

引用格式:

袁余洋, 刘属灵, 刘永林, 王瑛. 重庆江津区自产大米和玉米中重金属的健康风险评价[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2021, 47(6): 677–683.

YUAN Y Y, LIU S L, LIU Y L, WANG Y. The heavy metal content characteristic and human health risk assessment of rice and corn in Jiangjin District, Chongqing[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2021, 47(6): 677–683.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



重庆江津区自产大米和玉米中重金属的健康风险评价

袁余洋¹, 刘属灵^{2,3}, 刘永林^{2,3*}, 王瑛¹

(1.遵义师范学院工学院, 贵州 遵义 563006; 2.重庆师范大学 GIS 应用研究重点实验室, 重庆 401331; 3.重庆师范大学地理与旅游学院, 重庆 401331)

摘 要: 以重庆市江津区为研究区, 采集 2019 年生产的 63 份大米籽粒和 64 份玉米籽粒, 用电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)和原子荧光光谱仪(AFS)测定大米和玉米籽粒中砷(As)、钡(Ba)、镉(Cd)、铜(Cu)、铁(Fe)、锰(Mn)、钼(Mo)、镍(Ni)和锌(Zn)的质量分数, 并利用环境健康风险模型评价江津区大米和玉米中重金属的健康风险。结果表明: 江津区大米和玉米籽粒中 As 最大质量分数分别为 176.0、162.8 $\mu\text{g/kg}$, 低于国家食品卫生 As 标准($<200 \mu\text{g/kg}$); 江津区 3 份大米和 6 份玉米样品中 Cd 质量分数超过国家食品卫生 Cd 标准(大米 Cd 质量分数 $<200 \mu\text{g/kg}$ 、玉米 Cd 质量分数 $<100 \mu\text{g/kg}$); 大米籽粒中 As 和 Mo 质量分数均值显著高于玉米籽粒的($P<0.05$), Cd 质量分数均值略高于玉米籽粒的; 大米籽粒中 As、Cu、Mn 和 Zn 的单因子污染指数均小于 1, 属于清洁水平, 3 份大米籽粒样品中 Cd 属于轻度污染; 大米和玉米籽粒重金属综合污染指数分别为 1.09 和 1.57, 属于轻度污染, 江津区玉米籽粒中重金属污染程度大于大米籽粒; 大米籽粒中重金属 As 和 Cd 的致癌风险分别占健康总风险的 82.7%和 16.8%, 表明江津区大米籽粒中 As 含量虽低于国家食品卫生标准安全值, 但其健康风险较高, 其次为 Cd。可见, 重庆地区需重点监控农作物中 As 和 Cd 的健康风险。

关 键 词: 大米; 玉米; 重金属; 砷; 镉; 健康风险; 重庆江津区

中图分类号: X56; X820.4

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2021)06-0677-07

The heavy metal content characteristic and human health risk assessment of rice and corn in Jiangjin District, Chongqing

YUAN Yuyang¹, LIU Shuling^{2,3}, LIU Yonglin^{2,3*}, WANG Ying¹

(1.College of Engineering and Technology, Zunyi Normal University, Zunyi, Guizhou 563006, China; 2.The Key Laboratory of GIS Application Research, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China; 3.Geography and Tourism College, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China)

Abstract: To evaluate content characteristic and health risk of heavy metal in rice and corn from Jiangjin District, Chongqing City, sixty-three rice samples and sixty-four corn samples were collected from 2019 and analyzed by ICP-MS and AFS. The arsenic(As), barium(Ba), cadmium(Cd), copper(Cu), iron(Fe), manganese(Mn), molybdenum(Mo), nickel(Ni) and zinc(Zn) were took into account. The health risk of heavy metal was evaluated using environmental health risk assessment model. The results showed that the maximum mass fraction of As in rice and corn were 176.0, 162.8 $\mu\text{g/kg}$, respectively, which were lower than that of national food hygiene standards($<200 \mu\text{g/kg}$). The Cd content in three

收稿日期: 2020-08-31

修回日期: 2020-11-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(41502329、41602124); 重庆市教育委员会科学技术计划青年基金项目(KJQN201900519); 贵州省教育厅基金项目(黔教合 KY 字[2020]100); 遵义师范学院博士基金项目(遵师 BS[2018]07 号、遵师 BS[2020]5 号)

作者简介: 袁余洋(1982—), 男, 河南周口人, 博士, 副教授, 主要从事环境地球化学研究, yuanyy1234@126.com; *通信作者, 刘永林, 博士, 副教授, 主要从事环境地球化学研究, liu3986130@163.com

rice samples and six corn samples were exceeded the national food hygiene standard(Cd mass fraction of rice<200 $\mu\text{g/kg}$, Cd mass fraction of corn<100 $\mu\text{g/kg}$). The mean value of mass fractions of As and Mo in rice were significant higher than those of corn, while the mean value of mass fractions of Cd in rice was slightly above that of corn. The single factor pollution indexes of As, Cu, Mn and Zn in rice were less than 1.0 with clean level. The pollution level of Cd in three rice samples were slight. The synthetic index of heavy metal in rice and corn were 1.09 and 1.57, reaching the slight pollution, and heavy metal contamination of corn was higher than that of rice. The carcinogenic risk of As and Cd in rice accounted for 82.7% and 16.8% of total health risk, indicating that the heavy metal of maximum potential risk was As, the second was Cd. The results together indicated that the content and health risk of As and Cd in crops from area of Chongqing should be given strengthened surveillance.

Keywords: rice; corn; heavy metal; arsenic; cadmium; human health risk; Jiangjin District, Chongqing

四川盆地是中国重要的农业区,其粮食种植区主要分布于低山丘陵地带,居民们主要消费的粮食作物是水稻。XIAO 等^[1]研究发现四川盆地西部水稻中 Cd 含量较高;黄文捷^[2]研究发现重庆市本地产大米镉平均含量为 25.0 $\mu\text{g/kg}$;李其林^[3]研究发现重庆市部分水稻样品有 Cu、Cd 等重金属富集现象;付婷婷等^[4]研究发现重庆江津区 4 个乡镇自产水稻有重金属污染现象。重金属是一类在环境中具有持久性的污染物^[5-6],可通过农作物种植系统积累和迁移,通过食物链进入到人体,累积到一定程度就会对人体健康产生威胁。

江津区位于四川盆地东南缘,总体地势为南高北低,境内地貌类型分为河谷阶地(占 3.1%)、丘陵(占 65.1%)和山地(占 31.8%),区域内土壤主要是紫色土。江津区的丘陵面积占优且气候适宜,降水量丰富,使其成为重庆市耕地主要的保护区域,是长江上游及重庆市重要的粮食产区之一^[7-8]。付婷婷等^[4]采用内梅罗综合污染指数法对江津区 4 个乡镇的土壤重金属污染状况进行了评价,结果表明,37.0%的土壤面临重金属污染的风险,而 25.9%的土壤已受到重金属轻度污染。土壤中的重金属可能会通过食物链间接影响江津区居民的身体健康。本研究中,综合运用相关性分析、内梅罗综合污染指数法、环境健康风险评价模型等分析方法,对江津区自产大米和玉米中的重金属(As、Ba、Cd、Cu、Fe、Mn、Mo、Ni 和 Zn)进行污染评价和健康风险评价,以期为评估区域环境质量及科学管理农田种植系统提供依据。

1 材料与方法

1.1 农作物的采集及前处理

在重庆市江津区随机采集 2019 年生产的自产

大米籽粒(后简称大米)63 份和玉米籽粒(后简称玉米)64 份。大米和玉米采集时记录样点的 GPS 等信息。农作物样品采回后,用蒸馏水清洗干净,再于 60 $^{\circ}\text{C}$ 烘箱中烘干,然后研磨粉碎,过内径 0.15 mm 筛,收集至样品瓶,待测。

1.2 测定项目与方法

采用浓硝酸和高氯酸消解大米和玉米样品;采用电感耦合等离子体质谱仪 ICP-MS(PerkinElmer, Elan DRC-e)测定消解液中 Ba、Cd、Cu、Fe、Mn、Mo、Ni、Zn 等 8 种金属含量;用原子荧光光度计(AFS)测定消解液中的 As 含量。其中,消解液中重金属元素的测定由中国科学院地理科学与资源研究所理化中心完成。整个试验过程中,使用空白样、大米(GBW10010)和玉米(GBW10012)标准物质与样品同时消解和分析测试,以控制试验质量。标准物质检测相对误差绝对值小于 7%。

1.3 重金属污染评价方法

本研究中,共涉及 As、Ba、Cd、Cu、Fe、Mn、Mo、Ni 和 Zn 等 9 种元素,但只有 As、Cd、Cu、Mn、Ni 和 Zn 在国家食品安全标准、美国国家环境保护局(USEPA)和 FAO/WHO 食品法典委员会限量值规定^[9-11],因此,本研究中,仅评价 As、Cd、Cu、Mn、Ni 和 Zn 等 6 种元素。采用内梅罗综合污染指数法^[12-13]对江津区的大米和玉米中上述 6 种元素的污染状况进行评价。其中,单项因子污染指数(P_i)<1 为清洁;1 $\leq P_i$ <2 为轻度污染;2 $\leq P_i$ <3 为中度污染; $P_i \geq 3$ 为重度污染^[13]。综合污染指数(P_m) ≤ 0.7 为安全;0.7< $P_m \leq 1.0$ 为警戒限;1.0< $P_m \leq 2.0$ 为轻度污染;2.0< $P_m \leq 3.0$ 为中度污染; $P_m > 3.0$ 为重度污染。

1.4 重金属健康风险评价

重金属的摄入途径主要有经口摄入、呼吸摄入和皮肤摄入等。大米和玉米籽粒中的重金属主要考虑经口直接摄入的暴露途径。参照文献[14],江津区成年人大米和玉米的日均摄入量分别为 293.9、1.93 g。参考 USEPA 推荐的方法^[9,15],计算重金属产生的年人均健康风险指数(HQ_i)、潜在非致癌风险系数(HI)、致癌风险系数(R_i)。本研究中,9 种元素只有 As 和 Cd 是已知确认的致癌物质,因此,致癌风险系数只评价这 2 个元素的。

1.5 数据统计分析

采用 Mann-Whitney 非参数统计法检验差异性;运用 SPSS 18.0 和 Excel 2010 进行数据统计性分析。

2 结果与分析

2.1 供试大米和玉米中的重金属含量

从表 1 可知,江津区的大米和玉米中 As 质量分数分别为 0.6~176.0、0.7~162.8 μg/kg,均值分别为 75.6、44.6 μg/kg,均低于国家食品卫生标准(As 质量分数<200 μg/kg)^[10];Cd 质量分数分别为 4.8~245.6、2.8~257.8 μg/kg,均值分别为 36.7、32.8 μg/kg,有 3 份大米和 6 份玉米样品中 Cd 质量分数超过国家食品卫生标准(大米 Cd 质量分数<200

μg/kg、玉米 Cd 质量分数<100 μg/kg)^[10];Ni 质量分数分别为 63.0~602.2、80.9~879.1 μg/kg,均值分别为 232.8、324.5 μg/kg,有 7 份大米和 16 份玉米样品中 Ni 质量分数超过傅逸根等^[16]建议的食品镍限量(Ni 质量分数<400 μg/kg);Cu 质量分数分别为 0.6~9.4、0.8~16.0 mg/kg,均值分别为 2.1、4.0 mg/kg,均低于美国国家环保局标准(Cu 质量分数<20 mg/kg)^[9];Zn 质量分数分别为 10.4~39.1、16.7~84.2 mg/kg,均值分别为 21.9、28.9 mg/kg,有 2 份玉米样品质量分数超过美国国家环保局标准(Zn 质量分数<50 mg/kg)^[9];Ba 质量分数均值分别为 1.2、1.4 mg/kg;Fe 质量分数均值分别为 40.2、41.6 mg/kg;Mn 质量分数均值分别为 10.6、10.7 mg/kg;Mo 质量分数均值分别为 283.6、219.8 μg/kg。江津区大米中 As、Cd 和 Mo 质量分数均值大于玉米中的,而其他 6 种所测重金属质量分数均值则是玉米中的大于大米中的。可见,江津区大米和玉米中重金属含量除少量超标外,其他都处在一个较低或者适量值水平。从表 1 还可知,江津区大米中 9 种元素 Mo、Ni、Fe、Cd、As、Mn、Zn、Ba、Cu 质量分数的标准偏差依次减小,而玉米中 Ni、Mo、Cd、As、Fe、Mn、Zn、Cu、Ba 质量分数的标准偏差依次减小。可见,大米和玉米中 Mo、Ni、Cd、As 和 Fe 等 5 种元素的空间变异较大,这可能受区域土壤中重金属性质的影响较大。

表 1 江津区大米和玉米中的重金属质量分数统计特征

Table 1 Statistical characteristics of heavy metals contents in rice and corn of Jiangjin District								
重金属	大米重金属质量分数				玉米重金属质量分数			
	最小值	最大值	均值	标准差	最小值	最大值	均值	标准差
As	0.6	176.0	75.6	47.4	0.7	162.8	44.6	45.4
Ba	0.4	15.5	1.2	2.0	0.3	7.8	1.4	1.4
Cd	4.8	245.6	36.7	51.2	2.8	257.8	32.8	52.7
Cu	0.6	9.4	2.1	1.6	0.8	16.0	4.0	3.0
Fe	10.1	359.2	40.2	57.8	13.2	186.3	41.6	31.6
Mn	3.3	43.0	10.6	7.6	2.7	115.4	10.7	14.1
Mo	92.1	827.2	283.6	134.3	24.6	633.5	219.8	144.8
Ni	63.0	602.2	232.8	126.0	80.9	879.1	324.5	170.6
Zn	10.4	39.1	21.9	5.0	16.7	84.2	28.9	10.0

As、Cd、Mo 和 Ni 质量分数的单位为 μg/kg,其余重金属质量分数的单位为 mg/kg。

经 Mann-Whitney 非参数检验,大米和玉米中 As(P=0.000)、Ba(P=0.007)、Cu(P=0.000)、Fe(P=0.003)、Mo(P=0.011)、Ni(P=0.001)和 Zn(P=0.000)等 7 种重

金属质量分数间的差异有统计学意义,而 Cd(P=0.112)和 Mn(P=0.561)质量分数间的差异无统计学意义。

2.2 供试大米和玉米中重金属含量间的相关性

从表 2 可知,大米中 Ba 和 Cd、Cu、Fe、Mn、Zn, Cd 和 Cu、Fe、Ni, Cu 和 Fe、Mn、Zn, Fe 和 Mn, Mn 和 Zn, Ni 和 Zn 存在显著的正相关性; As 和 Cu、Ni、Zn 存在显著的负相关性。从表 3 可

知,玉米中 Ba 和 Cu、Fe、Mn、Zn, Cu 和 Fe、Mn、Zn, Fe 和 Mn、Zn, Mn 和 Zn 存在显著的正相关性; Mo 和 Ni 存在显著的负相关性。这可能与不同植物对元素的选择性吸收及元素间的协同或拮抗作用有关。

表 2 江津区大米中重金属元素含量间的相关系数

Table 2 Correlation coefficient of heavy metals in rice of Jiangjin District								
重金属	相关系数							
	As	Ba	Cd	Cu	Fe	Mn	Mo	Ni
Ba	-0.114							
Cd	-0.137	0.224*						
Cu	-0.233*	0.717**	0.343**					
Fe	-0.201	0.615**	0.398**	0.335**				
Mn	-0.197	0.663**	0.152	0.711**	0.232*			
Mo	-0.073	0.002	-0.133	0.019	-0.089	0.022		
Ni	-0.267*	0.083	0.326**	0.044	-0.011	0.147	-0.059	
Zn	-0.219*	0.235*	0.111	0.505**	0.104	0.480**	0.133	0.272*

“*”“**”“***”分别示差异达显著水平($P<0.05$)和极显著水平($P<0.01$)。

表 3 江津区玉米中重金属元素含量间的相关系数

Table 3 Correlation coefficient of heavy metals in corn of Jiangjin District								
重金属	相关系数							
	As	Ba	Cd	Cu	Fe	Mn	Mo	Ni
Ba	0.185							
Cd	-0.124	0.163						
Cu	-0.015	0.804**	0.208					
Fe	0.156	0.889**	0.130	0.786**				
Mn	0.199	0.720**	-0.017	0.633**	0.707**			
Mo	-0.010	-0.050	0.007	0.100	-0.026	-0.081		
Ni	0.131	0.004	0.104	0.073	0.054	-0.097	-0.312**	
Zn	0.215	0.639**	0.006	0.678**	0.675**	0.749**	0.088	-0.055

“*”“**”“***”分别示差异达显著水平($P<0.05$)和极显著水平($P<0.01$)。

2.3 供试大米和玉米中重金属污染评价结果

从表 4 可知,大米中 As、Cu、Mn 和 Zn 的单因子污染指数都小于 1,说明大米中 As、Cu、Mn 和 Zn 含量都属于清洁水平;分别有 3 份和 7 份大米样品中 Cd 和 Ni 的 P_i 处于 1~2,属轻度污染,说明江津区部分地区大米受到 Cd 和 Ni 污染;分别有 6、1、16、2 份玉米样品中 Cd、Mn、Ni 和 Zn 的 P_i 处于 1~2,属轻度污染,另有 1 份玉米样品中 Ni 属于中度污染,说明江津区部分地区玉米受到 Cd、Mn、Ni 和 Zn 污染;大米和玉米的 P_m 均处于 1~2,属于轻度污染,但玉米的重金属污染程度大于大米的。

表 4 江津区大米和玉米中重金属的单因子和综合污染指数统计特征

Table 4 Statistical characteristics of single factor and comprehensive pollution index of heavy metals in rice and corn in Jiangjin District

重金属	大米 P_i			玉米 P_i		
	最小值	最大值	均值	最小值	最大值	均值
As	0.00	0.88	0.36	0.00	0.81	0.17
Cd	0.02	1.23	0.18	0.00	1.29	0.16
Cu	0.03	0.47	0.10	0.04	0.80	0.20
Mn	0.03	0.43	0.11	0.03	1.15	0.11
Ni	0.00	1.51	0.56	0.00	2.20	0.79
Zn	0.21	0.78	0.44	0.33	1.68	0.58
P_m			1.09			1.57

2.4 江津区大米和玉米的健康风险评估结果

从表 5 可知, 江津区大米中 9 种重金属 Cd、As、Fe、Mn、Zn、Mo、Cu、Ni 和 Ba 的 HQ_i 依次减小; 玉米中 9 种重金属 Cd、As、Fe、Cu、Zn、Mn、Mo、Ni 和 Ba 的 HQ_i 依次减小。

表 5 江津区大米和玉米中重金属的年人均非致癌风险系数统计特征

重金属	大米 HQ_i			玉米 HQ_i		
	最小值	最大值	均值	最小值	最大值	均值
As	1.4E-10	4.1E-08	1.7E-08	1.0E-12	2.5E-10	6.8E-11
Ba	1.2E-10	5.4E-09	4.0E-10	7.2E-13	1.8E-11	3.2E-12
Cd	3.4E-09	1.7E-07	2.5E-08	1.3E-11	1.2E-09	1.5E-10
Cu	1.1E-09	1.6E-08	3.6E-09	9.7E-12	1.8E-10	4.6E-11
Fe	2.3E-09	8.3E-08	9.3E-09	2.0E-11	2.8E-10	6.3E-11
Mn	1.6E-09	2.1E-08	5.2E-09	8.9E-12	3.8E-10	3.5E-11
Mo	1.3E-09	1.1E-08	3.9E-09	2.3E-12	5.8E-11	2.0E-11
Ni	2.2E-10	2.1E-09	8.1E-10	1.8E-12	2.0E-11	7.4E-12
Zn	2.4E-09	9.0E-09	5.1E-09	2.5E-11	1.3E-10	4.4E-11
HI			7.1E-08			4.4E-10

从表 6 可知, 当地居民人均每年经大米摄入的 As 和 Cd 的 R_i 分别为 $6.5E-07 \sim 1.8E-04$ 、 $2.0E-06 \sim 1.0E-04$, 均值分别为 $7.9E-05$ 、 $1.6E-05$; 经玉米摄入的 As 和 Cd 的 R_i 均值分别为 $3.1E-07$ 、 $9.1E-08$; 经大米摄入的 As 和 Cd 分别占总摄入量的 82.8%和 16.8%, 而经玉米摄入的 As 和 Cd 只占总摄入量的 0.4%, 表明江津区大米中 As 是主要的致癌物质, 其次为 Cd。健康总风险为非致癌风险和致癌风险总和。非致癌风险系数数量级为 $10^{-12} \sim 10^{-7}$, 占总风险比为 0.1%, 致癌风险系数数量级为 $10^{-9} \sim 10^{-4}$, 占总风险比为 99.9%。

表 6 江津区大米和玉米中重金属的年人均致癌风险系数统计特征

重金属	大米 R_i			玉米 R_i		
	最小值	最大值	均值	最小值	最大值	均值
As	6.5E-07	1.8E-04	7.9E-05	4.7E-09	1.1E-06	3.1E-07
Cd	2.0E-06	1.0E-04	1.6E-05	7.9E-09	7.2E-07	9.1E-08

3 结论和讨论

本研究中, 江津区大米中 As 质量分数的均值

为 $75.6 \mu\text{g/kg}$, 低于四川大米的($93.0 \mu\text{g/kg}$)^[17]、中国华南大米的($110.0 \mu\text{g/kg}$)^[18]和湖南大米的($200.0 \mu\text{g/kg}$)^[19], 高于中国东北大米的($50.0 \mu\text{g/kg}$)^[18], 接近中国西南地区大米的($70.0 \mu\text{g/kg}$)^[18]; 江津区大米中 Cd 质量分数均值为 $36.7 \mu\text{g/kg}$, 低于贵州罗甸非喀斯特区大米的($80.0 \mu\text{g/kg}$)^[20]、广东大米的($91.0 \mu\text{g/kg}$)^[21]、中国华南大米的($130.0 \mu\text{g/kg}$)^[18]、中国西南大米的($80.0 \mu\text{g/kg}$)^[18]、贵州罗甸喀斯特区大米的($109.0 \mu\text{g/kg}$)^[20]和湖南大米的($280.0 \mu\text{g/kg}$)^[19], 接近中国东北大米的($40.0 \mu\text{g/kg}$)^[18]。江津区玉米中 As 质量分数均值为 $44.6 \mu\text{g/kg}$, 低于陕西潼关玉米的($146.0 \mu\text{g/kg}$)^[22]、内蒙古东来区玉米的($52.0 \mu\text{g/kg}$)^[23], 接近于内蒙古河套地区玉米的($47.5 \mu\text{g/kg}$)^[24], 高于甘肃白银市玉米的($16.0 \mu\text{g/kg}$)^[25]和山西玉米的($16.8 \mu\text{g/kg}$)^[26]; 江津区玉米中 Cd 质量分数均值为 $32.8 \mu\text{g/kg}$, 低于广西南宁玉米的($142.0 \mu\text{g/kg}$)^[27]和陕西潼关玉米的($45.0 \mu\text{g/kg}$)^[22], 高于贵州罗甸非喀斯特区玉米的($10.0 \mu\text{g/kg}$)^[20]、甘肃白银市玉米的($9.0 \mu\text{g/kg}$)^[25]、内蒙古东来区玉米的($29.0 \mu\text{g/kg}$)^[23]和内蒙古河套地区玉米的($12.0 \mu\text{g/kg}$)^[24], 接近贵州罗甸喀斯特区玉米的($33.0 \mu\text{g/kg}$)^[20]。

经 Mann-Whitney 非参数检验可知, 大米中 As 和 Mo 质量分数均值显著高于玉米的($P < 0.05$); Cd 质量分数均值略高于玉米的; 其他 6 种重金属质量分数均值均小于玉米的。可见, 大米和玉米中重金属污染监测和控制重点应有所不同, 这种差异可能与大米和玉米的生长环境和生物学特性差异有关^[3]。

本研究中, 依据健康风险评估模型, 评价了江津区大米和玉米中重金属的年人均非致癌和致癌风险系数。经大米和玉米摄入的重金属可能引起的非致癌风险系数最大值为 $1.7E-07$, 而大米和玉米的总非致癌风险系数分别为 $7.1E-08$ 、 $4.4E-10$, 远小于 USEPA 推荐的风险水平(10^{-6})。可见, 经大米和玉米摄入的重金属非致癌健康风险处于安全范围^[10]。As 和 Cd 是已知确认的致癌物质^[5]。经大米摄入的 As 和 Cd 致癌风险系数范围分别为 $6.5E-07 \sim 1.8E-04$ 、 $2.0E-06 \sim 1.0E-04$, 部分样品的致癌风险系数高于国际辐射防护委员会(ICRP)推荐的最大可接受风险水平 $5E-05$ ^[5,10], 但都低于 USEPA 推荐的风险水平(10^{-4})^[10]; 经玉米摄入的 As 和 Cd 的致癌风险系数最大值为 $1.1E-06$, 远低于 ICRP 推荐的最

大可接受风险水平。健康总风险为非致癌风险和致癌风险的总和。非致癌风险系数数量级为 $10^{-12} \sim 10^{-7}$, 占总风险的 0.1%; 致癌风险系数数量级为 $10^{-9} \sim 10^{-4}$, 占总风险的 99.9%; 因此, 江津区经大米和玉米摄入重金属引起的健康风险主要为致癌风险。计算可知, 大米中致癌金属 As 和 Cd 的致癌风险分别占总风险的 82.8% 和 16.8%, 进一步证明江津区大米中 As 是最大潜在致癌风险, 其次为 Cd。

从本研究的结果可看出, 虽然大米和玉米中 As 的含量不存在超标, 但由于其毒性较大, 健康风险评价表明 As 是主要风险来源。为全面掌握大米和玉米中重金属污染状况, 需引入健康风险评价, 这有助于加强大米和玉米中重金属含量的监控, 为制定和实施相应的污染物控制策略提供依据。

本研究中存在一定的不确定性, 主要有: ①本研究所用的饮食暴露参数为中国营养学会于 2002 年在重庆市的调查结果, 随着人口流动和饮食习惯等的变化, 可能已经不适用于现今的江津区; ②本研究只考虑经大米和玉米摄入, 未考虑食用蔬菜、饮水和皮肤接触等摄入途径, 可能低估了重金属的健康风险。

参考文献:

- [1] XIAO G X, HU Y L, LI N, et al. Spatial autocorrelation analysis of monitoring data of heavy metals in rice in China[J]. Food Control, 2018, 89: 32–37.
- [2] 黄文捷. 重庆市本地产大米中镉污染调查及健康风险评价[D]. 重庆: 重庆医科大学, 2015.
HUANG W J. Analysis of cadmium contamination and health risk assessment in rice locally produced in Chongqing City[D]. Chongqing: Chongqing Medical University, 2015.
- [3] 李其林. 重庆市土壤-作物系统重金属特征研究[D]. 重庆: 西南大学, 2008.
LI Q L. On characteristics of heavy metals of soil-crop system in Chongqing, China[D]. Chongqing: Southwest University, 2008.
- [4] 付婷婷, 张伟, 曾婷婷, 等. 重庆江津区土壤-稻米中硒和重金属的积累及迁移特征[J]. 西南农业学报, 2019, 32(4): 843–847.
FU T T, ZHANG W, ZENG T T, et al. Accumulation and migration characteristics of selenium and heavy metals in soil-rice Southwest China[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2019, 32(4): 843–847.
- [5] 杨泉, 王学华, 敖和军, 等. 不同种植密度高粱对耕地重金属污染的修复效果[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2018, 44(3): 234–239.
- [6] 卜思怡, 王翠红, 周伟军, 等. 长株潭地区 5 种母质发育水稻土锌和铜及镍元素剖面分布特征[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2019, 45(4): 391–397.
BU S Y, WANG C H, ZHOU W J, et al. Profile distribution characteristics of zinc, copper and nickel in paddy soils from five parent materials in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan area[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2019, 45(4): 391–397.
- [7] 幸邦其, 朱先利. 江津地区水稻高产创建主要做法及经验[J]. 现代农业科技, 2016(15): 63–64.
XING B Q, ZHU X L. Main methods and experience of high yield creation of rice in Jiangjin District[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2016(15): 63–64.
- [8] 王金霞, 李谢玲, 何清明, 等. 三峡库区典型农业区土壤重金属污染特征及风险评价[J]. 农业工程学报, 2018, 34(8): 227–234.
WANG J X, LI X L, HE Q M, et al. Characterization and risk assessment of heavy metal pollution in agricultural soils in Three Gorge Reservoir Area[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(8): 227–234.
- [9] USEPA. Exposure Factors Handbook 2011 Edition(Final Report)[M]. Washington DC: U. S. Environmental Protection Agency, 2011.
- [10] GB 2762—2017 食品安全国家标准 食品中污染物限量[S].
GB 2762—2017 National food safety standards pollutant limit in food[S].
- [11] 李如忠, 潘成荣, 徐晶晶, 等. 典型有色金属矿业城市零星菜地蔬菜重金属污染及健康风险评估[J]. 环境科学, 2013, 34(3): 1076–1085.
LI R Z, PAN C R, XU J J, et al. Contamination and health risk for heavy metals via consumption of vegetables grown in fragmentary vegetable plots from a typical nonferrous metals mine city[J]. Environmental Science, 2013, 34(3): 1076–1085.
- [12] 魏军晓, 耿元波, 岑况. 北京市售大米重金属含量监测及膳食风险评估[J]. 现代食品科技, 2018, 34(6): 267–273.
WEI J X, GENG Y B, CEN K. The heavy metal content monitoring and dietary risk assessment of commercial rice in Beijing[J]. Modern Food Science and Technology, 2018, 34(6): 267–273.
- [13] 王玉洁, 朱维琴, 金俊, 等. 杭州市农田蔬菜中 Cu、

- Zn 和 Pb 污染评价及富集特性研究[J]. 杭州师范大学学报(自然科学版), 2010, 9(1): 65–70.
- WANG Y J, ZHU W Q, JIN J, et al. Researches on pollution evaluation and enrichment characteristics of Cu, Zn and Pb in farmland vegetable in Hangzhou[J]. Journal of Hangzhou Normal University(Natural Science Edition), 2010, 9(1): 65–70.
- [14] 段小丽. 中国人群暴露参数手册[M]. 北京: 中国环境出版社, 2013.
- DUAN X L. Exposure Factors Handbook of Chinese Population[M]. Beijing: China Environment Press, 2013.
- [15] USEPA. Risk Assessment Guidance for Superfund Volume I: Human Health Evaluation Manual(Part F, Supplemental Guidance for Inhalation Risk Assessment)[M]. Washington DC: U. S. Environmental Protection Agency, 2009.
- [16] 傅逸根, 胡欣, 俞苏霞. 食品中镍限量卫生标准的研究[J]. 浙江省医学科学院学报, 1999, 10(1): 9–11.
- FU Y G, HU X, YU S X. Study on the tolerance limit of nickel in foods[J]. Acta Academiae Medicinae Zhejiang, 1999, 10(1): 9–11.
- [17] 范琴琴. 大米中砷、硒和汞的形态研究及其风险评估[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2011.
- FAN Q Q. Study on speciation and risk evaluation of arsenic, selenium, mercury in rice[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2011.
- [18] FANG Y, SUN X Y, YANG W J, et al. Concentrations and health risks of lead, cadmium, arsenic, and mercury in rice and edible mushrooms in China[J]. Food Chemistry, 2014, 147: 147–151.
- [19] 雷鸣, 曾敏, 王利红, 等. 湖南市场和污染区稻米中 As、Pb、Cd 污染及其健康风险评价[J]. 环境科学学报, 2010, 30(11): 2314–2320.
- LEI M, ZENG M, WANG L H, et al. Arsenic, lead, and cadmium pollution in rice from Hunan markets and contaminated areas and their health risk assessment[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2010, 30(11): 2314–2320.
- [20] 唐启琳. 贵州省罗甸北部喀斯特地区土壤和农作物中镉的分布特征及风险评价[D]. 贵阳: 贵州大学, 2019.
- TANG Q L. The distribution and risk evaluation of cadmium in soil and crops in Karst area of northern Luodian in Guizhou[D]. Guiyang: Guizhou University, 2019.
- [21] 蔡文华, 胡曙光, 许秀敏. 2012—2014 年广东省大米中铅镉的暴露风险评估[J]. 食品与机械, 2015, 31(4): 47–50.
- CAI W H, HU S G, XU X M. Risk assessment on exposure of lead and cadmium of rice in Guangdong residents from 2012 to 2014[J]. Food and Machinery, 2015, 31(4): 47–50.
- [22] 张俊丽, 雷建新, 赵晓进, 等. 陕西省潼关县农田重金属污染分析与评价[J]. 西北农业学报, 2019, 28(2): 247–252.
- ZHANG J L, LEI J X, ZHAO X J, et al. Analysis of heavy metal contamination in farmland soil of Tongguan County, Shaanxi Province[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2019, 28(2): 247–252.
- [23] 余清. 内蒙古东来地区土壤-植物-地下水系统重金属迁移规律研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018.
- YU Q. Study on the migration of heavy metals in soil-plant-groundwater system in Donglai, Inner Mongolia[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2018.
- [24] 包凤琴. 河套地区玉米产区生态环境地球化学评价[D]. 成都: 成都理工大学, 2016.
- BAO F Q. Ecological and geochemical assessment of corn-growing region in Hetao area[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2016.
- [25] 郭远新, 王芳, 张钊熔, 等. 甘肃省白银市四龙镇土壤: 玉米污染情况调查[J]. 西部探矿工程, 2019, 31(5): 162–164.
- GUO Y X, WANG F, ZHANG Z R, et al. The pollution survey of soil and corn in Silong Township, Baiyin City, Gansu Province [J]. West-China Exploration Engineering, 2019, 31(5): 162–164.
- [26] 朱翠娟. 山西省太原、大同及忻州盆地农田系统重金属生态效应地球化学评价[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2007.
- ZHU C J. Crops ecological geochemical assessment of heavy metals in Taiyuan, Datong and Xinzhou basins of Shanxi Province[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2007.
- [27] 李杰, 朱立新, 康志强. 南宁市郊周边农田土壤-农作物系统重金属元素迁移特征及其影响因素 [J]. 中国岩溶, 2018, 37(1): 43–52.
- LI J, ZHU L X, KANG Z Q. Characteristics of transfer and their influencing factors of heavy metals in soil-crop system of peri-urban agricultural soils of Nanning, South China[J]. Carsologica Sinica, 2018, 37(1): 43–52.

责任编辑: 邹慧玲

英文编辑: 柳 正