

调查研究

内蒙古地区婴幼儿配方乳粉中高氯酸盐与氯酸盐膳食暴露风险评估

李素颖¹,侯坤²,张卿²,郑莉韬²,李嘉凝²,蒲云霞²,毛伟峰³

(1. 内蒙古科技大学包头医学院,内蒙古包头 014000;2. 内蒙古自治区综合疾病预防控制中心,内蒙古呼和浩特 010000;3. 国家食品安全风险评估中心,北京 100022)

摘要:目的 了解内蒙古地区婴幼儿配方乳粉中高氯酸盐和氯酸盐的污染水平,评估婴幼儿高氯酸盐和氯酸盐的膳食摄入风险,为指导内蒙古地区婴幼儿健康膳食提供科学依据。方法 采集内蒙古地区市售各段位的婴幼儿配方乳粉 539 份,乳粉冲调用水(冲调乳粉时可能使用的饮用水)254 份,采用超高效液相色谱-串联质谱(UPLC-MS/MS)法对婴幼儿配方乳粉、乳粉冲调用水中的高氯酸盐和氯酸盐含量进行检测。以 2015 年中国婴幼儿食品消费量调查数据中内蒙古地区婴幼儿的消费量数据为依据,采用简单分布评估和累积暴露评估方法计算内蒙古地区婴幼儿配方乳粉中高氯酸盐和氯酸盐的膳食摄入风险。结果 婴幼儿配方乳粉中高氯酸盐的总体检出率为 92.39% (498/539),检测值在未检出~89.30 $\mu\text{g}/\text{kg}$,平均值为 14.45 $\mu\text{g}/\text{kg}$,中位数为 9.00 $\mu\text{g}/\text{kg}$;氯酸盐的总体检出率为 73.10% (394/539),检测值在未检出~1 061.00 $\mu\text{g}/\text{kg}$,平均值为 93.25 $\mu\text{g}/\text{kg}$,中位数为 45.50 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。乳粉冲调用水中高氯酸盐的总体检出率为 67.32% (171/254),检测值在未检出~26.59 $\mu\text{g}/\text{L}$,平均值为 1.25 $\mu\text{g}/\text{L}$;氯酸盐的总体检出率为 30.71% (78/254),检测值在未检出~927.66 $\mu\text{g}/\text{L}$,平均值为 24.03 $\mu\text{g}/\text{L}$ 。评估结果显示 0~36 月龄婴儿通过乳粉摄入高氯酸盐和氯酸盐的健康风险较低,且高消费人群(P95)的暴露量也均未超过健康指导值。结论 内蒙古地区婴幼儿配方乳粉中存在高氯酸盐和氯酸盐的污染,但在目前的污染水平下,0~36 月龄婴儿通过乳粉摄入高氯酸盐和氯酸盐的健康风险较低。且高消费人群(P95)的暴露量均未超过健康指导值,健康风险较低。其中 0~6 月龄婴儿的 P95 的暴露量较高,需进一步对其健康风险进行密切关注。

关键词:婴幼儿配方乳粉;高氯酸盐;氯酸盐;暴露评估

中图分类号:R155 文献标识码:A 文章编号:1004-8456(2023)09-1317-06

DOI:10.13590/j.cjfh.2023.09.010

Risk assessment of dietary exposure to perchlorate and chlorate in infant formula milk powder in Inner MongoliaLI Suying¹, HOU Kun², ZHANG Qing², ZHENG Litao², LI Jianing², PU Yunxia², MAO Weifeng³

(1. Baotou Medical College, Inner Mongolia University of Science and Technology, Inner Mongolia Baotou 014000, China; 2. Inner Mongolia Autonomous Region Comprehensive Disease Control and Prevention Center, Inner Mongolia Hohhot 010000, China; 3. National Center for Food Safety Risk Assessment, Beijing 100022, China)

Abstract: Objective To understand the pollution level of perchlorate and chlorate in infant formula milk powder in Inner Mongolia evaluate the dietary intake risk of perchlorate and chlorate in infants, and provide a scientific basis for guiding the healthy diet of infants in Inner Mongolia. **Methods** A total of 539 infant formula milk powder sold in each segment in Inner Mongolia were collected, and 254 milk powder flushing water (drinking water that may be used in the flushing and mixing of milk powder) were collected. The contents of perchlorate and chlorate in infant formula milk powder and milk powder washing and mixing water were detected by ultra-performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry (UPLC-MS/MS). Based on the consumption data of infants and young children in Inner Mongolia in the

收稿日期:2022-04-28

基金项目:内蒙古自治区自然科学基金项目(2020MS08058);

作者简介:李素颖 女 硕士研究生 研究方向为食品安全风险监测与评估 E-mail:1549373626@qq.com

通信作者:蒲云霞 女 主任检验师 研究方向为食品安全风险监测与评估 E-mail:btliisa2008@163.com

毛伟峰 女 副研究员 研究方向为食品中化学物质的风险评估 E-mail:maoweifeng@cfsa.net.cn

蒲云霞和毛伟峰为共同通信作者

2015 China Infant Food Consumption survey data, the risk of dietary intake of perchlorate and chlorate in infant formula milk powder in Inner Mongolia was calculated by simple distribution assessment and cumulative exposure assessment.

Results The overall detection rate of perchlorate in infant formula milk powder was 92.39% (498/539). The detection value was not detected up to 89.30 $\mu\text{g}/\text{kg}$, with an average of 14.45 $\mu\text{g}/\text{kg}$ and a median of 9.00 $\mu\text{g}/\text{kg}$. The overall detection rate of chlorate was 73.10% (394/539), and the detection value was not detected up to 1 061.00 $\mu\text{g}/\text{kg}$, with an average of 93.25 $\mu\text{g}/\text{kg}$ and a median of 45.50 $\mu\text{g}/\text{kg}$. The overall detection rate of perchlorate in milk powder was 67.32% (171/254), and the detection value was not detected up to 26.59 $\mu\text{g}/\text{L}$, with an average value of 1.25 $\mu\text{g}/\text{L}$. The overall detection rate of chlorate was 30.71% (78/254), and the detection value was not detected up to 927.66 $\mu\text{g}/\text{L}$, with an average value of 24.03 $\mu\text{g}/\text{L}$. The health risk of perchlorate and chlorate intake through milk powder was assessed as low for infants aged 0 to 36 months. Furthermore, the exposure of the high consumer population (P95) did not exceed the health guidance value.

Conclusion There is perchlorate and chlorate contamination in infant formula powder in Inner Mongolia. However, under the current pollution level, the health risk of perchlorate and chlorate ingestion through milk powder is low for infants under the age of 0-36 months. In addition, the exposure level of the high consumption group (P95) did not exceed the health guidance value, and the health risk was low. The exposure level of P95 in infants aged zero to six months is higher, and further attention should be paid to their health risks.

Key words: Infant formula milk powder; perchlorate; chlorate; exposure assessment

近年来,婴幼儿配方乳粉中高氯酸盐和氯酸盐(ClO_3^-)的污染问题引起广泛关注。氯酸盐主要是作为消毒副产物进入食品和饮用水中。且氯酸盐作为一种无机副产物,来源于饮用水氯化、食品加工中应用的设备和水的消毒以及自然界中含氯化物的分解^[1-3]。氯酸盐经口被动物摄入后,迅速被吸收并广泛分布在身体的各个部位,最终通过尿液排出,其毒性的主要作用终点为甲状腺和血液系统,对甲状腺的危害是氯酸盐抑制碘的吸收,削弱甲状腺功能^[4-5]。血液系统的危害是在亚慢性和急性暴露下,氯酸盐离子诱导血液反应,导致红细胞氧化损伤、高铁血红蛋白血症和溶血性贫血,氧化应激引起红细胞变化是暴露于氯酸盐引起的主要表现^[6]。

高氯酸盐(ClO_4^-)是高氯酸形成的盐类,含有正四面体形的高氯酸根离子 ClO_4^- ,其中氯的氧化态为+7价^[7],其性质是由本身的正四面体结构所决定,产生不良作用的是一种无机阴离子高氯酸根,使其既具有高可溶性又具有高稳定性^[8],存在于环境中结构不易被破坏。高氯酸盐是持久性污染物,环境中的高氯酸盐除自然存在外^[9-10],还主要来源于人工生产过程,包括将高氯酸盐用作强氧化剂的火箭推进剂、导弹、烟花制造、弹药工业、爆破作业等领域,以及润滑油、织物固定剂、皮革鞣制剂和汽车安全气囊等产品的生产过程^[11]。高氯酸盐具有易溶于水、稳定性强和难降解的特点,可随水体快速大范围迁移,进而污染食品和饮用水,人体暴露高氯酸盐的主要途径是通过摄入含高氯酸盐的食物和饮用水^[12]。高氯酸盐暴露能够抑制甲状腺滤泡细胞中碘化钠协同载体对碘的吸收,导致甲状腺

激素分泌减少^[13-14],甲状腺激素对正常生长、大脑发育和代谢活动特别重要,尤其对发育中的婴儿和儿童。

高氯酸盐和氯酸盐可抑制碘的吸收,削弱甲状腺功能,特别是对儿童生长发育有着至关重要的作用,我国近年接连出现相关食品安全事件引发关注,如婴幼儿配方粉中检出高氯酸盐和氯酸盐。欧洲食品安全局(European Food Safety Authority, EFSA)对食品中高氯酸盐和氯酸盐进行了风险评估,并确立了高氯酸盐和氯酸盐的健康指导值(Health-based guidance values, HBGV)。目前,内蒙古地区尚未开展婴幼儿配方乳粉中高氯酸盐和氯酸盐的暴露风险评估,健康风险不明,婴幼儿配方乳粉中高氯酸盐和氯酸盐的污染来源不明,无法提出科学的管控措施。基于此,本研究首次开展内蒙古地区婴幼儿配方乳粉中高氯酸盐和氯酸盐的暴露风险评估,为科学控制及制定国内婴幼儿配方乳粉中高氯酸盐和氯酸盐限量标准提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品来源

1.1.1 婴幼儿配方乳粉样品来源

采集内蒙古地区市售各段位的婴幼儿配方乳粉539份,其中婴儿配方乳粉(1段,0~6月龄)223份,占比41.37%(223/539);较大婴儿配方乳粉(2段,6~12月龄)160份,占比29.68%(160/539);幼儿配方乳粉(3段,12~36月龄)156份,占比28.94%(156/539)。其中牛乳粉488份,占比90.54%(448/539),羊乳粉51份,占比9.46%(51/539)。样品均来自流通环节。

1.1.2 乳粉冲调用水样品来源

采集内蒙古自治区内 12 个盟市 38 个旗县区的乳粉冲调用水,共采集样品 254 份,包括包装饮用水 33 份、末梢水 158 份、直饮水 32 份、矿泉水 31 份。

1.2 方法

1.2.1 样品检测

婴幼儿配方乳粉及乳粉冲调用水样品中的高氯酸盐和氯酸盐均采用超高效液相色谱-串联质谱法进行检测,采用同位素稀释法进行定量。其中高氯酸盐与氯酸盐的检出限(Limit of detection, LOD)分别为 0.3 和 1.00 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。

1.2.2 质量控制

1.2.2.1 样品采集过程的质量控制

为保证乳粉冲调用水和婴幼儿配方乳粉样品的代表性,乳粉冲调用水样品的采样容器由内蒙古疾病预防控制中心统一采购清洗后发放,两种样品在采样前均对采样人员进行统一培训,对样品分类、采样量、样品信息记录、样品的储藏和运输做了统一规定。

1.2.2.2 检测过程质量控制

为了保证检测结果的准确性与平行性,实验过程中采用全过程空白、10% 的样品加标及 10% 的平行双样,所使用的试剂、耗材均经过方法验证。

1.2.3 风险特征描述方法

1.2.3.1 高氯酸盐的风险特征描述

美国国家研究委员会(National Research Council, NRC)在 2005 年的评估中以甲状腺相关激素水平作为关键效应,选择一种非副作用,结果确定高氯酸盐的未观察到不良作用水平(No observed adverse effect level, NOAEL)为 0.7 $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{BW}\cdot\text{d})$,基于人群个体差异选择 10 倍不确定系数,得到的高氯酸盐每日推荐摄入量(Reference dose, RfD),即 RfD 为 0.7 $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{BW}\cdot\text{d})$ ^[15]。本次评估使用 RfD 作为高氯酸盐的风险评估的指标。

1.2.3.2 氯酸盐的风险特征描述

2011 年联合国粮农组织/世界卫生组织食品添加剂联合专家委员会(Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives, JECFA)以甲状腺相关激素水平作为关键效应,选择 50% 基准剂量可信区间下限(Benchmark dose limit of 50, BMDL₅₀)0.11 mg/kg 作为毒性作用终点,基于人群个体差异选择 10 倍不确定系数,获得氯酸盐的每日最大容许摄入量(Provisional maximum tolerable daily intake, PMTDI)为 10 $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{BW}\cdot\text{d})$ ^[16]。本次评估使用 PMTDI 作为氯酸盐的风险评估的指标。

1.2.4 暴露评估

1.2.4.1 简单分布评估

用婴幼儿配方乳粉中高氯酸盐和氯酸盐的平均含量数据,结合婴幼儿配方乳粉消费量数据,计算婴幼儿每日每千克体质量高氯酸盐和氯酸盐的摄入量,见公式 1:

$$Exp = \sum_{i=1}^n \frac{(Fi \times Ci)}{W} \div 1000 \quad \text{公式 1}$$

其中:Exp 为每天每千克体质量高氯酸盐和氯酸盐的摄入量,单位为 $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{BW}\cdot\text{d})$,Fi 为第 i 种食物的推荐消费量,单位为 g/d, Ci 为第 i 种食物的高氯酸盐和氯酸盐的平均含量,单位为 $\mu\text{g}/\text{kg}$, W 为某个体的体质量,单位为 kg。

1.2.4.2 累积暴露评估

由于高氯酸盐和氯酸盐毒性作用终点均为甲状腺,因此,评估采用基于剂量相加假设的危害指数(Hazard index, HI)法作为累积风险评估方法。在得到个体通过婴幼儿配方乳粉摄入高氯酸盐和氯酸盐暴露量的基础上,与高氯酸盐和氯酸盐的健康指导值相比,获得不同段位婴幼儿累计暴露水平。危害指数法是食品中各化合物暴露水平与其参考值或健康指导值的比值之和,即危害商(Hazard quotient, HQ)之和,见公式 2。当危害指数小于 1 时,认为风险是可以接受的;大于 1 时,认为风险是不可以接受的^[17]。

$$HI = \sum_{i=1}^n HQ_i = \sum_{i=1}^n \frac{Exp_i}{RV_i} \quad \text{公式 2}$$

1.2.5 婴幼儿配方乳粉的消费量数据

本次评估 0~36 月龄婴幼儿配方乳粉消费量数据来自国家食品安全风险评估中心(China National Center for Food Safety Risk Assessment, CFSA)2015 年中国婴幼儿食品消费量调查数据中内蒙古地区婴幼儿的消费量数据。

1.3 统计学分析

按照世界卫生组织(World Health Organization, WHO)全球环境监测系统/食品污染监测与评估规划(Global Environment Monitoring System-Food Contamination Monitoring and Assessment Programme, GEMS/FOOD)第二次会议关于“食品中低水平污染物可信评价”中对未检出数据处理原则^[18],本研究中高氯酸盐和氯酸盐数据处理原则为低于检出限的样品比例小于 60% 时,所有低于检出限的检测值按 1/2LOD(高氯酸盐为 0.3 $\mu\text{g}/\text{kg}$,氯酸盐为 1.00 $\mu\text{g}/\text{kg}$)计算;若低于检出限的样品比例 $\geq 60\%$ 但 $\leq 80\%$,所有小于 LOD 的检测值按 LOD 计算;若低于检出限的样品比例大于 80%,则按 LOD 计算。

监测数据统计采用 Excel 2016、SPSS 22.0 软件进行处理。高氯酸盐、氯酸盐检出率的差异采用 χ^2 检验,含量差异采用 Kruskal-Wallis H 非参数检验,所有检验均为双侧检验,检验水准为 $\alpha=0.05$,以 $P<0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 不同段位的婴幼儿配方乳粉中高氯酸盐和氯酸盐含量分析

高氯酸盐的总体检出率为 92.39%(498/539),其中,2段和3段的检出率均较高,分别为 95.63%(153/160)和 95.51%(149/156),1段检出率略低,为 87.89%(196/223)。经 χ^2 检验,3种不同段位的婴幼儿配方乳粉样品中高氯酸盐的检出率差异有统计学意义($P<0.05$),可以认为3种不同段位的婴幼儿配方乳粉样品中高氯酸盐检出率不同。1段、2段和3段婴幼儿配方乳粉中高氯酸盐的平均值分别为 13.30、15.20 和 15.33 $\mu\text{g}/\text{kg}$,经统计学非参数检验 Kruskal-Wallis H 分析,3种不同段位的含量之间差异有统计学意义($P<0.05$)。进一步两两比

较,发现高氯酸盐含量1段与2、3段之间差异有统计学意义($P<0.05$),2段和3段高氯酸盐含量平均值高于1段,2段和3段之间的差异无统计学意义($P>0.05$)。

氯酸盐的总体检出率为 73.10%(394/539),其中,2段的检出率较高,为 76.88%(123/160),1段和3段的检出率分别为 70.85%(158/223)、72.44%(113/156)。经 χ^2 检验,3种不同段位的婴幼儿配方乳粉样品中氯酸盐的检出率差异无统计学意义($P>0.05$),尚不能认为3种不同段位的婴幼儿配方乳粉样品中氯酸盐检出率不同;1段、2段和3段婴幼儿配方乳粉中氯酸盐的平均值分别为 86.39、95.45 和 100.80 $\mu\text{g}/\text{kg}$,经统计学非参数检验 Kruskal-Wallis H 分析,3种不同段位的含量差异无统计学意义($P>0.05$)。结果见表1。

2.2 婴幼儿配方乳粉冲调用水中高氯酸盐和氯酸盐调查结果分析

在调查的 254 份冲调用水中,高氯酸盐的平均值为 1.25 $\mu\text{g}/\text{L}$,氯酸盐的平均值为 24.03 $\mu\text{g}/\text{L}$ 。结果见表2。

表1 不同段位婴幼儿配方乳粉中高氯酸盐和氯酸盐含量的统计结果

Table 1 Statistical results of perchlorate and chlorate contents in infant formula milk powder at different stages

段位	样品量/份	高氯酸盐/($\mu\text{g}/\text{kg}$)					氯酸盐/($\mu\text{g}/\text{kg}$)				
		检出值范围	均值	中位数	最大值	P95	检出值范围	均值	中位数	最大值	P95
1段	223	ND~89.30	13.30	6.60	89.30	69.50	ND~828.00	86.39	42.30	828.00	356.40
2段	160	ND~76.12	15.20	9.14	76.12	53.22	ND~623.36	95.45	50.00	623.36	337.15
3段	156	ND~84.90	15.33	10.73	84.90	45.31	ND~1 061.00	100.80	47.65	1 061.00	413.40
合计	539	ND~89.30	14.45	9.00	89.30	53.36	ND~1 061.00	93.25	45.50	1 061.00	371.21

注:ND表示未检出

表2 不同乳粉冲调用水样品中高氯酸盐和氯酸盐含量的统计结果

Table 2 Statistical results of perchlorate and chlorate contents in different milk powder flushing water samples

样品名称	样品量/份	高氯酸盐/($\mu\text{g}/\text{L}$)			氯酸盐/($\mu\text{g}/\text{L}$)		
		均值	最大值	P95	均值	最大值	P95
直饮水	32	0.29	1.15	1.11	8.79	66.65	57.15
纯净水	33	0.25	1.03	0.81	6.64	174.78	56.74
末梢水	158	1.77	26.59	7.50	35.07	927.66	240.48
矿泉水	31	0.69	5.57	4.70	2.03	8.56	8.54
合计	254	1.25	26.59	6.06	24.03	927.66	136.31

2.3 暴露评估结果

2.3.1 简单分布法评估结果

高氯酸盐的评估结果表明,内蒙古地区0~6月龄、6~12月龄和12~36月龄婴幼儿高氯酸盐的平均暴露量分别为 0.23、0.16、0.11 $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{BW}\cdot\text{d})$,均未超过 RfD[0.7 $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{BW}\cdot\text{d})$],健康风险较低;0~36月龄 P95 暴露量为 0.42 $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{BW}\cdot\text{d})$,是 RfD 的 0.6 倍,未超过 RfD,健康风险较低。结果见表3。

表3 不同月龄婴幼儿配方乳粉消费人群高氯酸盐暴露水平

Table 3 Perchlorate exposure levels of infant formula milk powder consumers at different months

月龄	样品量/份	高氯酸盐暴露水平/[$\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{BW}\cdot\text{d})$]				平均暴露量占健康 指导值/%	P50暴露量占健康 指导值/%	P95暴露量占健康 指导值/%	最大值占健康 指导值/%
		平均暴露量	P50	P95	最大值				
0~6	3 164	0.23	0.18	0.59	1.83	32.86	25.71	84.29	261.43
6~12	4 384	0.16	0.14	0.37	1.05	22.86	20.00	52.86	150.00
12~36	3 081	0.11	0.10	0.25	0.76	15.71	14.29	35.71	108.57
合计	10 629	0.17	0.13	0.42	1.83	24.29	18.57	60.00	261.43

注:婴幼儿配方乳粉与冲调饮用水的比例为1:7;美国NRC计算出高氯酸盐的每日推荐摄入量即 RfD 为 0.7 $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{BW}\cdot\text{d})$

氯酸盐的评估结果表明,内蒙古地区0~6月龄、6~12月龄和12~36月龄婴幼儿氯酸盐的平均暴

露量分别为 2.64、1.80、1.25 $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{BW}\cdot\text{d})$,均未超过 PMTDI[10 $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{BW}\cdot\text{d})$],健康风险较低;

0~36 月龄 P95 暴露量为 4.80 $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{BW}\cdot\text{d})$, 是 PMTDI 的 0.48 倍, 未超过 PMTDI, 健康风险较低。结果见表 4。

表 4 不同月龄婴幼儿配方乳粉消费人群氯酸盐暴露水平

Table 4 Chlorate exposure levels of infant formula milk powder consumers at different months of age

月龄	样品量/份	氯酸盐暴露水平/ $[\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{BW}\cdot\text{d})]$				平均暴露量占健康指导值/%	P50 暴露量占健康指导值/%	P95 暴露量占健康指导值/%	最大值占健康指导值/%
		平均暴露量	P50	P95	最大值				
0~6	3 164	2.64	2.10	6.80	21.12	26.40	21.00	68.00	211.20
6~12	4 384	1.80	1.53	4.07	11.51	18.00	15.30	40.70	115.10
12~36	3 081	1.25	1.08	2.80	8.47	12.50	10.80	28.00	84.70
合计	10 629	1.89	1.47	4.80	21.12	18.90	14.70	48.00	211.20

注:婴幼儿配方乳粉与冲调饮用水的比例为 1:7;2011 年 JECFA 计算的氯酸盐 PMTDI 为 10 $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{BW}\cdot\text{d})$

表 5 不同月龄婴幼儿配方乳粉中高氯酸盐和氯酸盐的累积暴露结果

Table 5 Cumulative exposure to perchlorate and chlorate in infant formula milk powder at different ages

月龄	样品量/份	HQ 高氯酸盐	HQ 氯酸盐	HI
0~6	3 164	0.33	0.26	0.59
6~12	4 384	0.23	0.18	0.41
12~36	3 081	0.16	0.13	0.29
合计	10 629	0.24	0.19	0.43

注:高氯酸盐采用 NRC 推导的健康指导值 0.7 $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{BW}\cdot\text{d})$, 氯酸盐采用 JECFA 推导的健康指导值为 10 $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{BW}\cdot\text{d})$ 计算的累计暴露量

3 讨论

内蒙古地区婴幼儿配方粉中存在高氯酸盐和氯酸盐的污染,但在目前的污染水平下,0~36 月龄婴儿通过乳粉摄入的高氯酸盐和氯酸盐的健康风险较低。其中 0~6 月龄婴儿的 P95、P50 的暴露量和平均暴露量均较高,但均未超过其健康指导值,仍需进一步对其健康风险进行密切关注。

本研究的 2 段和 3 段的高氯酸盐含量平均值高于 1 段,差异有统计学意义 ($P < 0.05$), 各段位的氯酸盐含量差异无统计学意义 ($P > 0.05$)。高氯酸盐与氯酸盐的含量受污染来源的影响比较大,有研究表明,婴幼儿配方乳粉中的高氯酸盐主要来源于牛的饲草料,氯酸盐主要来自生产过程中使用的消毒剂^[19]。需要进一步深入研究高氯酸盐和氯酸盐的其他污染来源和污染水平。

目前,我国对于研究高氯酸盐和氯酸盐的污染调查与膳食暴露风险评估主要是蔬菜、水果、茶叶^[20],而对于婴幼儿配方乳粉中氯酸盐与高氯酸盐的污染研究相对较少。仅 2018 年,刘卿等^[21]调查了中国 14 个省的 215 份市售各段位的婴幼儿配方乳粉,氯酸盐的含量范围为 ND~1 170.0 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 平均值为 151.6 $\mu\text{g}/\text{kg}$;高氯酸盐的含量范围为 ND~74.2 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 平均值为 11.3 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 低于本研究的高氯酸盐的平均值,高于本研究氯酸盐的平均值。

2.3.2 累积暴露评估法评估结果

累积暴露评估结果 HI 均小于 1, 认为风险是可以接受的。结果见表 5。

2007 年,杨佳佳^[22]在全国各大超市和婴幼儿奶粉专卖店采集奶粉样品共 161 份,全部检出高氯酸盐,含量为 2.07~330.07 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 平均值为 32.46 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 高于本次研究的高氯酸盐的平均值。由此可见婴幼儿配方乳粉中检出高氯酸盐和氯酸盐是一个普遍现象。

内蒙古地区 0~6 月龄婴幼儿每日通过乳粉摄入高氯酸盐的平均暴露量为 0.23 $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{BW}\cdot\text{d})$, 氯酸盐的平均暴露量为 2.64 $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{BW}\cdot\text{d})$, 其中,每日通过乳粉摄入的高氯酸盐的暴露量稍高于我国 0~6 月龄人群婴儿配方粉中高氯酸盐暴露量均值 [0.2 $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{BW}\cdot\text{d})$]^[21];每日通过乳粉摄入的氯酸盐的暴露量高于上海市 0~6 月龄婴儿每日通过婴儿配方乳粉摄入氯酸盐的暴露量均值 1.64 $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{BW}\cdot\text{d})$ ^[23], 低于我国 0~6 月龄人群婴儿配方粉中氯酸盐暴露量均值 [4.0 $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{BW}\cdot\text{d})$]^[21], 可能与采用的不同评估方法、未考虑乳粉冲调用水中存在的高氯酸盐和氯酸盐、不同年份所监测的婴儿配方乳粉中高氯酸盐和氯酸盐含量不同以及每日婴儿配方乳粉消费量不同有关。

本次研究的不确定性包括(1)只评估了内蒙古地区 0~36 月龄的婴幼儿通过配方乳粉摄入高氯酸盐和氯酸盐的健康风险,未考虑通过其他辅食(如蔬菜、水果等)摄入高氯酸盐和氯酸盐的健康风险;(2)本研究采用 2015 年中国婴幼儿食品消费量调查数据中内蒙古地区婴幼儿的消费量数据,代表性可能存在差异,可能会对评估内蒙古地区 0~36 月龄的婴幼儿通过乳粉摄入高氯酸盐和氯酸盐的健康风险产生影响。在后续的研究中将继续更新内蒙古地区婴幼儿配方乳粉的消费量数据库。

参考文献

[1] GIL M I, MARÍN A, ANDUJAR S, et al. Should chlorate residues be of concern in fresh-cut salads? [J]. Food Control, 2016, 60: 416-421.

- [2] KETTLITZ B, KEMENDI G, THORGRIMSSON N, et al. Why chlorate occurs in potable water and processed foods: a critical assessment and challenges faced by the food industry[J]. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 2016, 33(6): 968-982.
- [3] MARÍN A, TUDELA J A, GARRIDO Y, et al. Chlorinated wash water and pH regulators affect chlorine gas emission and disinfection by-products [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2020, 66: 102533.
- [4] HEYWOOD R, SORTWELL R J, KELLY P J, et al. Toxicity of sodium chlorate to the dog[J]. *The Veterinary Record*, 1972, 90(15): 416-418.
- [5] HOOTH M J, DEANGELO A B, GEORGE M H, et al. Subchronic sodium chlorate exposure in drinking water results in a concentration-dependent increase in rat thyroid follicular cell hyperplasia[J]. *Toxicologic Pathology*, 2001, 29(2): 250-259.
- [6] AL-OTOUM F, AL-GHOUTI M A, AHMED T A, et al. Disinfection by-products of chlorine dioxide (chlorite, chlorate, and trihalomethanes): Occurrence in drinking water in Qatar [J]. *Chemosphere*, 2016, 164: 649-656.
- [7] 宋正规, 沈坚, 张爱芝, 等. 高氯酸盐毒性及其检测方法研究进展[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(8): 341-347, 351.
SONG Z G, SHEN J, ZHANG A Z, et al. Research progress in toxicological effects of perchlorate and its detection methods[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2018, 39(8): 341-347, 351.
- [8] OH S H, LEE J W, MANDY P, et al. Analysis and exposure assessment of perchlorate in Korean dairy products with LC-MS/MS [J]. *Environmental Health and Toxicology*, 2011, 26: e2011011.
- [9] 方齐乐, 陈宝梁. 新型环境污染物高氯酸盐的环境化学行为、食品安全及健康风险[J]. *科学通报*, 2013, 58(26): 2626-2642.
FANG Q L, CHEN B L. Environmental transport behaviors of perchlorate as an emerging pollutant and their effects on food safety and health risk [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(26): 2626-2642.
- [10] 赵茜, 姜苏, 史贵涛, 等. 极地雪冰中高氯酸盐的研究进展[J]. *极地研究*, 2021, 33(1): 139-147.
ZHAO Q, JIANG S, SHI G T, et al. Review of perchlorate research in polar snow and ice [J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2021, 33(1): 139-147.
- [11] 彭银仙. 高氯酸盐水环境行为特征研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2011.
PENG Y X. Study on environmental behavior characteristics of perchlorate brine [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2011.
- [12] 陈文秀, 何纳轮, 史亚利, 等. 我国人群高氯酸盐暴露途径及贡献率分析[J]. *科学通报*, 2020, 65(14): 1387-1394.
CHEN W X, HE N L, SHI Y L, et al. Analysis of exposure routes and contribution rate of perchlorate in China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2020, 65(14): 1387-1394.
- [13] LUMEN A, GEORGE N I. Evaluation of the risk of perchlorate exposure in a population of late-gestation pregnant women in the United States: Application of probabilistic biologically-based dose response modeling [J]. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 2017, 322: 9-14.
- [14] PLEUS R C, COREY L M. Environmental exposure to perchlorate: A review of toxicology and human health [J]. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 2018, 358: 102-109.
- [15] 蔡亚岐, 史亚利, 张萍, 等. 高氯酸盐的环境污染问题[J]. *化学进展*, 2006, 18(11): 1554-1564.
CAI Y Q, SHI Y L, ZHANG P, et al. Perchlorate related environmental problems [J]. *Progress in Chemistry*, 2006, 18(11): 1554-1564.
- [16] Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives. Seventy-second meeting of JECFA [R/OL]. Rome: WHO Technical Report Series, 2010. <https://www.fao.org/3/at868e/at868e.pdf>.
- [17] OEHHA. OEHHA adopts updated public health goal for perchlorate [EB/OL]. (2015-03-10) [2022-10-10]. <https://www.nexreg.com/oehha-adopts-updated-public-health-goal-for-perchlorate>.
- [18] WHO. GEMS/Food-EURO second workshop on reliable evaluation of low-level contamination of food [R]. Germany: Workshop in the Frame of GEMS/Food-EURO, 1995.
- [19] 张卿, 毛伟峰, 郭卫东, 等. 某市液态奶中氯酸盐和高氯酸盐污染源分析[J]. *食品安全质量检测学报*, 2021, 12(20): 7940-7945.
ZHANG Q, MAO W F, GUO W D, et al. Source analysis of chlorate and perchlorate pollution in liquid milk in a city [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2021, 12(20): 7940-7945.
- [20] 李冬桂, 吴凤, 吕丽兰, 等. 蔬菜、水果中高氯酸盐的污染情况及健康风险评估[J]. *食品工业*, 2021, 42(4): 497-500.
LI D G, WU F, LYU L L, et al. Pollution and health risk assessment of perchlorate in vegetables and fruits [J]. *The Food Industry*, 2021, 42(4): 497-500.
- [21] 刘卿, 毛伟峰, 蒋定国, 等. 2018年中国婴幼儿配方乳粉高氯酸盐和氯酸盐含量[J]. *卫生研究*, 2022, 51(1): 124-127.
LIU Q, MAO W F, JIANG D G, et al. Content of perchlorate and chlorate in infant formula milk powder in China in 2018 [J]. *Journal of Health Research*, 2022, 51(1): 124-127.
- [22] 杨佳佳. 中国居民膳食高氯酸盐和溴酸盐暴露水平研究[D]. 武汉: 武汉工业学院, 2012.
YANG J J. The study of occurrence and estimated dietary intakes of perchlorate and bromate in China [D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2012.
- [23] 宇盛好, 李亦奇, 张露菁, 等. 婴幼儿配方乳粉中氯酸盐的膳食暴露评估[J]. *上海预防医学*, 2022, 34(5): 401-406.
YU S H, LI Y Q, ZHANG L J, et al. Dietary exposure assessment of chlorate in infant formula [J]. *Shanghai Journal of Preventive Medicine*, 2022, 34(5): 401-406.