

宋雯, 李优琴, 吕康, 等. 江苏省稻米镉含量调查及其膳食暴露评估[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(5):886-893.

SONG Wen, LI You-qin, LÜ Kang, et al. Survey and dietary exposure assessment of cadmium in milled rice in Jiangsu Province[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(5):886-893.

## 江苏省稻米镉含量调查及其膳食暴露评估

宋雯<sup>1,2</sup>, 李优琴<sup>2</sup>, 吕康<sup>2</sup>, 刘贤金<sup>2\*</sup>

(1.浙江省农业科学院农产品质量标准研究所/浙江省食品安全重点实验室, 杭州 310021; 2.江苏省农业科学院食品质量安全与检测研究所/农业部农产品质量安全风险评估实验室(南京), 南京 210014)

**摘要:**为评价江苏省稻米重金属镉污染现状,于2013年在全省13市调研抽检了1101份稻谷,采用石墨炉原子吸收光谱法测定稻米中的镉含量。检测结果显示,全省稻米镉的检出率为97.6%,平均含量为0.0364 mg·kg<sup>-1</sup>,检出范围是0.0003~0.4310 mg·kg<sup>-1</sup>,仅有0.27%的样本超出0.2 mg·kg<sup>-1</sup>的限量。整合我国居民20个性别年龄组人群的稻米消费和体重信息,采用非参数概率模型对稻米镉的膳食暴露量进行评估,并与JECFA推荐的镉的暂定每月耐受摄入量(PTMI)25 μg·kg<sup>-1</sup>体重相比,评估结果表明,我国居民食用江苏地区稻米产生的平均镉暴露风险尚可接受。但在P95的风险水平下,14岁以下人群的摄入量相对较高,占PTMI的86.3%~130.7%,其中11岁以下人群中约有6.8%~9.0%的个体摄入量超过PTMI,潜在风险较大。建议对稻米中的重金属镉进行持续监测。

**关键词:**镉;稻米;膳食暴露;概率评估;江苏

中图分类号:X820.3 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2016)05-0886-08 doi:10.11654/jaes.2016.05.010

### Survey and dietary exposure assessment of cadmium in milled rice in Jiangsu Province

SONG Wen<sup>1,2</sup>, LI You-qin<sup>2</sup>, LÜ Kang<sup>2</sup>, LIU Xian-jin<sup>2\*</sup>

(1. Institute of Quality and Standards for Agricultural Products, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences/Zhejiang Province Key Lab for Food Safety, Hangzhou 310021, China; 2. Institute of Food Safety and Monitoring Technology, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences/Laboratory of Quality & Safety Risk Assessment for Agro-Products(Nanjing), Ministry of Agriculture, Nanjing 210014, China)

**Abstract:** A survey of cadmium levels in milled rice in Jiangsu Province was carried out in 2013. A total of 1101 milled rice samples were collected from 13 cities. Cadmium was measured by graphite furnace atomic absorption spectroscopy. Results showed that 97.6% of the samples contained detectable concentrations of cadmium, which ranged from 0.0003 to 0.4310 mg·kg<sup>-1</sup>, with the mean value of 0.0364 mg·kg<sup>-1</sup>, but only 0.27% of the samples had cadmium concentrations exceeding the maximum level (ML), 0.2 mg·kg<sup>-1</sup>. Based on recent rice consumption and body weight, an estimated monthly human intake of cadmium was calculated for 20 age-sex categories of Chinese population using a non-parameter probabilistic model. The provisional tolerable monthly intake (PTMI) of cadmium, as recommended by the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives (JECFA) was 25 μg·kg<sup>-1</sup> bw. The estimated exposure values for populations of interest were compared to the PTMI. This study confirmed a low average health risk of cadmium via the milled rice in Jiangsu Province. For the population below 14 years old, however, exposure to cadmium represented 86.3%~130.7% of the PTMI at P95 risk level. For population below 11 years old, 6.8%~9.0% individuals had cadmium exposure exceeding the PTMI. The present study suggests that it is necessary to establish a program to monitor cadmium dynamics in milled rice continuously.

**Keywords:** cadmium; milled rice; dietary exposure; probabilistic assessment; Jiangsu Province

收稿日期:2015-11-18

基金项目:国家自然科学基金项目(31401780);江苏省自然科学基金项目(BK20140746);国家农产品质量安全风险评估项目(GJFP2015003001)

作者简介:宋雯(1984—),女,江苏常州人,博士,助理研究员,主要从事农产品质量安全风险评估研究。E-mail:wengweng101@gmail.com

\*通信作者:刘贤金 E-mail:jaasliu@jaas.ac.cn

镉是一种天然稳定地存在于地壳中,含量甚微的重金属元素,但其在电镀、化工、电子和核工业等领域得到广泛应用,近年来在环境中急剧释放<sup>[1]</sup>。镉对动物和植物都是非必需的,且蓄积在人体内的半衰期很长<sup>[2]</sup>,慢性镉中毒会损伤肾脏和骨骼<sup>[3-9]</sup>。考虑到镉长期暴露对人体健康的危害而更需要引起重视,JECFA (Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives, 联合国粮农组织和世界卫生组织下的食品添加剂联合专家委员会)在2010年将镉的健康指导值由暂定每周耐受摄入量(Provisional Tolerable Weekly Intake, PTWI)  $7 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  体重(相当于每天  $1 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  体重)改为暂定每月耐受摄入量(Provisional Tolerable Monthly Intake, PTMI),并调低数值至  $25 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  体重(相当于每天  $0.8 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  体重)<sup>[2]</sup>。

膳食是人体摄入镉的最主要途径<sup>[10]</sup>。大米是我国居民膳食镉的主要来源<sup>[11-13]</sup>,稻米镉污染现已成为研究热点问题<sup>[9,14-15]</sup>。以往我国对镉摄入量的研究大都基于总膳食调查开展<sup>[12,16-18]</sup>。高俊全等<sup>[12]</sup>以成年男子为例,比对了我国3次总膳食研究的结果(1990、1992、2000年),得出了镉的膳食摄入量(全国平均值)呈上升趋势的结论。但基于总膳食研究的评估往往对单种农产品的针对性不足,关注的人群也较为单一,且立足于点评估方法,忽视了评估结果的变异性和不确定性。而另一方面,针对稻米镉的人群食用风险评价往往以市售大米为研究对象<sup>[19-20]</sup>,无法追溯产地,缺乏对源头安全的关注。

江苏地处长三角,是我国水稻播种面积和产量较大的省份之一。基于当前经济发展与环境保护的现实矛盾,在保证粮食数量安全的同时还必须兼顾人群健康,开展针对原产地的风险监测与评价是必要手段。为此,本文特以江苏稻米为研究对象,结合我国居民稻米消费和体重信息,采用非参数概率模型对20个性别年龄组人群的稻米镉膳食暴露量进行评估,并将评估结果与以往相关研究得到的结果进行比较,以期对相关质量标准和公共卫生政策的制定提供有益的参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集

于2013年的收获季节,在江苏苏州、无锡、常州、南京、镇江、扬州、泰州、南通、淮安、宿迁、盐城、徐州和连云港,通过田间现场抽样的方式,分别抽样86、90、95、83、70、60、97、80、80、90、90、90份,共计

1101份稻谷样品。调查所选大部分县市的水稻产量均在10万t以上,各抽检田块的种植面积都在3.33 hm<sup>2</sup>以上。采样时,在每个田块的中心位置采用5点取样法,每点取3株,共150株混合成一份稻谷样品。在核对确认样品信息无误、包装完好后,分为待检样和复检样入库待化学分析。

### 1.2 样品的前处理与分析测定

稻谷经出糙、磨精之后,得到精米。再以小型粉碎机将精米粉碎,过40目筛后贮存于干净塑料袋或塑料瓶中备用。

参考NYT 1100—2006和GB/T 5009.15—2003中的湿法消解,称取0.5 g粉碎均匀的样品,与8 mL硝酸溶液混合,放置过夜,次日于消解炉上缓慢加热消化,剧烈反应过后,稍冷加入2 mL过氧化氢溶液,继续消化至消解液体积为1~2 mL(呈无色透明或略带黄色),取下冷却,用纯水转移并定容至25 mL,上机待测。检测仪器使用德国耶拿分析仪器股份公司生产的石墨炉原子吸收光谱仪 novAA400。

本研究所建分析方法的回收率为83%~112%,检出限(Limit of detection, LOD)为  $0.0001 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,定量限(Limit of quantification, LOQ)为  $0.0003 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

### 1.3 质量控制

检测过程中使用的酸和过氧化氢为优级纯,其他试剂为分析级。测试用水符合GB/T 6682—2008二级用水标准。所有器皿在硝酸溶液中浸泡24 h后用去离子水冲洗。每批样品分析都做试剂空白和大米粉标准样品(GBW080684)测定,以保证分析结果的可靠性。

### 1.4 未检出值的处理

由于检测方法和仪器的局限,以及痕量数据的客观存在,检测结果中常含有一定比例的未检出值。这些未检出值可能是真实的“0”,也可能是低于LOD的痕量值。为尽可能有效地解读利用这部分信息,本研究采用WHO推荐的替代法对未检出值进行处理,即选用较为通行的以  $1/2\text{LOD}$  替换未检出值<sup>[21]</sup>。

### 1.5 各城市样本的一致性分析

因各城市样本的总体都呈右偏分布(非正态),故采用非参数的Kruskal-Wallis检验,对13个独立样本来自的13个总体的分布作一致性分析,以检验多个总体的分布是否存在显著差异。上述分析使用SPSS 22.0完成。

### 1.6 稻米中镉的膳食暴露评估

稻米中镉的膳食暴露评估,首先需要整合稻米中

镉含量数据( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )和目标人群每日稻米消费量数据( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  体重),得到膳食暴露量的估计值,再将结果与相应的健康指导值(PTMI)进行比较,权衡风险<sup>[22]</sup>。

每日膳食暴露估计值可通过下式计算:

$$y=x\cdot c/w \quad (1)$$

式中: $y$  代表个体每日由稻米摄入镉的量, $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  体重; $x$  代表个体每日的稻米消费量, $\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$ ;  $c$  代表稻米中镉的含量, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;  $w$  代表个体的体重,  $\text{kg}$ 。

评估所需的居民稻米消费量调查数据和体重数据分别引自《中国居民营养与健康状况调查报告之二——2002 膳食与营养素摄入状况》<sup>[23]</sup>和《中国居民营养与健康状况调查报告之三——2002 居民体质与营养状况》<sup>[24]</sup>公布的第4次总膳食调查数据。本研究将这两套数据进行整合,把目标人群分为20个性别年龄组<sup>[25]</sup>,见表1。

由于JECFA推荐使用PTMI来衡量人体镉的摄入安全<sup>[2]</sup>,需要对公式(1)稍作调整,将其右侧部分乘以系数30,以此计算个体的月暴露量。

$$y=x\cdot c\cdot 30/w \quad (2)$$

表1 目标人群体重及其稻米消费量

Table 1 Body weights and daily rice consumption of different subpopulations

年龄 Age	体重 Body weight/kg		日平均稻米消费量 Average daily rice consumption/ $\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$	
	男 Male	女 Female	男 Male	女 Female
2~4	14.06	13.48	116.8	115.3
4~7	18.20	17.61	154.9	137.5
7~11	25.98	25.12	199.0	182.8
11~14	36.22	36.39	229.5	205.5
14~18	50.58	47.81	266.1	207.5
18~30	62.52	52.85	266.9	224.9
30~45	64.42	55.73	272.6	240.2
45~60	62.71	56.59	271.5	235.2
60~70	60.48	53.51	236.2	209.4
70~80	57.33	49.80	222.7	192.7

### 1.7 评估模型构建

本研究采用概率模型作为评估方法<sup>[26-28]</sup>,将稻米镉含量和人群稻米消费量视为两个独立分布的总体。在获得两总体的分布特征和总体参数后,基于描述暴露过程的公式(2),利用计算机模拟对两个总体进行bootstrap抽样,再对每组bootstrap样本作100 000次的Monte Carlo随机抽样,用每一输入分布的随机数值来模拟计算膳食暴露。通过2000次的bootstrap迭

代重复上述过程,即可得到人群暴露量的概率分布。根据该分布可以算得一系列的统计量,如平均值与P50、P90和P95等百分位数可作为目标人群摄入量的估计值,以及相应摄入量估计值的置信区间,从而实现了对变异性和不确定性的定量描述。上述模拟过程在SAS/IML环境下完成。

模型总体分布的构建有非参数和参数两种方法<sup>[22]</sup>。非参数方法是将目标参数观察值的数据集直接定义为离散的均匀分布作为该参数的分布<sup>[22,29]</sup>,以保证每一数据在有放回抽样时有相同的概率被抽到。参数方法则是通过对目标参数观察值的分布拟合,将其定义为某一特殊分布<sup>[22]</sup>。本研究中,稻米镉含量的数据源于多个独立样本,宜在对多样本一致性分析的基础上,选择适宜的分布构建方法。

## 2 结果与分析

### 2.1 检测结果与分析

1101份稻米样品镉含量分布见图1,检测结果的描述性统计见表2。结果显示:稻米中镉的检出率较高,累计达97.6%,检出范围为0.0003~0.4310  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。比照GB 2762—2012对于稻米中镉的限量(Maximum limit, ML)为0.2  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,仅有3份样品超出限量,累计超标率为0.27%。未检出值经1/2LOD替代后,所抽稻米样品的镉含量平均值为0.0364  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,中位数为0.0223  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

Kruskal-Wallis检验显示,检验统计量的渐进显著性取值远小于0.0001,故可以认为13个城市稻米的镉含量并不都服从具有相同分布的总体,分布差异具有统计学意义。经多重比较得到相应齐性子集的划分,见表3。需要注意的是,该检验及相应多重比较结果针对的是各城市稻米镉含量的数学分布,而非基于

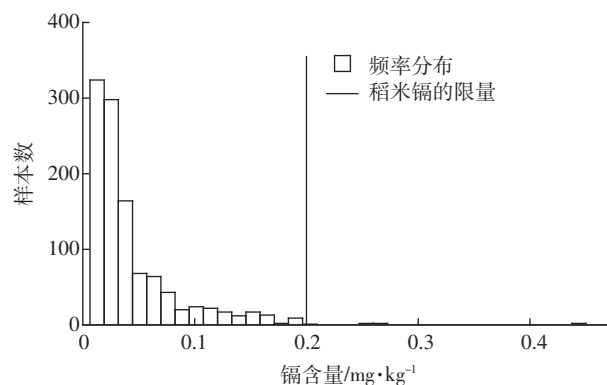


图1 稻米样品中镉含量分布

Figure 1 Frequency distribution of cadmium concentrations in rice

表2 1101份稻米样品中镉含量的分析结果(2013年)

Table 2 Statistical summary of cadmium concentrations in 1101 milled rice samples(in 2013)

城市 City	范围 Range/mg·kg <sup>-1</sup>	平均数 Mean/mg·kg <sup>-1</sup>	中位数 Median/mg·kg <sup>-1</sup>	超出 ML 的样本数 No.>ML	超标率 Over-limit rate/%
苏州 Suzhou	0.003 1~0.123 4	0.024 1	0.018 3	0	0
无锡 Wuxi	0.006 2~0.142 3	0.041 1	0.030 5	0	0
常州 Changzhou	0.004 0~0.265 1	0.048 6	0.038 6	1	1.05
南京 Nanjing	0.001 1~0.180 3	0.034 1	0.026 4	0	0
镇江 Zhenjiang	0.006 4~0.121 6	0.038 8	0.033 5	0	0
扬州 Yangzhou	0.000 3~0.431 0	0.035 5	0.014 7	1	1.67
泰州 Taizhou	<LOD~0.190 3	0.025 8	0.014 2	0	0
南通 Nantong	<LOD~0.140 1	0.032 8	0.016 2	0	0
淮安 Huaian	0.000 3~0.149 3	0.057 4	0.048 5	0	0
宿迁 Suqian	<LOD~0.241 4	0.028 1	0.023 7	1	1.11
盐城 Yancheng	<LOD~0.064 1	0.013 0	0.009 1	0	0
徐州 Xuzhou	0.000 6~0.193 3	0.041 4	0.021 5	0	0
连云港 Lianyungang	0.001 1~0.180 1	0.054 1	0.028 5	0	0

注:计算平均数和中位数时,以 1/2LOD(0.000 05 mg·kg<sup>-1</sup>)替代所有未检出值。

Note: When calculating mean and median values, one-half LOD(0.000 05 mg·kg<sup>-1</sup>) was used for samples with Cd concentrations lower than LOD.

表3 基于 Kruskal-Wallis 检验的齐性子集划分

Table 3 Homogeneous subsets based on Kruskal-Wallis test

城市 City	齐性子集 Homogeneous subset				
盐城 Yancheng	288.017				
泰州 Taizhou	416.691				
扬州 Yangzhou	467.583				
南通 Nantong	470.050				
苏州 Suzhou	484.692				
宿迁 Suqian	522.328				
徐州 Xuzhou	560.289				
南京 Nanjing	612.072				
连云港 Lianyungang	619.156				
无锡 Wuxi	675.956				
镇江 Zhenjiang	679.336				
常州 Changzhou	683.232				
淮安 Huaian	696.375				

注:表中所列为样本平均秩;齐性子集依 Kruskal-Wallis 检验的多重比较结果划分,显著水平为 0.05。

Note: Average rankings of samples were given in table. Homogeneous subsets were the result of multiple comparisons based on Kruskal-Wallis test. The significance level was 0.05.

数值高低对质量优劣的判定。

## 2.2 江苏稻米中镉的膳食暴露评估

基于 Kruskal-Wallis 检验结果,本研究选用非参数方法构建膳食暴露评估模型。评估结果采用变异性和不确定性描述,即以 20 个性别年龄组人群基于各自摄入分布下的均数、P50、P75、P90 和 P95 的估计值描述变异性,以其 90%的置信区间描述不确定性,详见表 4。比照 JECFA 推荐的镉的 PTMI(25 μg·kg<sup>-1</sup> 体重),食

用江苏稻米产生的平均镉暴露风险尚可接受,但在低年龄组以及高端暴露人群中均存在健康隐患。

表 4 显示,20 个性别年龄组人群的平均稻米镉摄入量介于 4.225~9.339 μg·kg<sup>-1</sup> 体重,未超过 PTMI (占比 16.9%~37.4%),总体安全。但在暴露量分布的 P95 下,14 岁以下人群(2~14 岁)呈现高暴露,摄入量达 21.579~32.684 μg·kg<sup>-1</sup> 体重,占 PTMI 的 86.3%~130.7%,不容乐观。14 岁以上人群面临的风险则相对



表 4 目标人群的稻米镉月暴露量的估计( $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  体重)Table 4 Estimated monthly cadmium exposures of different subpopulations via milled rice( $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  体重)

年龄 Age	性别 Sex	月摄入量估计值的均数、百分位数及其 90% 的置信限 Mean, percentile and their 90% confidence intervals for monthly cadmium exposure via rice consumption for each age-sex group				
		平均数 Mean	P50	P75	P90	P95
2~4	男 Male	9.070(8.591~9.590)	5.425(4.984~5.732)	11.277(10.205~12.461)	22.793(20.934~25.420)	31.744(29.906~34.891)
	女 Female	9.339(8.845~9.874)	5.586(5.132~5.902)	11.612(10.508~12.830)	23.468(21.555~26.173)	32.684(30.792~35.924)
4~7	男 Male	9.292(8.802~9.825)	5.558(5.107~5.873)	11.554(10.456~12.767)	23.352(21.448~26.044)	32.522(30.640~35.746)
	女 Female	8.528(8.075~9.014)	5.099(4.685~5.388)	10.600(9.592~11.712)	21.423(19.676~23.893)	29.836(28.109~32.794)
7~11	男 Male	8.363(7.921~8.843)	5.002(4.596~5.285)	10.398(9.410~11.490)	21.016(19.303~23.439)	29.269(27.575~32.171)
	女 Female	7.945(7.525~8.401)	4.752(4.366~5.021)	9.879(8.940~10.916)	19.966(18.338~22.268)	27.807(26.198~30.564)
11~14	男 Male	6.918(6.553~7.315)	4.138(3.802~4.372)	8.602(7.784~9.504)	17.385(15.967~19.389)	24.212(22.811~26.612)
	女 Female	6.166(5.840~6.519)	3.688(3.388~3.897)	7.666(6.938~8.471)	15.494(14.231~17.280)	21.579(20.330~23.718)
14~18	男 Male	5.744(5.441~6.073)	3.436(3.157~3.630)	7.142(6.463~7.892)	14.435(13.258~16.099)	20.103(18.940~22.096)
	女 Female	4.738(4.488~5.010)	2.834(2.604~2.995)	5.892(5.332~6.510)	11.908(10.937~13.281)	16.584(15.624~18.228)
18~30	男 Male	4.661(4.415~4.928)	2.788(2.561~2.946)	5.795(5.244~6.404)	11.713(10.758~13.063)	16.313(15.369~17.930)
	女 Female	4.646(4.401~4.913)	2.779(2.553~2.936)	5.777(5.228~6.383)	11.676(10.724~13.022)	16.261(15.320~17.873)
30~45	男 Male	4.620(4.376~4.885)	2.763(2.539~2.920)	5.744(5.199~6.347)	11.610(10.664~12.949)	16.170(15.233~17.773)
	女 Female	4.706(4.457~4.976)	2.815(2.586~2.974)	5.851(5.295~6.465)	11.826(10.861~13.189)	16.470(15.516~18.102)
45~60	男 Male	4.727(4.477~4.998)	2.827(2.598~2.987)	5.877(5.319~6.494)	11.879(10.910~13.248)	16.544(15.586~18.184)
	女 Female	4.538(4.298~4.798)	2.714(2.494~2.868)	5.642(5.106~6.234)	11.404(10.474~12.718)	15.882(14.962~17.456)
60~70	男 Male	4.264(4.039~4.509)	2.550(2.343~2.695)	5.302(4.798~5.858)	10.715(9.842~11.951)	14.923(14.060~16.403)
	女 Female	4.272(4.047~4.518)	2.556(2.348~2.700)	5.312(4.807~5.870)	10.737(9.862~11.975)	14.953(14.088~16.436)
70~80	男 Male	4.241(4.017~4.484)	2.537(2.331~2.680)	5.273(4.772~5.827)	10.658(9.789~11.887)	14.844(13.984~16.315)
	女 Female	4.225(4.002~4.467)	2.527(2.322~2.670)	5.253(4.754~5.804)	10.617(9.751~11.841)	14.786(13.930~16.252)

较小, P95 风险水平的暴露量介于 14.786~20.103  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  体重, 占 PTMI 的 59.1%~80.4%。

20 个性别年龄组人群的稻米镉摄入量分布见表 5。在各组人群中, 相应有 0.2%~9.0% 的个体的稻米镉摄入量大于 PTMI, 其中 11 岁以下的人群中, 有 6.8%~9.0% 的个体摄入量超过 PTMI, 应该引起重视。

### 2.3 与总膳食研究的比较

2007 年全国总膳食研究的结果表明, 成年男子膳食镉的平均摄入量为每人每周 5.27  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  体重<sup>[13]</sup>, 即为每人每月 22.586  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  体重。因居民膳食镉的来源主要是谷类, 尤其是大米, 贡献率近 50%<sup>[11, 13]</sup>, 由此可估算出 2007 年我国成年男子因消费米制品而产生的镉平均暴露量约为 11.293  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  体重。

在本研究中, 18 岁以上的成年男子因食用江苏稻米而产生的每月镉暴露量的平均值为 4.503  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  体重。在所使用的人群稻米消费和体重信息大体一致的前提下, 与总膳食研究结果相对照可知, 本研究结果一方面佐证了大米是膳食镉的主要来源之一, 另一方面也从侧面反映出江苏省稻米的镉含量要低于全国平均水平。

表 5 20 个性别年龄组人群的稻米镉摄入量分布

Table 5 Distributions of estimated cadmium exposure for populations of interest via milled rice consumption

年龄 Age	男 Male		女 Female	
	≤PTMI/%	>PTMI/%	≤PTMI/%	>PTMI/%
2~4	91.2	8.8	91.0	9.0
4~7	92.3	7.7	91.8	8.2
7~11	92.0	8.0	93.2	6.8
11~14	96.8	3.2	96.8	3.2
14~18	97.5	2.5	99.6	0.4
18~30	99.8	0.2	99.7	0.3
30~45	99.7	0.3	99.7	0.3
45~60	99.7	0.3	99.7	0.3
60~70	99.7	0.3	99.7	0.3
70~80	99.8	0.2	99.7	0.3

## 3 讨论

水稻是我国重要的粮食作物, 全国约有 65% 以上的人口以稻米为主粮<sup>[30]</sup>, 稻米的安全性直接关系到我国居民的健康。因此, 立足产地开展稻米镉的膳食暴露评估, 提出稻米的安全生产及消费对策, 有其必要

性和紧迫性。本研究对江苏全省各市2013年当季收获的稻米进行了调查,整合全国居民的稻米消费和体重信息,采用非参数概率模型对20个性别年龄组人群的稻米镉的膳食暴露量及分布情况做了全面的评估。研究结果显示,所检稻米样品中仅有部分受到镉污染,但仍需关注低年龄组以及高暴露人群的稻米镉摄入风险。

本研究1101份稻米样品中仅有0.27%的样品镉含量超出我国制定的限量标准,说明江苏稻米的镉含量总体处于安全水平,但仍存在安全隐患。本研究的调查结果显示,超标样品在空间上呈点状散落分布于省内(常州、扬州和宿迁),与矿区污染斑块状或条带状的分布格局不同,可能是由于省内部分稻区的环境已受工业点源污染影响。据第四次全国总膳食研究指出,我国南方主要稻区均存在不同程度的镉环境污染<sup>[13]</sup>。针对江苏水稻产区环境,金亮等<sup>[31]</sup>采集测定了苏北6县市的稻田土壤及稻米样品,分析认为供试地区土壤未发现严重的重金属污染,满足绿色食品和无公害农产品生产基地要求;而刘洪莲等<sup>[32]</sup>采样分析了太湖地区某冶炼厂周围的稻田土壤和稻米,发现由于工业的点源污染,供试农田土壤和水稻已经受到多种重金属复合污染,不适于农产品的安全生产。由此可见,控制大米中的镉含量应从源头做起,聚焦土壤-水稻系统中镉的迁移与籽粒积累规律,同时制定稻田镉的限量标准,合理划分产区。

降低稻米镉摄入风险,除了从生产上控制稻米镉含量,还需从消费层面引导,特别应加强对高消费人群和敏感人群的关注。涂杰峰等<sup>[33]</sup>对福建省的稻米镉进行了健康风险评价,结果表明,食用福建省稻米,有8.67%的居民月镉暴露量大于PTMI,健康面临风险。Masayuki Ikeda等<sup>[34]</sup>回顾了日本居民膳食镉摄入量近40年的变化,经水稻产区调整和消费引导,污染区居民(日本居民的体重按50 kg计算<sup>[35]</sup>)的镉摄入量已由过去最高 $360 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 体重下降到 $60 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 体重。相较而言,食用江苏省稻米,镉的摄入风险较低。依本研究样本数据分析,18岁以上成年男子食用江苏地区稻米,在高暴露位点P95下的暴露量估计值为 $15.759 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 体重,占PTMI的63.04%,风险可接受。而11岁以下人群中,有6.8%~9.0%的个体摄入量超过PTMI,面临风险。同时,在高暴露位点P95下,11~14岁人群和14~18岁男性的暴露量已非常接近PTMI,有潜在风险。因此,基于摄入风险的考量,有必要维持现行大米中镉限量卫生标准不放松,同时关注并合理调

整低年龄组及高暴露人群的膳食结构,才能在消费层面尽可能地保证人民健康。

在前人对稻米镉的暴露风险研究中,对风险的性别指向存有一定争议。如Mirei等<sup>[36]</sup>研究了日本神通川流域不同程度的镉污染区内,稻米镉含量与70岁以上人口的性别比率的关系,认为镉暴露对女性的致死风险高于男性。韩雪梅等<sup>[37]</sup>采用年龄系数法和消费量拟合法估算人群累积稻米镉暴露水平,其结果显示同年龄组男性的镉暴露水平要高于女性。而本研究针对稻米镉的暴露分析和全国总膳食镉的调查结果<sup>[13]</sup>则都未发现镉的暴露风险与性别差异有关联。由表4可见,2~4、30~45、60~70岁这3组人群的男性镉暴露量较同组女性人群略低,其余年龄组的暴露量则呈男高女低趋势,且各年龄组的暴露量在性别间的差异并不显著。这一分歧可能是由于各研究针对的样本和采用的方法均不一样,结论的普适性还有待进一步针对性的研究论证。

膳食暴露评估是一项对风险定性定量的系统工程,不可避免会有不确定性。本研究中不确定性主要源于建模过程和相关参数援引<sup>[38]</sup>。为降低模型中随机抽样带来的不确定性,设置了100 000次Monte Carlo模拟<sup>[39]</sup>和2000次的bootstrap迭代<sup>[40]</sup>。而参数的不确定性则主要源于最新膳食数据的匮乏。本研究中目标人群体重及其稻米消费量信息都来源于卫生部门2002年公布的数据。随着生活水平的提高,若某些性别年龄组人群的稻米消费量减少或体重增加,则本研究的评估结果有高估风险的可能;反之则有可能低估。因此,更为符合实际情况的评估结果还有赖于多平台数据的共享和整合利用。

## 4 结论

江苏地区稻米的镉污染情况总体较轻,仅有0.27%的样本超出限量。消费这一区域的稻米,目标人群面临的平均镉暴露风险处在可接受范围内。但低年龄组和高暴露人群面临的潜在风险隐患应引起重视,本研究中14岁以下人群(2~14岁)为敏感性群体,其中11岁以下人群中,有6.8%~9.0%的个体摄入量超过PTMI,面临的潜在风险较大。

### 参考文献:

- [1] Järup L. Hazards of heavy metal contamination[J]. *British Medical Bulletin*, 2003, 68(1):167-182.
- [2] World Health Organization(WHO). Safety evaluation of certain food additives and contaminants(WHO food additives series; 64)[R]. Geneva:

- World Health Organization, 2011; 372-374.
- [3] Järup L, Berglund M, Elinder C G, et al. Health effects of cadmium exposure: A review of the literature and a risk estimate[J]. *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health*, 1998, 24(Suppl 1): 1-51.
- [4] Buchet J P, Lauwerys R, Roels H, et al. Renal effects of cadmium body burden of the general population[J]. *The Lancet*, 1990, 336(8717): 699-702.
- [5] Friberg L. Health hazards in the manufacture of alkaline accumulators with special reference to chronic cadmium poisoning[J]. *Actamedica Scandinavica*, 1950, 240(Suppl): 1-124.
- [6] Bernard A, Roels H, Buchet J P, et al. Cadmium and health: The Belgian experience[J]. *IARC Scientific Publications*, 1992, 118: 15-33.
- [7] Hellström L, Elinder C G, Dahlberg B, et al. Cadmium exposure and end-stage renal disease[J]. *American Journal of Kidney Diseases*, 2001, 38(5): 1001-1008.
- [8] Staessen J A, Roels H A, Emelianov D, et al. Environmental exposure to cadmium, forearm bone density, and risk of fractures: Prospective population study[J]. *The Lancet*, 1999, 353(9159): 1140-1144.
- [9] Nordberg G, Jin T, Bernard A, et al. Low bone density and renal dysfunction following environmental cadmium exposure in China[J]. *Ambio*, 2002, 31(6): 478-481.
- [10] World Health Organization(WHO). Cadmium. Environmental health criteria 134[EB/OL].[2015-10-08]. <http://www.inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc134.htm>.
- [11] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会.《食品中污染物限量》(GB 2762—2012)问答[EB/OL].[2015-10-08]. <http://www.moh.gov.cn/wsb/pzcyj/201301/58113f0b463e4e1d89769e47b9555c03.shtml>. National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. Maximum limit of contaminants in foods(GB 2762—2012)Q&A[EB/OL].[2015-10-08]. <http://www.moh.gov.cn/wsb/pzcyj/201301/58113f0b463e4e1d89769e47b9555c03.shtml>.
- [12] 高俊全, 李筱薇, 赵京玲. 2000年中国总膳食研究: 膳食铅、镉摄入量[J]. *卫生研究*, 2006, 35(6): 750-754.  
GAO Jun-quan, LI Xiao-wei, ZHAO Jing-ling. 2000 Chinese total diet study: The dietary lead and cadmium intakes[J]. *Journal of Hygiene Research*, 2006, 35(6): 750-754.
- [13] 李筱薇. 中国总膳食研究应用于膳食元素暴露评估[D]. 北京: 中国疾病预防控制中心, 2012: 99-105.  
LI Xiao-wei. The application of total diet study to evaluate the dietary intakes of trace elements[D]. Beijing: Chinese Center for Disease Control and Prevention, 2012: 99-105.
- [14] Shi J, Li L Q, Pan G X. Variation of grain Cd and Zn concentrations of 110 hybrid rice cultivars grown in a low-Cd paddy soil[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, 21(2): 168-172.
- [15] Li Z W, Li L Q, Pan G X, et al. Bioavailability of Cd in a soil-rice system in China: Soil type versus genotype effects[J]. *Plant and Soil*, 2005, 271(1): 165-173.
- [16] 梁高道, 革丽亚, 谭慧, 等. 武汉市城市成人居民总膳食中镉的健康风险评价[J]. *中国卫生检验杂志*, 2008, 18(12): 2715-2716.  
LIANG Gao-dao, GE Li-ya, TAN Hui, et al. Health risk assessment of cadmium via diet for adults in Wuhan[J]. *Chinses Journal of Health Laboratory Technology*, 2008, 18(12): 2715-2716.
- [17] 洪华荣, 王娟, 陈剑锋, 等. 厦门市居民重金属膳食摄入水平评估[J]. *现代预防医学*, 2015, 42(9): 1580-1583.  
HONG Hua-rong, WANG Juan, CHEN Jian-feng, et al. Assessment on dietary intake level of heavy metals among residents, Xiamen[J]. *Modern Preventive Medicine*, 2015, 42(9): 1580-1583.
- [18] 杨巍, 蒋冬梅, 王定勇. 重庆市居民重金属膳食摄入水平研究[J]. *生态毒理学报*, 2009, 4(1): 50-56.  
YANG Wei, JIANG Dong-mei, WANG Ding-yong. Investigation on dietary intake of heavy metals intaken by inhabitants in Chongqing[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2009, 4(1): 50-56.
- [19] Qian Y Z, Chen C, Zhang Q, et al. Concentrations of cadmium, lead, mercury and arsenic in Chinese market milled rice and associated population health risk[J]. *Food Control*, 2010, 21: 1757-1763.
- [20] 李优琴, 李荣林, 石志琦. 市售大米重金属污染状况及健康风险评估[J]. *江苏农业学报*, 2008, 24(6): 977-978.  
LI You-qin, LI Rong-lin, SHI Zhi-qi. Pollution and risk evaluation of heavy metals in rice[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2008, 24(6): 977-978.
- [21] World Health Organization Regional Office for Europe(GEMS/Food-EURO). Second workshop on reliable evaluation of low-level contamination of food: Report on a workshop in the frame of GEMS/Food-EURO[R/OL].[2015-10-08]. [http://www.who.int/foodsafety/publications/chem/en/lowlevel\\_may1995.pdf](http://www.who.int/foodsafety/publications/chem/en/lowlevel_may1995.pdf), 1995.
- [22] World Health Organization(WHO). Principles and methods for the risk assessment of chemicals in food[M]. Geneva: WHO, 2009.
- [23] 翟凤英, 杨晓光. 中国居民营养与健康状况调查报告之二: 2002 膳食与营养摄入状况[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2006: 21-23.  
ZHAI Feng-ying, YANG Xiao-guang. A survey on the Chinese national health and nutrition II: The national diet and nutrition in 2002[M]. Beijing: People's Medical Publishing House, 2006: 21-23.
- [24] 杨晓光, 翟凤英. 中国居民营养与健康状况调查报告之三: 2002 居民体质与营养状况[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2006: 51-52.  
YANG Xiao-guang, ZHAI Feng-ying. A survey on the Chinese national health and nutrition III: The national health and nutrition in 2002 [M]. Beijing: People's Medical Publishing House, 2006: 51-52.
- [25] 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.
- [26] European Food Safety Authority Scientific Committee. Guidance of the scientific committee on a request from EFSA related to uncertainties in dietary exposure assessment[J]. *The EFSA Journal*, 2006, 438: 1-2.
- [27] van Asselt E D, Sterrenburg P, Noordam M Y, et al. Overview of available methods for risk based control within the european union[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2012, 23(1): 51-58.
- [28] van Der Voet H, Slob W. Integration of probabilistic exposure assessment and probabilistic hazard characterization[J]. *Risk Analysis*, 2007, 27(2): 351-371.

- [29] Vose D. Risk analysis: A quantitative guide[M]. 3rd Ed. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2008:263-297.
- [30] 龚伟群, 潘根兴. 中国水稻生产中 Cd 吸收及其健康风险的有关问题[J]. 科技导报, 2006, 24(5):43-48.  
GONG Wei-qun, PAN Gen-xing. Issues of grain Cd uptake and the potential health risk of rice production sector of China[J]. *Science and Technology Review*, 2006, 24(5):43-48.
- [31] 金亮, 李恋卿, 潘根兴, 等. 苏北地区土壤-水稻系统重金属分布及其食品安全风险评估[J]. 生态与农村环境学报, 2007, 23(1):33-39.  
JIN Liang, LI Lian-qing, PAN Gen-xing, et al. Distribution of heavy metals in the soil-rice system and food exposure risk assessment of North Jiangsu, China[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2007, 23(1):33-39.
- [32] 刘洪莲, 李艳慧, 李恋卿, 等. 太湖地区某地农田土壤及农产品中重金属污染及风险评估[J]. 安全与环境学报, 2006, 6(5):60-63.  
LIU Hong-lian, LI Yan-hui, LI Lian-qing, et al. Pollution and risk evaluation of heavy metals in soil and agro-products from an area in the Taihu Lake region[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2006, 6(5):60-63.
- [33] 涂杰峰, 刘兰英, 罗钦, 等. 福建省稻米镉含量及其健康风险[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(4):695-701.  
TU Jie-feng, LIU Lan-ying, LUO Qin, et al. Contents and health risk assessment of cadmium in milled rice in Fujian Province[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(4):695-701.
- [34] Masayuki Ikeda, Takafumi Ezaki, Teruomi Tsukahara, et al. Dietary cadmium intake in polluted and non-polluted areas in Japan in the past and in the present[J]. *Int Arch Occup Environ Health*, 2004, 77(4):227-234.
- [35] Takeya Inaba, Etsuko Kobayashi, Yasushi Suwazono, et al. Estimation of cumulative cadmium intake causing Itai-Itai disease[J]. *Toxicology Letters*, 2005, 159(2):192-201.
- [36] Mirei U, Etsuko K, Yasushi S, et al. Cadmium exposure aggravates mortality more in women than in men[J]. *International Journal of Environmental Health Research*, 2006, 16(4):273-279.
- [37] 韩雪梅, 张文丽, 尚琪. 镉污染区人群累积米镉暴露水平两种估算方法的比较[J]. 卫生研究, 2015, 44(6):939-969.  
HAN Xue-mei, ZHANG Wen-li, SHANG Qi. Comparison of two methods in calculating the cumulative cadmium intake(CCI) from rice in the cadmium polluted area[J]. *Journal of Hygiene Research*, 2015, 44(6):939-969.
- [38] US Environmental Protection Agency(US EPA). Risk assessment guidance for superfund Volume I: Human health evaluation manual (Part A)[R]. Washington DC:Office of Emergency and Remedial Response, 1989:6-47.
- [39] Waldo J de B, Voet van der H. MCRA, Release 6 a web-based program for Monte Carlo risk assessment[R/OL].[2015-10-08]. <https://mcra.rivm.nl/Documentation/Manual6.pdf>.
- [40] Efron B, Tibshirani R J. An introduction to the bootstrap[M]. New York: Chapman & Hall, 1993:14-15, 275.