

风险评估

我国稻米镉污染调查及健康风险评估

顾丰颖,丁雅楠,朱金锦,王锋

(中国农业科学院农产品加工研究所/农业农村部农产品加工综合性重点实验室,北京 100193)

摘要:目的 基于我国主产区稻米镉污染现状的调查结果,对不同人群稻米镉暴露的健康风险进行评估,为我国稻米合理膳食消费与政府安全监管提供参考依据。方法 采用电感耦合等离子体质谱法测定我国主产区 6 249 份稻米中的镉含量,分析稻米镉污染水平及分布特征;基于蒙特卡洛模拟,估算稻米镉暴露的风险熵(HQ)及癌症风险指数(CR)的累积概率分布,评估食用稻米的潜在健康风险。结果 采用区域产量加权计算四个主产区稻米镉平均含量为 0.1661 mg/kg,超标率为 25.99%,其中华中地区稻米样品镉超标率最高为 56.64%;分析表明,东北地区稻米镉暴露水平较低,不存在致癌和非致癌健康风险,其他地区处于 HQ>1 非致癌危害风险水平的人群概率范围分别为成人 0.06%~7.12%、儿童 0.15%~11.44%,处于 CR>10⁻⁴ 致癌危害风险水平的人群概率范围分别为成人 0.16%~72.55%、儿童 0.26%~77.93%,其中华中地区稻米镉暴露导致的健康风险最高。结论 我国居民存在一定的稻米镉暴露健康风险,华中地区稻米镉暴露的致癌和非致癌健康风险水平较高,儿童较成人受到的稻米镉暴露风险更高,提示重点区域和儿童的稻米镉暴露情况应予以重视。

关键词: 稻米; 重金属; 镉; 风险评估

中图分类号:R155

文献标识码:A

文章编号:1004-8456(2022)05-0997-08

DOI:10.13590/j.cjfh.2022.05.021

Exposure and health risk assessment of cadmium in rice in China

GU Fengying, DING Yanan, ZHU Jinjin, WANG Feng

(Institute of Food Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Science/Key Laboratory of Agro-Products Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100193, China)

Abstract: Objective To provide reference for rational rice consumption and government safety supervision in China, the potential health risk in different populations was evaluated based on the investigation results of Cadmium (Cd) exposure from rice. **Methods** Cd of 6 249 rice samples was determined by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS), the Cd pollution level and distribution characteristic in rice were analyzed. Monte-Carlo simulations were employed to estimate the cumulative distribution function of Hazard quotients (HQ) and Cancer-risk index (CR) of Cd exposure from rice to assess the potential health risks of rice consumption. **Results** The average Cd content in rice samples from four regions, weighted by regional yield, was 0.1661 mg/kg, 25.99% of the overall rice samples and 56.64% of the rice samples from Central China exceeded the national limit. Analysis showed that Cd exposure level from rice in Northeast China was low and there was no carcinogenic or non-carcinogenic health risk. In other regions, the probability range of non-carcinogenic health risk level of HQ>1 was 0.06%~7.12% for adults and 0.15%~11.44% for children, respectively. The probability range of carcinogenic risk level of CR>10⁻⁴ was 0.16%~72.55% for adults and 0.26%~77.93% for children, respectively. The potential health risk caused by Cd exposure from rice was highest in Central China. **Conclusion** There are high health risks of Cd exposure from rice in part of China, especially in Central China. The exposure risk of Cd from rice to children was higher than that of adults. It's suggested that more attention should be paid to Cd exposure from rice for the critical areas and children.

Key words: Rice; heavy metals; cadmium; risk assessment

收稿日期:2021-11-29

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC1600602);科技基础性工作专项(2015FY111300)

作者简介:顾丰颖 女 助理研究员 研究方向为食品安全检测及品质调控 E-mail:fengyingfy@163.com

通信作者:王锋 男 研究员 研究方向为食品安全检测及品质调控 E-mail:fengwang88@163.com

随着城市化、工业化进程的不断加速,重金属污染问题已经成为世界范围内严重的环境问题之一。镉(Cadmium, Cd)作为一种有色重金属,天然存在于地壳表层中,在电池、防腐蚀、光伏、显影剂、颜料添加剂等方面均有广泛应用,据报道美国每年约释放 2 000~6 500 吨的环境镉^[1],我国每年进入农田的镉量高达 1 417 吨^[2]。高镉暴露可在体内发生积累,引发肾脏疾病、骨骼损伤、消化道及呼吸道损伤、癌症等^[3],已成为严重影响人群健康的风险因素之一。

对于非吸烟人群,膳食是人群镉暴露的主要途径^[4]。水稻是我国重要的粮食作物,2020 年我国水稻产量达 2. 118 6 亿吨,人均占有量每年约 150 kg,是我国重要的主食原料之一,因此其安全性受到广泛关注。水稻易于从环境中富集重金属,尤其是镉元素^[5]。近年来,美国、澳大利亚、法国、意大利、日本、埃及、印度、西班牙、斯里兰卡、土耳其等多个国家均报道出大米镉超标情况^[6]。我国学者也相继报道了各地区稻米镉的污染情况,朱凤鸣等^[7]调研显示,由于高土壤背景值,昆明西郊地区生产的稻米镉含量达 0. 28 mg/kg;杨定清等^[8]调查显示四川省三块实验基地稻米镉含量范围在 0. 22~0. 38 mg/kg 之间;LYU 等^[9]对龙岩地区水稻重金属污染情况的调研显示,该地区采集样品中镉平均值为 0. 064 mg/kg,最高值为 0. 323 mg/kg。但不同时间、不同地区进行的调查及风险评估结果存在较大的差异。

本研究采集了我国东北、华中、华南、华东等稻米主产区 6 000 余份籽粒样品,检测其镉含量,分析我国水稻镉污染水平,评估我国稻米镉暴露对人体健康的影响。

1 材料与方法

1.1 稻米样品

2016—2017 年,在我国 600 余个水稻主产县区主要通过合作社收集稻米样品,每个主产区至少 6 份,共计收集稻米样品 6 249 份,包括东北地区 396 份、华中地区 3 501 份,华东地区 1 575 份及华南地区 777 份。每份样品以(合作社)地块为单位按 5 点法取样后混合均匀,取样量不低于 1 kg,于自封袋密封保存。

1.2 主要仪器与试剂

Agilent 7700×电感耦合等离子体质谱仪(美国安捷伦科技有限公司),CK2000 高通量组织研磨仪(托摩根生物科技有限公司),DigiBlock EHD36 电热板消解仪(北京莱伯泰科仪器股份有限公司),65% 浓硝酸(BV-III)、30% 过氧化氢(BV-III)(北京化学

试剂研究所)。

大米标准物质 GBW(E) 100348,镉标准值 0. 24 mg/kg,不确定度 0. 01,钢铁研究总院分析测试研究所钢研纳克检测技术有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 样品预处理

样品整谷后取 50 g 左右稻米(整谷未去除麸质的糙米)清洗 3 次,60 °C 干燥至恒重,研磨粉碎,过 40 目标准筛,采用电热板法消解。冷却定容至 50 mL,待测。

1.3.2 稻米镉的测定

参考国家标准 GB/T 35876—2018《粮油检验 谷物及其制品中钠、镁、钾、钙、铬、锰、铁、铜、锌、砷、硒、镉和铅的测定 电感耦合等离子体质谱法》,采用电感耦合等离子体质谱法分析样品中镉的含量。

仪器条件:最大功率 1 550 W;载气流速 1. 14 L/min;采样深度 7 mm;雾化室温度 2 °C;Ni 采样锥,Ni 载取锥;选 72 Ge 为内标元素。每检测 10 个稻米样品插入质控样本,用于校正仪器并检测分析期间潜在的样品污染。每个样品设 3 个重复。镉的检出限为 0. 002 mg/kg。

1.4 评估方法

1.4.1 污染水平分析

采用单因子污染指数(Single factor pollution index, SFPI)法对 4 个主产区所有稻米样品镉污染程度进行评估。

$$P=C/S \quad \text{式(1)}$$

式中, P 为污染指数; C 为样品镉元素实测浓度值(mg/kg); S 为样品中镉元素的国家限量值(mg/kg),根据 GB 2762—2017《食品安全国家标准食品中污染物限量》我国稻米(以糙米计)镉的限量值为 $\leq 0. 2$ mg/kg。参考 NYT 398—2000《农、畜、水产品污染监测技术规范》,按照 SFPI 产品质量分级标准将稻米样品划分为一级产品($P \leq 0. 6$)、二级产品($0. 6 < P < 1. 0$)、三级产品($P \geq 1. 0$)三级,并基于此进行统计分析。

1.4.2 人群健康风险评估

参考美国环境保护署文件^[10],采用风险熵(Hazard quotient, HQ)及癌症风险指数(Cancer-risk index, CR)对稻米镉摄入导致的非致癌风险及致癌风险进行评估。考虑到稻米镉浓度、摄入量、暴露频率、人群敏感性等差异,参考 LYU 等^[11]的方法,采用蒙特卡洛(Monte-Carlo)模拟估算不同地区稻米镉暴露导致成人和儿童 HQ 和 CR 的概率分布,并应用敏感性分析确定各参数对人群健康风险的贡献。

$$EDI = (C \times IR \times EF \times ED) / (BW \times AT) \quad \text{式(2)}$$

$$HQ = EDI / RfD \quad \text{式(3)}$$

$$CR = EDI \times CSF \quad \text{式(4)}$$

其中 EDI 为镉的估计每日摄入量(mg/kg·d);C 为稻米样品中的镉含量(mg/kg)。式中其他参数含义及数值见表 1。此次调查的稻米镉含量分布符合对

数正态分布,输入参数 C 使用对数正态分布函数, IR、BW、RfD 和 CSF 等参数使用三角分布计算, EF、ED、AT 以定值带入模拟(表 1)。HQ>1 代表具有非致癌风险,CR 的可接受范围为 $1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-6}$, CR 超过 1×10^{-4} 被认为对人类具有致癌性健康风险^[10]。

表 1 我国稻米镉人群健康风险评估模型参数

Table 1 Parameter values for human health risk assessment model of cadmium contamination in rice

| 参数符号 | 含义 | 分布(数值) | 来源 |
|---------------|--------------------------------|--|---------|
| RfD/(mg/kg·d) | 参考食用剂量 oral reference dose | TRI(0.001, 0.001, 0.01) | [12] |
| CSF/(kg·d/mg) | 癌症斜率因子 cancer slope factor | TRI(0, 0.38, 0.38) | [13] |
| IR/(kg/d) | 每日摄入量 intake rate | 儿童: TRI(0.25, 0.2885, 0.30) 成人: TRI(0.28, 0.3367, 0.35) | [14-15] |
| BW/kg | 体质量 body weight | 儿童: TRI(26.5, 31, 35.5) 成人: TRI(55.5, 60.7, 66) | [14-15] |
| EF/(d/year) | 暴露频率 exposure frequency | 350 | [11] |
| ED/year | 暴露持续时间 exposure duration | 儿童: 9 成人: 70 | [11] |
| AT/(d/year) | 平均暴露次数 averaging exposure time | ED×365 | [11] |

注: TRI: 三角分布, TRI(最小值, 最可能值, 最大值)

1.5 统计学方法

所有样本数据进行 3 次测定, 采用 SPSS 23.0 软件中的单因素方差分析和 Dunnett's T₃ 多重比较法对试验结果进行数据统计分析, 结果以平均值±标准差($\bar{X} \pm S$)表示, 不同字母表示数据间有显著性差异($P < 0.05$); 采用 Oracle Crystal Ball 11. 1. 2. 4 软件进行 Monte-Carlo 模拟, 试验次数 10 000 次; 采用 OriginPro 2016 软件进行曲线拟合和图像绘制。

2 结果

2.1 稻米镉含量分析

为减少各地区采样数量不一的影响, 客观地反应我国稻米镉含量的总体情况, 将 2019 年我国各省地区水稻产量占比(数据来源国家统计局)作为校正因子, 对 4 个主产区稻米镉含量的平均值及超标率进行加权计算。东北、华中、华东、华南地区水稻产量占比分别为 21. 30%、40. 00%、26. 26% 及 12. 44%, 结合 6 249 份采集样本的实际调查数据, 加权计算后 4 个主产区稻米平均镉含量为 0.1661 ± 0.2806 mg/kg, 低于 0.2 mg/kg 限量值 16. 95%, 总超标率为 25. 99%(表 2)。不同区域稻米镉含量存在较大差异。华中地区稻米样品超标最严重, 平均值高达 0.3205 mg/kg, 为限量值的 1.6 倍, 56. 64% 的样品超过我国现行稻米镉限量标准(0.2 mg/kg); 华东、华南地区样品的平均含量在 0.1 mg/kg 左右, 2 地区样品超标率分别为 11. 24% 和 3. 47%; 东北地区的稻米相对安全, 样品镉平均含量仅为 0.0075 ± 0.0104 mg/kg, 未检出超标样品。

4 个产区稻米镉含量分布均呈对数正态分布

表 2 我国稻米镉含量统计结果

Table 2 Statistical results of cadmium content in rice in China

| 样品采集范围 | 样品数量/份 | 镉含量范围/(mg/kg) | 镉含量/(mg/kg) | 超标率/% |
|--------|--------|---------------------------|--------------------------|--------|
| 东北地区 | 396 | ND~ 1.4×10^{-1} | 0.0075 ± 0.0104^a | 0 |
| 华中地区 | 3 501 | ND~3.28 | 0.3205 ± 0.3240^a | 56.64 |
| 华东地区 | 1 575 | ND~1.47 | 0.1012 ± 0.1425^c | 11.24 |
| 华南地区 | 777 | ND~ 3.24×10^{-1} | 0.0839 ± 0.0553^d | 3.47 |
| 总体 | 6 249 | ND~3.28 | $0.1661 \pm 0.2806^{b*}$ | 25.99* |

注: ND 为未检出, *为按产量加权后数值, 不同字母表示数据间有显著性差异($P < 0.05$)

(图 1), 总体向低浓度偏移, 这与福建等地调查结果一致^[16], 并与土壤重金属含量的分布类似^[17]。其中, 华中地区镉含量分布范围较宽, 主体分布在 ND~0.8821 mg/kg(1.5 倍四分位距)范围内, 中位值为 0.2300 mg/kg, 低于平均值 28.2%, 说明华中地区高镉含量稻米样品比例偏高; 华东和华南地区稻米镉含量 90 百分位点值分别为 0.2152 mg/kg 和 0.1643 mg/kg; 东北地区稻米镉含量集中分布在 ND~0.0161 mg/kg 的范围内, 仅有 3 个异常值, 且均未超过国家标准限量。

2.2 稻米镉的污染水平

根据单因子污染指数等级划分, 一级产品表明样品的污染物(镉)含量接近背景值或略高于背景值, 属于安全性产品; 二级产品为样品的污染物(镉)含量较高, 属于安全预警性产品; 三级产品为样品的污染物(镉)含量已经超过食品卫生标准。图 2 显示, 华中地区样品的镉污染程度最为严重, 一级产品仅占 27.8%, 一半以上的样品为三级产品; 华东及华南地区一级产品占比 75% 左右, 15% 左右的样品处于安全预警范围, 10% 左右的样品存

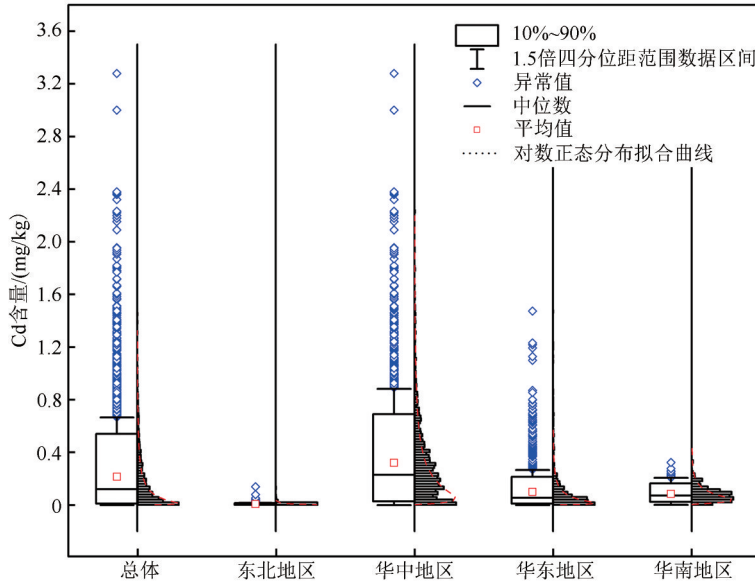


图1 稻米镉含量的分布图

Figure 1 Distribution of cadmium content in rice samples

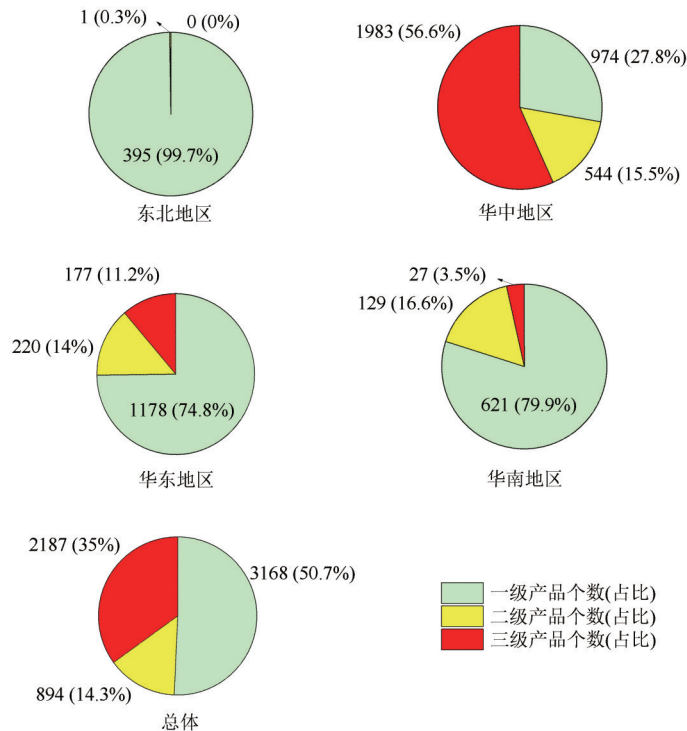


图2 稻米镉含量的单因子污染等级分布

Figure 2 SFPI distribution ranking of cadmium content in rice

在超标情况;东北地区几乎全部样品属于一级产品。

2.3 稻米镉的健康风险评估

2.3.1 非致癌风险评估

基于 Monte-Carlo 模拟概率模型运算,获得东北、华中、华东、华南地区成人及儿童稻米镉膳食暴露的 HQ 10 000 次模拟值的累积概率分布情况(图3)。与污染水平一致,风险水平由高到低依次为华中地区、华东地区、华南地区、东北地区。从4个产区总体情况来看,90%CI(0.009~0.943)内 HQ

平均值均低于0.5,成人及儿童分别为0.193和0.256,数值高于2017年在泰国曼谷地区的调查(0.03~0.16)^[6],儿童HQ的最高值低于我国工矿镉污染区稻米的HQ风险值(1.5~7.8)^[18]。东北地区稻米镉HQ均<1,其他地区均存在一定比例HQ>1的情况。华中地区HQ 90%CI为0.042~1.646,HQ>1的比例为儿童11.44%、成人7.12%,华东地区与华南地区稻米非致癌性风险显著低于华中地区,HQ 90%CI分别为0.008~0.550和0.017~0.380,两地区HQ>1的人群占比范围为0.06%~1.63%,提

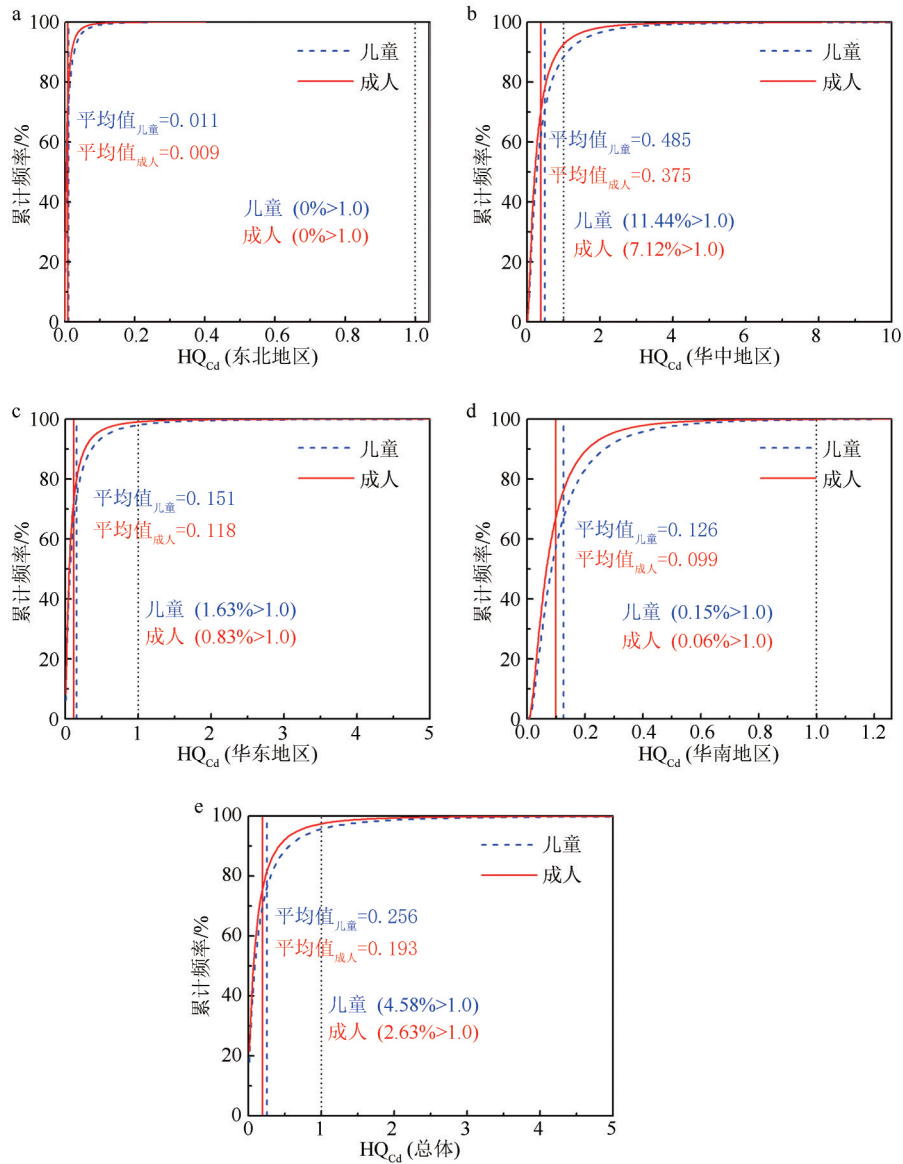


图3 稻米镉的非致癌性风险分布

Figure 3 Noncarcinogenic risk distribution of cadmium in rice

示部分人群因稻米镉暴露存在非致癌健康风险。

2.3.2 致癌性风险评估

基于CR对居民摄入稻米镉的致癌健康风险进行评估。如图4所示,与HQ风险类似,华中地区稻米镉污染水平较高,该地区的CR平均值分别超出可接受范围251%(儿童)和175%(成人),是其他3个地区的3~43倍,其90%CI为 $0.318 \times 10^{-4} \sim 8.371 \times 10^{-4}$,高位值比例较高,70%~80%的稻米处于CR值不可接受范围。东北和华南地区成人及儿童稻米镉暴露的CR平均值均低于 1×10^{-4} ,分布范围接近;东北地区有较少比例(0.26%儿童和0.16%成人)人群的稻米CR值超过 1×10^{-4} 。总体来看,稻米镉暴露所致人群致癌风险大于非致癌风险。

2.3.3 敏感性分析

通过计算方差贡献率比较C、IR、BW、RfD和

CSF等独立因素对稻米镉HQ及CR的敏感性,敏感度越大则表明该因素对健康风险值的影响越大,结果如表3、表4所示。各因素按照敏感度大小排序为,HQ:C>RfD>IR>BW,CR:C>CSF>IR>BW,儿童和成人规律一致。表明4个主产区稻米HQ和CR的首要影响因素是C,IR和BW对健康风险值的影响很小。敏感性分析说明,控制摄入稻米的镉含量将是降低其危害风险的最有效方式。

3 讨论

基于镉含量调查及健康风险评估结果,我国稻米镉污染水平及风险指数呈现显著的地域性差异。华中、华东和华南3个产区稻米镉存在3.47%~56.64%的超标情况,华中地区稻米样品的镉含量均值和超标率最高,其中镉含量最高的样品为限量

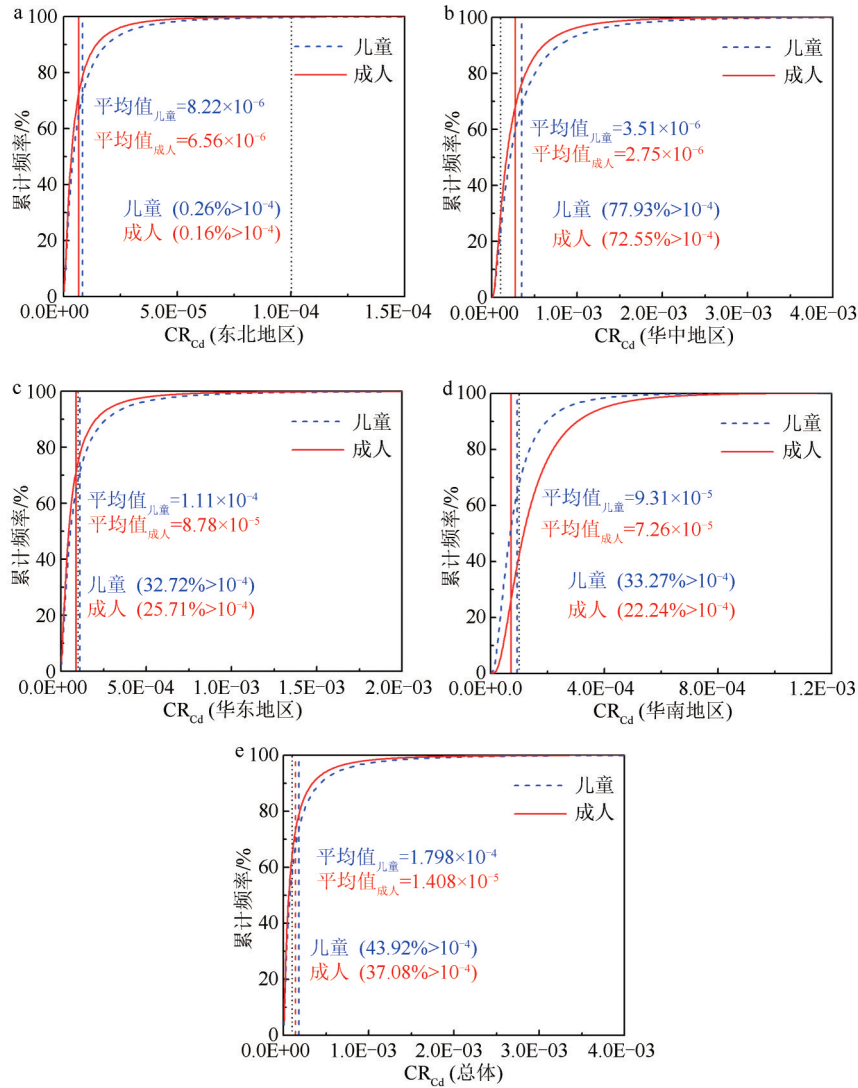


图4 稻米镉的致癌性风险分布

Figure 4 Carcinogenic risk distribution of cadmium in rice

表3 健康风险因素对HQ的敏感性分析

| 分组 | 参数 | 总体/% | 东北 地区/% | 华中 地区/% | 华东 地区/% | 华南 地区/% |
|----|-----|--------|------------|------------|------------|------------|
| 成人 | C | 79.04 | 71.44 | 64.65 | 74.61 | 46.89 |
| | RfD | -19.28 | -26.46 | -32.07 | -23.37 | -48.70 |
| | IR | 1.68 | 1.91 | 3.00 | 1.92 | 4.08 |
| | BW | -0.01 | -0.19 | -0.28 | -0.10 | -0.33 |
| 儿童 | C | 76.31 | 68.31 | 60.64 | 71.26 | 42.11 |
| | RfD | -19.05 | -24.72 | -30.13 | -22.50 | -45.83 |
| | IR | 4.46 | 6.69 | 8.80 | 6.06 | 11.75 |
| | BW | -0.18 | -0.29 | -0.43 | -0.18 | -0.31 |

表4 健康风险因素对CR的敏感性分析

| 分组 | 参数 | 总体/% | 东北 地区/% | 华中 地区/% | 华东 地区/% | 华南 地区/% |
|----|-----|-------|------------|------------|------------|------------|
| 成人 | C | 86.95 | 82.02 | 75.21 | 85.36 | 64.40 |
| | CSF | 11.14 | 15.04 | 21.73 | 12.60 | 30.40 |
| | IR | 1.72 | 2.77 | 2.98 | 1.80 | 5.11 |
| | BW | -0.19 | -0.17 | -0.08 | -0.25 | -0.08 |
| 儿童 | C | 83.31 | 77.26 | 72.09 | 79.08 | 55.72 |
| | CSF | 10.76 | 14.93 | 18.57 | 13.71 | 27.88 |
| | IR | 5.73 | 7.53 | 9.17 | 6.93 | 15.63 |
| | BW | -0.20 | -0.28 | -0.18 | -0.27 | -0.77 |

值的16倍,该地区HQ和CR风险值也为4个产区中最高,但低于2015年在我国湖南地区开展的稻米重金属风险评估结果(稻米镉平均含量为0.312±0.434 mg/kg, HQ值为2.29, CR为0.0343)^[19]。湖南省是我国土壤镉污染最严重的省份之一,稻米镉污染事件频发^[20],同时稻米产量大,占华中地区总产量的50%以上。本文华中地区来源样品镉污染水平较高可能与其中湖南省样品被采集和污染概率较

高有关。华东地区和华南地区样品镉污染水平接近,略低于HE等^[21]的调查结果,其通过2006—2016年间浙江省温岭产区稻米镉污染调查发现超标率达20.7%,平均含量0.117 mg/kg,成人和儿童的稻米镉HQ分别为0.603和0.604, CR均为1.58×10⁻³。稻米镉的含量显著影响其对人体造成的致癌和非致癌健康危害风险,不同地区稻米镉含量差异显著,这使我国呈现区域性的稻米镉膳食暴露健康风

险,与张荣^[22]、喻凤香等^[23]的调查结果接近。

对不同人群的健康风险评估显示,在4个主产区现有稻米镉暴露水平下,2.63%成人或4.58%儿童存在非致癌健康风险,致癌性风险超出可接受范围的比例更高,对于成人和儿童分别达到37.08%和43.92%,其中儿童的HQ平均值为成人的1.22~1.29倍,CR平均值约为成人的1.27倍,类似调查结果^[12,16]表明,儿童稻米多重金属暴露致癌风险指数约为成人的1.7倍,即儿童比成人对镉暴露更敏感^[24-25]。通常认为小龄儿童由于体型小,对重金属的耐受性较差,随着年龄增加,HQ会逐渐下降^[26]。本文研究中,虽然儿童镉的总暴露量远低于成人,但单位体质量的暴露量要更高。提示由于儿童体型小、单位体质量下暴露量高等因素,在稻米镉的暴露过程中可能比成人造成更大的风险。

稻米镉、铅、砷、铜等多种重金属的膳食暴露对健康风险存在多重重金属的累积效应和作用差异。有研究表明,镉含量对于谷物致癌健康风险CR的方差贡献率超过50%,是最大的影响因素,而对于非致癌健康风险HQ,铅或砷含量对其的影响可能大于镉^[12,27]。膳食镉暴露还包括蔬菜、肉、蛋、水产等多种来源,各地区人群饮食结构差异大。另一方面,碾磨、浸泡、发酵等加工方式可显著降低镉等重金属的含量,但稻米品种、加工精度等影响最终产品中重金属的去除比例^[28-29]。本文研究采用点抽样方式评估了2016—2017年以晚稻为主的4个产区稻米中镉元素暴露的健康风险,其中镉含量以糙米计,受实验条件在时间、空间和采样量等方面的条件限制,评估结果还存在一定局限性。仅从本研究结果来看,基于我国4个主产区稻米镉含量均值0.1661 mg/kg,结合Monte-Carlo模拟估算我国成人稻米镉的EDI值约为每人35 μg/d,即约每周4 μg/kg·BW或每月28 μg/kg·BW,高于欧盟食品安全局(European Food Safety Authority, EFSA)估计的镉暂定每周耐受摄入量(Provisional tolerated weekly intake, PTWI)2.5 μg/kg·BW^[4]及粮农组织/世卫组织食品添加剂联合专家委员会(Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives, JFCFA)估计的镉暂定每月耐受摄入量(Provisional tolerated monthly intake, PTMI)25 μg/kg·BW^[30],说明我国部分区域稻米存在重金属镉污染的安全隐患,建议持续对高镉暴露风险地区的稻米镉等重金属进行监测,积极对部分高风险地区采取环境修复改善、调整种植结构、筛选低重金属富集品种、建立加工重金属去除技术等管控措施,控制区域性高镉暴露对降低当地居民(尤其是儿童)健康风险尤为重要。

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] CHOU CH, HARPER C. Toxicological profile for arsenic[R]. United States, Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2007.
- [4] EUROPEAN FOOD SAFETY AUTHORITY (EFSA). Cadmium in food - Scientific opinion of the Panel on Contaminants in the Food Chain[J]. *EFSA Journal*, 2009, 7(3): 980.
- [5] 刘兰英, 黄薇, 吕新, 等. 田间环境下土壤-水稻系统重金属的迁移特征[J]. *福建农业学报*, 2018, 33(1): 66-72.
LIU L Y, HUANG W, LÜ X, et al. Migration of Heavy Metals from Soil to Rice Plant [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2018, 33(1): 66-72.
- [6] HENSAWANG S, CHANPIWAT P. Health impact assessment of arsenic and cadmium intake via rice consumption in Bangkok, Thailand[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2017, 189(11): 599.
- [7] 朱凤鸣, 刘芳, 邹学贤. 昆明西郊镉污染对人体健康的影响[J]. *中国卫生检验杂志*, 2002, 12(5): 602-603.
ZHU F M, LIU F, ZOU X X. Effects of cadmium pollution on human health in western suburbs of Kunming[J]. *Chinese Journal of Health Laboratory Technology*, 2002, 12(5): 602-603.
- [8] 杨定清, 罗丽卉, 周娅, 等. 非或低镉污染稻田不同品种稻米镉含量调查[J]. *环境与健康杂志*, 2017, 34(12): 1091-1094.
YANG D Q, LUO L H, ZHOU Y, et al. Cadmium in different rice cultivars in soil with or without light contamination [J]. *Journal of Environment and Health*, 2017, 34(12): 1091-1094.
- [9] LYU Q X, XIAO Q T, WANG Y J, et al. Risk assessment and hotspots identification of heavy metals in rice: A case study in Longyan of Fujian province, China [J]. *Chemosphere*, 2021, 270: 128626.
- [10] U S Environmental Protection Agency (USEPA). Risk assessment guidance for superfund. Volume I: Human health evaluation manual supplemental guidance [R]. Washington, DC: Office of Emergency and Remedial Response, 2009.
- [11] LYU Q X, XIAO Q T, GUO Y R, et al. Pollution monitoring, risk assessment and target remediation of heavy metals in rice from a five-year investigation in Western Fujian region, China [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 424: 127551.
- [12] U S Environmental Protection Agency (USEPA). IRIS chemical assessment summary for cadmium[DB/OL]. 1989[2022-03-07]. <https://cfpub.epa.gov/ncea/iris/search/index.cfm>.
- [13] NASERI K, SALMANI F, ZEINALI M, et al. Health risk assessment of Cd, Cr, Cu, Ni and Pb in the muscle, liver and gizzard of hen's marketed in East of Iran [J]. *Toxicology Reports*, 2021, 8: 53-59.
- [14] 环境保护部. 中国人群暴露参数手册-成人卷[M]. 北京: 中

- 国环境出版社, 2013.
- Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Exposure Factors Handbook of Chinese Population [M]. Beijing: China Environmental Press, 2013.
- [15] 环境保护部. 中国人群暴露参数手册(儿童卷:6~17岁)[M]. 北京: 中国环境出版社, 2016.
- Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Exposure Factors Handbook of Chinese Population(6~17 years)[M]. Beijing: China Environmental Press, 2016.
- [16] 黄锐敏, 欧阳辉, 吴俊, 等. 福建省宁化县稻米镉含量调查及健康风险评估[J]. 福建农林科学, 2020, 5: 30-36.
- HUANG R M, OU YANG H, WU J, et al. Cadmium Content Investigation and Health Risk Assessment of Rice in Ninghua County of Fujian[J]. Fujian Agricultural Science and Technology, 2020, 5: 30-36.
- [17] HU W Y, HUANG B, HE Y, et al. Assessment of potential health risk of heavy metals in soils from a rapidly developing region of China[J]. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 2016, 22(1): 211-225.
- [18] KE S, CHENG X Y, ZHANG N, et al. Cadmium contamination of rice from various polluted areas of China and its potential risks to human health [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2015, 187(7): 408.
- [19] ZENG F F, WEI W, LI M S, et al. Heavy metal contamination in rice-producing soils of Hunan province, China and potential health risks[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2015, 12(12): 15584-15593.
- [20] 张钊, 张海清. 湖南省镉污染土壤现状及建议[J]. 现代农业科技, 2019(10): 150-151, 153.
- ZHANG Z, ZHANG H Q. Status and Suggestions of Cadmium Contaminated Soil in Hunan Province [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2019(10): 150-151, 153.
- [21] HE M J, SHEN H R, LI Z T, et al. Ten-year regional monitoring of soil-rice grain contamination by heavy metals with implications for target remediation and food safety [J]. Environmental Pollution, 2019, 244: 431-439.
- [22] 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. Cadmium Investigation of Rice in Chinese Major Agricultural Regions and Utilization of Rice Polluted by Cadmium[D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2017.
- [23] 喻凤香, 林亲录, 陈煦. 我国主稻作区稻谷镉和铅含量及其分布特征[J]. 生态与农村环境学报, 2013, 29(1): 24-28.
- YU F X, LIN Q L, CHEN X. Contents and Distributions of Cadmium and Lead in Rice From Main Rice Cultivation Areas in China[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2013, 29(1): 24-28.
- [24] KORMOKER T, PROSHAD R, ISLAM M S, et al. Concentrations, source apportionment and potential health risk of toxic metals in foodstuffs of Bangladesh[J]. Toxin Reviews, 2021, 40(4): 1447-1460.
- [25] ZHANG Z X, ZHANG N, LI H P, et al. Potential health risk assessment for inhabitants posed by heavy metals in rice in Zijiang River Basin, Hunan province, China[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2020, 27(19): 24013-24024.
- [26] GUO G H, WANG Y T, ZHANG D G, et al. Source-specific ecological and health risks of potentially toxic elements in agricultural soils in Southern Yunnan Province and associated uncertainty analysis[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 417: 126144.
- [27] DJAHED B, TAGHAVI M, FARZADKIA M, et al. Stochastic exposure and health risk assessment of rice contamination to the heavy metals in the market of Iranshahr, Iran [J]. Food and Chemical Toxicology, 2018, 115: 405-412.
- [28] 雷婉莹, 刘惠惠, 李静, 等. 大米及其加工产品中镉的消减方法研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2018, 9(9): 1998-2003.
- LEI W Y, LIU H H, LI J, et al. Advance on reduction method of cadmium in rice and rice processing products [J]. Journal of Food Safety and Quality, 2018, 9(9): 1998-2003.
- [29] 辜世伟, 胡云均, 刘方菁, 等. 不同加工精度对稻谷中镉含量的影响[J]. 中国粮油学报, 2019, 34(8): 8-12.
- GU S W, HU Y J, LIU F Q, et al. Effect of different processing precision on cadmium content in rice[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2019, 34(8): 8-12.
- [30] Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives (JECFA). Summary and conclusions of the seventy-third meeting of joint FAO/WHO expert committee on food additives [R]. Geneva: FAO/WHO, 2010.