

风险监测

温州市本地大米重金属镉污染空间分布及人群膳食暴露风险评估

高四海,蔡圆圆,刘倩倩,郑三燕,林彩琴
(温州市疾病预防控制中心,浙江温州 325001)

摘要:目的 分析温州市本地大米重金属镉污染水平及空间分布规律,评估温州市居民食用本地大米镉暴露的健康风险。方法 收集2016—2021年温州市本地大米的监测数据,利用Arcgis 10.2软件将大米镉含量空间分布进行可视化展示,采用普通克里金插值分析方法进行插值分析;结合居民消费量数据,采用简单分布评估法,对温州市居民食用本地大米镉暴露的健康风险进行评估。结果 740份本地大米中镉含量中位数为0.069 mg/kg,检出率和超标率分别为95.68%、11.49%。本地大米镉含量较高的地方主要集中在鹿城区西北部及瑞安市中部地区。温州市成年居民食用本地大米镉的平均月暴露量和高消费人群月暴露量(P95)分别为12.04、21.08 $\mu\text{g}/\text{kg}\cdot\text{BW}$,未成年人食用本地大米镉的平均月暴露量和高消费人群月暴露量分别为17.02、32.04 $\mu\text{g}/\text{kg}\cdot\text{BW}$ 。居民食用鹿城区本地大米镉的平均暴露量和高消费人群暴露量均大于每月可耐受摄入量(PTMI)。结论 1.16%的温州市成年居民食用本地大米镉暴露量高于PTMI,大米高消费未成年人食用本地大米镉的暴露水平较高,居民食用鹿城区本地大米镉暴露的健康风险较高。

关键词:本地大米;镉;暴露量;健康风险

中图分类号:R155 文献标识码:A 文章编号:1004-8456(2023)09-1333-07

DOI:10.13590/j.cjfh.2023.09.013

Spatial distribution of cadmium pollution in locally produced rice and human exposure risk assessment in Wenzhou City

GAO Sihai, CAI Yuanyuan, LIU Qianqian, ZHENG Sanyan, LIN Caiqing
(Wenzhou Center for Disease Control and Prevention, Zhejiang Wenzhou 325001, China)

Abstract: Objective This study aimed to evaluate the health risks of cadmium exposure in the local rice of Wenzhou residents by analyzing the pollution level and spatial distribution of cadmium in locally produced Wenzhou rice. **Methods** The monitoring data of local rice in Wenzhou from 2016 to 2021 were collected, and the spatial distribution of the cadmium concentration of local rice was displayed visually by ARCGIS 10.2. The Ordinary Kriging interpolation analysis was used to analyze spatial interpolation. The cadmium exposure was estimated by combining the concentration of cadmium in local rice with food consumption data. The health risk was assessed using a simple distribution model. **Results** The median of cadmium in 740 local rice samples was 0.069 mg/kg. The detection rate and over-limit rate were 95.68% and 11.49%, respectively. The areas with high cadmium concentrations in local rice were mainly distributed in the northwest of Lucheng City and the central area of Rui'an City. The average exposure and the exposure of high-consumption groups (P95) to cadmium through eating local rice in Wenzhou adult residents were 12.04 and 21.08 $\mu\text{g}/\text{kg}\cdot\text{BW}$, respectively. The average and high-consumption group exposure to cadmium in children were 17.02 and 32.04 $\mu\text{g}/\text{kg}\cdot\text{BW}$, respectively. The average exposure and the exposure of high-consumption groups to cadmium by eating local rice in Lucheng were greater than the provisional tolerable monthly intake (PTMI). **Conclusion** The cadmium exposure levels of 1.16% of all adult residents in Wenzhou by eating local rice were higher than the PTMI. Children with high rice consumption had a higher cadmium exposure level from local rice, and residents had a higher health risk of cadmium exposure by eating local rice in Lucheng.

Key words: Local rice; cadmium; exposure; health risk

收稿日期:2023-02-20

基金项目:温州市基础性科研项目(Y20210040)

作者简介:高四海 男 副主任医师 研究方向为食品安全风险监测 E-mail:463801475@qq.com

镉是一种重金属污染物,广泛存在于环境中,具有“致畸、致癌和致突变”的生物毒性,长期摄入可对机体肾脏、骨骼等重要器官产生严重的慢性损伤,美国佐治亚州亚特兰大的毒物和疾病登记处

(Agency for Toxic Substances and Disease Registry, ATSDR)将镉(Cd)列为危害人类健康的第六大毒性物质。土壤镉污染已成为严重的全球性环境问题,在亚洲、北美和欧洲的土壤中发现不同程度的镉污染,美国每年约释放2 000~6 500吨的环境镉^[1],我国约有2 000万公顷耕地被Cd污染,约占耕地总面积的五分之一,每年进入农田的Cd量高达1 417吨^[2]。环境中的镉容易被小麦、水稻等植物和农作物吸收,近年来大量研究表明我国大米存在重金属污染,污染的重金属种类主要为铅、镉、砷、汞等,其中镉污染大米的情况最为严重^[3-5]。从地区上看,南方地区的大米重金属污染问题比北方地区更加严重,尤其是江浙沪地区和珠三角地区较为严重^[6]。温州市经济发达,拥有发达的皮革、电镀、打火机等制造业和加工业。这些工业在生产加工过程中会产生大量的重金属污染,随着工业废水排放到外环境中。有研究显示,重金属铜、铅、镉、铬对温州市主要入海河流水体重金属污染贡献度较高^[7]。温州市一线蔬菜生产基地的土壤重金属污染较为严重,镉、铅和汞均超出了温州的背景值^[8]。外环境中的重金属污染通过生物富集作用,聚集在农作物中,最终通过食物链进入人体内。水稻是温州市最主要的粮食作物,2016年播种面积91 353.33 hm²,产量为60.7万吨,占温州市粮食播种面积的3.51%,总产占80%左右^[9]。大米作为温州市主要的粮食之一,其重金属镉污染事关当地人民群众的健康。本研究收集近年来温州市本地大米中镉的监测数据,分析其分布规律;同时结合本地居民食物消费量数据,对温州市居民食用本地大米摄入镉的健康风险进行评估,为温州市食品安全政策及居民膳食指导提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 大米中镉含量的数据来源

本研究选取2016—2021年温州市食品安全风险监测中本地大米的监测结果,样品采集种植环节,样品地区分布来自温州市9个有大米种植的县(市、区),各地样品量分别为鹿城区94份、瓯海区4份、永嘉县95份、乐清市110份、瑞安市186份、平阳县109份、苍南县107份、文成县16份、泰顺县19份,采样过程严格按照《食品安全风险监测工作手册》中规定的采样要求进行。

1.1.2 居民消费量数据

本研究中使用的居民大米消费量数据来自于2016年浙江省居民食物消费量调查中温州市居民

的调查数据,选取温州市龙湾区、瓯海区、平阳县作为居民消费量调查点。食物消费量数据采用3 d 24 h膳食回顾法收集,共调查2 733人,根据人群能量摄入、膳食消费模式及镉的危害特征,将人群分为<18周岁未成年组(男、女)、≥18周岁成年人组(男、女)。

1.2 方法

1.2.1 样品检测方法

大米中镉含量的检测按照GB 5009.15—2014《食品安全国家标准 食品中镉的测定》^[10]中的石墨炉原子吸收光度法进行测定,方法检出限为(Limit of detection, LOD)为0.000 1 mg/kg,各实验室在开展监测前均应参加盲样考核,盲样考核合格后方可开展相关实验的检测。同时,每年开展食品安全风险监测前市疾控中心统一组织培训,确保各实验室的检测水平基本一致。每批样品检测时均进行大米质控样检测,质控方法采用平行试验和加标回收试验,每10份样品进行平行样品检测和加标回收率检测,确保实验数据真实可靠。按GB 2762—2017《食品安全国家标准 食品中污染物限量》^[11]进行大米中镉含量超标情况的判定。

1.2.2 空间点模式分析及插值分析

根据样品中采样地点的详细地址,通过调用百度地图开放平台的JavaScript API接口,将文本地址批量转换为经纬度坐标。之后将经纬度数据导入温州市电子地图的数据库中,建立温州市本地大米样品信息的地理信息数据库,采用Arcgis 10.2软件进行地图绘制,实现样品采样地点的点空间位置信息可视化描述。

本研究采用普通克里金插值分析方法进行插值分析。普通克里金插值是克里金插值分析方法中的一种,它是以空间自相关为前提,以区域化变量理论为基础,以变异函数为主要工具的一种空间插值方法,实质是利用区域化变量的原始数据和变异函数的结构特点,对未采样点的区域化变量的取值进行线性无偏、最优估计。首先运用半变异函数(Semi-variogram)判断数据空间相关性是否显著,该函数以任意两个样本点之间的距离 h 为自变量,在 h 给定的条件下,其函数值估计方法如下^[12]:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{|s_i - s_j| = h} [z(s_i) - z(s_j)]^2$$

式中, $N(h)$ 是距离为 h 的样本点对的个数, S_i 和 S_j 分别代表相距为 h 的采样点, $z(s_i)$ 和 $z(s_j)$ 分别代表的 S_i 和 S_j 属性值。 $\gamma(h)$ 最大值与最小值的差 $\gamma_{\max} - \gamma_{\min}$ 可以度量空间相关性的强度。 $\gamma_{\max} - \gamma_{\min}$ 越大,空间相关性越强。

在数据存在显著的空间相关性的前提下,可以采用普通克里金方法估计未知点上的值。普通克里金方法的基本公式如下^[12]:

$$\hat{Z}(s_0) = \sum_{i=1}^n W(s_i) Z(s_i)$$

式中: $W(s_i)$ 为 $Z(s_i)$ 分配所得权重, $Z(s_i)$ 为已知位置 s_i 处的观测值; $\hat{Z}(s_0)$ 为估计位置 s_0 处的估计值, n 为估计 $\hat{Z}(s_0)$ 值所采用的实际观测值个数。

半变异函数及普通克里金的具体计算过程由 Arcgis 10.2 软件完成。

1.2.3 暴露评估方法

本研究中,对温州市本地大米中重金属镉的健康风险暴露评估采用简单分布模型的方法,计算每个个体每月每公斤体质量因食用大米摄入镉的暴露量。计算公式:

$$Exp_j = \frac{F \times C}{BW_j} \times 30$$

式中: Exp_j 为调查人群中第 j 个个体每月每千克体质量因食用大米摄入镉的暴露量, $\mu\text{g}/\text{kg}\cdot\text{BW}$; F 为该个体每日大米的消费量, g/d ; C 为大米中重金属镉含量的均值, mg/kg ; BW_j 为第 j 个个体的体质量, kg ; 30为平均每月天数。

在得到个体因食用本地大米摄入镉的暴露量基础上,可获得所有调查者因食用本地大米镉暴露量的频数分布,并可计算人群食用本地大米镉暴露的平均值和大米高消费人群(P95)的摄入量。将人群食用本地大米镉暴露量与镉的每月可耐受摄入量(Provisional tolerable monthly intake, PTMI)进行比较,评价人群因食用本地大米摄入镉的健康风险。

联合国粮食及农业组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO)和世界卫生组织(World Health Organization, WHO)联合食品添加剂专家委员会(Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives, JECFA)制定镉的 PTMI 为 $25 \mu\text{g}/\text{kg}\cdot\text{BW}$ ^[13]。

1.3 统计学分析

采用 SPSS 22.0 软件进行数据统计分析。数据录入与整理采样用 Excel 2016。根据世界卫生组织

全球环境监测系统/食品污染监测与评估规划(Global Environment Monitoring System-Food Contamination Monitoring and Assessment Programme, GEMS/FOOD)第二次会议上提出的“食品中低水平污染物可信评价”原则,由于本研究总的检出率为 95.68%,因此本研究对未检出(Not detected, ND)的数据均赋予 1/2LOD 值进行统计计算^[14]。以 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 本地大米中重金属镉的污染状况

2016—2021 年共采集温州市地产大米 740 份,大米中重金属镉检出范围为 ND~1.960 mg/kg,中位数为 0.069 mg/kg,检出率为 95.68%,超标率为 11.49%,不同年份大米重金属镉的含量差异无统计学意义($\chi^2=10.07, P>0.05$)(表 1)。从频数分布图和箱式图看,大米中镉的分布呈“右偏态”,以“未超标”数据为主,存在部分离群值(图 1)。

2.2 本地大米中重金属镉的空间分布及插值分析

温州市本地大米镉含量的空间分布显示,不同地区大米镉的含量不同($\chi^2=180.16, P<0.05$),大米镉含量小于 0.20 mg/kg 的样品空间分布比较分散,镉含量超标的大米主要集中在鹿城区、瑞安市、永嘉县、平阳县、苍南县(图 2A)。鹿城区、瑞安市、永嘉县、平阳县、苍南县大米中镉的中位数分别为 0.217、0.093、0.050、0.057、0.066 mg/kg。空间插值分析显示,温州市本地大米镉含量较高的地方主要集中在鹿城区西北部及瑞安市中部地区,其他地区大米镉含量均较低。

2.3 不同人群大米重金属镉的膳食暴露评估

温州市居民食用本地大米摄入镉的暴露量及健康风险评估见表 2。结果显示,未成年组食用本地大米镉的平均月暴露量(均值)和高消费人群月暴露量(P95)分别为 17.02、32.04 $\mu\text{g}/\text{kg}\cdot\text{BW}$;成人组经食用本地大米镉的平均月暴露量和高消费人群月暴露量分别为 12.04、21.08 $\mu\text{g}/\text{kg}\cdot\text{BW}$ 。未成

表 1 2016—2021 年温州市本地大米重金属镉的污染情况

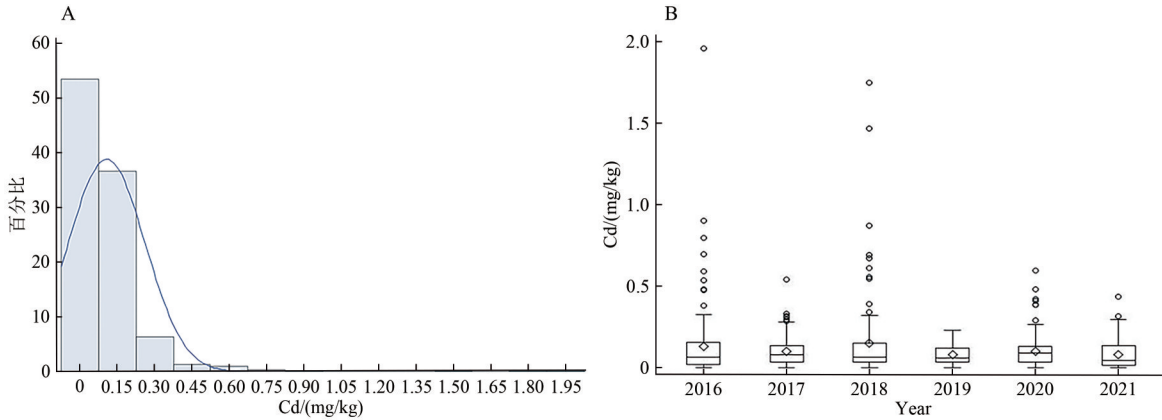
Table 1 The cadmium pollution of local rice in Wenzhou from 2016 to 2021

年份	样品数/份	镉含量			检出率/%	超标率/%*
		均值/(mg/kg)	中位数/(mg/kg)	检出范围/(mg/kg)		
2016	140	0.130	0.068(0.137)	ND~1.960	90.00	17.86
2017	133	0.101	0.080(0.099)	ND~0.540	93.23	12.78
2018	110	0.151	0.068(0.114)	ND~1.750	98.18	16.36
2019	111	0.079	0.063(0.088)	0.001~0.230	100.00	2.70
2020	133	0.102	0.090(0.096)	ND~0.598	94.74	6.02
2021	113	0.082	0.044(0.117)	0.0005~0.436	100.00	12.39
合计	740	0.108	0.069(0.107)	ND~1.960	95.68	11.49

注:*为参照 GB 2762—2017 大米中镉的限量值为 0.2 mg/kg

年组镉的平均月暴露量和高消费人群月暴露量均高于成人组。未成年组镉的高消费人群月暴露量大于 PTMI, 有 12.84% 的未成年人食用本地大米镉暴露量超过 PTMI。不论是未成年组还是成人组, 男性食用本地大米镉的暴露量均高于女性。

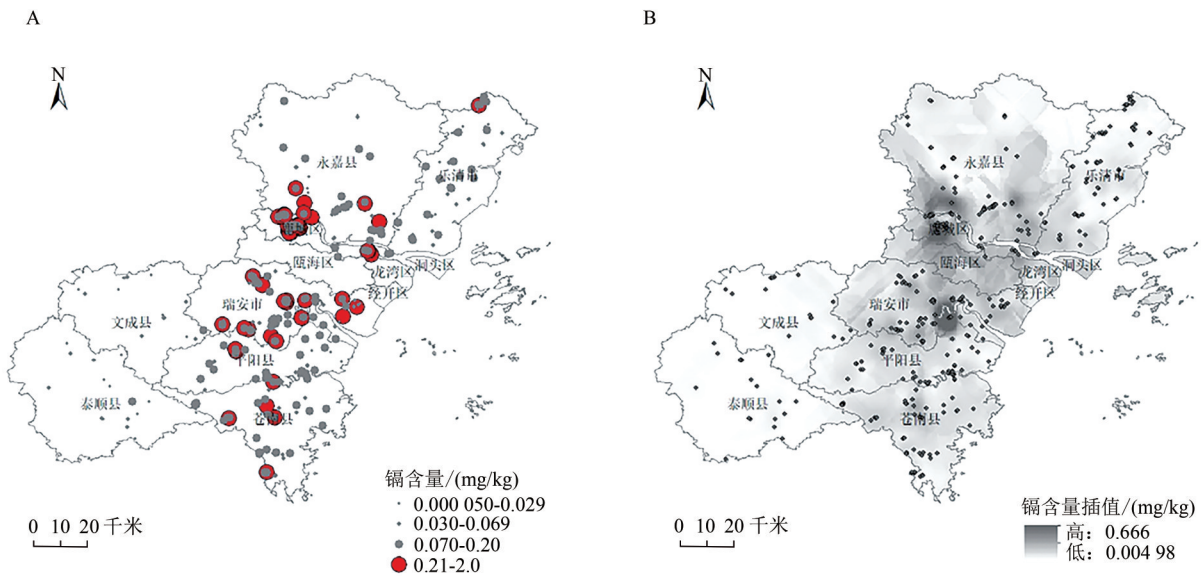
采用大米镉含量较高的两个地区鹿城区和瑞安市的数据进行镉的暴露评估(表 3), 结果显示, 不论未成年组还是成年组食用鹿城区本地大米镉的平均月暴露量和高消费人群月暴露量均大于 PTMI, 有 83.85% 的未成年人、67.82% 的成人食用



注:A:本地大米中镉的频数分布图;B:不同年份本地大米中镉的箱式图

图1 2016—2021年温州市本地大米重金属镉分布情况

Figure 1 The cadmium distribution of local rice in Wenzhou from 2016 to 2021



注:A:温州市本地大米中镉含量的空间点模式分布图,图中原点代表每个样品的采样点地理位置及样品中镉含量,原点越大代表大米中镉含量越高,红色原点代表大米中镉含量超标;B:利用空间插值分析后显示温州市本地大米镉含量的空间分布,图中原点代表每份样品的采样点地理位置,图中颜色深浅代表不同地区大米镉的含量,颜色越深代表大米中镉含量越高

审图号:浙温S(2018)6号

图2 温州市本地大米中镉含量的空间点模式及空间插值分布

Figure 2 The spatial point pattern and the spatial interpolation distribution of cadmium content in local rice in Wenzhou

表2 温州市本地居民经食用温州地产大米摄入重金属镉的暴露评估

Table 2 The exposure assessment of cadmium among local residents in Wenzhou by consuming local rice

人群	人数	平均体质量/ kg	大米平均 消费量/(g/d)	高消费人群(P95) 大米消费量/(g/d)	平均月暴露量/ ($\mu\text{g}/\text{kg}\cdot\text{BW}$)	高消费人群月 暴露量/($\mu\text{g}/\text{kg}\cdot\text{BW}$)	超过 PTMI 个体 比例/%	
未成年组	男	288	32.63	162.58	283.33	18.10	32.53	15.97
	女	195	32.09	136.40	250.00	15.42	29.89	8.72
	合计	483	32.41	152.01	266.67	17.02	32.04	12.84
成人组	男	1 149	66.60	246.41	403.33	12.19	21.30	1.31
	女	1 101	55.77	201.78	343.33	11.89	20.90	1.00
	合计	2 250	61.30	224.57	390.00	12.04	21.08	1.16

表3 居民食用鹿城区及瑞安市本地大米摄入重金属镉的暴露评估

Table 3 The exposure assessment of cadmium in residents by consuming local rice in Lucheng and Rui'an

人群	鹿城			瑞安			
	平均月暴露量/ ($\mu\text{g}/\text{kg}\cdot\text{BW}$)	高消费人群(P95)月 暴露量/($\mu\text{g}/\text{kg}\cdot\text{BW}$)	超过 PTMI 个体比例/%	平均月暴露量/ ($\mu\text{g}/\text{kg}\cdot\text{BW}$)	高消费人群(P95)月 暴露量/($\mu\text{g}/\text{kg}\cdot\text{BW}$)	超过 PTMI 个体比例/%	
未成年组	女	40.70	78.87	77.44	16.42	31.82	11.79
	男	47.76	85.85	88.19	19.27	34.64	20.49
	合计	44.91	84.55	83.85	18.12	34.12	16.98
成人组	女	31.37	55.14	67.85	12.66	22.25	1.63
	男	32.16	56.20	67.80	12.98	22.68	2.18
	合计	31.78	55.64	67.82	12.82	22.45	1.91

鹿城区本地大米镉暴露量超过 PTMI。人群食用瑞安本地大米镉暴露情况与温州市情况类似,只有未成年组镉的高消费人群暴露量大于 PTMI。

3 讨论

与其他重金属相比,镉是一种很容易被水稻吸收的重金属。从全国范围看,我国稻米受镉污染的情况呈现南重北轻、东重西轻的趋势,不同省大米中镉含量差异显著^[4,15]。本研究分析近6年温州本地大米中镉的含量,发现本地大米镉的检出范围为 ND~1.960 mg/kg,平均含量为 0.108 mg/kg,低于顾丰颖等^[16]报道的全国稻米镉的平均含量,但高于华东地区稻米镉的平均含量(0.101 mg/kg)及最高值(1.47 mg/kg)。可能是由于长期以来温州市电镀产业比较发达,土壤、水体受工业污染相对严重^[4],导致水稻吸收富集镉的含量较高。而且土壤一旦被重金属污染,其修复过程比较缓慢,重金属的含量会一直比较稳定。因此,研究分析不同年份大米中重金属镉的含量,发现不同年份大米镉的含量无差异。

重金属污染在自然界分布往往呈现一定的空间相关性,利用空间统计学研究土壤重金属空间分布规律目前应用比较广泛,而食品中污染物的空间分布研究起步晚^[17-18]。类似的研究较少,如王欣梅等^[19]利用空间统计学分析了某省大米砷的空间分布规律;陈夏威等^[20]利用空间插值分析探索食品中铅污染空间分布。本研究先利用空间点模式获得温州市本地大米镉含量分布比较分散,镉超标的大米主要集中在鹿城区、瑞安市、永嘉县、平阳县、苍南县,这些区域分布着温州辖区内3条主要的入海河流(瓯江、飞云江、鳌江),有研究表明这3条河流均存在不同程度的重金属污染^[7]。由于监测中无法对所有大米种植地进行采样,本研究采用空间插值方法,通过构建模型和结合现有检测数据,获得温州市所有地区大米镉的浓度,从整体上掌握了本地大米中镉的空间分布,并通过地图直观地呈现出温州市本地大米总镉含量较高的地方主要集中在鹿

城区西北部及瑞安市中部地区。为进一步开展高风险地区大米中镉的风险评估提供数据支持。

有研究表明,居民镉的摄入以膳食暴露为主(占99%以上),而膳食中镉的暴露又主要来源于谷物^[21]。本研究采用简单分布模型的评估方法,获得本地成年居民食用温州地产大米镉的平均月暴露量和高消费人群月暴露量分别为 12.04、21.08 $\mu\text{g}/\text{kg}\cdot\text{BW}$,均未超过 PTMI,说明温州市居民食用本地大米镉暴露的健康风险比较低,与国内大部分学者研究结果一致^[22-23]。居民食用大米镉的暴露量与大米中镉的含量、个体大米消费量及体质量相关,本研究发现不论是未成年组还是成人组,男性食用本地大米镉的暴露量均高于女性,这可能与男性本地大米消费量高于女性有关。同时国内外研究显示,不同年龄组膳食中镉的暴露量不同,一般低年龄未成年组暴露量较高^[21,24],本研究还发现镉的平均月暴露量和高消费人群月暴露量未成年组均高于成人组,而且未成年组大米高消费人群食用本地大米镉的月暴露量达到 32.04 $\mu\text{g}/\text{kg}\cdot\text{BW}$,超过 PTMI,未成年组超过 PTMI 的人群达到 12.84%,提示大米高消费未成年人食用本地大米镉的暴露水平较高,需要引起关注。

根据本地大米空间分布结果,本研究还进一步评估了温州市本地大米镉污染较严重的鹿城区和瑞安市居民食用本地大米镉的暴露风险,结果也提示,居民食用瑞安本地大米镉暴露情况与温州市情况类似,只有未成年组镉的高消费人群暴露量大于 PTMI。而食用鹿城区本地大米镉的平均暴露量和高消费人群暴露量均大于 PTMI,有 83.85% 的未成年人、67.82% 的成人食用鹿城区本地大米镉暴露量超过 PTMI,提示居民食用鹿城区本地大米镉暴露的健康风险比较高。因此,要重点加强镉污染严重地区大米从农田到餐桌的全过程监管和监测,采取有效的防控措施,通过土壤修复、稻米加工等方式,尽量降低大米中镉的含量。同时,要严格控制镉超标大米流入市场,开展精准评估,及时掌握大米中镉污染来源与人群健康影响。

本研究存在一些不确定性因素,仅评估了居民食用本地大米镉的暴露量,缺乏其他膳食中镉的暴露量,无法获得温州市居民膳食中镉的暴露量及膳食镉暴露中大米镉的贡献率;所用食物消费量数据为2016年浙江省居民食物消费量调查中温州市居民的调查数据,随着人们生活水平不断提高,饮食结构和饮食习惯发生一定变化,目前的食物消费模式和消费量与2016年相比存在的差别具有不确定性。虽然本评估发现大米高消费未成年人食用本地大米及居民食用鹿城区本地大米镉暴露较高,但是由于大米中镉经过加工及进入人体后产生生物有效性,受加工方式、肠道对镉的吸收能力、体内微量元素营养状态等因素的影响,直接用本地大米镉的暴露量来评估镉对人体的健康风险,可能会高估膳食中的健康危害。

参考文献

- [1] SCHRODER J L, BASTA N T, SI J T, et al. *In vitro* gastrointestinal method to estimate relative bioavailable cadmium in contaminated soil[J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, 37(7): 1365-1370.
- [2] CAI K, YU Y Q, ZHANG M J, et al. Concentration, source, and total health risks of cadmium in multiple media in densely populated areas, China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(13): 2269.
- [3] 何露露, 贾非然, 李欣童, 等. 南京市市售大米、蔬菜中6种微量元素含量调查及健康风险评估[J]. *职业与健康*, 2020, 36(24): 3364-3367.
- HE L L, JIA F R, LI X T, et al. Content survey and health risk assessment of six trace elements in rice and vegetables sold in Nanjing city[J]. *Occupation and Health*, 2020, 36(24): 3364-3367.
- [4] 覃焱, 韦燕燕, 顾明华. 中国市售大米重金属含量及健康风险评估[J]. *食品工业*, 2020, 41(11): 332-335.
- QIN Y, WEI Y Y, GU M H. The heavy metal content monitoring and dietary risk assessment of commercial rice in China[J]. *The Food Industry*, 2020, 41(11): 332-335.
- [5] 张慧娟, 王齐, 高媛, 等. 水稻重金属积累分布与风险分析研究综述[J]. *环境科学与技术*, 2020, 43(8): 64-72.
- ZHANG H J, WANG Q, GAO Y, et al. Accumulation, distribution and risk assessment of heavy metals in rice: A review[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 43(8): 64-72.
- [6] 陆姗姗, 毕颖, 李辉. 我国大米重金属污染现状及检测技术进展[J]. *农业技术与装备*, 2020, 365(5): 9-10.
- LU S S, BI Y, LI H. The Current situation of rice heavy metal pollution and detection technology in China[J]. *Agricultural Technology & Equipment*, 2020, 365(5): 9-10.
- [7] 徐慧韬, 徐秀丽, 王丽平. 温州主要入海河流6种重金属的空间分布及风险评估[J]. *水生态学杂志*, 2021, 42(1): 42-48.
- XU H T, XU X L, WANG L P. Spatial distribution and risk assessment of six heavy metals in rivers flowing into sea at Wenzhou, Zhejiang province[J]. *Journal of Hydroecology*, 2021, 42(1): 42-48.
- [8] 刘恩玲, 杨建军, 潘琇, 等. 温州市农业生产基地土壤重金属含量及其污染评价[J]. *浙江农业科学*, 2010, 51(3): 629-632.
- LIU E L, YANG J J, PAN X, et al. Soil heavy metal content and pollution evaluation in agricultural production base in Wenzhou city[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2010, 51(3): 629-632.
- [9] 夏如达, 吴建克, 黄宗贵. 2007—2016年温州市水稻生产和品种现状分析及发展建议[J]. *中国种业*, 2017(12): 36-39.
- XIA R D, WU J K, HUANG Z G. Analysis and development suggestions of rice production and varieties in Wenzhou from 2007 to 2016[J]. *China Seed Industry*, 2017(12): 36-39.
- [10] 国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中镉的测定: GB 5009.15—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- National Health and Family Planning Commission. National food safety standard-Determination of cadmium in foods: GB 5009.15—2014[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015.
- [11] 国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中污染物限量: GB 2762—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- National Health and Family Planning Commission, National Food and Drug Administration. National food safety standard-Maximum levels of contaminants in foods: GB 2762—2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [12] 肖革新. 空间统计实战[M]. 北京: 科学出版社, 2018: 107-108.
- XIAO G X. Space Statistics Practice[M]. Beijing: Science Press, 2018: 107-108.
- [13] World Health Organization. Evaluation of certain food additive and contaminants[J]. *World Health Organization Technical Report Series*, 2011(960): 1.
- [14] 宫春波, 王朝霞, 孙月琳, 等. 食品安全风险监测数据统计处理常见问题探讨[J]. *中国食品卫生杂志*, 2013, 25(6): 575-578.
- GONG C B, WANG Z X, SUN Y L, et al. Application of statistic analysis processing on food safety risk surveillance data[J]. *Chinese Journal of Food Hygiene*, 2013, 25(6): 575-578.
- [15] 张荣. 中国主要产粮区稻米镉污染调查及镉污染稻米的加工利用[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2017.
- ZHANG R. Investigation on cadmium pollution of rice in main grain-producing areas of China and its processing and utilization[D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2017.
- [16] 顾丰颖, 丁雅楠, 朱金锦, 等. 我国稻米镉污染调查及健康风险评估[J]. *中国食品卫生杂志*, 2022, 34(5): 997-1004.
- GU F Y, DING Y N, ZHU J J, et al. Exposure and health risk assessment of cadmium in rice in China[J]. *Chinese Journal of Food Hygiene*, 2022, 34(5): 997-1004.
- [17] 肖革新, 何来英, 杨冰, 等. 空间统计在长江流域大米镉分布特征研究的应用[J]. *中国食品卫生杂志*, 2018, 30(1):

- 59-62.
XIAO G X, HE L Y, YANG B, et al. The application of spatial statistics on the cadmium contamination in rice around Yangze watershed [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2018, 30(1): 59-62.
- [18] 姜桥. 统计方法在稻谷重金属污染情况分析中的应用研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2017.
Jiang Q. Study on the application of statistical method in the analysis of heavy metal pollution in rice [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2017.
- [19] 王欣梅, 肖革新, 梁进军, 等. 空间统计学在食品污染物分布研究中的应用[J]. 中华流行病学杂志, 2019, 40(2): 241-246.
WANG X M, XIAO G X, LIANG J J, et al. Application of spatial statistics in studying the distribution of food contamination [J]. Chinese Journal of Epidemiology, 2019, 40(2): 241-246.
- [20] 陈夏威, 罗赞, 何彬洪, 等. 空间插值分析方法在食品铅污染空间分布及预测中的应用研究[J]. 现代预防医学, 2021, 48(7): 1185-1187.
CHEN X W, LUO B, HE B H, et al. Applied research of spatial interpolation analysis method on the spatial distribution and forecasting of lead contamination in food [J]. Modern Preventive Medicine, 2021, 48(7): 1185-1187.
- [21] 蒋玉艳, 马宁, 蒙浩洋, 等. 广西居民重金属镉膳食摄入量及其健康风险评估[J]. 中国食品卫生杂志, 2021, 33(2): 191-195.
JIANG Y Y, MA N, MENG H Y, et al. Risk assessment on the dietary exposure of cadmium in Guangxi residents [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2021, 33(2): 191-195.
- [22] 黄飞飞, 王瑛, 张宁. 苏州市地产大米重金属污染状况及人群膳食暴露风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(23): 9039-9045.
HUANG F F, WANG Y, ZHANG N. Heavy metal pollution status of local rice and human dietary exposure risk assessment in Suzhou city [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2020, 11(23): 9039-9045.
- [23] 焦泽鹏, 李焕勇. 广东省市售大米中镉的污染水平及其健康风险评估[J]. 食品与发酵科技, 2017, 53(4): 104-108.
JIAO Z P, LI H Y. The contamination level and health risk assessment of cadmium in retailed rice in Guangdong Province [J]. Sichuan Food and Fermentation, 2017, 53(4): 104-108.
- [24] LEBLANC J C, GUÉRIN T, NOËL L, et al. Dietary exposure estimates of 18 elements from the 1st French Total Diet Study [J]. Food additives and contaminants, 2005, 22(7): 624-641.