 可知,随着 PEG-6000 浓度的升高,玉米幼苗叶片相对含水量总体呈下降趋势,且降低速度表现出慢-快-慢的特点。其中,叶片相对含水量在 PEG-6000 浓度介于 0~12.5% 之间时下降缓慢,且当 PEG-6000 浓度为 10% (P1) 时与 CK 无显著差异,当 PEG-6000 浓度达到 12.5% (P2) 已与对照差异达到显著水平;当 PEG-6000 浓度介于 P2~P4 之间时,叶片相对含水量降幅进一步加大,且 P2、P3、P4 处理间均差异显著;当 PEG-6000 浓度于 P4~P5 之间时,叶片相对含水量降幅又逐渐减小。说明玉米幼苗具有适应轻度干旱胁迫的能力,且叶片相对含水量对 12.5%-17.5% PEG-6000 模拟干旱胁迫的反应更为敏感。

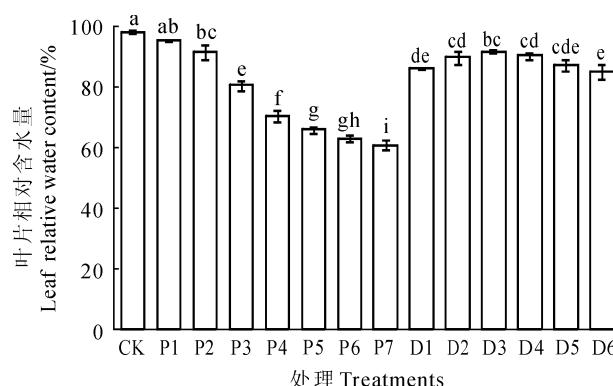


图 1 PEG-6000 和 DCPTA 对叶片含水量的影响

Fig 1 Effect of PEG-6000 and DCPTA on leaf relative water content

同时,在 15% PEG-6000 模拟干旱胁迫下,玉米幼苗叶片相对含水量随 DCPTA 浓度的增加呈先升后降的变化趋势。其中,叶片相对含水量在 DCPTA 浓度为 10(D2)、15(D3)、20(D4) mg/L 时显著高于未经 DCPTA 处理(15% PEG-6000),并在浓度为 15 mg/L 时达到最大值,此时与 12.5% PEG-6000 处理叶片相对含水量差异不显著,但仍显著低于对照水平。说明适宜浓度的 DCPTA 处理能够显著减轻干旱胁迫造成的叶片失水程度,从而提高幼苗对干旱胁迫的适应性,减少干旱胁迫下叶片水分的散失,增强其耐旱能力。

2.3 PEG-6000 和 DCPTA 对玉米幼苗叶片 SPAD 的影响

叶绿素是常见的衡量植物抗旱性的指标之一。随着 PEG-6000 浓度的升高,玉米幼苗叶片 SPAD 值呈逐渐下降趋势,且均显著低于对照(图 2)。其中,叶片 SPAD 值在 PEG-6000 浓度介于 P1~P4 之间时降幅较大,且 P1~P4 处理间差异显著;当 PEG-6000 浓度大于 17.5% 时(P4),SPAD 值继续下降,说明低浓度 PEG-6000 模拟干旱胁迫就可使叶绿素大量降解。

同时,在 15.0% PEG-6000 模拟干旱胁迫下,玉米幼苗叶片 SPAD 值随 DCPTA 浓度的增加呈先升后降趋势,但均不同程度地高于未经 DCPTA 处理(15.0% PEG-6000),并除 5 mg/L DCPTA 处理(D1) 外均达到显著水平(图 3)。其中,叶片 SPAD 值在 DCPTA 浓度小于 15 mg/L(D3) 时增幅逐渐减小,而在介于 15 和 20 mg/L 之间基本平稳,与 P2 和 P3 处理差异不显著,在大于 20 mg/L(D4) 时下降。说明适宜浓度 DCPTA 可有效缓解干旱胁迫下玉米幼苗叶绿素含量的下降,抑制叶绿素分解,但随着 DCPTA

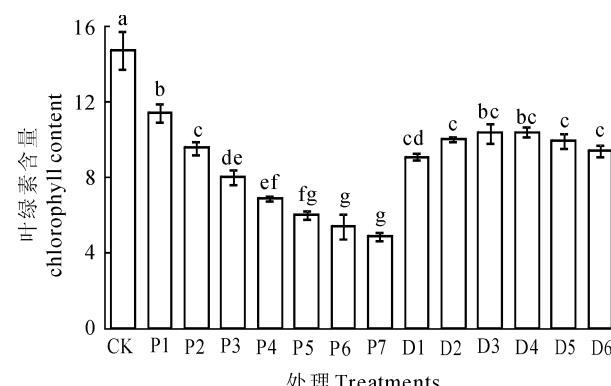


图 2 PEG-6000 和 DCPTA 对叶绿素含量 (SPAD) 的影响

Fig 2 Effect of PEG-6000 and DCPTA on chlorophyll content (SPAD)

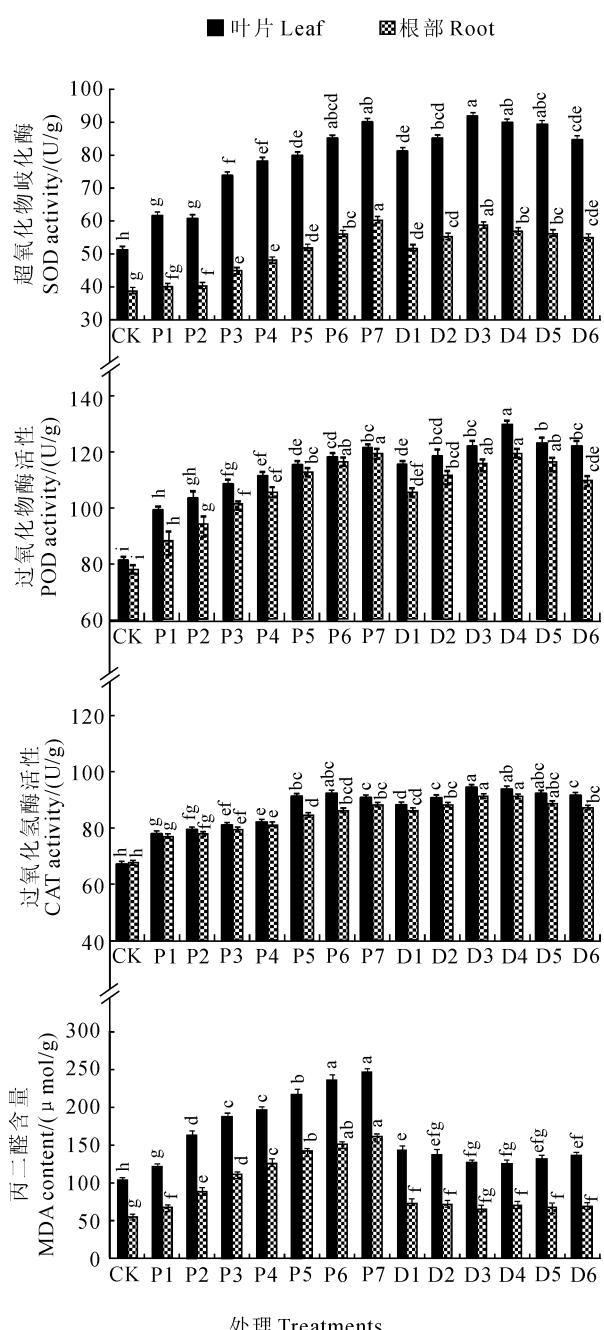


图 3 PEG-6000 和 DCPTA 处理下玉米幼苗抗氧化酶活性和丙二醛含量的变化

Fig. 3 The activities of antioxidant enzymes and MDA content in maize seedling under PEG-6000 and DCPTA treatments

浓度的增加其缓解效应有下降的趋势,其中以 15 和 20 mg/L DCPTA 的效果较佳。

2.4 DCPTA 对水分胁迫下玉米幼苗叶片和根系抗氧活酶活性的影响

超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)及过氧化氢酶(CAT)是植物活性氧清除系统中重要的酶,

能维持活性氧自由基产生与清除系统的平衡,丙二醛(MDA)是脂质过氧化作用的主要产物之一,其含量的高低在一定程度上反映脂膜过氧化作用水平和膜结构的受害程度。由图 3 可知,各处理幼苗叶片和根系中 3 种酶活性均不同程度高于清水对照处理,并以 SOD 活力增幅最大(叶片为 16.12%~72.87%,根系为 6.60%~60.12%),POD 活力增幅次之(叶片为 22.31%~49.57%,根系为 13.39%~54.20%),CAT 活力增幅最小(叶片为 15.78%~35.00%,根系为 13.90%~30.92%)。在 15% PEG-6000 模拟干旱胁迫下,玉米幼苗叶片和根系中 3 种酶活性随 DCPTA 处理浓度的增加均表现出先升高后降低的趋势,并均在 D3 或者 D4 处理中达到最大值;各 DCPTA 处理幼苗叶片和根系中 3 种酶活性均不同程度高于 P3 处理(15% PEG-6000),并大多达到显著水平;3 种抗氧化酶中, SOD 活力增幅最大(叶片为 11.29%~25.60%,根系为 15.18%~27.73%),POD 活力增幅次之(叶片为 6.73%~19.90%,根系为 4.26%~17.97%),CAT 活力增幅最小(叶片为 8.78%~16.34%,根系为 8.30%~14.78%);各处理幼苗叶片中 3 种抗氧化酶活性均大于相应的根系。另外,各处理幼苗叶片和根系中 MDA 含量随 DCPTA 处理浓度的增加呈先降后升趋势,且最低值均出现在 D3 处理中;各 DCPTA 处理幼苗的 MDA 含量均显著低于 P3 处理;同样,各处理根系中 MDA 含量明显低于相应叶片中含量。以上结果说明 SOD 对干旱胁迫反应更敏感,是玉米适应干旱胁迫的主要抗氧化酶;DCPTA 可显著促进玉米幼苗抗氧化系统活性上升,抑制活性氧的产生,防止活性氧大量积累,显著削弱由活性氧引起的膜脂过氧化作用,并以 15 和 20 mg/L DCPTA 处理的效果较佳。

2.5 DCPTA 对水分胁迫下玉米幼苗可溶性蛋白和游离脯氨酸含量的影响

可溶性蛋白和脯氨酸是重要的渗透保护物质,可提高植株对渗透胁迫的平衡能力,有利于植物体在干旱逆境中维持体内正常所需水分,是植物适应干旱的一种表现形式。由图 4 可知,可溶性蛋白和脯氨酸含量均随 PEG-6000 浓度升高而增大,与 CK 相比,叶片和根系可溶性蛋白含量增幅分别为 16.53%~41.64% 和 17.22%~32.04%,脯氨酸含量增幅分别为 11.08%~50.63% 和 11.60%~58.84%。在 15% PEG-6000 模拟干旱胁迫下,DCPTA 处理玉米幼苗叶片和根系可溶性蛋白含量分别显著高于 P3 处理 2.33%~7.41% 和 12.27%~16.77%,并均以 D4、

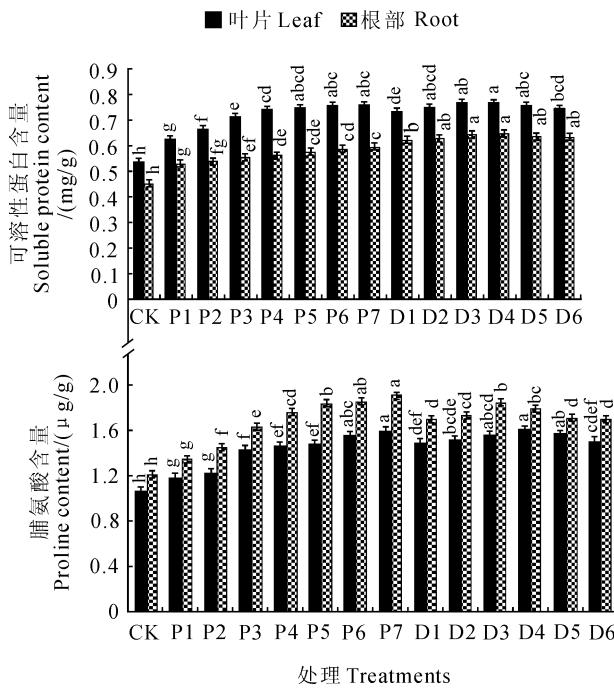


图 4 PEG-6000 和 DCPTA 处理下玉米幼苗可溶性蛋白和游离脯氨酸含量的变化

Fig. 4 The soluble protein and proline content in maize seedling under PEG-6000 and DCPTA treatments

D5、D6 相对较高;同时,玉米幼苗叶片和根系脯氨酸含量随 DCPTA 处理浓度增加表现出先升高后降低的趋势,叶片和根系脯氨酸含量最大值分别出现在 20 和 25 mg/L DCPTA 处理中;各 DCPTA 处理脯氨酸含量均不同程度地高于 P3 处理,叶片和根系增幅分别为 4.23%~12.68% 和 4.50%~13.29%。说明 DCPTA 可显著提高水分胁迫下玉米幼苗渗透调节能力,适应干旱胁迫环境,维持其细胞水势和相关代谢相对稳定。

3 讨 论

3.1 室内水培条件下鉴定玉米苗期耐旱性的适宜 PEG-6000 浓度

PEG 是亲水性很强的大分子有机物,其降低溶液水势作用与加入量成反比,且不被植物所吸收。根系是利用低于土壤水势的细胞水势进行吸水,当溶液水势降低时根系不易从周围环境吸收水分造成干旱胁迫。因此,室内水培条件下 PEG 可作为作物抗旱性选择剂或水分胁迫剂模拟干旱胁迫,是科研实验中常用的手段^[18]。抗旱性鉴定时使用 PEG 配成高渗溶液模拟田间干旱条件进行幼苗培养,根据幼苗长势等鉴定植株的抗旱能力,此方法操作简易,周期短,筛选结果与土壤试验结果基本一致^[13]。但用于抗旱性鉴定的适宜 PEG 浓度在作物间存在差异。例如,

孟健男等^[19]利用 20% PEG 溶液模拟干旱胁迫对‘东农冬麦 1 号’和‘济麦 22’小麦进行抗旱性鉴定,通过生理指标综合分析对比两品种的抗旱能力;李自超^[20]等通过比较 PEG 胁迫下水、陆稻的生长势,确定 15%~20% PEG 可用来鉴定水稻的抗旱性。周玉丽^[21]以 20% PEG-6000 溶液为渗透介质模拟干旱胁迫条件比较了 30 个大豆品种发芽期与耐旱性相关的形态和生理指标的差异;舒英杰等^[22]初步确定了室内采用 PEG-6000 浸种法模拟干旱胁迫鉴定大豆发芽期耐旱性的适宜浓度为 15%~25%。

形态结构与作物水分吸收和散失关系密切,植株在水分胁迫下体内细胞在结构、生理代谢上会发生一系列适应性改变,最终在形态上有所表现,因而部分形态指标可用于抗旱性鉴定。本实验中,随 PEG-6000 浓度增加,玉米幼苗的生物量、相对含水量、SPAD 值呈下降趋势,低于 10% PEG-6000 对幼苗生长的抑制作用不显著,但随着 PEG-6000 浓度的升高,幼苗生长明显受到抑制,幼苗叶片和根系的生物量、相对含水量、叶绿素含量显著下降,且 PEG-6000 浓度在 12.5%~17.5% 间时各指标降幅最大,在 PEG-6000 浓度达到 15% 时以上各指标与清水对照(CK)差异达到显著水平。可初步确定室内采用水培方式 PEG-6000 模拟干旱胁迫鉴定玉米苗期耐旱性的适宜浓度为 15%。

3.2 DCPTA 与干旱胁迫下玉米幼苗生长的关系

研究发现 DCPTA 可促进非逆境胁迫下四季豆、大豆、玉米幼苗植株生长、产量的增加^[23~25]。顾万荣等^[26]研究表明,适宜浓度 DCPTA 培养基培养的拟南芥发芽率、发芽势提高,胚根、胚轴长度增加,同时促进其储藏物质的转化。本实验中,DCPTA 处理能不同程度地缓解 15% PEG-6000 模拟干旱胁迫对玉米幼苗生长的抑制作用,并对地上部的生长的效果尤为明显,其适宜浓度为 15 和 20 mg/L。

光合作用是植物生长的基础,水分是影响光合作用最重要的因子之一。叶片光合色素含量是反映植物光合能力的一个重要指标,而干旱胁迫会引起叶绿素分解速率大于合成速率,进而影响原初反应和激发能的传递,导致光能吸收效率下降。研究表明,随着 PEG 浓度加大,水稻幼苗受到的干旱胁迫程度加大,其叶绿素总量和 Chl a、Chl b 含量均开始下降,并使光合机构吸收和传递光能效率下降^[27];非逆境条件下,DCPTA 处理可增加小麦^[28]、玉米^[25]幼苗叶绿素含量。在干旱条件下保持叶绿素含量的稳定有助于植株在逆境中的生存生长。曲天明^[29]研究表明

DCPTA 处理可以显著提高玉米幼苗叶片的 SPAD 值,有助于提高了光合作用的效率;原立地等^[30]报道,喷施 DCPTA 处理能够显著缓解低温胁迫下玉米叶片叶绿素含量的下降。本研究中随干旱胁迫程度的加重,幼苗叶片 SPAD 值呈下降趋势,干旱胁迫使叶片叶绿素含量降低;进一步分析发现,DCPTA 处理在一定程度上抑制了玉米幼苗叶绿素的降解,这可能与 DCPTA 提高干旱胁迫下抗氧化酶系统的活性,增强活性氧的清除作用,维持叶绿体膜系统的稳定性有关。

3.3 DCPTA 与干旱胁迫下玉米幼苗抗氧化酶活性的关系

逆境胁迫可引起细胞内活性氧水平增加而导致氧化胁迫^[31-33],一般认为植物抗逆性的强弱与其抗氧化酶活性密切相关^[34-36]。SOD、POD 和 CAT 是植物内重要的保护酶,它们既有分工又有合作,在抗逆代谢中起着重要的作用。干旱胁迫可诱导抗氧化酶基因的表达。近年来研究发现 DCPTA 不仅能提高作物产量和改善品质,而且在增强植物抗逆性方面也具有正向作用。朱恒光等^[37]研究表明低温胁迫下 DCPTA 处理可使玉米幼苗体内抗氧化酶(SOD、POD 和 CAT)活性升高,MDA 累积量下降。张翯等^[38]研究表明盐胁迫下 DCPTA 处理可使玉米幼苗 MDA 含量降低 21.6%。本研究结果与前人一致,DCPTA 处理使干旱胁迫下玉米幼苗叶片和根系的 SOD、POD 和 CAT 活性增加,MDA 含量降低,其适宜浓度为 15 和 20 mg/L。

3.4 DCPTA 与干旱胁迫下玉米幼苗脯氨酸及可溶性蛋白含量的关系

干旱条件下,植物体内积累脯氨酸和可溶性蛋白等渗透调节物质是植物适应逆境的自身调节方式,其

作用是提高细胞溶质含量,增强其渗透调节能力。干旱胁迫下,冠菌素、亚精胺处理能显著提高玉米幼苗叶片中的脯氨酸含量^[39];王芳等^[40]发现,水杨酸处理甜玉米种子可提高玉米幼苗脯氨酸含量,表明生理活性物质可通过增强植物体内脯氨酸的含量来维持植株的正常形态和生理代谢,增强植物对干旱胁迫的适应能力。朱恒光等^[37]研究表明 DCPTA 可显著提升低温胁迫下玉米幼苗可溶性蛋白含量,增强植株抗低温能力。在本实验中,DCPTA 处理诱导了干旱胁迫下玉米幼苗叶片内脯氨酸和可溶性蛋白的积累,这与前人关于生理活性物质通过提高植物体内脯氨酸和可溶性蛋白含量来增强玉米抗逆性的结论一致。

综上所述,本研究采用不同浓度(10%、12.5%、15%、17.5%、20%、22.5%、25%)的 PEG-6000 模拟干旱对室内水培条件下的玉米幼苗进行处理,通过幼苗地上部和根系的干重、鲜重,以及叶片相对含水量、SPAD 值等幼苗长势指标比较分析,认为室内水培条件下采用模拟干旱胁迫鉴定玉米苗期抗旱性的适宜 PEG-6000 浓度为 15%。在 15% PEG-6000 干旱胁迫条件下,DCPTA 可提高玉米幼苗抗氧化酶(SOD、POD、CAT)活性,增强植株对活性氧的清除能力,减轻膜脂过氧化程度,降低丙二醛(MDA)含量,抑制叶绿素分解,促进幼苗生长;同时,通过促进幼苗渗透调节物质(可溶性蛋白、脯氨酸)的积累,增强渗透调节能力,维持叶片较高的相对含水量;在 15% PEG-6000 干旱胁迫条件下,DCPTA 的适宜浓度为 15 和 20 mg/L。另外,高浓度 DCPTA 对玉米幼苗生长是否具有抑制作用,以及室内水培条件通过 PEG-6000 模拟干旱与生产实践中是否一致等问题仍需进一步研究,这些研究将为 DCPTA 在玉米生产上的应用提供理论与技术依据。

参考文献:

- [1] PANZZO J, EGGLESTON H. Rate and duration of grain filling and grain nitrogen accumulation of wheat cultivars grown in different environments[J]. *Aust. J. Agr. Res.*, 1999, **50**(6): 1 007-1 015.
- [2] LORETO F, CENTRITTO M. Leaf carbon assimilation in a water limited world[J]. *Plant Biosyst* 2008, **142**(1): 154-161.
- [3] PARENT B, TARDIEU F. Can current crop models be used in the phenotyping era for predicting the genetic variability of yield of plants subjected to drought or high temperature[J]. *J. Exp. Bot.* 2014, **65**(21): 6 137-6 139.
- [4] JACKSON R B, SPERRY J S, DAWSTON T E. Root water up-
take and transport: using physiological processes in global prediction[J]. *Trends in Plant Science*, 2000, **5**(11): 482-488.
- [5] 刘春晴. 干旱胁迫下甘蓝型油菜消减文库的构建及分析[D]. 武汉:华中农业大学, 2012.
- [6] 张淑杰,张玉书,纪瑞鹏,等. 东北地区玉米干旱时空特征分析[J]. 干旱地区农业研究, 2011, **29**(1): 231-236.
- [7] ZHANG S J, ZHANG Y S, JI R P, et al. Analysis of spatio-temporal characteristics of drought for maize in Northeast China [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2011, **29**(1): 231-236.
- [8] 马建勇. 东北地区高温干旱对玉米产量影响的情景分析[D]. 北京:中国农业科学院, 2012.

- [8] 姜晓艳,刘树华,马明敏,等.中国东北地区近百年气温序列的小波分析[J].气候变化研究发展,2008,4(2):122-125.
- JIANG X Y,LUI S H,MA M M, et al. A wavelet analysis of the temperature time series in northeast china during the last 100 years [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2008, 4 (2): 122-125.
- [9] 陈群,耿婷,侯雯嘉,等.近20年东北气候变暖对春玉米生长发育及产量的影响[J].中国农业科学,2014,47(10):1904-1916.
- CHEN Q,GENG T,HOU W J, et al. Impacts of climate warming on growth and yield of spring maize in recent 20 years in Northeast China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47 (10): 1 904- 1 916.
- [10] 李博,王刚卫,田晓莉,等.不同干旱方式和干旱程度对玉米苗期根系生长的影响[J].干旱地区农业研究,2008,26(5):148-152.
- LI B,WANG G W, TIAN X L, et al. Effects of different drought manners and different water availabilities on root growth of maize (*Zea mays*) seedlings [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2008, 26(5): 148-152.
- [11] 傅华龙,何天久,吴巧玉.植物生长调节剂的研究与应用[J].生物加工过程,2008,6(7):7-12.
- FU H L,HE T J,WU Q Y. Research and application on plant growth regulators[J]. *Chinese Journal of Bioprocess Engineering*, 2008, 6(7): 7-12.
- [12] 谢腾龙,朱恒光,顾万荣,等.水分胁迫下DCPTA对寒地春玉米种子萌发及幼苗生长的影响[J].农业现代化研究,2015,36(1):144-148.
- XIE T L,ZHU H G,GU W R, et al. Effect of DCPTA on spring maize seed germination and seedling growth under water stress condition in China cold region[J]. *Research of Agriculture Modernization*, 2015, 36(1): 144-148.
- [13] 杨春杰,张学昆,邹崇顺,等.PEG-6000模拟干旱胁迫对不同甘蓝型油菜品种萌发和幼苗生长的影响[J].中国油料作物学报,2007,29(4):425-430.
- YANG C J,ZHANG X K,ZOU C S, et al. Effects of drought simulated by PEG-6000 on germination and seedling growth of rapeseed(*Brassica napus L*) [J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2007, 29(4): 425-430.
- [14] 李松,周磊,郭传龙,等.2种玉米幼苗耐旱性生理机制研究[J].西北植物学报,2013,33(5):976-983.
- LI S ,ZHOU L, GUO C L, et al. Physiological mechanism of maize seedlings[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalis Sinica*, 2013, 33(5): 976-983.
- [15] 陈晓丽,李红兵,王林林,等.过表达 $IbOr$ 基因甘薯增强抗旱性的生理机制[J].西北植物学报,2015,35(3):540-545.
- CHEN X L,LI H B,WANG L L, et al. Overexpression of $IbOr$ gene confers enhanced tolerance to water stress in sweet potato (*Ipomoea batatas L.*) [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalis Sinica*, 2015, 35(3): 540-545.
- [16] 王学奎.植物生理生化实验原理与技术[M].2版北京:高等教育出版社,2006.
- [17] 郝再彬,苍晶,徐仲.植物生理实验[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2004.
- [18] 张立军,樊金娟,阮燕晔,等.聚乙二醇在植物渗透胁迫生理研究中的应用[J].植物生理学通讯,2004,40(3):361-364.
- ZHANG L J,FAN J J,RUAN Y H, et al. Application of polyethylene glycol in the study of plant osmotic stress physiology [J]. *Plant Physiology Journal*, 2004, 40(3): 361-364.
- [19] 孟健男,于晶,苍晶,等.PEG胁迫对两种冬小麦苗期抗旱生理特性的影响[J].东北农业大学学报2011,42(1):40-44.
- MENG J N, YU J, CANG J, et al. Effect of PEG stress on drought resistance physiological indices of two winter wheats at seedling stage[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2011, 42(1): 40-44.
- [20] 李自超,刘文欣,赵笃乐.PEG胁迫下水、陆稻幼苗生长势比较研究[J].中国农业大学学报2001,6(3):16-20.
- LI Z C,LIU W X,ZHAO D L. Comparison of growing tendency during young seedling between paddy rice and upland rice under PEG water-stress [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2001, 6(3): 16-20.
- [21] 周玉丽,朱平,胡能兵,等.不同大豆品种发芽期耐旱性评价及耐旱种质筛选[J].大豆科学2015,34(4):616-623.
- ZHOU Y L,ZHU P,HU N B, et al. Evaluation of drought resistance of different soybean at seed germination stage and the screening of germplasm [J]. *Soybean Science*, 2015, 34 (4): 616-623.
- [22] 舒英杰,周玉丽,时侠清,等.大豆种子发芽期耐旱性鉴定的适宜PEG-6000浓度筛选[J].大豆科学,2015,34(1):56-59.
- SHU Y J,ZHOU Y L,SHI X Q, et al. Screening of appropriate PEG-6000 concentration for the identification of soybean drought tolerance at germination stage[J]. *Soybean Science*, 2015, 34(1): 56-59.
- [23] 全瑞建,刘雪琴,耿慧敏,等.DCPTA浸种对四季豆苗期生长的影响[J].湖北农业科学,2011,50(9):1 823-1 825.
- TONG R J,LIU X Q,GENG H M, et al. Effects of DCPTA on the seedling growth of kidney bean[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2011, 50(9): 1 823-1 825.
- [24] 叶秀莲,杨成根,赵成美,等.增产胺在大豆上的应用效果初报[J].农药,1995,34(8):14-16.
- YE X L,YANG C G,ZHAO CH M, et al. Preliminary reportage on effect of application DCPTA to soybean [J]. *Pesticides*, 1995, 34(8):14-16.
- [25] 王颖,耿惠敏,赵晶晶.增产胺浸种对玉米幼苗生长的影响[J].贵州农业科学,2010,38(1):32-34.
- WANG Y,GENG H M,ZHAO J J. Effect of seed soaking with DCPTA on growth of maize seedlings[J]. *Guizhou Agricultural*

- Sciences, 2010, **38**(1): 32-34.
- [26] 顾万荣, 李召虎, 翟志席, 等. DCPTA 和 DTA-6 对拟南芥种子萌发和根系生长发育的影响[J]. 中国农学通报, 2008, **24**(6): 37-43.
- GU W R, LI SH H, ZH ZH X, *et al.* Effect of DCPTA and DTA-6 on the root growth and seed germination of arabidopsis [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2008, **24**(6):37-43.
- [27] 孙骏威, 杨 勇, 黄宗安, 等. 聚乙二醇诱导水分胁迫引起水稻光合下降的原因探讨[J]. 中国水稻科学, 2004, **18**(6):539-543.
- SUN J W, YANG Y, HUANG Z A, *et al.* Reason for photosynthetic declination in rice from water stress induced by polyethylene glycol(PEG) [J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2004, **18**(6): 539-543.
- [28] 耿惠敏, 俞晓红, 杜凤静, 等. DCPTA 浸种对小麦苗期生长的影响[J]. 广东农业科学, 2009, (12): 23-25.
- GENG H M, YU X H, DU F J, *et al.* Effects of DCPTA seed soaking on the growth of wheat seedling [J]. *Guang Dong Agricultural Sciences*, 2009, (12): 23-25.
- [29] 曲天明. DCPTA 对寒地玉米叶片光合特性及根系生长的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2014.
- [30] 原立地. DCPTA 增强玉米苗期耐冷性的生理机制及调控效应[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2013.
- [31] JABS T. Reactive oxygen intermediates as mediators of programmed cell death in plants and animals[J]. *Biochem. Pharmacol*, 1999, **57**(3):231-245.
- [32] PRASAD TK, Anderson MP, Martin BA, *et al.* Evidence for chilling induced oxidative stress in maize seedlings and a regulatory role for hydrogen peroxide[J]. *Plant Cell*, 1994, **6**(1):65-74.
- [33] BARTOSZ G. Oxidative stress in plants[J]. *Acta Physiol Plant*, 1997, **19**:47-64.
- [34] MALLICK N, MOHN FH. Reactive oxygen species response of algal cells[J]. *Plant Physiol.*, 2000, **157**(2):183-193.
- [35] VRANOVA E, INZE D, BREUSEGEM FV. Signal transduction during oxidative stress[J]. *Exp Bot*, 2002, **53**(372): 1-227-1-236.
- [36] Dat JF, Foyer CH, Scott IM. Change in salicylic acid and antioxidants during induced thermo tolerance in mustard seedlings[J]. *Plant Physiol.*, 1998, (4),118:1 455-1 461
- [37] 朱恒光, 顾万荣, 王泳超, 等. DCPTA 对低温下玉米叶片生理生化特征的影响[J]. 核农学报, 2015, **29**(3):549-556.
- ZHU H G, GU W R, WANG Y C, *et al.* Effects of DCPTA on the physiological and biochemical characteristics in maize seedling leaves under low temperature stress[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2015, **29**(3):549-556.
- [38] 张 翳, 顾万荣, 王泳超, 等. DCPTA 对盐胁迫下玉米苗期根系生长、渗透调节及膜透性的影响[J]. 生态学杂志, 2015, **34**(9): 2474-2481.
- ZHANG H, GU W R, WANG Y C, *et al.* Effect of DCPTA on root growth, osmotic adjustment and cell membrane permeability of maize seedlings under salt stress[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, **34**(9):2 474-2 481.
- [39] 汪宝卿, 李召虎, 段留生, 等. 冠菌素对玉米幼苗耐干旱胁迫的诱导效应[J]. 西北植物学报, 2007, **27**(4): 740-746.
- WANG B Q, LI ZH H, DUAN L SH, *et al.* Induced drought resistance of maize(*Zea mays L.*) seedling by coronatine [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2007, **27**(4):740-746.
- [40] 王 芳, 庞自学, 王汉宁, 等. 水杨酸浸种对甜玉米种子萌发及生理特性的影响[J]. 玉米科学, 2012, **38**(2): 74-77.
- WANG F, PANG Z X, WANG H N, *et al.* Effects of salicylic acid pretreatment on the seeds germination and physiological characteristics of sweet corn[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2012, **38**(2): 74-77.

(编辑:裴阿卫)