

## 高虹镇稻米中重金属污染状况及健康风险评价

许佳霖<sup>1</sup>, 武 帅<sup>1</sup>, 梁 鹏<sup>1,2</sup>, 张 进<sup>1,2</sup>, 吴胜春<sup>1,2</sup>

(1. 浙江农林大学 环境与资源学院, 浙江 杭州 311300; 2. 浙江农林大学 浙江省土壤污染生物修复重点实验室, 浙江 杭州 311300)

**摘要:** 为调查浙江省高虹镇稻米重金属污染状况及其对人体健康的影响, 从高虹镇采集了 51 个本地稻米样品和 37 个市售外地稻米样品进行分析。采用污染指数法、相关性分析及聚类分析法评价了高虹镇本地和市售稻米中的重金属污染状况和分布特征。依据对当地居民进行的问卷调查结果, 采用危险商法和高危指数法评价了稻米中的重金属对当地居民可能造成的风险。结果表明: 高虹镇稻米铬、砷和铅的污染比较严重, 分别为  $0.03\text{--}13.45\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,  $0.01\text{--}1.64\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  和  $0.04\text{--}7.84\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 超标比率分别为 70.59%, 31.37% 和 27.45%。本地稻米和市售稻米的综合污染指数分别为 3.01 和 1.95, 整体上分别处于重度污染和轻度污染的水平。本地稻米和市售稻米的高危指数值分别为 3.50 和 2.18, 食用高虹镇本地稻米对人体潜在的健康风险更大。图 2 表 6 参 19

**关键词:** 环境化学; 稻米; 重金属; 污染指数; 健康风险评价

中图分类号: S181; X820.4 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2017)06-0983-08

## Heavy metal pollution in rice of Gaohong Town with a health risk assessment

XU Jialin<sup>1</sup>, WU Shuai<sup>1</sup>, LIANG Peng<sup>1,2</sup>, ZHANG Jin<sup>1,2</sup>, WU Shengchun<sup>1,2</sup>

(1. School of Environmental and Resources Science, Zhejiang A & F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China;  
2. Key Laboratory of Soil Contamination Bioremediation of Zhejiang Province, Zhejiang A & F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China)

**Abstract:** To assess the heavy metal contamination in rice and human health risks induced by rice consumption in Gaohong Town, Zhejiang Province, 51 local and 37 commercial rice samples were collected and analyzed for heavy metal concentrations. This was followed by a pollution index calculation, correlation analysis, and cluster analysis. In addition, potential health risk through rice consumption was evaluated using a hazard index ( $I_{\text{HI}}$ ) based on the data and questionnaire surveys. Results showed that rice samples were contaminated by Cr, As, and Pb in Gaohong Town with concentration ranges of  $0.03\text{--}13.45\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  for Cr,  $0.01\text{--}1.64\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  for As, and  $0.04\text{--}7.84\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  for Pb. Of the rice samples that exceeded the National Food Safety Standard, 70.59% were Cr, 31.37% were As, and 27.45% were Pb. The comprehensive pollution index of local rice reached 3.01, which implied a moderate pollution level. By comparison, the pollution index of commercial rice from external sources was 1.95, meaning a mild pollution level. The  $I_{\text{HI}}$  value of local rice samples was 3.50, and for market rice samples it was 2.18. Thus, the overall health risk from heavy metals induced through local rice consumption was higher than commercial rice. [Ch, 2 fig. 6 tab. 19 ref.]

**Key words:** environmental chemistry; rice; heavy metals; pollution index; health risk assessment

收稿日期: 2016-11-23; 修回日期: 2017-02-26

基金项目: 浙江省重点科技创新团队资助项目(2013TD12); 国家国际科技合作专项(2014DFE90040); 国家自然科学基金资助项目(21577130, 21677131)

作者简介: 许佳霖, 从事环境汞污染研究。E-mail: 1452390526@qq.com。通信作者: 梁鹏, 副教授, 博士, 从事汞元素的环境地球化学循环过程、污染场地生态修复等研究。E-mail: liangpeng2727@163.com

农产品的食用安全性问题日益受到社会的广泛关注,尤其是毒性大、蓄积能力强、具有隐蔽性的重金属污染问题。水稻 *Oryza sativa* 是世界上的第一大粮食作物。中国的水稻年产量位居世界第一<sup>[1]</sup>,且稻米重金属已经呈现出一定的污染问题。2002年,农业部稻米及制品质量监督检验测试中心对全国的稻米进行抽检的结果显示,稻米中污染最为严重的是铅,其超标率高达28.4%;其次是镉,超标率为10.3%;而砷和汞的超标率相对比较低,分别为2.8%和3.4%<sup>[2]</sup>。浙江省高虹镇地处杭州市临安区北郊,居民以稻米为主食。全镇拥有规模节能灯企业29家。2010年,高虹镇生产的节能灯数量占世界的25%<sup>[3]</sup>。目前,高虹镇节能灯企业周边的土壤均受到了不同程度的重金属污染<sup>[4]</sup>,然而,关于高虹镇稻米中重金属的污染状况以及通过食用稻米造成的重金属人体暴露情况还鲜有报道。因此,本研究通过分析高虹镇本地种植和市售其他地区稻米中典型重金属(铜、锌、铬、镉、砷、铅、硒和汞)的含量,判断高虹镇当地工业企业生产是否造成了稻米中重金属的积累,并结合问卷调查数据,对成年人食用这些稻米的健康风险进行评价,以期了解高虹镇稻米中的重金属状况以及食用这些稻米对当地居民的健康风险。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集与处理

以在当地居住3个月以上的人群为目标,对他们进行问卷调查。调查内容包括其年龄、性别、体质量以及每日食用的稻米数量等。同时,采集的稻米样品标注是否为本地稻米,共采集食用稻米88个,包括51个本地稻米样品和37个市售外地稻米样品。样品装入自封袋带回实验室,先用自来水清洗3次,再用去离子水清洗3次之后放入烘箱烘干,之后进行研磨,过120目筛,装入自封袋中备用。

### 1.2 样品分析方法

稻米中铜、锌、铬、镉、砷、铅、硒的测定均采用强酸消解预处理:称取稻米样品0.3 g于50.0 mL消解管中,加入5.0 mL硝酸,加小漏斗过夜;次日于140~150 ℃消煮2 h至溶液只有1.0 mL左右;冷却之后,用体积分数为1%的硝酸定容至25.0 mL,过滤于50.0 mL离心管,置于4 ℃冰箱冷藏保存待测;测定前转移至15.0 mL离心管。使用电感耦合等离子体发生光谱仪(Prodigy 7,美国Leeman)测定。各种实验容器使用前均在体积分数为10%的硝酸溶液中浸泡24 h以上,用自来水、去离子水洗干净后放置于烘箱45 ℃,烘干后置于自封袋中储存备用。稻米样品中的汞采用硝酸水浴消解-冷原子荧光光谱法测定(Model III,美国Brooks Rand)。

### 1.3 质量控制与质量保证

每批次的样品中均设定3个空白、3个标准物质样品(GSS-18)和10%的平行样品。标准样品回收率为90.0%~98.0%,样品平行范围为84.1%~110.0%。

### 1.4 评价方法

1.4.1 重金属污染风险评价 评价方法采用单因子污染指数法和内梅罗综合污染指数法<sup>[5]</sup>,对高虹稻米中8种重金属(铜、锌、铬、镉、砷、铅、硒、汞)的污染状况进行评价。单因子污染指数法能够较直接地反映出稻米中的各项重金属的污染状况。其计算公式为:

$$P_i = C_i / S_{i0} \quad (1)$$

式(1)中:  $P_i$  为高虹稻米中重金属  $i$  的单项污染指数;  $C_i$  为高虹稻米中重金属  $i$  的实测值;  $S_{i0}$  为稻米中重金属  $i$  的限量值<sup>[6-7]</sup>。内梅罗综合污染指数法既考虑了所有评价因子单项污染程度的平均水平,又考虑了单项污染物的最大值,更能全面、综合地反映出评价区域内样品的质量状况。其计算公式为:

$$P_{\text{综}} = \sqrt{\frac{P_{i\max}^2 + P_{iave}^2}{2}} \quad (2)$$

式(2)中:  $P_{\text{综}}$  为高虹稻米中重金属的综合污染指数;  $P_{i\max}$  为高虹稻米中重金属的最大污染指数;  $P_{iave}$  为高虹稻米所有重金属单项污染指数的平均值。

1.4.2 稻米摄入的健康风险评价 本研究采用了危险商法<sup>[8]</sup>对高虹居民食用该区域稻米的健康风险进行了评价。该方法考虑了成年人稻米的日摄入量、暴露频率、年限、体质量、生命期望值以及口服参考剂量等等。具体计算公式为:

$$H_{\text{HQ}} = A_{\text{ADD}} / R_{\text{REF}} \quad (3)$$

$$A_{ADD} = (C_i \times I_{IR} \times E_{ED} - E_{EF}) / B_{BW} \times A_{AT} \times 365。 \quad (4)$$

式(3)和式(4)中:  $H_{HQ}$  为健康风险指数;  $A_{ADD}$  为通过食用稻米而摄入的日摄取重金属量 ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ );  $R_{RD}$  为重金属暴露参考剂量 ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ )<sup>[9-11]</sup>。  $H_{HQ} > 1.00$ , 表明该重金属能够对人体的健康造成风险, 并且  $H_{HQ}$  的数值越大, 则该种重金属所能引起的健康风险也就越大;  $H_{HQ} < 1.00$ , 表明该重金属不会对人体的健康造成任何风险<sup>[8]</sup>。各参数名称及取值见表1。重金属对人体健康的影响是多种元素共同作用和影响的结果, 因此, 将高危指数( $I_{HI}$ )运用到全面评价重金属元素对人体的健康风险中。计算公式为:

$$I_{HI} = H_{HQ1} + H_{HQ2} + \dots + H_{HQn}。 \quad (5)$$

式(5)中:  $I_{HI} \leq 1.00$ , 表明没有明显的健康影响, 不会对人体健康造成威胁; 若  $I_{HI} > 1.00$ , 则表明重金属对人体健康造成风险的可能性比较大; 当  $I_{HI} > 10.00$  时, 则表明该地的重金属存在着慢性毒性, 此时的重金属会对人体健康造成严重的威胁。

## 1.5 数据统计

采用 SPSS 18.0 进行统计与分析, 本研究主要进行了独立样本  $t$  检验、相关性分析和聚类分析, 采用 Origin 9.0 进行绘图。

## 2 结果与讨论

### 2.1 稻米中重金属质量分数

高虹镇本地和市售稻米中的重金属质量分数见表2。由表2可以看出: 高虹镇本地稻米中8种重金属质量分数均要高于市售稻米中重金属质量分数, 但对研究的所有元素进行  $t$  检验的结果显示, 只有本地和市售稻米中的硒和汞的质量分数水平差异具有统计学意义( $P < 0.05$ )。稻米中主要元素的来源为土壤。土壤天然原生矿质成分、农业生产以及工业污染状况等因素都会影响稻米中元素的质量分数。根据前期调查结果, 高虹镇的节能灯企业周边的土壤已经受到了汞的污染<sup>[4]</sup>, 因此, 本地稻米和市售其他地区稻米中汞质量分数存在显著性差异。目前, 关于高虹土壤中硒质量分数的报道还较为鲜有, 尽管浙江省北部地区土壤中硒质量分数较高, 但并不能直接说明本研究区域问题。因此, 浙北地区土壤硒质量分

表2 稻米中重金属总量统计结果

Table 2 Statistical results of heavy metal contents in rice samples

来源	统计值	$w_{\text{重金属}} / (\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$							
		铜	锌	铬	镉	砷	铅	硒	汞
(n=51)	最小值	0.19	1.60	0.30	0.01	0.01	0.04	未检出	0.00
	最大值	11.59	52.25	13.45	0.31	1.64	7.84	1.49	0.04
	均值	1.54	7.99	1.93	0.05	0.18	0.68	0.29	0.01
	标准差	2.44	10.53	2.24	0.05	0.30	1.44	0.33	0.01
(n=37)	最小值	0.20	1.63	0.61	0.01	0.01	0.04	未检出	0.00
	最大值	6.59	28.24	5.53	0.15	0.50	2.85	0.82	0.02
	均值	1.19	5.83	1.35	0.04	0.10	0.46	0.14	0.01
	标准差	1.33	6.72	1.16	0.04	0.12	0.76	0.22	0.01
稻米中污染物限量		10.00 a	50.00 a	1.00 a	0.20 a	0.15b	0.20.00 b	0.30 a	0.02 a

说明: a 表示限量标准参照 NY861-2004《粮食(含谷物、豆类、薯类)及制品中铅、铬、镉、汞、硒、砷、铜、锌等8种元素限量》; b 表示限量标准参照 GB2715-2005《粮食卫生标准》。

数较高可能是当地稻米硒质量分数较高的原因之一。此外,富硒微肥施用,特别是叶面喷施可以有效提高水稻中硒的质量分数。因此,农业施用条件或者土壤本底含量都有可能造成本研究中本地稻米硒质量分数显著高于市售稻米,究其原因还需进一步分析。而其他6种元素的质量分数水平在本地稻米和市售稻米中没有统计学差异( $P>0.05$ )。

对于其他元素来说,本地种植稻米和市售其他地区稻米的铬的平均质量分数均高于铬的限量值 $1.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。说明本地稻米和市售稻米的铬均会对高虹镇的居民健康产生一定的危害。土壤中的铬主要以 $\text{Cr}^{3+}$ 和 $\text{Cr}^{6+}$ 形态存在。在一定的氧化还原条件下,2种形态的铬会发生相互转化。植物对 $\text{Cr}^{3+}$ 和 $\text{Cr}^{6+}$ 的吸收利用率较低,没有产生特异的吸收机制,而主要是通过某种营养元素的吸收通道实现铬吸收。并且大部分 $\text{Cr}^{3+}$ 都富集于根部细胞壁组织,很难向地上部分迁移。因此,稻米中铬可能并不是主要来源于土壤。农业施肥过程中,叶面喷施能提高作物利用肥料的效率,闫湘等<sup>[12]</sup>对中国984个液体肥料安全水平进行了测试,液体肥料中铬的质量分数平均为 $(2.30 \pm 4.30) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,约有1%的肥料超标。虽然超标情况不严重,但是也有一定可能性。加之,液体肥料直接喷施在植株表面,进入地上部分可能性更大。因此,我们推测稻米铬较高,可能与使用的肥料有关。本地稻米和市售外地稻米中的铜、锌和镉的质量分数基本都未超过农业行业标准典型值。而本地稻米中有16个样品超出了砷的限量值 $0.15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,有个别样品甚至超出了10.0倍左右。本地稻米和市售稻米的铅平均质量分数分别为 $0.68$ 和 $0.46 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,均超出了粮食卫生标准规定的铅的限量值 $0.20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

与其他地区稻米样品中重金属的质量分数比较发现(表3),本区稻米中的铜和锌的质量分数低于其他地区稻米中的铜和锌的质量分数;稻米中铬的质量分数低于天津市污灌区<sup>[13]</sup>和贵州省矿区<sup>[5]</sup>,高于安徽省合肥市<sup>[14]</sup>、浙江省慈溪市<sup>[15]</sup>和河南省焦作市<sup>[8]</sup>等地区的铬质量分数;镉质量分数比贵州省<sup>[5]</sup>的略低外,其他地区的镉质量分数都差别不大;砷的质量分数比河南省焦作市<sup>[8]</sup>的要高,其他地区基本持平;铅质量分数低于贵州省矿区<sup>[5]</sup>,而与天津市污灌区<sup>[13]</sup>的铅的质量分数基本持平,但是要高于其他地区。硒的质量分数要远高于江苏省昆山市<sup>[16]</sup>。汞的质量分数低于贵州省矿区<sup>[5]</sup>和天津市污灌区<sup>[13]</sup>,与安徽省合肥市<sup>[14]</sup>和浙江省慈溪市<sup>[15]</sup>基本持平。

表3 本研究区域稻米重金属质量分数与其他地区比较

Table 3 Comparison of heavy metals concentrations in grains from different areas

地区	$w_{\text{重金属}}/(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$								资料来源
	铜	锌	铬	镉	砷	铅	硒	汞	
浙江省高虹镇(本地)	1.54	7.99	1.93	0.05	0.18	0.68	0.29	0.01	本研究
安徽省合肥市大兴镇	5.43	16.99	0.11	0.09	0.14	0.06		0.01	文献[14]
浙江省慈溪市	6.80		0.13	0.06	0.10	0.14		0.01	文献[15]
河南省焦作市			0.38	0.04	0.07	0.03			文献[8]
天津市污灌区	4.45	22.73	3.91	0.07	0.17	0.62		0.02	文献[13]
贵州省DX和DW矿区	22.87	28.24	2.58	0.46	0.33	7.36		0.10	文献[17]
江苏省昆山市	4.49			0.10			0.03		文献[16]

## 2.2 稻米重金属污染评价

2.2.1 单因子污染指数评价 高虹镇稻米中铜、锌、铬、镉、砷、铅、硒和汞的单项污染指数( $P_i$ ),结果见表4。高虹镇本地稻米中,铬、砷和铅的污染指数均值均大于1.00,超标比率分别为70.59%,31.37%和27.45%。其他元素的单因子污染指数均值小于1.00。高虹镇本地稻米样品中重金属的超标率的大小依次为铬>硒>砷>铅>汞>镉=铜=锌。高虹镇市售稻米中也是铬和铅的单因子污染指数均值大于1.00,超标率均为35.14%。砷和硒的超标率分别为24.32%和21.62%。其他元素没有样品超标。表明高虹镇市售稻米比本地产稻米安全。

2.2.2 综合污染指数评价 高虹镇本地稻米和市售稻米的平均综合污染指数分别为3.01和1.95,整体上分别处于重度污染和轻度污染的水平。不同等级稻米的分布见图1。高虹镇本地稻米中,只有15.69%的稻米处于安全等级,29.41%的稻米处于警戒线,轻度污染的稻米占33.33%,没有中度污染的样品,但是有21.57%的稻米是处于重度污染的水平。高虹镇市售外地的稻米中,处于安全等级的稻米样品达

表4 稻米重金属单因子污染指数

Table 4 Single factor pollution index in rice

地区	统计值	重金属污染指数						
		铜	锌	铬	镉	砷	铅	硒
本地	最小值	0.02	0.03	0.30	0.07	0.05	0.19	0.11
稻米	最大值	1.16	1.05	13.45	1.55	10.93	39.21	4.98
(n=51)	均值	0.15	0.16	1.93	0.24	1.22	3.40	0.95
	超标样品比率/%	1.96	1.96	70.59	1.96	31.37	27.45	43.14
市售	最小值	0.02	0.03	0.61	0.03	0.05	0.2	0.07
稻米	最大值	0.66	0.56	5.53	0.77	3.33	14.27	2.75
(n=37)	均值	0.12	0.12	1.35	0.18	0.64	2.30	0.47
	超标样品比率/%	0	0	35.14	0	24.32	35.14	21.62
								0

到半数以上, 为 51.35%, 在警戒线内的样品比例为 8.11%, 另有 13.51% 的轻度污染, 中度污染为 10.81%, 16.22% 的稻米处于重度污染的水平。

### 2.3 稻米中重金属元素间的相关性分析

高虹镇本地稻米中铜、锌、铬、镉、砷、铅、硒和汞元素之间的相关系数如表 5 所示。可以看出: 除汞之外, 稻米中其他 7 种重金属之间存在着极显著的正相关性, 说明研究区域稻米中 7 种重金属存在不同程度的复合污染<sup>[8]</sup>。这与吴迪等<sup>[17]</sup>对贵州典型铅锌矿区水稻中的研究结果一致, 稻米存在较大的潜在重金属复合危害。吴迪等<sup>[17]</sup>的研究中, 只有铬、铜、锌和镍的积累存在协同效应, 铅、镉、汞、砷与其他 4 种元素没有明显的相关性, 原因可能在于水稻对重金属的吸收和积累与元素本身的性质、水稻的生理生化功能以及水稻生长的产地有关。李其林等<sup>[18]</sup>的研究表明: 稻谷中的重金属间有正相关也有负相关, 但是正相关明显多于负相关, 说明稻谷中的重金属间的协同作用明显。

表5 高虹镇本地稻米中不同重金属之间的 Pearson 相关系数

Table 5 Pearson correlation coefficients for heavy metals in rice

重金属	铜	锌	铬	镉	砷	铅	硒
铜	1						
锌	0.953**	1					
铬	0.943**	0.937**	1				
镉	0.947**	0.925**	0.965**	1			
砷	0.800**	0.821**	0.893**	0.859**	1		
铅	0.960**	0.939**	0.983**	0.975**	0.858**	1	
硒	0.661**	0.683**	0.776**	0.684**	0.835**	0.689**	1
汞	-0.135	-0.125	-0.159	-0.148	-0.187	0.164	-0.092

说明: \*\* 表示呈极显著相关性( $P<0.01$ ),  $n=51$ 。

### 2.4 稻米中重金属的聚类分析

根据对高虹镇本地稻米中的铜、锌、铬、镉、砷、铅、硒和汞等的质量分数 R 型聚类分析结果(图 2), 可以发现镉、汞、砷、硒和铅等距离较近, 可以聚为一类, 表明它们之间的关联性比较强, 具有同源性。第 2 类是铜和铬, 表明这 2 种元素主要来源可能相同。第 3 类仅有锌 1 个元素, 说明与其他元素相比, 锌具有较为复杂的来源。刘庆等<sup>[19]</sup>的研究结果表明: 锌与其他的元素的空间相关性稍弱, 受人类活动的影响较大。

### 2.5 稻米摄入的健康风险评价

高虹镇稻米的健康风险的评价结果见表 6。由表 6 可知: 高虹镇市售其他地区稻米中的铜、锌、

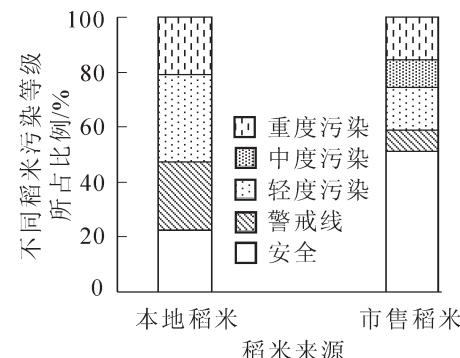


图 1 不同稻米污染等级分布

Figure 1 Distribution of pollution degree in rice

铬、镉、砷、铅、硒和汞等的每日摄入量全部都低于参考暴露剂量,表明食用高虹镇市售稻米不会对高虹本地的居民产生健康风险。铬的健康风险指数( $H_{HQ}$ )值为0.96,表明高虹镇市售稻米中的铬对人体已存在着潜在危害。高虹镇本地稻米样品中,铬和砷的均值均大于1.00,分别为1.38和1.31,表明高虹镇本地生产的稻米存在铬和砷的潜在危害;铜、锌、镉、铅、硒和汞等对人体健康的影响并不显著。

通过比较高虹镇本地和市售稻米样品得出,高虹镇本地稻米样品中的8种重金属元素的 $H_{HQ}$ 值都比市售稻米的 $H_{HQ}$ 值大;本地和市售稻米的高危指数( $I_{HI}$ )值都大于1.00,分别为3.50和2.18,因而都存在一定的潜在重金属复合危害。

从总体上来看,污染指数法和暴露评价法2种对高虹镇稻米的评价结果具有一致性,即高虹镇本地和市售稻米的铬和砷会对人体的健康产生威胁,同时存在着一定程度的重金属复合危害。2种评价结果的差别在于铅的结果以及各元素的污染指数排序和健康风险排序有所差别,主要是由于评价过程中所采用的评价标准要求和参数有所不同<sup>[8]</sup>。

表6 高虹稻米中重金属摄入量及健康风险

Table 6 Intaking amount and health risk assessment of heavy metal by rice consumption for people in Gaohong Town

重金属	$R_{RD}/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1})$	$A_{ADD}/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1})$		$H_{HQ}$		$I_{HI}$	
		本地稻米	市售稻米	本地稻米	市售稻米	本地稻米	市售稻米
铜	0.040 00 <sup>[9]</sup>	$3.30\times 10^{-3}$	$2.55\times 10^{-3}$	0.08	0.06	3.50	2.18
锌	0.300 00 <sup>[9]</sup>	$1.71\times 10^{-2}$	$1.25\times 10^{-2}$	0.06	0.04		
铬	0.003 00 <sup>[10]</sup>	$4.13\times 10^{-3}$	$2.88\times 10^{-3}$	1.38	0.96		
镉	0.001 00 <sup>[9]</sup>	$1.01\times 10^{-4}$	$7.76\times 10^{-5}$	0.10	0.08		
砷	0.000 30 <sup>[9]</sup>	$3.93\times 10^{-4}$	$2.06\times 10^{-4}$	1.31	0.68		
铅	0.004 00 <sup>[10]</sup>	$1.46\times 10^{-3}$	$9.87\times 10^{-4}$	0.36	0.25		
硒	0.005 00 <sup>[11]</sup>	$6.13\times 10^{-4}$	$3.01\times 10^{-4}$	0.12	0.06		
汞	0.000 35 <sup>[10]</sup>	$2.99\times 10^{-5}$	$1.55\times 10^{-5}$	0.09	0.04		

高虹镇本地的稻米存在较高的人体健康风险,尤其以铬、铅和砷的风险最为明显。高虹镇砷的暴露风险较高,原因可能是水稻对砷的吸收富集能力较高,水稻是需水量较大的植物,当处于淹水环境时容易引起砷元素从五价态向植物有效性更高的三价态砷转化,从而容易被水稻根系吸收并在体内积累。有研究表明,改用旱稻种植方式,可以有效降低稻米对砷的吸收和累积,因此,可建议稻米砷质量分数较高的地区采用旱稻种植方式以降低稻米中砷的质量分数。

由此可见:高虹镇的稻米存在一定程度的复合污染,这与2002年农业部稻米及其制品质量监督检验测试中心的抽检结果具有一致性,即全国市场上的稻米存在着一定程度的复合污染<sup>[2]</sup>,但高虹镇的镉的暴露风险较低,这与全国稻米污染状况有差异。原因在于,高虹镇土壤中镉的质量分数相对于浙江省的背景值较低,同时土壤中硒的质量分数相对较高,由于硒对镉具有明显的拮抗作用<sup>[16]</sup>,因此,高虹镇稻米中的镉的风险较低。

### 3 结论

本次对高虹镇的稻米中铜、锌、铬、镉、砷、铅、硒和汞等调查结果显示:本地种植稻米中重金属质量分数均高于市售其他地区稻米中重金属的质量分数。高虹镇稻米中的铬、砷和铅的污染比较严重。

采用单因子污染指数和内梅罗综合污染指数法,对高虹镇稻米中8种重金属污染进行评价,结果显示:本地稻米和市售稻米中重金属的平均综合污染指数为3.01和1.95,整体上分别处于重度污染和轻

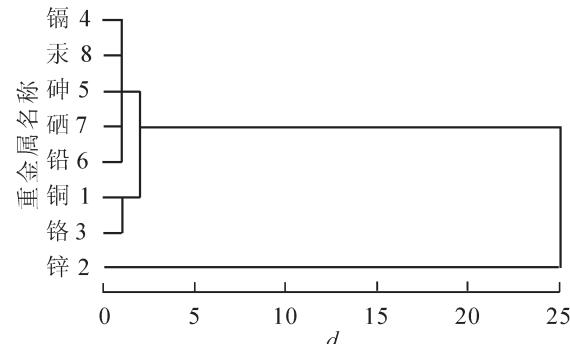


图2 高虹镇本地稻米R型聚类分析结果

Figure 2 R-cluster analysis of heavy metal concentrations for local rice samples in Gaohong Town

度污染的水平。

对高虹镇本地稻米中8种重金属的相关性分析结果表明: 高虹镇本地种植的稻米存在一定程度的重金属复合污染。聚类分析表明, 镉、汞、砷、硒和铅为第1类; 第2类是铜和铬; 第3类是锌。

暴露评价法的结果表明: 高虹本地种植稻米中铬和砷对人体会产生一定的危害。同时, 本地稻米8种重金属的健康风险指数( $H_{HQ}$ )也均大于市售稻米, 因此, 可以通过参混外地稻米一起食用, 以降低当地居民的健康风险。

## 4 参考文献

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 国家数据(2014)[DB/OL]. [2016-09-27]. <http://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?c=C01&zb=A0D0G&sj=2014>.
- [2] 路子显. 粮食重金属污染对粮食安全、人体健康的影响[J]. 粮食科技与经济, 2011, **36**(4): 14 – 17.  
LU Zixian. The influence of heavy metal pollution of grain on food security and human health [J]. *Grain Sci Technol Econ*, 2011, **36**(4): 14 – 17.
- [3] LIANG Peng, FENG Xinbin, ZHANG Chan, et al. Human exposure to mercury in a compact fluorescent lamp manufacturing area: by food (rice and fish) consumption and occupational exposure [J]. *Environ Pollut*, 2015, **198C**: 126 – 132.
- [4] 史坚, 廖欣峰, 祝小祥, 等. 节能灯企业集聚区周边农田土壤重金属污染评价[J]. 上海农业学报, 2014, **30**(2): 90 – 94.  
SHI Jian, LIAO Xinfeng, ZHU Xiaoxiang, et al. Evaluation of soil heavy metal pollution of farmlands surrounding industrial enterprises producing energy-saving bulbs [J]. *Acta Agric Shanghai*, 2014, **30**(2): 90 – 94.
- [5] 吴迪, 杨秀珍, 李存雄, 等. 贵州典型铅锌矿区水稻土壤和水稻中重金属含量及健康风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2013, **32**(10): 1992 – 1998.  
WU Di, YANG Xiuzhen, LI Cunxiong, et al. Concentration and health risk assessment of heavy metal in soil and rice in zinc-lead mining area in Guizhou Province, China [J]. *J Agro Environ Sci*, 2013, **32**(10): 1992 – 1998.
- [6] 中华人民共和国农业部. NY 861-2004 粮食(含谷物、豆类、薯类)及制品中铅、铬、镉、汞、砷、铜、锌等8种元素限量[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
- [7] 中华人民共和国卫生部, 中国国家标准化管理委员会. GB 2715-2005 粮食卫生标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [8] 麻冰涓, 王海邻, 李小超, 等. 豫北典型农田作物中重金属污染状况及健康风险评价[J]. 生态环境学报, 2014, **23**(8): 1351 – 1358.  
MA Bingjuan, WANG Hailin, LI Xiaochao, et al. Pollution of heavy metals in typical crops of northern Henan Province and health risk assessment [J]. *Ecol Environ Sci*, 2014, **23**(8): 1351 – 1358.
- [9] Environment Protection Agency. *Exposure Factors Handbooks* [R]. Washington D C: EPA, 1989: 104 – 126.
- [10] Environment Protection Agency. *Drinking Water Standards and Health Advisories* [R]. Washington D C: EPA, 2000: 822-B-00-00115.
- [11] Environment Protection Agency. *Selenium and Compounds* [R]. Washington D C: EPA, 1991: CASRN 7782-49-22.
- [12] 闫湘, 王旭, 李秀英, 等. 我国水溶肥料中重金属含量、来源及安全现状[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, **22**(1): 8 – 18.  
YAN Xiang, WANG Xu, LI Xiuying, et al. Contents, source and safety status of major heavy metals in water-soluble fertilizers in China [J]. *J Plant Nutr Fert*, 2016, **22**(1): 8 – 18.
- [13] 孙亚芳, 王祖伟, 孟伟庆, 等. 天津污灌区小麦和水稻重金属的含量及健康风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2015, **34**(4): 679 – 685.  
SUN Yafang, WANG Zuwei, MENG Weiqing, et al. Contents and health risk assessment of heavy metal in wheat and rice grown in Tianjin sewage irrigation area, China [J]. *J Agro Environ Sci*, 2015, **34**(4): 679 – 685.
- [14] 王俊涛, 周涛发, 李湘凌, 等. 合肥市大兴镇水稻重金属累积与健康风险分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2008, **30**(11): 2314 – 2320.  
WANG Juntao, ZHOU Taofa, LI Xiangling, et al. Accumulation of heavy metals and related health risks from rice

- grains in Daxing Town, Hefei City [J]. *J Hefei Univ Technol Nat Sci*, 2008, **30**(11): 2314 – 2320.
- [15] 沈群超, 胡寅侠, 蒋开杰, 等. 慈溪地产大米重金属调查及其健康风险评估[J]. 中国稻米, 2013, **19**(3): 79 – 81.
- SHEN Qunchao, HU Yinxia, JIANG Kaijie, et al. Investigation of heavy metals of rice and health risk assessment in Cixi City of Zhejiang Province [J]. *China Rice*, 2013, **19**(3): 79 – 81.
- [16] 李正文, 张艳玲, 潘根兴, 等. 不同水稻品种籽粒 Cd, Cu 和 Se 的含量差异及其人类膳食摄取风险[J]. 环境科学, 2003, **24**(3): 112 – 115.
- LI Zhengwen, ZHANG Yanling, PAN Genxing, et al. Grain contents of Cd, Cu and Se by 57 rice cultivars and risk significance for human dietary uptake [J]. *Environ Sci*, 2003, **24**(3): 112 – 115.
- [17] 吴迪, 邓琴, 周超, 等. 废弃矿污水灌溉区稻米重金属含量及相关性[J]. 贵州农业科学, 2014, **42**(2): 194 – 197.
- WU Di, DENG Qin, ZHOU Chao, et al. Heavy metal contents in rice and correlation in sewage irrigated region of abandoned mines [J]. *Guizhou Agric Sci*, 2014, **42**(2): 194 – 197.
- [18] 李其林, 黄昀, 王萍, 等. 三峡库区主要粮食作物和土壤中重金属的相关性及富积特征分析[J]. 生态环境学报, 2012, **21**(4): 764 – 769.
- LI Qilin, HUANG Yun, WANG Ping, et al. Character of heavy metals of main food stuff crop and soil in three gorges reservoir [J]. *Ecol Environ Sci*, 2012, **21**(4): 764 – 769.
- [19] 刘庆, 王静, 史衍玺, 等. 浙江省慈溪市农田土壤重金属污染初步研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, **26**(2): 639 – 644.
- LIU Qing, WANG Jing, SHI Yanxi, et al. Heavy metal pollution in cropland soil in Cixi City of Zhejiang Province [J]. *J Agro Environ Sci*, 2007, **26**(2): 639 – 644.