

有机物料对低积累水稻品种始穗期抗氧化酶活性和重金属积累的影响^①

周利强^{1, 2, 3}, 吴龙华², 骆永明^{2, 4}, 尹斌^{1*}

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008; 2 中国科学院土壤环境与污染修复重点实验室(南京土壤研究所), 南京 210008; 3 中国科学院大学, 北京 100049; 4 中国科学院烟台海岸带研究所, 山东烟台 264003)

摘要: 采用重金属污染水稻土开展盆栽试验, 研究施用有机碳源、菜籽饼和猪粪对低积累水稻品种中浙优 1 号始穗期重金属积累以及根、剑叶抗氧化酶活性的影响。结果表明, 施用高量有机碳源不利于水稻生长, 根抗氧化酶活性降低。施用菜籽饼和猪粪, 水稻生物量显著增加, 根和秸秆 Zn、Cd 浓度较对照处理显著降低。菜籽饼处理水稻抗氧化酶活性增强, 而猪粪处理从始穗期开始水稻衰老进程加快。与对照处理相比, 施菜籽饼水稻生物量增加 14.0%~49.2%, 根和剑叶丙二醛(MDA)含量分别降低 15.6%~31.3% 和 15.3%~51.8%, 过氧化氢酶(CAT)活性升高 40.9%~79.8% 和 9.0%~143.8%, 根和秸秆 Zn 浓度降低 19.1%~26.4% 和 10.1%~26.1%, Cd 浓度降低 32.7%~58.8% 和 16.8%~62.1%; 施用猪粪水稻生物量增加 10.8%~16.7%, 根和剑叶丙二醛(MDA)含量升高 53.1%~59.4% 和 18.5%~44.9%, 根和秸秆 Zn 浓度降低 29.7%~42.6% 和 15.2%~52.9%, Cd 浓度降低 22.5%~44.0% 和 12.1%~64.5%。

关键词: 有机物料; 水稻; 抗氧化酶活性; 重金属; 土壤

中图分类号: X53

土壤重金属污染所引发的环境问题日益突出, 在污染的土壤上进行粮食生产具有一定的健康风险^[1-3]。通过筛选低积累作物品种和采取适当农艺调控措施, 可以缓解重金属污染对作物的胁迫作用, 在改善生长的同时使进入食物链的重金属量尽可能降低^[4-6]。重金属胁迫下作物正常生理代谢受影响, 导致其生长受抑、产量和品质下降^[7-8]。前期研究表明, 污染土壤上施用不同的有机物料, 即使施入的碳、氮、磷、钾量相同, 水稻籽粒产量和各部分重金属浓度也有显著差异^[9]。研究水稻自身生理代谢对有机物料调控的响应, 特别是抗氧化保护酶系统在有机物料施用后表现出何种变化, 将能进一步理解其作用过程与机理。水稻保护酶系统对重金属胁迫的响应研究报道较多, 但集中于溶液培养或仅植物苗期结果, 且多为剂量-时间-效应关系角度探讨水稻耐受不同重金属胁迫的能力以及耐受力的种间差异^[10-12]。水稻抽穗后功能叶片同化产物是籽粒干物质的主要来源, 剑叶和根的生理特性将决定水稻产量和品质, 因此, 本研究拟以长江

三角洲地区典型的重金属污染土壤及低积累水稻品种中浙优 1 号为对象, 以 3 种不同有机物料(有机碳源、菜籽饼和猪粪)为试验材料, 研究等量氮、磷、钾施肥模式下, 始穗期水稻根和剑叶对有机调控的生理响应, 以期揭示重金属污染条件下施用有机物料后水稻抗氧化酶活性的变化规律及其重金属吸收积累特征, 为重金属污染水稻土的利用管理和水稻安全生产提供科学依据。

1 材料与amp;方法

1.1 供试材料和试验设计

供试水稻品种为重金属低积累水稻品种中浙优 1 号, 由中国水稻研究所提供。供试土壤为普通筒育水耕人为土(typic hapli-stagnic anthrosols), 采自浙江杭州郊区某小型金属冶炼厂附近农田, 由于长期大气沉降和污水灌溉导致土壤受到重金属污染。土壤风干去除杂物后混匀, 过 2 mm 尼龙筛、备用。供试土壤有机质为 29.2 g/kg, 全 N 1.52 g/kg, 全 P 0.43 g/kg,

基金项目: 国家自然科学基金项目(41071197, 40821140539)和国家高技术研究发展计划项目(863)(2006AA10Z418)资助。

* 通讯作者(byin@issas.ac.cn)

作者简介: 周利强(1983—), 男, 四川宜宾人, 博士研究生, 主要从事土壤重金属污染生物修复研究。E-mail: lqzhou@issas.ac.cn

表 1 供试有机物料养分和重金属浓度
Table 1 Nutrient and heavy metal concentrations of organic amendments tested

有机物料	有机碳(g/kg)	全 N(g/kg)	全 P(g/kg)	全 K(g/kg)	全 Cd(mg/kg)	全 Cu(mg/kg)	全 Zn(mg/kg)
有机碳源	218	0.40	Nd	0.79	Nd	1.35	8.18
菜籽饼	432	60.5	10.2	8.52	0.067	8.01	74.1
猪粪	269	19.9	19.0	3.19	0.083	33.7	179

注: Nd 表示未检出。

全 K 15.7 g/kg, 速效 P 6.04 mg/kg, 速效 K 73.3 mg/kg, 全 Cd 3.78 mg/kg, 全 Cu 217 mg/kg, 全 Zn 993 mg/kg, pH 7.75。土壤全量 Cd 和全量 Zn 浓度是国家《土壤环境质量标准》(GB15618-1995) 级标准的近 4 倍和 2 倍^[13]。供试有机物料中, 有机碳源为自制的水溶性高分子有机物的混合物粉末, 主要成分为改性纤维素和改性淀粉, 辅以海藻、植物胶、动物胶和聚乙二醇, 3 种供试有机物料的养分和重金属含量列于表 1。

试验于 2011 年在中国科学院南京土壤研究所温室内进行, 共 7 个处理: 对照(Control), 施化肥; 施有机碳源 5.95 g/kg(OCM1); 施有机碳源 11.9 g/kg(OCM2); 施菜籽饼 3.0 g/kg(RSC1); 施菜籽饼 6.0 g/kg(RSC2); 施猪粪 4.82 g/kg(PM1); 施猪粪 9.63 g/kg(PM2)。每处理 4 次重复, 共 28 盆, 随机排列。处理 1 施入的化肥氮、磷、钾分别为分析纯尿素、磷酸二氢钾、氯化钾, 其中, N 0.36 g/kg, P₂O₅ 0.42 g/kg, K₂O 0.33 g/kg; 处理 2~7 的氮、磷、钾含量与处理 1 相等, 不足部分以化肥补齐。每盆装干土 1.5 kg(烘干基), 装盆前将土壤过 0.4 mm 筛, 与化肥、经腐熟的有机物料充分混匀, 装盆后保持土壤含水量为田间持水量的 60%, 培养两周后移栽水稻。

水稻种子经多菌灵溶液消毒、洗净, 置恒温箱 30 ℃ 浸种 48 h, 滤去水分, 30 ℃ 下催芽, 待种子露白后于 2011 年 6 月 5 日播于塑料盘中育苗, 6 月 30 日移栽, 每盆 3 穴, 每穴 1 株。浇去离子水淹水栽培, 所有处理于 8 月 23 日追施氮肥(N) 0.12 g/kg。

1.2 测定内容和方法

2011 年 9 月 16 日水稻始穗期测定剑叶 SPDA 值和叶面积(浙江托普仪器有限公司 TYS-3N 植株养分速测仪, YMJ-A 叶面积测量仪)。采剑叶和根尖 3 cm 测可溶性蛋白和抗氧化酶活性。将植株分成地下部和地上部, 自来水洗净后地下部用 20 mmol/L Na₂EDTA 浸泡 20 min 去除根表吸附的重金属, 去离子水洗净, 70℃ 烘干, 称重, 用不锈钢粉碎机将各部分粉碎备用。采集土壤样品, 风干, 过 0.15 mm 尼龙筛备用。

组织匀浆的制备: 准确称取组织重量, 剪碎后按照重量体积比(m(g)/v(ml))1:9 的比例加入 0.1 mol/L

pH 7.0~7.4 磷酸盐缓冲液, 冰浴研磨制备成 10% 的组织匀浆, 2 500 r/min 离心 10 min 后, 取上清液进行有关酶活性的测定。测定过程中上清液置于冰浴中。采用南京建成生物工程研究所生产的蛋白质、MDA、SOD、CAT、POD 检测试剂盒测定组织可溶性蛋白、MDA 含量和酶活性。蛋白质含量的测定采用考马斯亮蓝比色法, 丙二醛(MDA)含量的测定采用 TBA 法。超氧化物歧化酶(SOD)活性以每克组织在 1 ml 反应液中 SOD 抑制率达 50% 时所对应的 SOD 量为一个 SOD 活力单位。过氧化物酶(POD)活性以 37℃ 时, 每克组织每分钟催化产生 1 μg 的底物的酶量定义为一个 POD 活力单位。过氧化氢酶(CAT)活性以每克组织每秒钟分解 1 μmol 的 H₂O₂ 的量为一个 CAT 活力单位。

水稻植株重金属含量用 HNO₃: HClO₄(v/v = 3:2)混酸消解, 采用原子吸收分光光度计(火焰: Varian SpectrAA 220FS; 石墨炉: Varian 220Z)测定, 以 GBW07603 标准物质进行分析测试质量控制。土壤基本理化性质采用常规方法分析^[14]。

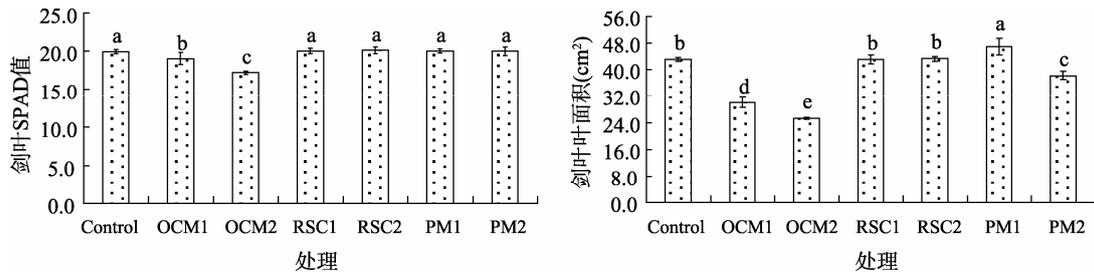
1.3 数据处理

采用 Excel 2003 和 SPSS 13.0 进行数据分析, 采用 LSD 法进行差异显著性检验($\alpha = 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 有机物料对始穗期水稻根和剑叶逆境生理特征的影响

由图 1 可看出, 与 Control 处理相比, OCM 处理显著降低了始穗期水稻剑叶中叶绿素相对含量(SPAD 值)和剑叶叶面积, PM1 处理使剑叶叶面积显著增加, PM2 处理剑叶叶面积显著减小。组织可溶性蛋白含量处理间差异明显(图 2), RSC 和 OCM 处理使水稻根可溶性蛋白含量显著增加, 与 Control 处理相比, RSC2、OCM2、RSC1 和 OCM1 处理下根可溶性蛋白含量分别增加 44.0%、30.3%、17.4% 和 14.5%, PM2 处理则减小 18.8%。OCM1、RSC2 和 OCM2 处理使剑叶可溶性蛋白含量较 Control 处理显著降低, 降幅为 15.5%、25.5% 和 29.9%。



(图中不同小写字母表示处理间差异在 $P < 0.05$ 水平显著, 下同)

图 1 有机物料对剑叶 SPAD 值和叶面积的影响

Fig. 1 Effects of organic amendments on chlorophyll SPAD values and flag leaf areas

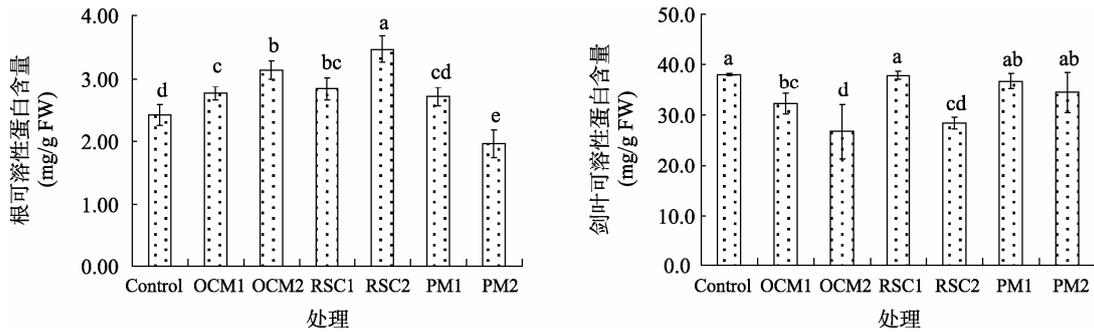


图 2 有机物料对根和剑叶可溶性蛋白含量的影响

Fig. 2 Effects of organic amendments on soluble protein contents in rice roots and flag leaves

不同有机物料处理对水稻根和剑叶 MDA 含量的影响如图 3 所示, 相同处理剑叶 MDA 含量高于根。与 Control 处理相比, PM 处理根和剑叶 MDA 含量增加, RSC 处理和 OCM2 处理则降低。PM1 和 PM2 处理使根 MDA 含量增加 59.4% 和 53.1%, 剑叶增加 18.5% 和 44.9%; RSC1 和 RSC2 处理使根 MDA 含量降低 15.6% 和 31.3%, 剑叶降低 15.3% 和 51.8%。有机物料对根和剑叶抗氧化酶(SOD、POD 和 CAT)活性的影响如图 4 所示。根 SOD 活性 PM2 处理最高, OCM2 处理最低, 而剑叶 SOD 活性 Control 处理最高, PM2 处理最低。PM2、RSC2、PM1 处理使根 SOD 活性较 Control 处理增大 52.1%、27.3%、17.6%, OCM1、RSC1、OCM2 处理则降低 25.8%、26.7%、86.8%。剑叶 SOD 活性 RSC2、OCM2、RSC1、PM1

和 PM2 处理较 Control 处理分别减小 11.7%、12.6%、21.6%、36.9% 和 43.7%。相同处理根 POD 活性比剑叶小, 与 Control 处理相比, OCM1、COM2、RSC2 处理使根 POD 活性分别减小 9.3%、27.2% 和 31.5%, RSC2、OCM2 和 PM2 则使剑叶 POD 活性增加 6.1%、4.0% 和 3.3%。相同处理根 CAT 活性同样比剑叶小, PM1、OCM2、RSC2、OCM1 和 RSC1 处理根 CAT 活性较 Control 处理增加 157.6%、100.0%、79.8%、69.6% 和 40.9%, OCM2 和 RSC1 处理使剑叶 CAT 活性较对照增加 190.6% 和 143.8%。

2.2 有机物料对始穗期水稻植株生物量及其分配的影响

始穗期水稻生物量和分配如表 2 所示。与 Control 处理相比, RSC1 和 PM2 处理根生物量增大 62.2% 和

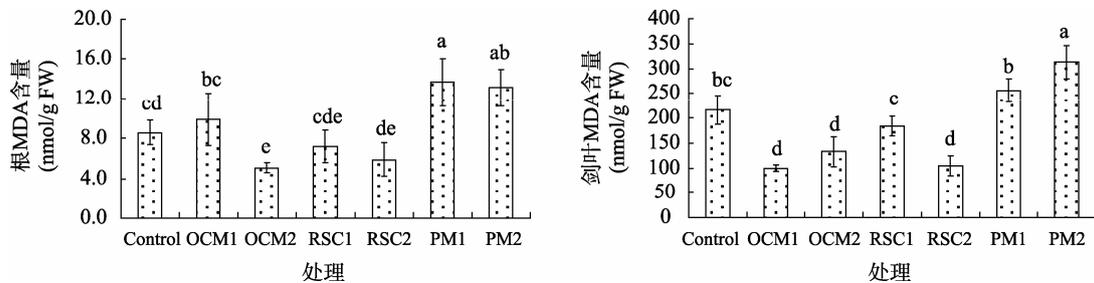


图 3 有机物料对根和剑叶 MDA 含量的影响

Fig. 3 Effects of organic amendments on MDA contents in rice roots and flag leaves

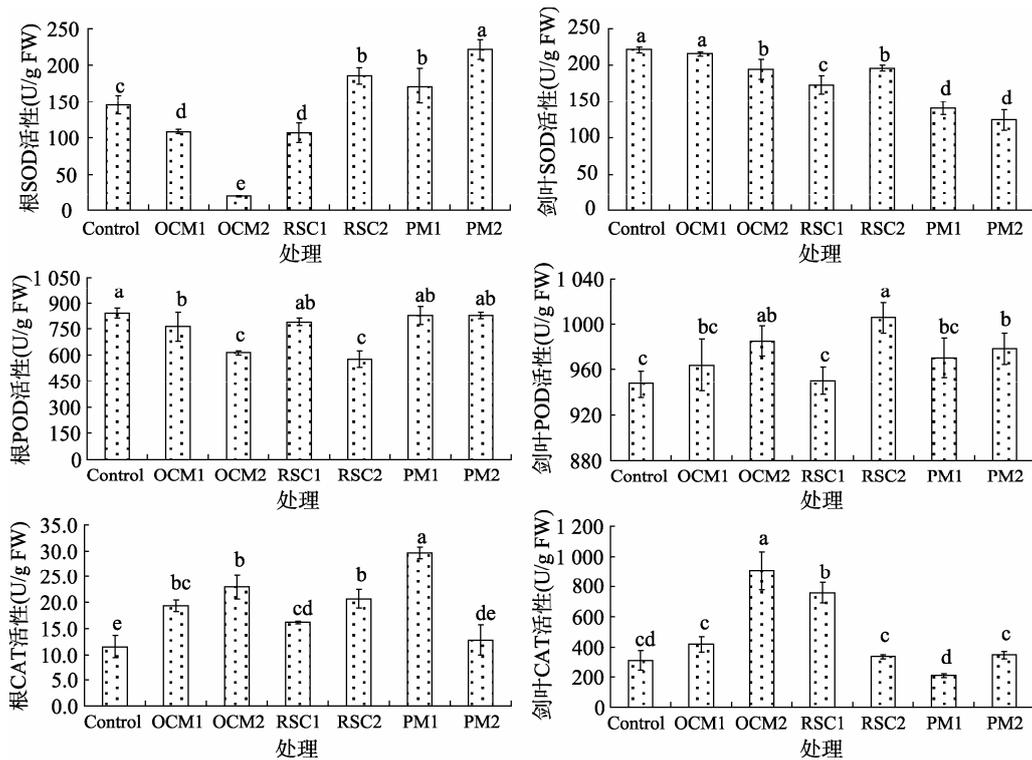


图 4 有机物料对根和剑叶抗氧化酶活性的影响

Fig. 4 Effects of organic amendments on antioxidant enzyme activities in rice roots and flag leaves

表 2 有机物料对始穗期水稻生物量的影响(g/盆)

Table 2 Effects of organic amendments on biomass at initial stage of panicle emerging

处理	根生物量	秸秆生物量	总生物量
Control	6.78 ± 0.16 cd	42.5 ± 1.7 d	49.2 ± 1.7 d
OCM1	6.04 ± 0.43 de	45.2 ± 4.5 cd	51.3 ± 4.7 cd
OCM2	4.90 ± 0.11 e	25.6 ± 1.8 e	30.5 ± 1.8 e
RSC1	10.99 ± 1.55 a	62.4 ± 1.9 a	73.4 ± 2.6 a
RSC2	7.78 ± 0.96 bc	48.4 ± 4.7 bc	56.1 ± 5.6 b
PM1	7.65 ± 0.71 bc	49.8 ± 1.6 b	57.4 ± 1.5 b
PM2	8.83 ± 1.12 b	45.6 ± 0.8 cd	54.5 ± 1.5 bc

注: 表中同列不同小写字母表示处理间差异在 $P < 0.05$ 水平显著, 下同。

30.2%, 而 OCM2 处理则减小 27.7%; RSC1、PM1 和 RSC2 处理秸秆生物量分别增大 46.8%、17.2% 和 13.9%, OCM2 处理则减小 39.8%。施用菜籽饼和猪粪水稻总生物量显著增加, OCM2 处理使得总生物量显著减小。OCM2 和 PM2 处理使根生物量所占的比例显著提高, 使秸秆所占的比例显著降低, OCM1 处理则相反。

2.3 有机物料对始穗期水稻植株锌镉浓度和积累量的影响

由表 3 可见, 施用有机物料后根中 Zn、Cd 浓度较 Control 处理显著降低, 以 OCM2 处理 Zn 浓度为最低, Cd 浓度以 RSC2 处理最低。OCM1、OCM2、

表 3 有机物料对始穗期水稻植株 Zn、Cd 浓度的影响 (mg/kg)

Table 3 Effects of organic amendments on concentrations of Zn and Cd in rice shoots at initial stage of panicle emerging

处理	Zn		Cd	
	根	秸秆	根	秸秆
Control	397 ± 55 a	138 ± 3 a	28.4 ± 4.6 a	2.56 ± 0.43 a
OCM1	276 ± 20 bc	138 ± 21 a	15.6 ± 4.7 bc	1.91 ± 0.23 a
OCM2	226 ± 4 c	110 ± 7 b	11.8 ± 0.5 c	1.10 ± 0.24 b
RSC1	321 ± 43 b	124 ± 14 ab	19.1 ± 4.3 bc	2.13 ± 0.35 a
RSC2	292 ± 40 bc	102 ± 22 b	11.7 ± 1.4 c	0.97 ± 0.26 b
PM1	279 ± 41 bc	117 ± 9 ab	22.0 ± 8.4 ab	2.25 ± 0.64 a
PM2	228 ± 29 c	65 ± 14 c	15.9 ± 4.4 bc	0.91 ± 0.27 b

RSC1、RSC2、PM1、PM2 处理根 Zn 浓度降低 30.5%、43.1%、19.1%、26.4%、29.7%、42.6%, Cd 浓度下降 45.1%、58.5%、32.7%、58.8%、22.5%、44.0%。秸秆中 Zn、Cd 浓度仍以 Control 处理最高, 其中 OCM2、RSC2 和 PM2 处理 Zn、Cd 浓度显著降低, Zn 降幅分别为 20.3%、26.1% 和 52.9%, Cd 降幅分别为 57%、62.1% 和 64.5%。水稻根和秸秆 Zn、Cd 的积累量均以 RSC1 处理最高, OCM2 处理最低(表 4)。与 Control 处理相比, RSC1 处理 Zn、Cd 积累总量分别增加 31.4% 和 12.9%, OCM2、PM2 处理使 Zn 积累总量减小 54.0% 和 41.5%, OCM1、OCM2、RSC2、PM2 处理使 Cd 的积累总量减小 39.4%、71.5%、54.3%

和 41.1%。所有处理 Zn 主要积累在秸秆中，而 Cd 主要积累在根部。

表 4 有机物料对始穗期水稻植株 Zn、Cd 积累量的影响 (mg/盆)

Table 4 Effects of organic amendments on accumulations of Zn and Cd in rice roots at initial stage of panicle emerging

处理	Zn			Cd		
	根	秸秆	总量	根	秸秆	总量
Control	2.68 b	5.85 b	8.53 b	0.193 ab	0.109 ab	0.302 a
OCM1	1.67 d	6.24 b	7.92 b	0.095 cd	0.087 b	0.183 b
OCM2	1.11 e	2.81 c	3.92 c	0.058 d	0.028 c	0.086 c
RSC1	3.48 a	7.73 a	11.21 a	0.209 a	0.132 a	0.341 a
RSC2	2.27 c	4.94 b	7.22 b	0.090 cd	0.048 c	0.138 bc
PM1	2.12 c	5.82 b	7.94 b	0.164 ab	0.113 ab	0.277 a
PM2	1.99 cd	2.99 c	4.99 c	0.137 bc	0.041 c	0.178 b

3 讨论

水稻籽粒干物质有 20%~40% 由抽穗前茎叶中的贮藏物质运转而来,大部分干物质由抽穗后的光合产物所供应^[15],作为功能叶片,剑叶光合同化能力对水稻产量的贡献大。叶片叶绿素含量和叶面积是反映光合作用能力的重要指标,SPAD 值与叶绿素含量密切相关^[16]。施用有机碳源(OCM),剑叶 SPAD 值和叶面积显著降低,OCM2 处理总生物量也显著减小,表明有机碳源不利于该污染土壤上水稻的生长,与之前敏感水稻品种的研究结果一致^[9]。3 种有机物料中,有机碳源 C/N 远远高于菜籽饼和猪粪,丰富的碳源会激发微生物活动,导致有效氮大量被微生物固持,从而影响作物的氮素供应,尤其是当季作物急需氮素的时候^[17]。在水稻氮代谢关键期,施用高量有机碳源使植株积累的氮减少,从而不利于水稻生长。旱作时施用高量有机碳源,土壤板结且不利于灌溉水下渗。淹水栽培水稻,施用高量有机碳源对水稻根系泌氧可能产生抑制作用,不利于根系的生长,其生物量显著降低。

重金属胁迫可诱导植物产生过量的活性氧自由基(ROS),当清除 ROS 的速度小于 ROS 积累的速度时,体内 ROS 的含量上升,将引起不可逆的伤害及细胞凋亡^[18]。SOD、POD 和 CAT 等是 ROS 清除系统中重要的保护酶,它们能有效地阻止高浓度氧的快速积累,对减轻逆境造成的膜伤害有重要作用。ROS 包括超氧自由基(O₂⁻)、氢氧自由基(OH⁻)、过氧化氢(H₂O₂)等活性氧类物质。O₂⁻ 由 SOD 清除,并使之形成 H₂O₂,再由 CAT 或者 POD 进一步分解为 H₂O^[19]。

研究表明重金属既能抑制也能诱导水稻抗氧化酶活性^[11,20]。本研究中,重金属胁迫可诱导剑叶增强清除超氧自由基的能力,当菜籽饼(RSC)和猪粪(PM)处理使得根清除超氧自由基的能力增强时,剑叶所受到的胁迫减弱,SOD 活性降低。有研究表明,就 SOD、POD 及 CAT 对重金属胁迫的敏感性而言,CAT 的敏感性最高,相同处理若 CAT 活性低,H₂O₂ 清除受到一定程度的抑制,将导致 POD 活性升高^[21]。在本研究中,CAT 酶活性处理间的差异明显,在根部除 PM1 处理外,CAT 活性低时 POD 活性升高,而在剑叶中并未表现出这一规律,Control 处理 CAT 和 POD 活性都较低。

MDA 是膜脂过氧化作用的最终产物,其含量的高低是膜脂过氧化程度的重要标志。MDA 含量大幅度升高,标志植株快速转向衰老^[22]。RSC 处理根和剑叶 MDA 含量降低,同时活性氧清除系统保持相应较高的水平,起到对膜的保护作用。PM 处理根和剑叶 MDA 含量均显著升高,根部 3 种抗氧化酶活性还能保持较高的水平,而剑叶中酶活性降低,表明该处理下水稻正加速衰老。在逆境胁迫下,组织可溶性蛋白是重要的渗透调节物质,能维系膜结构的完整性而使细胞免受伤害^[23]。施用高量有机碳源根可溶性蛋白含量显著增加,剑叶中可溶性蛋白含量显著降低,而根抗氧化能力降低,剑叶抗氧化能力增强,但组织 MDA 含量,根部和秸秆生物量较 Control 处理均显著降低,这表明有机碳源的抑制作用不仅仅是氧化胁迫,还存在更复杂的过程,可能与土壤氮的供给和根系活性受到抑制有关。RSC 处理 MDA 含量降低,抗氧化能力提高,根部可溶性蛋白含量显著增大,总生物量也显著增加,表明施用菜籽饼能缓解重金属对水稻的氧化胁迫,促进水稻生长。PM 处理虽然使水稻生物量增大,但是氧化胁迫导致其生育后期衰老加快,灌浆结实会受到一定程度的影响,与之前敏感水稻品种的研究结果一致^[9]。

施用菜籽饼和猪粪始穗期水稻根、秸秆中重金属浓度均较 Control 处理降低,其中 RSC2 和 PM2 处理重金属含量和积累总量均显著低于 Control 处理。RSC1 处理积累总量显著增加,源于生物量的增大,高产一般会伴随着相对高的重金属积累^[24]。水稻积累的 Cd 主要存留在根部,而 Zn 主要积累在秸秆中,Zn 和 Cd 之间可能存在着某种竞争作用,当水稻同时受到 Zn 和 Cd 胁迫时,以增加 Zn 从地下部向地上部转运的方式抑制 Cd 的转运,从而减轻 Cd 对地上部的毒害。

综上所述,在重金属污染土壤中施用不同的有机物料,对水稻始穗期根和剑叶生理特性的影响有所不同,且有机物料不同用量之间也有差异。施用有机碳源使剑叶的光合同化能力降低,根部抗氧化胁迫的能力减弱,特别是高量施用,不利于水稻生长。施用菜籽饼增强了水稻抗氧化胁迫的能力,生物量也显著增大,根和秸秆中 Zn、Cd 浓度降低,但高量施用会使水稻生育期推迟。施用猪粪始穗期的生物量显著增大,根和秸秆中 Zn、Cd 浓度也降低,氧化胁迫导致剑叶衰老进程加快,在高量施用,衰老更加明显。由此可以看出,在重金属污染土壤上菜籽饼与化肥配施能增强水稻抗氧化胁迫的能力,增加生物量又能降低水稻植株的重金属含量。

参考文献:

- [1] 骆永明. 中国土壤环境污染态势及预防、控制和修复策略[J]. 环境污染与防治, 2009, 31(12): 27-31
- [2] 夏家淇, 骆永明. 我国土壤环境质量研究几个值得探讨的问题[J]. 生态与农村环境学报, 2007, 23(1): 1-6
- [3] Yang QW, Lan CY, Wang HB, Zhuang P, Shu WS. Cadmium in soil-rice system and health risk associated with the use of untreated mining wastewater for irrigation in Lechang, China[J]. Agricultural Water Management, 2006, 84: 147-152
- [4] Yu H, Wang JL, Fang W, Yuan JG, Yang ZY. Cadmium accumulation in different rice cultivars and screening for pollution-safe cultivars of rice[J]. Science of the Total Environment, 2006, 370: 302-309
- [5] Liu JG, Qian M, Cai GL, Yang JC, Zhu QS. Uptake and translocation of Cd in different rice cultivars and the relation with Cd accumulation in rice grain[J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 143: 443-447
- [6] Hseu ZY, Su SW, Lai HY, Guo HY, Chen TC, Chen ZS. Remediation techniques and heavy metal uptake by different rice varieties in metal-contaminated soils of Taiwan: New aspects for food safety regulation and sustainable agriculture[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2010, 56(1): 31-52
- [7] Chien HF, Wang JW, Lin CC, Kao CH. Cadmium toxicity of rice leaves is mediated through lipid peroxidation[J]. Plant Growth Regulation, 2001, 33: 205-213
- [8] Hasan SA, Fariduddin Q, Ali B, Hayat S, Ahmad A. Cadmium: Toxicity and tolerance in plants[J]. Journal of Environmental Biology, 2009, 30: 165-174
- [9] 周利强, 吴龙华, 骆永明, 尹斌. 有机物料对污染土壤上水稻生长和重金属吸收的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23: 383-388
- [10] Shah K, Kumar RG, Verma S, Dubey RS. Effect of cadmium on lipid peroxidation, superoxide anion generation and activities of antioxidant enzymes in growing rice seedlings[J]. Plant Science, 2001, 161: 1 135-1 144
- [11] Hassan MJ, Shao GS, Zhang GP. Influence of cadmium toxicity on growth and antioxidant enzyme activity in rice cultivars with different grain cadmium accumulation[J]. Journal of Plant Nutrition, 2005, 28: 1 259-1 270
- [12] Chen J, Zhu C, Lin D, Sun Z X. The effects of Cd on lipid peroxidation, hydrogen peroxide content and antioxidant enzyme activities in Cd-sensitive mutant rice seedlings[J]. Canadian Journal of Plant Science, 2007, 87: 49-57
- [13] 国家环境保护总局. 土壤环境质量标准(GB 15618-1995) [S]. 北京: 中国标准出版社, 1996
- [14] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000
- [15] 杨文钰, 屠乃美. 作物栽培学各论(南方本)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003
- [16] Markwell J, Osterman JC, Mitchell JL. Calibration of the Minolta SPAD-502 leaf chlorophyll meter[J]. Photosynthesis Research, 1995, 46: 467-472
- [17] 鲁彩艳, 陈欣. 有机碳源添加对不同 C/N 比有机物料氮矿化进程的影响[J]. 中国科学院研究生院学报, 2004, 21(1): 108-112
- [18] Zhang FQ, Wang YS, Lou ZP, Dong JD. Effect of heavy metal stress on antioxidative enzymes and lipid peroxidation in leaves and roots of two mangrove plant seedlings (*Kandelia candel* and *Bruguiera gymnorhiza*) [J]. Chemosphere, 2007, 67: 44-50
- [19] Ushimaru T, Kanematsu S, Shibasaka M, Tsuji H. Effect of hypoxia on the antioxidative enzymes in aerobically grown rice (*Oryza sativa*) seedlings[J]. Physiologia Plantarum, 1999, 107: 181-187
- [20] 葛才林, 杨小勇, 金阳, 孙锦荷, 王泽港, 罗时石. 重金属胁迫对水稻不同品种超氧化物歧化酶的影响[J]. 核农学报, 2003, 17(4): 286-291
- [21] 朱雪梅, 林立金, 邵继荣, 杨远祥, 徐精文, 蒋小军. 锌铬复合污染对水稻根系抗氧化酶活性的影响[J]. 农业工程学报, 2008, 24(3): 203-208
- [22] 武立权, 王荣富, 吴殿星, 舒庆尧. 水稻黄叶突变体的剑叶衰老与保护酶活性关系的研究[J]. 核农学报, 2008, 22(1): 1-4
- [23] 汤日圣, 郑建初, 陈留根, 张大栋, 金之庆, 童红玉. 高温对杂交水稻籽粒灌浆和剑叶某些生理特性的影响[J]. 植物生理与分子生物学学报, 2005, 31(6): 657-662
- [24] 李坤权, 刘建国, 陆小龙, 杨建昌, 张建建, 朱庆森. 水稻不同品种对镉吸收及分配的差异[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(5): 529-532

Effects of Different Organic Amendments on Antioxidant Enzyme Activities and Heavy Metal Uptakes of a Low Grain Cd Accumulation Rice Cultivar at Initial Stage of Panicle Emerging

ZHOU Li-qiang^{1,2,3}, WU Long-hua², LUO Yong-ming^{2,4}, YIN Bin^{1*}

(1 *State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture(Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences), Nanjing 210008, China;* 2 *Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;* 3 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;* 4 *Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai, Shandong 264003, China*)

Abstract: A pot experiment was carried out to investigate the effects of three organic amendments (organic carbon material, rapeseed cake and pig manure) on antioxidant enzyme activities in roots, flag leaves and heavy metal uptakes of a low grain Cd accumulation rice cultivar at a heavy metal mixed contaminated paddy soil. The results showed that at initial stage of panicle emerging, application of higher rate mixed organic carbon material inhibited the growth of rice, and reduced antioxidant enzymes activities of rice roots. Application of rapeseed cake and pig manure significantly increased the biomass, and decreased Zn and Cd concentration in roots and straws. Application of rapeseed cake increased antioxidant enzyme activities of rice, and pig manure resulted in premature senility from initial stage of panicle emerging. As compared with the control, application of rapeseed cake increased biomass by 14.0% – 49.2%, decreased melondialdehyde (MDA) content by 15.6% – 31.3% and 15.3% – 51.8% in roots and flag leaves, increased catalase (CAT) activity by 40.9% – 79.8% and 9.0% – 143.8%, respectively. Concentrations of Zn in roots and straws decreased 19.1% – 26.4% and 10.1% – 26.1%, Cd decreased 32.7% – 58.8% and 16.8 – 62.1%, respectively. Application of pig manure increased biomass by 10.8% – 16.7%, increased MDA content by 53.1% – 59.4% and 18.5% – 44.9% in roots and flag leaves. Concentrations of Zn in roots and straws decreased 29.7% – 42.6% and 15.2% – 52.9%, Cd decreased 22.5% – 44.0% and 12.1% – 64.5%, respectively.

Key words: Organic amendments, *Oryza sativa* L., Antioxidant enzymes activity, Heavy metal, Soil