

亚低温与干旱胁迫对番茄幼苗渗透调节物质与抗氧化酶活性的影响

孙三杰, 李建明*, 姚勇哲, 陈凯利

(西北农林科技大学园艺学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要:以“金棚1号”番茄为试材,采用温室盆栽的方法研究亚低温与干旱胁迫对番茄幼苗渗透调节物质与抗氧化酶活性的影响。结果表明,随着亚低温干旱交互胁迫时间的延长,番茄幼苗叶片MDA含量、细胞膜相对透性均有不同程度的升高,可溶性蛋白含量、SOD活性变化趋势出现先升后降,POD活性呈现倒“V”型变化,CAT活性呈现“M”型变化,番茄幼苗叶片对亚低温胁迫的敏感程度大于干旱胁迫的影响。相关性分析与主成分分析显示:POD、CAT活性与细胞膜相对透性呈极显著负相关,与MDA含量呈显著负相关;SOD活性与MDA含量呈正相关,POD与CAT活性呈显著正相关。

关键词:番茄;亚低温;干旱胁迫;渗透调节;抗氧化酶活性

中图分类号: S626.5; Q945.78 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2012)03-0154-05

研究表明,单一逆境(如干旱、低温)条件下导致植物膜伤害程度增加和生物自由基累积加剧。然而对植物最致命的伤害往往是多个逆境因素的协同作用^[1,2]。如冬季干旱引起的渗透胁迫常与低温胁迫并存;低温削弱了水分的吸收和运输,也引起了渗透胁迫^[3]。

番茄(*Lycopersicon esculentum* Mill.)是一种对低温敏感的喜温作物,目前广泛应用于设施反季节栽培。然而在生产实践中,随着节能日光温室在我国大部分地区的推广应用,亚低温在生产种植中占据着较长的时间,成为影响番茄的生长发育、酶活性和干物质积累等的重要因素。前人针对番茄亚低温^[4-6]和干旱胁迫^[7]单一条件下生理特性变化的研究较多,而有关亚低温和干旱胁迫交互作用对番茄生理机制影响的报道较少。因此,考虑亚低温与干旱胁迫交互作用对番茄的影响,探讨番茄适应逆境的生理机制更具有实际意义。本研究以亚低温与干旱胁迫来模拟多逆境因子,探讨番茄幼苗叶片的渗透调节物质和抗氧化酶活性的变化,为番茄适应多胁迫因子的生理机制提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

分别于2011年1~3月在西北农林科技大学园

艺学院模型温室内进行。供试材料为“金棚1号”温室番茄专用品种。

1.2 试验设计及方法

采用营养钵育苗,育苗基质购自陕西杨凌西北农林科技大学新天地设施农业开发有限公司(营养成分含量:有机质含量 $\geq 50\%$,腐殖酸质量分数 $\geq 20\%$,pH值5.5~6.5)。待番茄幼苗长至三叶一心时移入高10 cm,直径5 cm的营养钵中,每盆装干土重为550 g。盆土为关中塿土,取自外界大田,土壤田间最大持水量为30.3%,土壤容重为1.3 g/cm³。每盆定植1株,共100盆。缓苗5 d结束后将100盆番茄分成两组,一组置于常温(15℃~25℃)温室内,另一组置于亚低温(8℃~15℃)温室内;将每个温室内的植株再分成2组,一组正常灌水(75%~90%土壤最大田间持水量),另外一组干旱处理(55%~70%土壤最大田间持水量)。试验设计见表1。至番茄第一花序的50%开放时结束处理。试验处理时间20 d,每个处理重复3次。

采用温室内覆盖小拱棚保温和铺地热线加温,温室湿帘降温进行温度调控。盆栽土壤含水量采用称重法进行测定与控制,于每日傍晚18:00进行称重灌水,由于试验时间较短,忽略考虑植株重量增加对水分控制水平的影响。

收稿日期:2012-01-21

基金项目:国家“十二五”科技支撑计划项目(2011BAD12B03)

作者简介:孙三杰(1987—),男,河南舞钢人,在读硕士,主要从事设施作物生理生态研究。E-mail: sanjie126@126.com。

* 通讯作者:李建明(1966—),男,陕西洛川人,教授,博士生导师,主要从事设施园艺栽培与生理生态研究。E-mail: lijianming66@163.com。

表1 试验设计

Table 1 Experiment treatment

| 处理 Treatment | 温度(℃) Temperature | 土壤水分(土壤最大田间持水量%) Soil water(percent of field capacity) |
|-----------------|----------------------|---|
| NH | 15~25 | 75%~90% |
| ND | 15~25 | 55%~70% |
| LH | 8~15 | 75%~90% |
| LD | 8~15 | 55%~70% |

1.3 测定方法及指标

1.3.1 抗氧化酶活性和渗透调节物质的测定 于处理第0、5、10、15、20天取番茄幼苗同一叶位的叶片,迅速低温保存,用于SOD、POD、CAT、MDA和可溶性蛋白含量、细胞膜相对透性的测定。

SOD活性的测定采用氮蓝四唑(NBT)光化学还原法测定^[8],以每克鲜重抑制NBT光化学还原50%为一个酶活性单位;CAT活性的测定采用紫外分光光度法^[8],以每克鲜重每分钟A240 nm处的光密度降低0.1的酶量为一个酶活性单位;POD活性测定采用愈创木酚法^[8],以每克鲜重每分钟A470 nm变化0.01的酶量为一个酶活性单位;MDA含量测定采用硫代巴比妥酸(TBA)法^[9],可溶性蛋白含量的测定采用考马斯亮蓝G-250染色法^[9];细胞膜相对透性的测定采用电导法^[9]。

1.3.2 H₂O₂组织化学定位 于处理20d取各个处理同一叶位的番茄幼苗叶片,采用Orozco-Cardenas和Ryan^[10]的方法进行H₂O₂组织化学定位。在过氧化物酶存在时,H₂O₂与二甲基联苯胺(3,3'-diaminobenzidine, DAB)反应生成深棕色的多聚产物,

根据颜色可以判断H₂O₂的位置及含量。

1.4 数据处理

文中的试验数据均为3次重复的平均值,采用Excel软件和SPSS16.0统计软件分析数据。

2 结果与分析

2.1 亚低温与干旱胁迫对番茄幼苗叶片MDA、可溶性蛋白含量和细胞膜相对透性的影响

丙二醛(MDA)作为膜脂过氧化产物,常用来表示逆境条件下膜伤害的程度。如图1A所示与常温相比,亚低温处理番茄幼苗叶片MDA含量升高,二者差异极显著($P < 0.01$)。另外无论是亚低温还是常温,干旱胁迫处理番茄幼苗叶片MDA含量均有不同程度的升高,其中20 dLD处理MDA含量为LH的125.17%,ND处理MDA含量为NH的189.21%,二者差异显著($P < 0.05$)。各处理20 d后MDA含量LD > LH > ND > NH,亚低温干旱交互作用下番茄幼苗叶片膜脂的氧化损伤程度更加严重,差异达到极显著水平($P < 0.01$)。

由图1B可知,随着处理时间的延长,亚低温和干旱处理番茄幼苗叶片可溶性蛋白含量均呈现先升高后降低的趋势,但均高于对照处理(NH)。其中,LD处理在第10天出现最大值,与其他处理差异极显著($P < 0.01$),LH、ND、NH处理在第15天出现最大值,说明番茄幼苗叶片在亚低温干旱交互条件下的渗透调节能力降低。亚低温条件下,干旱胁迫20 d可溶性蛋白含量明显降低,为正常灌水的78.42%;常温条件下,干旱胁迫20 d可溶性蛋白含量有所升高,为正常灌水的158.40%。

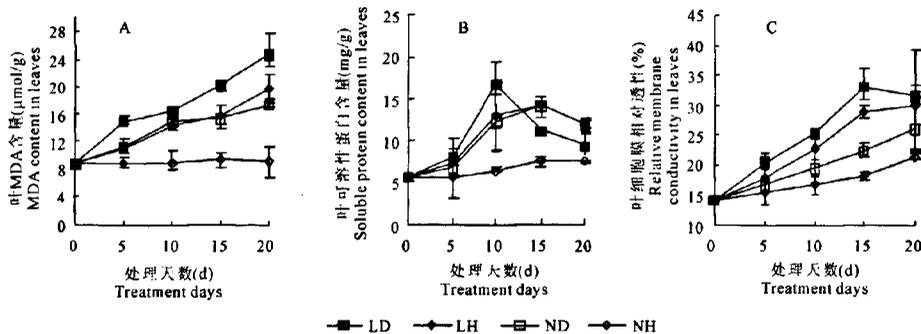


图1 亚低温与干旱胁迫对番茄幼苗叶片MDA(A)、可溶性蛋白含量(B)和细胞膜相对透性(C)的影响

Fig.1 Effect of sub-low temperature and drought stress on MDA content(A), soluble protein content(B) and relative membrane conductivity(C) in seeding stage tomato leaves

番茄幼苗叶片的细胞膜相对透性随着亚低温和干旱胁迫处理时间的延长而升高(图1C)。随着处

理时间的延长,对照处理(NH)番茄叶片细胞膜相对透性变化趋势平缓,亚低温处理的细胞膜相对透性

均高于常温处理,处理 15 d 二者差异极显著($P < 0.01$),处理 20 d,各处理番茄叶片细胞膜相对透性 $LD > LH > ND > NH$,处理间差异显著($P < 0.05$)。表明亚低温对于细胞膜相对透性的影响比干旱更明显。

2.2 亚低温与干旱胁迫对番茄幼苗叶片抗氧化酶活性的影响

图 2 显示,亚低温和干旱胁迫导致番茄叶片中 SOD 活性升高,但是却对 POD 和 CAT 活性产生了一些抑制作用,从图 2A 可以看出,SOD 活性在亚低温和干旱胁迫处理过程中先升后降,但是均高于常温灌水处理(NH)。亚低温干旱处理(LD)峰值出现在第 10 天,较对照(NH)显著提高了 15.01% ($P < 0.01$),亚低温和干旱单一处理峰值出现在第 15 天,较对照(NH)显著提高了 13.62% 和 12.78% ($P < 0.01$)。亚低温和干旱交互胁迫改变了 SOD 活性的

峰值变化。处理 20 d,SOD 活性随着胁迫时间的延长而下降,SOD 活性 $ND > LH > LD > NH$,处理间差异不显著($P > 0.05$)。从图 2B 可知,常温处理植株的 POD 活性高于亚低温处理,并且亚低温处理对番茄幼苗叶片 POD 活性的影响大于干旱处理。处理 10 d,亚低温胁迫较对照减少了 18.10%,差异极显著($P < 0.01$),干旱胁迫较对照减少了 7.43%,差异不显著($P > 0.05$)。亚低温干旱交互胁迫较对照减少了 47.02%,差异极显著($P < 0.01$)。说明亚低温干旱交互作用 POD 活性降低,自身清除 H_2O_2 的能力减弱。如图 2C 所示,在整个处理过程中,CAT 活性呈现“M”型变化,亚低温胁迫处理的番茄幼苗叶片 CAT 活性一直低于常温处理。处理结束 20 d 时,亚低温、干旱处理植株分别较对照下降 30.69% 和 12.52%,亚低温干旱交互胁迫处理植株较对照下降 33.45%。

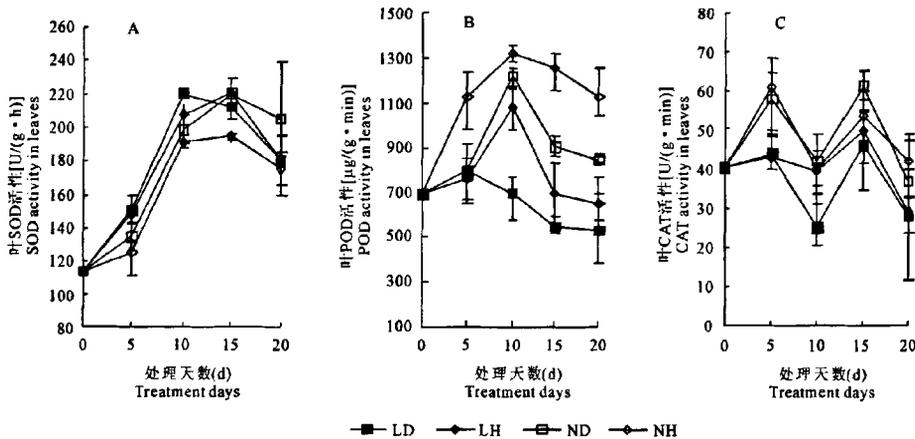


图 2 亚低温与干旱胁迫对番茄幼苗叶片 SOD(A)、POD(B)、CAT(C)活性的影响

Fig. 2 Effect of sub-low temperature and drought stress on SOD(A), POD(B), CAT(C) in seedling stage tomato leaves

2.3 亚低温与干旱胁迫对番茄幼苗叶片 H_2O_2 组织化学定位的影响

在过氧化物酶存在的条件下, H_2O_2 和 DAB 反应可生成肉眼可见的深棕色的多聚产物用来检验亚低温、干旱及其交互胁迫条件下番茄幼苗叶片中 H_2O_2 的原位积累。从图 3 可以看出,与 NH 相比,胁迫处理 20 d, LH、ND、LD 处理均明显增强了番茄叶片中 H_2O_2 的积累;且亚低温干旱交互胁迫处理的番茄叶片中 H_2O_2 的积累最多,其次是亚低温和干旱单一胁迫,而且二者处理的叶片中 H_2O_2 的积累差异不大。说明亚低温干旱逆境条件下番茄自身的活性氧动态平衡遭到破坏,三种胁迫诱导的番茄 H_2O_2 积累的变化与 MDA 含量和细胞膜相对透性的变化类似。

2.4 亚低温与干旱胁迫对番茄幼苗叶片各生理指标的相关性分析

亚低温、干旱胁迫下各生理指标的相关性分析见表 2。随着亚低温和干旱处理时间的延长,细胞脂质过氧化作用加强,细胞膜电解质大量外渗,质膜相对透性增加,同时脂质过氧化终产物 MDA 不断积累,细胞膜相对透性与 MDA 含量呈显著正相关($r = 0.977$)。抗氧化酶活性呈现先增后减,但 POD, CAT 活性均小于对照,而 SOD 活性一直都高于对照;相关分析表明 POD、CAT 活性同质膜相对透性总体上呈极显著负相关(r 分别为 -0.999 和 -0.991), SOD 活性同质膜相对透性几乎没有相关性($r = -0.008$)。POD、CAT 活性同 MDA 含量总体上呈显著负相关(r 分别为 -0.987 和 -0.941), SOD 活性

同 MDA 含量总体上呈正相关($r = 0.114$)。POD 与 CAT 活性呈显著正相关($r = 0.984$)。

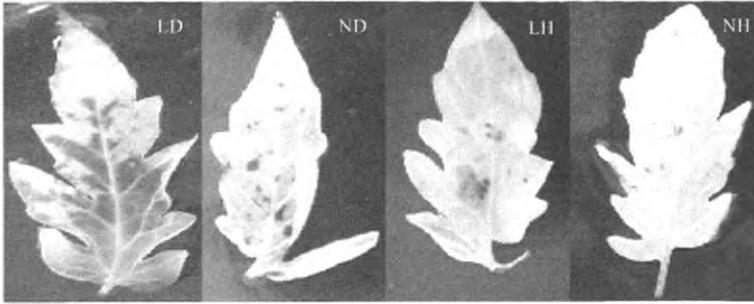


图 3 亚低温与干旱胁迫对番茄幼苗叶片 H₂O₂ 积累的影响

Fig.3 Effect of sub-low temperature and drought stress on H₂O₂ accumulation of tomato seedling leaves

表 2 亚低温与干旱胁迫对番茄幼苗叶片各生理指标的相关性分析

Table 2 Effect of sub-low temperature and drought stress on the relational analysis of the physiological indexes

| 项目 Item | X ₁ | X ₂ | X ₃ | X ₄ | X ₅ | X ₆ |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| X ₁ | 1 | | | | | |
| X ₂ | 0.492 | 1 | | | | |
| X ₃ | 0.977* | 0.521 | 1 | | | |
| X ₄ | 0.114 | 0.650 | -0.008 | 1 | | |
| X ₅ | -0.987* | -0.513 | -0.999** | -0.018 | 1 | |
| X ₆ | -0.941* | -0.491 | -0.991** | 0.114 | 0.984* | 1 |

注: X₁、X₂、X₃、X₄、X₅、X₆ 分别代表 MDA 含量、可溶性蛋白、细胞膜相对透性、SOD 活性、POD 活性、CAT 活性。* 和 ** 分别表示显著($P < 0.05$)和极显著($P < 0.01$)差异水平。下同。

Note: X₁、X₂、X₃、X₄、X₅、X₆ which are respectively represent MDA content, Soluble Protein, Relative Membrane Conductivity, SOD, POD, CAT; * and ** mean significant difference at 0.05 and 0.01 probability level, respectively. The same as blow.

2.5 亚低温与干旱胁迫对番茄幼苗叶片各生理指标的主成分分析

利用 SPSS16.0 对 6 个生理指标进行主成分分析(表 3), 筛选出来 2 个主成分, 其贡献率分别为 0.711、0.247, 累计贡献率达到 0.958, 其他指标可忽略不计。这样将原来 6 个指标换算成为 2 个新的相互独立的新指标, 分别定义为第 1 和第 2 主成分, 对应的特征向量为:

$$\text{第 1 主成分: } F_1 = 0.229X_1 + 0.148X_2 + 0.232X_3 + 0.030X_4 - 0.232X_5 - 0.227X_6;$$

$$\text{第 2 主成分: } F_2 = -0.047X_1 + 0.464X_2 - 0.098X_3 + 0.645X_4 + 0.089X_5 + 0.151X_6$$

由上述 2 个主成分表达式可知: 在第 1 主成分的表达式中, MDA 含量和细胞膜相对透性的系数较大, 可大致概括为膜脂过氧化对番茄叶片造成的伤害; 在第 2 主成分的表达式中, 可溶性蛋白含量和 SOD 活性的系数最大, 可大致概括为生理代谢和抗氧化酶的保护性作用。上述分析表明亚低温条件下干旱胁迫时, 清除番茄体内活性氧离子的主要酶为 SOD。

表 3 亚低温与干旱胁迫对番茄幼苗叶片各生理指标的系数及贡献率

Table 3 Effect of sub-low temperature and drought stress on the correlation of the physiological indexes and their contribution (P)

| 项目 Item | X ₁ | X ₂ | X ₃ | X ₄ | X ₅ | X ₆ | 特征值 T Eigenvalue | 贡献率 P Contribution |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|------------------|--------------------|
| F ₁ | 0.229 | 0.148 | 0.232 | 0.030 | -0.232 | -0.227 | 4.265 | 0.711 |
| F ₂ | -0.047 | 0.464 | -0.098 | 0.645 | 0.089 | 0.151 | 1.485 | 0.247 |

3 讨论

低温和干旱已成为目前限制植物生长的重要逆境因子^[11]。目前普遍认为逆境(低温、干旱)条件下

会引起植物膜透性的增加, 从而积累膜脂过氧化物的最终产物丙二醛(MDA)^[12], 生物自由基的累积进而伤害细胞膜。植物在正常生存环境下具有一系列的保护和修复系统, 使得活性氧的产生和清除处于

一个动态平衡过程中。植物代谢过程中产生的 O_2^- 和 H_2O_2 的清除能力在很大程度上依赖于诸如 SOD、CAT、POD 等多种抗氧化酶的协同作用^[13]。SOD 被公认为活性氧清除系统中首当其冲发挥作用的抗氧化酶, SOD 其活性变化常用来反映植物对逆境的应激反应和受害程度^[14]。SOD 是 O_2^- 的清除剂, 能催化 O_2^- 生成 H_2O_2 和 O_2 , H_2O_2 的清除主要在 CAT 和 POD 作用下被分解成 H_2O 和 O_2 , 从而抑制膜脂氧化, 减少膜系统的伤害, 维持活性氧代谢平衡^[15]。

本试验研究表明, 亚低温和干旱单一胁迫条件下, MDA 含量和细胞膜相对透性均随着胁迫时间的延长而增强, 亚低温处理对番茄的细胞膜的破坏比干旱处理更大, 亚低温条件下干旱处理对膜的伤害远远大于亚低温、干旱单因子分别对膜的伤害。植物在逆境条件下能够通过增加可溶性蛋白的含量来适应逆境过程^[16], 李妮亚等^[17]研究表明, 逆境条件会抑制植物体内正常的蛋白质的合成, 但是往往会诱导一些新的蛋白质的出现或明显增加原有蛋白质的含量。本试验结果显示, 亚低温与干旱胁迫处理的番茄幼苗在处理初期可溶性蛋白质含量有所增加, 说明短时间的亚低温干旱处理可能诱导新蛋白质合成; 但当交互胁迫时间超过 10 d 时, 可溶性蛋白含量急剧下降。这可能是由于长时间亚低温干旱胁迫导致植物体内代谢酶合成受阻造成的。

邹国元等^[18]研究表明, 冷害是一种特殊的水分胁迫, 低温会影响植物对水分的吸收, 主要通过影响植物根系吸水能力和破坏植物气孔蒸腾平衡来影响植物对水分的吸收。目前多数研究表明, 水分胁迫伤害程度与 SOD、POD、CAT 三种酶活性的提高呈负相关^[19], 但有些研究的结果也不尽相同, 葛体达等^[20]研究表明, 水分胁迫下, SOD、POD、CAT 活性呈现先升高后下降的趋势。本研究中, 亚低温与干旱胁迫对番茄幼苗 SOD 活性均出现先升高后降低的趋势, 亚低温干旱交互胁迫使得 SOD 活性峰值提前。POD、CAT 活性下降, 这与李建明等^[21]研究结果一致。POD、CAT 活性的下降导致植物体内 H_2O_2 含量的累积, 加大了对植物活性氧代谢平衡的破坏, 通过 DAB 染色直观地观察到了 H_2O_2 在番茄叶片的分布位置与含量变化。

本试验通过对指标进行简单相关性分析, 表明 POD、CAT 活性同细胞膜相对透性呈极显著负相关, POD、CAT 活性同 MDA 含量呈显著负相关, SOD 活性同 MDA 含量总体上呈正相关。POD 与 CAT 活性呈显著正相关。因此在番茄中, SOD 活性对清除活

性氧的贡献最大, 是清除自由基的关键酶。通过主成分分析表明, 亚低温干旱处理第 1 主成分主要为 MDA 含量和细胞膜相对透性, 可简单概括为细胞膜伤害; 第 2 主成分主要为可溶性蛋白含量和 SOD 活性, 可简单概括为生理代谢和抗氧化酶的保护性作用; 说明亚低温干旱处理番茄处于一种被动清除活性氧的过程, 自身已受到不同程度的伤害。

综上所述, 亚低温干旱胁迫条件下不同处理番茄幼苗膜脂过氧化和抗氧化酶系统调节机制和活性氧清除能力不同。亚低温和干旱胁迫对活性氧的清除机理可能不同, 在亚低温条件下表现出更大、更快的生理反应, 二者交互作用于番茄的生理变化及产生机制有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 孙彩霞, 刘志刚, 荆艳东. 水分胁迫对玉米叶片关键防御酶系活性及其同工酶的影响[J]. 玉米科学, 2003, 11(1): 63-66.
- [2] 王娟, 李德全, 谷令坤. 不同抗旱性玉米幼苗根系抗氧化系统对水分胁迫的反应[J]. 西北植物学报, 2002, 22(22): 285-290.
- [3] Xiong L M, Ishitani M, Zhu J K. Interaction of osmotic stress, temperature, and abscisic acid in the regulation of gene expression in Arabidopsis[J]. Plant Physiology, 1999, 119(1): 205-211.
- [4] 刘玉凤, 李天来, 焦晓亮. 短期夜间亚低温及恢复对番茄光合作用和蔗糖代谢的影响[J]. 园艺学报, 2011, 38(4): 683-691.
- [5] 李天来, 刘玉凤, 宋礼毓. 夜间亚低温处理及恢复对番茄叶片光抑制的影响[J]. 园艺学报, 2008, 35(7): 1003-1010.
- [6] 王荣清, 阮美颖, 杨悦俭, 等. 亚低温对番茄坐果的影响及耐低温材料的筛选[J]. 浙江农业学报, 2007, 19(3): 206-210.
- [7] 王学文, 付秋实, 王玉珏, 等. 水分胁迫对番茄生长及光合系统结构性能的影响[J]. 中国农业大学学报, 2010, 15(1): 7-13.
- [8] 孙群. 植物生理研究技术[M]. 杨凌: 西北农林科技大学出版社, 2007: 138-171.
- [9] 高俊凤. 植物生理实验指导[M]. 西安: 世界图书出版社, 2000: 192-199.
- [10] Orozco-Cárdenas M L, Ryan C A. Hydrogen peroxide is generated systemically in plant leaves by wounding and systemin via the octadecanoid pathway[J]. Proc Natl Acad Sci USA, 1999, 96: 6553-6557.
- [11] 孙彩霞, 沈秀瑛, 刘志刚. 作物抗旱性生理生化机制的研究现状和进展[J]. 杂粮作物, 2002, 22(5): 285-288.
- [12] Lin C C, Kao C H. Effect of NaCl stress on H_2O_2 metabolism in rice leaves[J]. Plant Growth Regulation, 2000, 30(1): 151-155.
- [13] 周艳虹, 喻景权, 钱琼秋, 等. 低温弱光对黄瓜幼苗生长及抗氧化酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 2003, 14(6): 921-924.
- [14] 马德华, 鹿吉安, 霍振荣, 等. 黄瓜对不同温度逆境的抗性研究[J]. 中国农业科学, 1999, 32(5): 28-35.
- [15] 刘宁, 高玉葆, 贾彩霞, 等. 渗透胁迫下多花黑麦草叶内过氧化物酶活性和脯氨酸含量以及质膜相对透性的变化[J]. 植物生理学通讯, 2000, 36(1): 11-14.
- [16] 张明生, 谢波, 谈锋, 等. 甘薯可溶性蛋白、叶绿素及 ATP 含量变化与品种抗旱性关系的研究[J]. 中国农业科学, 2006, 36(1): 13-16.

(下转第 164 页)

Effect of drought stress and rewater on protective enzyme activity and membrane lipid peroxidation in pea leaves during seedling stage

GU Jian-qin¹, YAN Zhi-li^{2,3*}, NIU Jun-yi^{3,4}, XI Ling-ling⁴, ZHOU Hai-yan³, JIANG Juan³

(1. Jiuquan Vocational and Technical College, Jiuquan, Gansu 735000, China; 2. Hebei Normal University of Science & Technology, Qinhuangdao, Hebei 066004, China; 3. College of Agronomy, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China; 4. College of Life Sciences, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: A pot experiment was conducted to investigate the effect of soil water on protective enzymes of superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT) and peroxidase (POD) activity, and as well as on membrane lipid peroxidation including malonaldehyde (MDA) content and plasma membrane permeability (RC) in pea (*Pisum sativum* Linn.) leaves during seedling stage under drought stress and rewater conditions. The comprehensive evaluation on antioxidant capability of pea during seedling stage was also made. The results showed that drought stress declined SOD activity, and more remarkably with increasing stress intensity and time. Light drought stress for 10 d and serious drought stress all increased POD and CAT activity, and more obviously with increasing stress intensity and time. Rewater for 5 d produced partial compensation to CAT and SOD activity, and equal compensation to POD activity. Rewater for 10 d produced equal compensation to SOD activity and equal or over compensation to CAT and POD activity. Drought stress increased MDA content, and increased more with increasing stress intensity, and increased less with time. Rewater for 5 d and 10 d produced partial and equal compensation respectively to MDA content of pea leaves under drought stress for 5 d. Drought stress enhanced RC and more significantly with increasing stress intensity and time. Rewater for 5 d and 10 d produced partial and equal compensation respectively.

Keywords: pea; seedling stage; drought stress; rewater; protective enzyme activity; membrane lipid peroxidation

(上接第 158 页)

- [17] 李妮亚,高俊凤,汪沛洪.小麦幼苗水分胁迫诱导蛋白的特征[J].植物生理学报,1998,24(1):65-71. 476-480.
- [18] 邹国元,杨志福,李晓林.低温下钾在植物水分调节中的作用[J].中国农业大学学报,1999,4(1):21-25. [20] 葛体达,隋方功,白莉萍,等.长期水分胁迫对夏玉米根叶保护酶活性及膜脂过氧化作用的影响[J].干旱地区农业研究,2005,23(3):18-23.
- [19] Chowdhury R S, Choudhuri M A. Hydrogen peroxidemetabolism as an index of water stress tolerance in jute[J]. *Physiol Plant*, 1985, 65: [21] 李建明,王平,李江.灌溉量对亚低温下温室番茄生理生化与品质的影响[J].农业工程学报,2010,26(2):129-134.

Effects of sub-low temperature and drought stress on osmotic substances and activities of antioxidant enzymes in tomato seedling

SUN San-jie, LI Jian-ming*, YAO Yong-zhe, CHEN Kai-li

(College of Horticulture, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: With potted tomato plants in greenhouse as the experiment material, we investigated the influence of sub-low temperature and drought stress on osmotic substances and activities of antioxidant enzymes in tomato seedling. The results showed that with the interaction of sub-low temperature and drought stress treatment time prolong, MDA content, relative membrane conductivity in leaves of tomato seedling increased, soluble protein content and SOD activities first increased and then decreased gradually with the prolong of treatment time. The change of POD activities showed inverted "V" pattern and POD activities showed "M" pattern, Tomato seedling of sub-low temperature is greater sensitivity than drought stress. The correlation analysis and Principal component analysis indicated that POD, CAT was significantly positively negatively correlated to relative membrane conductivity, positively negatively correlated to MDA content; SOD was related to MDA, POD and CAT was significantly positively related.

Keywords: tomato; sub-low temperature; drought stress; osmotic substances; activities of antioxidant enzymes