

不同品种对水稻铅汞耐性和富集能力的影响^①

吴亮^{1,2,3}, 孙波^{1,3*}

(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 中国科学院大学, 北京 100049; 3 中国科学院红壤生态实验站, 江西鹰潭 335211)

摘要: 选取 2 种类型水稻土(黄泥土和红泥土)和 9 个水稻品种, 通过温室盆栽试验, 研究 Pb(250 mg/kg)、Hg(0.6 mg/kg)污染条件下, 水稻品种对水稻 Pb、Hg 耐性和富集能力的影响。结果表明, Pb 污染处理显著降低了水稻产量, 在红泥土和黄泥土中, 水稻产量的降低幅度分别为 3.6%~29.8% 和 2.3%~16.9%; Hg 污染处理下, 水稻产量略有下降, 但差异不显著。不同品种水稻对 Pb、Hg 污染的耐性和富集能力差异显著。在 Pb 污染处理下, 宁粳 1 号产量降幅较小, 耐性较高; 天协 6 号产量降幅较大, 耐性较低; 在 Hg 污染处理下, 宁粳 1 号耐性较高, 浙 1500 耐性较低。在 2 种类型水稻土中, 特三矮 2 号稻米 Pb 的富集系数较高, 对 Pb 污染较敏感; 浙 1500 稻米 Hg 的富集系数较高, 对 Hg 污染较敏感; 宁粳 1 号稻米 Pb、Hg 的富集系数均较低, 对 Pb、Hg 污染均不敏感。水稻品种、土壤类型和污染类型对水稻 Pb、Hg 耐性的影响不同, 3 个因子的相对贡献率分别为 36.5%、18.3% 和 27.1%。

关键词: 水稻品种; Pb; Hg; 耐性; 富集系数

中图分类号: X503.231

土壤重金属污染是全球面临的环境问题之一。Pb、Hg 毒性较大, 在土壤中的长期积累不仅破坏土壤生态环境, 阻碍动植物生长, 而且可以通过食物链危及人体健康^[1]。近年来, 随着工业“三废”排放和矿藏开采, 以及各种化学品(化肥、农药、杀虫剂)和废弃物的大量施用, 造成我国农田土壤 Pb、Hg 污染日益增加, 影响了土壤生产力和农产品质量^[2-3]。

水稻是全球主要的粮食作物之一, 近 20 年来我国稻米重金属含量超标问题日益突出, 每年因重金属污染的粮食高达 1 200 万 t^[4]。近期农业部主持的全国范围内稻米卫生品质调查结果表明, 在《无公害食品—大米行业标准》列出的 4 种重金属元素(Cd、As、Hg、Pb)中, Pb 的超标现象最为严重^[5]。此外, 我国在世界上用 Hg 量最大、大气 Hg 污染最为严重^[6]。近期在水稻主产区广东、浙江等地 Pb、Hg 污染事件屡现, 外源重金属污染物进入土壤在长期累积过程中, 可形成轻度到重度污染^[7]。在重金属污染土壤中种植水稻, 一方面影响了水稻产量, 另一方面稻米富集后通过食物链进入人体引起健康风险^[8]。

影响土壤环境质量标准制定的因素不仅包括土

壤类型(性质), 而且需要考虑指示作物的不同品种^[9]。合理选育高耐性低积累水稻品种是有效降低稻米重金属污染风险的一个有效途径^[10]。已有研究表明, 不同品种水稻对 Pb、Hg 的耐性和富集能力存在显著的基因型差异^[11-17]。我国水稻主产区(东南沿海和长江中下游)存在不同程度重金属污染的水稻土, 生产中需要针对不同的土壤类型, 选育低重金属积累的高产水稻品种, 因此需要研究水稻品种和土壤类型对水稻重金属吸收和积累的影响, 为筛选提供理论依据。本研究采集了我国长江中下游 2 种典型水稻土, 针对长江流域及东南沿海地区种植面积较广的 9 个水稻品种(籼型杂交水稻、常规粳稻、常规籼稻各 3 个), 通过盆栽试验研究 Pb、Hg 污染条件下, 水稻品种对其 Pb、Hg 耐性和富集能力的影响, 为选育适合轻度污染水稻土种植的水稻品种提供依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

供试水稻品种为长江流域和东南沿海地区常见品种, 包括 3 个籼型杂交水稻品种: 德农 2000、天

基金项目: 农业部公益性行业科研专项(200903015)和江西省科技计划项目(20132BBF60078)资助。

* 通讯作者(bsun@issas.ac.cn)

作者简介: 吴亮(1988—), 男, 浙江舟山人, 硕士研究生, 主要从事土壤重金属生物有效性研究。E-mail: lwu@issas.ac.cn

协 6 号和冈优 118, 3 个常规粳稻品种: 晚粳 9707、宁粳 1 号和南粳 32, 3 个常规籼稻品种: 中育 1 号、特三矮 2 号和浙 1500。

供试土壤: 黄泥土, 采自江苏省常熟市(31°36'N,

120°35'E), 由冲积物母质所发育, 为普通铁聚水耕人为土。红泥土, 采自江西省鹰潭市(28°12'N, 116°57'E), 由第四纪红黏土母质所发育, 为普通铁聚水耕人为土。供试土壤基本理化性质分析结果见表 1。

表 1 供试土壤的基本理化性质
Table 1 Basic physico-chemical properties of the studied soils

土壤类型	pH	有机碳 (g/kg)	CEC (cmol/kg)	黏粒 (g/kg)	总 Pb (mg/kg)	总 Hg (μg/kg)
红泥土	5.07	12.0	9.39	188	20.62	75.14
黄泥土	6.15	26.7	18.0	261	22.20	125.4

1.2 盆栽试验

采用温室盆栽试验的方法, 供试土壤经自然风干、去杂质、磨碎后过 5 mm 筛, 将重金属元素与土壤充分混合, 分别装入高 30 cm、底径 12.5 cm、口径 35 cm 的聚氯乙烯(PVC)盆, 每盆装土 7 kg。土壤老化 3 个月后栽种水稻, 老化期间保持田间持水量的 80%。试验设置对照、重金属污染两个浓度处理水平, 其中, Pb 污染处理浓度设置为我国土壤环境质量标准(GB 15618-1995)中酸性土壤的二级标准值(250 mg/kg), Hg 污染处理浓度设置为土壤环境质量标准中酸性土壤二级标准值的 2 倍(0.6 mg/kg), 每处理重复 3 次, Pb、Hg 分别以 Pb(NO₃)₂ 和 HgCl₂ 形式加入。每盆分别施入 1 g CO(NH₂)₂、0.28 g Ca(H₂PO₄)₂、0.7 g K₂SO₄。

供试水稻种子先用 1% 的双氧水浸泡杀菌 30 min, 经去离子水洗净, 待其发芽后, 播于装有无污染土壤的育秧盘中, 两周后移苗至 PVC 盆中。插秧时每盆 3 穴、每穴 3 株, 水稻生长始终保持淹水(在 PVC 盆中维持 2~3 cm 的水层)。

1.3 样品的采集与分析

成熟期收获水稻样品, 籽粒风干后用精米机(LTJM-12, 中国)脱壳, 精米于 60℃ 烘干后用高速粉碎机(FW-80, 中国)粉碎, 供化学分析用。

土壤 pH 按水土比 2.5:1 用电位法测定; 土壤颗粒组成采用吸管法测定; 阳离子交换量(CEC)用 1 mol/L 乙酸铵(pH 7.0)交换法测定; 土壤有机质采用重铬酸钾容量法-外加热法测定。土壤总 Pb 用氢氟酸-高氯酸-硝酸消煮, 土壤总 Hg 用硝酸和盐酸混合液(体积比 1:3)消煮, 稻米中总 Pb 和总 Hg 用硝酸-双氧水消煮, 分别用土壤成分分析标准物质(GBW 07456)和生物成分分析标准物质——大米(GBW 10010)进行分析质量控制。本试验中土壤 Pb 和 Hg 的加标回收率范围分别为 92%~105% 和 86%~102%; 稻米 Pb 和 Hg 的加标回收率分别为 88.6%~102.8% 和 78.2%~109.2%。上述分析方法均参照《土壤农业

化学分析方法》^[18]。用石墨炉原子吸分光光度计(SpectrAA 220Z, 澳大利亚)测定溶液(待测液)中 Pb 的含量, 用双道原子荧光光度计(AFS-230E, 北京科创海光仪器有限公司)测定溶液(待测液)中 Hg 含量。

1.4 数据分析

相对产量 = $\frac{\text{重金属处理下籽粒重}}{\text{对照处理下籽粒重}} \times 100\%$

富集系数 = $\frac{\text{籽粒中重金属浓度}}{\text{土壤中重金属浓度}} \times 100\%$

水稻籽粒重为风干重, 土壤中重金属浓度为土壤重金属全量(包括背景值和添加量)测定值。利用 SPSS16.0 及 Excel 2003 软件对实验数据进行统计分析。其中, 采用最小显著差异法(LSD)检验差异的显著性。影响因素分析中根据各因素及交互作用的方差除以总方差确定其相对贡献率。

2 结果与分析

2.1 不同品种水稻产量的变化

在不同水稻土类型和 Pb、Hg 污染条件下, 不同品种水稻的产量差异显著。总体上, 籼型杂交稻的平均产量最高, 常规粳稻和常规籼稻稍低(表 2、表 3)。

两种水稻土相比, 种植于黄泥土上的水稻平均产量高于红泥土。在对照处理下, 黄泥土上的水稻平均产量(30.2 g/盆)较红泥土(28.9 g/盆)高 4.5%; 在 Pb 污染处理下, 黄泥土上的水稻平均产量(27.1 g/盆)较红泥土(24.4 g/盆)高 11.1%; 在 Hg 污染处理下, 黄泥土上的水稻平均产量(29.7 g/盆)较红泥土(27.6 g/盆)高 7.6%。

随着土壤 Pb 浓度的增加, 两种土壤上各品种水稻的产量均显著降低。在红泥土上, 水稻产量降低幅度为 3.6%~29.8%, 平均降低 14.2%, 相对产量的大小顺序为: 宁粳 1 号>冈优 118>晚粳 9707>中育 1 号>德农 2000>特三矮 2 号>南粳 32>浙 1500>天协 6 号。其中, 宁粳 1 号产量降幅最小, 对 Pb

的耐性最高；天协 6 号产量降幅最大，说明天协 6 号的生长受土壤中 Pb 浓度阻碍最大，对 Pb 的耐性最低。在黄泥土上，水稻产量降幅为 2.3% ~ 16.9%，平均降低 10.2%，宁粳 1 号对 Pb 的耐性最高；南粳 32 对 Pb 的耐性最低。

随着土壤 Hg 浓度的增加，两种土壤上大部分水稻品种的产量略有下降，红泥土上冈优 118 和宁

粳 1 号两个品种水稻产量反而略有增加，黄泥土上冈优 118、宁粳 1 号和南粳 32 三个品种水稻产量略有增加，但差异不显著。不同品种水稻对 Hg 的耐性不同，在红泥土上，冈优 118 产量略有增加，对 Hg 的耐性最高；浙1500 产量降幅最大，对 Hg 的耐性最低。在黄泥土上，宁粳 1 号对 Hg 的耐性最高；浙 1500 耐性最低。

表 2 不同水稻品种、土壤类型和 Pb 污染对水稻产量的影响(g/盆)
Table 2 Grain weights affected by rice cultivars, soil types and Pb treatments

品种		红泥土			黄泥土		
		对照	Pb 处理	相对产量(%)	对照	Pb 处理	相对产量(%)
籼型杂交稻	德农 2000	33.5 ± 1.0 bA	29.8 ± 0.7 aC	88.9	33.0 ± 1.8 bAB	30.0 ± 1.7 bBC	90.8
	天协 6 号	41.2 ± 1.5 aA	28.9 ± 1.0 aC	70.2	36.6 ± 0.9 aB	30.6 ± 0.3 bC	83.6
	冈优 118	31.4 ± 1.2 cB	29.7 ± 1.2 aB	94.5	37.7 ± 1.4 aA	36.6 ± 0.5 aA	96.9
常规粳稻	晚粳 9707	19.2 ± 1.4 eB	17.9 ± 1.7 dB	93.2	25.8 ± 0.2 cA	24.1 ± 0.7 dA	93.6
	宁粳 1 号	26.5 ± 1.5 dAB	25.5 ± 0.3 bB	96.4	27.1 ± 0.8 cA	26.5 ± 0.8 cA	97.7
	南粳 32	30.0 ± 1.2 cA	22.4 ± 1.7 cC	74.7	31.4 ± 1.7 bA	26.1 ± 0.2 cB	83.1
常规籼稻	中育 1 号	25.6 ± 0.6 dB	22.9 ± 1.1 cC	89.3	27.9 ± 1.5 cA	23.8 ± 0.2d BC	85.3
	特三矮 2 号	26.5 ± 1.0 dA	23.0 ± 0.2 cB	86.7	25.8 ± 1.3 cA	23.5 ± 0.5 dB	90.9
	浙 1500	26.5 ± 1.2 dA	19.7 ± 1.2 dC	74.4	26.1 ± 0.2 cA	22.7 ± 1.2 dB	86.8
平均值		28.9	24.4	85.8	30.2	27.1	89.8

注：表中数据为 3 次重复的平均值 ± 标准误；采用 LSD 法进行差异显著性检验，同列数值后不同小写字母代表同一类型土壤下，不同水稻品种间差异显著($P < 0.05$)；同行数值后不同大写字母代表同一水稻品种下，不同土壤类型间差异显著($P < 0.05$)，下同。

表 3 不同水稻品种、土壤类型和 Hg 污染对水稻产量的影响(g/盆)
Table 3 Grain weights affected by rice cultivars, soil types and Hg treatments

品种		红泥土			黄泥土		
		对照	Hg 处理	相对产量(%)	对照	Hg 处理	相对产量(%)
籼型杂交稻	德农 2000	33.5 ± 1.0 bA	30.0 ± 1.4 bB	89.5	33.0 ± 1.8 b AB	31.8 ± 1.2 cAB	96.3
	天协 6 号	41.2 ± 1.5 aA	38.2 ± 0.7 aB	92.8	36.6 ± 0.9 aB	35.1 ± 0.9 bC	96.0
	冈优 118	31.4 ± 1.2 cB	36.5 ± 1.3 aA	116	37.7 ± 1.4 aA	38.7 ± 1.4 aA	103
常规粳稻	晚粳 9707	19.2 ± 1.4 eB	18.4 ± 0.4 eB	87.5	25.8 ± 0.2 cA	25.4 ± 0.8 efA	98.6
	宁粳 1 号	26.5 ± 1.5 dAB	26.7 ± 0.9 cB	101	27.1 ± 0.8 cA	29.3 ± 0.4 dA	108
	南粳 32	30.0 ± 1.2 cA	29.7 ± 1.1 bA	99.0	31.4 ± 1.7 bA	32.1 ± 0.7 cA	102
常规籼稻	中育 1 号	25.6 ± 0.6 dB	24.1 ± 1.1 dB	94.3	27.9 ± 1.5 cA	26.9 ± 1.1 eA	96.4
	特三矮 2 号	26.5 ± 1.0 dA	24.8 ± 0.5 dAB	93.4	25.8 ± 1.3 cA	24.3 ± 1.1 fB	94.2
	浙 1500	26.5 ± 1.2 dA	19.7 ± 1.2 eC	74.5	26.1 ± 0.2 cA	23.8 ± 1.7 fC	91.0
平均值		28.9	27.6	95.3	30.2	29.7	98.4

2.2 不同品种水稻稻米中 Pb、Hg 含量的变化
在不同类型土壤和 Pb、Hg 处理水平下，不同品种水稻稻米中 Pb、Hg 含量差异显著。从平均含量看，常规籼稻最高，籼型杂交稻次之，常规粳稻最低(表 4、表 5)。两种水稻土相比，在对照处理下，红泥土上稻米平均 Pb 含量(0.109 mg/kg)略高于黄泥土(0.078 mg/kg)，但差异不显著；在 Pb 污染处理下，红泥土上稻米平

均 Pb 含量(0.788 mg/kg)较红泥土(0.379 mg/kg)高 107.9%，差异显著(表 4)。在 Pb 污染处理下，各品种水稻稻米中 Pb 的含量显著增加，且两种土壤上所有水稻品种稻米 Pb 的含量均超过食品安全国家标准限值(0.2 mg/kg)。
两种水稻土相比，在对照处理下，红泥土上稻米平均 Hg 含量(3.9 μg/kg)较黄泥土(2.7 μg/kg)高 43.2%；

表 4 水稻品种、土壤类型和 Pb 污染对稻米 Pb 含量的影响(mg/kg)
Table 4 Pb contents in rices affected by rice cultivar, soil type and Pb pollution

品种		红泥土		黄泥土	
		对照	Pb 处理	对照	Pb 处理
籼型杂交稻	德农 2000	0.124 ± 0.008 bC	0.798 ± 0.072 bcA	0.080 ± 0.008 cC	0.395 ± 0.038 abcB
	天协 6 号	0.115 ± 0.002 cC	0.807 ± 0.068 bcA	0.083 ± 0.006 bcC	0.374 ± 0.008 bcdB
	冈优 118	0.106 ± 0.004 dC	0.776 ± 0.058 cdA	0.075 ± 0.004 cdC	0.354 ± 0.036 bcdB
常规粳稻	晚粳 9707	0.079 ± 0.004 eC	0.625 ± 0.052 eA	0.066 ± 0.006 deC	0.394 ± 0.062 bcdB
	宁粳 1 号	0.075 ± 0.004 eC	0.584 ± 0.046 eA	0.056 ± 0.008 eC	0.322 ± 0.030 dB
	南粳 32	0.080 ± 0.006 eC	0.668 ± 0.028 deA	0.062 ± 0.006 eC	0.343 ± 0.016 cdB
常规粳稻	中育 1 号	0.130 ± 0.004 abC	0.988 ± 0.098 aA	0.106 ± 0.002 aC	0.451 ± 0.020 aB
	特三矮 2 号	0.138 ± 0.002 aC	0.933 ± 0.110 aA	0.090 ± 0.006 bC	0.414 ± 0.048 abB
	浙 1500	0.132 ± 0.006 aC	0.917 ± 0.062 abA	0.090 ± 0.008 bC	0.406 ± 0.032 abcB
平均值		0.109	0.788	0.078	0.379

表 5 水稻品种、土壤类型和 Hg 污染对稻米 Hg 含量的影响(μg/kg)
Table 5 Hg contents in rices affected by rice cultivar, soil type and Hg pollution

品种		红泥土		黄泥土	
		对照	Hg 处理	对照	Hg 处理
籼型杂交稻	德农 2000	4.0 ± 0.2 bcC	23.9 ± 1.2 bA	2.6 ± 0.1 bD	13.7 ± 0.7 bB
	天协 6 号	3.6 ± 0.2 dC	21.9 ± 0.5 bcA	2.6 ± 0.3 bcC	13.9 ± 0.8 bB
	冈优 118	4.1 ± 0.3 bcC	22.0 ± 1.9 bcA	2.4 ± 0.1 bcD	13.4 ± 0.9 bB
常规粳稻	晚粳 9707	3.7 ± 0.1 dC	19.8 ± 2.2 cA	2.3 ± 0.2 cC	11.5 ± 1.1 cB
	宁粳 1 号	3.4 ± 0.2 dC	19.5 ± 1.6 cA	2.2 ± 0.2 bcC	11.3 ± 1.1 cB
	南粳 32	3.6 ± 0.3 cdC	20.8 ± 1.9 cA	2.3 ± 0.1 bcC	13.4 ± 1.3 bB
常规粳稻	中育 1 号	4.1 ± 0.1 bC	26.0 ± 3.4 aA	3.2 ± 0.1 aC	15.5 ± 1.1 aB
	特三矮 2 号	4.1 ± 0.4 bC	22.9 ± 1.4 bA	3.3 ± 0.2 aC	15.6 ± 1.2 aB
	浙 1500	4.6 ± 0.1 aC	26.8 ± 0.4 aA	3.6 ± 0.3 aC	16.3 ± 0.6 aB
平均值		3.9	22.6	2.7	13.9

在 Hg 污染处理下，红泥土上的水稻平均 Hg 含量(22.6 μg/kg)显著高于黄泥土(13.9 μg/kg)(表 5)。在 Hg 污染处理下，各品种水稻稻米中 Hg 的含量显著增加，红泥土上除晚粳 9707 和宁粳 1 号外，其余水稻品种稻米 Hg 的含量均超过食品安全国家标准限值(20 μg/kg)，而黄泥土上均未超标。

2.3 不同品种水稻稻米 Pb、Hg 富集系数的变化
在不同类型土壤和 Pb、Hg 处理水平下，不同品种水稻稻米 Pb、Hg 的富集系数(bioconcentration factor, BCF)存在显著差异(图 1、2)。在对照处理下，红泥土上稻米 Pb 的 BCF 变化范围是 0.003 6 ~ 0.006 7，而在黄泥土上的变化范围是 0.002 6 ~ 0.004 8；在 Pb 处理下，红泥土上稻米 Pb 的 BCF 变化范围是 0.002 4 ~ 0.004 0，而在黄泥土上的变化范围是 0.001 3 ~ 0.001 8(图 1)。不同品种水稻籽粒中 Pb 的 BCF 变化大致趋势为：中育 1 号、特三矮 2 号、浙 1500>德农 2000、冈优 118、天协 6 号>晚粳 9707、宁粳 1 号、南粳 32。综合考虑两种土壤类型上不同水稻

品种 BCF 的显著差异可以发现，特三矮 2 号稻米 Pb 的富集系数较大，对 Pb 较为敏感，而宁粳 1 号稻米 Pb 富集系数较小，对 Pb 较不敏感。此外，土壤类型对稻米 BCF 的影响也达到了显著水平，水稻籽粒对 Pb 的富集能力在红泥土上显著强于黄泥土。

在对照处理下，红泥土上稻米 Hg 的 BCF 变化范围是 0.046 ~ 0.061，而在黄泥土上的变化范围是 0.018 ~ 0.028；在外源 Hg 处理下，红泥土上稻米 Hg 的 BCF 变化范围是 0.030 ~ 0.041，而在黄泥土上的变化范围是 0.016 ~ 0.023(图 2)。其中，浙1500 对 Hg 富集能力较强，对 Hg 较为敏感，而宁粳 1 号对 Hg 富集能力较弱，对 Hg 不敏感。此外，土壤类型对稻米 BCF 的影响也达到了显著水平，水稻籽粒对 Hg 的富集能力在红泥土上显著强于黄泥土。

2.4 水稻 Pb、Hg 耐性的影响因素分析

以水稻产量变化作为其耐性指标，方差分析表明水稻品种、土壤类型及污染类型对水稻 Pb、Hg 耐性的影响程度不同(图 3)。从各因子的单独作用看，

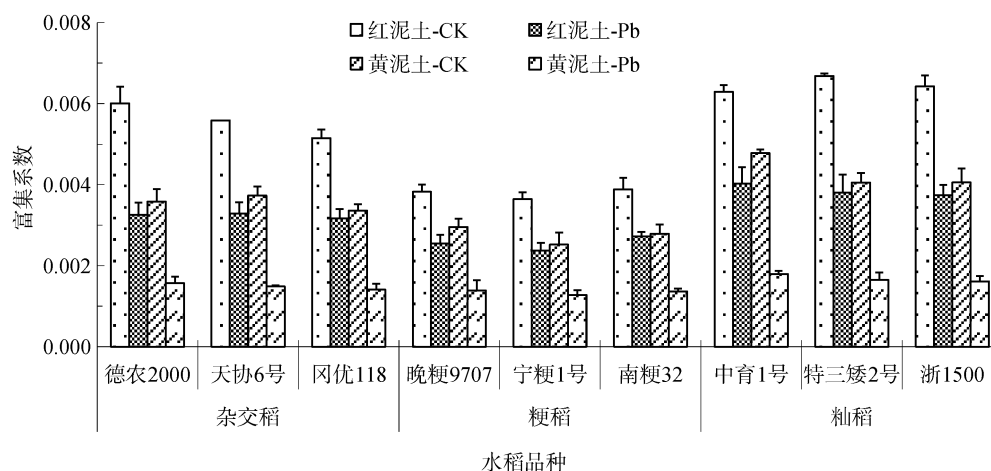


图 1 不同品种水稻 Pb 富集系数的变化

Fig. 1 Changes in bioconcentration factors of Pb for different rice cultivars

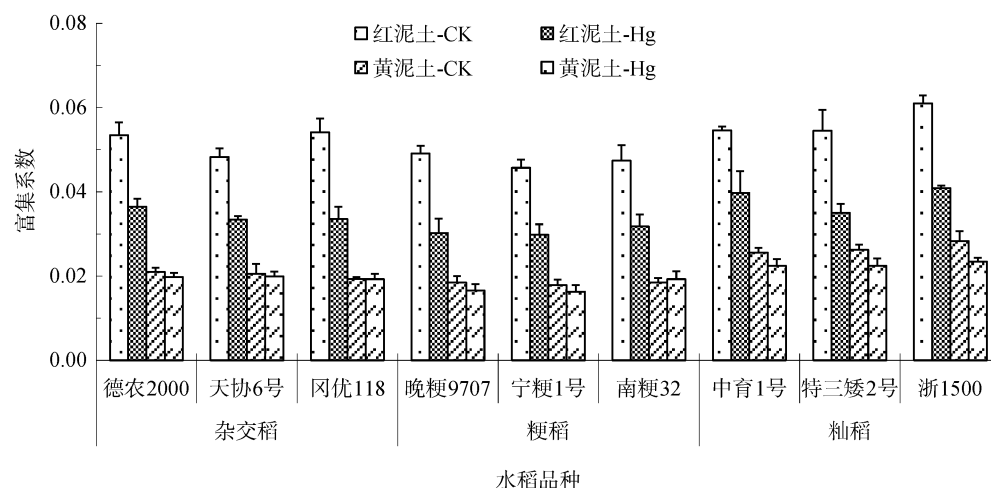


图 2 不同品种水稻 Hg 富集系数的变化

Fig. 2 Changes in bioconcentration factors of Hg for different rice cultivars

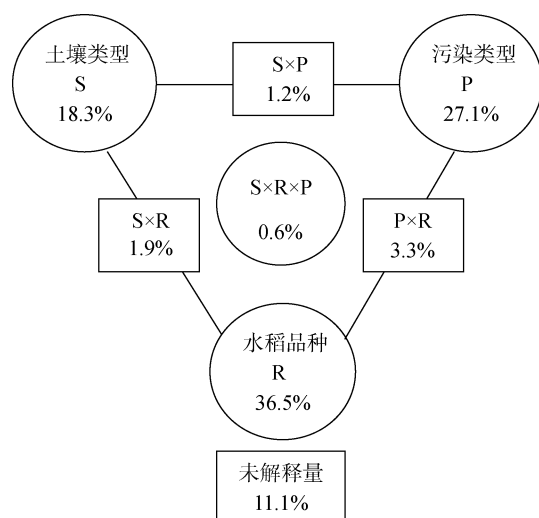
水稻品种对水稻 Pb、Hg 耐性影响的相对贡献率最大(36.5%),其次为不同污染类型(27.1%),不同土壤类型的影响最小(18.3%)。各因子之间的交互作用对水稻 Pb、Hg 耐性的影响均较小。

3 讨论

在 Pb 污染土壤中水稻产量显著减少,这可能是由于 Pb 污染导致水稻株高减小以及有效分蘖数减少的缘故^[19]。宋玉芝^[20]通过盆栽实验发现,当土壤 Pb 浓度为 156.4 ~ 312.8 mg/kg 时,水稻两优培九减产 10% ~ 16%。康立娟等^[21]发现,土壤添加 Pb 180 ~ 720 mg/kg 时,水稻吉农大 2 号减产 2% ~ 17%,且随着 Pb 施加量的增加产量显著降低。Kakuzo^[22]发现,在土壤中投加 250 mg/kg 的 Pb 可导致水稻减产 20%,且抑制效应与所添加的 Pb 浓度水平呈显著正相关^[23]。本研究中,在 Pb 浓度为 250 mg/kg 条件下,水稻平均减产 13%,与上述研究的减产效应

相似。Pb 阻碍水稻生长的主要原因是其减小细胞的有丝分裂速度,抑制根系的生长。与此同时,Pb 能影响叶绿素的合成,降低光合作用,导致水稻减产^[24]。此外,Pb 还会抑制抗氧化保护酶类(SOD、CAT、POD)的活性,降低膜脂过氧化物(MDA)含量^[25]。Pb 能抑制茎中蔗糖酶活性,使植物的营养转化失调,导致水稻的结实率降低^[26]。

水稻对 Hg 耐性较强,低浓度 Hg 对水稻的生长影响不大,甚至有促进作用,高浓度 Hg 则使植物的光合速率下降,分蘖受抑制,根系发育不良,产量下降^[27]。有研究表明,使作物减产 10% 时水稻土相应的 Hg 浓度为 1.25 mg/kg^[28]。瞿爱权等^[29]发现,含 Hg 在 0.5 mg/kg 以下时对水稻生长及产量无明显影响,2.5 mg/kg 开始产生抑制作用,致其减产 20%。高大翔等^[30]研究发现,低浓度 Hg 对水稻分蘖影响不明显,Hg 浓度为 1.0 mg/L 时分蘖减少,穗重显著降低。本研究中,在 Hg 浓度为 0.6 mg/kg 的污



(S: 土壤类型; P: 污染类型; R: 水稻品种; “×”表示变量之间的交互作用)

图 3 水稻品种、土壤类型、污染类型对水稻 Pb、Hg 耐性的相对影响

Fig. 3 Relative contributions of rice cultivar, soil type and pollution type to the tolerance of rice for Pb and Hg pollution

染条件下,水稻平均减产 3%。相关研究表明,Hg胁迫使水稻类囊体膜光系统和光系统受到破坏,抑制光合作用^[31-34]。同时,Hg会影响水稻植株的抗氧化酶系统,造成植物生理生化过程紊乱,导致产量降低^[35]。此外,Hg²⁺可以阻塞水通道,导致水稻生长受阻、产量降低^[36-37]。

土壤类型在一定程度上能够影响水稻吸收积累重金属的能力。土壤中黏粒矿物、水合氧化物和有机质表面的负电荷数量随着 pH 的降低而增加,对 Pb、Hg 离子的吸附能力减弱,有效态 Pb、Hg 含量相应增加。此外,由于土壤有机质-金属络合物的稳定性随 pH 降低而减弱,且土壤溶液中的 H⁺、Fe²⁺、Al³⁺、Mg²⁺ 等与 Pb²⁺、Hg²⁺ 的竞争吸附随 pH 降低而增强,从而减少土壤对 Pb、Hg 的吸附^[38]。有机质中多种酸性功能团能解离出负电荷,对 Pb、Hg 离子具有较强的络合能力,土壤有机质中的腐殖质有很高的阳离子代换吸附能力,可大量吸附 Pb、Hg。有研究表明,在一定的土壤条件和时间限制下,土壤有机质每增加 1%,Hg 的固定率可提高 30%^[39]。此外,土壤 CEC 和质地对重金属有效性也有一定影响。CEC 越高,土壤负电荷量越大,通过静电吸附的 Pb、Hg 离子量也越多,重金属活性越低。一般而言,当重金属进入土壤后,土壤质地越黏重,对重金属持留量越大。在本研究中,红泥土相对于黄泥土具有较低的土壤 pH、有机碳、CEC 和黏粒含量,对 Pb、Hg 的吸附和固定作用较弱,导致红泥土中 Pb、Hg 的生物有效性较高^[40]。

不同品种水稻由于遗传上的差异,对稻田重金属元素的吸收和分配存在很大差异,这种差异不仅存在于种间,也存在于种内(不同变种或品种)^[14]。Al-saleh 和 Shinwari^[15]检测了 27 个品种水稻籽粒中重金属的含量,发现不同品种中 Pb 和 Hg 含量差异较大。Zhu 等^[12]和蒋彬等^[41]分别研究了 38 个和 239 个水稻品种吸收 Hg 和 Pb 的差异,发现水稻籽实吸收重金属存在显著的基因型差异。谭周磁^[42]对 8 个早稻品种和 10 个晚稻品种进行研究,发现潭早粳 1 号和师大 1911 对重金属较为敏感,湘早粳 19 号和晚稻 V46 对重金属较不敏感。刘旭^[16]研究发现,水稻于 Pb 和 Hg 的积累能力存在显著的品种差异,籼型品种的积累高于粳型品种,杂交稻稍高于粳稻。本研究发现,水稻品种对其 Pb、Hg 耐性的影响最大,相对贡献率为 36.5%。水稻对 Pb、Hg 耐性和富集能力的基因型差异主要体现在不同品种水稻根表氧化膜厚度、重金属运输特征以及特殊基因表达的差异上。首先,水稻根表铁膜会改变根际环境中许多元素的形态、生物可利用性及生物毒性,不同的铁膜厚度决定了不同品种水稻对重金属耐性和吸收累积的差异^[43]。其次,土壤中的重金属通过被动和主动吸收进入水稻根系后,与细胞中的蛋白质结合储存起来或随原生质的流动通过胞间连丝进入邻近的细胞^[5],并以配合物或者螯合物的形式,随蒸腾流向地上部移动,最终积累到籽粒等部位。因此,较强的蒸腾和代谢作用有利于水稻对重金属的吸收和运输^[44]。此外,研究表明水稻对重金属的高积累特性可能与其植株内该种金属的转运蛋白基因具有较高的表达能力有关^[45]。

土壤重金属污染具有隐蔽性、长期性和不可逆性等特点。目前,对土壤重金属污染的修复技术主要包括物理、化学及生物措施,但这些方法在有效性、持久性及经济性方面限制了其实际应用效果^[46]。通过品种筛选,将作物可食部位的重金属浓度控制在允许范围内,是轻度污染地区控制重金属污染、避免健康风险的一个有效途径,这一方法已经成功应用于向日葵和硬质小麦的抗性品种筛选上^[47-48]。本研究所选 9 个水稻品种中,宁粳 1 号对于 Pb、Hg 污染的富集能力均较低,并且对 Pb、Hg 污染具有较强的耐性,相对较适宜种植于轻度 Pb、Hg 污染的稻田。

4 结论

在 Pb 污染(250 mg/kg)土壤上,水稻产量显著降低,且不同品种水稻对 Pb 污染的耐性差异显著,宁粳 1 号产量降幅较小,对 Pb 耐性较高;天协 6 号产量降幅较大,耐性较低。在 Hg 污染(0.6 mg/kg)

土壤上,水稻产量略有下降,但差异不显著。不同品种水稻对 Hg 污染的耐性差异显著,宁粳 1 号产量降幅较小,对 Hg 污染的耐性较高;而浙 1500 产量降幅较大,耐性最低。

水稻品种、土壤类型、重金属污染对水稻稻米中 Pb、Hg 的含量均有显著影响。同一类型土壤和相同污染浓度处理下,不同品种水稻稻米中 Pb、Hg 含量差异显著,整体趋势为常规籼稻重金属含量最高,粳型杂交稻次之,常规粳稻最低;红泥土上的水稻稻米中 Pb、Hg 含量显著高于黄泥土;Pb、Hg 污染显著增加稻米中 Pb、Hg 的含量。

不同品种水稻对土壤 Pb、Hg 的富集能力差异显著,在 2 种类型土壤上,特矮 2 号稻米 Pb 的富集系数较高,对 Pb 污染较为敏感;浙 1500 稻米 Hg 的富集系数较高,对 Hg 污染较为敏感;而宁粳 1 号稻米 Pb、Hg 的富集系数均较低,对 Pb、Hg 污染均不敏感,因此,在 9 个品种水稻中相对最适合种植于轻度 Pb、Hg 污染的水稻土上。

水稻品种、土壤类型和污染类型对水稻 Pb、Hg 耐性的影响不同,3 个因子的相对贡献率分别为 36.5%、18.3%和 27.1%,而 3 个因子之间的交互作用较小。

参考文献:

- [1] 郭朝晖,朱永官. 典型矿冶周边地区土壤重金属污染及有效性含量[J]. 生态环境,2004,13(4): 553-555
- [2] 刘平,仇广乐,商立海. 汞污染土壤植物修复技术研究进展[J]. 生态学杂志,2007,26(6): 933-937
- [3] 范中亮,季辉,杨菲,吴琦,张卫建. 不同土壤类型下杂交籼稻地上部器官对重金属镉和铅的富集特征[J]. 中国水稻科学,2010,24(2): 183-188
- [4] 路子显. 粮食重金属污染对粮食安全、人体健康的影响[J]. 粮食科学与经济,2011,36(4): 14-17
- [5] 朱海江,程方民,朱智伟. 土壤—水稻体系中的铅及其污染效应研究[J]. 中国粮油学报,2004,19(5): 4-7
- [6] 于建国. 我国汞污染防治现状和发展趋势[J]. 化学工业,2010,28(2-3): 40-42
- [7] 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
- [8] 肖青青,王宏镔,赵宾,叶志鸿. 云南个旧市郊农作物重金属污染现状及健康风险[J]. 农业环境科学学报,2011,30(2): 271-281
- [9] 周东美,王玉军,陈怀满. 论土壤环境质量重金属标准的独立性和依存性[J]. 农业环境科学学报,2014,33(2): 205-216
- [10] 伍钧,吴传星,孟晓霞,杨刚,沈飞,李艳,张倩. 重金属低积累玉米品种的稳定性和环境适应性分析[J]. 农业环境科学学报,2011,30(11): 2160-2167
- [11] 董建华,梁艳萍,刘素纯,赵文魁. 水稻铅污染研究进展[J]. 亚热带植物科学,2009,38(2): 74-78
- [12] Zhu C, Shen GM, Yan YP, He Junyu. Genotypic variation in grain mercury accumulation of lowland rice[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2008, 171(2): 1-5
- [13] 余有见. 不同基因型水稻耐汞性差异及耐汞基因的遗传分析[D]. 浙江: 浙江师范大学,2009: 17-22
- [14] 吴启堂,陈卢,王广寿. 水稻不同品种对 Cd 吸收累积的差异和机理研究[J]. 生态学报,1999,19(1): 104-107
- [15] Al-Saleh I, Shinwari N. Report on the levels of cadmium, lead and mercury in imported rice grain samples[J]. Biological Trace Element Research, 2001, 83(1): 91-96
- [16] 刘旭. 水稻对重金属镉和铅的吸收和运转及栽培环境的影响研究[D]. 江苏: 扬州大学,2007: 5-10
- [17] 刘建国,李坤权,张祖建,陆小龙,余碧玉,蔡一霞,杨建昌,朱庆森. 水稻不同品种对铅吸收、分配的差异及机理[J]. 应用生态学报,2004,15(2): 291-294
- [18] 中国土壤学会农业化学专业委员会. 土壤农业化学常规分析方法[M]. 北京: 科学出版社,1983
- [19] 许明辉,姚春馨,罗黎明,罗军,李鼎,隆四清,赵丰萍. 水稻铅积累基因型差异及其对铅胁迫的反应[J]. 西南农业学报,2007,20(5): 970-973
- [20] 宋玉芝. 土壤铅污染对水稻生长影响的研究[J]. 南京气象学院学报,2005,28(4): 536-541
- [21] 康立娟,赵成爱,李呐. 铅在砂壤水稻土/水稻体系中污染效应及累积规律的研究[J]. 吉林农业大学学报,2000,22(2): 68-70
- [22] Kakuzo K. Heavy Metal Pollution in Soils of Japan[M]. Tokyo: Japan Scientific Societies Press, 1981
- [23] 顾淑华,朱忠精,顾宗濂,汪祖祥,罗宗艳,金振春. 红壤性水稻土铅临界含量研究[J]. 农业环境保护,1989,8(3): 17-22
- [24] 廖自基. 微量元素的环境化学及生物效应[M]. 北京: 中国环境科学出版社,1992: 72-75
- [25] 蓝群,陈娟,李莉,莫亿伟. 铅、镉浸种对水稻幼苗生长和抗氧化酶的影响[J]. 云南农业大学学报,2005,20(5): 685-689
- [26] 彭鸣,王焕校,吴玉树. 镉、铅在玉米幼苗中的积累和迁移—X 射线显微分析[J]. 环境科学学报,1989,9(1): 1-67
- [27] 赖天斌,彭志耕,詹嘉红. 汞对水稻幼苗根系酯酶同工酶的影响[J]. 环境科学学报,1987,8(5): 36-38
- [28] 夏增禄. 土壤环境容量及其应用[M]. 北京: 气象出版社,1988: 95-97
- [29] 瞿爱权,东惠如,李俊国. 汞对水稻、油菜影响的研究初报[J]. 环境科学学报,1980,(6): 50-53
- [30] 高大翔,郝建朝,李子芳,马勇,刘惠芬. 汞胁迫对水稻生长及幼苗生理生化的影响[J]. 农业环境科学学报,2008,27(1): 58-61
- [31] 杜心,朱永官,刘文菊,赵晓松. 汞、砷复合污染对水稻生长及吸收汞、砷的影响[J]. 生态毒理学报,2006,1(2): 160-164
- [32] 王逸群,郑金贵,陈文列,陈莲云. Hg^{2+} 、 Cd^{2+} 污染对水稻叶肉细胞伤害的超微观察[J]. 福建农林大学学报,2004,33(4): 409-413
- [33] 李波. 土壤—植物系统中汞生物活性的调控及其机理研究[D]. 重庆: 西南农业大学,2001: 25-30
- [34] 杨艳华,陈国祥,刘少华,王娜,吕川根. Hg^{2+} 胁迫下两优培九和武运粳 7 号水稻幼苗抗性差异的研究[J]. 农业

- 生态环境, 2002, 18(3): 34–37
- [35] Bazzaz FA, Rolef GL, Carlson RW. Effect of Cd on photosynthesis and transpiration of excised leaves of corn and sunflower[J]. *Plant Physiology*, 1974, 32: 373–376
- [36] Maurel C. Aquaporins and water permeability of plant membranes[J]. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 1997, 48: 399–429
- [37] Zhang Wenhao, Tyerman SD. Inhibition of water channels by HgCl_2 in intact wheat root cells[J]. *Plant Physiology*, 1999, 120: 849–858
- [38] 刘建国, 李坤权, 张祖建, 陆小龙, 余碧玉, 蔡一霞, 杨建昌, 朱庆森. 水稻不同品种对铅吸收、分配的差异及机理[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(2): 291–294
- [39] 张大元, 熊强. 土壤—植物系统中汞的生物有效性及其调控[J]. *安徽农业科学*, 2009, 37(31): 15 593–15 599
- [40] 普锦成, 符娟林, 章明奎. 土壤性质对水稻土中外源镉与铅生物有效性的影响[J]. *生态环境学报*, 2008, 17(6): 2 253–2 258
- [41] 蒋彬, 张慧萍. 水稻精米中铅镉砷含量基因型差异的研究[J]. *云南师范大学学报*, 2002, 22(3): 37–40
- [42] 谭周磁. 稻米重金属污染的调查研究及其对策思考[J]. *湖南农业科学*, 1999(5): 26–28
- [43] Liu Jiangguo, Cao Changxun, Wong Minghuang, Zhang Zhijun, Chai Yuhong. Variations between rice cultivars in iron and manganese plaque on roots and the relation with plant cadmium uptake[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, 22(7): 1 067–1 072
- [44] 徐劫, 保积庆, 于明革, 施积炎, 陈英旭. 植物对 Pb 的吸收转运机制研究进展[J]. *安徽农业科学*, 2012, 40(36): 17 467–17 470
- [45] Ma Jianfeng, Yamaji N, Tamai K, Mitani N. Genotypic difference in silicon uptake and expression of silicon transporter genes in rice[J]. *Plant Physiology*, 2007, 145: 919–924
- [46] 叶新新, 周艳丽, 孙波. 适于轻度 Cd、As 污染土壤种植的水稻品种筛选[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 1(6): 1 082–1 088
- [47] Penner GA, Clarke J, Bezte LJ, Leisle D. Identification of PAPD markers linked to a gene governing cadmium uptake in durum wheat[J]. *Genome*, 1995, 38: 543–547
- [48] Li Yinming, Channey LR, Schneider AA. Genotypic variation in kernel cadmium concentration in sunflower germplasm under varying soil conditions[J]. *Crop Science*, 1995, 35: 137–141

Effects of Rice Cultivars on Their Tolerance and Accumulation for Pb and Hg Pollution

WU Liang^{1,2,3}, SUN Bo^{1, 3*}

(1 *State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture(Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences)*, Nanjing 210008, China; 2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, China; 3 *Ecological Experiment Station of Red Soil, Chinese Academy of Sciences, Yingtan, Jiangxi* 335211, China)

Abstract: Pot experiments were carried out by using two types of paddy soils (yellow paddy soil and red paddy soil) and nine rice varieties to study the effects of cultivar on their tolerance and accumulation for Pb and Hg pollution. The results indicated that the yields of all rice varieties reduced significantly when spiked with Pb. The reduction of yield ranged from 3.6% to 29.8% in red paddy soils and from 2.3% to 16.9% in yellow paddy soils. For Hg pollution treatment, the yields of 9 varieties reduced slightly with no significant difference. There was a significant difference in the tolerance to Pb and Hg among 9 rice cultivars. For Pb treatment, the reduction of yield for Ningjing 1 was the least, which indicated that it's highest tolerant to Pb, while the reduction of yield for Tianxie 6 was the largest, which showed that it's least tolerant to Pb. For Hg treatment, Ningjing 1 was the highest tolerant to Hg while Zhe 1500 was the least. Different rice cultivars showed a significant difference in accumulation capacity of Pb and Hg. Tesanai 2 had the highest bioconcentration factor(BCF) of Pb, which indicated it's most sensitive to Pb, while Zhe 1500 had the highest BCF of Hg, which indicated it's most sensitive to Hg contamination. Ningjing 1 had the lowest BCF of Pb and Hg, which showed it's least sensitive to both Pb and Hg contamination. Rice cultivar, soil type and pollution type differed in their effects on the tolerance of rice for Pb and Hg pollution, they contributed separately 36.5%, 18.3% and 27.1% of the total variation, respectively.

Key words: Rice cultivar, Pb, Hg, Tolerance, Bioconcentration factor