

风险评估

重庆市居民膳食中铬暴露水平及其健康风险评估

陈佳辉¹, 陈京蓉², 冯萍², 程莉², 覃梅², 罗书全², 张华东², 霍娇^{1,2}, 练雪梅¹
(1. 重庆医科大学公共卫生学院, 医学与社会发展研究中心, 重庆 400016;
2. 重庆市疾病预防控制中心, 重庆 400042)

摘要:目的 评估重庆市居民膳食中铬暴露水平及潜在的健康风险。方法 利用 2018—2021 年重庆市 9 类共 2 780 份食品中铬含量监测数据, 结合中国健康与营养调查项目 2018 年重庆市膳食调查数据(3 d 24 h 膳食回顾法), 采用蒙特卡罗模拟估计重庆市居民膳食中铬暴露水平并评估其健康风险。结果 重庆市各类食物中铬平均含量范围为 0.013 9~0.126 3 mg/kg, 总体检出率为 40.6%。铬平均含量以水产品及其制品最高, 其次是特殊膳食食用食品、叶菜类蔬菜和大米。重庆市居民膳食中铬每日平均暴露量范围为 0.683~2.117 $\mu\text{g}/\text{kg}\cdot\text{BW}$, 高食物量消费人群的膳食暴露水平(P_{95})范围为 1.165~3.597 $\mu\text{g}/\text{kg}\cdot\text{BW}$ 。各年龄组人群的铬每日平均暴露量随年龄增加有降低的趋势, 1~6 岁人群的铬每日平均暴露量最高, 60 岁以上人群最低; 男性铬平均暴露量高于女性; 城市地区人群的铬平均暴露量高于农村地区。谷物及其制品对重庆市居民膳食中铬暴露的贡献率最高, 达 39.31%~49.13%, 其次为蔬菜、肉及肉制品。各年龄、性别、地区组人群膳食中铬每日平均暴露量和 P_{95} 暴露量占每日耐受摄入量(TDI)的比例均低于 1。结论 重庆市居民膳食中铬暴露的健康风险较低, 谷物及其制品、蔬菜、肉及肉制品是膳食中铬摄入的主要来源。

关键词: 铬; 膳食暴露; 风险评估; 蒙特卡罗模型

中图分类号: R155 文献标识码: A 文章编号: 1004-8456(2023)10-1499-07

DOI: 10.13590/j.cjfh.2023.10.014

Dietary exposure to chromium and associated health risks in Chongqing

CHEN Jiahui¹, CHEN Jingrong², FENG Ping², CHENG Li², QIN Mei², LUO Shuquan²,
ZHANG Huadong², HUO Jiao^{1,2}, LIAN Xuemei¹

(1. School of Public Health of Chongqing Medical University, Research Center for Medicine and Social Development, Chongqing 400016, China; 2. Chongqing Center for Disease Control and Prevention, Chongqing 400042, China)

Abstract: Objective The aim of this study was to evaluate the dietary exposure level of chromium (Cr) and its potential health risks among residents of Chongqing. **Methods** Cr concentration data were obtained from the Food Safety Risk Monitoring System, which included 2 780 Cr-containing food samples from nine categories in Chongqing from 2018 to 2021. Food consumption data were derived from the Chongqing Diet Survey Data of the China Health and Nutrition Survey Project 2018 (3 d 24 h dietary recall surveys). A Monte Carlo simulation was used to estimate the dietary Cr intake levels and the associated health risks. **Results** The average concentration of Cr in all foods in Chongqing ranged from 0.013 9 to 0.126 3 mg/kg, with a total detection rate of 40.6%. The average Cr concentration was highest in aquatic products, followed by foods for special dietary use, leafy vegetables, and rice. The average daily dietary Cr exposure range of Chongqing residents was 0.683-2.117 $\mu\text{g}/\text{kg}$ body weight (BW), and the dietary Cr exposure level (P_{95}) of the high-food-consumption population was 1.165-3.597 $\mu\text{g}/\text{kg}$ BW. The average daily level of Cr exposure decreased with increasing

收稿日期: 2022-07-21

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); 重庆市科卫联合医学科
研青年项目(2022QNXM009); 重庆市新型培育智库公共卫生安全研究中心政策研究项目(ggwsaqyjzx202206); 重庆市首批公共卫生
重点学科(专科)

作者简介: 陈佳辉 男 在读硕士生 研究方向为食品安全风险评估 E-mail: 2567532034@qq.com

通信作者: 霍娇 女 主管医师 研究方向为食品化学物特殊毒性评价和风险评估 E-mail: lamarhj@126.com

练雪梅 女 教授 研究方向为营养与食品卫生 E-mail: xuemeilian@cqmu.edu.cn

霍娇和练雪梅为共同通信作者

age. The average daily exposure to Cr was highest for people aged 1-6 years and lowest for people aged >60 years. The average exposure to Cr was higher in urban areas than in rural areas, and females had higher exposure levels than males. Cereals and their products had the highest contribution to the total dietary Cr exposure of Chongqing residents, reaching 39.31%-49.13%. The mean and maximum levels of exposure (*P*95) to chromium were less than one of the tolerable daily intake in all age, sex, and regional groups. **Conclusion** The health risk of dietary Cr exposure among Chongqing residents was low. The three main sources of dietary Cr were cereals and their products, vegetables, and meat.

Key words: Chromium; dietary exposure; risk assessment; Monte Carlo model

铬(Chromium)是维持人体生命活动的必需微量元素之一,但摄入过多也可能对人体产生危害。铬在自然环境中以 Cr(Ⅲ)和 Cr(Ⅵ)两种形式存在, Cr(Ⅵ)较 Cr(Ⅲ)毒性高,且易被人体吸收并在体内蓄积。在动物亚慢性或慢性经口毒性试验中, Cr(Ⅲ)在最高染毒剂量下(506和286 mg/kg·BW/d)均未观察到致癌或其他不良反应^[1]。与 Cr(Ⅲ)相比, Cr(Ⅵ)因其易穿过细胞膜而具有较高毒性,经口染毒时在较低剂量时即可导致消化系统和血液系统损伤,并被国际癌症研究机构(International Agency for Research on Cancer, IARC)确定为人类致癌物(1类)^[1-2]。由于检测方法限制,现有关于食品中铬含量的报道绝大多数以总铬形式进行分析检测,关于食物中铬不同形态含量研究较少^[3]。根据 KOVACS 等^[4]和 NOVOTNIK 等^[5]的研究,食物基本上可以被认为是一种还原介质,可将食物中的 Cr(Ⅵ)还原为 Cr(Ⅲ),并且不会将 Cr(Ⅲ)氧化为 Cr(Ⅵ)。因此在本研究中,采用了食物摄入的所有铬都是 Cr(Ⅲ)的假设,该假设也是欧洲食品安全局(European Food Safety Authority, EFSA)在对膳食中铬进行暴露风险评估时采用的假设^[6]。食物中铬来源于环境,包括矿石风化、火山喷发和大气降水等自然形成,以及煤炭石油燃烧、垃圾焚烧等人类活动,而后者是铬污染的主要来源。研究显示,我国部分地区农田土壤和主要河流中均存在不同程度的铬污染^[7-8];重庆市主城区河流中铬污染达到了轻度污染的等级^[9]。目前,我国仅部分地区报道了针对单一类别食品的铬暴露风险评估,但尚无膳食中铬的总暴露风险评估报道^[10-11]。鉴于重庆市西南地区的工业中心地位,及现有报道中关于土壤和水体中铬污染状况,关于重庆市居民膳食中铬暴露水平及其健康风险评估工作亟需开展。

本次研究利用2018—2021年重庆市食品安全风险监测系统中食品的铬监测数据,结合2018年重庆市居民的食物消费量数据,采用蒙特卡罗模型(Monte Carlo)对重庆市居民膳食中铬暴露风险进行评估。本研究将对重庆市居民膳食中铬暴露及其可能的健康风险提供重要信息,对于膳食中铬的食

品贡献、人群分布等暴露特征研究具有重要科学意义,对于全国其他地区膳食中铬暴露风险评估具有重要参考价值。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 铬含量数据

铬含量数据来源于重庆市食品安全风险监测系统2018—2021年的化学污染物监测数据。样品采集按照我国食品风险污染物和有害因素监测手册的随机抽样原则,在重庆市39个县区(包括零售店、大中型超市、食杂店、农贸市场和便利店)随机采集需要检测的食物样品,共收集到2780份食物样品。采样方法详见国家食品安全风险监测手册^[12]。根据GB 2762—2017《食品安全国家标准 食品中污染物限量》的食品类别和EFSA风险评估食品分类标准^[6],将采集的食物样本分为谷物及其制品、蔬菜、淀粉类、水果、肉及肉制品、水产品及其制品、蛋及蛋制品、乳及乳制品、特殊膳食用食品9个食品大类,共计18种食物类别。

1.1.2 食物消费量数据

食品消费数据来源于2018年中国健康与营养调查项目重庆市膳食调查数据。本次调查采用多阶段分层整群随机抽样的方法,在重庆市抽取共计6个调查点(区/县),包括沙坪坝区、南岸区、大足区、奉节县、江津区、綦江区,共调查了979名居民。调查均采用以家庭为基础的入户膳食调查方式,被抽取的调查户签署知情同意后,由经过统一培训的调查员采用连续3d 24h膳食回顾法收集个人食物摄入数据(包括在家和在外进食的所有食物)。膳食调查采取面对面询问的方式收集饮食消费信息和一般人口统计信息(性别、年龄、居住地)。对于7岁以下或75岁以上的人,饮食信息来自成年家庭成员。调查者中,男性436人(44.5%),女性543人(55.5%),505人来自城市地区(51.6%),474人来自农村(48.4%)。样本包括41名1~6岁的学龄前儿童(4.2%)、113名7~17岁的学龄儿童(11.5%)、399名18~59岁的成年人(40.8%)和426名60岁

及以上的成年人(43.5%)。

1.2 方法

1.2.1 食品中铬含量检测方法和质量控制

食品中铬含量的检测按照 GB 5009.123—2014《食品安全国家标准 食品中铬的测定》石墨炉原子吸收光谱法^[13]和 GB 5009.268—2016《食品安全国家标准 食品中多元素的测定》电感耦合等离子体质谱法进行^[14],各类食物中铬含量数据的实际检出限(Limit of detection, LOD)范围为 0.001 1~0.05 mg/kg。检测的总铬均按照三价铬处理。

采用质控样品、空白试验、平行双样、加标回收等方法进行内部质量质控。对培训、采样、样品制备和检测的环节进行严格的外部质量控制,承担检测工作的各个实验室均需通过质量控制考核,保证数据的可靠性、完整性符合调查的标准。

1.2.2 暴露评估方法

为了更加精确地估计出重庆市居民膳食中铬的暴露水平,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)推荐的概率评估法进行估计^[15],以重庆市食品中铬含量监测数据和重庆市居民消费量数据为参数,最适函数曲线采用赤池信息量准则(Akaike information criterion, AIC)作为判断依据。采用拉丁超立方抽样方法,从铬含量数据和消费量数据分布函数中分别随机抽样 50 000 次,利用蒙特卡罗(Monte Carlo)模拟计算得到铬的暴露量概率分布。本研究共模拟抽样 50 000 次分析铬暴露量概率分布的不确定性,使用统计量的平均值、四分位间距、95% 置信区间(95%CI)表示其不确定度。计算铬暴露量其公式为:

$$EDI_i = \sum_{j=1}^n \frac{F_j \times C_j}{BW_i}$$

估计日摄入量(Estimated daily intake, EDI)为某个体每天每千克体质量铬的暴露水平, $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{BW}/\text{d})$, F_j 为个体第 j 种食物的消费量, g/d ; C_j 为第 j 种食物中铬污染水平, mg/kg ; BW_i 为某个体的体质量, kg 。

1.2.3 风险特征描述

EFSA 根据一项大鼠慢性经口毒性研究中未观察到有害作用的最高水平(No observed adverse effect level, NOAEL),设定 Cr(III)每日可耐受摄入量(Tolerable daily intake, TDI)为 $300 \mu\text{g}/\text{kg}\cdot\text{BW}$ ^[6]。本研究将人群膳食中铬暴露量与 TDI 相比较,按照年龄、性别以及居住地区不同特征对重庆市居民膳食中铬暴露的健康风险进行评估,并以其占 TDI 百分比来表示膳食中铬暴露风险的大小。当占 TDI 百分比 >1 时,认为存在一定的健康风险;当占 TDI

百分比 ≤ 1 时,就认为健康风险相对较低。

1.3 统计学分析

对于未检出数据,参照 EFSA 对于左删失数据的推荐处理方法,即替代法,对于低于 LOD 的数据,分别用 0、1/2LOD、LOD 代表下限(Lower bound, LB)、中限(Median bound, MB)和上限(Upper bound, UB)3 种情况进行替代^[16]。采用 SPSS 22.0 软件和 @RISK 8.2 进行数据的统计分析。

2 结果

2.1 重庆市食物中铬含量水平

在 2018—2021 年监测的 2 780 份食品样品中,有 59.4% 的样品铬含量低于检测限,检出率为 40.6%(1 128/2 780)。在 18 组食物中,铬检出率排在前 3 的食物是叶菜类蔬菜(61.6%, 77/125)、水产品及其制品(51.4%, 37/72)、特殊膳食用食品(55.0%, 396/720)。根类蔬菜、豆类蔬菜、瓜茄类蔬菜、水果、蛋及蛋制品检出率较低,分别为 23.2%(13/56)、26.3%(5/19)、24.8%(31/125)、28.7%(98/342)、25.8%(93/360),其余食品的检出率在 30%~50% 之间。当未检出数据分别用 0、1/2LOD、LOD 替代时,重庆市食品中铬的平均含量分别为 0.052 3、0.060 5、0.068 6 mg/kg。铬含量最高的食品是水产品及其制品,为 0.116 6~0.126 3 mg/kg,其次分别是特殊膳食用食品、叶菜类蔬菜、大米、马铃薯、蛋及蛋制品、小麦和面粉、内脏、家禽和兔肉,铬含量为 0.037 0~0.091 6 mg/kg,所有其他食品类别中的铬浓度均低于 0.05 mg/kg,在 0.013 9~0.019 3 mg/kg 之间。详见表 1。

2.2 重庆市居民膳食中铬的暴露评估

通过对不同年龄、性别、地区人群的食品消费量和体重进行拟合分布,结果表明其最优拟合分布大部分分别为指数分布(Exponential)、韦伯分布(Weibull)。以重庆市食品中铬平均含量监测结果、不同人群居民食物消费量数据为参数,按最优拟合分布,采用拉丁超立方抽样,进行蒙特卡罗 50 000 次模拟迭代、分布叠加,重庆市居民按年龄、性别、居住地区铬暴露水平概率分布。暴露评估结果显示,各年龄组铬的 P_{95} 暴露量均低于 $3.60 \mu\text{g}/\text{kg}\cdot\text{BW}$,见图 1。各性别组铬 P_{95} 暴露量均低于 $2.23 \mu\text{g}/\text{kg}\cdot\text{BW}$,见图 2。各地区组铬 P_{95} 暴露量均低于 $2.08 \mu\text{g}/\text{kg}\cdot\text{BW}$,见图 3。

按年龄分组可见,各年龄组人群的铬每日平均摄入量随年龄增加有降低的趋势,1~6 岁人群的铬每日平均暴露量最高,而 60 岁以上人群最低,分别为 $1.523\sim 2.117$ 和 $0.683\sim 0.928 \mu\text{g}/\text{kg}\cdot\text{BW}$;按性

表1 不同种类食物中铬含量

Table 1 Chromium content in different types of food

食物分类	样品份数	<LOD/%	P5/(mg/kg)			中位数/(mg/kg)			均值±标准差/(mg/kg)			P95/(mg/kg)		
			LB	MB	UB	LB	MB	UB	LB	MB	UB	LB	MB	UB
谷物及其制品	大米	181	0.000 0	0.005 0	0.010 0	0.000 0	0.025 0	0.050 0	0.062 8±0.184 0	0.077 5±0.180 8	0.086 8±0.178 3	0.407 8	0.407 8	0.407 8
	小麦和面粉	179	0.000 0	0.005 0	0.010 0	0.000 0	0.025 0	0.050 0	0.037 9±0.081 6	0.047 5±0.077 8	0.057 1±0.075 4	0.220 0	0.220 0	0.220 0
	小计	360	0.000 0	0.005 0	0.010 0	0.000 0	0.025 0	0.050 0	0.053 2±0.143 2	0.062 6±0.140 1	0.072 1±0.137 7	0.289 0	0.289 0	0.289 0
蔬菜	叶类蔬菜	125	0.000 0	0.001 1	0.002 2	0.042 0	0.042 0	0.050 0	0.071 8±0.119 5	0.076 7±0.116 9	0.081 6±0.114 9	0.250 0	0.250 0	0.250 0
	茎类蔬菜	91	0.000 0	0.001 1	0.002 2	0.000 0	0.025 0	0.042 0	0.028 6±0.062 2	0.037 2±0.059 1	0.045 7±0.057 7	0.160 4	0.160 4	0.160 4
	根类蔬菜	56	0.000 0	0.005 0	0.010 0	0.000 0	0.025 0	0.050 0	0.023 4±0.050 0	0.035 4±0.045 2	0.047 5±0.042 9	0.141 6	0.141 6	0.141 6
	豆类蔬菜	19	0.000 0	0.005 0	0.010 0	0.000 0	0.025 0	0.042 0	0.018 2±0.042 9	0.029 2±0.039 2	0.040 3±0.038 5	— ^a	— ^a	— ^a
	瓜茄类蔬菜	125	0.000 0	0.005 0	0.010 0	0.000 0	0.025 0	0.050 0	0.019 5±0.044 7	0.030 8±0.040 9	0.042 1±0.039 8	0.124 9	0.124 9	0.124 9
	小计	416	0.000 0	0.005 0	0.009 7	0.000 0	0.025 0	0.050 0	0.037 7±0.081 4	0.046 5±0.077 9	0.055 4±0.075 8	0.180 6	0.180 6	0.180 6
淀粉类	马铃薯	16	0.000 0	0.005 0	0.010 0	0.000 0	0.025 0	0.050 0	0.056 4±0.083 6	0.063 0±0.079 3	0.069 5±0.076 0	— ^a	— ^a	— ^a
	其他淀粉类 (不包括马铃薯)	48	0.000 0	0.001 1	0.002 2	0.001 4	0.005 0	0.005 0	0.013 9±0.028 2	0.016 6±0.027 7	0.019 3±0.028 8	0.098 1	0.098 1	0.098 1
水果	小计	64	0.000 0	0.001 1	0.002 2	0.000 0	0.005 0	0.010 0	0.024 5±0.051 0	0.028 2±0.049 8	0.031 2±0.049 7	0.123 3	0.123 3	0.123 3
	猪肉	342	0.000 0	0.005 0	0.010 0	0.000 0	0.025 0	0.050 0	0.027 1±0.067 8	0.037 5±0.064 4	0.047 9±0.062 7	0.130 0	0.130 0	0.130 0
	家禽和兔肉 (牛、绵羊和山羊肉)	66 63	0.000 0 0.000 0	0.005 0 0.005 0	0.010 0 0.010 0	0.000 0 0.000 0	0.025 0 0.025 0	0.041 9 0.050 0	0.028 4±0.063 7 0.037 0±0.085 0	0.037 5±0.060 3 0.045 7±0.081 7	0.046 7±0.058 6 0.054 4±0.079 6	0.185 3 0.214 0	0.185 3 0.214 0	0.185 3 0.214 0
肉及肉制品	牛、绵羊和山羊肉	20	0.000 0	0.005 0	0.010 0	0.000 0	0.025 0	0.050 0	0.026 3±0.046 2	0.039 8±0.039 1	0.053 3±0.034 8	0.150 8	0.150 8	0.150 8
	内脏	253	0.000 0	0.005 0	0.010 0	0.000 0	0.025 0	0.033 3	0.037 0±0.091 3	0.044 6±0.088 7	0.052 2±0.087 1	0.146 0	0.146 0	0.146 0
	小计	402	0.000 0	0.005 0	0.010 0	0.000 0	0.025 0	0.039 8	0.035 0±0.084 4	0.043 3±0.081 5	0.051 7±0.079 8	0.157 3	0.157 3	0.157 3
水产品及其制品	水产品	72	0.000 0	0.005 0	0.009 4	0.010 2	0.025 0	0.036 0	0.116 6±0.222 5	0.121 4±0.220 1	0.126 3±0.021 8	0.694 7	0.694 7	0.694 7
	水产品及其制品	360	0.000 0	0.005 0	0.010 0	0.000 0	0.025 0	0.050 0	0.041 7±0.127 1	0.052 6±0.123 9	0.063 5±0.121 6	0.279 5	0.279 5	0.279 5
蛋及蛋制品	蛋及蛋制品	44	0.000 0	0.001 5	0.003 0	0.000 0	0.015 0	0.030 0	0.015 3±0.026 3	0.023 3±0.022 8	0.031 3±0.022 5	0.085 5	0.085 5	0.085 5
	奶及奶制品	720	0.000 0	0.005 0	0.010 0	0.032 9	0.032 9	0.050 0	0.085 6±0.159 9	0.090 8±0.157 3	0.091 6±0.155 1	0.380 0	0.380 0	0.380 0
特殊膳食食品	特殊膳食食品	2 780	0.000 0	0.005 0	0.010 0	0.000 0	0.025 0	0.050 0	0.052 3±0.126 0	0.060 5±0.123 0	0.068 6±0.120 8	0.270 0	0.270 0	0.270 0
	总计	2 780	0.000 0	0.005 0	0.010 0	0.000 0	0.025 0	0.050 0	0.052 3±0.126 0	0.060 5±0.123 0	0.068 6±0.120 8	0.270 0	0.270 0	0.270 0

注：^a样本量不足以计算P95值；LOD：检出限；LB：下限；MB：中限；UB：上限

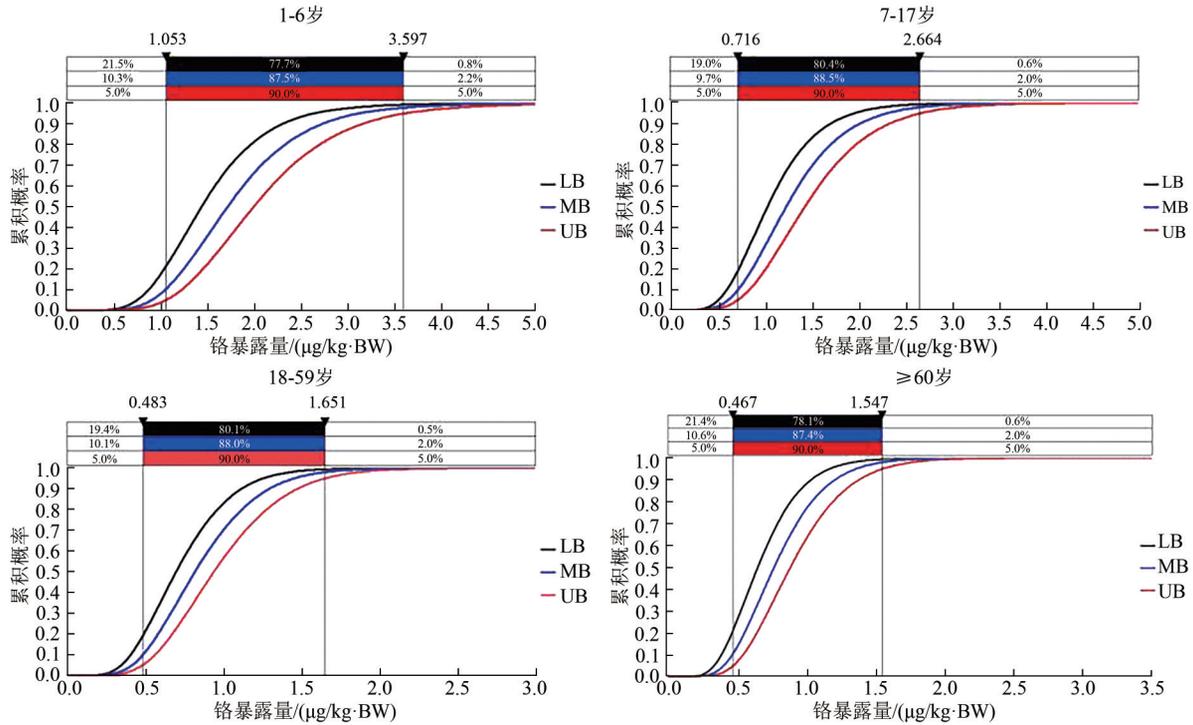


图1 不同年龄人群铬暴露量分布

Figure 1 Distribution of Cr exposure among different age groups

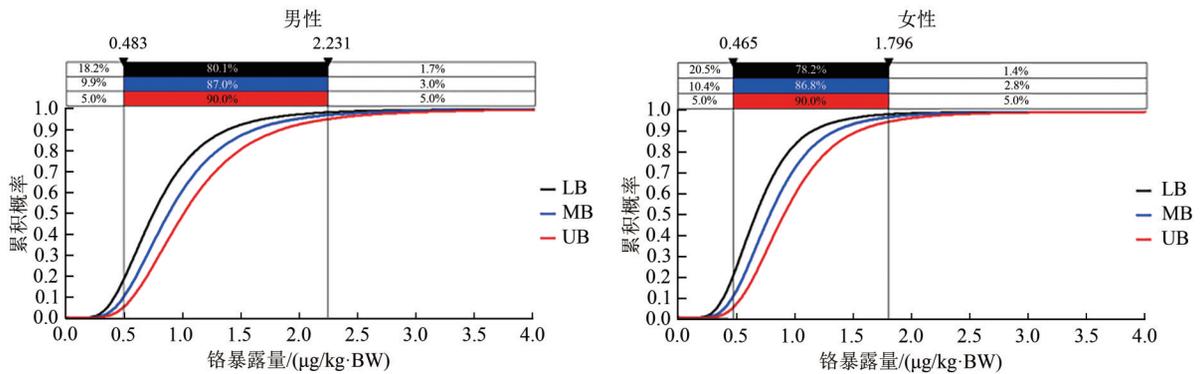


图2 不同性别人群铬暴露量分布

Figure 2 Distribution of Cr exposure among different gender groups

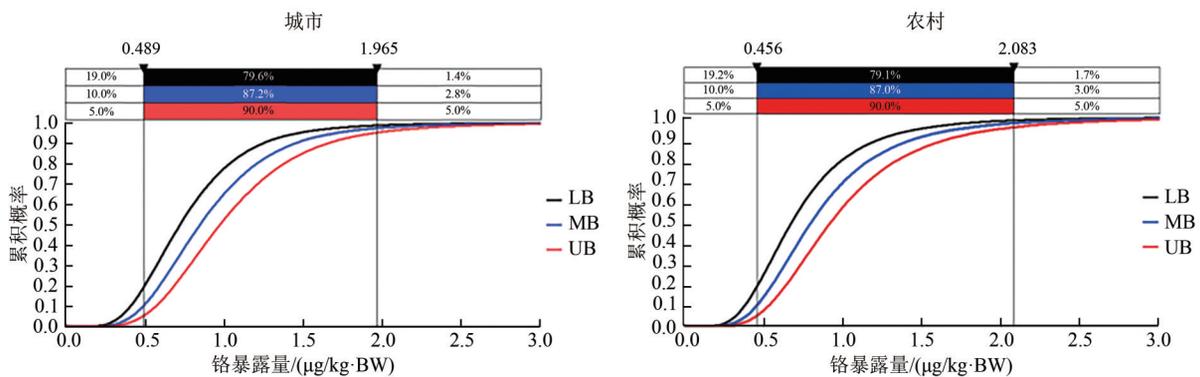


图3 不同地区人群铬暴露量分布

Figure 3 Distribution of Cr exposure among different region groups

别分层可见,男性铬每日暴露量平均值高于女性,分别为 0.843~1.135 和 0.725~0.987 $\mu\text{g}/\text{kg}\cdot\text{BW}$;按居住地区分层可见,城市地区膳食中铬暴露量平均值高于农村,分别为 0.780~1.072 和 0.777~

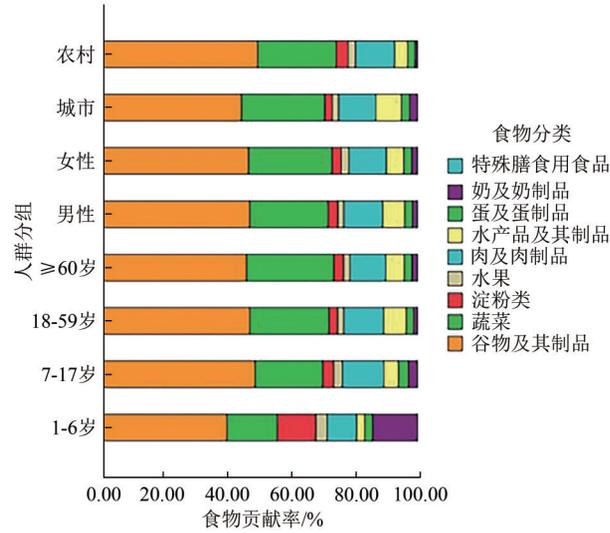
1.058 $\mu\text{g}/\text{kg}\cdot\text{BW}$,见表 2。

2.3 重庆市居民膳食中铬暴露的各类食品贡献率
不同种类食品对不同年龄、性别、地区人群膳食中铬暴露的贡献率见图 4,可见各类含铬食品中,

表2 不同年龄、性别、居住地区人群人群铬暴露量概率分布/($\mu\text{g}/\text{kg}\cdot\text{BW}$)

Table 2 Probability distribution of chromium exposure among populations of different ages, genders, and residential areas/($\mu\text{g}/\text{kg}\cdot\text{BW}$)

分组	平均值(95%CI)			P50			P95		
	LB	MB	UB	LB	MB	UB	LB	MB	UB
1~6岁	1.523(1.524~1.534)	1.823(1.817~1.829)	2.117(2.110~2.124)	1.432	1.712	1.991	2.631	3.112	3.597
7~17岁	1.106(1.102~1.110)	1.316(1.312~1.321)	1.527(1.522~1.533)	1.035	1.234	1.434	1.955	2.306	2.664
18~59岁	0.734(0.731~0.736)	0.860(0.857~0.862)	0.986(0.983~0.989)	0.694	0.815	0.937	1.251	1.449	1.651
≥60岁	0.683(0.681~0.685)	0.806(0.803~0.808)	0.928(0.925~0.931)	0.646	0.764	0.882	1.165	1.353	1.547
男性	0.843(0.839~0.847)	0.989(0.984~0.994)	1.135(1.129~1.141)	0.739	0.869	0.999	1.675	1.950	2.231
女性	0.725(0.722~0.728)	0.856(0.852~0.859)	0.987(0.983~0.991)	0.659	0.779	0.900	1.338	1.565	1.796
城市	0.780(0.792~0.799)	0.933(0.929~0.937)	1.072(1.067~1.076)	0.722	0.848	0.975	1.482	1.720	1.966
农村	0.777(0.773~0.781)	0.918(0.913~0.923)	1.058(1.053~1.063)	0.678	0.802	0.926	1.547	1.814	2.083



注:数据是由2018年重庆市居民膳食调查使用MB估计提供

图4 不同种类食品对膳食中铬暴露的贡献率

Figure 4 Contribution rate of different types of food to dietary Cr exposure

铬暴露贡献率最大的为谷物及其制品(39.31%~49.13%),其次是蔬菜(15.97%~27.78%)、肉及肉制品(9.39%~13.24%),谷物及其制品、蔬菜、肉及肉制品三类食品的合计贡献率对膳食中铬暴露的总贡献率均超过60%。

2.4 重庆市居民膳食中铬暴露风险特征描述

当未检出数据分别用LB、MB、UB替代时,各年龄、性别、地区组人群膳食中铬平均暴露量和P95暴露量占TDI百分比均<1,详见表3,表明重庆市居民膳食中铬暴露对健康的风险较低。

表3 不同年龄、性别、地区人群暴露量占TDI百分比/%

Table 3 Exposure percentage to TDI among populations of different ages, genders, and regions/%

分组	平均值			P95		
	LB	MB	UB	LB	MB	UB
1~6岁	0.51	0.61	0.71	0.88	1.04	1.20
7~17岁	0.37	0.44	0.51	0.65	0.77	0.89
18~59岁	0.24	0.29	0.33	0.42	0.48	0.55
≥60岁	0.23	0.27	0.31	0.39	0.45	0.52
男性	0.28	0.33	0.38	0.56	0.65	0.74
女性	0.24	0.29	0.33	0.45	0.52	0.60
城市	0.26	0.31	0.36	0.49	0.57	0.66
农村	0.26	0.31	0.35	0.52	0.60	0.69

3 讨论

在近代,由于重金属元素污染曾引起多起重大公共卫生事件,如日本熊本县水俣湾甲基汞污染事件、日本富士县神通川流域镉污染事件,导致食物中重金属元素污染水平及其健康风险一直以来是民众关注的焦点,具有很高舆论敏感性。重庆市是西南地区工业中心,针对我市元素类污染物膳食暴露风险研究具有重要的公共卫生学意义。EFSA对铬的风险评估报告显示,肉及肉制品、谷物及其制品、蔬菜、水果以及牛奶和乳制品的铬浓度较低($<0.1\text{ mg}/\text{kg}$)^[6]。本次研究中,即使在未检出数据用LOD替代情况下,肉及肉制品、谷物及其制品、蔬菜、水果以及奶及奶制品的铬含量水平为 $0.031\text{ 3}~0.072\text{ 1 mg}/\text{kg}$ ($<0.1\text{ mg}/\text{kg}$),与2014年EFSA对食品中铬的调查结果一致。在所有食品类别中,铬含量最高的食物是水产品及其制品($0.126\text{ 3 mg}/\text{kg}$)小于ARNICH等^[17]在对来自法国市场的159份鱼类和其他海产品分析得出的结果(鱼类中铬的平均含量为 $0.220\text{ mg}/\text{kg}$,海产品中为 $0.228\text{ mg}/\text{kg}$)。总体来看,肉及肉制品、水产品及其制品、谷物及其制品的铬含量水平高于水果、奶及奶制品,与BRAKATOS等^[18]对希腊各类食物中铬含量水平研究的结果一致。本研究中,膳食暴露评估结果显示,重庆市居民通过食物铬每天平均摄入量最低为 $0.683\text{ }\mu\text{g}/\text{kg}\cdot\text{BW}$,最高为 $2.117\text{ }\mu\text{g}/\text{kg}\cdot\text{BW}$,与2014年EFSA对食品中铬的暴露评估研究结果基本一致^[6]。各年龄、性别、地区组人群膳食铬平均暴露量和P95暴露量占TDI百分比均低于1,说明目前膳食铬暴露对重庆市居民健康造成的风险较低。

本次研究存在的一定的不确定性。虽然本次研究在铬的暴露水平评估方法上,选择了比确定性评估更为精确的概率评估法,在铬含量、居民膳食消费量数据来自铬含量监测和3天24h问卷调查的数据,这些在一定程度上减少健康风险评估中的不确定性,但是在本次评估中所选的食品种类尚未涵盖居民进食的所有食品种类,如豆及豆制品未纳入评估范围,一些食品如乳和乳制品、水产品及其

制品的样本量比较少,远低于其他几类食品,收集到的数据并不能完全代表某一类食物中的铬含量水平,一些食品如大米制品、乳制品的铬含量水平采用大类总体铬含量水平替代,且肉及肉制品、蔬菜、谷物及其制品等食物的加工烹调方式也未考虑,这些因素均可能导致评估结果存在一定程度的不确定性。调查的消费人群与实际消费模式也存在一定的差异,重庆市居民的消费结构可能随着时间的变化发生改变,本次评估采用的2018年重庆市营养健康调查的食物消费量数据并不能代表所有的情况。上述情况可能会影响评估结果的精确性,导致健康风险的高估或低估,但不会对评估的结论产生实质性影响。此外值得注意的是,由于目前缺乏关于不同食品中铬存在形态的研究报道,此次评估是建立在食品中的铬均以Cr(Ⅲ)形式存在的假设基础上,若有更多关于食品中铬存在形式和含量的研究报道,则应考虑重新进行风险评估。

参考文献

- [1] PAVESI T, MOREIRA J C. Mechanisms and individuality in chromium toxicity in humans[J]. *Journal of Applied Toxicology*, 2020, 40(9): 1183-1197.
- [2] International Agency for Research on Cancer (IARC). Chromium, nickel and welding[J]. *IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans*, 1990, 49: 9283212495.
- [3] HAMILTON E M, YOUNG S D, BAILEY E H, et al. Chromium speciation in foodstuffs: A review[J]. *Food Chemistry*, 2018, 250: 105-112.
- [4] KOVÁCS R, BÉNI Á, KAROSI R, et al. Investigation of chromium content in foodstuffs and nutrition supplements by GFAAS and determination of changing Cr(Ⅲ) to Cr(Ⅵ) during baking and toasting bread[J]. *Food Chemistry*, 2007, 105(3): 1209-1213.
- [5] NOVOTNIK B, ZULIANI T, ŠČANČAR J, et al. Chromate in food samples: An artefact of wrongly applied analytical methodology[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2013, 28(4): 558-566.
- [6] EFSA Panel on Dietetic Products, Nutrition and Allergies (NDA). Scientific opinion on dietary reference values for chromium[J]. *EFSA Journal*, 2014, 12(10): 3845.
- [7] 陈璐璐,周北海,徐冰冰,等.太湖水体典型重金属镉和铬含量及其生态风险[J].*生态学杂志*, 2011, 30(10): 2290-2296.
CHEN L L, ZHOU B H, XU B B, et al. Cadmium and chromium concentrations and their ecological risks in the water body of Taihu Lake, East China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(10): 2290-2296.
- [8] 翁倩,李启权,代天飞,等.崇州市典型农田土壤中铬的含量状况与空间分布[J].*四川农业大学学报*, 2015, 33(4): 408-414.
WENG Q, LI Q Q, DAI T F, et al. Chromium content status and spatial distribution in typical farmland soils of Chongzhou[J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2015, 33(4): 408-414.
- [9] 张占梅,黄大俊,石瑞琦,等.重庆主城区河流底泥中重金属污染现状及生态风险分析[J].*重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2020, 39(11): 122-127.
ZHANG Z M, HUANG D J, SHI R Q, et al. Heavy metal pollution and its ecological risk analysis of river sediments in the main urban area of Chongqing[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)*, 2020, 39(11): 122-127.
- [10] 高志杰,汪媿娜,郑海波,等.宁波市2012年市售海产品中重金属铅、汞、镉、铬污染状况分析[J].*中国食品卫生杂志*, 2014, 26(1): 76-78.
GAO Z J, WANG L N, ZHENG H B, et al. Analysis on concentration of heavy metals lead, mercury, cadmium, chromium in seafood in Ningbo in 2012[J]. *Chinese Journal of Food Hygiene*, 2014, 26(1): 76-78.
- [11] 王晓波,李建国,刘冬英,等.广州市市售大米中铬污染水平及健康风险评价[J].*中国食品卫生杂志*, 2015, 27(1): 75-78.
WANG X B, LI J G, LIU D Y, et al. Evaluation on chromium contamination in rice to human health in Guangzhou city[J]. *Chinese Journal of Food Hygiene*, 2015, 27(1): 75-78.
- [12] 梁春穗,罗建波.食品安全风险监测工作手册[M].北京:中国标准出版社,2012.
LIANG C H, LUO J B. *Work manual of food safety risk monitoring* [M]. Beijing: Standards Press of China, 2012.
- [13] 国家卫生和计划生育委员会.食品安全国家标准 食品中铬的测定:GB 5009.123—2014[S].北京:中国标准出版社,2014.
National Health and Family Planning Commission. *National food safety standard- Determination of chromium in foods: GB 5009.123—2014* [S]. Beijing: Standards Press of China, 2014.
- [14] 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 食品中多元素的测定:GB 5009.268—2016[S].北京:中国标准出版社,2016.
National Health and Family Planning Commission, National Food and Drug Administration. *National food safety standard- Determination of multiple elements in foods: GB 5009.268—2016* [S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
- [15] Food and Agriculture Organization of the United Nations/World Health Organization (FAO/WHO). Principles and methods for the risk assessment of chemicals in food [M/OL]. Ottawa: WHO Press, 2021. <https://www.who.int/publications/i/item/9789241572408>.
- [16] European Food Safety Authority. Management of left-censored data in dietary exposure assessment of chemical substances[J]. *EFSA Journal*, 2010, 8(3): 1557.
- [17] ARNICH N, SIROT V, RIVIÈRE G, et al. Dietary exposure to trace elements and health risk assessment in the 2nd French Total Diet Study[J]. *Food Chemistry Toxicol*, 2012, 50(7): 2432-2449.
- [18] BRATAKOS M S, LAZOS E S, BRATAKOS S M. Chromium content of selected Greek foods[J]. *Science of the Total Environment*, 2002, 290(1-3): 47-58.