

小麦苗期对 1, 2, 4-三氯苯胁迫的生理响应

张国良^{1,2}, 陈文军¹, 王 显¹, 金 添², 戴其根^{1,*}, 孙国荣¹, 许 轲¹, 霍中洋¹, 张洪程¹

(1. 扬州大学 江苏省作物遗传生理重点实验室, 扬州 225009; 2. 淮阴工学院 生命科学与化学工程学院, 淮安 223001)

摘要:通过砂培试验,研究了 6 种浓度(0、0.3、0.6、1.0、1.5 mmol/kg 沙和 2.0 mmol/kg 沙)的 1, 2, 4-三氯苯(TCB)对两种小麦烟辐 188(耐性基因型)和扬麦 16(敏感基因型)种子发芽率、发芽指数、幼苗生物量、以及叶片和根系的蛋白质含量、丙二醛含量(MDA)、超氧化物歧化酶(SOD)活性、过氧化物酶(POD)活性、过氧化氢酶(CAT)活性等生理指标的影响。结果表明两种小麦基因型具有显著的差异,在 TCB 胁迫下,烟辐 188 的种子发芽率、发芽指数、幼苗生物量均高于扬麦 16,烟辐 188 和扬麦 16 的叶片可溶性蛋白含量分别与对照差异不显著和显著偏低。随着 TCB 浓度的升高,烟辐 188 根系的可溶性蛋白含量呈上升趋势,与对照差异显著,而扬麦 16 先略有上升然后呈下降趋势,且显著低于对照。TCB 胁迫导致扬麦 16 叶片 SOD、POD 活性小于对照,CAT 活性显著小于对照;而烟辐 188 叶片 SOD 活性与对照间差异不明显,POD 和 CAT 活性在低浓度 TCB 胁迫时与对照差异不大,在高浓度时小于对照,其 MDA 含量低于扬麦 16。烟辐 188 根系 SOD、POD 活性对 TCB 胁迫不敏感,扬麦 16 SOD、POD 活性受 $O_2^{\cdot -}$ 诱导而上升,但由于其 $O_2^{\cdot -}$ 产生速率要大于烟辐 188,仍然不能清除多余的 $O_2^{\cdot -}$,最终其根系 MDA 含量高于烟辐 188。总体而言,TCB 胁迫下烟辐 188 的发芽情况、幼苗生长情况和生理指标均好于扬麦 16,表现出对 TCB 胁迫有较强的耐受性和适应性。

关键词:1, 2, 4-三氯苯;小麦;耐性基因型;敏感基因型;毒性;抗氧化酶

文章编号:1000-0933(2008)09-4388-08 中图分类号:S181,S314,X171 文献标识码:A

Physiological reaction of wheat seedling to 1,2,4-trichlorobenzene stress

ZHANG Guo-Liang^{1,2}, CHEN Wen-Jun¹, WANG Xian¹, JIN Tian², DAI Qi-Gen^{1,*}, SUN Guo-Rong¹, XU Ke¹, HUO Zhong-Yang¹, ZHANG Hong-Cheng¹

1 Key Lab for Crop Genetics and Physiology of Jiangsu Province, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China

2 College of Life Science and Chemistry Engineering, Huaiyin Institute of Technology, Huaian 223001, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(9): 4388 ~ 4395.

Abstract: Wheat seeds germination and seedling growth were investigated to study the physiological response of Yanfu 188 and Yangmai 16 to TCB toxicity. The influence of increasing concentrations of TCB (0, 0.3, 0.6, 1.0, 1.5 mmol/kg sand and 2.0 mmol/kg sand) on the germination rate and germination exponential of wheat seeds, the biomass of wheat seedling were measured. Soluble protein content, malnodialdehyde (MDA) content, superoxide dismutase (SOD) activities, peroxidase (POD) activities, and catalase (CAT) activities of both leaves and roots were also measured. TCB had obvious toxicity to wheat, and there was significant difference ($P < 0.05$) between Yanfu 188 and Yangmai 16. The seed germination rate, germination exponential and the seedling biomass of Yanfu 188 were higher than those of Yangmai 16. No significant difference ($P > 0.05$) was observed between the control and the treatment on the leaf soluble protein content of

基金项目:国家科技支撑计划重大资助项目(2006BAD02A03);江苏省高校“青蓝工程”优秀青年骨干教师资助项目(2006)

收稿日期:2007-12-01; **修订日期:**2008-05-15

作者简介:张国良(1976~),男,江苏阜宁人,博士生,主要从事作物生理生态研究. E-mail: hgzgl@sina.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: qgdai@yzu.edu.cn

Foundation item: The project was financially supported by National Key Technology R&D Program of China (No. 2006BAD02A03), and “Qinglan Project” for Training Yong Academic Leaders of Universities of Jiangsu Province(No. 2006)

Received date: 2007-12-01; **Accepted date:** 2008-05-15

Biography: ZHANG Guo-Liang, Ph. D. candidate, mainly engaged in crop physiology and ecology. E-mail: hgzgl@sina.com

Yanfu 188 under TCB stress, but the leaf soluble protein of Yangmai 16 were significantly lower ($P < 0.05$) than the control. With increasing TCB level, the root soluble protein content of Yanfu 188 increased, significantly different with the control. While that of Yangmai 16 increased firstly, then significantly decreased. Under TCB stress, the activities of SOD, POD in Yangmai 16 leaves were lower than control, and the activity of CAT was significantly lower than control. SOD activity in Yanfu 188 leaf was similar with the control. POD and CAT activities in Yanfu 188 leaf was similar with the control under low concentrations, while lower than the control under high concentrations. MDA content in Yanfu 188 was lower than in Yangmai 16. The activities of SOD, POD in Yanfu 188 roots were not sensitive to TCB stress, while those in Yangmai 16 root increased with the concentration of TCB, under induction of $O_2^{\cdot-}$. Since $O_2^{\cdot-}$ producing velocity in Yangmai 16 was greater than Yanfu 188, it could not eliminate excessive $O_2^{\cdot-}$, which led to its higher MDA content. In conclusion, the germination, seedling growth and physiological function of Yanfu 188 were better than Yangmai 16 under TCB stress, and Yanfu 188 was not adversely impacted by TCB.

Key Words: 1,2,4-trichlorobenzene; wheat; tolerant genotype; sensitive genotype; toxicity; antioxidant enzymes

氯苯类有机物(chlorobenzenes, CBs)在合成染料、芳香剂、农药、制药、油漆等工农业生产中有着广泛用途,也是环境中存在的一类疏水性氯代有机污染物。在我国北京地区的通惠河水中 CBs 的检测含量范围为 $0.093 \sim 6.638 \mu\text{g/L}$,表层沉积物(干重)中 CBs 的范围为 $95.3 \sim 1\,827.7 \text{ ng/g}^{[1]}$ 。北京东南郊化工区土壤(干重)中 CBs 的范围为 $0.232 \sim 51.15 \text{ ng/g}$,植物(干重)中 CBs 的范围为 $5.635 \sim 31.99 \text{ ng/g}^{[2]}$ 。CBs 中以 1, 2, 4-三氯苯(1,2,4-TCB)较为广泛,据美国环境保护局(EPA)统计,美国 2001 年向土壤中排放了 1,2,4-TCB 3497 kg,累计已排放 53023 kg,EPA 已将其列入优先控制污染物黑名单^[3]。我国在珠三角、长三角、环渤海湾等地区 and 沈阳、兰州、西安等城市的污泥、土壤及地下水中均检测到了 1,2,4-TCB,在水中浓度可达 $1.55 \mu\text{g/L}$,污泥中含量高达 $2.929 \text{ mg/kg D. W.}^{[4]}$ 。1,2,4-TCB 很难降解^[5,6]。污水灌溉以及用污泥制作肥料使用,均会导致农田中 1,2,4-TCB 的累积。He 等研究了水稻土中 1,2,4-TCB 含量在 $0 \sim 50 \text{ mg/kg D. W.}$ 时生长一季水稻后,稻谷和根中 1,2,4-TCB 的含量最高达 4.01 和 $35.90 \text{ mg/kg D. W.}^{[7]}$ 。王泽港等也在稻米中检测 1,2,4-TCB 的浓度达 $30 \sim 40 \mu\text{g/kg D. W.}^{[8]}$,张建英等在叶菜类和根菜类蔬菜中也检测到了 1,2,4-TCB^[9]。这说明环境中 1,2,4-TCB 将导致其在农产品中的积累,进而通过食物链累积危害人类健康。

由于该类化合物有强烈的致癌、致畸、致突变作用^[10],因此,国内外对其研究也相当活跃,主要集中在生态效应及其在生物体内的富集及毒性毒理机制^[11],特别是对其理化性质、生物学特性及在水生、陆生生态系统中的环境行为^[12,13]的研究报道较多,对高等植物的生态效应和毒性机理研究较少^[8,14,15],尤其是小麦苗期对 1, 2, 4-三氯苯胁迫的生理响应的相关研究未见报道。而小麦苗期容易受外部环境的影响,从而影响后期的生长发育及籽粒的产量和品质。结合选择 2 种小麦(烟辐 188 和扬麦 16)为材料,在评价 1,2,4-TCB 对小麦种子萌发和幼苗生长影响的基础上,对其伤害机理以及 2 种小麦耐性差异的生理机制研究,以期小麦苗期的管理措施提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

两个小麦品种烟辐 188(耐性品种)和扬麦 16(敏感品种),为前期筛选出来的代表性品种;1, 2, 4-三氯苯(TCB),纯度为 96%,购自中国医药集团上海化学试剂公司。

1.2 试验设计

本试验在实验室人工气候箱条件下进行,采用在培养皿中砂培的方式,每培养皿装沙 60 g,设置 0(对照)、0.3、0.6、1.0、1.5、2.0 mmol/kg 沙 6 个 TCB 浓度处理(0.3 ml 丙酮溶解),每个处理 3 次重复,随机区组设计。选择健壮、饱满的小麦种子经 0.2% 的 KMnO_4 表面消毒 20 min,先用自来水冲洗 3 遍后再用去离子水冲洗干净,分别播于不同浓度 TCB 的培养皿中发芽。观察并记录种子发芽生长情况,培养 2 周后测定不同

TCB 浓度处理的小麦植株叶片和根系的活性氧和抗氧化酶活性等生理生化指标。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 发芽和生物量的测定

种子发芽实验方法参照 OECD 和 ISO 方法指南^[17,18]。发芽率(%) = (7d 内发芽种子数/供试种子数) × 100%。发芽指数: $GI = \sum (Gt/Dt)$, 式中 Gt 为不同时间的发芽种子数, Dt 为相应的发芽日数。生物量以 20 株幼苗干重的平均值表示(g/株)。

1.3.2 蛋白质含量的测定

采用考马斯亮蓝法测定叶片和根系的蛋白质含量^[19](mg/g)。

1.3.3 超氧阴离子自由基($O_2^{\cdot-}$)产生速率的测定

根据王爱国和罗广华的方法^[20], 略加修改。在每个处理每个重复中随机取若干植株剪取叶片和根系, 取 0.5 g 叶片或根系加 pH 7.8 的 65 mmol/L 的磷酸缓冲液, 匀浆后离心(2 500 × g) 10 min。取上清液 1 ml, 加入 0.1 ml 羟胺氯化物(10 mmol/L), 25℃ 条件下反应 20 min。再加入 17 mmol/L 的对氨基苯磺酸 1 ml 和 7 mmol/L 的 α-萘胺 1 ml, 25℃ 下再反应 20 min。

1.3.4 丙二醛(MDA)含量的测定

丙二醛(MDA)含量的测定参照张宪政的方法^[21]。取粗酶液 1.5 ml, 加入 2.5 ml 0.5% 的硫代巴比妥酸(TBA, 溶解于 10% 三氯乙酸), 在沸水浴中保温 30 min 后, 立即冷却, 4000 r/min 离心 20 min, 取上清液分别在 450、532nm 和 600nm 下测定吸光度(A)值, 用 $MDA(\mu\text{mol/L}) = 6.45(A_{532} - A_{600}) - 0.56A_{450}$ 计算 MDA 含量, 以单位鲜重 MDA 含量为单位(nmol/g FW)。

1.3.5 抗氧化酶活性的测定

超氧化物歧化酶(SOD)采用氮蓝四唑法^[22], 以抑制 NBT 光还原相对百分率为 50% 的酶量作为一个酶单位(U), 酶活性以 U/mg pro 表示。

过氧化物酶(POD)采用愈创木酚法^[19], 酶活性以 $\Delta A_{470}/(\text{min} \cdot \text{mg pro})$ 表示。

过氧化氢酶(CAT)采用紫外吸收法^[23], 以 1 min 内 A_{240} 减少 0.1 的酶量为 1 个酶活单位(U), 酶活性以 $U/(\text{min} \cdot \text{mg pro})$ 表示。

2 结果与分析

2.1 1, 2, 4-三氯苯胁迫对小麦种子发芽率和发芽指数的影响

TCB 胁迫对小麦种子发芽的影响存在着明显的基因型差异(图 1A、B), 烟辐 188 的发芽率、发芽指数受

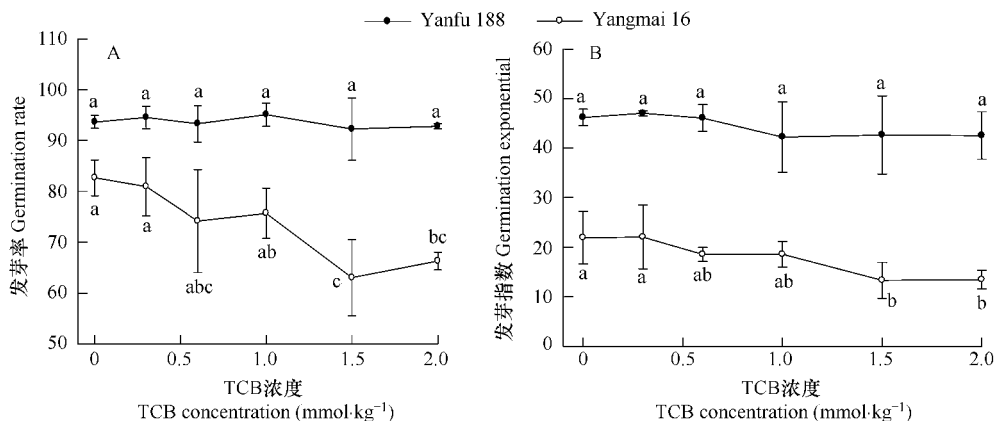


图 1 TCB 对小麦种子发芽率(A)和发芽指数(B)的影响

Fig. 1 Effect of TCB on the germination rate(A) and germination exponential(B) of wheat seeds

同品种不同字母表示差异达 0.05 显著水平; 下同 Different letters within the same variety indicate significant difference at 0.05 level; the same below

TCB 影响较小,各 TCB 处理与对照差异不显著;而扬麦 16 的发芽率、发芽指数随 TCB 浓度的增加呈下降趋势,当浓度 ≥ 1.5 mmol/kg 时发芽率、发芽指数均显著低于对照($p < 0.05$)。可见,敏感基因型扬麦 16 发芽受 TCB 影响较大。

2.2 1, 2, 4-三氯苯胁迫对小麦幼苗生物量的影响

从表 1 可见,两种小麦生物量与 TCB 浓度之间均呈显著的负相关关系,烟辐 188 生物量(y)与 TCB 浓度(x)之间的线性方程为 $y = -0.0033x + 0.0378$ ($r = 0.9543^{**}$),扬麦 16 生物量(y)与 TCB 浓度(x)之间的线性方程为 $y = -0.005x + 0.0368$ ($r = 0.9328^{**}$)。耐性基因型烟辐 188 在低浓度 TCB 胁迫时,生物量与对照差异不大,高浓度 TCB 胁迫时生物量下降幅度相对较大,敏感基因型扬麦 16 经 TCB 胁迫后,生物量显著下降。

2.3 1, 2, 4-三氯苯胁迫对小麦叶片和根系可溶性蛋白含量的影响

从表 2 可以看出,对于叶片来说,烟辐 188 各 TCB 处理(除 0.6 mmol/kg)的可溶性蛋白含量与对照差异不显著,说明烟辐 188 叶片可溶性蛋白含量受 TCB 影响较小;而扬麦 16 各 TCB 处理(除 0.6 mmol/kg)的可溶性蛋白含量均显著低于对照,说明扬麦 16 叶片对 TCB 较敏感。根系则不同,随着 TCB 浓度的升高,烟辐 188 可溶性蛋白含量呈上升趋势,TCB 胁迫的浓度越高,其与对照间的差异越显著;而扬麦 16 先略有上升然后呈下降趋势,且与对照间差异显著。

表 1 TCB 浓度对小麦生物量的影响

Table 1 Effect of TCB on the biomass of wheat

TCB 浓度 (mmol/kg) TCB concentration	小麦生物量 (g/株) Wheat biomass	
	Yanfu 188	Yangmai 16
0 (CK)	0.0367 ab	0.0390 a
0.3	0.0372 a	0.0337 b
0.6	0.0370 ab	0.0331 b
1.0	0.0348 b	0.0317 bc
1.5	0.0325 c	0.0283 c
2.0	0.0311 c	0.0281 c

同列中不同字母表示差异达 0.05 显著水平,下同 Different letters within the same column indicate significant difference at 0.05 level, the same below

表 2 TCB 浓度对小麦叶片和根系可溶性蛋白含量的影响

Table 2 Effect of TCB on the soluble protein content in wheat leaf and root

TCB 浓度 (mmol/kg) TCB concentration	叶片可溶性蛋白含量 (mg/g) Soluble protein content in leaf		根系可溶性蛋白含量 (mg/g) Soluble protein content in root	
	Yanfu 188	Yangmai 16	Yanfu 188	Yangmai 16
0 (CK)	12.4 ab	15.8 a	1.2 d	1.7 b
0.3	11.8 b	12.5 d	1.3 d	1.9 a
0.6	10.8 c	15.1 ab	1.1 d	1.3 c
1.0	11.8 b	14.2 bc	1.6 c	1.4 c
1.5	13.1 a	13.1 cd	1.8 b	1.4 c
2.0	11.6 bc	13.3 cd	2.1 a	1.39 c

2.4 1, 2, 4-三氯苯胁迫对小麦叶片和根系 O_2^- 产生速率的影响

从图 2A、B 可知,经 TCB 胁迫后,两个小麦品种叶片 O_2^- 产生速率变化趋势一致,都是随着 TCB 浓度的增加先升高后下降,在高浓度时又有所回升。但 O_2^- 产生速率大小存在明显的基因型差异,低浓度 TCB 胁迫时扬麦 16 的 O_2^- 产生速率明显要高于烟辐 188,显示出扬麦 16 对 TCB 的敏感性;高浓度 TCB 胁迫时两个品种的 O_2^- 产生速率相差不大。

两个小麦品种根系对于 TCB 胁迫的响应也存在明显的基因型差异,烟辐 188 的 O_2^- 产生速率先下降后上升,而扬麦 16 是先急剧上升而后又迅速下降,且各 TCB 处理的 O_2^- 产生速率均大于对照。扬麦 16 的变化幅度明显大于烟辐 188,说明扬麦 16 对于 TCB 胁迫更敏感。

2.5 1, 2, 4-三氯苯胁迫对小麦叶片和根系 MDA 含量的影响

图 3A、B 表明,扬麦 16 叶片和根系 MDA 含量均是随着 TCB 浓度的增加先下降后上升,在 TCB 浓度 ≥ 1.5 mmol/kg 时,叶片 MDA 含量与对照差异不显著,根系 MDA 含量与对照差异显著。烟辐 188 叶片 MDA 含

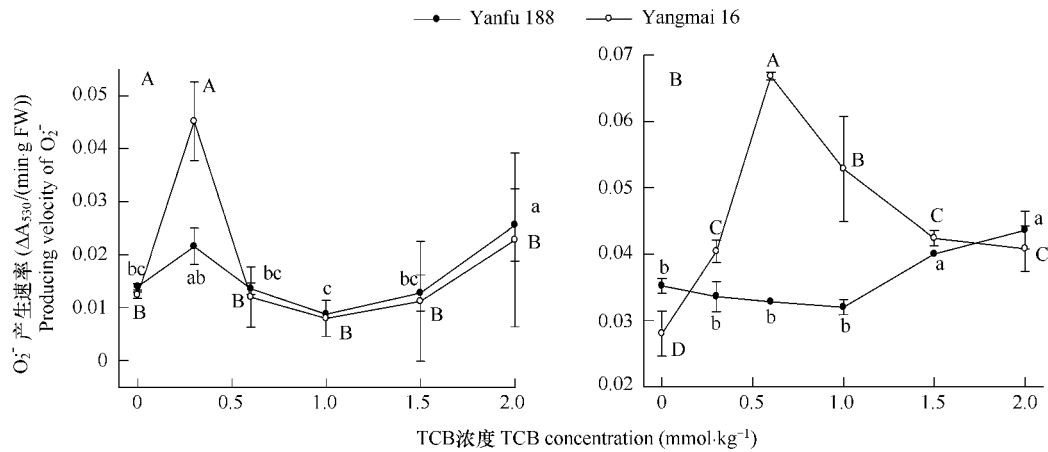


图2 TCB对小麦叶片(A)和根系(B) O₂⁻产生速率的影响

Fig. 2 Effect of TCB on the producing velocity of O₂⁻ in wheat leaf (A) and root (B)

大写字母代表扬麦 16, 小写字母代表烟辐 188 The capital letter indicate Yangmai 16, the small letter indicate Yanfu 188

量对 TCB 胁迫不敏感, 根系对低浓度 TCB 胁迫不敏感, 在 TCB 浓度 ≥ 1.0 mmol·kg⁻¹ 时根系 MDA 含量与对照间差异显著。以上说明根系比叶片对 TCB 胁迫敏感。

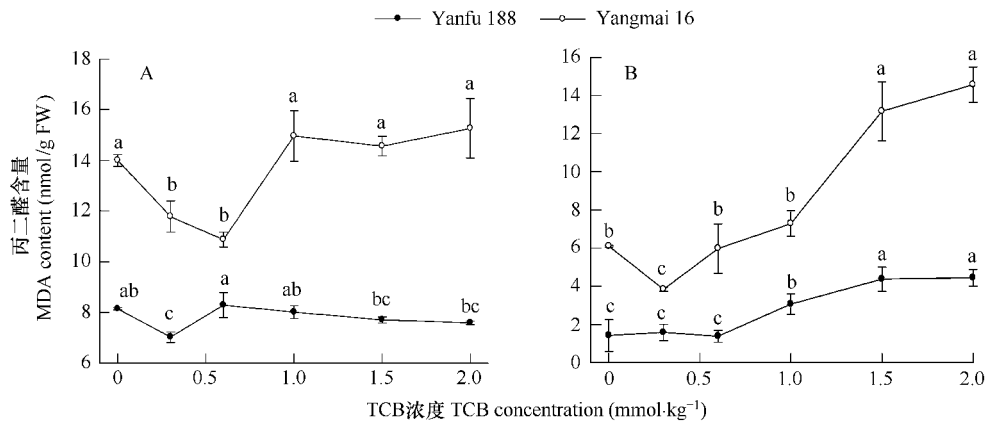


图3 TCB对小麦叶片(A)和根系(B)丙二醛含量的影响

Fig. 3 Effect of TCB on the MDA content in wheat leaf (A) and root (B)

2.6 1, 2, 4-三氯苯胁迫对小麦叶片和根系抗氧化酶活性的影响

2.6.1 1, 2, 4-三氯苯胁迫对小麦叶片和根系 SOD 活性的影响

由表 3 可知, 对叶片而言, 耐性基因型烟辐 188 各 TCB 处理间 SOD 活性变化幅度不大, 与对照间差异都

表 3 TCB 浓度对小麦叶片和根系 SOD 活性的影响

Table 3 Effect of TCB on the activity of SOD in wheat leaf and root

TCB 浓度 (mmol/kg) TCB concentration.	叶片 SOD 活性 (U/mg pro) Activity of SOD in leaf		根系 SOD 活性 (U/mg pro) Activity of SOD in root	
	Yanfu 188	Yangmai 16	Yanfu 188	Yangmai 16
0 (CK)	58.1 a	95.2 a	193.7 ab	216.1 c
0.3	57.3 a	74.4 bc	239.7 a	250.6 bc
0.6	53.6 a	89.0 a	181.0 abc	260.9 bc
1.0	57.4 a	87.9 a	210.2 a	297.9 b
1.5	53.6 a	63.3 c	132.4 bc	279.4 b
2.0	55.7 a	84.1 ab	129.2 c	388.4 a

不显著,说明烟辐 188 叶片 SOD 活性对 TCB 胁迫不敏感。敏感基因型扬麦 16 SOD 活性值变化幅度较大 ($63.3 \sim 95.2 \Delta A_{560}/(\text{min} \cdot \text{mg pro})$),各 TCB 处理 SOD 活性值均小于对照。对于根系而言,烟辐 188 SOD 活性只有在 TCB 浓度达到 2.0 mmol/kg 时才显著低于对照,这说明其根系 SOD 活性对 TCB 胁迫不敏感。扬麦 16 SOD 活性随 TCB 浓度的升高呈上升趋势,在 TCB 浓度 $\geq 1.0 \text{ mmol/kg}$ 时 SOD 活性值显著高于对照,说明 TCB 胁迫诱导扬麦 16 根系 SOD 活性升高。

2.6.2 1, 2, 4-三氯苯胁迫对小麦叶片和根系 POD 活性的影响

由表 4 可知,经 TCB 处理后,就叶片而言,烟辐 188 在 TCB 浓度 $\geq 0.6 \text{ mmol/kg}$ 时 POD 活性显著低于对照 ($p < 0.05$);而扬麦 16 各 TCB 处理 POD 活性值均显著低于对照 ($p < 0.05$),这说明扬麦 16 叶片 POD 对 TCB 胁迫响应较快。对于根系来说,烟辐 188 各 TCB 处理与对照间差异均不显著;扬麦 16 各 TCB 处理均显著高于对照 ($p < 0.05$),这说明扬麦 16 根系对 TCB 胁迫的响应较敏感。

表 4 TCB 浓度对小麦叶片和根系 POD 活性的影响

Table 4 Effect of TCB on the activity of POD in wheat leaf and root

TCB 浓度 (mmol/kg) TCB concentration.	叶片 POD 活性 ($\Delta A_{470}/(\text{min} \cdot \text{mg pro})$) Activity of POD in leaf		根系 POD 活性 ($\Delta A_{470}/(\text{min} \cdot \text{mg pro})$) Activity of POD in root	
	Yanfu 188	Yangmai 16	Yanfu 188	Yangmai 16
0 (CK)	5.4 a	12.2 a	275.6 a	185.7 e
0.3	5.1 ab	8.7 c	252.6 a	232.6 d
0.6	4.5 bc	10.5 b	259.3 a	341.5 b
1.0	4.5 bcd	10.3 b	291.9 a	283.3 c
1.5	4.1 cd	6.1 d	243.9 a	295.7 c
2.0	3.8 d	9.5 bc	272.7 a	387.9 a

2.6.3 1, 2, 4-三氯苯胁迫对小麦叶片 CAT 活性的影响

由表 5 可知,烟辐 188 叶片 CAT 活性先略有上升后下降,在 TCB 浓度 $\leq 1.0 \text{ mmol/kg}$ 时与对照差异不显著,当 TCB 浓度 $\geq 1.5 \text{ mmol/kg}$,CAT 活性显著低于对照;扬麦 16 各 TCB 处理 CAT 活性均显著低于对照,各 TCB 处理间差异不显著。可以看出,扬麦 16 对于 TCB 胁迫响应较迅速。

3 讨论

小麦是我国的一种主要粮食作物,随着污水灌溉以及利用城市垃圾和污泥制成肥料的使用,均会导致农田中有机污染物的累积^[1,4,24]。本研究结果表明,在 1,2,4-TCB 供试浓度范围内,对耐性基因型烟辐 188 的发芽影响不明显,对敏感基因型扬麦 16 的发芽明显抑制。TCB 胁迫导致小麦苗期生长缓慢,扬麦 16 生物量明显下降,烟辐 188 在高浓度 TCB 胁迫时生物量下降幅度较大。

本研究中经 TCB 处理后,烟辐 188 的叶片可溶性蛋白含量与对照差异不显著,扬麦 16 则显著低于对照,进一步说明了烟辐 188 对 TCB 胁迫耐性较强,扬麦 16 对 TCB 较敏感。随着 TCB 浓度的升高,烟辐 188 根系的可溶性蛋白含量呈上升趋势,与对照差异显著;而扬麦 16 先略有上升然后呈下降趋势,且显著低于对照。这可能是因为根系直接接触 TCB,耐性基因型合成积累较多蛋白质,与 TCB 结合缓解其毒性;而敏感基因型受 TCB 胁迫使蛋白酶活性增强,加快了蛋白质的分解或者使 RNA 转录和翻译受到抑制,造成蛋白质合成受阻,导致根系蛋白质含量下降。研究表明,抛物线型剂量-效应关系是生物对污染胁迫反应的常见形式,其顶点所对应的污染物浓度可以认为是生物对污染从适应性反应到中毒性反应的临界值^[25]。本文中个别 TCB 浓度 (0.6 mmol/kg) 胁迫下的蛋白质含量和 POD 活性出现特

表 5 TCB 浓度对小麦叶片 CAT 活性的影响

Table 5 Effect of TCB on the activity of CAT in wheat leaf

TCB 浓度 (mmol/kg) TCB concentration	叶片 CAT 活性 ($\text{U}/(\text{min} \cdot \text{mg pro})$) Activity of CAT in leaf	
	Yanfu 188	Yangmai 16
0 (CK)	5.0 ab	5.0 a
0.3	5.3 a	4.4 b
0.6	5.0 ab	4.4 b
1.0	4.6 bc	3.9 b
1.5	4.2 c	4.1 b
2.0	4.5 c	4.0 b

异点的原因可能就在于此。

逆境下植物产生更多的活性氧自由基,引起膜脂过氧化而导致膜系统受损,最终使组织受到破坏。SOD、POD 和 CAT 则共同组成植物体内一个有效的活性氧清除系统,能够有效地清除植物体内的自由基和过氧化物^[26]。SOD 催化 $O_2^{\cdot-}$ 形成 H_2O_2 , H_2O_2 仍然是活性氧一种存在形式,其最终被消除主要依赖于 CAT 完成,此外 ASP, POD 等保护酶也承担部分 H_2O_2 的清除。 H_2O_2 的积累往往导致 CAT 消耗或失活^[27]。徐应明等通过水培研究了二氯苯胁迫对小麦幼苗生长的影响,二氯苯胁迫使小麦 POD、MDA 含量增加,小麦受害程度加重^[28]。本研究结果表明,烟辐 188 和扬麦 16 对 TCB 胁迫的响应存在明显的基因型差异,TCB 胁迫导致 $O_2^{\cdot-}$ 自由基代谢平衡被打破,敏感基因型扬麦 16 的 $O_2^{\cdot-}$ 产生速率大,耐性基因型烟辐 188 产生缓慢。活性氧的积累导致抗氧化酶系统发生改变,敏感基因型扬麦 16 叶片 SOD、POD 活性比对照有所降低, CAT 活性显著低于对照;而耐性基因型烟辐 188 叶片 SOD 活性与对照间差异不明显, POD 和 CAT 活性在低浓度 TCB 胁迫时与对照差异不大。这说明 TCB 胁迫导致敏感基因型叶片 SOD 清除 $O_2^{\cdot-}$ 的能力下降, POD 和 CAT 活性的降低也势必造成 H_2O_2 的积累,积累的 $O_2^{\cdot-}$ 和 H_2O_2 攻击生物膜,导致膜脂过氧化加剧,最终其 MDA 含量高于耐性基因型。对于根系而言,耐性基因型烟辐 188 的 SOD、POD 活性对 TCB 胁迫不敏感,敏感基因型扬麦 16 的 SOD、POD 活性受 $O_2^{\cdot-}$ 诱导而上升,但由于其 $O_2^{\cdot-}$ 产生速率要大于耐性基因型,仍然不能缓解 $O_2^{\cdot-}$ 的积累,最终导致其 MDA 含量高于耐性基因型。

总体而言,烟辐 188 苗期蛋白质积累能力相对较强、 $O_2^{\cdot-}$ 产生速率变化幅度相对较小、抗氧化酶系统较稳定、清除活性氧的能力较强,因而其耐受 TCB 胁迫的能力要强于扬麦 16。

References:

- [1] Zhou X, Yu G, Zhang Z L, *et al.* Chlorobenzenes in water and surface sediments from Tonghui river of Beijing. *Environmental Science*, 2005, 26 (2): 117—120.
- [2] Zhou X, Yu G, Huang J, *et al.* Residues and distribution characters of chlorobenzenes in soil and plants from Beijing Southeast Chemical Industry Zone. *Environmental Science*, 2007, 28(2): 249—254
- [3] Jaime D, Manuel R, Mario D. 1,2,4-Trichlorobenzene flow characteristics in saturated homogeneous and stratified porous media. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2006, 177(1-4): 3—17.
- [4] Cai Q Y, Mo C H, Wu Q T, *et al.* Preliminary study on the content of chlorobenzenes in selected municipal sludge of China. *Environmental Chemistry*, 2002, 21(2): 139—143.
- [5] Brunsbach F R, Reineke W. Degradation of chlorobenzenes in soil slurry by a specialized organism. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 1994, 42(2-3): 415—420.
- [6] Freitag D, Ballhorn L, Geyer H, Korte F. Environmental hazard profile of organic chemicals; An experimental method for the assessment of the behaviour of organic chemicals in the ecosphere by means of simple laboratory tests with ^{14}C labelled chemicals. *Chemosphere*, 1985, 14(10): 1589—1616.
- [7] He Y W, Tieheng S, Ziqing O, Ayfer Y, Antonius K. Fate of 1,2,4-Trichlorobenzene (1,2,4-TCB) in soil-rice paddy system. *Chemosphere*, 1996, 32 (7): 1381—1389.
- [8] Wang Z G, Wang D Z, Yang Y C, *et al.* Effects of 1,2,4-trichloroben and naphthalene on grain yield and quality of rice. *Chinese Journal of Rice Science*, 2006, 20(3): 295—300.
- [9] Jianying Z, Wei Z, Jun P, Limin Q, Yinmei Z. Tissue-dependent distribution and accumulation of chlorobenzenes by vegetables in urban area. *Environment International*, 2005, 31(6): 855—860.
- [10] Assche F V. Induction of enzyme capacity in plants as a result of heave metal toxicity: Dose-response relation in *Phaseolus vulgaris* L. treatment with zinc and cadmium. *Environmental Pollution*, 1988, 52(2): 103—115.
- [11] Kong F X. Molecular structure and biochemical toxicity of four halogeno-benzenes on the unicellular green alga. *Environmental and Experimental Botany*, 1998, 40(2): 105—111.
- [12] Hart, *et al.* Charaterization of cadimium binding, uptake, and translocation in intact seedlings of bread and durum wheat cultivars. *Plant Physiology*, 1998, 116(4): 1413—1420.
- [13] Du Q P, Huang C N, Jia X S, *et al.* The toxic effects of 1,2,4-trichlorobenzene on three kinds of ocean tiny algae. *Ecology and Environment*,

2007, 16(2):352—357.

- [14] Liu W, Song Y F, Zhou Q X, *et al.* Effect of chlorobenzene-stress on seed germination and seedling growth of wheat. *Agro-environmental Protection*, 2001, 20(2): 65—68.
- [15] Du Q P, Jia X S, Yuan B H. Toxic effects of 1,2,4-trichlorobenzene on rice seed germination and seedling growth. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(11): 2185—2188.
- [16] Zhang G L, Chen W J, Dai Q G, *et al.* Screening of tolerant wheat genotypes to 1,2,4-trichlorobenzene stress at seedling stage. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2008, 27(1): 0030—0034.
- [17] OECD(Organization for Economic Cooperation and Development). Proposal for Updating Guideline 208:Terrestrial(Non-Target) Plant Test 208A-Seedling Emergence and Seedling Growth test. 2000, Paris, France.
- [18] International Organization for Standardization(ISO). Soil quality-Determination of the effects of pollutants on soil flora. Part 1: Method for the measurement of inhibition of root growth. 1993, ISO11269-1.
- [19] Zhang Z L. The guidance of plant physiological experiment. Beijing: Higher Education Press, 2003. 274—277.
- [20] Wang A G, Luo G H. Quantitative relation between the reaction of hydroxylamine and superoxide anion radicals in plant. *Plant Physiology Communication*, 1990, 26(6): 55—57.
- [21] Zhang X Z. Research method of crop physiology. Beijing: Agriculture Press, 1992. 195—218.
- [22] Li H S. Experimental principle and technique for plant physiology and biochemistry. Beijing: Higher Education Press, 2000.
- [23] Zou Q. The guidance of plant physiological experiment. Beijing: China Agriculture Press, 2000. 173—174.
- [24] Liu W, Sun T H, Zhou Q X, *et al.* Chlorobenzene-stressing injury of the germination of soybean seed. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(2): 141—144.
- [25] Liu W, Li P J, Zhou Q X, *et al.* Effect of Stress from Chlorobenzenes on SOD activity of broadbean seedlings. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(3): 432—436.
- [26] Chu L, Jin S, Wu X F, *et al.* Effects of Cu pollution on *Medicago lupulina* L. seedlings growth and active oxygen metabolism. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(12): 1481—1485.
- [27] Xu Y M, Yuan Z H, Li J X, *et al.* Effects of dichlorobenzene-stress on seed germination and seedling growth of wheat. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2005, 24(4): 11—14.
- [28] Zhao L Y, Deng X P, Shan L. The response mechanism of active oxygen species removing system to drought stress. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2005, 25(2): 413—418.

参考文献:

- [1] 周霞,余刚,张祖麟,等.北京通惠河水表层沉积物中氯苯类有机物污染现状. *环境科学*, 2005, 26(2): 117—120.
- [2] 周霞,余刚,黄俊,等.北京东南郊化工区土壤和植物中氯苯类有机物的残留及分布特征. *环境科学*, 2007, 28(2): 249—254.
- [4] 蔡全英,莫测辉,吴启堂,等.部分城市污泥中氯苯类化合物的初步研究. *环境化学*, 2002, 21(2): 139—143.
- [8] 王泽港,万定珍,杨亚春,等.1,2,4-三氯苯和萘对水稻产量及品质的影响. *中国水稻科学*, 2006, 20(3): 295—300.
- [13] 杜青平,黄彩娜,贾晓珊,等.1,2,4-三氯苯对 3 种海洋微藻的毒性效应. *生态环境*, 2007, 16(2): 352—357.
- [14] 刘宛,宋玉芳,周启星,等.氯苯胁迫对小麦种子发芽和幼苗生长的影响. *农业环境保护*, 2001, 20(2): 65—68.
- [15] 杜青平,贾晓珊,袁保红.1,2,4-TCB 对水稻种子萌发及幼苗生长的毒性机理. *应用生态学报*, 2006, 17(11): 2185—2188.
- [16] 张国良,陈文军,戴其根,等.小麦耐 1,2,4-三氯苯胁迫基因型的苗期筛选. *农业环境科学学报*, 2008, 27(1): 0030—0034.
- [19] 张志良.植物生理学实验指导.北京:高等教育出版社,2003. 274—277.
- [20] 王爱国,罗广华.植物的超氧自由基与羟胺反应的定量关系. *植物生理学通讯*, 1990, 26(6): 55—57.
- [21] 张宪政.作物生理研究法.北京:中国农业出版社,1992. 195—218.
- [22] 李合生.植物生理生化实验原理和技术.北京:高等教育出版社,2000. 160—163.
- [23] 邹琦.植物生理学实验指导.北京:中国农业出版社,2000. 173—174.
- [24] 刘宛,孙铁珩,周启星,等.氯苯胁迫对大豆种子萌发的伤害. *应用生态学报*, 2002, 13(2): 141—144.
- [25] 刘宛,李培军,周启星,等.氯苯类胁迫对蚕豆幼苗超氧化物歧化酶活性的影响. *农业环境科学学报*, 2004, 23(3): 432—436.
- [26] 储玲,晋松,吴学峰,等.铜污染对天蓝苜蓿幼苗生长及活性氧代谢的影响. *生态学杂志*, 2006, 25(12): 1481—1485.
- [27] 徐应明,袁志华,李军幸,等.二氯苯胁迫对小麦种子萌发和幼苗生长的影响. *灌溉排水学报*, 2005, 24(4): 11—14.
- [28] 赵丽英,邓西平,山仑.活性氧清除系统对干旱胁迫的响应机制. *西北植物学报*, 2005, 25(2): 413—418.