

## 风险评估

## 基于北京市某城区和张家口崇礼地区食品调查数据的镉暴露评估

韩高超<sup>1,2</sup>, 敬海明<sup>1,2</sup>, 韩逸陶<sup>3</sup>, 李楠<sup>4</sup>, 张磊<sup>4</sup>, 宋雁<sup>4</sup>, 罗菲<sup>3</sup>, 侯岩<sup>3</sup>, 张国艳<sup>1,2</sup>, 李子南<sup>1,2</sup>, 张文静<sup>1</sup>, 齐丽娟<sup>1</sup>,  
杜宏举<sup>1</sup>, 聂燕敏<sup>1</sup>, 谭壮生<sup>1</sup>, 宁钧宇<sup>1,2</sup>, 高珊<sup>1</sup>, 娄云<sup>1</sup>, 李国君<sup>1,2</sup>

- (1. 北京市疾病预防控制中心, 食物中毒诊断溯源技术北京市重点实验室, 北京 100013;  
2. 首都医科大学公共卫生学院, 北京 100069; 3. 国家粮食和物资储备局科学研究院, 北京 100037;  
4. 国家食品安全风险评估中心, 北京 100022)

**摘要:**目的 预先评估北京冬奥会周边地区主要食品中镉(Cd)暴露水平及可能存在的健康风险, 为2022年北京冬奥会及周边居民食品安全风险评估和安全保障提供部分参考依据。方法 在对镉进行危害评估和限量标准分析的基础上, 采用2019—2020年北京市某城区和张家口崇礼地区现场采样调查数据, 结合2018年北京市主要食品消费量调查数据, 运用点评估的方法, 对镉的膳食暴露风险进行评估。结果 采集的各类食品中镉总体平均含量为0.0106 mg/kg, 总体超标率为0.47%。北京市居民通过摄入主要食品的镉平均暴露量为5.92  $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{BW}\cdot\text{m})$ , 占粮农组织/世界卫生组织食品添加剂联合专家委员会(JECFA)推荐的可耐受月摄入量(PTMI)25  $\mu\text{g}/\text{kg}\cdot\text{BW}$ 的23.66%, 且粮谷和蔬菜类食品是本次调查膳食镉的主要暴露来源。按其现行GB 2762—2017《食品安全国家标准 食品中污染物限量》中镉的限量标准, 除了这两类食品外, 其余食品中的镉理论暴露量均未超过PTMI。蔬菜类和粮谷类的推算关注阈值(LOC)为0.172和0.199 mg/kg, 略小于国标规定的最大限量值。结论 冬奥会及北京市居民主要食品镉暴露预期总体处于安全水平, 健康风险较低。

**关键词:** 冬奥会; 镉; 食品暴露; 风险评估

中图分类号: R155

文献标识码: A

文章编号: 1004-8456(2022)04-0780-06

DOI: 10.13590/j.cjfh.2022.04.023

### Cadmium exposure assessment based on food survey data in an urban area of Beijing and Chongli area of Zhangjiakou

HAN Gaochao<sup>1,2</sup>, JING Haiming<sup>1,2</sup>, HAN Yitao<sup>3</sup>, LI Nan<sup>4</sup>, ZHANG Lei<sup>4</sup>, SONG Yan<sup>4</sup>, LUO Fei<sup>3</sup>,  
HOU Yan<sup>3</sup>, ZHANG Guoyan<sup>1,2</sup>, LI Zinan<sup>1,2</sup>, ZHANG Wenjing<sup>1</sup>, QI Lijuan<sup>1</sup>, DU Hongju<sup>1</sup>,  
NIE Yanmin<sup>1</sup>, TAN Zhuangsheng<sup>1</sup>, NING Junyu<sup>1,2</sup>, GAO Shan<sup>1</sup>, LOU Yun<sup>1</sup>, LI Guojun<sup>1,2</sup>

- (1. Beijing Center for Disease Prevention and Control, Beijing Key Laboratory of Diagnostic and Traceability Technologies for Food Poisoning, Beijing 100013, China;  
2. School of Public Health, Capital Medical University, Beijing 100069, China;  
3. Academy of National Food and Strategic Reserves Administration, Beijing 100037, China;  
4. China National Center for Food Safety Risk Assessment, Beijing 100022, China)

**Abstract: Objective** To provide a reference for food safety risk assessment and safety assurance for the Winter Olympics and Beijing residents, the exposure level and possible health risks of cadmium (Cd) in main foods in the surrounding areas of the 2022 Beijing Winter Olympics were evaluated. **Methods** Based on the hazard assessment and limit standard analysis of cadmium, the point assessment method was used to assess the dietary exposure risk of cadmium. The 2019 to 2020 on-site sampling survey data of an urban area of Beijing and Zhangjiakou Chongli area and the 2018 Beijing main food consumption survey data were used in this pre-assessment. **Results** The cadmium provisional tolerated monthly intake (PTMI) established by joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives (JECFA) was 25  $\mu\text{g}/\text{kg}\cdot\text{BW}$ . The overall average content of cadmium in various foods was 0.0106 mg/kg, and the overall rate of exceeding the standard was 0.47%. The average exposure of Beijing residents to cadmium through the main food was 5.92  $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{BW}\cdot\text{m})$ ,

收稿日期: 2021-12-26

基金项目: 国家重点研发计划课题(2018YFC1602703, 2018YFC1603102); 北京市科技计划课题(Z201100008920005)

作者简介: 韩高超 男 硕士研究生 研究方向为神经毒理学、食品毒理学安全性评价及健康风险评估 E-mail: hgcta8099@163.com

通信作者: 李国君 女 研究员 研究方向为神经毒理学与毒理蛋白质组学、模式生物毒理学、毒性安全性评价与健康风险评估

E-mail: ligj@bjcdc.org

accounting for 23.66% of the JECFA-recommended provisional tolerable monthly intake (PTMI) of 25  $\mu\text{g}/\text{kg}\cdot\text{BW}$ . In addition, cereals and vegetable foods were the main sources of dietary cadmium exposure. According to the current limit of cadmium (LOC) in GB 2762—2017 National Food Safety Standards Limits of contaminants in food, except for these two categories of food, the theoretical exposure to cadmium in the rest of the food did not exceed the PTMI. The estimated LOC for vegetables, grains and cereals is 0.172 and 0.199 mg/kg, both of which were less than the maximum limit value stipulated by the national standard. **Conclusion** The main food cadmium exposure of Winter Olympics and Beijing residents is generally at a safe level, and the health risk is relatively low.

**Key words:** Winter Olympics; cadmium; exposure assessment; risk assessment

镉(Cadmium, Cd)是一种自然存在的金属,人群接触镉的方式主要有吸入受污染的空气、吸烟、摄入受污染的食物(如肉类、蔬菜和大米)和水。2014年的《全国土壤状况调查公报》表明,无机污染物镉在全国耕地土壤的点位超标率达到7%,是污染物中超标最高的元素。生活中谷物和蔬菜类食品是主要的膳食镉摄入来源。在非吸烟人群中,镉暴露量90%来源于膳食,另外10%来源于空气吸入及饮水<sup>[1]</sup>。镉可以通过消化道、呼吸道、皮肤等进入体内<sup>[2]</sup>,而环境中的镉常通过污染食物和水后到达人体肠道<sup>[3]</sup>,长期过量摄入对人体健康有一定危害。镉在体内的生物利用率受食品镉含量、个体和其他金属离子含量等多种因素的影响<sup>[4-5]</sup>。机体内镉排泄的主要途径是通过粪便和尿液排泄,且在泌乳期还可通过唾液和乳液排泄<sup>[6]</sup>。镉在肝脏和肾脏中各有约30%的沉积物,其余分布在全身,清除半衰期为25年<sup>[7]</sup>。国际癌症研究机构(International Agency for Research on Cancer, IARC)将镉归为确定的人类致癌物(I类,主要是吸入途径)。我国GB 2762—2017《食品安全国家标准 食品中污染物限量》中规定了稻谷、大米、叶类蔬菜、新鲜食用菌和豆类等食品中镉限量不得超过0.2 mg/kg,新鲜果蔬等食品中镉限量不得超过0.05 mg/kg<sup>[8]</sup>。前期本课题组初步的危害评估结果提示,镉导致机体损害的重要靶器官是肾脏,镉中毒主要引起肾小管功能障碍和不同程度的肾损伤,而长期接触镉还可对机体神经系统、生殖发育系统、循环系统和免疫系统造成不利影响<sup>[9-16]</sup>。因此,基于食品安全与人群健康的考虑,尤其是2022冬奥会食品安全保障的需求,本研究以镉的危害识别、危害特征描述为基础,预先评估冬奥会周边地区及北京市居民主要食品中镉暴露水平及可能存在的健康风险。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

#### 1.1.1 食品样本选择及来源

食品中镉含量数据由国家粮食和物资储备局科学研究院以及国家食品安全风险评估中心提供,为2019—2020年北京周边地区食品供应地现场采

样调查数据。检测的食品类别主要包括水果类、蔬菜类、粮谷类、豆类、猪等肉和禽肉等6类食品类别,共计样品212份。采样时兼顾污染重、种类广、食用频、获得易、检测简、非季节性等多种因素。

在张家口崇礼地区随机抽选1个农贸市场和2个超市采样,采集48份蔬菜样品(农贸市场35份,超市13份),16份水果样品(农贸市场10份,超市6份),23份粮食样品(农贸市场12份,超市11份),13份豆类样品(农贸市场8份,超市5份)。在北京某城区某超市采集4份蔬菜、4份水果和8份粮谷类样品。在张家口崇礼地区随机抽选的1个农贸市场、2个超市和1家街边肉铺采样,采集96份肉及肉制品(猪等肉和禽肉类),样品均为散装的冷鲜或冷冻生肉以及熟肉制品。

#### 1.1.2 采样方法

在农贸市场和超市不同的货位上随机挑选样品,每份样品采集购买约1~2 kg。农贸市场以每个摊位为单位采样,超市以每个货位为单位采样,为避免对同一来源的样品重复采样,每个摊位/货位每次的采样量不超过4份,每份样品采集不少于500 g。冷链运输至实验室4℃保存并于24 h内进行检测,或置于-20℃长期保存。

#### 1.1.3 食品中镉含量检测方法

食品中镉含量检测按照GB 5000.268—2016《食品安全国家标准 食品中多元素的测定》<sup>[17]</sup>的方法统一进行,以电感耦合等离子体质谱法为主,检出限为0.002 mg/kg,定量限为0.005 mg/kg,符合评估需求。依据GB 2762—2017《食品安全国家标准 食品中污染物限量》<sup>[8]</sup>对食品中镉超标情况进行判定。

#### 1.1.4 质量控制

Cd样品前处理和检测方法采用国标方法;检测中需定量的仪器设备均经过检定或校准;定量分析时,每20个样品采用标准物质[GBW(E) 100348和GSB 04-1767—2004]进行质控,以保证检测数据的准确性、稳定性和可比性。

## 1.2 方法

### 1.2.1 食物消费量数据来源

食物消费量数据源自北京市统计局2019年2月20日发布的人民生活年度统计资料发布计划中的

2018年北京全市居民家庭主要食品人均消费量调查。

### 1.2.2 镉暴露评估方法

镉暴露评估分为食品中镉限量标准的理论评估和食品中镉实际含量的暴露评估。暴露评估以2018年北京全市居民家庭主要食品人均消费量数据为基础,结合水果类、蔬菜类、粮谷类、豆类、猪等肉和禽肉等主要食品镉含量数据均值,采用点评估的方法,计算标准人每类食品每月每千克体质量的平均摄入量,每类食品镉摄入量相加得标准人每月每千克体质量的总摄入量。计算公式为:

$$Exp = \frac{F \times C}{W} \times 30$$

$$Exp_{总} = Exp1 + Exp2 + \dots + Exp6$$

式中: $Exp$ 为北京市居民每类食品每月每公斤体质量的平均摄入量, $Exp_{总}$ 为每月每公斤体质量的总摄入量,单位均为 $mg/(kg \cdot BW \cdot m)$ ;  $F$ 为北京市居民某种食物的平均消费量,单位为 $g/d$ ;  $C$ 为某种食物中镉的平均含量,单位为 $mg/kg$ ;  $W$ 为目标人群体质量,单位为 $kg$ (采用标准人,体质量为 $60 kg$ );  $30$ 为平均每月的天数。

本次评估采用粮农组织/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)制定的可耐受月摄入量(Provisional tolerated monthly intake, PTMI)对北京市居民膳食中镉暴露的潜在危害进行风险评估。PTMI评估方法:先计算目标人群每日镉暴露量再折算出每月镉暴露量,用得到的每月镉暴露量与原定PTMI( $25 \mu g/kg \cdot BW$ )进行比较。如暴露量超过PTMI则提示风险较高。

### 1.2.3 不同食品贡献率

不同食品贡献率计算公式:

$$\text{食品贡献率}(\%) = \frac{\text{某类食品镉的平均暴露量}}{\text{各类食品膳食镉暴露量之和}} \times 100\%$$

### 1.2.4 各食品镉关注阈值(Limit of cadmium, LOC)的推算

分别假设把各类食品当做居民膳食镉暴露的

唯一来源,基于镉的PTMI和北京市居民各主要食品实际消费水平以及标准体质量( $60 kg$ ),对各食品镉的LOC进行推算。计算公式为:

$$LOC = \frac{25 \times \text{体质量}}{\text{某食品平均消费量} \times 30}$$

式中: $LOC$ 为某食品镉关注阈值,单位为 $mg/kg$ ;  $25$ 为每月镉的PTMI,单位为 $\mu g/kg \cdot BW$ ;体质量,单位为 $kg$ (采用标准人,体质量为 $60 kg$ );某食品平均消费量,单位为 $g/d$ ;  $30$ 为平均每月的天数。

### 1.3 统计学分析

依据WHO全球环境监测系统/食品污染物监测与评估规划(GEMS/FOOD)第2次会议提出的“食品中低水平污染物可信评价”原则对未检出数据进行处理<sup>[18]</sup>。由于本研究未检出数据的比例小于 $60\%$ ,未检出的数据以检出限值的二分之一( $1/2 LOD$ )替代,本次评估对未检出的数据赋予 $1/2 LOD$ 值进行统计。使用SPSS 20.0软件进行数据的统计分析。

## 2 结果

### 2.1 不同食品类别中镉含量

各类食品镉总体平均含量为 $0.0106 mg/kg$ ,单一类别中镉平均含量最高的仍然为粮谷类( $0.0348 mg/kg$ ),且其检出值最高可达 $0.2196 mg/kg$ (花生)。水果类食品检出率最低,为 $10\%$ ,豆类食品检出率最高,为 $100\%$ (表1)。基于我国现行国标GB 2762—2017所规定的限量标准,只有蔬菜类食品(52例)中有1例检出超标,故各类食品总体超标率为 $0.47\%$ ( $1/212$ )。

### 2.2 北京地区居民不同类别食品消费量

由表2可见,北京全人群主要食品平均每日消费量中蔬菜类最高为 $291.23 g/d$ ,且消费量超过粮谷类,而日均消费量均超过 $200 g/d$ 的食品有蔬菜类、粮谷类和水果类三种。

### 2.3 镉暴露评估

#### 2.3.1 基于各类食品中镉限量标准的理论评估

以我国现行的国标GB 2762—2017所规定的

表1 北京冬奥周边地区不同食品类别镉检测结果

Table 1 Cadmium test results of different food categories in the surrounding areas of Beijing

食品类别	样品数量	检出率/%	超标率/%	镉含量/(mg/kg)				检出范围
				$\bar{x}$	P50	P90	P95	
水果类	20	10.00	0.00	0.0016	0.0010	0.0021	0.0110	ND~0.0115
蔬菜类	52	63.46	1.92	0.0076	0.0029	0.0199	0.0278	ND~0.0771
粮谷类	31	38.71	0.00	0.0348	0.0010	0.1585	0.1862	ND~0.2196 <sup>△</sup>
豆类	13	100.00	0.00	0.0103	0.0095	0.0182	—	ND~0.0210
猪等肉	31	22.58	0.00	0.0040	0.0010	0.0154	0.0171	ND~0.0184
禽肉	65	18.46	0.00	0.0052	0.0010	0.0216	0.0318	ND~0.0365

注:ND表示未检出;—表示数值不存在;△表示测定的31个粮谷类样品中,包括25个稻谷、糙米、大米等样品和6个花生样品,其相应的国标限量值分别为 $0.2 mg/kg$ 和 $0.5 mg/kg$

表2 2018年北京全市居民家庭主要食品人均消费量(标准人)  
Table 2 Per capita consumption of main foods in households in Beijing in 2018 (standard person)

食品类别	平均消费量/(kg/y)	平均消费量/(g/d)
水果类	74.70	204.38
蔬菜类	106.30	291.23
粮谷类	91.90	251.78
豆类	7.60	20.82
猪等肉	22.20	60.82
禽肉	5.80	15.89

食品镉限量标准,结合表2消费量数据和国标规定的各类食品镉限量数据,每月以30d计,计算出北京市全人群每月每公斤体质量通过主要食品的理论暴露量,具体结果见表3。以主要食品镉含量最大限量值计,北京全人群平均每月通过主要食品暴露的镉,理论评估值中蔬菜类最高,可达29.123  $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{BW}\cdot\text{m})$ ,占JECFA推荐的镉每月可耐受摄入量[25  $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{BW}\cdot\text{m})$ ]的116.49%,其次为粮谷类,其理论评估值为25.178  $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{BW}\cdot\text{m})$ ,占PTMI的100.71%。其余食品的理论评估值均为未超出PTMI。

### 2.3.2 基于各类食品中镉实际含量的暴露评估

采用各食品镉的含量平均值和消费量平均值,估计北京全人群通过暴露主要食品导致的镉暴露量。

表4 基于主要消费食品镉含量的实际暴露评估(标准人)

Table 4 Actual exposure assessment based on the cadmium content of the main consumer food (standard person)

食品类别	平均消费量/(g/d)	每月暴露量/ $(\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{BW}\cdot\text{m}))$			
		$\bar{x}$	P50	P90	P95
水果类	204.38	0.162 0	0.102 2	0.212 6	1.127 7
蔬菜类	291.23	1.104 2	0.420 7	2.891 5	4.055 2
粮谷类	251.78	4.377 1	0.125 9	19.954 8	23.443 2
豆类	20.82	0.107 7	0.099 2	0.189 2	—
猪等肉	60.82	0.122 7	0.030 4	0.468 6	0.518 5
禽肉	15.89	0.041 3	0.007 9	0.171 4	0.252 9
总计	844.92	5.915 0	0.786 3	23.888 1	—

### 2.3.3 推算全膳食镉暴露量及食物贡献率

针对纳入本次评估的各类食品对北京全人群膳食镉暴露的贡献率分析表明,镉暴露贡献率最高的食品为粮谷类(71.85%),其余食品镉暴露贡献率依次为蔬菜类(20.21%)、水果类(2.96%)、猪等肉(2.25%)、豆类(1.97%)和禽肉(0.76%)(图1)。

### 2.4 各食品LOC推算结果

由表5可知,在调查的6类食品中,有4类食品的推算LOC均大于各自国标规定的最大限量,其中水果类和猪等肉的推算LOC介于0.2~1 mg/kg之间,豆类和禽肉的推算LOC介于2.4~3.2 mg/kg之间。但是,有2类食品的推算LOC均小于各自国标规定的最大限量(0.2 mg/kg),分别是蔬菜类

表3 基于国标GB 2762—2017中镉限量值的每月镉理论暴露评估(标准人)

Table 3 Theoretical exposure assessment based on the maximum limit value of cadmium in the national standard (standard person)

食品类别	食品中镉限量 (以Cd计,mg/kg)	$\bar{x}$ / ( $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{BW}\cdot\text{m})$ )	占PTMI的 比例/%
水果类	0.05	5.1095	20.44
蔬菜类	0.20	29.1230	116.49
粮谷类	0.20	25.1780	100.71
豆类	0.20	2.0820	8.33
猪等肉	0.10	3.0410	12.16
禽肉	0.10	0.7945	3.18
总计	0.85	65.3280	261.31

表4结果表明,全人群通过主要食品镉平均暴露量为5.915 0  $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{BW}\cdot\text{m})$ ,占JECFA推荐的PTMI [25  $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{BW}\cdot\text{m})$ ]的23.66%。当主要消费食品的镉含量为P90时,全人群镉平均暴露量为23.888 1  $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{BW}\cdot\text{m})$ ,占PTMI的95.56%。就不同食品具体暴露情况而言,全人群粮谷类食品镉平均暴露量最高为4.377 1  $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{BW}\cdot\text{m})$ ,占PTMI的17.51%,其余暴露水平较高的主要消费食品为蔬菜类[1.104 2  $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{BW}\cdot\text{m})$ ]。食品镉暴露平均暴露量较低的食品依次为水果类[0.162 0  $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{BW}\cdot\text{m})$ ]、猪等肉[0.122 7  $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{BW}\cdot\text{m})$ ]、豆类[0.107 7  $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{BW}\cdot\text{m})$ ]和禽肉[0.041 3  $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{BW}\cdot\text{m})$ ]。

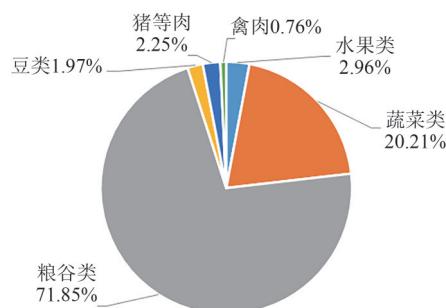


图1 各类食品对膳食镉暴露的贡献率  
Figure 1 Contribution rate of various foods to dietary cadmium exposure

(0.172 mg/kg)和粮谷类(0.199 mg/kg)。该结果可为今后相关国标限量值的修订提供部分基础数据依据。

表5 基于PTMI和主要食品消费量对各食品镉的LOC推算  
Table 5 Calculation of LOC of cadmium in each food based on PTMI and main food consumption

食品类别	平均消费量/ (g/d)	LOC/ (mg/kg)	此类食品国标最大限量/ (以Cd计,mg/kg)
水果类	204.38	0.245	0.05
蔬菜类	291.23	0.172	0.20
粮谷类	251.78	0.199	0.20
豆类	20.82	2.402	0.20
猪等肉	60.82	0.822	0.10
禽肉	15.89	3.147	0.10

### 3 讨论

本研究采用2019—2020北京冬奥会周边地区食品供应地主要食品中镉的含量水平的数据,初步评估了冬奥会周边主要食品中镉暴露水平,为了解北京市主要食品中镉的本底含量以及指导合理膳食提供基础数据。研究表明,各类食品镉总体平均含量为0.0106 mg/kg,单一类别中镉的含量差别较大,总体来说粮谷类和豆类食品镉含量较高,且明显高于其他四类食品,有研究<sup>[19-21]</sup>也表明粮谷类食品镉含量较高,且为膳食镉摄入主要来源。此外,基于国标GB 2762—2017所规定的限量标准,仅蔬菜类食品中检出超标样本。

以现行的国标GB 2762—2017<sup>[8]</sup>所规定的食品镉限量标准进行理论暴露量估计,北京全人群平均每月蔬菜类和粮谷类食品镉理论暴露量均已超过PTMI。基于北京市主要食品膳食消费量和抽检食品中镉实际污染水平开展确定性暴露评估,结果显示,北京市全人群通过主要食品镉平均暴露量为每月每公斤体重5.91 μg,占JECFA推荐的PTMI(25 μg/kg·BW)的23.66%。当主要食品镉含量为P95时,全人群镉平均暴露量为每月23.89 μg/(kg·BW·m),占PTMI的95.56%。粮谷类和蔬菜类食品镉平均暴露量占总暴露量的比例较高,这与卿颖等<sup>[22]</sup>的结果一致,但上海市居民除粮谷类和蔬菜类镉暴露占比较高外,水产类也很高;本结果与刘思洁等<sup>[23]</sup>的结果不完全一致,部分原因可能是吉林省居民膳食中肉类食品消耗量较多,导致肉类食品镉暴露占比较高。以上可知,粮谷类和蔬菜类食品也是北京市人群膳食镉的主要暴露来源,北京市全人群通过主要食品镉平均暴露量低于PTMI,健康风险较低,与曾立爱等<sup>[19]</sup>的结果一致,该研究与本研究均重点关注成人(标准人)群体;本结果与蒋玉艳等<sup>[20]</sup>和欧嵩凤等<sup>[21]</sup>的结果不完全一致,后二者分别以广西和南宁为研究对象,属于我国西南方,土壤镉含量较高,且研究侧重于高暴露人群,因此可能风险较高。有研究结果也表明,北京市密云区居民和顺义区居民膳食镉暴露处于安全水平,其健康风险较低<sup>[24-25]</sup>。此外,不同食

品镉的LOC推算结果提示,有4类食品的推算LOC均大于各自国标规定的最大限量,但是蔬菜类和粮谷类的LOC为0.172和0.199 mg/kg,略小于国标GB 2762—2017规定的限量值,该结果可为今后相关国标限量值的修订提供部分基础数据依据。

由于数据和资料有限,本评估具有以下不确定性:本次评估所用的各类食品的消费量为2018年北京市居民膳食消费量数据,随着时间的推移,居民的饮食结构和摄入量可能会发生变化;高暴露量计算采用高污染食品,可能对平均消费水平人群的长期暴露产生高估,但未反映高食物消费量人群的暴露水平;本次评估主要基于北京周边地区食品供应地2019~2020年被抽检到的食品镉含量数据,还有部分食品类别未纳入,食品样本的来源和数量有限,据此推算的分析结果可能存在一定的不确定性。在今后的研究中需搜集最新、最全的膳食消费量数据和食品镉含量检测数据,以开展更全面、准确的北京市居民膳食镉暴露风险评估。

综上,冬奥会及北京市居民主要食品镉暴露总体处于安全水平,健康风险较低。反推LOC值结果为今后相关国标限量值的修订提供部分基础数据。本研究初步为冬奥会及北京市居民食品安全风险评估和安全保障提供部分参考依据。

### 参考文献

- [1] VAHTER M, BERGLUND M, SLORACH S, et al. Methods for integrated exposure monitoring of lead and cadmium [J]. *Environmental Research*, 1991, 56(1): 78-89.
- [2] 叶煦亭, 沙继宏, 周雍, 等. 镉离子诱发的氧自由基对肝细胞损伤及钙离子分布的影响[J]. *中华预防医学杂志*, 2000, 34(4): 256.  
YE X T, SHA J H, ZHOU Y, et al. Gelizi youfa de yangziyouji dui ganxibao sunshang ji gailizi fenbu de yingxiang [J]. *Chinese Journal of Preventive Medicine*, 2000, 34(4): 256.
- [3] 邓新, 温璐璐, 迟鑫妹. 镉对人体健康危害及防治研究进展[J]. *中国医疗前沿*, 2010, 5(10): 4-5.  
DENG X, WEN L L, CHI X S. Cadmium hazards to human health and the prevention and treatment research New [J]. *National Medical Frontiers of China*, 2010, 5(10): 4-5.
- [4] REEVES P G, CHANEY R L. Bioavailability as an issue in risk assessment and management of food cadmium: A review [J]. *Science of the Total Environment*, 2008, 398(1-3): 13-19.
- [5] Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). Toxicological profile for Arsenic [M]. Atlanta, GA: U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, 2007.
- [6] 曹宇静, 吴丰昌. 淡水中重金属镉的水质基准制定[J]. *安徽农业科学*, 2010, 38(3): 1378-1380, 1437.  
CAO Y J, WU F C. Establishment of water quality criteria for cadmium in freshwater [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2010, 38(3): 1378-1380, 1437.

- [ 7 ] 李国基,刘明星,张首临,等.金属离子对牙鲆仔鱼的毒性影响[J].海洋学报,1996,18(6):34-39.  
LI G J, LIU M X, ZHANG S L, et al. Jinshu lizi dui yapingzaiyu de duxing yingxiang[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1996, 18(6): 34-39.
- [ 8 ] 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.  
National Health and Family Planning Commission, National Food and Drug Administration. National food safety standard-Maximum levels of contaminants in foods: GB 2762—2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [ 9 ] FASANYA-ODEWUMI C, LATINWO L M, IKEDIOBI C O, et al. The genotoxicity and cytotoxicity of dermally-administered cadmium: Effects of dermal cadmium administration [J]. International Journal of Molecular Medicine, 1998, 1(6): 1001-1006.
- [ 10 ] HANSON M L, HOLÁSKOVÁ I, ELLIOTT M, et al. Prenatal cadmium exposure alters postnatal immune cell development and function [J]. Toxicology and Applied Pharmacology, 2012, 261(2): 196-203.
- [ 11 ] YUAN G P, DAI S J, YIN Z Q, et al. Toxicological assessment of combined lead and cadmium: Acute and sub-chronic toxicity study in rats [J]. Food and Chemical Toxicology, 2014, 65: 260-268.
- [ 12 ] NINKOV M, POPOV ALEKSANDROV A, DEMENESKU J, et al. Toxicity of oral cadmium intake: Impact on gut immunity[J]. Toxicology Letters, 2015, 237(2): 89-99.
- [ 13 ] 马合红,张俊峰,杨双燕,等.镉对孕鼠生殖毒性及胎鼠发育毒性的作用研究[J].广西医科大学学报,2016,33(3):405-408.  
MA H H, ZHANG J F, YANG S Y, et al. Research on the reproductive and developmental toxicities of cadmium in pregnant rats[J]. Journal of Guangxi Medical University, 2016, 33(3): 405-408.
- [ 14 ] 刘洋,王兰,孙敏.慢性镉暴露对斑马鱼卵巢组织的氧化损伤和子代发育的母源影响[J].生物技术通讯,2017,28(3):301-307.  
LIU Y, WANG L, SUN M. Oxidative damage on ovary of mature zebrafish and maternal toxicity effects on their embryos after chronic cadmium exposure[J]. Letters in Biotechnology, 2017, 28(3): 301-307.
- [ 15 ] 王乐乐.硒对镉致大鼠肾病理损伤的影响及毒性机制的初步研究[D].西安:第四军医大学,2017.  
WANG L L. Preliminary study of effects of selenium on renal pathological damage induced by cadmium and their toxic mechanism in rats [D]. Xi'an: The Fourth Military Medical University, 2017.
- [ 16 ] BATOOL Z, AGHA F, TABASSUM S, et al. Prevention of cadmium-induced neurotoxicity in rats by essential nutrients present in nuts[J]. Acta Neurobiologiae Experimentalis, 2019, 79(2): 169-183.
- [ 17 ] 国家卫生和计划生育委员会.食品安全国家标准 食品中镉的测定:GB 5009.15—2014[S].北京:中国标准出版社,2015.  
National Health and Family Planning Commission. National food safety standard-Determination of cadmium in foods: GB 5009.15—2014[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015.
- [ 18 ] FUJITA Y, EL BELBASI H I, MIN K S, et al. Fate of cadmium bound to phytochelatin in rats[J]. Research Communications in Chemical Pathology and Pharmacology, 1993, 82(3): 357-365.
- [ 19 ] 曾立爱,刘成伟,周鸿,等.2016年江西省成人主要膳食中镉暴露水平评估[J].卫生研究,2020,49(5):836-839.  
ZENG L A, LIU C W, ZHOU H, et al. Dietary exposure assessment of cadmium of adults in Jiangxi province in 2016[J]. Journal of Hygiene Research, 2020, 49(5): 836-839.
- [ 20 ] 蒋玉艳,马宁,蒙浩洋,等.广西居民重金属镉膳食摄入水平及其健康风险评估[J].中国食品卫生杂志,2021,33(2):191-195.  
JIANG Y Y, MA N, MENG H Y, et al. Risk assessment on the dietary exposure of cadmium in Guangxi residents [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2021, 33(2): 191-195.
- [ 21 ] 欧嵩凤,范云燕,唐琼,等.南宁市膳食镉污染现状及健康风险评估[J].职业与健康,2021,37(9):1193-1196.  
OU S F, FAN Y Y, TANG Q, et al. Cadmium contamination in foods and health risk assessment in Nanning City [J]. Occupation and Health, 2021, 37(9): 1193-1196.
- [ 22 ] 卿颖,杨家齐,何更生.上海市居民镉内外暴露水平及健康风险评估[C]//营养研究与临床实践:第十四届全国营养科学大会暨第十一届亚太临床营养大会、第二届全球华人营养科学家大会,2019:547-548.  
QIN Y, YANG J Q, HE G S. Shanghai shi jumin ge neiwai baolushuiping ji jiankang fengxian pinggu[C] // Yinyang yanjiu yu linchuang shijian: di 14 jie quanguo yingyang kexue dahui ji di 11 jie yatai linchuang yingyang dahui di 2 jie quanqiu huaren yingyang kexuejia dahui, 2019: 547-548.
- [ 23 ] 刘思洁,白光大,王慧,等.吉林省居民主要膳食镉暴露风险评估[J].现代预防医学,2018,45(17):3111-3113,3117.  
LIU S J, BAI G D, WANG H, et al. Risk assessment of major dietary cadmium exposure for the residents, Jilin [J]. Modern Preventive Medicine, 2018, 45(17): 3111-3113, 3117.
- [ 24 ] 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.
- [ 25 ] 高彭,陈东宛,吕金昌,等.北京市顺义区居民膳食镉暴露风险评估[J].现代预防医学,2016,43(19):3505-3508.  
GAO P, CHEN D W, LV J C, et al. Risk assessment on residents' dietary exposure of cadmium in Shunyi District, Beijing [J]. Modern Preventive Medicine, 2016, 43(19): 3505-3508.