

不同籼稻品种对土壤汞富集的研究

田甜, 陈炎辉, 陈春乐, 谢团辉, 王果*

(福建农林大学资源与环境学院, 福州 350002)

摘要:在福建省9个地区采集19个籼稻(常规籼稻、二系杂交籼稻、三系杂交籼稻)品种的283个稻米和表层土壤样品,研究了汞在不同籼稻品种糙米中累积的差异性。结果显示:土壤样品总汞含量范围介于 $0.02\sim 1.81\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,其中超过国家土壤二级标准的占37%;供试水稻糙米汞含量的范围为 $0.13\sim 41.78\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,其中3.2%的水稻糙米超过了国家食品污染物限量标准(GB 2762—2012)。大部分供试糙米汞含量与土壤总汞及有效汞含量之间没有显著相关。杂交籼稻与常规籼稻糙米汞含量之间没有显著差异($P>0.05$),三系杂交籼稻糙米汞含量高于两系杂交籼稻,但也没有显著差异($P>0.05$),两系杂交籼稻对土壤汞的富集能力均低于三系杂交籼稻。两系杂交籼稻是籼稻中对汞累积相对较低的品系。

关键词:糙米;富集;籼稻;汞;土壤

中图分类号:S511 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2015)05-0824-07 doi:10.11654/jaes.2015.05.002

Accumulation of Soil Mercury by Different Indica Rice(*Oryza sativa* L.) Cultivars

TIAN Tian, CHEN Yan-hui, CHEN Chun-le, XIE Tuan-hui, WANG Guo*

(College of Resource and Environmental Science, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: Different plants have showed various abilities to accumulate heavy metals from soils. In this study, 283 rice grain samples of 19 indica rice cultivars (including conventional, two-line hybrid and three-line hybrid indica rices) and 283 corresponding surface soils were collected from 9 districts of Fujian Province. Mercury (Hg) concentrations in both rice grains and soils were determined. Total soil Hg concentrations varied from $0.02\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ to $1.81\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, of which 37% samples contained Hg exceeding the secondary level limit of the National Soil Environmental Quality. The Hg concentrations in brown rice grains ranged from $0.13\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ to $41.78\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, of which only 3.2% samples contained Hg greater than the limit of the National Standards for Pollutants in Food (GB 2762—2012). There was no significant correlation between Hg concentrations in brown rice and total or available Hg in soil. No significant difference in Hg concentrations of brown rice between hybrid and conventional indica rice ($P>0.05$) was observed. Brown rice Hg content in three-line hybrid indica cultivars was higher than that in two-line hybrid indica cultivars, but the difference between them was not significant (i.e., $P>0.05$). Two-line hybrid indica rice cultivars showed lower Hg accumulating capability than three-line hybrid indica rice did. The present results indicate that two-line hybrid indica rice is the strain of low Hg accumulation.

Keywords: brown rice; accumulation; indica rice; mercury; soil

2014年4月全国土壤污染状况调查公报报道,全国土壤中污染物总超标率为16.1%,耕地污染点位超标率达到19.4%,重金属是主要污染物。耕地土壤的重金属污染不仅影响农作物生长、粮食产量和质

量,还通过食物链严重威胁人体健康^[1]。

在重金属污染物中,汞作为一种毒性极强的元素备受关注,已被许多国际组织列为优先污染物^[2]。我国由于土壤汞污染而引起的农产品汞污染比较严重,在贵州汞矿区,稻谷中汞浓度高达 $569\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[3],食用大米已成为当地居民汞暴露的主要途径^[4],严重威胁着当地的农田生态安全及居民健康。水稻是我国第一大粮食作物,稻米质量安全问题直接维系消费者的健康。郭翠花等^[5]研究重工业城市农田生态系统中汞污

收稿日期:2014-12-25

基金项目:国家自然科学基金(u1305232)

作者简介:田甜(1988—),女,山东济宁人,硕士研究生,从事环境生态学研究。E-mail:1105669151@qq.com

*通信作者:王果 E-mail:1400619353@qq.com

染时发现,几种农作物籽粒(玉米、高粱、水稻、小麦、谷子)中水稻对汞的吸收富集最强。籼稻是我国南方主要的口粮品种,产量占我国稻谷总产量的一半以上^[6],仲维功等^[7]报道籼稻对汞的富集能力高于粳稻。目前已有不少关于稻米籽粒汞的研究^[4,8-10],但关于不同籼稻品种对汞的吸收富集研究较少。因此,开展不同籼稻品种对汞吸收富集的研究,明确不同籼稻品种糙米对土壤汞吸收富集规律,对于合理安排水稻种植、保障农产品的质量安全具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 材料

供试的 19 个籼稻品种(Ⅱ优 3301、Ⅱ优 673、东联 5 号、丰Ⅱ优 1 号、佳福占、内 2 优 6 号、纳科 1 号、培杂泰丰、泉珍 10 号、深两优 5814、特优 009、特优 175、天优 998、扬两优 6 号、宜香 2292、宜优 115、宜优 673、宜优 99、岳优 9113)采自福建省 9 个地(市)(福州、福清、泉州、莆田、漳州、三明、宁德、南平、龙岩),是福建省普遍栽培的水稻品种。

1.2 样品采集及处理

在水稻成熟期,选择采样单元,在采样单元内选取籽粒成熟饱满的稻穗多点采集约 0.5 kg,同时多点采集水稻植株下的表层土壤(0~15 cm),共采集 283 对样品。稻米样品自然风干后去壳,将糙米磨碎置于自封袋中于-20℃冰箱中冷藏。土样经风干研磨后,过 2 mm 尼龙筛,取其中部分继续研磨后全部过 100 目(<0.149 mm)尼龙筛,置于自封袋中保存在干燥通风处。

1.3 测定方法

土壤基本理化性状用常规方法^[11-12]测定,供试土壤的基本理化性质见表 1。土壤总汞采用 NY/T 1121.10—2006 方法测定^[13],土壤样品每 5 个做 1 次重复,同步做 3 个空白,同时插入土壤标准物质 GSS-2[总汞含量(0.015±0.002) mg·kg⁻¹]以保证试验的准确性及可靠性。标准物质实测值为(0.016±0.002) mg·kg⁻¹(n=24),该标准物质的总汞回收率介于 93%~110%之间,说明采用以上方法测定的总汞数据可靠。土壤有效汞用 0.03% TGA-1/15 mol·L⁻¹ Na₂HPO₄ 浸提^[14]。

糙米汞测定方法如下:称取糙米试样 1 g 左右(精确至 0.000 1 g)置于 50 mL 三角瓶中,加入 10 mL 混合酸(硝酸:高氯酸=4:1),加盖小漏斗浸泡过夜,于通风橱内电热板上低温消解,使试样消化液保持微

沸;观察消化情况,若试样消化液颜色仍较深(棕黑色),取下稍冷,再加 3~5 mL 混合酸,加热至消化液呈无色透明或略带黄色,继续加热至将高氯酸的白烟赶尽,当消化液剩 1 mL 左右取下,冷却;将试样消化液全部洗入 25 mL 容量瓶中,加入 1.25 mL 盐酸,定容,摇匀,放置澄清。糙米样品每 5 个做 1 次重复,同步做 3 个空白,同时插入大米标准物质 GBW10044(GSD-22)[四川大米,总汞含量(0.002 2±0.000 5) mg·kg⁻¹]以保证试验的准确性及可靠性。标准物质实测值为(0.002 5±0.000 4) mg·kg⁻¹(n=21),该标准物质的汞回收率介于 90%~105%之间,说明采用以上方法测定的有效汞数据是可靠的。用原子荧光分光光度计(AF-610B 北分瑞利)测定 Hg 含量。

表 1 采样区土壤的基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of soils in investigated areas

项目	pH	有机质/ g·kg ⁻¹	CEC/ cmol·kg ⁻¹	游离铁/ g·kg ⁻¹	<0.002 mm 含量/%
最小值	4.17	3.79	1.12	1.25	0.16
最大值	7.59	79.96	30.18	54.30	46.39
平均值	5.49	28.28	9.96	12.26	17.72
标准差	0.63	10.65	5.10	6.26	9.09
变异系数	0.11	0.38	0.51	0.51	0.51

1.4 数据处理

试验数据采用 Excel 和 Sigmaplot 12.0 软件进行处理,并采用 SPSS19.0 软件 Turkey 多重比较法分析各水稻品种糙米汞含量的差异性以及两系杂交籼稻、三系杂交籼稻、常规籼稻富集系数之间的差异性。

2 结果与讨论

2.1 土壤汞含量及其影响因素

2.1.1 土壤总汞含量

田间采集的土样总汞含量范围为 0.02~1.81 mg·kg⁻¹,平均值为 0.34 mg·kg⁻¹,是我国土壤汞背景值(0.04 mg·kg⁻¹)的 8.55 倍,福建省土壤汞背景值(0.081 mg·kg⁻¹)的 4.22 倍,远高于西藏(0.026 mg·kg⁻¹)、深圳(0.07 mg·kg⁻¹)而低于广州(0.614 mg·kg⁻¹)等土壤中汞的含量^[15-17]。我国《土壤环境质量标准》中规定土壤汞一级标准为 0.15 mg·kg⁻¹,在 pH<6.5 的酸性土壤中二级标准为 0.3 mg·kg⁻¹。土壤样品总汞量超过二级标准的占 37%,超过一级标准的占 77%,说明部分地区水稻土已经遭受了一定程度的汞污染。采样农田周围

无大型燃煤、有色金属冶炼、水泥厂等对大气汞排放量较高的企业,且福建省原煤汞含量以及有色金属汞含量远低于全国平均含量^[18],故认为大气汞沉降对采样区的影响较小,因此本文不考虑大气沉降对稻米汞含量的影响。

2.1.2 土壤总汞与土壤理化性质的关系

土壤 CEC 的范围在 1.12~30.18 cmol·kg⁻¹ 之间,平均值为 9.96 cmol·kg⁻¹。土壤总汞含量与 CEC 之间呈显著线性相关($P<0.01$),说明阳离子交换量越高,在一定范围内土壤累积汞的能力越强(图 1)。阳离子交换量高的土壤,吸持游离态汞的能力强,从而减少了汞的挥发损失,有利于汞在土壤中的富集。

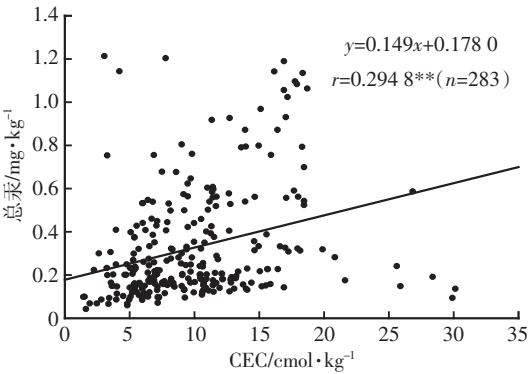


图 1 土壤总汞与土壤 CEC 的关系

Figure 1 Correlation between total soil mercury and soil CEC

从图 2 可见,土壤总汞量与土壤粘粒含量之间呈显著正相关($P<0.01$),说明土壤中汞的累积随着粘粒含量的增加而增加,粘质土壤有利于土壤中汞的富集,细小土粒对汞的吸附固定能力较强,有利于土壤中汞的富集。其他研究也发现,土壤汞含量与粘粒呈极显著相关关系^[19]。

其他土壤理化性质(pH、有机质、游离铁)与土壤总汞含量的相关性不明显,说明土壤粘粒含量和 CEC 是影响汞在土壤中富集的主要因素。

2.1.3 土壤汞的有效性及其影响因素

植物主要吸收土壤中元素态汞、溶解态无机汞和小分子有机质结合的汞,对其他形态的汞不吸收^[20-21]。因此,研究土壤有效态汞对评价土壤汞的生物有效性及其环境风险有重要意义。供试土壤有效汞的含量范围为 0.001~0.05 mg·kg⁻¹,平均值为 0.015 mg·kg⁻¹。土壤汞有效度是土壤有效汞与土壤总汞的百分比,供试土壤汞有效度介于 0.3%~23.2%之间,平均值为 6.4%。

由表 2 可知,供试土壤有效汞与土壤总汞呈显著正相关,表明随着土壤总汞含量的增高,土壤有效汞

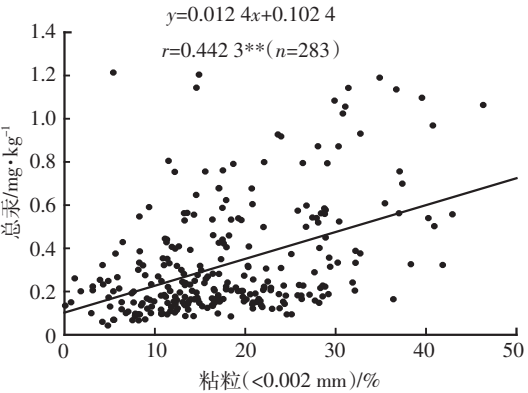


图 2 土壤总汞与土壤粘粒(<0.002 mm)含量的关系

Figure 2 Correlation between total soil mercury and soil clay (<0.002 mm) content

的含量也增高。土壤汞有效度和土壤总汞含量之间呈极显著负相关,说明随土壤总汞含量的增加,有效态汞占总汞的比例降低。除粘粒(<0.002 mm)含量外,其余土壤性质均与有效汞含量无显著相关性。土壤有机质含量与有效度呈显著负相关,这是由于有机质中的腐殖质含有大量的功能基团,能与汞络合或螯合形成稳定的腐殖质汞盐^[22],从而降低了土壤汞的有效度。CEC 与土壤汞的有效度呈显著负相关,说明土壤汞有效度随 CEC 的升高而降低。粘粒(<0.002 mm)与土壤汞有效度呈显著负相关,说明质地越粘重,对汞的吸附固定能力越强,从而降低了汞的有效度。pH、游离铁与土壤汞有效度无明显相关关系。

表 2 土壤有效汞、有效度与土壤总汞及理化性质的相关性

Table 2 Correlation of soil available mercury and mercury availability factor with soil total mercury, soil physical and chemical properties

项目	有效汞	有效度
土壤总汞/mg·kg ⁻¹	0.183**	-0.558**
pH	0.001	-0.081
有机质/g·kg ⁻¹	-0.032	-0.170**
CEC/cmole·kg ⁻¹	0.082	-0.190**
粘粒<0.002mm 含量/%	0.125*	-0.247**
游离铁/g·kg ⁻¹	0.054	-0.110

2.2 不同品种糙米汞含量及其影响因素

2.2.1 糙米汞含量状况

由表 3 可知,糙米汞含量范围为 0.13~41.78 μg·kg⁻¹,平均含量为 7.85 μg·kg⁻¹,高于江西(3.70 μg·kg⁻¹)、湖南(2.10 μg·kg⁻¹)、广东(2.40 μg·kg⁻¹)、四川(3.10 μg·kg⁻¹)的糙米平均汞含量,而低于湖北(12.30 μg·

kg^{-1})和广西($11.30 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)糙米平均汞含量^[23]。各品种糙米汞平均含量依次为培杂泰丰<深两优 5814<岳优 9113<佳辐占<Ⅱ优 673<宜香 2292<扬两优 6 号<东联 5 号<宜优 115<宜优 99<内 2 优 6 号<宜优 673<Ⅱ优 3301<丰Ⅱ优 1 号<特优 627<天优 998<泉珍 10 号<纳科 1 号<特优 009,糙米汞含量最高的特优 009 比汞含量最低的培杂泰丰高 5.5 倍。我国食品污染物限量标准中糙米汞的限量标准为 $0.02 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (GB 2762—2012),糙米样品超标率仅 3.2%,说明采样区糙米的汞含量总体上是安全的。糙米汞超标率仅为土壤汞超标率(超过二级标准)约 1/10,说明土壤汞向稻米的转移比较困难。周俊等^[24]在研究中也发现,水稻根对汞具有极强的束缚力和耐受力,根部积累大量的汞但只有极少部分运输到地上部。

比较杂交籼稻和常规籼稻之间糙米汞平均含量发现,杂交籼稻($7.86 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)与常规籼稻($7.84 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)之间没有显著差异($P>0.05$)。比较两系杂交籼稻和三系杂交籼稻的汞平均含量发现,虽然三系杂交籼稻汞含量($8.60 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)高于两系杂交籼稻($5.63 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$),但未表现出显著性差异($P>0.05$)。其中特优 009 显著高于扬两优 6 号、深两优 5814、培杂泰丰、岳优 9113、Ⅱ优 673、宜香 2292、佳辐占($P<0.05$)。有研究表明,不同品种水稻籽粒对重金属累积差异的原因是

重金属在水稻植株各器官分配具有差异,以及重金属在植物体内向地上部及营养贮存器官迁移的速率不同而造成的^[24-25]。这可能是不同水稻品种糙米汞含量出现差异的原因。

2.2.2 糙米汞含量与土壤汞含量之间的关系

统计结果表明,只有纳科 1 号、宜优 115、佳辐占糙米汞含量与土壤总汞之间存在显著正相关关系(表 4)。大部分糙米样品汞含量随着土壤总汞量的增加而升高,但相关性不显著。大部分糙米样品汞含量与土壤有效汞含量之间没有显著相关性,只有特优 009、东联 5 号与土壤有效汞呈显著正相关(表 4)。其可能原因:一是水稻样品采自不同的地区,环境条件、农艺管理措施以及土壤性质等方面均存在差异;二是部分水稻品种的样本偏少;三是汞从根系向籽粒的转移难度较大。这些因素均可能影响二者的相关性。宋雯等^[23]调查南方 6 省稻米总汞含量时就发现稻米汞含量存在地区间差异。也有研究发现,水稻籽粒汞含量与土壤总汞含量之间无显著相关性^[26]。大田条件下多种环境因子都会影响土壤中汞的生物有效性和作物对汞的吸收^[27]。

2.3 各品种水稻糙米对土壤汞的富集能力

吸收富集系数(BCF)是指植物某一部位的元素含量与土壤中相应元素含量之比,能够反映植物吸收

表 3 各水稻品种糙米汞平均含量(采用 TukeyHSD 多重比较法)

Table 3 Average content of mercury in brown rice of different indica rice varieties

类型	水稻品种	样品数	最小值/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	最大值/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	平均值/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	标准偏差/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	变异系数
两系杂交籼稻	扬两优 6 号	15	3.45	10.43	5.99ab	2.0	0.33
	丰Ⅱ优 1 号	11	1.95	18.28	9.72abc	5.7	0.59
	深两优 5814	7	0.80	9.40	4.14ab	2.7	0.66
	培杂泰丰	6	0.2	3.98	2.65a	1.5	0.56
三系杂交籼稻	纳科 1 号	6	0.43	40.00	12.26bc	14.0	1.14
	特优 627	11	1.93	41.78	10.97bc	11.0	1.00
	Ⅱ优 3301	21	1.68	22.03	8.59abc	4.6	0.53
	内 2 优 6 号	5	3.13	11.30	7.51abc	3.2	0.43
	岳优 9113	19	1.10	10.48	4.95ab	2.8	0.56
	宜优 673	27	0.85	21.83	7.73abc	4.7	0.61
	Ⅱ优 673	8	0.28	20.13	5.46ab	6.3	1.15
	天优 998	12	3.23	27.48	11.15bc	6.5	0.59
	宜优 115	8	1.45	16.55	6.91abc	4.9	0.71
	宜优 99	18	1.80	19.50	7.15abc	4.5	0.63
	宜香 2292	16	2.20	16.20	5.97ab	4.0	0.67
	特优 009	10	11.38	24.30	14.53c	3.8	0.26
	泉珍 10 号	8	5.73	21.08	11.99bc	5.8	0.48
	东联 5 号	15	1.65	12.68	6.54abc	3.6	0.55
	佳辐占	37	0.15	18.28	5.00ab	4.7	0.94

表 4 糙米汞含量与土壤总汞及有效汞的相关性

Table 4 Correlation between brown rice mercury content and soil total and available mercury

品种	总汞	有效汞
扬两优 6 号	-0.097	0.273
丰Ⅱ优 1 号	0.186	0.002
深两优 5814	0.473	0.318
培杂泰丰	0.719	-0.338
纳科 1 号	0.987**	-0.316
特优 627	0.170	0.055
Ⅱ优 3301	-0.249	-0.148
内 2 优 6 号	-0.068	0.194
岳优 9113	0.188	-0.321
宜优 673	0.138	0.071
Ⅱ优 673	0.149	-0.179
天优 998	0.345	-0.149
宜优 115	0.766*	0.155
宜优 99	-0.010	0.030
宜香 2292	0.477	-0.152
特优 009	0.190	0.776**
泉珍 10 号	0.026	0.062
东联 5 号	0.392	0.935**
佳辐占	0.596**	0.302

富集土壤重金属的能力。因此,可以用土壤-糙米汞的吸收富集系数比较不同品种水稻富集汞能力的差异。富集系数通常以土壤重金属总量为分母,这种算法存在的问题是富集系数的差异不仅包含了植物品种之间富集能力的差异,还包含了重金属在土壤中有效性的差异。为了更好地反映不同品种对土壤汞富集能力的差异,本文采用该方法,分别以土壤元素全量和有效量为基础进行探讨(表 5)^[28]。统计结果表明,BCF(全量基)与土壤总汞呈显著指数负相关关系, $r=0.520$ ($P<0.01$),BCF(有效量基)与土壤有效汞呈显著对数负相关关系, $r=0.641$ ($P<0.01$),而 BCF 全量基及有效量基均与土壤理化性质无明显相关关系。Wang 等^[28]研究表明,如果采集的样品所对应的土壤重金属浓度范围是有限的,富集系数会随着相应土壤重金属浓度的变化而变化,因而简单利用富集系数的平均值或中位值来判断植物的吸收富集能力是不合理的,并提出利用富集系数与对应土壤重金属浓度建立回归模型的方法确定代表性的富集系数。本文在土壤总汞含量为 $0.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和土壤有效汞含量为 $0.015\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的点上分别计算了全量基富集系数(BCF0.2)和有效量基富集系数(BCF0.015),用于比较不同品种糙米的富

集能力。各水稻糙米样品对土壤汞的富集系数的计算公式如下:

吸收富集系数(BCF)=糙米汞含量/土壤汞含量

表 5 统计结果显示,各水稻糙米样品对土壤总汞的富集系数存在较大差异,范围在 0.001~0.557 之间。以 BCF(0.2)比较各供试水稻糙米富集系数(全量基)大小依次为:纳科 1 号>泉珍 10 号>特优 627>丰Ⅱ优 1 号>内 2 优 6 号>宜优 673>Ⅱ优 3301>天优 998>宜优 99>东联 5 号>扬两优 6 号>宜香 2292>Ⅱ优 673>岳优 9113>深两优 5814>佳辐占>特优 009>宜优 115>培杂泰丰。不同品种糙米对土壤全汞的富集系数差异明显,其中纳科 1 号富集系数最大,是富集系数最小的培杂泰丰的 22 倍之多。培杂泰丰是供试两系杂交水稻中富集系数最低的水稻品种,宜优 99 和特优 009 是三系杂交水稻中富集系数相对较低的品种,佳辐占是常规水稻中富集系数相对较低的品种。大体上看,两系杂交水稻对土壤总汞的富集系数低于三系杂交水稻,但没有显著差异($P>0.05$)。有盆栽试验发现^[7],杂交水稻稻谷吸收富集土壤汞的能力高于常规水稻,而本研究常规水稻的富集系数并不比杂交水稻低,两者之间未表现出显著差异($P>0.05$)。

土壤重金属生物有效性及其风险主要决定于有效态的含量,因此以重金属有效量计算糙米对土壤汞的吸收富集系数具有重要意义。供试水稻糙米对土壤有效汞的富集系数范围介于 0.01~8.44 之间(表 5),明显高于全量基的富集系数。以 BCF(0.015)比较各供试水稻糙米富集系数(有效量基)大小依次为:纳科 1 号>泉珍 10 号>特优 009>天优 998>宜优 99>宜优 673>内 2 优 6 号>丰Ⅱ优 1 号>宜优 115>Ⅱ优 3301>宜香 2292>东联 5 号>扬两优 6 号>岳优 9113>特优 627>Ⅱ优 673>佳辐占>深两优 5814>培杂泰丰。结果表明,两系杂交水稻中的低富集品种是培杂泰丰,三系杂交水稻以及常规水稻的吸收富集系数均较高。平均而言,两系杂交水稻对土壤有效汞的富集系数低于三系杂交水稻,但未表现出显著差异($P>0.05$)。整体上,无论 BCF 是 0.2 还是 0.015,两系杂交水稻的吸收富集系数都是较小的,即两系杂交水稻对土壤汞的富集能力较弱,其中培杂泰丰是所有水稻样品中对汞富集能力最低的品种,纳科 1 号对汞富集能力最强。

综合以上结果可知,两系杂交水稻中的培杂泰丰品种的糙米汞含量、全量基 BCF 以及有效量基 BCF 均较低,属于汞的低积累水稻品种。

表 5 糙米汞吸收富集系数统计
Figure 5 Statistical results of bioconcentration factor(BCF) of mercury in brown rice

类型	水稻品种	样品数	BCF(全汞)		BCF(有效汞)	
			范围	BCF(0.2)	范围	BCF(0.015)
两系杂交籼稻	扬两优 6 号	15	0.011~0.066	0.028	0.234~0.846	0.378
	丰Ⅱ优 1 号	11	0.003~0.058	0.042	0.101~1.27	0.497
	深两优 5814	7	0.003~0.032	0.020	0.064~0.608	0.216
三系杂交籼稻	培杂泰丰	6	0.001~0.012	0.009	0.013~0.326	0.011
	纳科 1 号	6	0.007~0.208	0.188	0.043~4.62	0.988
	特优 627	11	0.013~0.209	0.043	0.311~4.44	0.353
	Ⅱ优 3301	21	0.006~0.557	0.036	0.105~8.44	0.470
	内 2 优 6 号	5	0.008~0.045	0.038	0.184~0.867	0.515
	岳优 9113	19	0.005~0.065	0.022	0.063~0.709	0.358
	宜优 673	27	0.004~0.111	0.037	0.050~1.33	0.552
	Ⅱ优 673	8	0.002~0.122	0.022	0.036~3.40	0.343
	天优 998	12	0.007~0.053	0.034	0.165~1.38	0.823
	宜优 115	8	0.007~0.050	0.016	0.127~1.66	0.484
	宜优 99	18	0.003~0.125	0.031	0.108~2.85	0.579
	宜香 2292	16	0.007~0.071	0.026	0.100~1.18	0.439
	特优 009	10	0.011~0.023	0.017	0.594~1.08	0.847
常规籼稻	泉珍 10 号	8	0.036~0.144	0.062	0.212~1.94	0.940
	东联 5 号	15	0.001~0.060	0.030	0.204~6.78	0.417
	佳辐占	37	0.001~0.057	0.019	0.010~1.54	0.274

3 结论

(1)供试土壤中总汞超过土壤二级标准(0.3 mg·kg⁻¹)的占 37%。土壤总汞与土壤 CEC 和粘粒含量之间呈显著正相关,高 CEC 和粘粒含量的土壤有利于汞的累积。土壤有效汞与土壤总汞及粘粒含量亦显著正相关,土壤有效度与土壤总汞、有机质、CEC 和粘粒含量则显著负相关。

(2)大部分糙米汞含量与土壤总汞及有效汞含量之间均无显著相关。杂交籼稻与常规籼稻糙米汞含量没有明显差异,三系杂交籼稻糙米汞含量高于两系杂交籼稻,但未表现出显著差异。

(3)籼稻糙米对土壤汞的富集系数存在较大差异,两系杂交籼稻均低于三系杂交籼稻,而常规籼稻并不低于杂交籼稻。

参考文献:

[1] Rahman M A, Hasegawa H, Rahman M M, et al. Arsenic accumulation in rice(*Oryza Sativa* L.); Human exposure through food chain[J]. *Eco-toxicology & Environmental Safety*, 2008, 69(2):317-324.
[2] Jiang G B, Shi J B, Feng X B. Mercury pollution in China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, 40(12):3672-3678.

[3] Horvat M, Nolde N, Fajon V, et al. Total mercury, methylmercury and selenium in mercury polluted areas in the province Guizhou, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2003, 304(1-3):231-256.
[4] Zhang H, Feng X B, Larssen T, et al. In inland China, rice, rather than fish is the major pathway for methylmercury exposure[J]. *Environmental Health Perspectives*, 2010, 118(9):1183-1188.
[5] 郭翠花,张红,杨国栋. 重工业城市农田生态系统中 Hg 污染及防治[J]. 农业环境保护, 2009, 28(4):245-247.
GUO Cui-hua, ZHANG Hong, YANG Guo-dong. Mercury pollution and its control of agriculture eco-system in heavy industry city[J]. *Agro-environmental Protection*, 2009, 28(4):245-247.
[6] 张婷. 2013 年籼稻米市场回顾[J]. 农产品市场周刊, 2014(1):52-55.
ZHANG Ting. Review of indica rice market in 2013[J]. *Farm Produce Market Weekly*, 2014(1):52-55.
[7] 仲维功,杨杰,陈志德,等. 水稻品种及其器官对土壤重金属元素 Pb、Cd、Hg、As 积累的差异[J]. 江苏农业学报, 2006, 22(4):331-338.
ZHONG Wei-gong, YANG Jie, CHEN Zhi-de, et al. Differences in accumulation and distribution of Pb, Cd, Hg and As in rice cultivars and their organs(*Oryza Sativa* L.)[J]. *Jiangsu Journal of Agriculture Sciences*, 2006, 22(4):331-338.
[8] Meng B, Feng X B, Qiu G L, et al. The process of methylmercury accumulation in rice(*Oryza sativa* L.)[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(7), 2711-2717.
[9] Meng B, Feng X B, Qiu G L, et al. Inorganic mercury accumulation in

- rice(*Oryza Sativa* L.)[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2012, 31(9):2093–2098.
- [10] Meng B, Feng X B, Qiu G L, et al. Localization and speciation of mercury in brown rice with implication for Pan-Asian public health[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(14), 7974–7981.
- [11] 全国农业技术推广服务中心. 土壤分析技术规范[M]. 二版. 北京: 中国农业出版社, 2006.
- NATESC (National Agro-Tech Extension and Service Center). Soil analysis and technical specifications[M]. 2nd edition. Beijing: China Agriculture Press, 2006.
- [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.
- LU Ru-kun. Soil agriculture and chemical analysis method[M]. Beijing: China Agriculture and Scientific Technology Press, 2000.
- [13] NY/T 1121. 10—2006. 土壤检测 第10部分: 土壤总汞的测定[S]. NY/T 1121. 10—2006. Soil Testing Part 10: Method for determination of soil total hydrargyrum[S].
- [14] 黄玉芬. 土壤汞对作物的毒害及临界值研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2011: 33–36.
- HUANG Yu-fen. Study on the toxicity effects of mercury on crops and the toxicity threshold value to crops of soil mercury[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2011: 33–36.
- [15] 祝玉杰, 张毅强, 刘明, 等. 西藏土壤汞的分布特征及污染评价[J]. 生态环境学报, 2014, 23(9): 1487–1491.
- ZHU Yu-jie, ZHANG Yi-qiang, LIU Ming, et al. Distribution and pollution assessment of the mercury in soils of Tibet[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(9): 1487–1491.
- [16] 张铭杰, 张璇, 秦佩恒, 等. 深圳市土壤表层汞污染等级结构与空间特征分析[J]. 中国环境科学, 2010, 30(12): 1645–1649.
- ZHANG Ming-jie, ZHANG Xuan, QIN Pei-heng, et al. Spatial distribution of mercury contents in surface soil in Shenzhen City[J]. *China Environmental Science*, 2010, 30(12): 1645–1649.
- [17] 尹伟, 卢瑛, 李军辉, 等. 广州城市土壤汞的分布特征及污染评价[J]. 土壤通报, 2009, 40(5): 1185–1188.
- YIN Wei, LU Ying, LI Ju-hui, et al. Distribution characteristics and pollution assessment of mercury in urban soils of Guangzhou[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2009, 40(5): 1185–1188.
- [18] Wang S X, Zhang L, Wang L, et al. A review of atmospheric mercury emissions, pollution and control in China[J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2014, 8(5): 631–649.
- [19] 余小芬, 陈军, 彭荣珍, 等. 滇中农用地土壤重金属影响因素研究[J]. 西南农业学报, 2012, 25(5): 1765–1769.
- YU Xiao-fen, CHEN Ju, PENG Rong-zhen, et al. Study on influencing factors of farmland soil heavy metals in Central Yunnan Province[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2012, 25(5): 1765–1769.
- [20] 刘俊华, 王文华, 彭安. 土壤中汞生物有效性的研究[J]. 农业环境保护, 2000, 19(4): 216–220.
- LIU Jun-hua, WANG Wen-hua, PENG An. Bioavailability of mercury in soil[J]. *Agro-environmental Protection*, 2000, 19(4): 216–220.
- [21] 姚爱军, 青长乐, 牟树森. 腐植酸对矿物结合汞植物活性的影响[J]. 中国环境科学, 2000, 20(3): 215–219.
- YAO Ai-jun, QING Chang-le, MOU Shu-seng. Effects of humus on the plant activity of mineral bound Hg[J]. *China Environmental Science*, 2000, 20(3): 215–219.
- [22] 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): 15593–15594, 15604.
- ZHANG Da-yuan, XIONG Qiang. Control and bioavailability of mercury in soil-plant system[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2009, 37(31): 15593–15594, 15604.
- [23] 宋雯, 陈志军, 朱智伟, 等. 南方6省稻米总汞含量调查及其膳食暴露评估[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(5): 817–823.
- SONG Wen, CHEN Zhi-jun, ZHU Zhi-wei, et al. Survey and dietary exposure assessment of total mercury in milled rice farmed in 6 provinces of southern China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(5): 817–823.
- [24] 周俊, 刘鸿雁, 吴龙华, 等. 不同Hg浓度下水稻中Hg的分布累积特征[J]. 生态学杂志, 2013, 32(6): 1532–1538.
- ZHOU Jun, LIU Hong-yan, WU Long-hua, et al. Distribution and accumulation characteristics of Hg in rice(*Oryza sativa* L.) under different concentrations of soil Hg[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(6): 1532–1538.
- [25] 唐非, 雷鸣, 唐贞, 等. 不同水稻品种对镉的积累及其动态分布[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(6): 1092–1098.
- TANG Fei, LEI Ming, TANG Zhen, et al. Accumulation characteristic and dynamic distribution of Cd in different genotypes of rice (*Oryza sativa* L.)[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(6): 1092–1098.
- [26] Rothenberg S E, Feng X B, Zhou W J, et al. Environment and genotype controls on mercury accumulation in rice(*Oryza Sativa* L.) cultivated along a contaminated gradient in Guizhou, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 426: 272–280.
- [27] McLaughlin M, Smolders E, Dergyes F, et al. Uptake of metals from soil into vegetables[C]. London: Springer, 2011: 325–367.
- [28] Wang G, Su Y M, Chen Y H, et al. Transfer characteristics of cadmium and lead from soil to the edible parts of six vegetable species in South-eastern China[J]. *Environmental Pollution*, 2006, 144(1): 127–135.