

# 干旱胁迫及复水对豌豆苗期保护酶活性及膜脂过氧化的影响

顾建勤<sup>1</sup>, 闫志利<sup>2,3\*</sup>, 牛俊义<sup>3,4</sup>, 席玲玲<sup>4</sup>, 周海燕<sup>3</sup>, 蒋娟<sup>3</sup>

(1. 酒泉职业技术学院, 甘肃 酒泉 735000; 2. 河北科技师范学院, 河北 秦皇岛 066004;

3. 甘肃农业大学农学院, 甘肃 兰州 730070; 4. 甘肃农业大学生命科学学院, 甘肃 兰州 730070)

**摘要:** 采用盆栽控水试验法,研究了干旱胁迫及复水对豌豆苗期叶片超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)活性及丙二醛(MDA)含量,质膜相对透性(RC)的影响,对豌豆苗期抗氧化能力进行了综合评价。结果表明:干旱胁迫降低了SOD活性,随胁迫程度加重和历时延长降幅增大。轻度干旱胁迫10 d或重度干旱胁迫提高了POD和CAT活性,随胁迫程度加重和历时延长增幅加大。复水5 d对CAT、SOD活性产生部分补偿效应,对POD活性产生等量补偿效应。复水10 d对SOD活性产生等量补偿效应,对CAT、POD活性产生等量或超补偿效应;干旱胁迫增加了MDA含量,随胁迫程度加重增幅加大,胁迫历时延长增幅减少。复水5 d、10 d对干旱胁迫5 d豌豆叶片MDA含量分别产生部分和等量补偿效应。干旱胁迫导致膜脂透性增大,随胁迫程度加重和历时延长增幅加大。复水5 d、10 d可分别产生部分和等量补偿效应。

**关键词:** 豌豆; 苗期; 干旱胁迫; 复水; 保护酶活性; 膜脂过氧化

**中图分类号:** S643.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2012)03-0159-06

我国干旱和半干旱地区总面积达455万km<sup>2</sup>,占全国土地面积的47%左右<sup>[1]</sup>。干旱胁迫直接改变了作物生理生化特性,进而影响到作物产量,是农作物增产增收的巨大障碍。前人研究结果表明,作物自身存在着应对土壤水分变化的生理响应机制,对于旱逆境具有一定的耐性。复水对作物因干旱逆境降低的生理功能具有补偿效应。在细胞水平上,干旱逆境会使植物细胞结构和功能受到破坏,膜系统是最先受害的部位<sup>[2]</sup>。作物在受到干旱胁迫时,会自发地诱导酶系统保护细胞膜免遭氧化伤害<sup>[3]</sup>。生物自由基伤害学说认为,在逆境条件下,植物体内自由基的大量积累会引发膜脂过氧化作用,最终分解的产物丙二醛(MDA)含量也会增加,破坏细胞膜,加大膜脂透性<sup>[4]</sup>。因此,研究干旱胁迫及复水对作物保护酶活性及膜脂过氧化的影响,对确定抗旱节水栽培技术具有重要的意义。但以往研究多集中于干旱胁迫对作物生理生化指标的影响方面,对复水的补偿作用报道较少。部分研究也仅限于小麦、玉米等大宗作物<sup>[5-6]</sup>,未见对豌豆研究的报道。

豌豆是世界上四大豆类作物之一。近年来,随着国内外消费市场的拉动,种植面积日益扩大。但我国52.5%的豌豆生产区集中于干旱半干旱地区,

干旱成为限制豌豆生产、提高产量的主要因素<sup>[7]</sup>。特别是在豌豆苗期,正值少雨季节,干旱对豌豆生长的影响最大。本研究采取盆栽土培人工控水试验方法,测定了不同程度、不同历时的干旱胁迫和复水豌豆苗期保护酶系统——超氧化物歧化酶(Superoxide dismutase, SOD)、过氧化氢酶(Catalase, CAT)、过氧化物酶(Peroxidase, POD)活性以及过氧化产物丙二醛(Malonaldehyde, MDA)含量和脂膜相对透性(Plasma membrane permeability, RC)的影响,综合分析了豌豆苗期的抗氧化能力,旨在为建立豌豆抗旱节水栽培技术体系提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 盆栽试验及设计

试验采用盆栽土培人工控水法,在甘肃农业大学农学院教学试验基地进行。供试豌豆品种为“青914”,为甘肃省当前大面积种植的高产耐旱品种。供试土壤取自甘肃农业大学农学院校内教学实验田耕层土。试验用盆为陶土盆,高35 cm,内径30 cm,每盆装入施好基肥的土壤13 kg。试验设计为干旱胁迫程度、干旱胁迫历时和复水历时三个因素。其中,干旱胁迫程度设计为土壤相对含水量(RWC)

收稿日期:2011-12-21

基金项目:国家“十一五”科技支撑计划项目(2006BAD29B07);甘肃省教育厅研究生导师基金资助项目。

作者简介:顾建勤(1959—),男,甘肃酒泉人,硕士,副教授,研究方向为农产品贮藏与加工研究。E-mail:gujianqin2005@126.com。

\*通讯作者:闫志利(1963—),男,河北滦南人,博士,副研究员,研究方向为作物栽培与生态生理。E-mail:zhili310@tom.com。

75% ± 5% (CK, 充分供水)、60% ± 5% (L, 轻度胁迫) 和 45% ± 5% (S, 重度胁迫) 3 水平, 干旱胁迫历时设计为 5 d 和 10 d 两个水平, 复水历时设计为 5 d 和 10 d 两个水平, 共 12 个处理。每处理重复 15 盆, 共计 180 盆。3 月 26 日每盆等距离播种 5 穴, 每穴播种籽 2 粒。苗高 7~10 cm 时定苗, 每穴留 1 株生长健壮苗, 每盆留 5 株。整个生长期利用防雨棚遮挡自然降水, 晴天打开, 确保光照充足一致。5 月 17 日开始干旱胁迫, 采取定期分批停止浇水的方法进行干旱处理, 使各处理土壤相对含水量分别达到设定指标上限(采取称重法控制)。然后每隔 2 d 测定一次土壤含水量, 采取定期微量给水的方法维持水分胁迫梯度, 低于供水限时补水到上限。各处理胁迫历时到期后, 当日即复水至充分供水(即对照)水平。除水分处理不同外, 其他栽培管理措施均保持一致。各盆随机摆放, 每 10 d 随机调换一次位置, 排除边际效应。

### 1.2 测定项目及方法

采集干旱胁迫历时 5 d、10 d 和旱后复水历时 5 d、10 d 的完整叶片(每个处理取 8 片)为待测样本。其中: 4 片用液氮速冻, 而后放置 -20 °C 冰箱中保存待测 SOD、CAT、POD 活性和 MDA 含量; 另外 4 片用于打孔取样, 测定细胞质膜透性。SOD 活性按梁爱华等<sup>[8]</sup>的方法测定, 以抑制氮蓝四唑(NBT)光氧化还原反应 50% 酶量为 1 个酶活性单位。CAT 活性参照 Jiang 等<sup>[9]</sup>的紫外吸收法测定, 以每分钟吸光度减少 0.1 所需酶量为 1 个酶活力单位。POD 活性按袁庆华等<sup>[10]</sup>的方法, 以吸光度每分钟增加 0.01 为 1 个酶活力单位。各种酶活性均以 U/g(鲜重)表示。MDA 含量采用硫代巴比妥(TBA)显色法<sup>[11]</sup>测定, 依据消光值计算 MDA 浓度, 而后根据叶片重量计算 MDA 含量, 以 μmol/g(鲜重)表示。RC 值按 Aroca 等<sup>[12]</sup>的方法测定, 用 DDS-307 电导仪测定各处理的电导值, 然后计算细胞膜的相对透性(%)。

### 1.3 数据分析

根据 Maschinski 和 Belsky 的方法<sup>[13-14]</sup>, 结合胡展育<sup>[15]</sup>的观点, 将复水补偿作用分为 5 类(表 1), 以此对本研究各项指标的复水效应进行判定。

应用隶属函数法, 对豌豆苗期不同水分条件下的抗氧化能力进行综合评价<sup>[16-17]</sup>。隶属函数值计算公式为:

$$U(x_i) = (x_i - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min}) \quad (1)$$

式中,  $U(x_i)$  为隶属函数值,  $x_i$  为指标测定值,  $x_{\max}$ 、 $x_{\min}$  为豌豆叶片某指标的最大值和最小值。如果某一指标与豌豆抗旱性为负相关, 则利用反隶属函数

进行转换。计算公式为:

$$U(x_i) = 1 - (x_i - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min}) \quad (2)$$

采用 Microsoft Excel 2003、SPSS 17.0 统计软件进行数据处理和分析。

表 1 复水对豌豆生理指标补偿效应分级评定表

Table 1 Graded assessment of compensation effect on physiological characters of pea under water recovery

补偿作用定义 Definition of compensation effect	处理指标和对照指标的关系 Relationship between treatment and control	补偿情况 Compensation effect
超补偿 Over-compensation	QT/QC > 1	> 100
等量补偿 Contour compensation	QT/QC = 1	= 100
部分补偿 Partial compensation	QT/QC < 1	< 100
无补偿 No-compensation	△QT/△QC = 0	= 0
伤害补偿 Injury compensation	△QT/△QC < 0	< 0

注: QT 为复水后处理指标量; QC 为对照指标量; △QT 为复水前后处理指标变化量; △QC 为复水前后对照指标变化量。

Note: QT, Quantity of treatment after rewater; QC, Quantity of control; △QT, Changes in the quantity of treatment during rewater; △QC, Changes in the quantity of control during rewater.

## 2 结果与分析

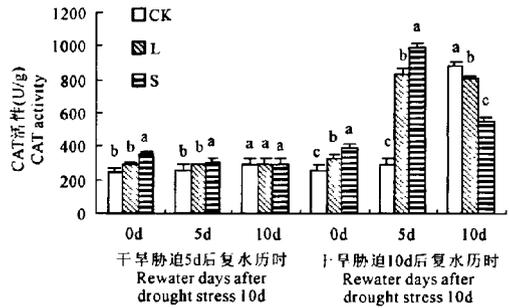
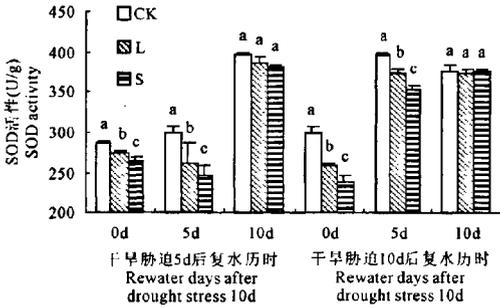
### 2.1 水分条件对保护酶活性的影响

2.1.1 SOD 活性 由图 1 可见, 干旱胁迫导致豌豆苗期叶片 SOD 活性降低, 随干旱胁迫程度加重和胁迫历时延长降幅增大。轻度干旱胁迫 5 d 和 10 d 处理 SOD 活性分别比对照显著降低 4.03% 和 13.54%, 重度干旱胁迫 5 d 和 10 d 处理 SOD 活性分别比对照显著降低 7.33% 和 19.87% ( $P < 0.05$ ); 复水 5 d 时, 干旱胁迫 5 d 处理 SOD 活性与对照差异加大, 说明干旱胁迫存在滞后效应。干旱胁迫 10 d 处理与对照差异缩小, 说明复水 5 d 产生了部分补偿效应; 复水 10 d 时, 各干旱胁迫处理 SOD 活性均与对照无显著差异, 说明复水 10 d 产生了等量补偿效应。

2.1.2 CAT 活性 由图 1 可见, 干旱胁迫导致豌豆苗期叶片 CAT 活性提高, 随干旱胁迫程度加重和胁迫历时延长增幅加大。轻度干旱胁迫 5 d 处理 CAT 活性与对照未表现出显著差异, 胁迫历时达到 10 d 时叶片 CAT 活性比对照显著提高 26.61%。重度干旱胁迫 5 d 和 10 d 处理 CAT 活性分别比对照显著提高 45.98% 和 51.01% ( $P < 0.05$ ); 复水 5 d 时, 干旱胁迫 5 d 处理 CAT 活性与对照差异缩小, 说明复水产生了部分补偿效应。轻度、重度干旱胁迫 10 d 处理 CAT 活性分别比对照高出 1.95 倍和 2.48 倍, 与

对照差异更大,说明干旱胁迫存在滞后效应;复水 10 d 时,水分胁迫 5 d 处理 CAT 活性与对照无显著差异,说明复水产生等量补偿效应。轻度、重度干旱

胁迫 10 d 处理 CAT 活性分别比对照显著降低 9.83% 和 38.84%,说明复水 10 d 产生了伤害补偿效应。



注:CK:对照;L:轻度干旱胁迫;S:重度干旱胁迫。不同的字母代表  $P < 0.05$ 。下同。

Note:CK, Control; L, Light drought stress; S, Serious drought stress. The different letters stand for  $P < 0.05$ . The same as below.

图1 干旱胁迫及复水对豌豆苗期叶片 SOD、CAT 活性的影响

Fig.1 SOD and CAT activity in pea leaves during seedling stage under drought stress and rewater

2.1.3 POD 活性 由图 2 可见,干旱胁迫导致豌豆苗期叶片 POD 活性提高,随干旱胁迫程度加重和胁迫历时延长增幅加大。轻度干旱胁迫 5 d 处理 POD 活性与对照无显著差异,轻度干旱胁迫 10 d 处理和重度干旱胁迫 5 d、10 d 处理 POD 活性分别比对照显著增加 27.47% 和 16.76%、30.32% ( $P < 0.05$ );复水 5 d 时,干旱胁迫 5 d 处理 POD 活性与对照无显著差异,说明复水 5 d 产生了等量补偿效应。轻度

和重度干旱胁迫 10 d 处理与对照差异明显缩小,说明复水 5 d 对于干旱胁迫 10 d 处理产生了部分补偿效应;复水 10 d 时,轻度、重度干旱胁迫 5 d 处理 POD 活性分别比对照显著降低了 14.52% 和 32.27%,说明复水 10 d 对于干旱胁迫 5 d 处理产生伤害补偿效应。干旱胁迫 10 d 处理 POD 活性与对照基本接近,说明复水 10 d 产生了等量补偿效应。

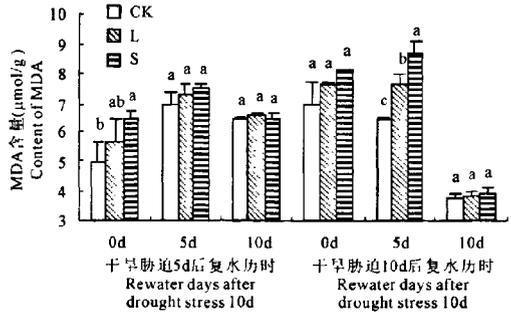
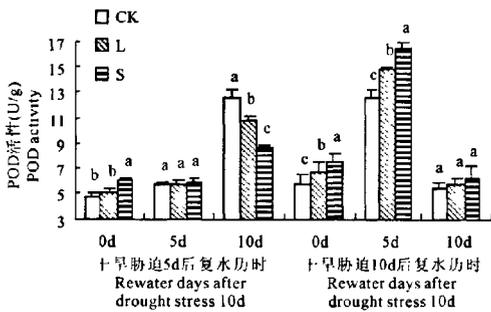


图2 干旱胁迫及复水对豌豆苗期叶片 POD 活性和 MDA 含量的影响

Fig.2 POD activity and MDA content in pea leaves during seedling stage under drought stress and rewater

2.2 水分条件对过氧化产物及膜脂相对透性的影响

2.2.1 MDA 含量 由图 2 可见,干旱胁迫导致苗期豌豆叶片 MDA 含量增加,随水分胁迫程度加重增幅加大,随胁迫历时延长增幅减少。轻度、重度干旱胁迫 5 d 处理和 10 d 处理 MDA 含量分别比对照显著增加 13.92%、30.52% 和 9.48%、16.71% ( $P < 0.05$ );复水 5 d 时,轻度和重度干旱胁迫 5 d 处理与对照无显著差异,说明复水产生了等量补偿效应。干旱胁迫 10 d 处理与对照差异增大,轻度和重度胁迫

处理叶片 MDA 含量分别比对照显著增加 19.06% 和 35.73% ( $P < 0.05$ ),说明干旱胁迫 10 d 对豌豆叶片 MDA 含量的影响具有滞后作用;复水 10 d 时,各干旱胁迫处理 MDA 含量均与对照无显著差异,说明复水 10 d 产生了等量补偿效应。

2.2.2 膜脂相对透性(RC) 由图 3 可见,干旱胁迫导致豌豆叶片膜脂相对透性(RC)增大,随干旱胁迫程度加重和胁迫历时延长增幅加大。轻度、重度干旱胁迫 5 d 处理和 10 d 处理 RC 值分别比对照显

著增加 21.95%、28.88% 和 22.39%、32.15% ( $P < 0.05$ );复水 5 d 时,轻度、重度干旱胁迫 5 d 处理和 10 d 处理叶片 RC 值比复水前与对照的差异明显缩小,说明复水产生了部分补偿效应;复水 10 d 时,各干旱胁迫处理 RC 值均与对照未表现出显著差异,说明复水 10 d 产生了等量补偿效应。

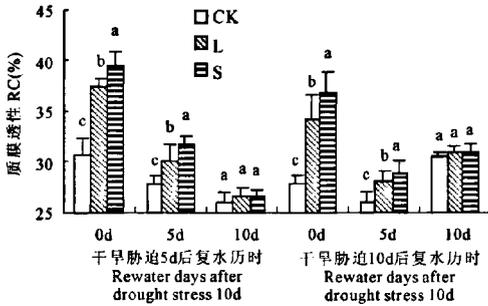


图 3 干旱胁迫及复水对豌豆苗期叶片膜脂相对透性 (RC) 的影响

Fig.3 RC of pea leaves during seedling stage under drought stress and rewater

2.3 不同水分处理对豌豆苗期抗氧化能力影响的综合评价

应用隶属函数法,对豌豆苗期在不同水分条件下叶片的抗氧化能力进行综合评价(MDA 和 RC 表示活性氧的毒害作用,不纳入评价指标),结果如表 2 所示。干旱胁迫 5 d 处理抗氧化能力轻度胁迫居中,重度胁迫最强,对照最弱,随干旱胁迫程度加重抗氧化能力增强。干旱胁迫 10 d 处理抗氧化能力轻度胁迫居中,重度胁迫最弱,对照最强,随干旱胁迫程度加重抗氧化能力减弱。可见,豌豆苗期干旱胁迫程度不宜过强、胁迫历时不宜过长;复水 5 d 时,各干旱胁迫处理抗氧化能力均随胁迫程度加重表现为增强趋势,说明复水有效地缓解了干旱胁迫对豌豆抗氧化系统所造成的影响;复水 10 d 时,各干旱胁迫处理抗氧化能力随着胁迫程度加强表现为减弱趋势,会直接影响豌豆生长。可见,豌豆苗期抗氧化保护系统对 10 d 内的轻度、短期干旱胁迫具有一定的适应性。

表 2 不同水分处理对豌豆苗期抗氧化能力综合评价

Table 2 Comprehensive evaluation on antioxidant capability of pea during seedlings stage under different water treatment

处理 Treatment	隶属函数值 Subordinate function value	复水历时 Rewater days(d)					
		0		5		10	
		隶属函数值 Subordinate function value	抗氧化能力 Antioxidant capability	隶属函数值 Subordinate function value	抗氧化能力 Antioxidant capability	隶属函数值 Subordinate function value	抗氧化能力 Antioxidant capability
干旱胁迫 5 d 后 After 5 days drought stress	CK	0.2775	弱 Low	0.6132	弱 Low	2.4826	强 High
	L	0.6465	中 Medium	0.6202	中 Medium	2.2501	中 Medium
	W	1.3012	强 High	0.7027	强 High	1.9269	弱 Low
干旱胁迫 10 d 后 After 10 days drought stress	CK	0.4153	强 High	1.8045	弱 Low	1.7477	强 High
	L	0.3986	中 Medium	2.6698	中 Medium	1.6420	中 Medium
	W	0.3511	弱 Low	2.9035	强 High	1.3525	弱 Low

3 小结与讨论

SOD、POD、CAT 作为防御活性氧自由基对细胞膜系统伤害的酶系统,在抗逆生理中的作用越来越受到人们的重视<sup>[16]</sup>。SOD 直接控制植物体内超氧阴离子自由基和过氧化氢(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)的浓度<sup>[17,18]</sup>。CAT 专一清除植株体内的 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>,与 SOD 协同作用,最大限度地减少了羟自由基(·OH)的形成。在逆境胁迫下,POD 既可清除 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 表现为保护效应,还可参与活性氧的形成表现为伤害效应<sup>[17]</sup>。前人在其他植物上的研究表明,干旱逆境胁迫诱导了 SOD 活性的增强<sup>[19]</sup>,CAT、POD 活性上升或未见变化<sup>[20-21]</sup>。但 Moran 等<sup>[22]</sup>的研究结果表明,豌豆叶

片 SOD 活性在干旱胁迫下未见变化。本研究结果表明,干旱胁迫降低了豌豆苗期叶片 SOD 活性,且随干旱胁迫程度加重和胁迫历时延长降幅加大;轻度干旱胁迫 5 d 不会对 POD 和 CAT 活性产生显著影响,当轻度胁迫达到 10 d 或在重度胁迫条件下,POD 和 CAT 活性明显提高,且随胁迫程度加重和历时延长增幅加大。干旱胁迫 10 d 对 CAT 活性的影响存在滞后效应,这与许长成等<sup>[23]</sup>在大豆上的研究结论一致。复水 5 d 对干旱胁迫 10 d 豌豆叶片 SOD 活性、干旱胁迫 5 d 叶片 CAT 活性均产生部分补偿效应,对干旱胁迫 5 d、10 d 叶片 POD 活性分别产生等量补偿效应和部分补偿效应,对干旱胁迫 5 d 叶片 SOD 活性和干旱胁迫 10 d 叶片 CAT 活性未产生

影响。复水 10 d 对豌豆叶片 SOD 活性产生等量补偿效应,对胁迫历时 5 d、10 d 叶片 CAT 活性分别产生等量补偿、伤害补偿效应,对胁迫历时 5 d、10 d 豌豆叶片 POD 活性产生伤害补偿效应和等量补偿效应。

MDA 含量高低和细胞膜透性变化是反映细胞膜脂过氧化作用强弱和质膜破坏程度的重要指标<sup>[24]</sup>。对干旱胁迫下植物体内积累的活性氧,抗旱性较强的植物能够积极调整其清除系统而维持生理平衡,显示出一定的抗氧化能力。但如果活性氧超出了其清除能力,将导致活性氧大量积累,引发膜脂过氧化,对植物形成过氧化伤害<sup>[17]</sup>。本研究结果表明,干旱胁迫导致豌豆苗期叶片 MDA 含量增加,随水分胁迫程度加重增幅加大,随胁迫历时延长增幅减少。干旱胁迫 10 d 对豌豆叶片 MDA 含量的影响具有滞后作用。复水 5 d 仅对干旱胁迫 5 d 豌豆叶片 MDA 含量产生等量补偿效应,复水 10 d 可对各干旱胁迫处理产生等量补偿效应;干旱胁迫导致豌豆叶片膜脂相对透性(RC)增大,随胁迫程度加重和历时延长增幅加大。复水 5 d、10 d 可分别产生部分补偿和等量补偿效应。

作物抗氧化能力是整个保护酶系统协同作用的结果,其强弱很难依据一种保护酶的变化做出准确的判断<sup>[25]</sup>。本研究对豌豆苗期抗氧化能力综合评价结果表明,干旱胁迫 5 d 随胁迫程度加重抗氧化能力增强,干旱胁迫 10 d 随干旱胁迫程度加重抗氧化能力减弱。复水 5 d 可有效地缓解干旱胁迫对豌豆抗氧化系统所造成的影响。复水 10 d 时,各干旱胁迫处理抗氧化能力表现为随着胁迫程度加重而减弱的趋势,这除与干旱胁迫的滞后效应和复水的激发效应<sup>[26]</sup>、补偿效应有关外,还与活性氧的过度积累、破坏了部分豌豆活性氧清除机制有关。

#### 参考文献:

- [1] 彭以祺. 我国干旱、半干旱地区几个主要要素的变化及地图修编问题[J]. 地图, 1988, (4): 29-31.
- [2] 孙一荣, 朱教军, 康宏徽. 水分处理对沙地樟子松幼苗膜脂过氧化作用及保护酶活性影响[J]. 生态学杂志, 2008, 27(5): 729-734.
- [3] Bowler C, Montagu M V, Inze D. Superoxide dismutase and stress tolerance[J]. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology, 1992, 43: 83-116.
- [4] 邵艳军, 山 仑, 李广敏. 干旱胁迫与复水条件下高粱、玉米苗期渗透调节及抗氧化比较研究[J]. 中国生态农业学报, 2006, 14(1): 68-70.
- [5] 杨玉兰, 唐加红, 刘 丹, 等. 干旱胁迫对宁糯麦 1 号膜脂过氧化及保护酶活性的影响[J]. 作物杂志, 2010, (5): 43-47.
- [6] 张仁和, 郑友军, 马国胜, 等. 干旱胁迫对玉米苗期叶片光合作用和保护酶的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(5): 1303-1311.
- [7] 施积炎, 袁小凤, 丁贵杰. 作物水分亏缺补偿与超补偿效应的研究现状[J]. 山地农业生物学报, 2000, 19(3): 69-72.
- [8] 梁爱华, 马富裕, 梁宗锁, 等. 旱后复水激发玉米根系功能补偿效应的生理机制研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2008, 36(4): 58-64.
- [9] Jiang M Y, Zhang J H. Water stress induced abscisic acid accumulation triggers the increased generation of reactive oxygen species and up-regulates the activities of antioxidant enzymes in maize leaves[J]. J Exp Bot, 2002, 53: 2401-2410.
- [10] 袁庆华, 桂 枝, 张文瓶. 苜蓿抗感褐斑病品种内超氧化物歧化酶、过氧化物酶和多酚氧化酶活性的比较[J]. 草业学报, 2002, 11(2): 100-104.
- [11] 何文亮, 黄成红, 杨颖丽, 等. 盐胁迫过程中抗坏血酸对植物的保护功能[J]. 西北植物学报, 2004, 24(12): 2196-2201.
- [12] Aroca R, Amodeo G, Fernandez I S, et al. The role of aquaporins and membrane damage in chilling and hydrogen peroxide induced changes in the hydraulic conductance of maize roots[J]. Plant Physiol, 2005, 137: 341-353.
- [13] Maschinski J, Whitham T G. The Continuum of plant responses to herbivory: The influence of plant association, nutrient availability and timing[J]. An Nat, 1989, 134: 1-19.
- [14] Belsky F A. Does herbivory benefit plants? A review of the evidence [J]. An Nat, 1986, 127: 807-829.
- [15] 胡展育. 植物受害后的补偿作用[J]. 文山师范高等专科学校学报, 2007, 20(4): 106-109.
- [16] 孙彩霞, 沈秀英, 刘志刚. 作物抗旱生理生化机制的研究现状和进展[J]. 杂粮作物, 2002, 22(5): 285-288.
- [17] 闫成仕. 水分胁迫下植物叶片抗氧化系统的相应研究进展[J]. 烟台师范学院学报(自然科学版), 2002, 18(3): 220-225.
- [18] 刘 巍, 于志水, 纪纯阳, 等. 植物盐胁迫研究进展[J]. 防护林科技, 2008, 82(1): 57-61.
- [19] 韩 刚, 党 青, 赵 忠. 干旱胁迫下沙生灌木花棒抗氧化保护响应研究[J]. 西北植物学报, 2008, 28(5): 1007-1013.
- [20] Zhang J X, Kirkham M B. Antioxidant responses to drought in sunflower and sorghum seedlings[J]. New Phytol, 1996, 132: 361-373.
- [21] Hurng W P, Kao C H. Effect of flooding on the activities of some enzymes of activated oxygen metabolism, the levels of antioxidants, and lipid per oxidation in senescing tobacco leaves[J]. Plant Growth Regulation, 1994, 39(7): 634-640.
- [22] Moran J F, Becana M, Ormaetxe I I, et al. Drought induces oxidative stress in pea plants[J]. Planta, 1994, 194: 346-352.
- [23] 许长成, 邹 琦. 大豆叶片早促衰老及其与膜脂过氧化的关系[J]. 作物学报, 1993, 19(4): 359-364.
- [24] Riesa S K, Giannopolitis C N. Superoxide dismutase occurrence in higher plants[J]. Plant Physiol, 1997, 59(6): 309-314.
- [25] 张文辉, 段宝利, 周建云, 等. 不同种源栓皮栎幼苗叶片水分关系和保护酶活性对于干旱胁迫的响应[J]. 植物生态学报, 2004, 28(4): 483-490.
- [26] 梁卫理, 王贵彦, 李雁鸣, 等. 利用激发效应提高高产粮田稀缺资源生产效率的研究 I. 理论探讨[J]. 河北农业大学学报, 2000, 23(1): 1-4.

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

GU Jian-qin<sup>1</sup>, YAN Zhi-li<sup>2,3\*</sup>, NIU Jun-yi<sup>3,4</sup>, XI Ling-ling<sup>4</sup>, ZHOU Hai-yan<sup>3</sup>, JIANG Juan<sup>3</sup>

(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