· 调查报告与分析 ·

2012—2022 年重庆市居民膳食镉暴露水平及其健康风险评估

李旻涛[1,2]，陈佳辉[1,2]，刘怡佳[3]，陈京蓉[2]，冯萍[2]，覃梅[2]，程莉[2]，唐晓琴[2]，龙诚[2]，吴艾琳[2]，霍娇[1,2]，练雪梅[1]

1. 重庆医科大学公共卫生学院，重庆 400016；
2. 重庆市疾病预防控制中心，重庆 400042；
3. 四川省人民医院，成都 610000
通信作者：霍娇，E-mail：lamarhj@126.com；练雪梅，E-mail：xuemeilian@cqmu.edu.cn

【摘　要】目的 分析 2012—2022 年重庆市居民膳食镉暴露水平及其可能的健康风险，为该地区的食品安全决策提供理论依据。**方法** 收集重庆市食品安全风险监测系统 2012—2022 年化学污染物监测数据中大米及其制品、小麦及其制品、其他谷物及其制品、叶菜类蔬菜、块根和块茎类蔬菜、豆类蔬菜、其他新鲜蔬菜、禽肉、畜肉、水果、蛋及其制品 11 类共 9 219 份食品样品的镉含量监测数据，结合 2011—2018 年中国健康与营养调查项目膳食重庆市调查数据，采用蒙特卡罗模拟法估计重庆市居民在 2012—2014 年、2015—2018 年和 2019—2022 年 3 个时间段中膳食镉暴露水平，并评估其健康风险。**结果** 重庆市 2012—2022 年 11 类 9 219 份食品样本中，共检出 5 143 份含镉样本，镉的总检出率为 55.79%，总检出水平为 0.015 6 ~ 0.024 7 mg/kg。2012—2014 年、2015—2018 年、2019—2022 年 3 个时间段重庆市居民的膳食镉平均暴露水平分别为 12.69、13.47、11.19 μg/kg bw/month（MB）和 12.87、13.62、12.42 μg/kg bw/month（UB），均低于食品添加剂联合专家委员会提出的暂定每月可耐受摄入量（PTMI）的 25 μg/kg bw/month；2012—2014 年、2015—2018 年、2019—2022 年 3 个时间段高暴露水平人群（P_{95}）的膳食镉平均暴露水平分别为 40.53、39.42、34.53 μg/kg bw/month（MB）和 40.47、38.43、36.63 μg/kg bw/month（UB），分别为 PTMI 的 1.62、1.58、1.38 倍。大米及其制品在不同时间段中均为膳食镉暴露风险的主要来源，2012—2014 年、2015—2018 年、2019—2022 年的贡献率分别为 52.45%（MB）和 51.87%（UB）、65.42%（MB）和 62.13%（UB）、47.54%（MB）和 42.88%（UB）；其次是叶菜类蔬菜，2012—2014 年、2015—2018 年、2019—2022 年的贡献率分别为 23.86%（MB）和 23.39%（UB）、15.12%（MB）和 14.21%（UB）、29.98%（MB）和 37.12%（UB）。**结论** 2012—2022 年重庆市居民镉暴露水平较低，引起健康风险可能性不大，但高暴露水平人群可能通过膳食镉暴露引起一定健康风险，大米及其制品和叶菜类蔬菜均为膳食镉暴露风险的主要来源。

【关键词】 镉；膳食暴露；概率评估；时间趋势

Dietary cadmium exposure and associated health risks among residents of Chongqing city from 2012 to 2022: surveillance and survey data analysis

LI Mintao[1,2], CHEN Jiahui[1,2], LIU Yijia[3], CHEN Jingrong[2], FENG Ping[2], QIN Mei[2], CHENG Li[2], TANG Xiaoqin[2], LONG Cheng[2], WU Ailin[2], HUO Jiao[1,2], LIAN Xuemei[1] (*1. College of Public Health, Chongqing Medical University, Chongqing* 400016, *China*; *2. Chongqing Center for Disease Control and Prevention, Chongqing* 400042, *China*; *3. Sichuan Provincial People's Hospital, Chengdu* 610000, *China*)
Corresponding authors: HUO Jiao, E-mail: lamarhj@126.com; LIAN Xuemei, E-mail: xuemeilian@cqmu.edu.cn

【Abstract】 Objective To analyze the levels and potential health risks of dietary cadmium exposure among residents of Chongqing city from 2012 to 2022, and to provide a basis for regional decision-making on food safety. **Methods** The detection data from 2012 to 2022 on cadmium concentrations of 9 219 samples from 11 food categories, including rice and rice products, wheat and wheat products, other grains and grain products, leafy vegetables, root and tuber vegetables, legumes, other fresh vegetables, poultry, livestock, fruits, and eggs and egg products, were collected from the Chongqing Food Safety Risk Monitoring System. The cadmium content in food samples was detected by graphite furnace atomic absorption spectroscopy according to the national standard (GB 5009.15–2014) and inductively coupled plasma mass spectrometry according to (GB 5009.268–2016). The limit of detection (LOD) for different food types ranged from 0.000 1 to 0.01 mg/kg, and the left-censored results were replaced by the middle bound (MB) and upper bound (UB) detections.

开放获取：CC BY-NC-ND 4.0　DOI：10.11847/zgggws1144247
基金项目：中国博士后科学基金面上项目（2022M710549）；重庆市自然科学基金面上项目（cstc2021jcyj-msxmX0479）；重庆市博士后特别资助项目（2022CQBSHTB2065）；重庆市首批公共卫生重点学科（专科）
第一作者：李旻涛（2000—），硕士在读，研究方向：食品安全风险评估。
收稿日期：2024-02-20　修回日期：2024-09-10　录用日期：2024-11-21
利益冲突：不存在　伦理审查：免除审查　出版授权：全体作者已与编辑部签署作者贡献声明及版权转让协议

Dietary survey data from 3 354 residents in 6 districts/counties of Chongqing city were also extracted from the three waves of the China Health and Nutrition Survey conducted in 2011, 2015, and 2018. A Monte Carlo simulation was used to estimate dietary cadmium exposure levels for Chongqing residents during three time periods: 2012–2014, 2015–2018, and 2019–2022. The health risks associated with these exposure levels were then assessed. **Results** Cadmium was detected in 5 143 (55.79%) of all samples at levels ranging from 0.015 6 to 0.024 7 mg/kg. For Chongqing residents during 2012–2014, 2015–2018, and 2019–2022, the estimated mean dietary cadmium intake (μg/kg bw/month) was 12.69, 13.47, and 11.19 with MB substitutions for the left-censored food sample measurements used in the estimates) and 12.87, 13.62, and 12.42 (with UB substitutions for the left-censored food sample measurements used in the estimates), respectively. All these values were below the provisional tolerable monthly intake (PTMI) of 25 μg/kg bw/month established by the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives (JECFA). The estimated mean dietary cadmium intake (μg/kg bw/month) for the highly exposed population (95 th percentile) during 2012–2014, 2015–2018, and 2019–2022 was 40.53, 39.42, and 34.53 (with MB) and 40.47, 38.43, and 36.63 (with UB), respectively, which was 1.62, 1.58, and 1.38 times the PTMI. Rice and rice products were the main source of dietary cadmium exposure risk in all periods, contributing 52.45% (with MB) and 51.87% (with UB) of total dietary cadmium exposure in 2012–2014, 65.42% (with MB) and 62.13% (with UB) in 2015–2018, and 47.54% (with MB) and 42.88% (with UB) in 2019–2022. Leafy vegetables were the second largest contributor, accounting for 23.86% (with MB) and 23.39% (with UB) of total dietary cadmium exposure in 2012–2014, 15.12% (with MB) and 14.21% (with UB) in 2015–2018, and 29.98% (with MB) and 37.12% (with UB) in 2019–2022. **Conclusions** Dietary cadmium exposure among Chongqing residents from 2012 to 2022 was relatively low, posing a minimal health risk to the general population. However, the high-exposure population may face some health risks from dietary cadmium exposure. Rice and rice products, and leafy vegetables were identified as the main sources of risk from dietary cadmium exposure.

【**Keywords**】 cadmium; dietary exposure; probabilistic assessment; temporal trend

镉是一种具有全球公共卫生意义的环境污染物，同时也是一种毒性较高、具有一定蓄积性且在自然中广泛存在的重金属污染物，其作为人体非必需元素之一，在生物体中的半衰期较长，对人类和动物均可造成广泛的不良健康影响[1-2]。中国作为一个工业快速发展的国家，面临着较严重的环境镉污染问题，研究表明，除职业暴露者与吸烟者外，普通人群亦可能通过食品、水和空气等形式暴露于镉污染[3]。其中，食品暴露是最主要的暴露途径，环境镉直接或间接在动植物等农产品中蓄积，最终被人摄入导致健康危害[4]。近年研究表明，四川省部分污染地区膳食镉暴露水平可达到每月可耐受摄入量的 2.56～5.42 倍[5]。重庆市位于中国西南部，饮食模式在西南地区具有代表性，镉暴露水平及其健康风险研究对于西南地区乃至全国均具有重要的公共卫生学意义。为分析 2012—2022 年重庆市居民膳食镉暴露水平及其可能的健康风险，为该地区的食品安全决策提供理论依据，本研究收集重庆市食品安全风险监测系统 2012—2022 年化学污染物监测数据中大米及其制品、小麦及其制品、其他谷物及其制品、叶菜类蔬菜、块根和块茎类蔬菜、豆类蔬菜、其他新鲜蔬菜、禽肉、畜肉、水果、蛋及其制品 11 类共 9 219 份食品样品的镉含量监测数据，结合 2011—2018 年中国健康与营养调查项目膳食重庆市调查数据，采用蒙特卡罗模拟法估计重庆市居民在 2012—2014 年、2015—2018 年和 2019—2022 年 3 个时间段中膳食镉暴露水平，并评估其健康风险。结果报告如下。

1 资料与方法

1.1 资料来源 镉含量数据来源于重庆市食品安全风险监测系统 2012—2022 年化学污染物监测数据中 11 类共 9 219 份食品样品的镉含量监测数据，其中，大米及其制品 1 070 份、小麦及其制品 1 045 份、其他谷物及其制品 362 份、叶菜类蔬菜 957 份、块根和块茎类蔬菜 492 份、豆类蔬菜 215 份、其他新鲜蔬菜 1 134 份、禽肉 670 份、畜肉 430 份、水果 1 513 份、蛋及其制品 1 331 份，将所有样品按采样年限分为 2012—2014 年、2015—2018 年和 2019—2022 年 3 个时间段。食品样品中镉含量均按照国家标准 GB 5009.15—2014《食品中镉的测定》[6] 中石墨炉原子吸收光谱法和 GB 5009.268—2016《食品安全国家标准 食品中多元素的测定》[7] 中电感耦合等离子质谱法进行检测，各类食品检测限（limit of detection，LOD）范围为 0.000 1～0.01 mg/kg。食品消费数据来源于 2011—2018 年中国健康与营养调查项目中重庆市膳食调查数据，该调查采用多级分层随机抽样的方法分别于 2011、2015 和 2018 年对重庆市沙坪坝区、南岸区、大足区、奉节县、江津区和綦江区 6 个区县 3 354 名居民的饮食状况进行调查，内容包括性别、年龄、居住地和饮食情况等。

1.2 统计分析 应用 SPSS 22.0 和@RISK 8.2 软件进行统计分析。采用联合国粮农组织/世界卫生

组织（Food and Agriculture Organization of the United Nations/World Health Organization，FAO/WHO）推荐的概率评估法估计镉暴露水平[8]。镉的暴露量以重庆市食品镉含量监测数据拟合分布乘以居民食品消费量数据拟合分布计算，使用蒙特卡罗模拟法进行 100 000 次模拟迭代，将 2012—2022 年食品中镉暴露平均水平分为 2012—2014 年、2015—2018 年和 2019—2022 年 3 组，分别对应 2011 年、2015 年和 2018 年的膳食消费量数据，计算个体每天每公斤体重的镉暴露量（estimated daily intake，EDI），公式为：

$$EDI = \frac{\sum_{i=1}^{j}(Conc_i \times Copt_i)}{bw}$$ [9]。

其中，EDI 为某个体每天每公斤体重镉的暴露水平，单位为μg/kg bw/day；j 为食品组数，$Conc_i$ 为食品 i 组中镉的浓度，单位为μg/kg；$Copt_i$ 为第 i 类食品 g/day 的消耗量；bw 是个人体重，单位为 kg。本次评估采用暴露水平乘以每月平均天数（30 d）与健康指导值比较来评估居民健康风险，健康指导值使用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（Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives，JECFA）在 2010 年制定并应用至今的暂定每月可耐受摄入量（provisional tolerable monthly intake，PTMI）[10]。在其 2010 年的评估中，JECFA 根据人群尿 β_2 微球蛋白水平升高作为指示肾脏损伤的关键效应，使用毒代动力学模型计算与该阈值水平相对应的饮食暴露水平，将镉健康指导值修订为 25 μg/kg bw/month [10]。对于镉含量低于 LOD 的食品，参照欧洲食品安全局（European Food Safety Authority，EFSA）对于左删失数据的推荐处理方法，即替代法，使用中限（middle bound，MB）和上限（upper bound，UB）2 种情况进行替代，其中 MB 设为 1/2 LOD，UB 设为 LOD[11]。

2 结　果

2.1　重庆市 2012—2022 年不同食品类别中镉检出率及含量（表 1）　重庆市 2012—2022 年 11 类 9 219 份食品样本中，共检出 5 143 份含镉样本，镉的总检出率为 55.79%，总检出水平为 0.015 6～0.024 7 mg/kg。2012—2014 年镉检出率最高的 3 类食品依次为大米及其制品 [94.7%（198/209）]、叶菜类蔬菜 [90.0%（352/391）]、块根和块茎类蔬菜 [84.6%（77/91）]，2015—2018 年镉检出率最高的 3 类食品依次为大米及其制品 [92.9%（196/211）]、小麦及其制品 [86.9%（146/168）]、叶菜类蔬菜 [83.4%（241/289）]，2019—2022 年镉检出率最高的 3 类食品依次为叶菜类蔬菜 [79.8%（221/277）]、小麦及其制品 [77.1%（436/566）]、大米及其制品 [72.2%（469/650）]。2012—2014 年和 2015—2018 年镉含量平均值和高暴露水平（P_{95}）最高的 3 类食物均为大米及其制品、叶菜类蔬菜、块根和块茎类蔬菜，而 2019—2022 年镉含量平均值和高暴露水平（P_{95}）最高的 3 类食物均为叶菜类蔬菜、大米及其制品、其他谷物及其制品。重庆市 2012—2022 年不同时间段不同食品类别中镉含量见表 1。

表 1　重庆市 2012—2022 年不同时间段不同食物类别中镉含量/（mg/kg）

Table 1　Mean and 95th percentile of cadmium content (mg/kg) for 9 219 samples of 11 food categories collected in Chongqing city during 2012–14, 2015-18, and 2019–22, with middle bound (MB) and upper bound (UB) substitutions for the left-censored measurements

食品类别	2012—2014年				2015—2018年				2019—2022年			
	平均值（MB）	平均值（UB）	P_{95}（MB）	P_{95}（UB）	平均值（MB）	平均值（UB）	P_{95}（MB）	P_{95}（UB）	平均值（MB）	平均值（UB）	P_{95}（MB）	P_{95}（UB）
大米及其制品	0.047 9	0.047 9	0.152 0	0.151 2	0.061 8	0.061 9	0.196 3	0.169 3	0.043 8	0.044 1	0.185 5	0.162 5
小麦及其制品	0.012 8	0.012 9	0.045 7	0.044 5	0.021 6	0.021 7	0.069 8	0.046 4	0.014 5	0.014 7	0.065 1	0.044 2
其他谷物及其制品	0.010 0	0.010 1	0.039 0	0.038 0	0.003 6	0.003 9	0.010 7	0.135 1	0.031 0	0.031 5	0.011 7	0.137 8
叶菜类蔬菜	0.033 6	0.033 6	0.118 9	0.116 6	0.022 7	0.022 8	0.082 1	0.180 9	0.045 4	0.061 6	0.082 4	0.238 1
块根和块茎类蔬菜	0.022 4	0.022 6	0.073 9	0.072 8	0.021 3	0.023 6	0.093 0	0.073 1	0.019 0	0.015 7	0.087 6	0.064 0
豆类蔬菜	0.009 6	0.009 8	0.039 7	0.038 4	0.006 3	0.007 1	0.023 9	0.019 3	0.014 2	0.006 1	0.020 7	0.017 7
其他新鲜蔬菜	0.013 6	0.013 9	0.050 4	0.050 6	0.016 1	0.062 1	0.014 2	0.048 6	0.011 0	0.011 4	0.053 9	0.046 4
畜肉	0.007 0	0.010 8	0.030 8	0.040 1	0.001 2	0.002 1	0.002 4	0.007 6	0.002 7	0.003 6	0.003 4	0.010 2
禽肉	0.008 2	0.008 3	0.018 7	0.026 9	0.001 5	0.002 5	0.003 3	0.008 1	0.002 9	0.003 9	0.004 8	0.011 0
水果	0.006 8	0.006 9	0.025 8	0.025 4	0.003 7	0.005 0	0.014 4	0.008 0	0.002 7	0.003 4	0.014 3	0.010 3
蛋及其制品	0.006 3	0.006 4	0.018 8	0.024 7	0.002 8	0.003 4	0.010 4	0.007 0	0.002 5	0.003 4	0.011 0	0.009 4
合计	0.018 2	0.018 3	0.081 9	0.081 5	0.017 8	0.018 2	0.079 8	0.079 7	0.013 7	0.014 3	0.060 8	0.061 7

2.2　2012—2022 年重庆市居民膳食镉暴露水平（图 1）　重庆市居民 2015—2018 年的膳食镉平均暴露水平最高，其 EDI 为 0.449 μg/kg bw/day（MB）和 0.454 μg/kg bw/day（UB）；其次是 2012—2014 年的膳食镉平均暴露水平，其 EDI 为 0.423 μg/kg bw/day（MB）和 0.429 μg/kg bw/day（UB），2019—2022 年的膳食镉平均暴露水平最低，其 EDI 为 0.373 μg/kg bw/day（MB）和 0.414 μg/kg bw/day（UB）。重庆市居民 2012—2014 年、2015—2018 年和 2019—2022 年膳食镉的平均暴露水平分别为 12.69、13.47、11.19 μg/kg bw/month（MB）和 12.87、13.62、12.42 μg/kg bw/month（UB），均低于 JECFA 制定的 PTMI（25 μg/kg bw/month），分别为 PTMI 的 0.50～0.51、0.54～0.55、0.45～0.50 倍，不具有健康风险。2012—2014 年、2015—2018 年、2019—2022 年 3 个时间段高暴露水平人群（P_{95}）的膳食镉平均暴露水平分别为 1.351、1.314、1.151 μg/kg bw/day（MB）和1.349、1.281、1.221μg/kgbw/day（UB），即高暴露水平人群（P_{95}）的膳食镉平均暴露水平分别为 40.53、39.42、34.53 μg/kg bw/month（MB）和 40.47、38.43、36.63 μg/kg bw/month（UB），分别为 PTMI 的 1.62、1.58、1.38 倍，可能会对人体健康带来一定的风险。

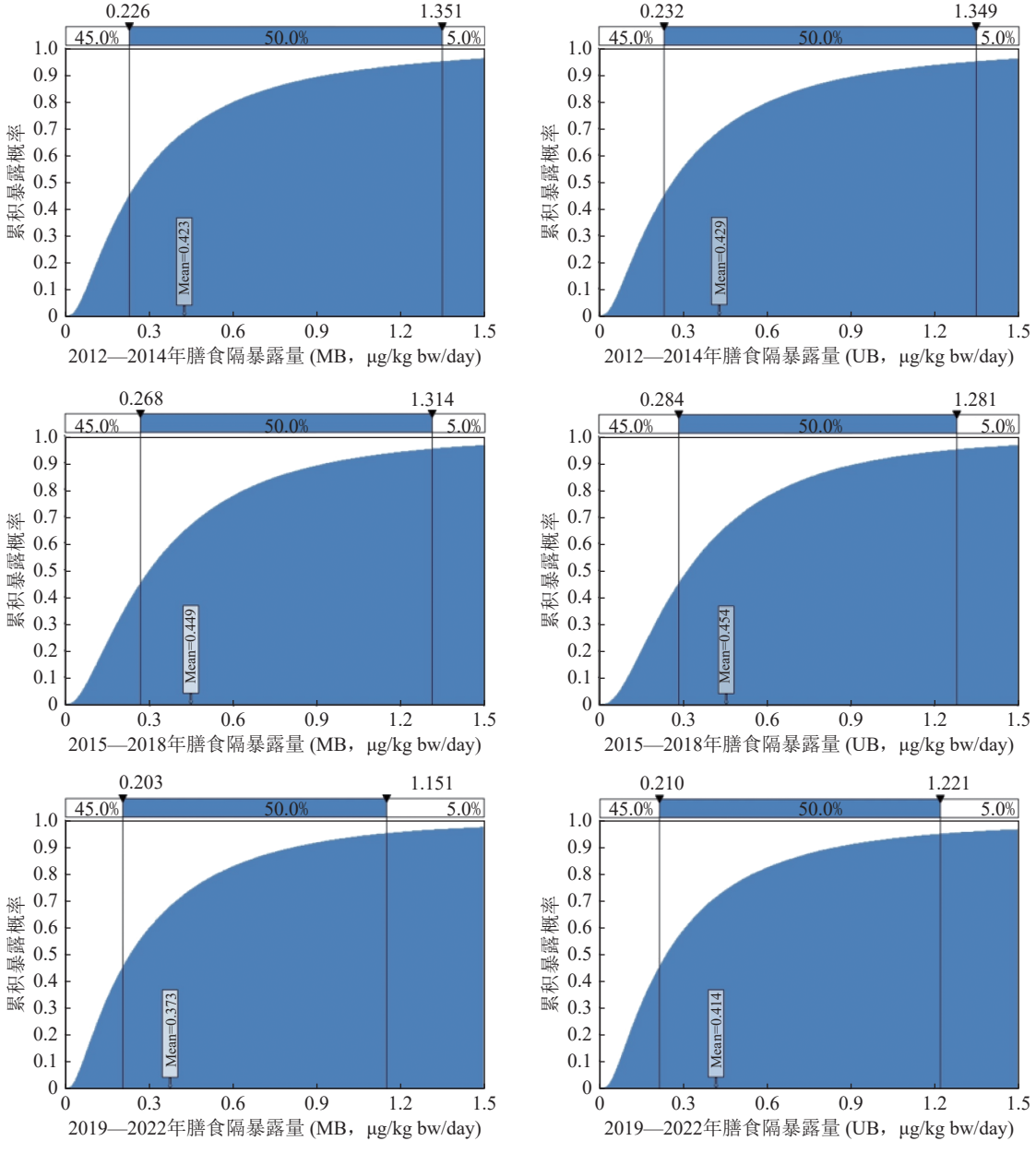


图 1　2012—2022 年重庆市居民膳食镉暴露量

Fig. 1　Estimated daily dietary intake of cadmium for residents of Chongqing city during 2012–14, 2015–18, and 2019–22, with MB (left) and UB (right) substitutions for the left-censored food sample measurements

2.3　2012—2022 年各类食品对重庆市居民膳食镉暴露的贡献率（表 2）　各类含镉食品中，大米及其制品在重庆市 2012—2014 年、2015—2018 年和 2019—2022 年的镉贡献率均为最高，其次为叶菜类蔬菜；2019—2022 年大米及其制品对镉暴露的贡献率明显减少，而叶菜类蔬菜则对镉暴露的贡献率明显增加。MB 和 UB 情况下，不同类别食品对重庆市居民膳食镉暴露的贡献率具体见表 2。

表 2 2012—2022 年各类食品对重庆市居民膳食镉暴露的贡献率

Table 2 Contribution ratios (%) of 11 food categories to dietary cadmium intake of Chongqing city residents during 2012–14, 2015–18, and 2019–22, with MB (three left columns) and UB (three right columns) substitutions for the left-censored food sample measurements

食物类别	贡献率（MB/%）			贡献率（UB/%）		
	2012—2014年	2015—2018年	2019—2022年	2012—2014年	2015—2018年	2019—2022年
大米及其制品	52.45	65.42	47.54	51.87	62.13	42.88
小麦及其制品	4.96	9.51	7.21	4.91	9.03	6.69
其他谷物及其制品	0.51	0.16	2.01	0.50	0.16	1.84
叶菜类蔬菜	23.86	15.12	29.98	23.39	14.21	37.12
块根和块茎类蔬菜	6.43	6.40	7.46	6.34	6.73	5.52
豆类蔬菜	0.83	0.60	0.44	0.82	0.62	0.27
其他新鲜蔬菜	5.43	0.56	3.19	5.44	5.16	3.03
畜肉	2.76	0.34	1.33	4.08	0.87	1.66
禽肉	0.87	0.07	0.22	0.77	0.19	0.27
水果	1.32	0.81	0.35	1.32	0.59	0.40
蛋及其制品	0.55	1.32	0.26	0.57	0.31	0.32

3 讨　论

本研究结果显示，重庆市 2012—2022 年 11 类 9 219 份食品样本中，共检出 5 143 份含镉样本，镉的总检出率为 55.79%，总检出水平为 0.015 6～0.024 7 mg/kg；镉检出率最高的 3 类食品 2012—2014 年依次为大米及其制品（94.7%）、叶菜类蔬菜（90.0%）、块根和块茎类蔬菜（84.6%），2015—2018 年依次为大米及其制品（92.9%）、小麦及其制品（86.9%）、叶菜类蔬菜（83.4%），2019—2022 年依次为叶菜类蔬菜（79.8%）、小麦及其制品（77.1%）、大米及其制品（72.2%），提示重庆市居民膳食镉暴露以大米及其制品、叶菜类蔬菜、块根和块茎类蔬菜、小麦及其制品为主。本研究中，2012—2022 年重庆市叶菜类蔬菜、块根和块茎类蔬菜镉含量均值分别为 0.022 7～0.061 6 和 0.015 7～0.023 6 mg/kg，均高于 Song Y 等[12] 报道的 2011—2015 年全国叶菜类蔬菜、块根和块茎类蔬菜镉含量均值的 0.021 和 0.015 mg/kg，但其他类别食品镉含量均值均低于全国的平均值。重庆市 2012—2022 年各类食物镉含量均值（0.013 7～0.018 3 mg/kg）均低于江西省（0.051 mg/kg）[13] 和陕西省（0.031 7 mg/kg）[14]，但 2012—2018 年各类食物镉含量均值（0.017 8～0.018 3 mg/kg）高于广东省广州市 2013—2015 年各类食品的镉含量均值（0.015 9 mg/kg）[15]。

2012—2022 年重庆市居民膳食镉平均暴露水平（包括 MB/UB）存在一定波动，2015—2018 年镉的暴露水平最高，而 2019—2022 年整体暴露水平最低。造成这一情况的原因可能是 2015—2018 年作为重庆市居民主食的大米及其制品和小麦及其制品的镉含量均值均为 3 个时间段中的最高水平。本研究结果显示，在 2012—2014 年、2015—2018 年和 2019—2022 年的 3 个时间段中，居民膳食镉平均暴露水平均低于 PTMI（分别为 PTMI 的 0.50～0.51、0.54～0.55、0.45～0.50 倍），提示重庆市居民膳食镉平均暴露水平下的健康风险较低，因此该种波动对平均暴露水平人群并不会造成实际健康影响。然而，重庆市膳食镉高暴露水平人群（P_{95}）在 3 个时间段中的健康风险均超过了 PTMI（分别为 PTMI 的 1.62、1.58 和 1.38 倍），说明膳食镉暴露对于重庆市高暴露人群（P_{95}）可能会引发健康损伤风险。但值得关注的是，2012—2022 年高暴露人群（P_{95}）的膳食镉暴露水平逐渐降低，这可能与环境中镉本底水平的下降[16] 导致大部分食品种类的镉含量均在 2019—2022 年明显降低有关。虽然高风险人群（P_{95}）膳食镉暴露量的降低使其健康风险得到了一定程度的控制，但仍超过 PTMI，依然需要持续加强镉等元素类污染物的治理和控制，并持续进行镉暴露风险的监测和评估。

本研究中，在 MB 和 UB 情况下，大米及其制品在不同时间段中均为重庆市居民膳食镉暴露风险贡献的主要来源，2012—2014 年、2015—2018 年、2019—2022 年的贡献率分别为 52.45%（MB）和 51.87%（UB）、65.42%（MB）和62.13%（UB）、47.54%（MB）和 42.88%（UB）；其次是叶菜类蔬菜，2012—2014 年、2015—2018 年、2019—2022 年的贡献率分别为 23.86%（MB）和 23.39%（UB）、15.12%（MB）和 14.21%（UB）、29.98%（MB）和 37.12%（UB）。这可能是因为大米和叶菜类蔬菜均对元素镉具有较强的富集性，且中国居民饮食结构中大米和蔬菜是重要的组成部分[17–18]。

综上所述，本研究对重庆市居民 2012—2022 年的膳食镉暴露风险进行了全面评估，结果显示

重庆市居民膳食镉平均暴露水平不存在健康风险，但高暴露水平人群（P_{95}）仍存在较高健康风险，与国内其他地区对膳食镉健康风险的研究结果一致[9,12]。因此，对于膳食镉高暴露人群（P_{95}）的相关风险控制措施亟待开展，且对环境中的镉污染仍需持续关注和开展治理工作。此外，居民在选择食品种类时还应注意饮食均衡，可通过减少摄入相关易富集的食品种类来降低膳食镉的暴露水平[19]。本研究选用了概率评估法，可在一定程度上保证分析结果的准确性，但研究仍存在一定的局限性。一方面是本研究虽纳入了 11 类食品，但仍缺少如菌类及其制品、调味料、鱼类等类别食品的相关数据，其中菌类及其制品属于镉检出率及含量均较高的食品[20]，这可能会导致对膳食镉暴露健康风险的低估；另一方面是本研究中部分类别食品数据量较少（如 2015—2018 年的其他谷物及其制品数据），不能完全代表市场中该类食品的含量水平，这可能导致对膳食镉暴露健康风险的低估或高估。因此，今后对于膳食镉暴露水平以及健康风险的评估可进行更多高质量的长期随访调查作进一步研究。

参考文献

[1] Yang Y D, Gu Y, Zhang Y N, et al. Spatial-temporal mapping of urine cadmium levels in China during 1980–2040: dietary improvements lower exposure amid rising pollution[J]. Journal of Hazardous Materials, 2024, 473: 134693.

[2] 王梅, 严俊, 张晨阳, 等. 镉致肾损伤生物标志在长期环境暴露人群中应用的稳定性 [J]. 中国公共卫生, 2023, 39(1): 46-49.

[3] Hogervorst J, Plusquin M, Vangronsveld J, et al. House dust as possible route of environmental exposure to cadmium and lead in the adult general population[J]. Environmental Research, 2007, 103(1): 30-37.

[4] Jean J, Sirot V, Hulin M, et al. Dietary exposure to cadmium and health risk assessment in children–results of the French infant total diet study [J]. Food and Chemical Toxicology, 2018, 115: 358-364.

[5] Huo J, Huang Z Z, Li R J, et al. Dietary cadmium exposure assessment in rural areas of southwest China[J]. PLoS One, 2018, 13(8): e0201454.

[6] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.15—2014 食品安全国家标准 食品中镉的测定 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.

[7] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. GB 5009.268—2016 食品安全国家标准食品中多元素的测定 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.

[8] Food and Agriculture Organization of the United Nations, World Health Organization. Principles and methods for the risk assessment of chemicals in food[S]. Ottawa: World Health Organization Press, 2021.

[9] Yu G G, Zheng W R, Wang W, et al. Health risk assessment of Chinese consumers to cadmium via dietary intake[J]. Journal of Trace Elements in Medicine and Biology, 2017, 44: 137-145.

[10] Food and Agriculture Organization of the United Nations, World Health Organization. WHO Food Additives Series: 64: safety evaluation of certain food additives and contaminants[M]. Geneva: World Health Organization, 2011.

[11] European Food Safety Authority. Management of left-censored data in dietary exposure assessment of chemical substances[J]. EFSA Journal, 2010, 8(3): 1557.

[12] Song Y, Wang Y B N, Mao W F, et al. Dietary cadmium exposure assessment among the Chinese population[J]. PLoS One, 2017, 12(5): e0177978.

[13] 王艳敏, 周鸿, 游兴勇, 等. 江西省居民主要膳食镉暴露风险的初步评估 [J]. 现代预防医学, 2018, 45(21): 3887-3890.

[14] 刘宇, 王彩霞, 袁文婷, 等. 2012—2020 年陕西省食品中镉污染状况及健康风险评估 [J]. 卫生研究, 2022, 51(2): 308-312.

[15] Zhang W W, Liu Y G, Liu Y F, et al. An assessment of dietary exposure to cadmium in residents of Guangzhou, China[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2018, 15(3): 556.

[16] 杨雳, 白宗旭, 薄文浩, 等. 中国农田土壤重金属污染分析与评价 [J]. 环境科学, 2024, 45(5): 2913-2925.

[17] Chen H P, Yang X P, Wang P, et al. Dietary cadmium intake from rice and vegetables and potential health risk: a case study in Xiangtan, southern China[J]. Science of the Total Environment, 2018, 639: 271-277.

[18] Liu P, Zhang Y F, Su J F, et al. Maximum cadmium limits establishment strategy based on the dietary exposure estimation: an example from Chinese populations and subgroups[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25(19): 18762-18771.

[19] 黄芸, 袁洪, 黄志军, 等. 环境重金属暴露对人群健康危害研究进展 [J]. 中国公共卫生, 2016, 32(8): 1113-1116.

[20] 蔡文焰, 黄唐嘉, 郑晓燕, 等. 泉州市 2018—2020 年居民主要膳食镉暴露评估 [J]. 海峡预防医学杂志, 2022, 28(6): 75-77.