

## 研究报告

## 基于大米中镉暴露水平的多种评估模型的比较

刘佳琳<sup>1</sup>,魏晟<sup>1</sup>,白莉<sup>2</sup>,王彝白纳<sup>2</sup>

(1. 华中科技大学同济医学院公共卫生学院流行病与卫生统计学系,湖北 武汉 430030;

2. 国家食品安全风险评估中心卫生部食品安全风险评估重点实验室,北京 100022)

**摘要:**目的 以估算长期经大米摄入的镉暴露水平为例,比较食品污染物暴露评估过程中常用的3种统计模型,即观测个体均数(OIM)模型、贝塔二项正态分布(BBN)模型和非参数模型的优缺点。方法 以大米、镉、膳食等为中文关键词,Rice、Food和Cadmium等为英文关键词,检索中国知网、万方数据知识服务平台和PubMed数据库中关于我国大米中镉浓度的文献,并结合一项中国营养调查中3 d 24 h膳食调查获得的食物消费量数据,分别采用上述3种模型,估算我国居民及各年龄性别组人群长期经大米摄入镉的暴露水平。结果 全人群OIM模型显示我国人群经大米导致的镉暴露量第2.5~97.5百分位数(P<sub>2.5</sub>~P<sub>97.5</sub>)为0.081~0.576 μg/(kg·BW·d),非参数模型的结果为0.081~0.573 μg/(kg·BW·d),BBN模型结果为0.104~0.611 μg/(kg·BW·d)。不同人群中OIM模型、非参数模型与BBN模型估算的镉暴露水平的平均值相近,其中全人群中3种模型均值分别为0.278、0.277和0.278 μg/(kg·BW·d)。结论 在原始数据充足的条件下,非参数模型与OIM模型评估结果近似,而BBN模型可以通过扣除个体内消费频率差异,对经食品污染物的暴露评估结果更保守。

**关键词:**膳食调查;风险评估;统计模型;大米;镉

中图分类号:R155

文献标识码:A

文章编号:1004-8456(2022)03-0459-08

DOI:10.13590/j.cjfh.2022.03.011

**The comparison of three risk assessment models based on cadmium exposure level in rice**LIU Jialin<sup>1</sup>, WEI Sheng<sup>1</sup>, BAI Li<sup>2</sup>, WANGYI Baina<sup>2</sup>

(1. Department of Epidemiology and Biostatistics, School of Public Health, Huazhong University of Science and Technology, Hubei Wuhan 430030, China; 2. Key Laboratory of Food Safety Risk Assessment of Ministry of Health, China National Center for Food Safety Risk Assessment, Beijing 100022, China)

**Abstract: Objective** The advantages and disadvantages of three statistical models commonly used in food contaminant exposure assessment, namely the observed individual means (OIM) model, the beta-binomial and normal (BBN) model and the non-parametric model were compared by an example of the estimation of long-term exposure to cadmium *via* rice.

**Methods** Rice, cadmium and diet were used as Chinese and English keywords to search the literature on cadmium concentration in rice in China National Knowledge Infrastructure, Wanfang Data Knowledge Service Platform and PubMed database. Long-term levels of exposure to cadmium *via* rice for the total population and age groups in China were estimated by combining partial consumption frequency data obtained from the Chinese nutrition survey. **Results** In the total population, the OIM model showed that the 2.5<sup>th</sup> to 97.5<sup>th</sup> percentile (P<sub>2.5</sub>, P<sub>97.5</sub>) of the exposure to heavy metal Cd in rice was 0.081–0.576 μg/(kg·BW·d), the non-parametric model result was 0.081–0.573 μg/(kg·BW·d), and the BBN model result was 0.104–0.611 μg/(kg·BW·d). The average results of the OIM model, non-parametric model and BBN model in different populations were close. The average values of the three models in the total population were 0.278, 0.277 and 0.278 μg/(kg·BW·d), respectively. **Conclusion** With large sample data, non-parametric models have similar assessment results to the OIM model, while BBN models can allow for a more conservative assessment of exposure by subtracting differences in consumption frequency within individuals, and better evaluate the long-term exposure level of pollutants.

收稿日期:2021-12-31

基金项目:国家重点研发计划(2018YFC1603105)

作者简介:刘佳琳 女 在读硕士生 研究方向为食品安全风险评估 E-mail:15927092307@163.com

通信作者:王彝白纳 女 副研究员 研究方向为食品安全风险评估 E-mail:wangyibaina@cfsa.net.cn

**Key words:** Dietary survey; risk assessment; statistical model; rice; cadmium

食品安全一直是关系到民生和民众健康的重大问题,是世界各国都重点关注和监管的领域。食品中重金属镉因为其具有迁移率高和生物半衰期长等特点,易在稻米蔬菜类食品中累积,并对骨骼、心血管和肾脏等器官和系统造成损伤,一直都是食品安全领域的关注热点<sup>[1-2]</sup>。不同国家或组织对谷物,尤其是稻米的限量标准参差不齐,未达到统一,中国目前将 0.2 mg/kg 作为到稻米镉的限量标准<sup>[3]</sup>。因此为保障食品安全和保护人体健康,准确估算人群经膳食镉摄入量以及超出风险值的人群比例,规范系统地镉和其他化学物进行风险评估是实现科学监管的重要途径,能够为相关限量标准的制定和修改提供科学的决策证据<sup>[4]</sup>。

暴露评估是根据食物中污染物的含量水平和食物消费量数据,计算人群通过膳食途径摄入的该物质的暴露量,是风险评估的核心步骤,通常分为短期暴露和长期暴露<sup>[5]</sup>。国内外目前常用的评估模型主要为点评估、简单分布模型和概率评估模型。联合国粮农组织或欧盟都曾采用点评估模型进行初步的暴露评估,当污染物暴露量大于健康指导值时,再用概率评估模型作进一步精确评估<sup>[6]</sup>。镉的主要危害在于低剂量长期暴露,对于此类型暴露评估的重点和难点是合理准确地估计个体镉的日常摄入量,一般所推荐使用的是观测个体均数(Observed individual means, OIM)模型和贝塔二项正态分布(Beta-binomial and normal, BBN)模型<sup>[7]</sup>,在食物消费量调查数据充足的情况下,也可以使用非参数模型。本文采用上述模型,利用文献中大米镉污染水平和食物消费量调查数据,对人群经大米镉的暴露水平进行估计,并对结果进行对比分析。

## 1 资料和方法

### 1.1 资料来源

以镉、重金属、食品、大米等为中文关键词, Cadmium、Heavy metal、Rice 以及 China 等为英文关键词,检索中国知网、万方数据知识服务平台、PubMed 数据库发表有关中国人群所消费的大米中镉含量的文献。文献纳入标准为:(1)所检测的食品种类中明确标明为大米;(2)重金属镉的检测方法为石墨炉原子吸收法、氢化物原子荧光法或电感耦合等离子体质谱法;(3)排除明确标记在污染地区所采大米样本的文献;(4)文章中有明确的检测样品数和镉浓度均值。文献时间限定于 2000 年 1 月 1 日至 2020 年 12 月 31 日,语种为中文和英

文。共检索 1 143 篇相关文献,其中 473 篇英文,670 篇中文。在排除重复、与纳入标准不符、无相关具体数值等文献后,最终纳入文献 43 篇(2 篇为全国性,41 篇为省份调查),具体检索流程如图 1,并采用加权平均的方法,即按公式  $C = \sum(N_i \times C_i) / \sum N_i$  计算大米中镉污染浓度水平,其中  $C_i$  是指某一文献中大米镉的平均浓度, $N_i$  是指该文献的大米采样本数。

本次研究中的人群膳食消费量数据来源于一项中国居民膳食消费量调查,该调查采用分层抽样,所有市区监测人员均在培训合格后方可参与调查。在膳食调查部分采用连续 3 d 24 h 膳食询问法问卷调查和食物频率问卷调查,其数据结果经过整理、核查和录入,以获得最终人群大米的消费量。调查点包括大中小城市以及农村,调查人群从儿童到中老年,调查人数为 2 340 人,共调查 6 867 人次,有很好的代表性。

### 1.2 暴露评估分析方法

#### 1.2.1 观测个体均数模型

观测 OIM 模型是将食品中固定的污染物水平与该食品的消费量调查数据库结合起来计算污染物暴露水平的方法<sup>[8]</sup>。即将调查个体在调查天数内的大米消费量取平均值并乘以大米中镉平均含量,计算每个人污染物的暴露量。其计算公式为:

$$y_i = \frac{x_{i,mean} \times c_{mean}}{w_i} \quad (1)$$

其中  $x_{i,mean}$  是个体  $i$  在调查 3 d 内大米的平均消费量(g/d),  $c_{mean}$  是大米中镉的平均浓度(mg/kg),  $w_i$  为个体  $i$  的体质量(kg),  $y_i$  是个体  $i$  经大米的镉暴露量 [ $\mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{BW} \cdot \text{d})$ ]。

#### 1.2.2 非参数模型

膳食暴露的非参数模型是以大量的个体消费量数据和食品污染物含量数据库为前提,通过确保每一条数据在放回抽样中有同样概率被抽到,利用计算机技术在两个数据库中进行随机抽样和整合计算,得到人群某污染物暴露水平的概率分布<sup>[9]</sup>。该方法也可适用于其中一个数据库的抽样计算,为半概率模型,计算公式为与公式(1)类似。不同的是大米消费量  $x$ (g/d)是从原始数据的经验分布中进行 10 000 次的有放回抽样,通过蒙特卡洛(Monte Carlo)模拟计算暴露量的概率分布,以上过程使用 R4.1.0 软件的 Sample 函数实现。该过程可以弥补观测个体均数模型中未考虑食品消费量人群间变异度的问题。

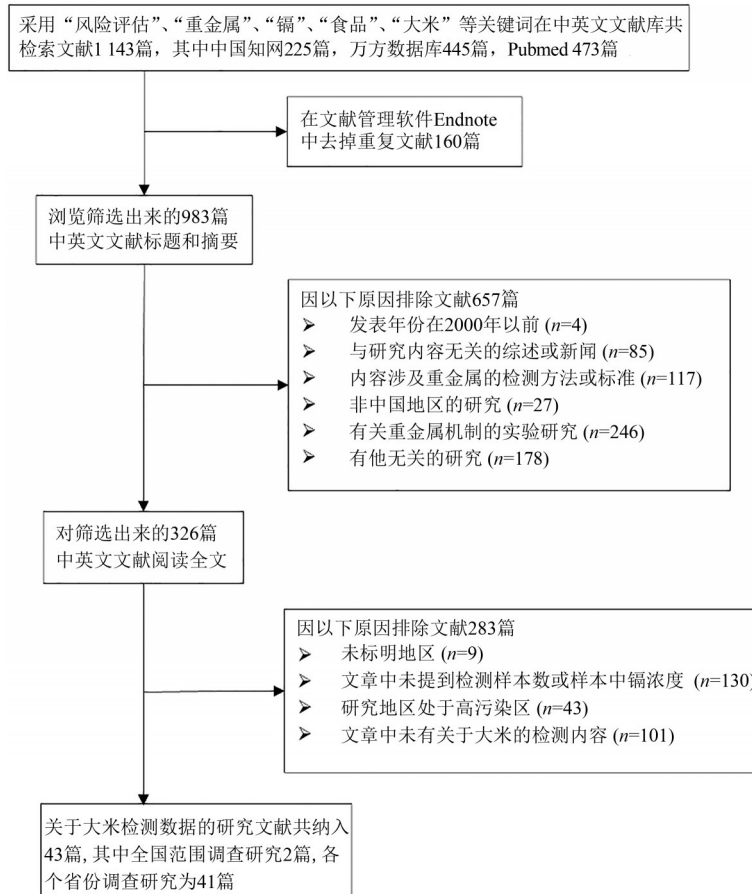


图1 中英文文献库中大米镉浓度文献检索流程图

Figure 1 Flow chart of literature search for cadmium content in rice in Chinese and English reference data

### 1.2.3 贝塔二项正态分布模型

在经膳食化学污染物长期暴露评估时,不同人群对不同种类食物的摄入频率存在较大的变异性,当用短期 2~3 d 的消费频率数据代替长期慢性暴露会产生较大的误差,如何通过统计模型转换使其近似等于长期暴露是评估过程中的关键。目前被世界各国和评估机构所认可和接受的是由 DE BOER 等<sup>[7]</sup>在 2005 年提出的贝塔二项-正态分布模型。该模型的基本思想是将调查人群膳食消费的个体内变异通过适当的统计模型去除,所剩的个体间变异便可以反映人群的长期膳食消费情况<sup>[10]</sup>。

该模型包括三个模块,分别为:(1)摄入频率,假设其符合贝塔二项分布。根据实际调查人群的阳性摄入天数  $n_{pos}$ (即有污染物暴露的天数)服从总天数为  $n$ ,阳性摄入概率为  $p$  的二项分布,不同个体间的阳性摄入概率不同,服从范围为 0~1 的贝塔分布;(2)阳性暴露量分布,通过对不同个体的污染物阳性暴露量进行对数转换使其服从正态分布。所建立的线性随机效应模型具体公式为  $\text{transf}(y_{pos_{ij}}) = \mu + c_i + u_i$ ,其中  $\text{transf}(y_{pos_{ij}})$  表示对数转换后的阳性摄入量,  $c_i$  表示人间变异效应,即不同人群之间膳食摄入的差异性,服从  $N(0, \sigma_b^2)$ ,  $u_i$  表示人内变

异效应,反映的是个体在调查天数内膳食结构的短期波动,服从  $N(0, \sigma_w^2)$ 。通过最大似然估计法得到 3 个参数的估计值为  $m, s_b^2, s_w^2$ 。上述模型构建采用 R4.1.0 软件中“lmerTest”包中的 lmer 函数完成。进一步采用 Monte Carlo 抽样,获得阳性摄入量的样本数据,即反对数转换后的阳性摄入量为  $y_{pos_{ij}} = \exp(m + z_i + 0.5 \times s_w^2)$ ,其中  $z_i = \text{random}(N(0, S_b^2))$ ,在本研究中模拟次数定为 10 000 次;(3)长期暴露量估计:同时对服从贝塔分布的摄入概率  $p$  进行 10 000 次抽样,通过公式  $y_i = p_i \times y_{pos_i}$  获得长期暴露量分布<sup>[11]</sup>。

## 2 结果

### 2.1 数据基本情况

在最终纳入的 43 篇文献中共收集 30 254 份大米样本,样本来源于北京、福建、广东、广西、河南、湖南、吉林、江苏、江西、山东、陕西、上海、四川、浙江、重庆 15 个省(自治区,直辖市),详见表 1。各个检测数据均未超过国家限量标准,对大米中镉浓度合并计算后得出其浓度均值为 0.072 mg/kg。此外在一项居民营养调查中,总调查人群为 861 户家庭,2 340 个人,平均年龄为 43.34 岁,具体不同分组人群基本人口学信息如表 2 所示。

表1 中国2000—2020年各省大米中重金属镉的含量

Table 1 The content of cadmium in rice in various provinces of China from 2000 to 2020

参考文献	年份	份数	含量/(mg/kg)	参考文献	年份	份数	含量/(mg/kg)
[12]	2000—2002	142	0.127	[31]	2011—2015	160	0.041 5
[13]	2000	120	0.06	[32]	2004—2010	26	0.112 8
[14]	2001	30	0.032	[33]	2010—2012	138	0.136 9
[14]	2002	20	0.026	[34]	2011—2012	63	0.014 05
[14]	2003	36	0.049	[35]	2012	100	0.19
[14]	2004	30	0.019	[36]	2011—2012	16	0.010 1
[15]	2003	16	0.07	[37]	2007—2014	3 167	0.114
[16]	2000—2005	393	0.126	[38]	2012—2014	1 898	0.091
[17]	2005—2006	20	0.173	[39]	2009—2012	16	0.087 6
[18]	2005—2007	14	0.06	[40]	2011—2013	50	0.158
[19]	2008	10	0.017	[41]	2010	228	0.028
[20]	2005—2006	19	0.092	[42]	2007—2014	370	0.05
[21]	2008	5	0.017 4	[43]	2009—2015	304	0.041
[22]	2002—2007	117	0.023	[44]	2012—2013	25	0.02
[23]	2009	10	0.14	[45]	2014	80	0.018
[24]	2009—2010	20	0.24	[46]	2014	35	0.006 08
[25]	2010	10	0.002	[47]	2011—2015	19 786	0.062
[26]	2005	20	0.033	[48]	2014—2015	40	0.006 53
[26]	2006	11	0.022	[49]	2010—2011	86	0.01
[26]	2007	18	0.008	[50]	2001—2009	184	0.025
[26]	2008	54	0.009 5	[51]	2012—2017	680	0.095
[27]	2007—2010	16	0.010 1	[52]	2013—2018	87	0.033 9
[28]	2011	10	0.067	[53]	2013—2016	20	0.019 6
[29]	2009	420	0.077 5	[54]	2015—2019	886	0.126 85
[30]	2008	248	0.037			30 254	0.072 15

表2 一项中国居民膳食消费量调查中部分调查对象的基本人口学信息

Table 2 Basic demographic information of some subjects in a survey of dietary consumption of Chinese residents

分组	人数	人日数	年龄/岁	体质量/kg
全人群	2 340	6 867	43.34	59.19
男性	1 100	3 225	43.32	62.84
女性	1 240	3 642	43.35	56.16
儿童(2~11岁)	244	717	6.89	28.95
青少年(12~17岁)	106	305	14.39	47.95
成人(≥18岁)	1 990	5 845	49.34	61.04

2.2 3种模型计算结果比较

OIM模型、非参数模型和BBN模型计算结果如表3所示,结果显示我国全人群经大米镉暴露量分别为0.278、0.277、0.278 μg/(kg·BW·d),表示3种模型均可较好评估暴露分布的平均水平,其他各亚组的模型均值也较为接近。此外,在对全人群的暴露量计算中,经3种模型计算获得的镉暴露水平第2.5和97.5百分位数分别为0.081~0.576、0.081~0.573、0.104~0.611 μg/(kg·BW·d)。由此可见,BBN模型在低端暴露百分位值要高于其他两种模型,在高端暴露百分位,如P99.9也是类似的结果。

同时采用不同模型分性别和年龄亚组进行计算,结果显示男性人群大米镉的暴露要高于女性,低年龄组暴露量高于高年龄组。在图2中总人群3种模型暴露水平概率分布图显示,相较于前两种模型,由于

表3 我国一般人群及不同亚组大米镉暴露水平[μg/(kg·BW·d)]

Table 3 Exposure to cadmium in rice of the general population and different subgroups in China [μg/(kg·BW·d)]

组别	均值	P2.5	P50	P90	P95	P97.5	P99	P99.9
总人群								
OIM	0.278	0.081	0.260	0.439	0.500	0.576	0.680	1.031
非参数	0.277	0.081	0.260	0.435	0.500	0.573	0.670	1.060
BBN	0.278	0.104	0.252	0.448	0.529	0.611	0.705	0.997
男性								
OIM	0.290	0.082	0.268	0.459	0.517	0.584	0.689	0.985
非参数	0.290	0.080	0.268	0.459	0.528	0.574	0.674	0.999
BBN	0.291	0.107	0.262	0.470	0.558	0.647	0.751	1.061
女性								
OIM	0.264	0.084	0.257	0.407	0.454	0.518	0.618	0.997
非参数	0.263	0.086	0.257	0.398	0.450	0.518	0.612	1.028
BBN	0.265	0.106	0.242	0.415	0.484	0.554	0.642	0.870
儿童								
OIM	0.390	0.127	0.374	0.607	0.682	0.797	0.862	1.086
非参数	0.390	0.126	0.374	0.607	0.685	0.798	0.872	1.093
BBN	0.390	0.151	0.354	0.621	0.732	0.838	0.968	1.346
青少年								
OIM	0.304	0.100	0.298	0.475	0.552	0.583	0.601	0.602
非参数	0.305	0.095	0.296	0.477	0.552	0.592	0.602	0.602
BBN	0.298	0.113	0.275	0.469	0.542	0.624	0.721	0.977
成人								
OIM	0.281	0.090	0.264	0.433	0.504	0.575	0.678	1.030
非参数	0.280	0.091	0.260	0.433	0.508	0.591	0.709	1.028
BBN	0.282	0.111	0.257	0.446	0.518	0.598	0.694	0.921

BBN模型扣除了个体内变异,人群镉摄入量存在较小的变异性。国际评估机构以25 μg/kg·BW为镉每月耐受剂量(即每日耐受摄入量为0.833 μg/kg·BW),BBN模型有助于发现更高比例的危险人群。

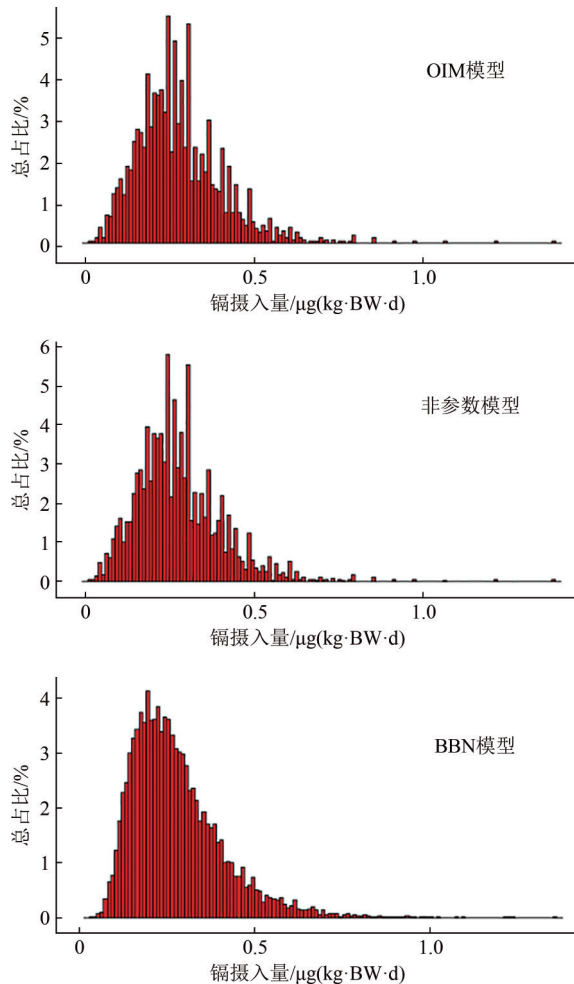


图2 总人群中3种模型计算大米镉暴露水平概率分布图

Figure 2 Probability distribution map of rice cadmium exposure level calculated by 3 models in the total population

### 3 讨论

在本次研究中评估我国人群经大米镉平均摄入量为  $0.278 \mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{BW}\cdot\text{d})$ , 范围在  $0.08\sim 1.34 \mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{BW}\cdot\text{d})$  之间, 概率评估的方法表明有 2% 左右人群会因摄入大米镉的长期累积而产生健康危害。其结果高于之前中国调查所报道的摄入量  $0.164 \mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{BW}\cdot\text{d})$ , 该文献中暴露评估方法采用简单分布模型<sup>[31]</sup>。在亚组分析中, 低年龄组人群镉暴露水平高于高年龄组, 可能是体质量较轻引起的单位体质量摄入水平增加。近年来, 随着工业发展造成土壤和水域污染, 我国和其他各国大米镉含量超标现象层出不穷<sup>[55]</sup>。发达的交通和物流使得不同产地的稻米能够实现贸易自由<sup>[56]</sup>, 进一步对不同地区的膳食镉摄入估计增加了难度。由于目前所使用的评估方法大多采用点评估或简单分布模型, 使得在评估时存在一定变异性和不确定性, 出现在低端百分位和高端百分位估计值高于实际摄入量的情况。在保证群众摄入安全的前提下, 根据评估结果进一步推动大米中镉限量标准的制修

订是关键问题。

在膳食长期暴露评估中, 不同人群对不同种类食物的消费习惯不同, 这会导致在慢性暴露评估中出现两种情况: (1) 一种为摄入的膳食食品中不含有特定污染物; (2) 一种为间断食用某些食品, 使得一年或更长时间内某些天数内不摄入特定污染物。因此, 在利用短期的膳食调查和污染物含量数据估计暴露人群的日常摄入量, 存在较大的个体内变异, 会使评估结果产生一定的偏倚和不确定性。BBN 模型正是通过蒙特卡洛抽样原理, 通过大量的随机模拟而实现此目的, 同时通过合适的统计方法分解变异和去除个体内变异, 使评估结果更接近实际暴露水平。此外 BBN 模型还可以引入协变量, 减少其他因素对暴露评估的影响, 从而得到了欧盟委员会的推荐, 并逐渐被粮农组织/世卫组织食品添加剂联合专家委员会 (The Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives, JECFA) 等国际组织用于儿童膳食中铅等化学物的慢性暴露评估中<sup>[57]</sup>。不同模型的使用有不同的限定条件, OIM 模型的适用条件广, 对数据形式要求不高, 计算也较为简单, 但所得暴露结果在两端较分散; BBN 模型的使用前提是经转换后的阳性摄入量需要服从正态分布, 通常情况下可采用 PP 图或 QQ 图进行正态性判断, 若严格采用统计学上的正态性检验方法, 在大样本情况下可能增加一类错误的概率; BBN 模型还适应于检出率不高的污染物的暴露评估。同时本研究发现使用非参数方法计算结果也与其他模型结果类似, 该方法可在原始数据样本量大但质量欠缺的情况下, 获得稳健的结果。综上所述, OIM 模型是在点评估方法基础上的进一步完善和补充, 在数据量大的情况下, 非参数模型可以作为 OIM 模型的替代或补充, 以减小结果不确定性, 当未发现有风险时, 可采用 BBN 模型进行更为保守的暴露评估。

我国的食品污染物的安全风险评估体系自建立以来, 在技术规范、应用方法以及模型应用等方面取得了较大的进步<sup>[58]</sup>。但在风险评估过程中常使用的点评估模型、观测个体均数模型或概率模型都局限于对食品中化学污染物的估计, 无法量化污染物在人体内的代谢的剂量。目前兴起的基于生理学的药物动力学模型、毒物代谢动力学模型等是一种将污染物外暴露与机体内代谢和残留量联系起来的方法。在未来工作中可以结合我国人群的膳食食用和污染物特点, 建立符合国情、适用范围广和评估精准模型。

## 参考文献

- [ 1 ] FERRARO P M, BONELLO M, FRIGO A C, et al. Cadmium exposure and kidney stone formation in the general population: An analysis of the National Health and Nutrition Examination Survey III data [J]. *Journal of Endourology*, 2011, 25 (5) : 875-880.
- [ 2 ] NAMBUNMEE K, NISHIJO M, SWADDIWUDHIPONG W, et al. Bone fracture risk and renal dysfunction in a highly cadmium exposed Thai population [J]. *Journal of Research in Health Sciences*, 2018, 18(3): e00419.
- [ 3 ] 耿安静, 王富华, 杨慧, 等. 大米镉限量标准现状分析及建议[J]. *中国食物与营养*, 2015, 21(5): 14-17.
- GENG A J, WANG F H, YANG H, et al. Status analysis and suggestions on cadmium maximum limit in rice [J]. *Food and Nutrition in China*, 2015, 21(5): 14-17.
- [ 4 ] SHI Z Y, CAREY M, MEHARG C, et al. Rice grain cadmium concentrations in the global supply-chain [J]. *Exposure and Health*, 2020, 12(4): 869-876.
- [ 5 ] 陈君石. 食品安全风险评估概述[J]. *中国食品卫生杂志*, 2011, 23(1): 4-7.
- CHEN J S. Overview of food safety risk assessment [J]. *Chinese Journal of Food Hygiene*, 2011, 23(1): 4-7.
- [ 6 ] 刘蕊, 张辉, 勾昕, 等. 健康风险评估方法在中国重金属污染中的应用及暴露评估模型的研究进展[J]. *生态环境学报*, 2014, 23(7): 1239-1244.
- LIU R, ZHANG H, GOU X, et al. Approaches of health risk assessment for heavy metals applied in China and advance in exposure assessment models: A review [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(7): 1239-1244.
- [ 7 ] DE BOER W J, VAN DER VOET H, BOKKERS B G H, et al. Comparison of two models for the estimation of usual intake addressing zero consumption and non-normality [J]. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 2009, 26(11): 1433-1449.
- [ 8 ] 周妍, 闻胜, 刘潇, 等. 食品中化学污染物风险评估研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2014, 5(6): 1868-1875.
- ZHOU Y, WEN S, LIU X, et al. Review on the risk assessment for chemical contaminants in food [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2014, 5(6): 1868-1875.
- [ 9 ] 宋雯. 农产品膳食暴露评估模型构建及其应用[D]. 扬州: 扬州大学, 2012.
- SONG W. Model construction and application of dietary exposure assessment for agricultural products [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2012.
- [ 10 ] 田野, 闵捷, 刘沛, 等. BBN模型在江苏居民氟戊菊酯长期膳食暴露评估中的应用[J]. *中国卫生统计*, 2012, 29(5): 661-663, 666.
- TIAN Y, MIN J, LIU P, et al. Evaluation of the long-term dietary exposure of fenvalerate for the residents in Jiangsu province with BBN model [J]. *Chinese Journal of Health Statistics*, 2012, 29 (5): 661-663, 666.
- [ 11 ] 李喜艳, 张亚非, 金昊, 等. 化学污染物慢性膳食暴露评估全概率模型构建研究[J]. *中国卫生统计*, 2015, 32(2): 214-216.
- LI X Y, ZHANG Y F, JIN H, et al. Establishment of fully probabilistic model for evaluation of long-term dietary exposure to chemical contaminants [J]. *Chinese Journal of Health Statistics*, 2015, 32(2): 214-216.
- [ 12 ] 梁春穗, 邓峰, 黄伟雄, 等. 广东省食物中化学污染物的网  
点监测与动态分析[J]. *中国食品卫生杂志*, 2003, 15(5): 395-401.
- LIANG C S, DENG F, HUANG W X, et al. Network monitoring and dynamic analysis of chemical contaminants in agricultural products in Guangdong [J]. *Chinese Journal of Food Hygiene*, 2003, 15(5): 395-401.
- [ 13 ] 沈向红, 汤筠, 应英, 等. 浙江省部分食品中铅镉污染水平研究[J]. *中国食品卫生杂志*, 2006, 18(5): 413-417.
- SHEN X H, TANG J, YING Y, et al. Status of food pollution by plumbum and cadmium in Zhejiang province during 2004 [J]. *Chinese Journal of Food Hygiene*, 2006, 18(5): 413-417.
- [ 14 ] 王岙, 白梅, 崔勇. 吉林省部分地区食品中铅、镉污染状况分析[J]. *中国食品卫生杂志*, 2006, 18(3): 239-243.
- WANG A, BAI M, CUI Y. Situation of lead and cadmium contamination in foods in Jilin province during the period 2001-2004 [J]. *Chinese Journal of Food Hygiene*, 2006, 18 (3) : 239-243.
- [ 15 ] 赵哲, 凌剑, 冒小鸥. 南通市2003年食品污染状况监测与分析[J]. *中国食品卫生杂志*, 2006, 18(1): 51-53.
- ZHAO Z, LING J, MAO X O. Situation of chemical contamination in foods produced in Nantong in 2003 [J]. *Chinese Journal of Food Hygiene*, 2006, 18(1): 51-53.
- [ 16 ] 邓峰, 梁春穗, 黄伟雄, 等. 2000—2005年广东省食品化学污染物网络监测与危害分析[J]. *中国食品卫生杂志*, 2007, 19(1): 1-9.
- DENG F, LIANG C S, HUANG W X, et al. Monitoring and risk assessment of chemical pollution of foods in Guangdong during 2000-2005 [J]. *Chinese Journal of Food Hygiene*, 2007, 19 (1): 1-9.
- [ 17 ] 李奕托, 卢志坚, 王雪红, 等. 韶关市区食品污染物监测研究[J]. *中国食品卫生杂志*, 2007, 19(4): 322-324.
- LI Y T, LU Z J, WANG X H, et al. Determination and analysis on certain food contamination in Shaoguan downtown [J]. *Chinese Journal of Food Hygiene*, 2007, 19(4): 322-324.
- [ 18 ] 张彩虹, 胡小玲, 张瑰. 部分食品中化学污染物铅和镉的含量调查[J]. *实用预防医学*, 2008, 15(3): 875-876.
- ZHANG C H, HU X L, ZHANG G. Investigation on lead and cadmium contamination in foods [J]. *Practical Preventive Medicine*, 2008, 15(3): 875-876.
- [ 19 ] 巴蕾, 沈成钢, 朱云洁. 北京市朝阳区食品污染物监测状况分析[J]. *广东微量元素科学*, 2009, 16(6): 62-67.
- BA L, SHEN C G, ZHU Y J. Analysis on surveillance of food pollutant in Chaoyang district of Beijing [J]. *Guangdong Trace Elements Science*, 2009, 16(6): 62-67.
- [ 20 ] 何健飞, 雷霖. 2005—2006年清远市食品中铅镉含量调查[J]. *预防医学情报杂志*, 2009, 25(3): 236-238.
- HE J F, LEI L. Investigation on lead and cadmium in food in Qingyuan during 2005-2006 [J]. *Journal of Preventive Medicine Information*, 2009, 25(3): 236-238.
- [ 21 ] 樊毅. 2008年重庆市部分区县9类食品铅和镉污染状况的监

- 测[J]. 中国预防医学杂志, 2010, 11(4): 424.
- FAN Y. Monitoring of lead and cadmium contamination of 9 types of food in some districts or counties of Chongqing in 2008 [J]. Chinese Preventive Medicine, 2010, 11(4): 424.
- [22] 刘弘, 吴春峰, 陆屹, 等. 上海市成年人膳食中镉暴露水平评估[J]. 环境与职业医学, 2010, 27(12): 711-715.
- LIU H, WU C F, LU Y, et al. Dietary cadmium exposure assessment in Shanghai adult residents[J]. Journal of Environmental & Occupational Medicine, 2010, 27(12): 711-715.
- [23] 王超, 林少美, 张晓艺. 温州市2009年食品污染物中重金属检测分析[J]. 中国卫生检验杂志, 2010, 20(5): 1199-1200, 1222.
- WANG C, LIN S M, ZHANG X Y. Analysis of heavy metals in food pollutants in Wenzhou in 2009 [J]. Chinese Journal of Health Laboratory Technology, 2010, 20(5): 1199-1200, 1222.
- [24] 陈润阶, 莫桂姮, 李梦映, 等. 梧州市食品中铅镉污染情况调查[J]. 职业与健康, 2011, 27(19): 2206-2207.
- CHEN R J, MO G H, LI M Y, et al. Survey on lead and cadmium pollution of food in Wuzhou City [J]. Occupation and Health, 2011, 27(19): 2206-2207.
- [25] 高静. 2010年北京市通州区食品污染物监测结果分析[J]. 中国卫生检验杂志, 2011, 21(7): 1760-1762.
- GAO J. Analysis on monitoring results of food contaminants in Tongzhou district of Beijing in 2010 [J]. Chinese Journal of Health Laboratory Technology, 2011, 21(7): 1760-1762.
- [26] 王岙, 白梅, 张冠英, 等. 2001年-2008年吉林省食品中重金属污染状况监测分析[J]. 中国卫生检验杂志, 2011(8): 2027-2032.
- WANG A, BAI M, ZHANG G Y, et al. Analysis on lead and cadmium contamination in foods in Jilin province during 2001-2008 [J]. Chinese Journal of Health Laboratory Technology, 2011(8): 2027-2032.
- [27] 赵黎芳, 汤红梅, 陈建平, 等. 上海市闵行区部分食品镉污染暴露评估[J]. 中国食品卫生杂志, 2011, 23(6): 501-505.
- ZHAO L F, TANG H M, CHEN J P, et al. Assessment on the exposure of cadmium from food in Minhang district of Shanghai [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2011, 23(6): 501-505.
- [28] 宋鹏, 陈德珍. 南阳市食品中重金属污染物检测分析[J]. 公共卫生与预防医学, 2012, 23(2): 43-45.
- SONG P, CHEN D Z. Analysis of heavy metal pollution in the food of Nanyang city [J]. Journal of Public Health and Preventive Medicine, 2012, 23(2): 43-45.
- [29] 王桂安, 梁春穗, 黄琼, 等. 广东省居民主要膳食镉暴露风险的初步评估[J]. 中国食品卫生杂志, 2012, 24(4): 353-357.
- WANG G A, LIANG C S, HUANG Q, et al. Preliminary risk assessment on the dietary exposure of Cd in Guangdong residents [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2012, 24(4): 353-357.
- [30] HUANG Z, PAN X D, WU P G, et al. Health risk assessment of heavy metals in rice to the population in Zhejiang, China [J]. PLoS One, 2013, 8(9): e75007.
- [31] YUAN X P, WANG J, SHANG Y E, et al. Health risk assessment of cadmium via dietary intake by adults in China [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2014, 94(2): 373-380.
- [32] 洪华荣, 张向东, 陈剑锋, 等. 厦门市居民膳食中铅、镉暴露水平评估[J]. 卫生研究, 2014, 43(6): 1009-1012, 1017.
- HONG H R, ZHANG X D, CHEN J F, et al. Assessment of dietary exposure levels of lead and cadmium in Xiamen residents [J]. Journal of Hygiene Research, 2014, 43(6): 1009-1012, 1017.
- [33] 彭楠, 李晓辉, 王瑶, 等. 成都市居民膳食中铅镉暴露水平评估[J]. 中国初级卫生保健, 2014, 28(11): 86-88.
- PENG N, LI X H, WANG Y, et al. Assessment on the dietary exposure of lead and cadmium in Chengdu residents [J]. Chinese Primary Health Care, 2014, 28(11): 86-88.
- [34] 孙延斌, 孙婷, 董淑香, 等. 济南市居民主要膳食镉含量监测及暴露评估[J]. 中国食品卫生杂志, 2014, 26(3): 284-287.
- SUN Y B, SUN T, DONG S X, et al. Surveillance on cadmium contents and dietary exposure assessment in Jinan [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2014, 26(3): 284-287.
- [35] 谢燕湘, 郭志忠, 李兆敏, 等. 南方某市2012年市售大米镉污染状况及膳食暴露评估[J]. 海峡预防医学杂志, 2014, 20(1): 5-6, 11.
- XIE Y X, GUO Z Z, LI Z M, et al. Analysis on cadmium contamination in rice and assessment of dietary exposure of residents in a southern city in 2012 [J]. Strait Journal of Preventive Medicine, 2014, 20(1): 5-6, 11.
- [36] 赵黎芳, 王支兰, 杨胜琴, 等. 上海市某区居民粮食制品重金属铅、镉暴露评估[J]. 现代预防医学, 2014, 41(9): 1581-1584.
- ZHAO L F, WANG Z L, YANG S Q, et al. Evaluation on exposure of grains to lead and cadmium in a district of Shanghai [J]. Modern Preventive Medicine, 2014, 41(9): 1581-1584.
- [37] 蔡文华, 胡曙光, 苏祖俭, 等. 2007—2014广东省膳食中铅、镉、砷、汞元素的人群健康风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2015, 6(6): 2308-2316.
- CAI W H, HU S G, SU Z J, et al. A health assessment of lead, cadmium, arsenic and mercury in dietary in Guangdong Province during 2007 to 2014 [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2015, 6(6): 2308-2316.
- [38] 蔡文华, 胡曙光, 许秀敏. 2012—2014年广东省大米中铅镉的暴露风险评估[J]. 食品与机械, 2015, 31(4): 47-50.
- CAI W H, HU S G, XU X M. Risk assessment on exposure of lead and cadmium of rice in Guangdong residents from 2012 to 2014 [J]. Food & Machinery, 2015, 31(4): 47-50.
- [39] 洪华荣, 王娟, 陈剑锋, 等. 厦门市居民重金属膳食摄入水平评估[J]. 现代预防医学, 2015, 42(9): 1580-1584.
- HONG H R, WANG J, CHEN J F, et al. Assessment on dietary intake level of heavy metals among residents, Xiamen [J]. Modern Preventive Medicine, 2015, 42(9): 1580-1584.
- [40] 王玲莉, 刘辉, 王姝婷. 杭州市居民主要膳食镉暴露评估[J]. 中国食品卫生杂志, 2015, 27(5): 585-589.
- WANG L L, LIU H, WANG S T. Assessment on the dietary exposure of cadmium in Hangzhou residents [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2015, 27(5): 585-589.
- [41] 王彩霞, 郭蓉, 程国霞, 等. 陕西省谷物中重金属污染状况

- 及健康风险评估[J]. 卫生研究, 2016, 45(1): 35-38, 44.
- WANG C X, GUO R, CHENG G X, et al. Dietary exposure and health risk assessment of heavy metal in grains of Shaanxi Province[J]. Journal of Hygiene Research, 2016, 45(1): 35-38, 44.
- [42] 樊伟, 王晶, 陈理. 绍兴地区不同人群铅镉汞膳食暴露评估[J]. 中国食品卫生杂志, 2016, 28(4): 535-540.
- FAN W, WANG J, CHEN L. Assessment on the dietary exposure of lead, cadmium and total mercury in different populations in Shaoxing[J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2016, 28(4): 535-540.
- [43] 蒋立新, 杨梅, 李玥, 等. 深圳居民膳食中镉暴露水平评估[J]. 公共卫生与预防医学, 2016, 27(2): 74-77.
- JIANG L X, YANG M, LI Y, et al. Assessment of dietary exposure levels of cadmium in Shenzhen residents[J]. Journal of Public Health and Preventive Medicine, 2016, 27(2): 74-77.
- [44] 林祥田, 罗贤标, 冀慧玲. 连云港市食品和生活饮用水中镉的调查结果及其风险评估[J]. 中国食品卫生杂志, 2016, 28(3): 389-391.
- LIN X T, LUO X B, JI H L. Monitoring results and risk assessment of cadmium from food and drinking water in Lianyungang city[J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2016, 28(3): 389-391.
- [45] 罗贤如, 黄薇, 张锦周, 等. 深圳市居民铅镉膳食摄入水平评估[J]. 中国热带医学, 2016, 16(12): 1204-1207.
- LUO X R, HUANG W, ZHANG J Z, et al. Assessment on dietary exposure of lead and cadmium of residents in Shenzhen city[J]. China Tropical Medicine, 2016, 16(12): 1204-1207.
- [46] 张秀芹. 青岛市2014年食品中化学污染物及有害因素的监测及分析[D]. 济南: 山东大学, 2016.
- ZHANG X Q. Monitoring and analysis of chemical pollutants and harmful factors in foods of Qingdao in 2014 [D]. Ji'nan: Shandong University, 2016.
- [47] SONG Y, WANG Y, MAO W F, et al. Dietary cadmium exposure assessment among the Chinese population[J]. PLoS One, 2017, 12(5): e0177978.
- [48] 冯月明, 郑德生, 李建超, 等. 北京市密云区居民膳食镉暴露风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2017, 8(1): 355-359.
- FENG Y M, ZHENG D S, LI J C, et al. Risk assessment of residents' dietary exposure of cadmium in Miyun district of Beijing[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2017, 8(1): 355-359.
- [49] 金庆中, 赵耀, 吴国华, 等. 北京地区居民镉摄入量评估[J]. 首都公共卫生, 2017, 11(5): 243-245.
- JIN Q Z, ZHAO Y, WU G H, et al. Dietary intake of Cadmium on Beijing population [J]. Capital Journal of Public Health, 2017, 11(5): 243-245.
- [50] 张亚非. 江苏省人群膳食镉慢性暴露评估模型构建及验证研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.
- ZHANG Y F. Validation of long-term dietary cadmium exposure assessment model in Jiangsu province [D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [51] 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.
- WANG Y M, ZHOU H, YOU X Y, et al. Preliminary risk assessment on residents' dietary exposure of cadmium in Jiangxi [J]. Modern Preventive Medicine, 2018, 45(21): 3887-3890.
- [52] 冯哲伟, 王峥, 杨海斌, 等. 杭州市下城区居民主要膳食中镉暴露评估[J]. 中国食品卫生杂志, 2019, 31(2): 162-166.
- FENG Z W, WANG Z, YANG H B, et al. Assessment on the dietary exposure of cadmium in residents of Xiacheng District Hangzhou City [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2019, 31(2): 162-166.
- [53] 杨洋. 2013-2016年六安市主要膳食食品中重金属铅、镉、汞、砷的暴露量及风险评估[D]. 合肥: 安徽医科大学, 2019.
- YANG Y. Exposure and Risk Assessment of Lead, Cadmium, Mercury and Arsenic in Major Dietary Foods in Lu'an City from 2013 to 2016 [D]. Hefei: Anhui Medical University, 2019.
- [54] 范云燕, 欧嵩凤, 张海霞, 等. 南宁市大米中镉污染现状及膳食暴露研究[J]. 中国食品卫生杂志, 2020, 32(3): 276-279.
- FAN Y Y, OU S F, ZHANG H X, et al. Cadmium contamination and dietary exposure assessment in rice in Nanning city [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2020, 32(3): 276-279.
- [55] 覃焱, 韦燕燕, 顾明华. 中国市售大米重金属含量及健康风险评估[J]. 食品工业, 2020, 41(11): 332-335.
- QIN Y, WEI Y Y, GU M H. The heavy metal content monitoring and dietary risk assessment of commercial rice in China [J]. The Food Industry, 2020, 41(11): 332-335.
- [56] SHAHRIAR S, RAHMAN M M, NAIDU R. Geographical variation of cadmium in commercial rice brands in Bangladesh: Human health risk assessment [J]. Science of the Total Environment, 2020, 716: 137049.
- [57] BOON P E, TE BIESEBEEK J D, SIOEN I, et al. Long-term dietary exposure to lead in young European children: Comparing a pan-European approach with a national exposure assessment [J]. Food Additives & Contaminants Part A, Chemistry, Analysis, Control, Exposure & Risk Assessment, 2012, 29(11): 1701-1715.
- [58] 刘兆平. 我国食品安全风险评估的主要挑战[J]. 中国食品卫生杂志, 2018, 30(4): 341-345.
- LIU Z P. Challenges and recommendations for future development of food safety risk assessment in China [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2018, 30(4): 341-345.