

# 1 2 4 三氯苯和萘对水稻产量及品质的影响

王泽港 万定珍 杨亚春 葛才林 马 飞 杨建昌

(扬州大学 江苏省作物遗传生理重点实验室,江苏 扬州 225009 ; E mail wangzg002@yahoo .com .cn)

## Effects of 1 2 4 Trichlorobenzene and Naphthalene on Grain Yield and Quality of Rice

WANG Ze gang , WAN Ding zhen , YANG Ya chun , GE Cai lin , MA Fei , YANG Jian chang

( Key Laboratory of Crop Genetics and Physiology of Jiangsu Province , Yangzhou University , Yangzhou 225009 , China ; E mail : wangzg002@yahoo .com .cn)

Abstract : With rice varieties Shanyou 63 ( indica hybrid) and Wuyujing 7 ( japonica) as materials , the effects of 1 2 4 tri-chlorobenzene ( TCB) and naphthalene ( NAP) on grain yield , yield components , and grain quality were studied and regulation strategies to reduce the residue in rice grain were proposed . The survival percentage of rice seedlings was significantly reduced by TCB , which was the main reason for the decrease of the grain yield , while NAP had little effect . Both TCB and NAP de-layed the heading date of rice . Among the yield components , decreases in number of panicles per pot and seed setting rate were two main reasons for the yield reduction . Both of the organic pollutants affected the grain quality , and their effects on chalki-ness were the greatest , the next was on milled rice rate , head rice rate , protein content and amylose content in order , and the both pollutants had little effect on brown rice rate of the two tested varieties . The NAP content was as ten times as TCB con-tent in grains , indicating that the bioavailability of NAP was higher than that of TCB . Shanyou 63 accumulated more organic pollutants than Wuyunjing 7 . Application of organic and inorganic fertilizer could reduce the harm of TCB and NAP , and in-crease grain yield . The results suggested that in sewage water irrigation practice , the supply of irrigation water in good quality is necessary for higher survival percentage of seedlings after transplanting , and controlling TCB , especially NAP content , and adoption of reasonable cultivation strategies are very important for high grain yield and food safety .

Key words : 1 2 4 trichlorobenzene ; naphthalene ; rice ; grain yield ; grain quality ; organic pollutant

摘 要 : 以汕优 63 和武运粳 7 号为材料 ,研究了两种有机污染物 1 2 4 三氯苯(TCB)和萘(NAP)对水稻产量及其构成因子的影响并提出了减少籽粒中残留的调控措施。TCB 明显降低两个水稻品种的移栽成活率 ,这是导致产量明显降低的主要原因 ;NAP 对水稻移栽成活率影响较小。两种有机污染物都引起水稻抽穗期延迟。在产量构成因子中 ,每盆穗数和结实率是影响产量的两个主要因子。两种有机污染物均影响稻米品质 ,对稻米的垩白度影响最明显 ,其次是精米率、整精米率、蛋白质含量和直链淀粉含量 ,而对出糙率几乎无影响。TCB 和 NAP 在水稻籽粒中都有残留 ,而 NAP 的含量几乎是 TCB 的 10 倍 ,表明 NAP 的生物可利用性要比 TCB 高。汕优 63 籽粒积累两种有机物的能力明显高于武运粳 7 号。增施有机肥以及 N、P、K 肥可明显减轻有机污染物的毒害作用 ,从而提高产量。上述结果说明 ,在污水灌溉实践中要注意控制秧苗移栽期灌溉水的质量 ,严格控制水中 TCB 尤其是 NAP 的含量 ,并通过适当的肥水等栽培措施进行调控 ,以保证产量和粮食安全。

关键词 : 1 2 4 三氯苯 ; 萘 ; 水稻 ; 产量 ; 品质 ; 有机污染物

中图分类号 : S511 ; X503 231

文献标识码 : A

文章编号 : 1001-7216(2006)03-0295-06

中国是一个人多、地少、水缺的发展中国家。水资源的严重短缺一直是中国农业 ,尤其是北方地区农业发展的主要限制因素之一 ,因而研究节水灌溉和污水灌溉显得尤为重要。污水灌溉已有近百年的历史 ,美国、澳大利亚、日本和以色列等国家的污水灌溉技术已比较成熟<sup>[1]</sup>。我国污水灌溉起步较晚 ,发展相对较慢 ,污水灌溉中还存在许多问题 ,对污染的研究 ,尤其是有机污染物对作物生理生化、生态毒理的研究还相当缺乏。因而开展这方面的研究对于推动我国污水灌溉的发展具有重要意义。

氯苯类 (CBs)和多环芳烃类(PAHs)有机物作为染料、农药和医药的重要原料和中间体在工业、农业、医药生产中应用广泛。它们通过废水排放进入环境 ,造成不同环境介质的污染。两类化合物已被列入美国及欧共体环境保护机构所确定的优先控制污染物黑名单<sup>[2]</sup>。

水稻是我国第一大粮食作物 ,又是消耗水分最多的作物 ,而水是有机污染物迁移的最主要载体 ,因而水稻是最易受到有机污染危害的粮食作物 ,特别是在工业较发达的长江和珠江三角洲地区 ,工业有机物污染已严重影响到水稻安全生产。因此 ,研究主要有机污染物对水稻生长发育及其品质的影响 ,对水稻高产稳产和安全生产具有重要意义。目前 ,有关有机污染物的植物毒性响应已受到研究者关注 ,但大多数的研究都集中于有机污染的短期伤害效应<sup>[3-5]</sup> ,而有关水稻的研究报道很少 ,关于有机污染物对水稻产量及品质的影响的研究尚未见报道。本试验初步研究了 1 ,2 ,4 三氯苯 (TCB)和

收稿日期 : 2005-10-08 ; 修改稿收到日期 : 2005-12-09。

基金项目 : 国家自然科学基金资助项目 (30300026)。

第一作者简介 : 王泽港 (1972 - ) , 男 , 博士研究生 , 讲师。

萘(NAP)对水稻产量及品质的影响 ,以期 为污水灌溉实践提供依据。

1 材料与方 法

1.1 试验材料及处理

1.1.1 供试材料

水稻(*Oryza sativa* L.)品种 汕优 63、武运粳 7 号。

1.2.4 三氯苯、萘 购自中国医药集团上海化学试剂公司。

1.1.2 处理浓度的设置

TCB 处理浓度为 10、20、40 和 80 mg/kg。  
NAP 处理浓度为 10、20、40 和 80 mg/kg。

1.1.3 供试材料培养

试验 采用大盆钵(25 cm×30 cm)栽培 ,每盆装土 15 kg 加水浸泡 ,每盆施尿素 2 g 作为基肥 ,调节 pH 值在 5.0~5.5。7 d 后 ,按处理浓度分别添加有机污染物 ,有机污染物先用 10 mL 无水乙醇溶解 ,加入盆钵中 ,搅拌均匀 ,加 10 mL 无水乙醇作为对照。2 d 后移栽水稻秧苗 ,汕优 63 单本栽 ,武运粳 7 号双本栽 ,每盆栽秧 3 穴。水肥及病虫害管理同常规高产栽培 ,全部盆钵置于防雨大棚内 ,雨天遮盖塑料薄膜 ,以防 TCB 和 NAP 淋失 ,晴天则揭去塑料薄膜。每个处理重复 12 盆 ,其中 6 盆用于产量测定 ,另外 6 盆用于产量构成因子及污染物残留等项目的测定。该试验分别于 2003 年和 2004 年进行了两年的重复 ,试验结果基本一致 ,本文仅列出了 2004 年的数据。

试验 施肥措施设置为中氮 ,尿素 2.5 g/盆 ;高氮 ,尿素 5 g/盆 ;低氮 ,尿素 1.5 g/盆。氮磷钾肥 ,尿素、磷酸钙、硫酸钾分别为 2.5、1.0、2.5 g/盆 ;有机肥菜籽饼 5 g/盆(菜籽饼提前腐熟处理 ,并晒干)。所有肥料均在装土时均匀搅拌加入。每处理重复 10 盆 ,6 盆用于产量测定 ,其余 4 盆用于产量构成因子的测定。

采用大盆钵(25 cm×30 cm)栽培 ,每盆装土 15 kg 加水浸泡 ,调节 pH 值在 5.0~5.5。7 d 后 ,添加有机污染物 ,每盆均用统一有机污染物处理浓度(60 mg/kg) ,搅拌均匀 2 d 后移栽水稻秧苗。其他管理措施同试验 。

1.2 测定方法

1.2.1 成活率统计

秧苗移栽后 ,每天观察记录秧苗的死亡情况 ,并

计算最终的成活率。

1.2.2 产量及其构成因子的测定

水稻成熟后考种测产 ,并测定产量构成因子 ,包括每盆穗数、每穗粒数、千粒重、结实率<sup>[6]</sup>。

1.2.3 米质测定

用瑞典 FOSS TECATOR 公司生产的近红外谷物分析仪(Infratec 1241 grain analyzer)测定精米的直链淀粉含量和蛋白质含量 ,其他稻米品质指标按农业部标准 NY/T-593 2002 进行测定。

1.2.4 TCB 和 NAP 在稻米中的残留测定

稻米中 TCB 提取与测定参照张海荣等的方法<sup>[7]</sup>。GC 分析测定的色谱条件 :汽化室温度 220 ,检测器温度 220 ,柱初始温度 90 ,保持 1 min ,以 4 /min 升温至 108 。然后以 25 /min 升温至 200 ,保持 5 min。载气为高纯氮气 ,流量 6.0 mL/min。进样量为 1.0 μL。

稻米中 NAP 的提取与测定参照宋玉芳等的方法<sup>[8]</sup>。HPLC 分析测定的色谱条件 :惠普 1100 型高效液相色谱仪 ,1046 程序荧光检测器检测 ,色谱柱为 250 mm(id)×4.6 μm(id)硅胶 C<sub>18</sub> 柱。流动相为 V<sub>乙腈</sub> :V<sub>水</sub> = 70 :30 ,梯度淋洗 15 min ,由液相色谱高压泵控制。自动进样量为 10 μL。以萘标准液为外标 ,用保留时间直接对照法定量计算 NAP 含量。

2 结果与分析

2.1 TCB 和 NAP 对水稻移栽后成活率和抽穗期(插秧至抽穗天数)的影响

图 1-A 反映了 TCB 和 NAP 对水稻移栽后成活率的影响 ,从图中可以看出 :TCB 对两个水稻品种的成活率有显著的抑制作用 ,随胁迫浓度的增加 ,成活率几乎呈直线下降 ;NAP 对水稻的成活率影响不明显 ,最高胁迫浓度时 ,成活率也仅下降了约 8%。这表明 TCB 对水稻的毒害作用明显大于 NAP ,两水稻品种的变化趋势基本一致。

从图 1-B 中可以看出 ,TCB 和 NAP 能明显推迟水稻的抽穗期。TCB 对抽穗期的影响大于 NAP ,最高胁迫浓度下 ,TCB 分别导致汕优 63、武运粳 7 号抽穗期推迟 11 d 和 10 d ;而 NAP 则分别为 2 d 和 4 d。由于水稻根系受污染物毒害作用明显(结果另文发表) ,根系生长发育及其生理功能受到显著抑制 ,从而延迟水稻生长发育 ,导致抽穗期延迟 ,最终影响产量。

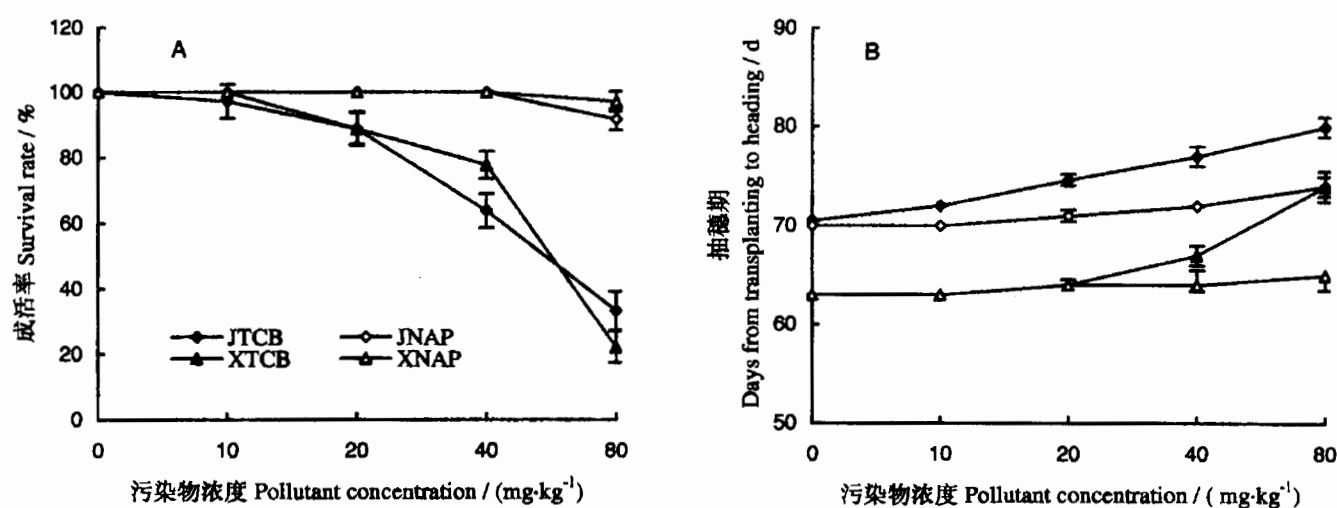


图1 TCB和NAP对移栽后水稻成活率(A)和抽穗期(B)的影响

Fig. 1. Effects of TCB and NAP on survival rate of rice seedlings (A) and heading date (B) of rice.

JTCB—武运梗7号受TCB胁迫; JNAP—武运梗7号受NAP胁迫; XTCB—汕优63受TCB胁迫; XNAP—汕优63受NAP胁迫。图2同。

JTCB, Wuyunjing 7 in TCB treatment; JNAP, Wuyunjing 7 in NAP treatment; XTCB, Shanyou 63 in TCB treatment; XNAP, Shanyou 63 in NAP treatment. The same as in Fig. 2.

## 2.2 TCB和NAP对水稻产量及其构成因素的影响

TCB和NAP处理后,每盆成活的穴数、每盆穗数以及每穗粒数差异均很大。为客观比较各处理浓度对产量及其构成因素的影响,本文以每盆为单位进行分析。从表1可以看出,TCB和NAP对汕优63产量的影响均呈低浓度下增加产量而高浓度下显著降低产量的变化趋势,但在高浓度下TCB对产量的影响较NAP明显。这主要是由于高浓度的

TCB导致每盆穗数显著降低,同时每穗粒数也有较大幅度的降低所致。NAP导致产量下降的原因主要在于每穗粒数的下降和结实率的降低。两种有机污染物处理下,千粒重变化不明显。

从表1中也可以看出,TCB和NAP胁迫下武运梗7号的产量变化趋势与汕优63相似,但产量下降幅度(TCB下降65%,NAP下降16.5%)较汕优63小(TCB下降74%,NAP下降19%)。TCB对武运梗7号产量的影响主要体现在每盆穗数和每穗

表1 TCB和NAP对汕优63、武运梗7号产量及其构成因素的影响

Table 1. Effects of TCB and NAP on grain yield and its components of Shanyou 63 and Wuyunjing 7.

材料 Variety	污染物浓度 Pollutant concentration /(mg · kg <sup>-1</sup> )		产量 Grain yield /(g · pot <sup>-1</sup> )	每盆穗数 No. of panicles per pot	每穗粒数 Grain number per panicle	结实率 Seed setting rate /%	千粒重 1000-grain weight /g
汕优 63 Shanyou 63	TCB	CK	117.9 ab	30.1 b	163.0 a	86.4 a	27.9 a
		10	121.7 a	34.6 a	155.7 ab	79.1 b	28.6 a
		20	111.4 b	33.8 a	146.2 b	78.1 bc	28.5 a
		40	71.4 c	27.6 c	119.4 c	77.1 c	28.1 a
		80	30.1 d	9.6 d	131.9 d	82.4 d	28.2 a
	NAP	CK	117.9 a	30.1 c	163.0 a	86.7 a	27.9 a
		10	121.4 a	33.8 b	155.2 ab	83.2 b	27.8 a
		20	118.1 a	36.0 ab	141.6 b	81.8 b	28.3 a
		40	113.3 b	37.1 a	143.2 b	77.2 d	27.7 a
		80	95.5 c	35.8 ab	134.4 c	73.2 e	27.6 a
武运梗 7 号 Wuyunjing 7	TCB	CK	81.6 a	29.5 a	108.2 bc	79.3 b	32.3 a
		10	79.6 a	28.8 a	105.4 c	80.9 b	32.4 a
		20	67.4 b	23.8 b	117.4 ab	78.4 b	31.8 a
		40	36.9 c	11.7 c	122.5 a	80.7 b	32.0 a
		80	25.4 d	8.5 d	105.5 c	91.5 a	31.7 a
	NAP	CK	81.6 a	29.5 a	108.2 a	79.3 c	32.3 a
		10	84.4 a	29.3 a	101.8 b	84.4 d	32.5 a
		20	80.5 a	24.3 b	109.9 a	89.9 b	32.5 a
		40	73.3 b	22.4 b	108.5 a	90.5 ab	32.4 a
		80	68.1 b	22.4 b	98.1 b	92.7 a	32.4 a

同一栏数据后带相同字母者表示在0.05水平上差异不显著(同一水稻品种、同一污染物不同处理比较)。

Within a column, data followed by the same lowercase letters represent no significant difference at 0.05 level by comparison among different treatments for the same rice variety and the same organic pollutant.

表 2 TCB 和 NAP 对汕优 63、武运粳 7 号稻米品质的影响

Table 2 . Effects of TCB and NAP on grain quality of Shanyou 63 and Wuyunjing 7 . %

材料 Variety	污 染 物 浓 度 Pollutant concentration /(mg · kg <sup>-1</sup> )		出糙率 Brown rice rate	精米率 Milled rice rate	整精米率 Head rice rate	垩白度 Chalkiness	蛋白质含量 Protein content	直链淀粉含量 Amylose content
汕优 63 Shanyou 63	TCB	CK	81.4 a	75.1 a	57.1 a	10.5 d	8.2 a	21.5 a
		10	80.4 a	72.4 b	55.5 b	23.5 a	6.1 b	20.9 b
		20	80.7 a	72.7 b	54.7 b	18.5 b	6.4 b	20.5 b
		40	79.9 a	72.8 b	55.9 b	16.7 bc	8.2 a	19.8 c
		80	79.4 a	72.2 b	55.3 b	14.6 c	7.8 a	21.1 ab
	NAP	CK	81.4 a	75.1 a	57.1 a	10.5 c	8.2 a	21.5 a
		10	80.8 a	73.1 bc	55.9 b	21.3 a	6.4 b	19.3 c
		20	80.7 a	73.4 b	55.5 bc	20.4 a	6.1 b	21.1 a
		40	80.6 a	72.6 bc	54.8 c	21.8 a	6.6 b	20.0 b
		80	79.6 a	72.3 c	54.8 c	18.6 b	8.0 a	20.3 b
武运粳 7 号 Wuyunjing 7	TCB	CK	84.5 a	75.6 a	66.0 a	5.0 d	7.3 ab	19.7 b
		10	84.0 a	75.5 a	66.9 a	7.4 c	7.4 a	18.6 c
		20	84.4 a	74.3 b	67.6 a	11.0 b	7.7 a	17.6 d
		40	84.5 a	72.4 c	65.9 a	13.3 a	6.8 b	18.6 c
		80	84.2 a	69.8 d	64.0 b	8.4 c	5.9 c	21.7 a
	NAP	CK	84.5 a	75.6 ab	66.0 b	5.0 c	7.3 a	19.7 b
		10	84.7 a	76.6 a	68.1 a	6.5 bc	7.6 a	18.4 c
		20	84.0 a	75.9 ab	67.2 a	10.3 a	7.6 a	18.6 c
		40	83.9 a	75.7 ab	67.5 a	7.8 b	7.3 a	20.2 ab
		80	83.7 a	75.0 b	66.8 ab	3.3 d	7.2 a	20.8 a

同一栏数据后带相同字母者表示在 0.05 水平上差异不显著(同一水稻品种、同一污染物不同处理间比较)。  
Within a column , data followed by the same lowercase letters represent no significant difference at 0.05 level by comparison among different treatments for the same rice variety and the same organic pollutant .

粒数上 ,同时值得注意的是在 NAP 处理下 ,随处理浓度的增加 ,结实率有较明显的提高 ,这可能是产量下降幅度小的一个主要原因。说明同一水稻品种对不同有机污染物的反应是不一样的 ,不同水稻品种对同一污染物的适应性也存在差异。

2.3 TCB 和 NAP 对稻米品质的影响

从表 2 可以看出两种有机污染物 TCB 和 NAP 对稻米出糙率影响不大 ,而对稻米垩白度的影响最为明显 ,随胁迫浓度的增加 ,垩白度呈现先升高后降低的趋势。两个水稻品种精米率和整精米率均随两种有机污染物处理浓度增加而下降 ,且 TCB 处理下降幅度较 NAP 明显。至于两种污染物对蛋白质含量的影响 ,汕优 63 表现为低浓度下蛋白质含量降低而在高浓度下蛋白质含量又有所升高 ,而武运粳 7 号则随处理浓度的增加呈先升高后降低的趋势 ,这进一步表明此两稻米品质指标对有机污染物的反应存在差异。有机污染物处理导致汕优 63 直链淀粉含量降低 ,而对武运粳 7 号则相反。

2.4 TCB 和 NAP 在稻谷中的残留

有机污染物被植物吸收后 ,可以被降解 ,可以挥发至大气中 ,也可以被转移到作物的不同器官中贮存起来<sup>[9]</sup>。对于粮食作物 ,人们往往最为关心污染物在可食部分即籽粒中的残留。两种有机污染物在籽粒中的残留测定结果见图 2。

图 2 显示 ,随 TCB 胁迫浓度的增加 ,两水稻品种籽粒中 TCB 含量也随之增加 ,但汕优 63 的增加幅度明显高于武运粳 7 号。在 80 mg/kg 的胁迫浓度下 ,汕优 63 籽粒中 TCB 含量是武运粳 7 号的 4 倍。这表明汕优 63 籽粒具有较强的吸收积累 TCB 的能力 ,而 TCB 在武运粳 7 号籽粒中的吸收积累相对较少。从图 2 中还可以看出 ,随 NAP 胁迫浓度的增加 ,籽粒中积累的 NAP 对两品种而言都呈增加趋势 ,但汕优 63 对 NAP 吸收积累明显高于武运粳 7 号。

比较 TCB 和 NAP 的吸收情况可以看出 ,汕优 63 对 NAP 的积累量明显高于 TCB ,同一胁迫浓度下 NAP 的积累量几乎是 TCB 的 10 倍 ,说明 NAP 在植物体内的移动性比较高 ,而 TCB 在植物体内的移动性比较低。就水稻品种而言 ,汕优 63 具有较强积累有机污染物的能力。

2.5 施肥措施对两种有机污染胁迫的调控作用

表 3 显示 ,对汕优 63 而言 ,施氮磷钾肥和有机肥处理均可显著提高产量 ,提高氮肥供应量增产效果次之 ,而氮肥供应不足则会导致产量显著降低。TCB 胁迫下 ,施氮磷钾和有机肥处理主要能提高结实率 ,每盆穗数及每穗粒数也有不同程度的增加 ,千粒重变化不明显 ;在 NAP 胁迫下 ,施氮磷钾和有机肥处理主要是提高每盆穗数而增加产量 ,虽然每穗

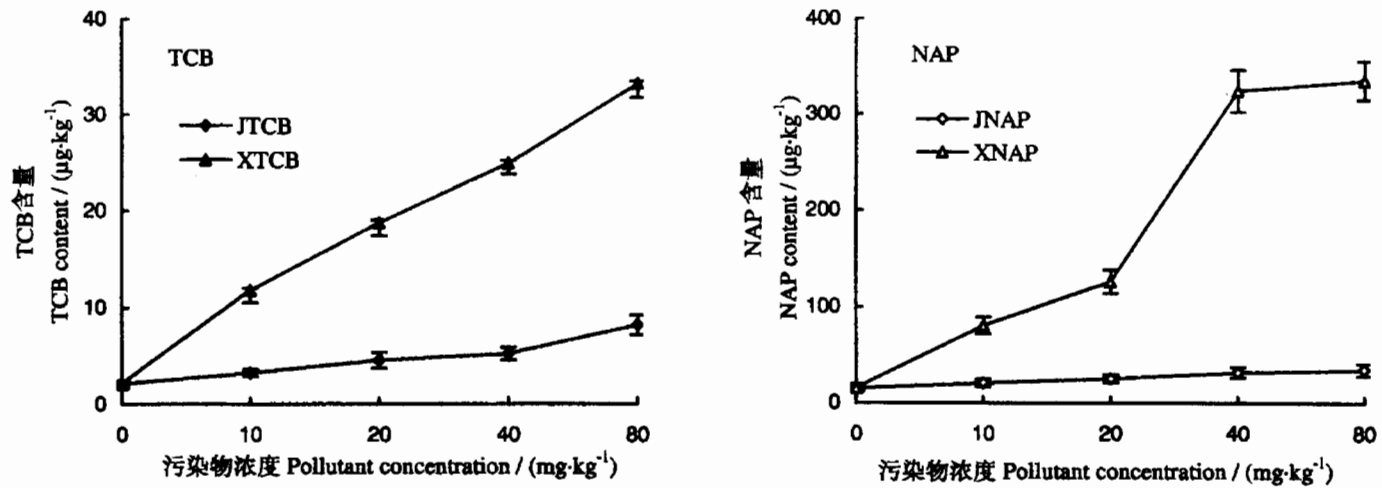


图2 TCB和NAP在两水稻品种籽粒中的残留  
Fig. 2. TCB and NAP content in rice grains.

粒数和结实率有所下降。有机肥处理有降低成活率的趋势,这可能是有机肥用量较多造成一定程度的“烧苗”所致,可通过适当减少有机肥用量,并提前施用解决这一问题。低氮处理明显降低有机污染物胁迫下水稻的产量,主要原因在于每盆穗数和每穗粒数减少。

对于武运粳7号,在不同施肥措施中,提高氮肥供应、增施磷、钾肥或施用有机肥都有利于有机污染胁迫下水稻产量的提高。在TCB胁迫下,施氮磷钾和有机肥提高产量主要是通过增加每盆穗数而实现的,每穗粒数和结实率也略有增加;而NAP胁迫

下,施氮磷钾和有机肥处理增产作用显著,主要因为每盆穗数及结实率有明显提高。在各施肥措施中,低氮措施籽粒产量最低,主要是每盆穗数及结实率明显降低所致。

3 讨论

本研究表明,两种有机污染物均明显影响产量,其中TCB的影响远大于NAP,表明TCB的生物毒性明显高于NAP,这与宋玉芳等<sup>[10]</sup>的研究结果相一致。TCB造成产量下降的原因主要是水稻移栽后成活率显著降低、抽穗期延迟、每穗粒数下降、结

表3 有机污染胁迫下不同施肥措施对汕优63和武运粳7号的调控效果

Table 3. Effects of different fertilizer managements on Shanyou 63 and Wuyunjing 7 under the stress of the organic pollutants.

材料 Variety	肥料措施 Fertilizer management		产量 Grain yield /(g · pot <sup>-1</sup> )	秧苗成活率 Survival rate of seedlings /%	每盆穗数 No. of panicles per pot	每穗粒数 Grain number per panicle	结实率 Seed setting rate /%	千粒重 1000-grain weight /g
汕优 63 Shanyou 63	TCB	中氮 MN	64.3 b	55.6 a	23.2 ab	136.8 b	70.0 b	29.0 a
		高氮 HN	63.2 b	55.6 a	20.1 c	148.8 a	72.9 c	28.8 a
		低氮 MN	38.4 c	50.0 b	14.8 d	119.6 c	76.9 d	28.2 a
		氮磷钾 NPK	73.9 a	55.6 a	25.2 a	134.2 b	76.7 d	28.4 a
		有机肥 OF	74.1 a	44.4 c	22.2 b	147.8 a	79.4 a	28.5 a
	NAP	中氮 MN	72.5 b	94.4 b	23.2 c	131.3 b	83.8 a	28.4 a
		高氮 HN	68.3 bc	100.0 a	20.9 c	143.7 a	80.5 b	28.3 a
		低氮 LN	63.8 c	100.0 a	20.5 c	132.5 b	84.1 a	28.3 a
		氮磷钾 NPK	82.5 d	100.0 a	28.2 b	134.9 b	75.9 c	28.6 a
		有机肥 OF	111.3 a	94.4 b	44.0 a	115.7 c	76.0 c	28.8 a
武运粳 7 号 Wuyunjing 7	TCB	中氮 MN	41.1 b	55.6 b	10.9 b	133.3 a	85.7 ac	32.9 a
		高氮 HN	42.4 b	55.6 b	13.0 ab	117.3 b	86.0 ac	32.3 a
		低氮 LN	21.9 c	55.6 b	7.18 c	119.6 b	79.4 b	32.0 a
		氮磷钾 NPK	51.3 a	61.1 a	13.4 ab	133.8 a	88.0 a	32.6 a
		有机肥 OF	50.6 a	50.0 c	13.78 a	136.2 a	83.6 c	32.5 a
	NAP	中氮 MN	43.6 b	100.0 a	11.9 b	138.3 a	83.7 b	31.6 a
		高氮 HN	49.9 c	100.0 a	18.1 c	102.0 c	86.9 c	31.6 a
		低氮 LN	31.8 d	94.4 b	11.8 b	109.8 b	79.4 d	31.6 a
		氮磷钾 NPK	61.6 a	100.0 a	19.9 ac	108.2 bc	89.5 a	32.0 a
		有机肥 OF	62.4 a	94.4 c	21.6 a	101.7c	88.7 ac	32.0 a

同一栏数据后带相同字母者表示在0.05水平上差异不显著(同一水稻品种、同一污染物不同肥料措施间比较)。  
Within a column, data followed by the same lowercase letters represent no significant difference at 0.05 level by comparison among different fertilizer management for the same rice variety and the same organic pollutant.  
MN, Medium level nitrogen(2.5 g urea/pot); HN, High level nitrogen(5 g urea/pot); LN, Low level nitrogen (1.5 g urea/pot); NPK, Urea, calcium phosphate and potassium sulphate at 2.5, 1.0 and 2.5 g/pot, respectively; OF, Organic fertilizer at 5 g/pot.

实率降低,其中成活率下降是最主要的原因,成活率下降最直接的后果是单位面积穗数(即每盆穗数)下降。但在低浓度下,TCB 并没有造成汕优 63 产量明显降低(表 1),可能存在两方面的原因:一是汕优 63 具有较强的分蘖能力,可以补偿成活率下降而造成的每盆穗数减少;另一方面是低浓度的 TCB 会被土壤微生物较快地除去,使水稻迅速恢复生长。TCB 造成成活率下降可能是由于水稻秧苗移栽期是它对有机污染物的毒害作用较为敏感的时期,这可以从我们在水稻生长中后期的处理试验中得到证明,在抽穗期两种污染物处理下的水稻成活率远高于秧苗移栽期<sup>[11]</sup>。这也提示我们在污水灌溉稻田时,要控制秧苗移栽期灌溉水以及泡田用水的质量,以确保水稻移栽期秧苗的成活率,为高产稳产奠定基础。

两种有机污染物不仅影响水稻产量,对稻米品质也有明显的影响。除稻米出糙率外,其他几项稻米品质指标变化明显。其中垩白度变化最显著,随胁迫浓度的增加,垩白度呈现先升高后降低的趋势,为什么在高浓度下垩白度反而降低,其原因有待于进一步研究。两个水稻品种米质指标对有机污染物的反应存在差异,如蛋白质含量,汕优 63 上呈先降低后升高的变化规律,而武运粳 7 号则呈先升高后降低的趋势。

两种有机污染物都能在籽粒中积累,而且随处理浓度的增加,这种积累也呈增加的趋势。两种有机污染物在不同水稻品种中的积累动态也存在明显的差异。在两个水稻品种中 TCB 的积累量明显低于 NAP,而汕优 63 具有较高的积累有机污染物的能力,这表明不同污染物的生物积累是不一样的,不同水稻品种对同一污染物的积累能力也是有差异的,在制定污水灌溉水质标准时应予以充分考虑。能否通过水、肥等栽培措施减少有机污染物在籽粒中的残留,尚有待于进一步研究。

虽然有关污染物对作物生长影响的报道较多,但涉及污染条件下栽培调控措施的研究鲜有报道。我们研究了不同施肥措施在两种有机污染物胁迫下对水稻产量的调控作用。有机污染胁迫下,污染土壤中的有机污染物可以通过水、肥等栽培措施加快它们从土壤中的去除<sup>[12-14]</sup>。Lin 和 Mendelssohn<sup>[14]</sup>从有机污染生物修复的角度研究认为,增施 N 肥可以提高土壤和水体中石油类有机污染物的修复效率。Hutchinson 等<sup>[12]</sup>的研究进一步表明添加 C、N、P 肥可有效提高有机污染物的生物修复,并提

出在温室条件下,有利于石油污染修复的最佳肥料配比是  $m_C \quad m_N \quad m_P = 100 \quad 2 \quad 0.2$ 。本研究结果与此非常一致,增施有机肥, N、P、K 肥均会不同程度地提高产量。分析其原因可能包括两个方面:一方面 C、N、P、K 肥会促进土壤中有有机污染物的微生物降解,因为土壤中微生物是有机污染物降解的主体,其活性与土壤中有有机污染物的去除速率显著相关,而微生物的高活性需要消耗大量的 C、N 等养分,同时有机肥还会吸附有机污染物,降低其生物有效性,从而减轻有机污染物对作物的毒害作用;另一方面,也为植株后期的生长发育提供了充足的养分,能够在一定程度上补偿前期生长发育所受到的抑制。

本研究结果显示,在污水灌溉实践中要注意控制水稻移栽期灌溉水的质量,以保证秧苗移栽后的成活率,为水稻高产打下基础;同时在污水灌溉中可以通过增施有机肥,无机 N、P、K 肥,以加速有机污染物的生物降解,降低污水中有毒有害物质(TCB、NAP)的含量,减少这些有机污染物在粮食中的残留,从而提高产量并保证稻米的安全卫生。

## 参考文献:

- [1] 杨继富. 污水灌溉农业问题与对策. 水资源保护, 2000(2): 48.
- [2] 王晓燕, 尚伟. 水体有毒有机污染物的危害及优先控制污染物. 首都师范大学学报(自然科学版), 2002, 23(3): 73-78.
- [3] 刘宛, 孙铁珩, 李培军, 等. 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.
- [4] 刘建武, 林逢凯, 王郁, 等. 多环芳烃(萘)污染对水生植物生理指标的影响. 华东理工大学学报, 2002, 28(5): 520-525.
- [5] 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.
- [6] 杨建昌, 王志琴, 刘立军, 等. 旱种水稻生育特性与产量形成的研究. 作物学报, 2002, 28(1): 11-17.
- [7] 张海荣, 区自清, 任丽萍, 等. 水、土壤及植物样品中 1, 2, 4-三氯苯的提取和 GC 测定. 生态学杂志, 1996, 15(4): 70-73.
- [8] 宋玉芳, 区自清, 孙铁珩. 土壤、植物样品中多环芳烃(PAHs)分析方法研究. 应用生态学报, 1995, 6(1): 92-96.
- [9] Sung K, Yavuz Corapdoglu M, Drew M C, Munster C L. Plant contamination by organic pollutants in phytoremediation. J Environ Qual, 2001, 30(6): 2081-2090.
- [10] 宋玉芳, 周启星, 许华夏, 等. 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, 22(11): 1945-1950.
- [11] 王泽港, 骆剑峰, 高红明, 等. 1, 2, 4-三氯苯和萘对水稻抽穗期光合特性的影响. 中国农业科学, 2005, 38(6): 1113-1119.
- [12] Hutchinson S L, Schwab A P, Banks M K. Phytoremediation of aged petroleum sludge: effect of irrigation techniques and scheduling. J Environ Qual, 2001, 30: 1516-1522.
- [13] Hutchinson S L, Schwab A P, Banks M K. Phytoremediation of aged petroleum sludge: effect of inorganic fertilizer. J Environ Qual, 2001, 30: 395-403.
- [14] Lin Q X, Mendelssohn I A. The combined effects of phytoremediation and biostimulation in enhancing habitat restoration and oil degradation of petroleum contaminated wetlands. Ecol Eng, 1998, 10: 263-274.