

有机物料对污染土壤上水稻重金属吸收的调控效应^①

周利强^{1,2,3}, 尹 斌¹, 吴龙华², 骆永明^{2,4*}

(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、菜籽饼和猪粪对不同水稻(汕优 63, 简称“SY63”; 中浙优 1 号, 简称“ZZY1”)重金属吸收的调控效应。结果表明, 在重金属污染土壤上 ZZY1 具有一定的耐性, 相同处理时 ZZY1 糙米、蓉糠、秸秆中重金属含量均低于 SY63 品种, 糙米中 Cd 含量较 SY63 低 57.5%~83.8%, Cu 含量低 37.8%~69.1%, Zn 含量低 0.88%~31.7%, 食物链风险较 SY63 品种低。3 种有机物料中, 施用菜籽饼使两水稻品种糙米中重金属含量明显低于其他处理; 与对照相比, 施用菜籽饼使 SY63 糙米中 Cd、Cu 和 Zn 含量降低 73.5%、52.6% 和 32.1%, ZZY1 糙米 Cd 含量降低 30.5%。在供试重金属污染土壤上可选择具有一定重金属耐性的水稻品种 ZZY1 进行粮食生产, 同时施用适量的菜籽饼以增强其抵御重金属毒害的能力, 降低糙米中 Cd、Cu 和 Zn 含量及其食物链污染风险。

关键词: 有机物料; 水稻; 重金属; 土壤

中图分类号: X53

受重金属、持久性有机污染物等影响, 我国耕地土壤正面临非常严峻的环境污染问题, 并呈现出复合或混合污染的特征^[1-2]。土壤中存留的污染物不仅会影响农作物生长, 降低粮食产量, 还导致农产品中各种污染物的积累, 通过食物链威胁到人体健康, 从而影响经济和社会的发展。作为粮食生产主产区之一的长江三角洲部分地区, 由于农业生产中长期大量施用化肥、农药和污水灌溉, 以及工矿企业废弃物处置不当造成的土壤污染使粮食生产面临生态风险^[3-5], 而耕地面积的不断缩减导致在污染土壤上进行粮食生产的现象仍比较普遍。通过特定的土壤改良措施和农艺栽培措施以减少土壤污染对粮食生产造成不良影响的研究已取得了积极进展, 其中施用改良剂以改善土壤的理化特性^[6-8], 筛选低积累的耐性品种最受关注^[9-10]。

将稻麦秸秆、榨油饼粕、畜禽粪便、城市生活垃圾、污泥等有机废弃物作为污染土壤有机改良剂的研究最为常见^[7, 11]。各种有机改良剂施用后污染土壤物理、化学、生物学性质会发生改变, 重金属的生物有

效性通常会降低, 植物吸收积累量减小, 对于贫瘠的土壤还能增加养分供给, 提高作物的产量, 但是有机改良剂不改变重金属的总量, 畜禽粪便还可能产生新的输入, 随着有机物质被分解, 改良剂的固定作用减弱, 重金属生物有效性又会提高^[11]。因此本研究选择长江三角洲地区典型重金属污染水稻土, 以高产水稻栽培品种汕优 63 和重金属低积累水稻品种中浙优 1 号为对象, 选择具有代表性的 3 类不同来源的有机物料(有机碳源、菜籽饼和猪粪), 将低积累耐性品种筛选和有机改良物质结合, 研究有机物料对污染土壤上不同重金属吸收特性水稻的调控效应, 以期为重金属污染水稻土的利用和管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试水稻品种为籼型杂交稻汕优 63(SY63)和中浙优 1 号(ZZY1), 分别由江苏省农业科学院和中国水稻研究所提供。供试土壤为普通黏化湿润富铁土 (typic agri-udic ferrosols), 采自浙江杭州郊区小型金

基金项目: 国家自然科学基金重大国际合作项目(40821140539), 国家高技术研究发展计划(863)项目(2006AA10Z418)和国家自然科学基金项目(41071197)资助。

* 通讯作者(ymluo@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

属冶炼厂附近,由于长期大气沉降和污水灌溉导致农田土壤受到重金属污染。土壤经风干去除杂物后混匀,过 2 mm 尼龙筛、备用。土壤有机质为 39.4 g/kg,全氮 2.24 g/kg,全磷 0.71 g/kg,全钾 25.1 g/kg, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 10.1 mg/kg,速效磷 20.7 mg/kg,速效钾 79.6 mg/kg,全 Cd 2.08 mg/kg,全 Cu 236 mg/kg,全 Zn 1 497 mg/kg, pH 7.71。土壤全 Cd 和全 Zn 含量是国家《土壤环境质量标准》(GB 15618-1995)III 级标准的 2 倍和近 3 倍。3 类不同来源的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,视为成分相对简单的含碳有机物;菜籽饼是油菜压榨后的产物,可视为生物质有机物直接还田;猪

粪则是农业生产中最常用的有机肥,可视为过腹还田。供试有机物料养分和重金属含量见表 1。

1.2 试验设计与实施

盆栽试验在中国科学院南京土壤研究所温室进行,每一水稻品种设 4 处理,每处理 6 次重复,共 48 盆,随机排列。每盆加土壤 5 kg(烘干基),装盆前施入化肥和过 0.4 mm 筛腐熟后的有机物料,充分混匀,浇去离子水保持土壤含水量为田间持水量的 60%,平衡一周后播种。化肥氮磷钾分别以尿素、磷酸二氢钾、硫酸钾施入,基肥氮(N)0.24 g/kg,磷(P_2O_5)0.13 g/kg,钾(K_2O)0.13 g/kg。处理: 施化肥对照(CK); 施入有机碳源(OCM)1.5 g; 施入菜籽饼(RSC)1.5 g; 施入猪粪(PM)1.5 g。

表 1 供试有机物料养分和重金属含量

Table 1 Nutrient and heavy metal concentrations of organic amendments tested

有机物料	有机碳(g/kg)	全氮(g/kg)	全磷(g/kg)	全钾(g/kg)	全镉(mg/kg)	全铜(mg/kg)	全锌(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:表中“ND”表示未检出。

2010 年 6 月 28 日起在温室进行土培试验。水稻种子经多菌灵溶液消毒,洗净后置恒温箱 30 浸种 48 h,滤去水分在 30 催芽,待种子露白后直播,每盆 4 穴,每穴 3 粒,保持土壤含水量为田间持水量的 60%,秧苗长至三叶期定苗,每盆 4 穴,每穴 1 株。定苗后去离子水淹水培育,管理措施同大田栽培。所有处理于 2010 年 8 月 1 日追施氮(N)0.163 g/kg,磷(P_2O_5)0.18 g/kg,钾(K_2O)0.12 g/kg。

2010 年 11 月 20 日收获,将地上部分为秸秆和籽粒两部分,用去离子水洗净,70 烘干、称量,籽粒用脱粒机脱成糙米,将糙米、蓉糠和秸秆用不锈钢粉碎机粉碎备用。采集土壤样品,风干后研磨过 2 mm 筛、备用。植物样品重金属含量用 $\text{HNO}_3:\text{HClO}_4$ (3:2)混酸消解,原子吸收分光光度计(火焰:Varian SpectrAA 220FS、石墨炉:Varian 220Z)测定,以 GBW07603

进行分析测试质量控制。土壤 DTPA 提取态重金属用 pH 7.3 的 0.005 mol/L DTPA (0.01 mol/L CaCl_2 , 0.1 mol/L TEA) 浸提剂(土液比 1:2)浸提,原子吸收分光光度计测定。土壤基本理化性质采用常规方法分析^[12]。

1.3 数据统计

Microsoft Office Excel 2003 进行数据整理,SPSS13.0 进行差异显著性检验(LSD, $P<0.05$)和相关性分析,计算 Pearson 相关系数。

2 结果与分析

2.1 有机物料对地上部生物量的影响

施用有机碳源和猪粪使 SY63 籽粒产量较对照降低 43.6% 和 39.5% 而 ZZY1 则增大 64.0% 和 18.4% (表 2)。施用菜籽饼使 SY63 和 ZZY1 籽粒产量较对

表 2 水稻地上部生物量(g/钵)

Table 2 Biomass of rice shoot

处理	秸秆		籽粒		地上部生物量	
	SY63	ZZY1	SY63	ZZY1	SY63	ZZY1
CK	33.6 ± 2.9 ab	40.5 ± 2.9 b	16.1 ± 2.4 a	7.44 ± 1.35 b	49.7 ± 5.2 a	47.9 ± 3.2 b
OCM	29.3 ± 3.7 c	42.4 ± 2.2 ab	9.08 ± 1.32 b	12.2 ± 0.4 a	38.4 ± 2.9 b	54.6 ± 1.9 a
RSC	30.9 ± 2.5 bc	39.3 ± 4.4 b	19.1 ± 2.3 a	11.1 ± 1.3 a	50.0 ± 4.0 a	50.4 ± 4.2 ab
PM	36.3 ± 2.0 a	47.4 ± 1.7 a	9.74 ± 2.00 b	8.81 ± 0.68 b	46.1 ± 2.8 a	56.2 ± 1.4 a

注:CK 表示对照;OCM 表示有机碳源;RSC 表示菜籽饼;PM 表示猪粪;同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$);下同。

照增加 18.6% 和 49.2%。有机碳源处理下 SY63 秸秆和地上部生物量显著降低,猪粪处理 ZZY1 秸秆和地上部生物量显著升高。

2.2 有机物料对地上部重金属含量和积累量的影响

施有机碳源和菜籽饼处理, SY63 糙米中 Cd、Cu 和 Zn 含量均较对照显著降低,其中菜籽饼处理降幅达 73.5%、52.6% 和 32.1%,施用猪粪显著增大了糙米中 Zn 含量(图 1)。在 SY63 砉糠和秸秆中 3 种重金属含量仍以菜籽饼处理最低,与对照相比其砉糠中 Cd、Cu 和 Zn 含量降低 50.1%、50.3% 和 49.1%,秸秆中降低 7.49%、3.76% 和 22.2%。除砉糠中 Zn 含量

外,ZZY1 糙米、砉糠、秸秆中重金属含量在菜籽饼处理时最低,糙米中 Cd 含量较对照降低 30.5%,秸秆中 Cd、Cu 和 Zn 含量则分别降低 63.9%、43.9% 和 49.1%。施用猪粪 ZZY1 糙米中 Cd 和 Zn 含量较对照增加了 24.7% 和 15.7%。相同处理时 ZZY1 品种糙米、砉糠、秸秆中 3 种重金属含量均低于 SY63 品种,ZZY1 糙米中 Cd 含量较 SY63 低 57.5%~83.8%,Cu 含量低 37.8%~69.1%,Zn 含量低 0.88%~31.7%。同一处理中重金属则基本呈现出秸秆 > 砉糠 > 糙米的规律。

水稻地上部分重金属积累量因有机物料处理不同而有所差异,相同处理下两品种间积累量差异明显

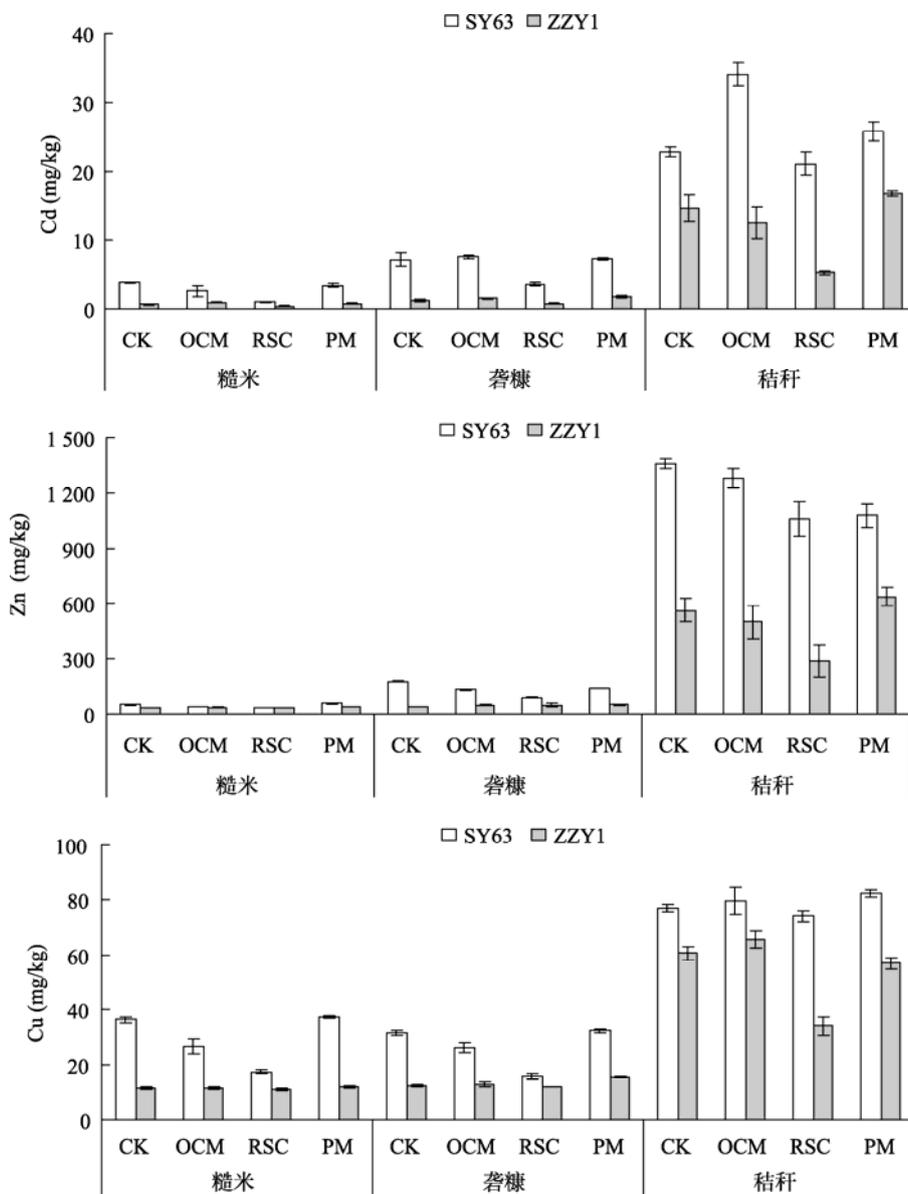


图 1 糙米、砉糠和秸秆中重金属含量

Fig. 1 Heavy metal concentrations in brown rice, husk and straw

(表 3)。有机碳源处理 SY63 品种 Cd 积累量较对照增加 14.1%，Cu、Zn 积累量则降低 10.8% 和 13.8%；ZZY1 品种 Cu 积累量上升 15.4%，Cd、Zn 则降低 8.51% 和 6.03%。菜籽饼处理 SY63 品种 Cd、Cu 和 Zn 积累量降低 28.7%、37.7% 和 36.0%，ZZY1 品种分别降低 64.3%、42.1% 和 48.3%。猪粪处理 SY63 品种 Cu、Zn 积累量降低 6.65% 和 12.3%；ZZY1 品种 Cd、Cu 和 Zn 积累量则分别增加 34.1%、11.0% 和 32.3%。相同处理下，ZZY1 品种 Cd 积累量较 SY63 低 1.11% ~ 62.8%、Zn 的积累量则低 23.3% ~ 58.9%。

将糙米中重金属含量与相应秸秆中重金属含量之比用以表征重金属由秸秆向籽粒转运的效率，由表 4 可见，施用菜籽饼处理使 SY63 品种的 Cd、Cu 和 Zn 转运效率较对照降低了 71.0%、50.5% 和 13.5%，且糙米中重金属含量显著低于对照，表明施用菜籽饼明显降低了重金属由秸秆向糙米的转运；ZZY1 品种的 Cd、Cu 和 Zn 转运效率较对照提高 86.4%、71.4% 和 101%，而糙米中的含量较对照低，表明菜籽饼的作用主要体现在减少地上部对 Cd 的积累。施猪粪处理 SY63 品种 Cd 的转运与对照相比显著降低，而 Zn

的转运显著增高，这与糙米中 Cd、Zn 的含量趋势相一致；ZZY1 对 3 种重金属的转运效率与对照之间无显著差异。

2.3 土壤 pH 和 DTPA 提取态重金属含量

施用有机碳源后种植 SY63 品种的土壤 pH 显著低于其他处理，而施用菜籽饼显著增大种植 ZZY1 品种土壤 pH 值(表 5)。栽植 SY63 品种，土壤中 DTPA 提取态 Cu、Zn 含量处理间没有显著的差异，施用菜籽饼处理 DTPA-Cd 含量较对照显著增大。栽植 ZZY1 品种，施用有机碳源使土壤 DTPA 提取态 Cd、Cu 和 Zn 含量较对照升高 27.5%、25.9% 和 16.5%，施用菜籽饼处理分别增大 62.9%、44.6% 和 69.7%，施用猪粪处理增大 39.3%、37.3% 和 54.3%。所有处理 DTPA-Cd 含量均是种植 SY63 土壤高于种植 ZZY1 水稻的土壤。对照和有机碳源处理中，土壤提取态 Cu、Zn 含量以 SY63 品种高于 ZZY1 品种，菜籽饼和猪粪处理则反之。土壤 pH 与 DTPA 提取态重金属含量之间无显著的相关性，与 SY63 地上部生物量呈极显著的正相关，与 ZZY1 地上部积累量呈显著负相关。

表 3 地上部分重金属积累量(mg/钵)
Table 3 Accumulation of heavy metals in rice shoot

处理	Cd		Cu		Zn	
	SY63	ZZY1	SY63	ZZY1	SY63	ZZY1
CK	0.81 ± 0.03 ab	0.60 ± 0.11 b	3.16 ± 0.27 a	2.54 ± 0.09 b	45.6 ± 5.9 a	23.2 ± 4.1 a
OCM	0.92 ± 0.23 a	0.55 ± 0.13 b	2.66 ± 0.20 a	2.93 ± 0.15 a	39.3 ± 6.3 a	21.8 ± 4.8 a
RSC	0.58 ± 0.18 b	0.21 ± 0.03 c	1.97 ± 0.46 b	1.47 ± 0.29 c	29.2 ± 9.2 b	12.0 ± 4.9 b
PM	0.81 ± 0.08 ab	0.80 ± 0.05 a	2.95 ± 0.11 a	2.82 ± 0.02 ab	40.0 ± 1.4 a	30.7 ± 3.2 a

表 4 糙米与秸秆中重金属含量之比
Table 4 Heavy metal content ratio of brown rice to straw

处理	Cd		Cu		Zn	
	SY63	ZZY1	SY63	ZZY1	SY63	ZZY1
CK	0.169 ± 0.010 a	0.044 ± 0.013 b	0.471 ± 0.016 a	0.185 ± 0.015 b	0.037 ± 0.003 b	0.062 ± 0.008 b
OCM	0.076 ± 0.023 c	0.074 ± 0.012 a	0.336 ± 0.050 b	0.170 ± 0.010 b	0.032 ± 0.003 b	0.074 ± 0.018 b
RSC	0.049 ± 0.005 d	0.082 ± 0.002 a	0.233 ± 0.012 c	0.317 ± 0.043 a	0.032 ± 0.003 b	0.125 ± 0.034 a
PM	0.132 ± 0.003 b	0.047 ± 0.001 b	0.452 ± 0.013 a	0.205 ± 0.011 b	0.054 ± 0.004 a	0.063 ± 0.005 b

表 5 土壤 pH 和 DTPA 提取态重金属含量
Table 5 Soil pH and DTPA extractable Cd, Cu and Zn concentrations after rice plant harvested

处理	pH		DTPA-Cd (mg/kg)		DTPA-Cu (mg/kg)		DTPA-Zn (mg/kg)	
	SY63	ZZY1	SY63	ZZY1	SY63	ZZY1	SY63	ZZY1
CK	7.79 ± 0.05 a	7.80 ± 0.03 b	1.24 ± 0.10 b	0.847 ± 0.232 b	73.9 ± 10.0 a	60.3 ± 10.7 b	102 ± 13 a	71.3 ± 16.8 b
OCM	7.63 ± 0.04 b	7.77 ± 0.03 b	1.27 ± 0.12 ab	1.08 ± 0.21 ab	79.1 ± 6.8 a	75.9 ± 14.5 ab	112 ± 14 a	83.1 ± 13.0 b
RSC	7.79 ± 0.05 a	7.90 ± 0.03 a	1.39 ± 0.10 a	1.38 ± 0.03 a	79.7 ± 11.6 a	87.2 ± 2.1 a	108 ± 14 a	121 ± 4 a
PM	7.75 ± 0.04 a	7.79 ± 0.03 b	1.31 ± 0.06 ab	1.18 ± 0.10 ab	72.6 ± 5.4 a	82.8 ± 1.5 a	104 ± 6 a	110 ± 9 a

3 讨论

不同水稻品种对土壤重金属污染的敏感性有差异, SY63 品种所有处理整个生育期叶色偏黄, 叶尖干枯, 生育后期作为功能叶片的剑叶和倒二叶叶绿度低, 孕穗后稻穗被剑叶叶鞘包裹, 抽穗受到明显抑制。虽然 ZZY1 因重金属污染生长也受到抑制, 但叶片失绿程度整体较 SY63 轻, 表明 ZZY1 对土壤重金属污染具有一定的耐性。SY63 叶片失绿表明在重金属胁迫下, 叶片叶绿素合成受到抑制或者是叶绿素分解加速, 进而影响同化作用, 最后导致 SY63 不能完成抽穗。可能是因为叶绿素合成的相关酶类在重金属胁迫下受到抑制, 也有可能是进入水稻体内的重金属离子取代了叶绿素结构中的 Mg^{2+} 引起。还有研究表明重金属胁迫下的黄化症不是由于 Mg 或 Fe 的缺乏引起的, 而是胁迫导致 Mn 亏缺, 抑制叶绿素合成造成的^[13]。

水稻重金属的积累受到多种因素的影响, 遗传和环境因素以及两者间的互动起至关重要的作用^[14]。不同的水稻品种对同一重金属元素的积累及其在植株中的分配有很大差异^[15], 而水稻对重金属的累积品种间存在一定的稳定性^[16], 因此可通过选育低积累的水稻品种和减少重金属积累的农艺调控措施, 在一定污染程度的土壤上生产出安全的粮食产品。本研究中, 相同处理 ZZY1 糙米、砉糠、秸秆中 Cd、Cu 和 Zn 含量均低于 SY63, 其中糙米 Cd 和 Cu 含量大幅减小, 表明 ZZY1 的食物链风险较 SY63 低。水培研究也表明汕优 63 对重金属 Cu、Cd 较敏感, 根系对 Cd 的阻截能力较差, 属于高积累水稻品种^[17]。ZZY1 地上部对重金属的积累总量除有机碳源处理 Cu 外, 其余处理 Cd、Cu 和 Zn 的积累量也较 SY63 低, 这表明 ZZY1 除了能耐受一定含量的重金属污染外, 还具有某些生理机制以阻截重金属从土壤进入根系或者从根系迁移到地上部的能力, 可能与其体内非蛋白巯基(NPT)含量有关^[18], 如能进一步研究证明 ZZY1 具有低积累、高抗逆稳定性, 则可作为低积累品种加以利用。

一般认为在污染土壤中施入有机物质会增强土壤吸附重金属的能力, 使重金属元素生物有效性降低, 植物体吸收积累的重金属会减少^[11, 19]。对重金属敏感的 SY63, 糙米中重金属的含量与转运效率极显著正相关, 重金属从秸秆向籽粒的转运效率很大程度上决定了籽粒中重金属的含量^[10]。SY63 菜籽饼处理转运效率降低, 糙米重金属含量显著减小, 而土壤

DTPA 提取态 Cd、Cu 和 Zn 含量高于其余处理, 表明施用菜籽饼改善水稻生长后, 使得水稻抗逆能力增强, 在减少水稻植株吸收积累重金属的同时, 还抑制了重金属在水稻体内的转运。ZZY1 施用菜籽饼后, 糙米中 Cd 含量显著降低缘于地上部对重金属的积累减少, 而转运效率和土壤 DTPA 提取态 Cd、Cu 和 Zn 含量显著增加, 这表明菜籽饼增强了 ZZY1 阻截重金属从土壤到根系或者地下部向地上部的迁移能力。可见施用有机物质并不一定使土壤重金属钝化, 特别是在用量较少的情况下, 且土壤可提取态重金属含量与水稻秸秆、籽粒中重金属含量间并不总是有显著的相关关系^[20], 菜籽饼的调控效应主要体现在增强水稻抗逆能力, 促进水稻生长方面, 而对土壤重金属的直接效应不明显。

综上所述, 在本研究重金属污染土壤上, 可选择具有一定重金属耐性的水稻品种 ZZY1 进行粮食生产, 同时施用适量的菜籽饼以增强其抵御重金属毒害的能力, 结合其他降低水稻重金属积累的农艺改良措施, 如施用钙镁磷肥、水稻与特定的植物轮作等^[21-22], 在改善水稻生长的同时减小糙米中 Cd、Cu 和 Zn 含量, 以降低食物链风险。

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] 徐莉, 骆永明, 滕应, 卜元卿, 张雪莲, 王家嘉, 李振高, 刘五星. 长江三角洲地区土壤环境质量与修复研究 IV. 废旧电子产品拆解场地周边农田土壤酸化和重金属污染特征[J]. 土壤学报, 2009, 46(5): 833-839
- [4] 徐莉, 骆永明, 滕应, 张雪莲, 王家嘉, 章海波, 李振高, 刘五星. 长江三角洲地区土壤环境质量与修复研究 V. 废旧电子产品拆解场地周边农田土壤含氮有机污染物残留特征[J]. 土壤学报, 2009, 46(6): 1 013-1 018
- [5] 李恋卿, 潘根兴, 张平究, 成杰民, 褚秋华, 丘多生. 太湖地区水稻表层土壤 10 年尺度重金属元素积累速率的估计[J]. 环境科学, 2002, 23(3): 119-123
- [6] Li ST, Liu RL, Wang HT, Shan H. Accumulations of cadmium, zinc, and copper by rice plants grown on soils amended with composted pig manure[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2009, 40(11): 1 889-1 905
- [7] Li P, Wang XX, Zhang TL, Zhou DM, He YQ. Distribution and accumulation of copper and cadmium in soil-rice system as affected by soil amendments[J]. Water Air Soil Pollut, 2009, 196: 29-40
- [8] 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
- [9] 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
- [10] 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
- [11] Park JH, Lamb D, Paneerselvam P, Choppala G, Bolan N, Chung JW. Role of organic amendments on enhanced bioremediation of heavy metal(loid) contaminated soils[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 185: 549–574
- [12] 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
- [13] 万雪琴, 张帆, 夏新莉, 尹伟伦. 镉处理对杨树光合作用及叶绿素荧光参数的影响[J]. *林业科学*, 2008, 44(6): 73–78
- [14] 柯庆明, 梁康迳, 朱燕, 肖美秀, 林文雄. 基因型与环境互作对食用稻米重金属积累特性遗传相关性的影响研究[J]. *中国生态农业学报*, 2006, 14(1): 24–27
- [15] Diao WP, Ni WZ, Ma HY, Yang XE. Cadmium pollution in paddy soil as affected by different rice (*Oryza sativa* L.) cultivars[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2005, 75: 731–738
- [16] 徐燕玲, 陈能场, 徐胜光, 周健民, 谢志宜, 李志安. 低镉累积水稻品种的筛选方法研究—品种与类型[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(7): 1 346–1 352
- [17] 宋阿琳, 娄运生, 梁永超. 不同水稻品种对铜镉的吸收与耐性研究[J]. *中国农学通报*, 2006, 22(9): 408–411
- [18] 李鹏, 葛滢, 吴龙华, 沈丽波, 谭维娜, 骆永明. 两种籽粒镉含量不同水稻的镉吸收转运及其生理效应差异初探[J]. *中国水稻科学*, 2011, 25(3): 291–296
- [19] Zaniewicz-Bajkowska A, Rosa R, Franczuk J, Kosterna E. Direct and secondary effect of liming and organic fertilization on cadmium content in soil and in vegetables[J]. *Plant Soil and Environment*, 2007, 53(11): 473–481
- [20] Zeng FR, Ali S, Zhang HT, Ouyang YN, Qiu BY, Wu FB, Zhang GP. The influence of pH and organic matter content in paddy soil on heavy metal availability and their uptake by rice plants[J]. *Environmental Pollution*, 2011, 159: 84–91
- [21] 沈丽波, 吴龙华, 谭维娜, 韩晓日, 骆永明, 欧阳由男, 金千瑜, 蒋玉根. 伴矿景天-水稻轮作及磷修复剂对水稻镉吸收的影响. *应用生态学报*, 2010, 21(11): 2 952–2 958
- [22] Wu FL, Lin DY, Su DC. The effect of planting oilseed rape and compost application on heavy metal forms in soil and Cd and Pb uptake in rice[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2011, 10(2): 267–274

Effects of Different Organic Amendments on Uptake of Heavy Metals in Rice from Contaminated Soil

ZHOU Li-qiang^{1,2,3}, YIN Bin¹, WU Long-hua², LUO Yong-ming^{2,4*}

(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 the growth and heavy metal uptake of different rice cultivars, Shanyou 63(SY63) and Zhongzheyou 1(ZZY1) in a heavy metal mixed contaminated paddy soil. The results showed that ZZY1 was a metal tolerant cultivar, the heavy metal concentration in brown rice, husk and straw were lower than that of in SY63 cultivar. Compared with SY63, the concentrations of Cd, Cu and Zn in ZZY1 brown rice decreased by 57.5% – 83.8%, 37.8% – 69.1% and 0.88% – 31.7%, respectively, and resulted in lower food-chain heavy metal risk. Application of rapeseed cake significantly decreased heavy metal concentration in brown rice of both cultivars. Compared with the control, application of rapeseed cake decreased concentrations of Cd, Cu and Zn in brown rice of SY63 by 73.5%, 52.6%, 32.1%, and Cd in ZZY1 by 30.5% respectively. This indicated that growing ZZY1 and applying proper amount of rapeseed cake to heavy metal contaminated paddy soil could decrease heavy metal concentrations in rice plant and achieve high yield with low food-chain heavy metal risk.

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