

风险监测

基于污染指数法对重庆市市售食品中重金属污染调查及评价

吴艾琳^{1,2}, 罗书全², 赵怡楠², 赵舰², 练雪梅¹

(1. 重庆医科大学公共卫生与管理学院, 重庆 400016; 2. 重庆市疾病预防控制中心, 重庆 400042)

摘要:目的 了解重庆市市售食品中重金属的含量及分布情况,对食品中重金属污染状况和程度进行分析和评价,为食品安全评估和针对性的控制措施提供科学依据。方法 按多阶段分层随机抽样,将重庆市划分为四个片区,兼顾市民消费量较大的八类食品,在每个片区各抽取450份样品,全市共采集样品1800份,利用单因子污染指数法和内梅罗(Nemerow)综合污染指数法,对食品中重金属的污染程度进行评价。结果 本研究的八类食品中,各类污染物的平均含量均低于国家标准限值。样品中镉、砷和汞含量中位数(P50)最高的均为食用菌及其制品,分别为0.230、0.150和0.012 mg/kg,其次是谷物及其制品中的镉(0.023 mg/kg)和砷(0.055 mg/kg)含量,以及水产动物及其制品中的汞含量(0.004 mg/kg)。利用单因子污染指数和Nemerow综合污染指数对八类食品的重金属含量进行评价,各类食品可评价为安全、轻度污染,但食用菌及其制品中部分样品重金属含量较高,综合污染指数偏高。结论 重庆市八类食品存在不同程度的重金属污染情况,但总体污染程度较低。食用菌及其制品有部分样品重金属检出值较高,综合污染指数较高,需进一步采取针对性的控制措施。

关键词:食品; 重金属污染; 单因子污染指数; Nemerow综合污染指数; 食品安全

中图分类号:R155 文献标识码:A 文章编号:1004-8456(2021)02-0175-06

DOI:10.13590/j.cjfh.2021.02.010

Survey and evaluation of heavy metal pollution of food in Chongqing by contamination index method

WU Ailin^{1,2}, LUO Shuquan², ZHAO Yi'nan², ZHAO Jian², LIAN Xuemei¹

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

Abstract: Objective To understand the content and distribution characteristics of heavy metal in food in Chongqing, analyze and evaluate the risk, and provide scientific basis for food safety assessment and targeted control measures in Chongqing. **Methods** With multi-stage stratified random sampling method, Chongqing was divided into four areas. A total of 1800 samples within eight food categories with large consumption were collected in the whole city with 450 samples from each area. The single factor pollution index method and the Nemerow comprehensive pollution index method were used to evaluate the degree of heavy metal pollution in food. **Results** Among the eight food categories in this study, all the average heavy metal contents were lower than the national standard limit. The highest median (P50) contents of cadmium, arsenic and mercury in edible fungi and their products were 0.230, 0.150, 0.012 mg/kg, respectively. The median contents of cadmium (0.023 mg/kg) and arsenic (0.055 mg/kg) in cereals and their products were the highest, and the mercury contents of aquatic animals and their products (0.004 mg/kg) were higher than other food categories. The single factor pollution index and Nemerow comprehensive pollution index were used to evaluate the heavy metal content of eight categories of food. All kinds of food could be evaluated as safe and slightly polluted. However, some samples of edible fungi and their products had higher heavy metal content and higher comprehensive pollution index. **Conclusion** Eight categories of foods in Chongqing had different levels of heavy metal pollution, but the overall pollution level was relatively low. Some samples of edible fungus and its products had high level of heavy metals and high comprehensive pollution index, so it is necessary to further strengthen targeted control measures.

Key words: Foods; heavy metal pollution; single factor pollution index; Nemerow comprehensive pollution index; food safety

收稿日期:2020-11-20

基金项目:重庆市科卫联合医学科研项目(2018QNXM030)

作者简介:吴艾琳 女 医师 研究方向为营养与食品安全 E-mail:ailin5296@163.com

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

重金属污染因其较强的毒性和持久性,而引起广泛关注^[1],尤其是环境中的重金属元素,其已在农产品中普遍存在,并成为人们迫切关注的问题。为了解重庆市市售食品中镉(Cd)、砷(As)、汞(Hg)的含量及分布情况,及时发现食品安全隐患,针对食品安全提出科学防控依据,本研究基于污染指数法,采用单因子污染指数和内梅罗(Nemerow)综合污染指数,分析重庆市市售食品中重金属含量的片区分布与污染程度,为食品重金属污染情况累积基础资料,为开展居民重金属膳食暴露评估提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

在2018年6月—2019年8月,按多阶段分层整群随机抽样,根据地域特点,将重庆市划分为主城区、渝西片区、渝东北片区和渝东南片区,共四个片区,兼顾市民消费量较大的食品种类,在每个片区采集蛋及蛋制品、水产动物及其制品、水果及其制品、谷物及其制品、食用菌及其制品(以鲜重计)、肉与肉制品、乳及乳制品、蔬菜及其制品等八类食品共450份,全市共采集样品1800份。样品主要来自当地自产或市售产品,采集地点主要为当地居民日常消费量较大的超市、商店和农贸市场。样品的采集方法按国家标准要求进行,不便分零的样品应最少采集500~1000g。

1.2 方法

1.2.1 样品检测

根据既往研究,选择检测重庆市风险较大的重金属污染物,包括Cd、总Hg、总As^[2-3]。根据GB 5009.268—2016《食品安全国家标准 食品中多元素的测定》^[4],由经过中国合格评定国家认可委员会(CNAS)认证的实验室,对样品中重金属含量进行检测。

对未检出的数据,按世界卫生组织食品中污染物含量低水平数据进行处理,即当检测结果低于检测限(LOD)的结果比例≤60%时,所有低于LOD的结果按1/2 LOD赋值计算^[5]。本次调查中,Cd和总As的LOD均为0.002 mg/kg(固体)、0.000 5 mg/L(液体),总Hg的LOD为0.001 mg/kg(固

体)、0.000 3 mg/L(液体)^[4]。

1.2.2 评价标准和方法

以GB 2762—2017《食品安全国家标准 食品中污染物限量》^[6]中规定的重金属污染物限量标准为评价标准,对各类食品中Cd、As、Hg的含量和超标情况进行判定,同时采用污染指数法对食品中的重金属污染程度进行评价,包括单因子污染指数法和Nemerow综合污染指数法。

单因子污染指数法适用于单因子污染特定区域的评价^[7-8],以实际污染水平与标准限值的比值,评估某个单一因子对特定区域的污染情况^[9],值的大小直接反映了该种因子的污染程度,值越大,表示所受到的污染越严重。单因子污染指数评价公式为:

$$P_i = \frac{C_i}{S_i}$$

式中: P_i 为重金属污染物*i*元素的单因子污染指数; C_i 为重金属污染物*i*元素的实测浓度值,mg/kg; S_i 为重金属污染物*i*元素的限量值,mg/kg。

Nemerow综合污染指数法是一种加权型多因子质量指数,兼顾单因子污染指数平均值和极值,反映各类因子对特定区域的综合污染水平,是环境中重金属污染评价的经典方法^[10],侧重反映高浓度污染物的影响^[1,9]。Nemerow综合污染指数评价公式为:

$$P_n = \sqrt{\frac{\left(\frac{C_i}{S_i}\right)_{\max}^2 + \left(\frac{C_i}{S_i}\right)_{\text{ave}}^2}{2}}$$

式中: P_n 为Nemerow综合污染指数; $(C_i/S_i)_{\max}$ 为所有评价污染物中单因子污染指数的最大值; $(C_i/S_i)_{\text{ave}}$ 为所有评价污染物中单因子污染指数的平均值。

1.2.3 分级标准

参考NY/T 398—2000《农、畜、水产品污染监测技术规范》^[11]制定的农、畜、水产品中质量分级标准,将食品划分为3个质量等级评价。若样品同时存在多种污染物时,则按该样品中污染物最高污染指数确定该样品的质量等级,即以最高限制因素计算^[9,11],见表1。

表1 农、畜、水产品质量分级标准

Table 1 Criteria of quality classification for agricultural, livestock and aquatic products

等级划分	单因子污染指数	污染水平	质量水平
一级产品	≤0.6	有污染物残留产品,污染物含量接近背景值或略高于背景值	安全
二级产品	0.6~1.0	污染物残留较多的产品	轻度污染
三级产品	≥1.0	污染产品,污染物含量超过食品卫生标准,品质下降,影响食用和出口等	重度污染

1.3 统计学分析

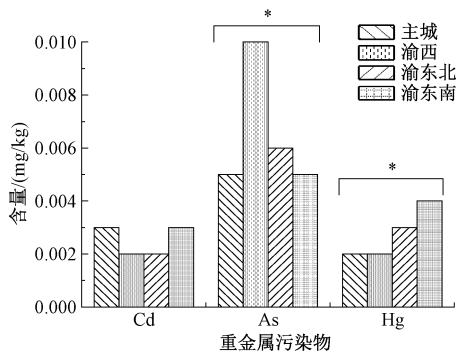
采用 Excel 2007 和 SPSS 26.0 软件进行数据整理、分类汇总和计算,用 Origin 2018 进行图形的绘制,采用 Shapiro-Wilk 正态性检验验证数据分布情况,采用 Kruskal-Wallis 检验和 χ^2 检验比较污染物检出的组间差异,采用污染指数对污染程度进行评价,以 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 检测情况

2.1.1 各片区的检测情况

对主城区、渝西片区、渝东北片区和渝东南片区的 1 800 份样品中重金属 Cd、As、Hg 的含量进行测定分析,并对 Cd、As、Hg 的检测值进行 Shapiro-Wilk 正态性检验,3 组数据的显著性 $P < 0.001$,偏度均较大,说明数据分布与正态性分布有显著差异,检测数据呈非正态性分布,因此采用中位数对样本的集中趋势和平均含量进行描述,检测结果如图 1。结果显示,各片区样品中重金属污染水平,As 最高,Cd 和 Hg 次之,三者含量中位数分别为 0.006、0.003 和 0.003 mg/kg。



注: * 表示该类污染物在各片区间检测值中位数的差异有统计学意义 ($P < 0.05$)

图 1 各片区样品中 Cd、As、Hg 的含量比较(中位数)
Figure 1 Comparison of cadmium, arsenic and mercury in samples from different areas (median)

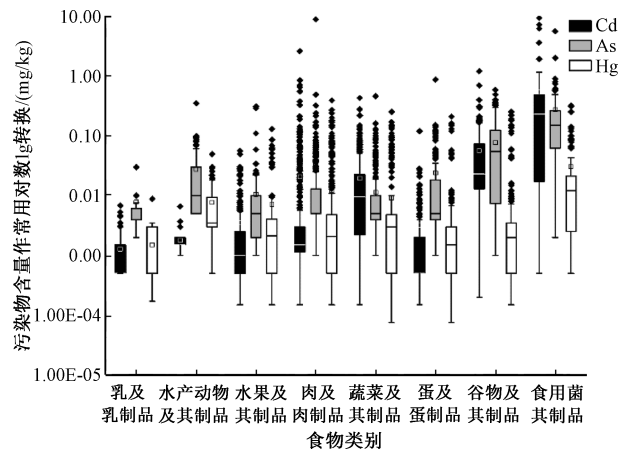
采用 Kruskal-Wallis 检验比较污染物在每个片区中的分布情况,其中,Cd 在各片区中的分布差异无统计学意义 ($H = 3.829, P = 0.281$)。渝西片区 As 检测值的中位数最高为 (0.010 ± 0.273) mg/kg,地区间的检测值差异有统计学意义 ($H = 53.600, P < 0.001$)。渝东南片区 Hg 检测值的中位数最高为 (0.004 ± 0.012) mg/kg,地区间的检测值差异有统计学意义 ($H = 118.715, P < 0.001$)。

2.1.2 各类食品检测情况

根据中位数 (P50),Cd、As、Hg 三种重金属污染物检测值含量最高的均为食用菌及其制品(鲜重),分别为 0.230、0.150 和 0.012 mg/kg。Cd 检测值含

量第二高的为谷物及其制品 (0.023 mg/kg) ,最低为蛋与蛋制品、水果及其制品和乳与乳制品,均为 0.001 mg/kg 。As 检测值含量第二高的为谷物及其制品 (0.055 mg/kg) ,最低为乳与乳制品 (0.004 mg/kg) 。Hg 检测值含量第二高的为水产动物及其制品 (0.004 mg/kg) ,最低为乳与乳制品 (0.001 mg/kg) 。

部分样品检测值较高,因此,将样品各类污染物的检测值取常用对数后,各类样品 Cd、As、Hg 的检测情况如图 2。图中的离群值已进行复检,复检结果无异议,故保留真实检测值计算。



注:图中的点为检测离群值,均已进行复检,复检结果无异议

图 2 各类食品中 Cd、As、Hg 的检出情况箱型图
Figure 2 Box-plot of detection of Cd, As and Hg in various foods

2.2 各类食品污染物的检出率比较

根据各类样品检测值,以 LOD 作为参考值,计算各类样品的检出率。结果显示,Cd 检出率最高的是食用菌及其制品,检出率为 96.84% (92/95),其次是谷物及其制品,检出率为 93.33% (224/240),各类样品中 Cd 检出率的差异有统计学意义 ($\chi^2 = 551.175, P < 0.001$)。As 检出率最高的是水产动物及其制品和乳及乳制品,检出率均为 100.00%,其次为食用菌及其制品,检出率为 98.95% (94/95),各类样品中 As 检出率的差异有统计学意义 ($\chi^2 = 122.133, P < 0.001$)。Hg 检出率最高的为乳及乳制品,检出率为 99.07% (107/108),其次为食用菌及其制品,检出率为 91.58% (87/95),各类样品中 Hg 检出率的差异有统计学意义 ($\chi^2 = 104.118, P < 0.001$),见表 2。

2.3 检测结果超标情况

采用 GB 2762—2017^[6]对样品中的重金属污染超标情况进行评价,样品中 Cd、As、Hg 的总体超标率分别为 2.49% (42/1 690)、2.13% (21/987)、5.60% (91/1 625)。Cd 的超标率以食用菌及其制品最高,其次是谷物及其制品和蔬菜及其制品。

表2 各类样品重金属的检出情况比较

Table 2 Comparison of detection rates of heavy metal detection in all kinds of samples

食品类别	检测份数	Cd			As			Hg		
		检出份数	检出率/%	LOD*	检出份数	检出率/%	LOD*	检出份数	检出率/%	LOD*
蛋及蛋制品	188	46	24.47	0.002	174	92.55	0.002	102	54.26	0.001
水产动物及其制品	64	9	14.06	0.002	64	100.00	0.002	52	81.25	0.001
水果及其制品	175	47	26.86	0.002	131	74.86	0.002	121	69.14	0.001
谷物及其制品	240	224	93.33	0.002	231	96.25	0.002	143	59.58	0.001
食用菌及其制品	95	92	96.84	0.002	94	98.95	0.002	87	91.58	0.001
肉与肉制品	480	156	32.50	0.002	437	91.04	0.002	320	66.67	0.001
乳及乳制品	108	52	48.15	0.000 5	108	100.00	0.000 5	107	99.07	0.000 3
蔬菜及其制品	450	339	75.33	0.002	358	79.56	0.002	317	70.44	0.001
合计	1 800	965	53.61	—	1 597	88.72	—	1 249	69.39	—

注: * 除乳及乳制品的 LOD 单位为 mg/L 外,其余样品的检出限单位均为 mg/kg

As 的超标情况与 Cd 类似,以食用菌及其制品最高,其次是谷物及其制品和水产动物及其制品。Hg 的总体超标率较高,最高为食用菌及其制品,其次为肉与肉制品和谷物及其制品,见表 3。

表3 各类食品中重金属指标的检测结果超标情况

Table 3 Detection results of heavy metals in all kinds of samples exceed the standard

食品类别	检测份数	Cd			As			Hg		
		超标份数	超标率/%	国家标准限值/(mg/kg)	超标份数	超标率/%	国家标准限值/(mg/kg)	超标份数	超标率/%	国家标准限值/(mg/kg)
蛋及蛋制品	188	1	0.53	0.05	—	—	—	9	4.79	0.05
水产动物及其制品	64	0	0.00	0.1	1	1.56	0.1	0	0.00	0.5
水果及其制品	175	1	0.57	0.05	—	—	—	—	—	—
谷物及其制品	240	8	3.33	0.1, 0.2 ^a	11	4.58	0.2	16	6.67	0.02
食用菌及其制品	95	20	21.51 ^b	0.5	8	8.42	0.5	7	7.37	0.1
肉与肉制品	480	3	0.63	0.1, 0.5, 1.0 ^c	1	0.21	0.5	33	6.88	0.05
乳及乳制品	108	—	—	—	0	0.00	0.1	0	0.00	0.01
蔬菜及其制品	450	9	2.00	0.05, 0.1, 0.2 ^d	—	—	—	26	5.78	0.05
合计	1 800	42	2.49 ^b	—	21	2.13	—	91	5.60	—

注: ^a 谷物碾磨加工品中 Cd 限值为 0.1 mg/kg, 稻谷、糙米、大米中 Cd 限值为 0.2 mg/kg; ^b 食用菌及其制品中有 2 份样品无 Cd 国家标准限值, 超标率为 21.51% (20/93), 同理合计中超标率的计算均已扣除无国家标准限值的样品数量; ^c 肉类中 Cd 限值为 0.1 mg/kg, 禽畜肝脏 Cd 限值为 0.5 mg/kg, 禽畜肾脏 Cd 限值为 1.0 mg/kg; ^d 新鲜蔬菜(叶菜蔬菜、豆类蔬菜、块根和块茎蔬菜、茎类蔬菜、黄花菜除外)中 Cd 限值为 0.05 mg/kg, 豆类蔬菜、块根和块茎蔬菜、茎类蔬菜(芹菜除外)中 Cd 限值为 0.1 mg/kg, 叶类蔬菜、芹菜、黄花菜中 Cd 限值为 0.2 mg/kg; 一表示无国家标准限量值或该项不统计

2.4 多种重金属超标情况

同一份样品存在 2 种及 2 种以上重金属超标的情况,主要集中在食用菌及其制品、谷物及其制品、蛋及蛋制品、蔬菜及其制品和肉与肉制品等五类食品,其中,有 14 份样品存在 2 种重金属同时超标的情况,超标率为 0.96%,有 2 份样品存在 3 种重金属同时超标的情况,超标率为 0.14% (2/1 453),各类食品中多种重金属超标情况差异无统计学意义 ($\chi^2 = 3.644$, $P = 0.75$),见表 4。

2.5 食品重金属污染指数评价

2.5.1 各类食品中重金属污染情况

单因子污染指数均值评价结果显示,各类食品的单因子污染指数均 < 1,按标准 NY/T 398—2000^[11],属于一级和二级产品,各类食品可评价为安全、轻度污染。Cd 和 As 的单因子污染指数均以食用菌及其制品最高,其中食用菌及其制品 $P_{Cd} = 0.957$,属于轻度污染。Hg 的单因子污染指数最高为谷物及其制品, $P_{Hg} = 0.693$,同样属于

表4 同一份样品中多种重金属超标情况

Table 4 Excessive standard of 2 or more heavy metals in the same sample

食品类别	样品份数	两种污染物同时超标		三种污染物同时超标	
		超标份数	超标率/%	超标份数	超标率/%
蛋及蛋制品	188	1	0.53	0	0.00
谷物及其制品	240	5	2.08	0	0.00
食用菌及其制品	95	4	4.21	2	2.11
肉与肉制品	480	2	0.42	0	0.00
蔬菜及其制品	450	2	0.44	0	0.00
合计	1 453	14	0.96	2	0.14

轻度污染。

Nemerow 综合污染指数评价结果显示,食用菌及其制品综合污染指数最高 ($P_n = 13.159$),其次是肉与肉制品 ($P_n = 12.460$) 和谷物及其制品 ($P_n = 8.844$),见表 5。

2.5.2 各片区重金属污染情况

计算各片区的 Nemerow 综合污染指数,结果显

表5 各类食品重金属单因子污染指数及 Nemerow 综合污染指数计算结果

Table 5 Calculation results of the single-factor pollution index and Nemerow comprehensive pollution index for each category of the sample

食品类别	P_{Cd}	P_{As}	P_{Hg}	P_n
蛋及蛋制品	0.003 ~ 2.400 (0.064)	—	0.002 ~ 4.200 (0.164)	2.971
水产动物及其制品	0.010 ~ 0.066 (0.018)	0.050 ~ 3.500 (0.277)	0.001 ~ 0.099 (0.015)	2.476
水果及其制品	0.003 ~ 1.122 (0.070)	—	—	0.795
谷物及其制品	0.001 ~ 3.957 (0.333)	0.005 ~ 2.935 (0.385)	0.008 ~ 45.500 (0.693)	8.844
食用菌及其制品	0.001 ~ 18.600 (0.957)	0.004 ~ 11.200 (0.549)	0.005 ~ 3.200 (0.305)	13.159
肉与肉制品	0.001 ~ 7.020 (0.065)	0.002 ~ 17.620 (0.069)	0.003 ~ 7.800 (0.242)	12.460
乳及乳制品	—	0.020 ~ 0.300 (0.078)	0.017 ~ 0.880 (0.151)	0.628
蔬菜及其制品	0.001 ~ 2.200 (0.171)	—	0.002 ~ 5.000 (0.181)	3.538

注:—表示该项目暂无国标规定限制,无单因子指数值;括号内为该项目单因子污染指数均值

示各片区综合污染指数中位数为 6.967。由于目前暂无针对食品的总和污染指数评价分级标准,按各片区综合污染指数中位数比较,样品采集的四个片

区,渝西和渝东北片区的 Nemerow 指数均较大 ($P_n \geq 6.967$),食品样品中重金属污染相对较为严重,见图 3。

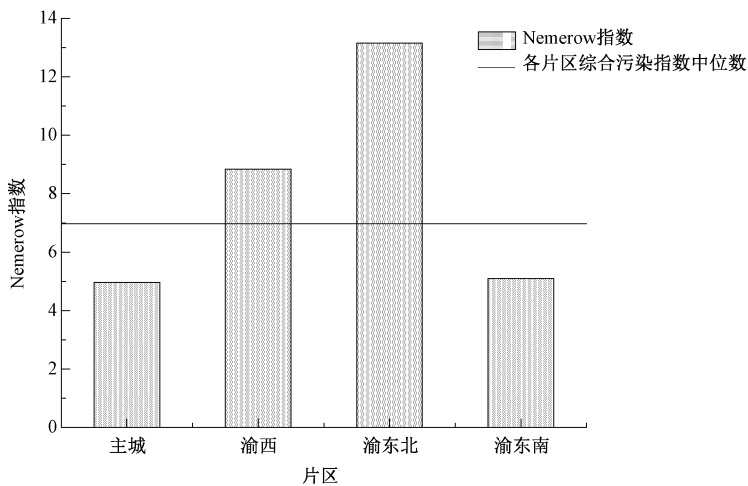


图3 各片区重金属 Nemerow 综合污染指数计算结果

Figure 3 Calculation results of Nemerow comprehensive pollution index of heavy metals in each area

3 讨论

随着城市化和工业化的急速发展,环境中的重金属污染情况逐渐加重,可能通过植物富集等作用在农作物中聚集,造成食品中重金属污染^[12]。而食品中的重金属污染物可通过食物链传递进入人体,是消费者接触重金属的主要来源之一,由于重金属污染物具有低降解性、长生物半衰期的特性,极易在人体内形成蓄积,对人体产生神经毒性、致癌、致畸等危害^[13-15]。

根据历年监测情况和鲍丽然等^[2]、张云芸等^[3]的研究结果显示,重庆市风险较大的重金属污染物主要集中在 Cd、As、Hg。本次调查被检测的八类食品中 Cd、As、Hg 均有不同程度检出,但各类污染物的平均含量均低于国家标准限值,超标率和单因子污染指数均较低。各类食品的单因子污染指数均 < 1,可评价为安全、轻度污染,表明重庆市谷类、蔬菜、水果等食品中 Cd、As 和 Hg 整体污染程度较低,

重金属含量在安全范围内,可放心食用,这与陕西省^[12]、吉林省^[16]等地的调查结果一致。

就重金属污染物在各片区中的分布而言,Cd 在各片区中的分布大致相同,As 在渝西片区的平均含量最高,Hg 在渝东南片区的平均含量最高,重金属污染在片区中分布的差异提示,食品中重金属的污染情况可能和当地环境污染状况有关,这与 ARORA 等^[17]的研究猜想一致。比较各片区的 Nemerow 综合污染指数,最高为渝东北片区,提示该地区的综合污染情况值得关注。综合污染指数是在单因子污染指数上同时考虑了所有纳入研究的污染物,能较好地综合评估该区域的污染水平,但值得注意的是,Nemerow 综合污染指数本身只考虑了单因子污染指数均值和最高值的影响,可能会突出了单因子污染指数最大的污染物对该片区的影响,同时缩小了低浓度因子的影响^[1,9],因此在利用综合污染指数时还应结合当地实际情况开展综合评价。

本次采集的 1 800 份样品中,涵盖了谷类、蔬

菜、水果等八大类食品,是市民“菜篮子”工程的重要食品^[12],直接关系到市民们的身体健康。在本次研究中,各类食品重金属的平均含量均低于国家标准限值,污染程度较低。其中,食用菌及其制品中Cd、As、Hg的平均含量最高,谷物及其制品中Cd和As平均含量较高,这与聂晓玲等^[12]对陕西省的调查结果一致。根据国家标准对样品超标情况进行判定,Cd、As和Hg的超标情况基本集中在食用菌及其制品和谷物及其制品两大类。同时,采用污染指数法对各类食品的重金属含量进行评价,各类食品重金属污染情况总体处于安全可控,食用菌及其制品和肉与肉制品重金属的综合污染水平较高。根据研究结果可发现,谷物及其制品虽然超标率较高,但综合污染指数较低,说明检出极值较低,综合污染情况尚可,但谷物及其制品作为市民主要消费食品,其重金属污染情况依旧不容小觑。另一方面,本次样品中食用菌及其制品重金属的平均含量均低于国家标准限值,说明重庆市食用菌及其制品中重金属含量总体是安全的,这与黎勇等^[18]于2006年对重庆市主要食用菌的研究结果一致,但超标率和Nemerow综合污染指数较高,说明有部分样品重金属含量较高,导致综合污染指数受到检测值极值的影响,提示部分样品的重金属污染情况值得关注。

需要说明的是,本次研究采用污染指数法评价食品中重金属污染物的影响,包括单因子污染指数法和Nemerow综合污染指数法,目前,这两种方法多用于土壤、水质环境等的污染,对食品的污染评价近年正处于探索阶段^[9-10]。本次研究探索性的使用这两种评价方法,初步了解食品中Cd、As和Hg三种重金属污染物的污染情况,但不同人群食品的摄入种类和摄入量可能存在较大的差异,还需进一步开展膳食暴露风险评估。

参考文献

[1] MA L, SUN J, YANG Z G, et al. Heavy metal contamination of agricultural soils affected by mining activities around the Ganxi River in Chenzhou, Southern China [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2015, 187(12): 731.

[2] 鲍丽然,邓海,贾中民,等. 重庆秀山西北部农田土壤重金属生态健康风险评价[J]. 中国地质, 2020, 47(6): 1625-1636.

[3] 张芸芸. 基于海量文献的中国农田土壤重金属镉的时空分布及风险评价[D]. 太原:山西大学,2019.

[4] 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. 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.

[5] 王绪卿,吴永宁,陈君石. 食品污染监测低水平数据处理问题[J]. 中华预防医学杂志,2002, 36(4): 278-279.

[6] 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. 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.

[7] 屈雪寅,郑楠,韩荣伟,等. 污染指数及危害系数(HQ)评价生乳中重金属残留风险分析方法研究[J]. 中国畜牧兽医, 2013, 40(S1): 22-26.

[8] 关伯仁. 评内梅罗的污染指数[J]. 环境科学, 1979(4): 67-71.

[9] 孙延斌,孙婷,董淑香,等. 污染指数法在乳制品重金属污染评价中的应用研究[J]. 中国食品卫生杂志, 2015, 27(4): 441-446.

[10] GUO X X, LIU C Q, ZHU Z Z, et al. Evaluation methods for soil heavy metals contamination: a review[J]. Chinese Journal of Ecology, 2011, 30(5): 889-896.

[11] 中华人民共和国农业部. 农、畜、水产品污染监测技术规范: NY/T 398—2000 [S]. 北京:中国标准出版社,2000.

[12] 聂晓玲,程国霞,王敏娟,等. 2014年陕西省市售食品中重金属污染调查及评价[J]. 中国食品卫生杂志,2016, 28(2): 240-243.

[13] GIRI S, MAHATO M K, BHATTACHARJEE S, et al. Development of a new noncarcinogenic heavy metal pollution index for quality ranking of vegetable, rice, and milk [J]. Ecological Indicators, 2020, 113: 106214.

[14] 王慧,毛伟峰,蒋定国,等. 中国居民水产品中四种常见重金属暴露评估[J]. 中国食品卫生杂志,2019, 31(5): 470-475.

[15] ORISAKWE O E, NDUKA J K, AMADI C N, et al. Heavy metals health risk assessment for population via consumption of food crops and fruits in Owerri, South Eastern, Nigeria [J]. Chemistry Central Journal, 2012, 6(1): 77.

[16] 白光大,翁熹君,付尧,等. 2010年吉林省食品中有害金属监测结果分析[J]. 应用预防医学, 2012, 18(3): 166-168.

[17] ARORA M, KIRAN B, RANI S, et al. Heavy metal accumulation in vegetables irrigated with water from different sources[J]. Food Chemistry, 2008, 111(4): 811-815.

[18] 黎勇,黄建国,袁玲. 重庆市主要食用菌的重金属含量及评价[J]. 西南农业大学学报(自然科学版), 2006, 28(2): 231-235.