

## 风险评估

## 污染指数法在乳制品重金属污染评价中的应用研究

孙延斌,孙婷,董淑香,李士凯,钟庆,张军

(济南市疾病预防控制中心,山东 济南 250021)

**摘要:**目的 了解济南市乳制品中重金属污染物含量分布特征,评价重金属污染状况及程度。方法 2012—2013 年对济南市生乳、发酵乳、灭菌乳、婴幼儿配方乳粉和普通乳粉等 5 种乳制品中的铅(Pb)、汞(Hg)、镉(Cd)、铬(Cr)及类金属元素砷(As)含量进行测定。采用单因子污染指数法和内梅罗综合污染指数法,按农产品质量分级标准,对其污染程度进行分析评价。结果 乳制品中 5 种重金属元素项目检出率分别为 Pb 14.0% (21/150)、总 As 24.7% (37/150)、总 Hg 82.0% (109/133)、Cd 26.3% (35/133) 和 Cr 72.9% (43/59),生乳中 Pb 和灭菌乳中 Pb、Cd 未检出。生乳中总 Hg 的均值、P75 和 P95 均超过限量值,发酵乳、灭菌乳中总 Hg 含量和普通乳粉中 Cd 含量的 P95 超过限量值。生乳、发酵乳和灭菌乳等液态乳重金属检出率和单因子污染指数均以总 Hg 最高,其中生乳  $P_{Hg} > 1$ ,属重度污染,发酵乳  $P_{Hg} > 0.6$ ,属轻度污染;婴幼儿配方乳粉和普通乳粉等固态乳重金属检出率以 Cr 最高,单因子污染指数以 Cd 最高,处于安全级别范围内。生乳重金属污染程度最高,综合污染指数  $P_n = 0.754$ ,属轻度污染,婴幼儿配方乳粉最低,综合污染指数排序为生乳 > 发酵乳 > 灭菌乳 > 普通乳粉 > 婴幼儿配方乳粉。结论 济南市 4 种乳制品达到安全级别,受重金属污染威胁较小。液态乳重金属污染物主要为总 Hg,固态乳为 Cd。生乳中总 Hg 单因子污染指数和综合污染指数较高,处于污染状态,应加强生乳中重金属污染物总 Hg 含量的控制。

**关键词:**重金属; 乳制品; 单因子污染指数; 内梅罗综合污染指数; 食品污染物; 食品安全; 风险评估

**中图分类号:** R155; O614 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-8456(2015)04-0441-06

**DOI:** 10.13590/j.cjfh.2015.04.020

### The application of contamination index method to evaluate heavy metal contaminations in dairy products

SUN Yan-bin, SUN Ting, DONG Shu-xiang, LI Shi-kai, ZHONG Qing, ZHANG Jun

(Jinan Center for Disease Control and Prevention, Shandong Jinan 250021, China)

**Abstract: Objective** To understand the distribution characteristics of heavy metal contamination in dairy products, and to evaluate the status and the extent of heavy metal contamination. **Methods** The contents of Pb, total-Hg, Cd, Cr and total-As in raw milk, fermented milk, sterilized milk, infant formula and milk powder during 2012-2013 were detected. Single factor contamination index method and comprehensive contamination index method of Nemerow were used to evaluate the contamination level according to the grading standard of agriculture product quality. **Results** The detection rate of Pb, total-As, total-Hg, Cd and Cr were 14.0% (21/150), 24.7% (37/150), 82.0% (109/133), 26.3% (35/133) and 72.9% (43/59) in dairy products, respectively. Pb in raw milk and Cd in sterilized milk were not detected. The mean, P75 and P95 of total-Hg in raw milk were higher than the limit. The P95 of total-Hg in fermented milk and sterilized milk and Cd in milk powder were higher than the limit. The detection rate and single factor contamination index of total-Hg were the highest in raw milk, fermented milk and sterilized milk, which indicated there was severe contamination in the raw milk ( $P_{Hg} > 1$ ) and mild contamination in fermented milk ( $P_{Hg} > 0.6$ ). The detection rate of Cr was the highest in infant formula and milk powder, while single factor contamination index of Cd was the highest. The heavy metal contamination in raw milk ranked the first with  $P_n = 0.754$ , reaching mild level of contamination. The heavy metal contamination in dairy products could be lined in a decreasing order of raw milk, fermented milk, sterilized milk, milk powder and infant formula.

**Conclusion** Four kinds of dairy products were at the safe level of heavy metal contamination. Total-Hg was the dominant heavy metal contamination in liquid milk, while Cd in solid milk. Single factor contamination index and comprehensive contamination index of total-Hg in raw milk indicated that measures should be taken to prevent the contamination.

收稿日期:2015-01-12

基金项目:济南市科学技术发展计划项目(201121055)

作者简介:孙延斌 男 主任医师 研究方向为营养与食品安全 E-mail:shipinsyb@163.com

通讯作者:李士凯 男 副主任技师 研究方向为营养与食品安全 E-mail:lishikai@163.com

**Key words:** Heavy metals; dairy products; single factor pollution index method; comprehensive pollution index method of Nemerow; food contaminants; food safety; risk assessment

乳制品营养价值全面均衡,富含蛋白质、矿物质和维生素等,还含有各种多功能的免疫因子和生物活性因子,如免疫球蛋白、乳铁蛋白、乳清蛋白和生长因子等,可提供人类生长发育所必须的全部营养素,是迄今为止被公认的营养价值最接近于完善的全价食物<sup>[1]</sup>。然而,随着全球经济的快速发展,人类活动范围的拓展,导致土壤、水质和大气环境中的重金属污染不断加剧,直接或间接地影响了食用农产品的安全。重金属主要指铅(Pb)、汞(Hg)、镉(Cd)、铬(Cr)及类金属元素砷(As)等元素,多以固相化合物结合形态广泛分布于自然界,主要通过“工业三废”以及化肥、农药的使用等污染方式进入并存在于土壤母质、水体和大气环境中。在生物圈内,经过动、植物对重金属的吸收、富集、迁移、相互转化和分解等一系列生物浓缩与循环污染,最终到达食物链的终端,危害人类健康<sup>[2-4]</sup>。

重金属元素有较大的生物毒性,长期摄入重金属污染食品易对人体产生潜在的危害<sup>[4]</sup>,如铅伤害大脑神经组织、影响酶系统、阻碍血细胞的形成,造成神经功能紊乱、贫血、免疫力低下等;甲基汞可侵入脑神经细胞,损害肾脏、肝脏和中枢神经系统等,引发“水俣病”;砷(三价)可抑制酶的活性,影响细胞正常代谢;镉可损坏肝、肾器官中酶系统的正常功能,影响骨骼的生长代谢,引发各种骨骼病变;铬(六价)可影响机体的抗氧化系统,损伤消化道、呼吸道、皮肤及粘膜等,严重的会造成遗传性基因缺陷和癌症。基于重金属污染物对人类健康的严重危害,早在20世纪80年代,国际癌症研究机构(IARC)将镉、砷、六价铬列为确定的人类致癌物,无机铅和无机铅化合物、甲基汞列为人类可能的致癌物<sup>[5]</sup>。为了解济南市乳制品中重金属污染状况,掌握背景数据,减少居民膳食暴露,降低对人类健康的危害,2012—2013年本课题组选择济南市生产加工和流通领域中常见的5类乳制品,测定了5种重金属污染物的含量特征,并运用污染指数法对乳制品的污染状况及程度进行了分析与评价。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 样品

按照《食品安全风险监测工作手册》<sup>[6]</sup>中规定的采样技术要求采集样品。监测样品主要采集于济南市的部分超市、专卖店、生乳收购站、奶站和乳

制品生产企业等。监测的乳制品种类分别为液态乳和固态乳两大类,其中液态乳包括生乳、发酵乳和灭菌乳(含巴氏杀菌乳);固态乳包括婴幼儿配方乳粉(以下简称配方乳粉)和普通乳粉。生乳和发酵乳均为本地产品,其他乳制品源于本地或外地。

### 1.2 方法

#### 1.2.1 检测方法

选择并确定了Pb、Cd、Cr、总As、总Hg等5种重金属元素作为乳制品的监测项目,其中生乳样品因试验设计问题未检测Cr项目。检验方法按《2013年国家食品污染和有害因素风险工作手册》<sup>[7]</sup>规定的具体要求执行。Pb、Cd、Cr含量测定采用食品中石墨炉原子吸收光度法;总As、总Hg含量测定采用食品中氢化物发生原子荧光光度法。Pb、Cd、Cr、总As、总Hg的检测限(LOD)分别为3.0、0.1、3.0、1.6、0.15 μg/kg。

#### 1.2.2 评价标准和方法

评价标准:按照GB 2762—2012《食品安全国家标准 食品中污染物限量》<sup>[8]</sup>规定的乳及乳制品污染物限量标准执行。婴幼儿配方乳粉中的总As、Cr限量参照GB 2762—2012标准中乳粉的限量值。配方乳粉中的Pb污染物限量参照GB 10767—2010《较大婴儿和幼儿配方食品》标准<sup>[9]</sup>。Cd污染物限量参照欧盟委员会(EU) No 488/2014《食品中镉的最大限量修订》<sup>[10]</sup>,普通乳粉Cd污染物限量亦参照EU规定的婴幼儿配方乳粉Cd限量标准。普通乳粉配方乳粉中的总Hg限量值均按生乳8倍浓缩计算,见表1。

表1 不同类别乳制品中5种重金属污染物最高允许限量值(mg/kg)

乳制品类别	污染物最高允许限量值				
	Pb	总As	Cr	总Hg	Cd
液态乳	0.05	0.1	0.3	0.01	0.005
普通乳粉	0.5	0.5	2.0	0.08	0.010
配方乳粉	0.15	0.5	2.0	0.08	0.010

单因子污染指数法:单因子污染指数<sup>[11-12]</sup>适用于单因子污染特定区域的评价,是以实际污染水平与标准限量值相比较的评价方法。指数值的大小直接反映了单因子的污染程度,污染指数值越大,表示所受污染越严重。

单因子污染指数计算公式:

$$P_i = C_i/S_i$$

式中: $P_i$ :重金属污染物  $i$  元素的单因子污染指数; $C_i$ :重金属污染物  $i$  元素的实测浓度值,  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ;  $S_i$ :重金属污染物  $i$  元素的限量值,  $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。

内梅罗(Nemerow)综合污染指数法:内梅罗综合污染指数<sup>[11-12]</sup>是一种兼顾单因子污染指数平均值和极值的计权型多因子质量指数,反映了各污染物对产品的综合污染水平,重点突出了高浓度污染物对产品质量的影响。计算公式为:

$$P_n = \sqrt{[(C_i/S_i)_{\max}^2 + (C_i/S_i)_{\text{ave}}^2] / 2}$$

式中: $P_n$ :内梅罗综合污染指数;  $(C_i/S_i)_{\text{ave}}$ :所有污

染物单因子污染指数的平均值;  $(C_i/S_i)_{\max}$ :所有评价污染物中单因子污染指数的最大值。

分级标准:按照农业行业标准 NY/T 398—2000《农、畜、水产品污染监测技术规范》<sup>[13]</sup>制定的农、畜、水产品中质量分级标准,将乳制品污染划分为3个质量等级评价,综合污染指数亦按单因子污染指数质量分级标准评价。在监测乳制品中若同时存在多种污染物时,按该乳制品中污染物最高质量分级数来确定乳制品的质量分级,即以最高限制因素来计算污染指数,见表2。

表2 乳制品质量分级标准

Table 2 Quality classification standards of dairy products

等级划分	单因子污染指数	综合污染指数	污染水平	质量水平
1	$\leq 0.6$	$\leq 0.6$	有污染物残留,污染物含量接近或略高于背景值	安全
2	0.6 ~ 1.0	0.6 ~ 1.0	产品污染物含量较多,限量值范围内	轻度污染
3	$\geq 1.0$	$\geq 1.0$	污染产品,污染物含量超过限量值	重度污染

污染物分担率:污染物分担率<sup>[13]</sup>反映各单因子污染物主次顺序,可确定主要污染物项目。计算公式为:

$$K_i = (P_i/P) \times 100\%$$

式中: $K_i$ :产品重金属污染物  $i$  元素所占的分担率,%;  $P_i$ :产品重金属污染物  $i$  元素的单因子污染指数;  $P$ :各重金属污染物单因子污染指数之和。

### 1.2.3 未检出数据的处理

考虑到未检出数据的不确定性,按世界卫生组织(WHO)食品污染物含量低水平数据进行处理<sup>[14]</sup>。污染物含量低于  $LOD$  且样品未检出率 < 60%的,所有低于  $LOD$  的数值按  $1/2 LOD$  赋值计算;样品未检出率 > 60%的,按  $LOD$  赋值计算。

### 1.3 数据分析

采用 Excel 2007 和 SPSS 17.0 软件包进行数据整理、分类汇总和统计学分析。

## 2 结果

### 2.1 乳制品重金属含量监测结果

除生乳中 Pb 和灭菌乳中 Pb、Cd 未检出外,其他重金属项目均检出。按重金属监测项目分类统计,以总 Hg 检出率最高, Cr 次之,5 种重金属元素的项目检出率分别为 Pb 14.0% (21/150)、总 As 24.7% (37/150)、总 Hg 82.0% (109/133)、Cd 26.3% (35/133) 和 Cr 72.9% (43/59)。总 Hg、Cd 两项目存在超标现象,项目超标率分别为 8.7% (13/150) 和 3.0% (4/133),其他项目均无超标。

5 种重金属含量在不同的乳制品种类之间差异较大。从表3可以看出,所有监测乳制品样品中,仅

配方乳粉无超标样品。液态乳重金属检出率均以总 Hg 最高,固态乳检出率以 Cr 最高。生乳中总 Hg 的均值、P75 和 P95 皆超过限量值。在第 95 分位数时,发酵乳、灭菌乳的总 Hg 含量和普通乳粉的 Cd 含量均超过限量值,其他乳制品重金属含量的均值、P75 和 P95 均在限量值范围内。

### 2.2 乳制品重金属污染指数结果

按计算公式分别计算出济南市 5 种乳制品重金属污染物单因子污染指数、综合污染指数的范围及均值。单因子污染指数均值评价结果显示,生乳、发酵乳和灭菌乳等液态乳的单因子污染指数均以总 Hg 最高,其中生乳  $P_{\text{Hg}} = 1.030$ ,属重度污染,发酵乳  $P_{\text{Hg}} = 0.664$ ,属轻度污染;配方乳粉和普通乳粉等固态乳的单因子污染指数以 Cd 最高,但均处于安全级别范围内。综合污染指数均值评价结果显示,生乳重金属污染程度最高,  $P_n = 0.754$ ,属轻度污染,配方乳粉综合污染指数最低,综合污染指数从大到小排序为生乳 > 发酵乳 > 灭菌乳 > 普通乳粉 > 配方乳粉,见表4。

### 2.3 乳制品重金属污染物分担率结果

济南市 5 种乳制品重金属污染物分担率的范围及均值见表5。结果显示,总 Hg 是液态乳的主要重金属污染物,对液态乳的污染贡献最大,而 Cd 是固态乳的主要重金属污染物,对固态乳的污染贡献最大。液态乳重金属污染物均值分担率均以总 Hg 最高,生乳、灭菌乳和发酵乳中总 Hg 分担率的均值分别为 93.85%、80.06% 和 79.54%;固态乳以 Cd 最高,普通乳粉、配方乳粉 Cd 均值的分担率分别为 72.91%、36.64%。

表3 不同种类乳制品重金属含量监测结果

Table 3 Monitoring results of heavy metal contents in dairy products of different types

乳制品种类	元素种类	样品数 /份	检出率 /%	超标率 /%	重金属含量/( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )			
					$\bar{x} \pm s$	P75	P95	含量范围
生乳	Pb	20	0.0(0/20)	0.0(0/20)	1.50 $\pm$ 0.00	1.50	1.50	ND
	总 As	20	10.0(2/20)	0.0(0/20)	1.35 $\pm$ 0.38	0.80	6.93	ND ~ 7.00
	总 Hg	20	100.0(20/20)	30.0(6/20)	10.30 $\pm$ 1.33	11.63	31.70	7.00 ~ 32.50
	Cd	20	5.0(1/20)	0.0(0/20)	0.12 $\pm$ 0.07	0.05	1.36	ND ~ 1.42
发酵乳	Pb	42	2.4(1/42)	0.0(0/42)	2.11 $\pm$ 0.61	1.50	1.50	ND ~ 27.10
	总 As	42	4.8(2/42)	0.0(0/42)	0.84 $\pm$ 0.03	0.80	1.57	ND ~ 1.70
	总 Hg	34	73.5(25/34)	17.6(6/34)	6.64 $\pm$ 1.09	8.00	21.25	ND ~ 25.00
	Cd	34	14.7(5/34)	0.0(0/42)	0.31 $\pm$ 0.12	0.05	2.46	ND ~ 2.99
	Cr	31	64.5(20/31)	0.0(0/42)	17.47 $\pm$ 3.67	30.00	65.88	ND ~ 74.70
灭菌乳	Pb	15	0.0(0/15)	0.0(0/15)	1.50 $\pm$ 0.00	1.50	1.50	ND
	总 As	15	20.0(3/15)	0.0(0/15)	1.40 $\pm$ 0.42	0.80	7.00	ND ~ 7.00
	总 Hg	6	83.3(5/6)	16.7(1/6)	5.85 $\pm$ 2.00	7.50	15.00	ND ~ 15.00
	Cd	6	0.0(0/6)	0.0(0/6)	0.05 $\pm$ 0.00	0.05	0.05	ND
	Cr	17	76.5(13/17)	0.0(0/17)	27.52 $\pm$ 5.92	46.00	71.00	ND ~ 71.00
配方乳粉	Pb	33	21.2(7/33)	0.0(0/33)	7.64 $\pm$ 2.41	3.50	42.44	ND ~ 67.50
	总 As	33	36.4(12/33)	0.0(0/33)	10.39 $\pm$ 2.92	30.50	43.00	ND ~ 64.00
	总 Hg	33	81.8(27/33)	0.0(0/33)	4.80 $\pm$ 0.38	5.50	8.00	ND ~ 8.00
	Cd	33	39.4(13/33)	0.0(0/33)	0.95 $\pm$ 0.33	0.66	6.18	ND ~ 7.40
	Cr	4	100.0(4/4)	0.0(0/4)	65.25 $\pm$ 8.53	83.25	90.00	53.00 ~ 90.00
普通乳粉	Pb	40	32.5(13/40)	0.0(0/40)	10.71 $\pm$ 2.34	21.60	36.21	ND ~ 61.20
	总 As	40	45.0(18/40)	0.0(0/40)	30.82 $\pm$ 5.32	68.00	70.00	ND ~ 70.00
	总 Hg	40	80.0(32/40)	0.0(0/40)	7.33 $\pm$ 1.98	9.88	18.25	ND ~ 80.00
	Cd	40	40.0(16/40)	10.0(4/40)	5.43 $\pm$ 2.28	4.57	59.37	ND ~ 68.40
	Cr	7	85.7(6/7)	0.0(0/7)	54.37 $\pm$ 2.28	83.00	90.00	ND ~ 90.00

注:ND表示未检出;生乳Cr项目未检测,故不列出数据;因试验设计问题同一类别乳制品样品数可能不同

表4 乳制品重金属单因子污染指数及综合污染指数计算结果

Table 4 Single factor pollution index and comprehensive pollution index of heavy metal pollutants in dairy products

乳制品种类	$P_{\text{Pb}}$	$P_{\text{As}}$	$P_{\text{Hg}}$	$P_{\text{Cd}}$	$P_{\text{Cr}}$	$P_n$
生乳	0.030 ~ 0.030 (0.030)	0.008 ~ 0.070 (0.014)	0.700 ~ 3.250 (1.030)	0.010 ~ 0.284 (0.024)	—	0.512 ~ 2.386 (0.754)
发酵乳	0.030 ~ 0.542 (0.042)	0.008 ~ 0.017 (0.008)	0.008 ~ 2.500 (0.664)	0.010 ~ 0.598 (0.062)	0.005 ~ 0.249 (0.058)	0.023 ~ 1.852 (0.484)
灭菌乳	0.030 ~ 0.030 (0.030)	0.008 ~ 0.070 (0.014)	0.008 ~ 1.500 (0.585)	0.010 ~ 0.010 (0.010)	0.005 ~ 0.237 (0.092)	0.023 ~ 1.092 (0.426)
配方乳粉	0.010 ~ 0.450 (0.051)	0.002 ~ 0.128 (0.021)	0.001 ~ 0.100 (0.060)	0.005 ~ 0.740 (0.095)	0.027 ~ 0.045 (0.033)	0.020 ~ 0.563 (0.077)
普通乳粉	0.003 ~ 0.122 (0.021)	0.002 ~ 0.140 (0.062)	0.001 ~ 1.000 (0.092)	0.005 ~ 6.840 (0.543)	0.001 ~ 0.045 (0.027)	0.022 ~ 4.972 (0.398)

注:—表示生乳Cr项目未检测,无 $P_{\text{Cr}}$ 指数值;括号内为该项目单因子污染指数均值

表5 乳制品重金属污染物分担率结果(%)

Table 5 Share rate of heavy metal pollutants in dairy products

乳制品种类	$K_{\text{Pb}}$	$K_{\text{As}}$	$K_{\text{Hg}}$	$K_{\text{Cd}}$	$K_{\text{Cr}}$
生乳	(4.01, 0.83)2.73	(1.07, 1.93)1.23	(93.58, 89.43)93.85	(1.34, 7.81)2.19	—
发酵乳	(49.18, 13.88)5.05	(13.11, 0.44)1.01	(13.11, 64.00)79.54	(16.40, 15.31)7.43	(8.20, 6.37)6.97
灭菌乳	(49.18, 1.63)4.11	(13.11, 3.79)1.91	(13.11, 81.21)80.06	(16.40, 0.54)1.37	(8.20, 12.83)12.55
配方乳粉	(22.22, 30.76)19.63	(4.45, 8.75)8.02	(2.22, 6.83)23.14	(11.11, 50.58)36.64	(60.00, 3.08)12.57
普通乳粉	(25.00, 1.50)2.87	(16.67, 1.72)8.27	(8.33, 12.27)12.30	(41.67, 83.96)72.91	(8.33, 0.55)3.65

注:—表示生乳Cr项目未检测,故无 $K_{\text{Cr}}$ 分担率;括号内数值表示某类乳制品重金属污染物最小值和最大值的分担率,括号外数值表示某类乳制品重金属污染物均值的分担率

### 3 讨论

目前,重金属污染日趋严重,引起世界各国的普遍关注,已经成为食品科学、污染生态学和环

保护学等学术界重点和优先研究的问题。20世纪70年代,世界卫生组织(WHO)、联合国粮农组织(FAO)和联合国环境规划署(UNEP)共同制定的全球环境监测规划之食品污染监测与评估计划

(GEMS/FOOD)中,将重金属列为重点研究的环境污染物和优先监测的食品污染物<sup>[15]</sup>;2001年度WHO/FAO制定的全球食品安全战略(草案)中,把化学性有毒有害物质(含重金属污染物)监测和危害评估作为首要任务并在各成员国推广<sup>[16]</sup>;2014年欧盟(EU)对(EC)No 1881/2006《食品中某些污染物最大限量》进行了修订,并首次建立了乳制品中镉的最高允许限量值<sup>[10]</sup>。我国对食品及农产品产地环境中重金属污染问题十分重视。国家有关部门相继颁布的乳制品类食品安全国家标准<sup>[9]</sup>以及GB 2762—2012《食品中污染物限量》<sup>[8]</sup>、GB 13078—2001《饲料卫生标准》<sup>[17]</sup>、GB/T 18407.5—2003《农产品安全质量 无公害乳与乳制品产地环境要求》<sup>[18]</sup>和农业部颁布的NY/T 391—2013《绿色食品 产地环境质量》<sup>[19]</sup>等标准,均将重金属污染物列为重点监测项目和首要评价指标。

从整体上看,济南市4种乳制品达到了安全级别,尤其是配方乳粉无超标样品且综合污染指数最低( $P_n = 0.077$ ),表明济南市乳制品受重金属污染威胁较小,与近年来国家重点治理婴幼儿配方乳粉的生产加工和市场流通有关。但在不同种类乳制品中,生乳的污染程度最高,且存在4种乳制品存在不同程度的总Hg或Cd超标现象,提示济南市部分乳制品产品已受到重金属污染,污染项目主要是总Hg、Cd,而Pb、Cr、总As污染相对较小。根据文献[20-21],内蒙古地区乳制品总Hg、Cd和Pb检出率分别为32.63%、20.86%和12.90%,济南市乳制品Cd、Pb检出率及检测值范围与之基本一致,但总Hg检出率(82.0%)远高于内蒙古地区,与包头地区报道的检出率相近(67.7%)。屈雪寅等<sup>[12]</sup>对中国奶业主产区A、B两地区生乳的污染评估结果显示,综合污染指数分别为0.542和0.567,低于本次评价指数(0.754),而甘肃白牦牛生乳的综合污染指数则高于本次评价指数<sup>[22]</sup>,说明各地区、各区域间生乳产品均存在污染,但污染程度和污染项目有所不同,因污染程度与污染来源与饲料、季节、养殖加工环境不同以及不同品种的奶牛对重金属富集能力存在差别等因素有关<sup>[23-28]</sup>。

对总Hg而言,乳制品总Hg检出率最高,均在70%以上。3种液态乳中总Hg检出率、单因子污染指数和分担率最高,且生乳 $P_{Hg} > 1$ ,属重度污染,发酵乳 $P_{Hg} > 0.6$ ,属轻度污染。固态乳的单因子污染指数和分担率虽然以Cd最高,总Hg次之,但由于Cd最高允许限量参照EU标准,Cd限量值仅是生乳2倍,而总Hg则按生乳8倍浓缩折算,折算倍数关系不同,可能相对降低了总Hg单因子污染指数。从固态乳重金属检出

率来看,Cr和总Hg检出率较高,但Cr监测样品数偏少,易产生抽样误差,可能是导致Cr检出率偏高的主要原因之一。若排除监测样品数偏少等干扰因素,固态乳的总Hg检出率可能相对提高。由此可见,总Hg是乳制品主要重金属污染物,对乳制品污染贡献大,提示控制乳制品尤其是生乳中总Hg的含量,将可减少食物链中重金属污染物迁移量,有效地降低污染指数,提升乳制品的安全性。需要特别指出的是,2012年由于受到原料污染的影响,我国部分地区乳制品中出现汞含量偏高的异常现象,本文采用部分2012年乳制品中总Hg的监测结果作为评价的基础数据,有可能高估了总Hg的污染指数和分担率。若对乳制品中重金属污染物进行多年连续监测,并有针对性地增加某些单一乳制品的样品数和监测项目,如灭菌乳中总Hg、Cd和固态乳中Cr项目等,将会进一步减少抽样误差等不确定性因素带来的偏倚,提高较低样品数项目检出率的稳定性,评价结果将更加充分可靠。

除总Hg外,固态乳中Pb、Cd、Cr和总As含量均高于液态乳,并与浓缩倍数存在比例关系,其关联度除受生乳本底值的影响外,也可能与固态乳中允许添加而生乳、巴氏杀菌乳和灭菌乳等液态乳中不允许添加食品添加剂和营养强化剂有关<sup>[9]</sup>。从不同种类乳制品总Hg含量值来看,即使考虑到固态乳的浓缩比例,5种乳制品中生乳的总Hg含量均值也是最高的,但加工前、后的乳制品总Hg含量变化不大。总Hg含量与生乳的浓缩倍数不存在关联,且有随乳制品加工温度升高而总Hg含量减少的变化趋势,是否与Hg的升华作用有关,尚需进一步探讨和证实。若推论成立,本研究固态乳中总Hg限量值按生乳8倍浓缩关系折算值得商榷,实际上有可能低估了固态乳的污染指数。

应用污染指数法来评价乳制品中重金属的污染状况及程度是合理可行的<sup>[12]</sup>,但存在一定的局限性和不确定性。单因子污染指数法具有计算简单方便、可判定产品中主要污染因子等特点,是综合污染评价的基础。但该方法不考虑各评价参数间的联系,只能分别反映重金属污染物的污染程度,不能全面地反映产品的污染程度,仅适用于单一因子污染评价。内梅罗综合污染指数法可以全面反映各重金属对产品的不同作用,避免了由于平均作用污染权重被削弱现象的发生,但过分突出了污染指数最大污染物对产品质量的影响,可能会人为地夸大高浓度因子或缩小低浓度因子的影响作用,尤其是出现异常值时对评价结果影响更大,有可能会偏离客观实际。此外,该方法没有考虑各种污染物对产品毒害性的差别,仅能反映污染的程度而难以

反映污染的质变特征。

需要说明的是,单因子污染指数法和内梅罗综合污染指数法通常多用于土壤、水质环境质量污染程度的评价<sup>[28-29]</sup>,反映各重金属对土壤、水质的影响,而对食用农产品重金属污染程度的评价研究相对较少,还处于探索阶段。本研究运用污染指数法对乳制品重金属污染评价是一种初步的尝试性探讨,其评价结果的准确性、灵敏性等还有待进一步验证和完善。

## 参考文献

- [ 1 ] 许晓曦. 乳品安全与质量控制[M]. 北京:科学出版社,2012.
- [ 2 ] 李海华,刘建武,李树人,等. 土壤—植物系统中重金属污染及作物富集研究进展[J]. 河南农业大学学报,2000,34(1): 30-35.
- [ 3 ] 俞花美,焦鹏,葛成军,等. 施肥措施对重金属污染土壤—植物系统影响的研究进展[J]. 热带农业科学,2012,32(2): 61-66.
- [ 4 ] 滕葳,柳琪,李倩,等. 重金属污染对农产品的危害与风险评估[M]. 北京:化学工业出版社,2010.
- [ 5 ] 刘美霞,石峻岭,吴世达,等. IARC:900种有害因素及接触场所对人类致癌性的综合评价(一)[J]. 环境与职业医学,2006,23(2):180-184.
- [ 6 ] 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.
- [ 7 ] 杨大进,李宁. 2013年国家食品污染和有害因素风险工作手册[M]. 北京:中国质检出版社、中国标准出版社,2012: 62-107.
- [ 8 ] 中华人民共和国卫生部. GB 2762—2012 食品安全国家标准食品中污染物限量[S]. 北京:中国标准出版社,2013.
- [ 9 ] 卫生部政策法规司. 中华人民共和国食品安全国家标准汇编(2010年度下)[M]. 北京:中国质检出版社,中国标准出版社,2011:403-508.
- [ 10 ] EU. No 488/2014 amending Regulation (EC) No 1881/2006 as regards maximum levels of cadmium in foodstuffs[S]. Belgium: European Union,2014.
- [ 11 ] 关伯仁. 评内梅罗的污染指数[J]. 环境科学,1979(4): 67-71.
- [ 12 ] 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.
- [ 13 ] 中华人民共和国农业部. NY/T 398—2000 农、畜、水产品污染监测技术规范[S]. 北京:中国标准出版社,2000.
- [ 14 ] 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.
- [ 15 ] World Health Organization. WHO global strategy for food safety: safer food for better health ( food safety issues ) [ R ]. WHO,2003.
- [ 16 ] 杨杰,樊永祥,杨大进,等. 国际食品污染物监测体系理化指标监测介绍及思考[J]. 中国食品卫生杂志,2009,21(2): 161-168.
- [ 17 ] 国家质量监督检验检疫总局. GB 13078—2001 饲料卫生标准[S]. 北京:中国标准出版社,2001.
- [ 18 ] 国家质量监督检验检疫总局. GB/T 18407.5—2003 农产品安全质量 无公害乳与乳制品产地环境要求[S]. 北京:中国标准出版社,2003.
- [ 19 ] 中华人民共和国农业部. NY/T 391—2013 绿色食品 产地环境质量[S]. 北京:中国标准出版社,2013.
- [ 20 ] 刘婷婷,蒲云霞,王文瑞,等. 2010—2011年内蒙古地区食品中铅、镉、汞污染调查分析[J]. 中国食品卫生杂志,2013,25(6):548-551.
- [ 21 ] 刘永华,吴云,杜雪梅,等. 包头地区市售粮食、肉蛋类、乳制品中铅、镉、汞残留量调查[J]. 包头医学院学报,2013,29(6):15-17.
- [ 22 ] 陈其元,徐轶飞,余群力. 天祝白牦牛奶重金属污染分析[J]. 甘肃农业科技,2007(9):7-9.
- [ 23 ] 张浩,邵伟,李亚林,等. 伊宁市不同规模奶牛养殖场水和饲料及原料乳中重金属水平检测与分析[J]. 现代农业科技,2011(16):289-290.
- [ 24 ] 张娜,曹社会,宋晓芳,等. 5种牧草中铅、铬、锌、铜、铁、锰重金属污染的分析[J]. 家畜生态学报,2012,33(4):91-95.
- [ 25 ] Simsek O, Gültekin R, Öksüz O, et al. The effect of environmental pollution on the heavy metal content of raw milk [ J ]. Food/ Nahrung, 2000, 44 ( 5 ): 360-363.
- [ 26 ] Pilarczyk R, Wojcik J, Czerniak P, et al. Concentrations of toxic heavy metals and trace elements in raw milk of Simmental and Holstein-Friesian cows from organic farm [ J ]. Environmental Monitoring and Assessment, 2013, 185 ( 10 ): 8383-8392.
- [ 27 ] Hasan T, Arzu S. Heavy metal concentrations in raw milk collected from different regions of Samsun, Turkey [ J ]. International Journal of Dairy Technology, 2012, 65 ( 4 ): 516-522.
- [ 28 ] 中华人民共和国农业部. NY/T 1054—2013 绿色食品 产地环境调查、监测与评价规范[S]. 北京:中国标准出版社,2013.
- [ 29 ] 中华人民共和国农业部. NY/T 5295—2004 无公害食品 产地环境评价准则[S]. 北京:中国标准出版社,2004.