

DOI: 10.5846/stxb201407171459

李玉, 丁焕新, 丁秀文, 殷毅凡, 孙影, 戴其根, 张洪程, 许轲, 霍中洋, 魏海燕, 郭保卫. 1, 2, 4-三氯苯胁迫对不同基因型水稻灌浆期生理特性及产量的影响. 生态学报, 2016, 36(5): - .

Li Y, Ding H X, Ding X W, Yin Y F, Sun Y, Dai Q G, Zhang H C, Xu K, Huo Z Y, Wei H Y, Guo B W. Effects of 1, 2, 4-trichlorobenzene on physiological characteristics during grain filling stage and grain yield of rice of different genotypes. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(5): - .

1, 2, 4-三氯苯胁迫对不同基因型水稻灌浆期生理特性及产量的影响

李 玉¹, 丁焕新¹, 丁秀文¹, 殷毅凡¹, 孙影¹, 戴其根^{1,2,*}, 张洪程^{1,2}, 许 轲^{1,2}, 霍中洋^{1,2}, 魏海燕^{1,2}, 郭保卫^{1,2}

1 扬州大学江苏省作物遗传生理重点实验室, 扬州 225009

2 扬州大学农业部长江流域稻作技术创新中心, 扬州 225009

摘要:在盆栽土培条件下,研究了 5 种浓度(0、10、20、40、80 mg/kg 土)的 1, 2, 4-三氯苯(TCB)对两种基因型水稻品种宁粳 1 号(敏感基因型)和扬辐粳 8 号(耐性基因型)产量及灌浆期生理特性的影响。结果表明:TCB 对两种基因型水稻产量和灌浆期生理特性的影响具有显著差异,随着 TCB 浓度的增加,宁粳 1 号的产量呈现递减趋势,而扬辐粳 8 号呈低浓度下产量增加高浓度下产量显著降低的趋势,在中高浓度 TCB(40、80 mg/kg)处理时,宁粳 1 号每盆穗数,每穗粒数,结实率显著降低且降幅显著大于扬辐粳 8 号,两个基因型品种千粒重变化都不明显。宁粳 1 号株高、干物重受 TCB 抑制程度较明显,降幅显著大于扬辐粳 8 号。在低浓度 TCB(20 mg/kg)处理时,宁粳 1 号根系活力、叶绿素含量、可溶性蛋白质含量显著降低,而扬辐粳 8 号有所提高。随着 TCB 浓度的增加,两个基因型品种叶片抗氧化酶 SOD、POD、CAT 活性均呈先升后降趋势,且在低浓度 TCB(10 mg/kg、20 mg/kg)处理时,扬辐粳 8 号抗氧化酶活性极显著高于宁粳 1 号,在高浓度 TCB(80 mg/kg)TCB 浓度胁迫下,宁粳 1 号抗氧化酶活性极显著低于对照,且降幅极显著大于扬辐粳 8 号,且 MDA 含量增幅较大,膜质过氧化程度高。总体而言,低浓度 TCB 对扬辐粳 8 号的产量和灌浆期株高、干物重、叶绿素含量、叶片蛋白质含量和抗氧化酶活性具有一定的促进作用,中高浓度 TCB 对宁粳 1 号的抑制作用显著大于扬辐粳 8 号,扬辐粳 8 号在不同浓度的 TCB 处理下较宁粳 1 号表现出较强的耐迫性和适应性。

关键词:水稻;灌浆期;1, 2, 4-三氯苯;基因型;抗氧化酶;产量

Effects of 1, 2, 4-trichlorobenzene on physiological characteristics during grain filling stage and grain yield of rice of different genotypes

LI Yu¹, DING Huanxin¹, DING Xiuwen¹, YIN Yifan¹, SUN Ying¹, DAI Qigen^{1,2,*}, ZHANG Hongcheng^{1,2}, XU Ke^{1,2}, HUO Zhongyang^{1,2}, WEI Haiyan^{1,2}, GUO Baowei^{1,2}

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

2 Innovation Center of Rice Cultivation Technology in Yangtze River Valley, Ministry of Agriculture, Yangzhou 225009, China

Abstract: A soil culture experiment was conducted to study the effects of 1, 2, 4-trichlorobenzene (TCB) at different levels on the grain yield and physiological characteristics of rice plants during grain filling period. Two cultivars, Ningjing 1 (TCB sensitive) and Yangfujing 8 (TCB tolerant), were planted in soils containing 0 (CK), 10, 20, 40 and 80 mg TCB per kg soil. Significant differences were determined in the effects of TCB levels on the grain yield and physiological characteristics during grain filling period between the two cultivars. With the increase in TCB level, the yield of Ningjing 1

基金项目:国家自然科学基金(31271639);公益性行业(农业)科研专项(201303102)

收稿日期:2014-07-17; **网络出版日期:**2015- -

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

was reduced gradually and the yield of Yangfujing 8 was increased at the two low TCB levels of 10 and 20 mg/kg and significantly decreased at higher TCB levels. At the medium and high TCB levels (40 and 80 mg/kg), the panicle number per pot, grain number per panicle and seed setting rate of Ningjing 1 decreased significantly, with decrements significantly bigger than Yangfujing 8, while there was no significant difference in 1000-grain-weight between TCB treatments. The plant height and dry biomass weight of Ningjing 1 were reduced at higher degrees than those of Yangfujing 8. At the low TCB level (20 mg/kg), chlorophyll content, root activity and soluble protein were significantly decreased in the leaves of Ningjing 1 and slightly increased in the leaves of Yangfujing 8. The activities of superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD) and catalase (CAT) of the leaves of two cultivars in leaves were increased at low TCB levels and decreased at high TCB levels. At the low TCB levels of 10 and 20 mg/kg, the activities of antioxidant enzymes in Yangfujing 8 were significantly higher than in Ningjing 1. At the highest level of 80 mg/kg, the activities of antioxidant enzymes were significantly lower as compared with the control, with bigger decrements than those in Yangfujing 8. The content of MDA in leaves of Ningjing 1 increased more remarkably than that in Yangfujing 8, indicating that lipid peroxidation was more serious in Ningjing 1. Our study indicated that low TCB levels slightly promoted rice yield, biomass weight, chlorophyll content, protein content and the activities of antioxidant enzymes of the leaves of Yangfujing 8. TCB at the medium and high levels had more inhibitive effects on Ningjing 1 than on Yangfujing 8. Compared with Ningjing 1, Yangfujing 8 was more resistant and adaptable to TCB at different levels.

Key Words: Rice; grain filling period; 1, 2, 4-trichlorobenzene; genotype; antioxidant enzymes; yield

氯苯类有机化合物(chlorobenzenes, CBs)是一类在合成染料、芳香剂、农药、制药、油漆等工农业生产中有着广泛用途的化工产品,因此广泛存在于环境中。这类疏水性有机化合物因不易降解,以及对人的致突变性、致癌性和致畸性^[1],已先后被美国环境保护局(U.S. Environmental Protection Agency 简称 EPA)、欧洲、中国列入优先控制污染物名单^[2-3]。据统计,每年排入英国南部亨伯流域工业废水中氯苯总量为 133 kg,美国 2001 年向土壤中排放了 1,2,4-TCB 3497 kg,累计已排放 53023 kg。美国、英国和加拿大等国城市污泥中 CBs 的含量通常为 0.1—50 mg/kg,主要在 1—10 mg/kg 之间,少数在 50 mg/kg 以上,有的甚至高达 1700 mg/kg^[4-7]。中国部分城市污泥中 CBs 化合物的总含量(CBs)在 0.01—6.92 mg/kg 之间^[8],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、土壤及地下水中都可检测出 1,2,4-TCB,其中在水中浓度可达 1.55 $\mu\text{g/L}$,污泥中含量高达 2.93 mg/kg^[9-10]。

三氯苯(TCB)有 3 种同分异构体 1,2,4-TCB、1,2,3-TCB 和 1,3,5-TCB,其中 1,2,4-TCB 应用最为广泛。三氯苯对生态环境的影响在国内外已经引起广泛关注,以往的研究主要集中在氯苯污染物的生态效应^[11-13],水生植物和动物的毒性毒理机制^[14-16]以及污染物修复方面^[17-18],而对高等植物尤其是农作物的毒性机理及其生态效应研究较少。水稻是我国第一大粮食作物,而且又是消耗水分较多的作物,而水是三氯苯迁移的主要载体,因此水稻易受到三氯苯的危害。灌浆期是水稻品质和产量的形成期,以往相关的研究多数为 1,2,4-TCB 短期胁迫且主要集中在苗期^[19-25],分蘖盛期^[26]以及品种筛选上,抽穗期也有少量报道^[27],至今未见灌浆期的相关报道,这样难以了解 1,2,4-TCB 对水稻生长的长期伤害效应和对产量形成的影响。本文在前期筛选出对 1,2,4-TCB 胁迫耐性显著差异的代表性水稻品种^[26]基础上,研究不同基因型水稻灌浆期对 1,2,4-三氯苯胁迫的响应,进一步比较耐性、敏感类型的生理特点及产量的差异性,为耐 1,2,4-三氯苯水稻品种的筛选和稻米安全生产提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试品种:宁粳 1 号(Ning Jing1 简称 NJ,敏感基因型)和扬辐粳 8 号(yang Fujing8 简称 YFJ,耐性基因

型)为前期筛选出的代表品种^[26]。

1,2,4-三氯苯(TCB)化学纯,含量 $\geq 98.5\%$,购自国药集团化学试剂有限公司。

1.2 试验设计

试验于2013年5—10月份在扬州大学实验农场(东经119.42°,北纬32.39°),该地属亚热带季风气候,5—10月份平均气温24℃,月降水量88 mm,月日照时数168 h。在大棚内盆栽,塑料盆钵直径25 cm、高30 cm,装土15 kg。土壤取自农场稻田耕层土壤,砂壤土,经3 mm孔径过筛,土壤pH(H₂O)值6.89、全氮0.14%、速效磷35.62 mg/kg、速效钾88.12 mg/kg、有机质14.9 g/kg。每盆施尿素2 g,磷酸二氢钾0.5 g作为基肥,稀硫酸调节pH值在5.0—5.5之间。

根据前人相关研究^[23-24,28]和预备性试验,设置0(对照)、10、20、40、80 mg 1,2,4-TCB每kg土5个浓度处理,每个处理重复8次。按处理浓度将1,2,4-TCB溶液(丙酮作为溶剂)加入到土中,充分搅拌均匀,加水浸泡放置3天后,于7月1号移栽,每盆栽3穴,每穴双本。水稻秧苗3叶1心,秧龄18天。整个生长季在通风透光避雨玻璃棚,以防氯苯淋失,其他栽培管理同大田。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 形态指标的测定

在水稻灌浆期(抽穗后20天),各品种各处理取代表性植株5穴(10株),测量株高后,按茎、叶片、穗和根分组,并在105℃烘箱内杀青15 min,然后80℃烘至恒重称取干重。

1.3.2 生理指标的测定

水稻抽穗后20天,各品种各处理取代表性植株3穴测定相关生理指标。取冲洗干净根系根尖0.5 g,采用 α -萘胺法测定根系活力,单位为 $\text{ug}/(\text{g} \cdot \text{h FW})$;采用SPAD-502型叶绿素计测定剑叶叶绿素含量。测定剑叶蛋白质含量、酶及其活性,其中:蛋白质含量采用考马斯亮蓝法测定^[29],单位为 $(\text{mg}/\text{g FW})$;丙二醛(Malondialdehyde 简称MDA)含量采用硫代巴比妥酸(Tertiary Butanol 简称TBA)法测定^[30],单位为 $(\text{umol}/\text{g FW})$;超氧化物歧化酶(Superoxide Dismutase 简称SOD)活性采用氮蓝四唑(Nitrotetrazolium Blue Chloride 简称NBT)光还原法^[31]测定,以抑制反应50%的酶量为一个酶活性单位(U),酶活性单位以 $\text{U}/(\text{g} \cdot \text{min FW})$ 表示;过氧化物酶(Peroxidase 简称POD)的活性采用愈创木酚法^[29],以每分钟A470值变化0.01作为一个酶活性单位(U),酶活性以 $\text{U}/(\text{g} \cdot \text{min FW})$ 表示;过氧化氢酶(Catalase 简称CAT)采用紫外吸收法^[32]测定活性,单位为 $\text{U}/(\text{g} \cdot \text{min FW})$ 。

1.3.3 产量及其构成因素的测定

成熟期,各品种各处理取两盆水稻用于考种测产,测定每盆水稻产量及其穗数,每穗粒数,结实率和千粒重。

1.4 数据分析与作图

用Excel 2007 进行数据整理,用SPSS 17.0 软件进行方差分析与多重比较。

2 结果与分析

2.1 1,2,4-三氯苯胁迫对水稻产量及其构成因素的影响

方差分析表明(表1),产量在基因型间、1,2,4-三氯苯处理(TCB)浓度间差异均达极显著水平,并且二者存在极显著的互作效应。产量构成各因素在基因型间的差异达极显著水平,在TCB浓度间除对千粒重的影响不显著外对其他产量三因素的影响达极显著水平,且每盆穗数还存在基因型间与TCB处理极显著的互作效应。

随着TCB浓度的增加,敏感基因型宁粳1号的产量呈现递减趋势,而耐性基因型扬辐粳8号呈低浓度下产量增加高浓度下产量显著降低的趋势。在10 mg/kgTCB浓度处理时,宁粳1号产量与对照差异不显著,扬辐粳8号产量比对照提高5.7%,每盆穗数,每穗粒数,结实率分别提高6.19%、2.75%、2.17%。在20 mg/kg

TCB 浓度处理时, 宁粳 1 号产量极显著低于对照, 且每盆穗数极显著低于对照, 每穗粒数和结实率也显著低于对照, 而扬辐粳 8 号产量、每盆穗数, 每穗粒数, 结实率变化不明显, 随着 TCB 浓度的进一步增加, 两个基因型品种每盆穗数, 每穗粒数, 结实率均极显著下降, 且宁粳 1 号降幅较大, 在不同浓度的 TCB 处理下两个基因型品种千粒重的变化均不显著。

表 1 1,2,4-TCB 对水稻产量及其构成因素的影响

Table 1 Effect of 1,2,4-TCB on grain yield and its components of rice

基因型 Genotype	1,2,4-TCB 浓度 1,2,4-TCB Concentration/ (mg/kg)	每盆产量/g Grain yield/ g per pot	每盆穗数 NO. of panicles Per pot	每穗粒数 Grain numbe Per panicle	结实率/% Seed setting Rate/%	千粒重/g 1000-grain Weight/g
宁粳 1 号 Ningjing 1	0	92.74 aA	33.33 abA	108.40 aAB	0.92 abAB	27.90 aA
	10	89.16 abAB	32.33 bA	108.20 aAB	0.90 bcB	28.32 aA
	20	72.48 dC	30.00 cB	99.00 bcBCD	0.89 cB	27.42 aAB
	40	58.58 eD	27.67 dB	89.40 cC	0.85 dC	27.86 aA
	80	26.20 gF	14.67 fD	78.00 eE	0.81 eD	28.27 aA
扬辐粳 8 号 Yangfujing 8	0	86.66 bcAB	32.33 bA	109.40 aAB	0.92 abAB	25.23 bBC
	10	91.63 abA	34.33 aA	112.00 aA	0.94 aA	25.35 bBC
	20	83.42 cB	33.67 abA	105.60 abABC	0.93 aA	26.63 bBC
	40	62.47 eD	28.33 dB	95.80 cdCD	0.89 cB	25.86 bBC
	80	40.55 fE	21.00 eC	89.80 dD	0.85 dC	25.30 bBC
基因型 F 值 F-value of genotype (A)		18.05 **	42.24 **	11.24 **	39.89 **	62.48 **
基因型 P 值 P-value of genotype (A)		0.001694103	2.45894E-06	0.001760308	1.69872E-07	1.30756E-05
浓度 F 值 F-value of concentration (B)		316.88 **	259.02 **	32.04 **	56.41 **	0.61
浓度 P 值 P-value of concentration (B)		1.75169E-10	6.41546E-17	5.47179E-12	6.45875E-16	0.664201667
基因型×浓度 F 值 F-value of (A×B)		8.72 **	12.33 **	1.03	0.92	0.49
基因型×浓度 P 值 P-value of (A×B)		0.002679483	3.24771E-05	0.405837904	0.460731024	0.744198351

同列中标以不同大、小写字母的值分别在 0.01 和 0.05 水平差异显著。

2.2 1,2,4-三氯苯胁迫对水稻灌浆盛期形态指标和干物重的影响

如表 2 所示敏感基因型宁粳 1 号株高、地上部和地下部干物重在 10 mg/kg TCB 浓度处理时与对照差异不显著, 在 20 mg/kg TCB 浓度处理时, 株高、地上部和地下部干物重比对照降低 9.48%、9.54%、11.9%, 差异

表 2 1,2,4-三氯苯胁迫对 2 种基因型水稻灌浆盛期各形态指标的影响

Table 2 Effect of 1,2,4-TCB on morphological index in rice at grouting stage

基因型 Genotype	1,2,4-TCB 浓度 1,2,4-TCB Concentration/ (mg/kg)	株高/cm Plant height/ cm	地上部干物重/g Shoot dry weight g per plant	地下部干物重/g Root dry weight g per plant
宁粳 1 号 (Ningjing 1)	ck	81.05 a A	25.10 a A	3.56 a A
	10	81.30 a A	27.60 a A	3.45 a AB
	20	77.30 b AB	23.95 b B	3.18 b B
	40	73.90 c B	20.70 c B	2.72 c C
	80	67.73 d C	16.40 d C	1.84 d D
扬辐粳 8 号 (Yangfujing 8)	ck	86.93 a A	28.55 bc AB	3.36 a A
	10	86.43 a A	29.65 ab A	3.42 a A
	20	87.33 ab A	30.15 a A	3.51 a A
	40	81.13 b AB	25.25 c BC	2.87 b B
	80	74.90 c B	21.60 d C	2.10 c C

同列中标以不同大、小写字母的值分别在 0.01 和 0.05 水平差异显著。

达显著水平。耐性基因型扬辐梗 8 号在 (10 mg/kg, 20 mg/kg) TCB 浓度处理时, 株高与对照差异不显著, 甚至略有增加, 如在 20 mg/kg TCB 浓度处理时, 株高, 地上部干物重, 地下部干物重分别增加 0.46%, 5.6%, 4.5%, 其中地上部干物重显著高于对照, 随 TCB 浓度进一步增加, 两个基因型品种株高, 地上部干物重, 地下部干物重均显著降低, 且宁梗 1 号降幅较大。低浓度 TCB 对耐性基因型品种扬辐梗 8 号具有一定的刺激作用, 促进其株高生长, 干物质积累, 敏感基因型品种宁梗 1 号, 耐性较差, 在中低浓度 TCB 处理时即出现明显抑制作用, 根系抑制作用明显, 植株矮小, 叶色偏黄。

2.3 1,2,4-三氯苯对两种基因型水稻灌浆盛期根系活力的影响

如图 1 所示, 未进行 TCB 处理时, 两个基因型品种根系活力差异不显著, 随着 TCB 浓度的升高, 敏感基因型宁梗 1 号根系活力呈下降趋势, 而耐性基因型扬辐梗 8 号根系活力呈先上升后下降的趋势, 在 20 mg/kg TCB 浓度处理时宁梗 1 号根系活力极显著低于对照, 而扬辐梗 8 号根系活力极显著大于对照, 在 40 mg/kg TCB 浓度处理时, 宁梗 1 号根系活力极显著降低, 而扬辐梗 8 号根系活力变化不明显, 在 80 mg/kg TCB 浓度处理时, 两个基因型品种根系活力均极显著低于对照, 且宁梗 1 号降幅较大, 极显著低于扬辐梗 8 号。

2.4 1,2,4-三氯苯对两种基因型水稻灌浆盛期叶片叶绿素含量的影响

由图 2 可以看出, 随着 TCB 浓度的增加, 敏感基因型宁梗 1 号叶片叶绿素含量呈下降趋势, 在 20 mg/kg TCB 浓度处理时, 极显著低于对照, 并随进一步 TCB 浓度增加而明显降低, 达极显著水平。耐性基因型扬辐梗 8 号叶片的叶绿素含量在 (10 mg/kg, 20 mg/kg) TCB 浓度处理时呈上升趋势, 在 20 mg/kg TCB 浓度处理时显著高于对照, 随进一步 TCB 浓度增加而明显低于对照, 达极显著水平。未进行 TCB 处理时, 两种基因型水稻的叶片叶绿素含量差异不显著; 相同浓度 TCB (20 mg/kg, 40 mg/kg 和 80 mg/kg) 处理时, 扬辐梗 8 号叶片叶绿素含量极显著高于宁梗 1 号。

2.5 1,2,4-三氯苯对两种基因型水稻灌浆盛期叶片可溶性蛋白质含量的影响

1,2,4-三氯苯处理下, 水稻叶片蛋白质含量存在明显的基因型差异, 如图 3 所示, 未进行 TCB 处理时, 两个基因型品种叶片可溶性蛋白质含量差异不显著, 相同浓度的 TCB 处理下, 耐性基因型扬辐梗 8 号叶片可溶性蛋白质含量显著或极显著大于敏感基因型宁梗 1 号。

随着 TCB 浓度的升高, 两个基因型品种均呈现先增后减的趋势, 当 1,2,4-三氯苯浓度大于 20 mg/kg 时, 宁梗 1 号叶片可溶性蛋白质含量下降, 而扬辐梗 8 号叶片可溶性蛋白质含量上升, 在 80 mg/kg TCB 浓度处理时, 宁梗 1 号极显著低于对照, 而扬辐梗 8 号极显著高于对照。

2.6 1,2,4-三氯苯对两种基因型水稻灌浆盛期叶片 MDA 含量的影响

如图 4 所示未进行 TCB 处理时两个基因型品种叶片 MDA 含量差异不显著, 随着 TCB 浓度的升高, 两个基因型品种叶片 MDA 含量均总体呈升高趋势, 且敏感基因型品种宁梗 1 号增幅较大, 在 10 mg/kg TCB 浓度处理时, 敏感基因型宁梗 1 号叶片 MDA 含量变化不明显, 而耐性基因型扬辐梗 8 号叶片 MDA 含量显著低于对照, 在 20 mg/kg 和 40 mg/kg TCB 浓度处理时, 宁梗 1 号显著或者极显著大于对照, 而扬辐梗 8 号与对照差异不显著, 在 80 mg/kg TCB 浓度处理时, 两个基因型品种均极显著大于对照, 在 TCB 浓度 (20—80 mg/kg) 处理下, 宁梗 1 号叶片 MDA 含量极显著大于扬辐梗 8 号。

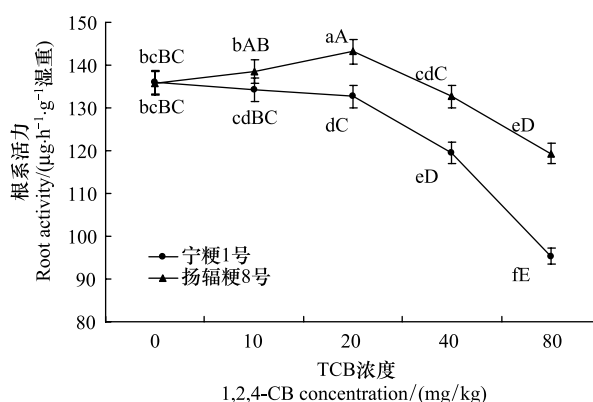


图 1 1,2,4 三氯苯对两种基因型水稻灌浆盛期根系活力的影响
Fig. 1 Effect of 1,2,4-TCB (trichlorobenzene) on root activity in the two rice genotypes at the grain filling period
柱上标以不同大、小写字母时分别表示 0.01 和 0.05 差异显著水平

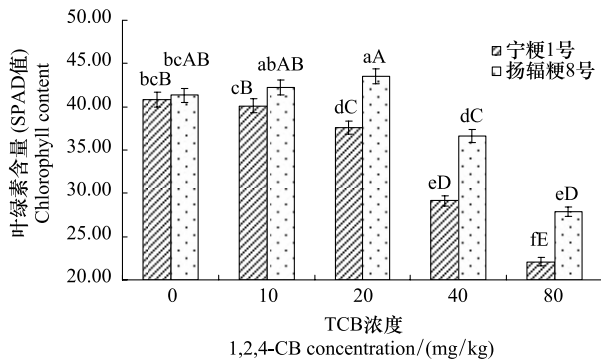


图2 1,2,4-三氯苯胁迫对灌浆盛期水稻叶片叶绿素含量 (SPAD 值) 的影响

Fig. 2 Effect of 1,2,4-TCB on chlorophyll content (value of SPAD) of leaves in the two rice genotypes at the grain filling period

柱上标以不同大、小写字母时分别表示 0.01 和 0.05 差异显著水平。

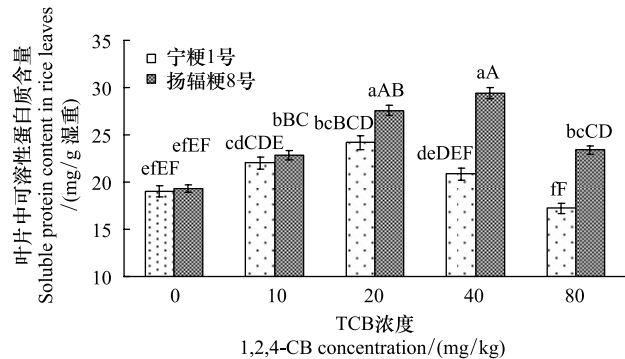


图3 1,2,4-三氯苯胁迫对灌浆盛期水稻叶片可溶性蛋白质含量的影响

Fig. 3 Effect of 1,2,4-TCB on the soluble protein content in rice leaves at the grain filling period

柱上标以不同大、小写字母时分别表示 0.01 和 0.05 差异显著水平。

2.7 1,2,4-三氯苯对两种基因型水稻灌浆盛期抗氧化酶活性的影响

2.7.1 1,2,4-三氯苯对两种基因型水稻灌浆盛期 SOD 活性的影响

如图 5 所示,两个基因型品种叶片 SOD 活性在未进行 TCB 处理时,差异不明显,随着 TCB 处理浓度的升高,均呈现先升高后降低的趋势且存在基因型差异,在 0—20 mg/kg TCB 浓度处理时,敏感基因型品种宁梗 1 号 SOD 活性显著或极显著低于耐性基因型品种扬辐梗 8 号,在 60 mg/kg TCB 浓度处理时,宁梗 1 号叶片 SOD 活性极显著低于对照,而扬辐梗 8 号极显著高与对照,在 80 mg/kg TCB 浓度处理时,均极显著低于对照且宁梗 1 号叶片 SOD 活性极显著低于扬辐梗 8 号。

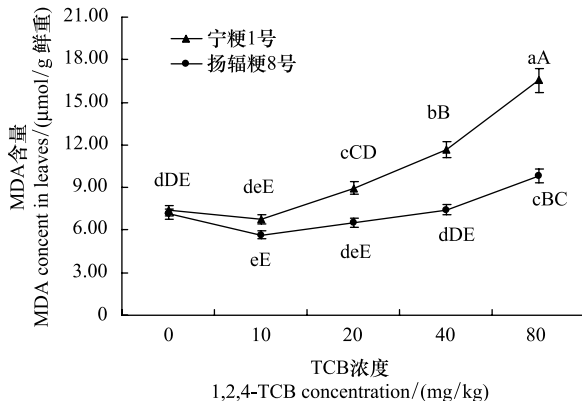


图4 1,2,4-三氯苯胁迫对灌浆盛期水稻叶片丙二醛含量的影响

Fig. 4 Effect of 1,2,4-TCB on the producing velocity of content of MDA in rice leaves at the grain filling period

柱上标以不同大、小写字母时分别表示 0.01 和 0.05 差异显著水平。

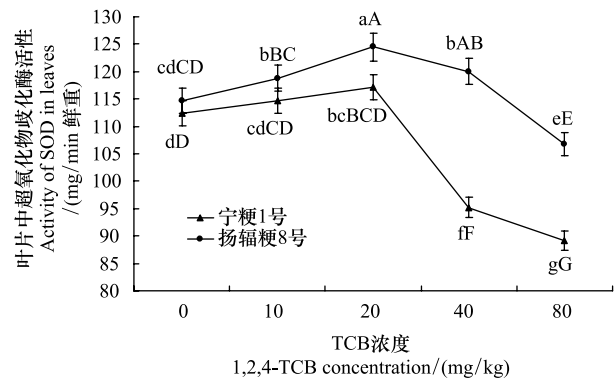


图5 1,2,4-三氯苯胁迫对灌浆盛期水稻叶片 SOD 活性的影响

Fig. 5 Effect of 1,2,4-TCB on the activity of SOD rice leaves at the grain filling period

柱上标以不同大、小写字母时分别表示 0.01 和 0.05 差异显著水平。

2.7.2 1,2,4-三氯苯对两种基因型水稻灌浆盛期叶片 POD 活性的影响

如图 6 所示,随着 TCB 浓度的增加,宁梗 1 号和扬辐梗 8 号叶片 SOD 活性均呈先上升后下降的趋势,且均在 20 mg/kg TCB 浓度处理时达最大值。敏感基因型宁梗 1 号 SOD 活性在 80 mg/kg TCB 浓度处理时极显著低于对照,而扬辐梗 8 号叶片 SOD 活性在不同浓度 TCB 处理时均极显著高于对照。在 20 mg/kg, 40 mg/kg 和 80 mg/kg TCB 浓度处理时,宁梗 1 号叶片 POD 活性均极显著低于扬扬辐梗 8 号。

2.7.3 1,2,4-三氯苯对两种基因型水稻灌浆盛期叶片 CAT 活性的影响

如图 7 所示,随着 TCB 浓度的增加,两个基因型品种叶片 CAT 活性均呈现先增后减趋势,都在 20 mg/kg TCB 浓度时达到最大值。敏感基因型品种宁梗 1 号叶片 CAT 活性在 10 mg/kg,20 mg/kg TCB 浓度处理时与对照差异不显著,随着进一步 TCB 浓度的增加而明显降低,达极显著水平。耐性基因型品种扬辐梗 8 号叶片 CAT 活性在 10 mg/kg,20 mg/kg TCB 浓度处理时极显著大于对照,在 40 mg/kg,80 mg/kg TCB 处理时与对照差异不显著。未进行 TCB 胁迫时两种基因型水稻叶片 CAT 活性差异不显著,相同 TCB 胁迫下扬辐梗 8 号叶片 CAT 活性均极显著大于宁梗 1 号。

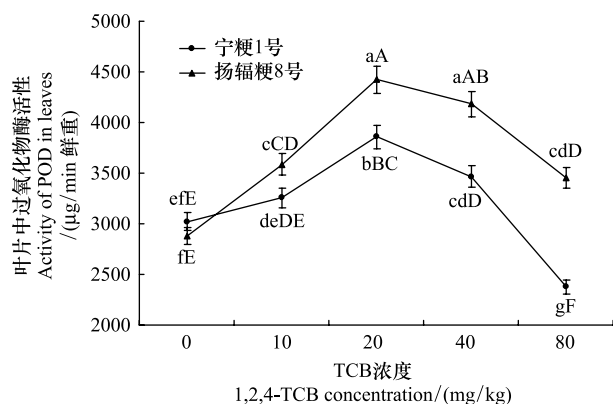


图 6 1,2,4-三氯苯胁迫对灌浆盛期水稻叶片 POD 活性的影响

Fig. 6 Effect of 1,2,4-TCB on the activity of POD rice leaves at the grain filling period

柱上标以不同大、小写字母时分别表示 0.01 和 0.05 差异显著水平。

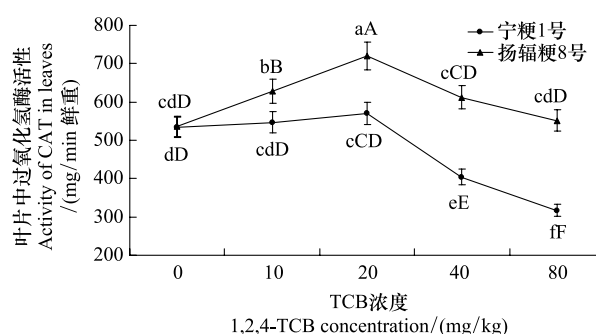


图 7 1,2,4-三氯苯胁迫对灌浆盛期水稻叶片 CAT 活性的影响

Fig. 7 Effect of 1,2,4-TCB on the activity of CAT rice leaves at the grain filling period

柱上标以不同大、小写字母时分别表示 0.01 和 0.05 差异显著水平。

3 讨论

3.1 1,2,4-三氯苯胁迫对水稻产量的影响及基因型差异

随着农田中 1, 2, 4-TCB 的累积,对作物生长的影响已引起了广泛的关注^[22]。王泽港等^[33]研究发现,TCB 导致水稻减产的原因是穗数、穗粒数、结实率的降低。本研究发现,产量结构的下降顺序是穗数>粒数>结实率,这与洛育^[34]研究相一致,1,2,4-三氯苯对水稻产量的影响存在基因型差异,在低 TCB 处理(10 mg/kg)耐性基因型扬辐梗 8 号产量有所上升,而敏感基因型宁梗 1 号产量下降。进一步随 TCB 处理浓度升高,2 品种产量极显著下降,宁梗 1 号降幅远大于扬辐梗 8 号,主要是宁梗 1 号的穗数、粒数降幅大。TCB 对产量的影响前期主要是分蘖发生的抑制,灌浆结实是籽粒灌浆充实不良,秕粒增多。耐性基因型扬辐梗 8 号可能由于 TCB 诱导相关解毒酶的产生,提高了耐受性。

3.2 1,2,4-三氯苯胁迫对水稻根系活力、水稻生长的影响及基因型差异

1,2,4-三氯苯对小麦苗期^[35]、水稻苗期^[19]、分蘖盛期^[26]根系活力均有显著的抑制作用,影响根系结构,导致脂质过氧化,对根系蛋白质组也有显著影响^[36-37],进而影响株高、干物质积累^[24,28,35],本研究发现 1,2,4-三氯苯对灌浆结实期根系活力、株高、地上部干物重、地下部干物重仍具有显著的抑制作用且存在基因型差异,耐性基因型扬辐梗 8 号在低浓度 TCB 处理下根系活力显著提高,株高、地上部干物重、地下部干物重与对照相比分别升高 0.46%、5.6%、4.5%,说明低浓度 TCB 扬辐梗 8 号的生长具有一定的促进作用,而敏感基因型宁梗 1 号在低浓度处理下即出现抑制作用,根系活力显著降低,植株矮小,叶色发黄,干物重降低,高浓度 TCB 胁迫下,两个基因型品种均出现显著的抑制作用,且宁梗 1 号降幅较大。耐性扬辐梗 8 号在根系活力相对较高,耐性较强可能是由于 TCB 诱导脂酶、醛/酮还原酶、谷胱甘肽-硫转移酶等相关的解毒酶。

3.3 1,2,4-三氯苯胁迫对水稻灌浆期叶片蛋白质的影响及基因型差异

植物受胁迫诱导会积累基因的蛋白产物以应对不良环境^[38]。TCB 胁迫能诱导根系内不同类型蛋白质的表达^[36],本研究发现 TCB 胁迫对水稻灌浆期叶片蛋白质含量的影响存在基因型差异,低浓度 TCB(10 mg/kg, 20 mg/kg)胁迫时,两个基因型品种叶片蛋白质含量均呈上升趋势,扬辐粳 8 号蛋白质含量增加幅度较宁粳 1 号大,随着 TCB 浓度的进一步升高,宁粳 1 号蛋白质含量开始下降,但与对照差异不显著,而扬辐粳 8 号蛋白质含量略有下降但仍极显著高于对照。扬辐粳 8 号叶片可溶性蛋白质含量在中低浓度 TCB 处理下极显著升高,诱导抗性蛋白的产生,高浓度 TCB 胁迫时正常蛋白质的表达有一定的抑制作用,但是仍能极显著高于对照。敏感基因型品种宁粳 1 号在中高浓度 TCB 会造成 DNA 的损伤,正常蛋白质的转录翻译受阻,病程相关蛋白继续产生,与对照差异不显著。本研究发现 TCB 胁迫下,对水稻生育后期(灌浆盛期)蛋白质含量的影响与苗期^[25]和分蘖盛期^[26]有所不同,因此,可通过蛋白质组学进一步了解蛋白质表达的差异性,获取差异蛋白。

3.4 1,2,4-三氯苯胁迫对叶绿素的影响及基因型差异

王泽港等^[24,27]研究发现,TCB 能使水稻苗期、抽穗期叶片叶绿素含量和 Rubisco 酶显著降低。灌浆期是产量形成的关键时期,本研究发现灌浆结实期敏感基因型宁粳 1 号叶片叶绿素含量随着 1,2,4-TCB 浓度升高呈递减趋势,在低浓度 TCB 处理时已极显著低于对照,而耐性基因型扬辐粳 8 号在低浓度 TCB 处理时有所上升,在相同浓度 TCB 胁迫时,宁粳 1 号叶绿素含量显著或者极显著低于扬辐粳 8 号,光合器官受到伤害,而籽粒的灌浆物质 70%—80%来自于开花后功能叶的光合作用^[39],这是敏感基因型品种宁粳 1 号产量降幅较大的主要原因。

3.5 1,2,4-三氯苯胁迫对酶活性的影响及基因型差异

逆境下植物产生更多的活性氧自由基,水稻细胞内活性氧自由基代谢平衡受到破坏,造成活性氧自由基的积累,膜脂过氧化作用加剧,损坏细胞膜系统结构和功能。丙二醛(MDA)是膜脂氧化的主要产物之一,其积累量可以代表膜脂过氧化作用的程度。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^[40],能够有效地清除植物体内的自由基和过氧化物。张国良等^[25],王泽港等^[36],丁秀文等^[26]研究发现,高浓度 TCB 胁迫下水稻苗期、分蘖盛期敏感品种叶片 MDA 含量显著高于对照,SOD、POD、CAT 有所下降, O_2^- 产生速率极显著高于对照。本研究发现,两品种对 1,2,4-TCB 胁迫的酶活性响应存在明显的基因型差异,耐性基因型扬辐 8 号在中低浓度 TCB 胁迫时,叶片中三种抗氧化活性酶均显著升高,清除活性氧能力增强,MDA 含量有所下降。敏感基因型宁粳 1 号叶片抗氧化酶清除活性氧的能力较弱,引起膜脂过氧化加剧,最终其 MDA 含量高于耐性基因型。说明耐性基因型在中低浓度时,TCB 诱导抗性蛋白质的表达,提高抗氧化酶活性,清除活性氧自由基,膜脂过氧化程度低^[34]。

4 结论

1,2,4-三氯苯胁迫对不同基因型水稻产量和灌浆期生长生理特性的影响存在基因型差异,低浓度 TCB(10 mg/kg)促进耐性基因型扬辐粳 8 号的生长和产量的提高,而敏感基因型宁粳 1 号在低浓度 TCB 胁迫下即出现抑制作用,中高浓度 TCB 处理时两个基因型品种都出现明显的抑制作用。耐性基因型扬辐粳 8 号产量、株高、干物重、叶绿素含量抑制程度相对较低、蛋白质含量高、抗氧化酶清除能力强、膜脂过氧化程度相对较低,进一步明确了水稻耐 1,2,4-三氯苯的筛选评价指标,为水稻抗逆栽培管理和品种选用提供了依据。

参考文献(References):

- [1] 宋玉芳,周启星,许华夏,任丽萍,宋雪英,龚平. 菲、芘、1,2,4-三氯苯对土壤高等植物根伸长抑制的生态毒性效应. 生态学报, 2002, 21(11): 1945-1950.
- [2] Díaz J, Rendueles M, Díaz M. 1,2,4-trichlorobenzene flow characteristics in saturated homogeneous and stratified porous media. Water, Air, and Soil Pollution, 2006, 177(1/4): 3-17.

- [3] 周文敏, 傅德黔, 孙宗光. 水中优先控制污染物黑名单. 中国环境监测, 1990, 6(4): 1-3.
- [4] Wang M J, Jones K C. Analysis of chlorobenzenes in sewage sludge by capillary gas chromatography. *Chemosphere*, 1991, 23(5): 677-691.
- [5] Rogers H R, Campbell J A, Crathorne B, Dobbs A J. The occurrence of chlorobenzenes and permethrins in twelve U. K. sewage sludges. *Water Research*, 1989, 23(7): 913-921.
- [6] Wild S R, Jones K C. Organic chemicals entering agricultural soils in sewage sludges; screening for their potential to transfer to crop plants and livestock. *Science of The Total Environment*, 1992, 119(1): 85-119.
- [7] Wang M J, Jones K C. Behavior and fate of chlorobenzenes in spiked and sewage sludge-amended soil. *Environment Science & Technology*, 1994, 28(11): 1843-1852.
- [8] 蔡全英, 莫晓辉, 吴启堂, 李桂荣, 王伯光, 田凯, 李拓. 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.
- [9] 张丽珊, 于殿臣, 刘海玲, 姚家彪, 朱岩, 尹昭华, 姜萍, 可夫. 慢速渗滤土地处理系统对沈阳西部城市污水有机污染物净化效果的研究. 应用生态学报, 1992, 3(4): 355-362.
- [10] 蔡全英, 莫晓辉, 吴启堂, 王伯光, 蒋成爱, 曾巧云, 李海芹. 城市污泥中氯苯类化合物(CBs)的堆肥处理研究. 农业工程学报, 2004, 20(3): 229-233.
- [11] 舒月红, 黄小仁, 贾晓珊. 氯苯类化合物在沉积物上的非线性吸附行为. 环境科学, 2009, 30(1): 178-183.
- [12] 周霞, 余刚, 黄俊, 张祖麟, 胡洪营. 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.
- [13] 王新新, 张颖, 韩斯琴, 李慧. 1, 3-二氯苯污染底泥的零价铁修复对微生物群落结构的影响. 农业环境科学学报, 2009, 28(1): 173-178.
- [14] Kong F X, Hu W, Liu Y. Molecular structure and biochemical toxicity of four halogeno-benzenes on the unicellular green alga *Selenastrum capricornutum*. *Environmental and Experimental Botany*, 1998, 40(2): 105-111.
- [15] 杜青平, 黄彩娜, 贾晓珊, 袁保红. 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.
- [16] 王桂燕, 胡筱敏, 周启星, 史济月, 赵志龙, 王亚锋. 对二氯苯和镉对草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)的联合毒性效应研究. 环境科学, 2007, 28(1): 156-159.
- [17] 李培军, 刘宛, 孙铁珩, 巩宗强, 付莎莎. 我国污染土壤修复研究现状与展望. 生态学杂志, 2006, 25(12): 1544-1548.
- [18] 郭观林, 王翔, 关亮, 颜增光, 谷庆宝, 李发生. 基于特定场地的挥发/半挥发有机化合物(VOC/SVOC)空间分布与修复边界确定. 环境科学学报, 2009, 29(12): 2597-2605.
- [19] 杜青平, 贾晓珊, 袁保红. 1, 2, 4-三氯苯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.
- [20] 刘宛, 孙铁珩, 李培军, 周启星, 梁文举, 台培东, 许华夏, 张海荣. 1, 2, 4-三氯苯胁迫对萌发大豆种子中活性氧的影响. 应用生态学报, 2002, 13(12): 1655-1658.
- [21] 刘宛, 孙铁珩, 李培军, 周启星, 台培东, 张春桂, 许华夏, 张海荣. 1, 2, 4-三氯苯胁迫对大豆下胚轴膜脂过氧化的影响. 农业环境保护, 2002, 21(5): 413-416.
- [22] 张国良, 陈文军, 王显, 金添, 戴其根, 孙国荣, 许轲, 霍中洋, 张洪程. 小麦苗期对1, 2, 4-三氯苯胁迫的生理响应. 生态学报, 2008, 28(9): 4388-4395.
- [23] 丁艳, 葛才林, 王泽港, 杜庆才. 小麦幼苗对镉和1, 2, 4-三氯苯污染的响应. 中国农业大学学报, 2011, 16(3): 48-52.
- [24] 王泽港, 葛才林, 万定珍, 酆志文, 罗时石, 杨建昌. 1, 2, 4-三氯苯和萘对水稻幼苗生长的影响. 农业环境科学学报, 2006, 25(6): 1402-1407.
- [25] 张国良, 陈文军, 仇利民, 孙国荣, 戴其根, 张洪程. 不同基因型水稻苗期对1, 2, 4-三氯苯胁迫的生理响应. 作物学报, 2009, 35(4): 733-740.
- [26] 丁秀文, 张国良, 戴其根, 朱青. 1, 2, 4-三氯苯胁迫对水稻分蘖盛期植株生长和生理特性的影响. 作物学报, 2014, 40(3): 487-496.
- [27] 王泽港, 骆剑峰, 高红明, 万定珍, 葛才林, 罗时石, 杨建昌. 1, 2, 4-三氯苯和萘对水稻抽穗期叶片光合特性的影响. 中国农业科学, 2005, 38(6): 1113-1119.
- [28] 陈文军, 张国良, 孙国荣, 戴其根, 张洪程, 陶金飞, 孙洁, 严林锋. 水稻耐1,2,4-三氯苯胁迫基因型的苗期筛选. 中国农业科学, 2008, 27(3): 1003-1008.
- [29] 邹琦. 植物生理生化实验指导. 北京: 中国农业出版社, 2003.
- [30] 郝建军. 植物生理学实验技术. 北京: 化学工业出版社, 2007: 159-160.
- [31] 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: 167-169.
- [32] 张志良, 瞿伟菁. 植物生理学实验指导(第三版). 北京: 高等教育出版社, 2003: 274-277.
- [33] 王泽港, 万定珍, 杨亚春, 葛才林, 马飞, 杨建昌. 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.
- [34] 洛育, 张凤鸣, 白良明, 孙世臣, 姜辉, 张玉华, 耿立清. 硝基苯污染对水稻生长发育及稻米安全性的影响. 中国农学通报, 2009, 25(24): 468-471.
- [35] 徐应明, 袁志华, 李军幸, 戴晓华. 硝基苯和氯苯灌溉对春小麦品质影响研究. 灌溉排水学报, 2004, 23(3): 17-19.
- [36] 葛才林, 万定珍, 王泽港, 丁艳, 王余龙, 商奇, 马飞, 罗时石. 水稻根系对1,2,4-三氯苯胁迫的应答(英文). 作物学报, 2007, 33(12): 1991-2000.
- [37] 杜青平, 贾晓珊. 根系急性吸收1, 2, 4-三氯苯诱发大蒜根尖细胞染色体异常. 中山大学学报: 自然科学版, 2006, 45(5): 118-122.
- [38] 李雪梅, 李明莹, 马莲菊, 刘旭, 陈亮. 逆境胁迫下水稻蛋白质组学研究进展. 沈阳师范大学学报: 自然科学版, 2009, 27(3): 257-263.
- [39] 曹显祖, 朱庆森. 水稻品种的库源特征及其类型划分的研究. 作物学报, 1987, 13(4): 265-272.
- [40] 储玲, 晋松, 吴学峰, 刘登义. 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.