

## 风险评估

## 无锡市谷物重金属污染状况及健康风险评估

刘萍,任梁,周伟杰,钱红丹

(无锡市疾病预防控制中心(南京医科大学附属无锡疾病预防控制中心),江苏无锡 214023)

**摘要:**目的 了解无锡市市售谷物重金属污染状况以及对人体的潜在健康风险。方法 采集无锡市市售大米、面粉、杂粮等谷物,根据国家标准方法对谷物中的铅、镉、总汞、总砷进行检测。运用单因子污染指数和尼梅罗综合污染指数评价谷物中重金属污染状况,采用美国国家环境保护局(US EPA)推荐的环境健康风险评估模型对重金属通过膳食途径所引起的健康风险做出评估。结果 大米、面粉、杂粮的单因子污染指数均小于0.6,在安全范围内。谷物总致癌风险值为 $1.71 \times 10^{-4}$ ,大米的致癌风险值最高,为 $3.29 \times 10^{-4}$ 。4种重金属的非致癌危险商(HQ)均小于1,由高到低依次为总砷、镉、总汞和铅,不同种类谷物的重金属非致癌危险指数(HI)均小于1,由高到低依次为大米类、面粉类、杂粮类。结论 无锡市谷物重金属污染在安全范围内,对健康风险进行评估显示,谷物中重金属对人体健康的整体风险在可接受范围内,致癌风险在EPA推荐的可接受范围内,其中大米的致癌风险最高,主要贡献为总砷;非致癌风险也在可接受范围内,其中大米的非致癌风险最高,主要贡献仍为总砷。

**关键词:**重金属;谷物;污染;健康风险评估

中图分类号:R155 文献标识码:A 文章编号:1004-8456(2024)04-0420-06

DOI:10.13590/j.cjfh.2024.04.009

**Pollution status and health risk assessment of heavy metals in grains in Wuxi city**

LIU Ping, REN Liang, ZHOU Weijie, QIAN Hongdan

(The Affiliated Wuxi Center for Disease Control and Prevention of Nanjing Medical University, Wuxi Center for Disease Control and Prevention, Jiangsu Wuxi 214023, China)

**Abstract: Objective** To investigate the pollution status of heavy metal contamination in commercially available grains in Wuxi, and to assess the potential risk to humans. **Methods** The grains such as rice, flour and coarse cereals sold in Wuxi were collected, and the contents of Pb, Cd, Hg, As were detected according to the national standard method. The single factor pollution index and Nemerow multi-pollution index were used to evaluate the pollution status of heavy metals in grains, and the environmental health risk assessment model recommended by the U. S. Environmental Protection Agency (US EPA) was used to evaluate the health risk caused by heavy metals through diet. **Results** The single factor Pollution Index of rice, flour and coarse cereals were all less than 0.6, which is within the safe range. The carcinogenic risk value of grains is  $1.71 \times 10^{-4}$ , which is within the acceptable risk level recommended by US EPA, and rice is the major exposure media. The non carcinogenic hazard quotient (HQ) of all four metals were all less than 1, which were decreased in the order of As>Cd>Hg>Pb. All the non carcinogenic hazard index (HI) was less than 1 too, which were decreased in the order of rice>flour>coarse cereals. **Conclusion** The heavy metal contamination of grains in Wuxi is within the acceptable range, and the health risk assessment showed that carcinogenic risk value of grains was within the acceptable risk level recommended by US EPA. The main carcinogenic and noncarcinogenic risk all come from rice, and the attribution factor is arsenic.

**Key words:** Heavy metals; grains; contamination; health risk assessment

重金属普遍存在于环境中,并通过食物链在人体中不断蓄积,从而对人体健康产生影响<sup>[1]</sup>。铅(Pb)、

镉(Cd)、汞(Hg)、砷(As)是世界卫生组织和联合国粮食及农业组织确认为对人体毒性作用最强的4种重金属<sup>[2]</sup>。进入人体的重金属有着各不相同的毒性靶器官及毒性作用特点,且会产生联合毒性作用。铅主要对神经系统产生影响,尤其对儿童智力发育影响较大<sup>[3]</sup>;镉极易在人体蓄积,主要损害肾脏、骨骼和消化系统<sup>[4-5]</sup>;汞暴露主要损害神经系统,会造成神经、心血管和免疫系统损害<sup>[6]</sup>;砷暴露可对皮

收稿日期:2023-05-30

基金项目:江南大学公共卫生研究中心项目(JUPH201815)

作者简介:刘萍 女 副研究员 研究方向为营养与食品安全

E-mail:wxcdelp@163.com

通信作者:钱红丹 女 副主任医师 研究方向为营养与食品安全

E-mail:space.0403@163.com

肤、肝脏、胃肠道和肾脏等器官产生急慢性毒性作用<sup>[7]</sup>;无机砷及其化合物已被国际癌症研究机构(The International Agency for Research on Cancer, IARC)确认为人类 I 类致癌物<sup>[8]</sup>。

谷物是我国居民膳食的主要来源,同时也是饲料的主要原料,谷物的食用安全一直以来备受关注。土壤中的重金属降解难,迁移性小,不断积累从而对农作物的生长产生影响,而谷类作物对土壤重金属具有较强的吸收特性<sup>[9]</sup>。谷物中重金属的污染水平直接影响人体健康,本研究对无锡市市售谷物重金属的污染情况进行分析,并评估其对人体的健康风险。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集

2020—2022 年按照江苏省食品安全风险监测方案的要求在无锡市各市(县)区进行各类谷物样品采集,采样地点覆盖超市、农贸市场、粮油店、餐饮店等环节,保证采集的样品具有一定的代表性、典型性和适时性。共在 56 个采样点采集谷物样品 119 份,其中大米 30 份、面粉 49 份、杂粮 40 份(其中玉米面 37 份、小米 3 份)。

### 1.2 方法

#### 1.2.1 检测方法与限量值

检测方法采用《国家食品污染和有害因素风险监测工作手册》食品中多元素分析的标准操作程序电感耦合等离子体质谱法,检测中采用标准物质、加标回收实验等方法进行质量控制,确保测定的重金属含量数据准确可靠。谷物中重金属含量按照 GB 2762—2022《食品安全国家标准 食品中污染物限量》进行评价,检出限和限量值见表 1。

表 2 谷物重金属污染水平分级

Table 2 Grade of the heavy metal contamination level in grains

等级	单因子污染指数	污染水平	质量水平
1	$P_i \leq 0.6$	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
2	$0.6 < P_i \leq 1.0$	污染物残留较多的产品	轻度污染
3	$P_i \geq 1.0$	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

#### 1.2.4 重金属对人体健康风险评估方法

##### 1.2.4.1 暴露评定

暴露剂量计算公式<sup>[13]</sup>如下:

$$ADD_{oral} = \frac{C_s \times IR \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (3)$$

式中, $ADD_{oral}$  为某重金属经口日均暴露剂量 [ $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ ];  $C_s$  为谷物中某重金属的平均含量 ( $\text{mg}/\text{kg}$ );  $IR$  为经口日均摄入某类谷物的量 ( $\text{g}/\text{d}$ );  $EF$  为年暴露频率 ( $\text{days}/\text{year}$ );  $ED$  为暴露持续时间

表 1 谷物中重金属的检出限及限量值/ $(\text{mg}/\text{kg})$

Table 1 Detection methods and limits of heavy metals in grains/ $(\text{mg}/\text{kg})$

监测项目	检出限	限量值
总砷	0.01	0.5
铅	0.005	0.2
总汞	0.001	0.02
镉	0.000 1	0.1(大米 0.2)

##### 1.2.2 小于检出限的数据处理

根据 WHO 全球环境监测系统/食品污染监测与评估规划(GEMS/FOOD)第二次会议上提出的“食品中低水平污染物可信评价”原则<sup>[10]</sup>,当未检出样品的比例低于总样品数的 60% 时,所有未检出数据用 1/2 检出限替代,当未检出样品的比例高于总样品数的 60% 时,所有未检出数据用检出限替代。

##### 1.2.3 重金属污染水平评价方法

采用单因子污染指数( $P_i$ )和尼梅罗综合污染指数( $P_{综合}$ )对谷物中重金属污染状况进行评价<sup>[11]</sup>,公式如下:

$$P_i = \frac{C_i}{S_i} \quad (1)$$

$$P_{综合} = \sqrt{\frac{P_{平均}^2 + P_{max}^2}{2}} \quad (2)$$

式中  $C_i$  代表样品重金属的测定值 ( $\text{mg}/\text{kg}$ ),  $S_i$  代表重金属的标准值 ( $\text{mg}/\text{kg}$ )。  $P_{平均}$  代表各类谷物某元素的单因子污染指数的平均值,  $P_{max}$  代表各类谷物某元素的单因子污染指数的最大值。参考 NY/T 398—2000《农、畜、水产品污染监测技术规范》规定的农、畜、水产品质量分级标准,可根据单因子污染指数将污染水平分为 3 个等级<sup>[12]</sup>。尼梅罗综合污染指数,兼顾单因子污染指数平均值和最大值,反映重金属的综合污染水平,指数越高,表示污染水平相对越高。评价标准见表 2。

(years);  $BW$  为体质量;  $AT$  为暴露时长,  $AT = \text{期望寿命} \times 365$ , 单位为 d。

##### 1.2.4.2 致癌风险评价

致癌风险用风险值(Risk)来描述<sup>[14]</sup>,表示人体暴露于某种物质而导致的一生中超过正常水平的癌症发病率。

$$ADD_{oral} = \frac{C_s \times IR \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (4)$$

$$Risk = ADD_{oral} \times SF \quad (R \leq 0.01) \quad (5)$$

式中, $SF$ (Slope factor)为致癌斜率因子( $[mg/(kg \cdot d)]^{-1}$ ),指个体终生暴露于某种致癌物后发生癌症的概率估计值。EPA规定人群的可接受致癌风险为 $10^{-6}$ ~ $10^{-4}$ <sup>[15-16]</sup>,如果致癌风险值小于 $10^{-6}$ ,则认为不存在致癌风险或者风险极低;如果致癌风险值介于 $10^{-4}$ ~ $10^{-6}$ ,则认为有致癌风险,但风险在可接受的范围内;如果致癌风险值大于 $10^{-4}$ ,则认为其引起癌症的风险性较高。

### 1.2.4.3 非致癌风险评价

非致癌风险采用靶标危害系数法(Target hazard quotient)进行评价<sup>[17]</sup>。计算公式为:

$$ADD_{oral} = \frac{C_s \times IR \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (6)$$

$$HQ = \frac{ADD_{oral}}{RfD} \quad (7)$$

多种重金属复合风险计算公式:

$$HI = \sum_{i=1}^n HQ \quad (8)$$

式中, $RfD$ 为参考暴露剂量,指人群终生暴露于某污染物而不太可能产生可预测的有害效应的日均暴露量估计值( $[mg/(kg \cdot d)]^{-1}$ )。HQ单一重金属危险商,HQ $\leq 1$ 说明该污染物对暴露人群健康危害程度较小,在可接受范围内;HQ $> 1$ 说明该污染物对暴露人群有一定的健康危害,HQ值越大表明该污染物对人体健康风险越大。HI复合重金属危险指数,用于评价多种重金属产生的复合影响。

表4 重金属元素SF、RfD取值

Table 4 Reference doses and cancer slope factors of heavy metals

参数	名称	单位	重金属污染物			
			As	Pb	Hg	Cd
SF	致癌斜率因子	$[mg/(kg \cdot d)]^{-1}$	1.5	—	—	—
RfD	参考剂量	$[mg/(kg \cdot d)]^{-1}$	$3.0 \times 10^{-4}$	$3.6 \times 10^{-3}$	$1.6 \times 10^{-4}$	$1.0 \times 10^{-3}$

注:“—”表示该重金属元素暂无致癌斜率因子

表5 各类谷物中重金属检测结果

Table 5 The results of heavy metals in the grain samples

元素	食品类别	n	含量范围/(mg/kg)	平均值/(mg/kg)	P90/(mg/kg)	P95/(mg/kg)	检出率/%	超标率/%
总砷	大米	30	0.04~0.167	0.079	0.155	0.164	30(100.00)	0
	面粉	49	ND~0.028	0.010	0.019	0.021	32(65.31)	0
	杂粮	40	ND~0.044	0.009	0.020	0.021	19(47.50)	0
	均值	119	ND~0.167	0.027	0.076	0.111	81(68.07)	0
铅	大米	30	ND~0.172	0.032	0.079	0.128	24(80.00)	0
	面粉	49	ND~0.166	0.052	0.114	0.148	43(87.76)	0
	杂粮	40	ND~0.19	0.045	0.118	0.140	31(77.50)	0
	均值	119	ND~0.19	0.044	0.100	0.140	98(82.35)	0
总汞	大米	30	ND~0.011	0.005	0.010	0.011	28(93.30)	0
	面粉	49	ND~0.014	0.003	0.010	0.012	16(32.65)	0
	杂粮	40	ND~0.015	0.002	0.009	0.015	8(20.00)	0
	均值	119	ND~0.015	0.003	0.010	0.011	52(43.69)	0
镉	大米	30	0.002~0.14	0.044	0.130	0.14	30(100.00)	1(3.33)
	面粉	49	0.003~0.096	0.023	0.044	0.050	49(100.00)	0
	杂粮	40	ND~0.035	0.004	0.018	0.025	36(90.00)	0
	均值	119	ND~0.14	0.025	0.048	0.110	115(96.64)	1(0.84)

注:ND表示未检出

### 1.2.4.4 健康风险评价参数

根据EPA对重金属致癌性的分类<sup>[18]</sup>,As为确定的人类致癌物(分类为A),本研究仅将As作为致癌物进行评价。对Pb、Cd、Hg、As均进行非致癌性评价。各金属的SF、RfD等,参照EPA综合风险信息数据库公布的参考值<sup>[19]</sup>,其他参数则根据《中国人群暴露参数》进行确定<sup>[20]</sup>,谷物的日均摄入量来自2014年江苏省居民营养与健康状况变迁追踪研究<sup>[21]</sup>,具体见表3、表4。

表3 重金属健康风险评价模型参数取值

Table 3 Factors of the exposure assessment of heavy metals

参数	名称	单位	取值
IR	经口日均摄入量	g/d	191.0(米及其制品)、86.8(面及其制品)、14.3(其他谷类)
EF	年暴露频率	days/year	365
ED	暴露持续时间	year	70
BW	体重	kg	63.2
AT	暴露时间	d	76.63×365

## 2 结果

### 2.1 各类谷物中重金属的检测结果

各类谷物中重金属检测结果见表5,谷物中铅、镉、总汞、总砷均有检出,其中镉的检出率最高,为96.64%,总汞的检出率最低,为43.69%。除了大米中检出镉超标,超标率为3.33%,其余谷物中重金属含量均未超标。重金属的平均含量高低为铅>总砷>镉>总汞。

## 2.2 各类谷物中重金属的污染程度评价

采用单因子污染指数法和内梅罗综合污染指数法对谷物中重金属污染水平进行评价(表6)。从内梅罗综合污染指数看,大米的综合污染指数最高,相对于面粉及杂粮,大米的重金属污染程度相对更高。不同谷物中4种重金属单因子污染指数 $P_i$ 均小于0.6,均在安全范围内,其中大米的总砷 $P_i$ (0.1586)高于面粉(0.0201)和杂粮(0.0175),表明大米的总砷污染程度比面粉和杂粮更高。

表6 谷物中重金属污染指数

Table 6 The pollution indices of the metals in grains

食品类别	单因子污染指数 $P_i$				污染程度	内梅罗综合污染指数 $P_{综合}$
	总砷	铅	总汞	镉		
大米	0.1586	0.1627	0.2383	0.2210	安全	0.2178
面粉	0.0201	0.2584	0.1462	0.2324	安全	0.2165
杂粮	0.0175	0.2228	0.1268	0.0351	安全	0.1728

## 2.3 谷物中重金属对人体健康风险评价

### 2.3.1 谷物中重金属对人体致癌风险评价

谷物中重金属的致癌风险主要来自于总砷,评价结果见表7,参照EPA规定的人群可接受的致癌风险范围( $10^{-4}$ ~ $10^{-6}$ ),谷物的总致癌风险值以及大米、面粉、杂粮的单独致癌风险值均在EPA推荐的可接受的范围内,其中大米的致癌风险值( $3.29 \times 10^{-4}$ )最高。

表7 谷物中重金属暴露的致癌风险

Table 7 Carcinogenic risks due to exposure to heavy metals via grains

元素	食品类别	风险值	
总砷	大米	$3.29 \times 10^{-4}$	$1.71 \times 10^{-4}$
	面粉	$1.90 \times 10^{-5}$	
	杂粮	$2.72 \times 10^{-6}$	

### 2.3.2 谷物中重金属对人体非致癌风险评价

运用靶标危害系数法对谷物中的重金属污染进行人体非致癌风险评估,结果见表8。重金属危险商HQ均小于1,说明谷物中的重金属非致癌风险在可接受范围内,风险大小依次为总砷>镉>总汞>铅,说明总砷对谷物的污染对人体的非致癌风险最大。复合重金属危险指数HI也均小于1,由高到低依次为大米类、面粉类、杂粮类,其中大米的HI值

表8 谷物中重金属暴露的非致癌风险

Table 8 No-carcinogenic risks due to exposure to heavy metals via grains

食品类别	HQ				HI
	总砷	铅	总汞	镉	
大米	0.7300	0.0249	0.0822	0.1220	0.9591
面粉	0.0420	0.0180	0.0230	0.0292	0.1122
杂粮	0.0060	0.0026	0.0033	0.0007	0.0126
均值	0.4042	0.0553	0.0824	0.0980	0.6399

接近1,相对于摄取面粉和杂粮,通过摄取大米对人体造成的重金属非致癌健康风险相对更高。

## 3 讨论

无锡作为中国东部人口密度较高的经济发达地区,土壤、水体受工业污染相对严重。本研究表明,无锡市谷物中均有不同程度的重金属污染,其中镉污染比较普遍,镉的检出率达96.64%。单因子污染指数和内梅罗综合污染指数分析显示,目前谷物的重金属污染尚在安全范围内,相对于面粉及杂粮,大米的重金属污染程度更高。

对健康风险进行评估显示,谷物中重金属污染对人体健康的整体风险在可接受范围内,其中大米中重金属污染对人体产生的整体健康风险高于其他谷物。总的致癌风险在EPA推荐的接受范围内,其中大米的致癌风险值最高,主要贡献为总砷;非致癌风险也在可接受范围内,其中大米的非致癌风险最高,主要贡献仍为总砷。相较于以面食和其他谷物为主食的膳食结构,以大米作为主食的膳食结构,重金属污染,尤其是总砷污染产生的健康风险相对更高。

从单因子污染指数看,大米中总砷的单因子污染指数高于面粉和杂粮,表明大米的总砷污染程度比面粉和杂粮更高。这可能是由于相对于其他作物,水稻的组织特异性更易于从土壤和水中富集砷<sup>[22]</sup>。我国各省、市及自治区膳食大米中总砷含量范围为0.038~0.1 mg/kg<sup>[23]</sup>,江苏省大米中总砷含量的平均值为0.051 mg/kg<sup>[24]</sup>,无锡市大米的总砷含量平均值为0.079 mg/kg,处于相对较高水平。无锡市居民每日大米及其制品的平均摄入量为191.0 g,计算得出总砷的暴露量 $ADD_{oral}$ 为0.219  $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{d})$ ,低于US EPA的RfD 0.3  $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{d})$ ,说明无锡市居民大米总砷暴露的非致癌风险尚处于可接受水平。根据第五次中国总膳食研究数据显示,居民通过谷物摄入的砷占总膳食砷暴露的59.7%<sup>[26]</sup>,因此,如果考虑到其他食物中砷的暴露量,膳食中总砷的暴露风险还需要进一步探讨。

本研究也存在一定的局限性,首先,本研究未进行无锡市居民谷物摄入量专项调查,采用2014年江苏省居民营养与健康状况监测数据,在计算膳食摄入量的时候,可能会产生偏差;其次,本研究使用的谷物中重金属含量为生制品的含量,没有考虑谷物加工过程如清洗、烹饪中的损失,有数据表明,在大米的冲洗过程中总砷的去除率为13%~30%<sup>[25]</sup>,因此本研究可能会使评估结果比实际情况偏高。

无锡是太湖流域的交通中枢,自古以来就有

“鱼米之乡”之称,是江苏省的水稻主产区之一。因此,关注无锡地区大米的重金属尤其是总砷的污染及其防治,对于无锡乃至我国东南部地区的粮食食用安全具有重要意义。在现行标准下,无锡市大米砷含量并未出现超标情况,但对于日常食用大米的高消费人群来说,仍存在一定的健康风险。如何结合市售大米中砷含量的现有水平,通过制定更适合本地的食品安全地方标准,以更好地保护居民健康,可以作为谷物尤其是大米食品安全监管的重要方向。

### 参考文献

- [1] 杨冬燕,王舟,雷伶俐,等. 2018—2019年深圳市米面及其制品中重金属污染状况的监测与分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(24): 9261-9265.  
YANG D Y, WANG Z, LEI L G, et al. Monitoring and analysis of heavy metal pollution in rice, flour and their products in Shenzhen from 2018 to 2019 [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2020, 11(24): 9261-9265.
- [2] 张静,李鹏. 南宁市稻米重金属污染状况及环境因素分析[J]. 粮食与油脂, 2021, 34(11): 158-162.  
ZHANG J, LI P. Analysis of heavy metal pollution in rice and environmental factors in Nanning[J]. Cereals & Oils, 2021, 34(11): 158-162.
- [3] KUMAR S. Occupational and environmental exposure to lead and reproductive health impairment: an overview [J]. Indian Journal of Occupational and Environmental Medicine, 2018, 22(3): 128-137.
- [4] 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.
- [5] LI X, ZHOU D. A meta-analysis on phenotypic variation in cadmium accumulation of rice and wheat: implications for food cadmium risk control[J]. Pedosphere, 2019, 29(5): 545-553.
- [6] BUDNIK L T, CASTELEYN L. Mercury pollution in modern times and its socio-medical consequences[J]. Science of the Total Environment, 2019, 654: 720-734.
- [7] CHANG J Y, AHN S C, LEE J S, et al. Exposure assessment for the abandoned metal mine area contaminated by arsenic[J]. Environmental Geochemistry and Health, 2019, 41(6): 2443-2458.
- [8] 袁文婷,刘宇,程国霞,等. 陕西主要食品中砷污染及居民膳食暴露风险评估[J]. 现代预防医学, 2021, 48(1): 55-58.  
YUAN W T, LIU Y, CHENG G X, et al. Arsenic pollution in main foods in Shaanxi and risk assessment of residents' dietary exposure[J]. Modern Preventive Medicine, 2021, 48(1): 55-58.
- [9] MAMAT A, ZHANG Z, MAMAT Z, et al. Pollution assessment and health risk evaluation of eight (metalloid) heavy metals in farmland soil of 146 cities in China[J]. Environmental Geochemistry and Health, 2020, 42(11): 3949-3963.
- [10] 毛伟峰,杨大进,隋海霞,等. 我国成人居民膳食中铅暴露风险评估[J]. 中国食品卫生杂志, 2016, 28(1): 107-110.  
MAO W F, YANG D J, SUI H X, et al. Risk assessment of dietary lead exposure in Chinese adult population [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2016, 28(1): 107-110.
- [11] 黄飞飞,王瑛,张宁. 苏州市地产大米重金属污染状况及人群膳食暴露风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(23): 9039-9045.  
HUANG F F, WANG Y, ZHANG N. Heavy metal pollution status of local rice and human dietary exposure risk assessment in Suzhou city [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2020, 11(23): 9039-9045.
- [12] 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.  
Ministry of Agriculture of the PRC. Procedural regulations regarding monitoring of pollutants in the produces of agriculture, animal husbandry and fishery: NY/T 398—2000 [S]. Beijing: China Standard Press, 2000.
- [13] US EPA. Risk Assessment Guidance for Superfund (RAGS). Part A (Chapter 8: risk characterization) [EB/OL]. [2022-02-15] <https://www.epa.gov/risk/risk-assessment-guidance-superfund-rags-part>.
- [14] 孙庆华,杜宗豪,杜艳君,等. 环境健康风险评估方法 第五讲 风险特征(续四)[J]. 环境与健康杂志, 2015, 32(7): 640-642.  
SUN Q H, DU Z H, DU Y J, et al. Environmental health risk assessment methods lecture 5: risk characteristics (continued 4) [J]. Journal of Environment and Health, 2015, 32(7): 640-642.
- [15] 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.
- [16] US EPA. Available information on assessment exposure from pesticides in food [J]. Washington DC, 2000.
- [17] US EPA. Integrated Risk Information System [EB/OL]. [2022-02-15] <https://www.epa.gov/iris>.
- [18] 陈春静,张景山,李峻,等. 2019年南京市饮用水重金属健康风险评估[J]. 现代预防医学, 2020, 47(5): 813-816.  
CHEN C J, ZHANG J S, LI J, et al. Health risk assessment of heavy metals in drinking water, Nanjing, 2019 [J]. Modern Preventive Medicine, 2020, 47(5): 813-816.
- [19] US EPA. The risk assessment information system [DB/OL]. [2022-02-15] [https://rais.orml.gov/cgi-bin/tools/TOX\\_search?select=chemmeta](https://rais.orml.gov/cgi-bin/tools/TOX_search?select=chemmeta).
- [20] 环境保护部. 中国人群暴露参数手册(成人卷)[M]. 北京: 中国环境出版社, 2013.  
Ministry of Environmental Protection. Chinese population exposure parameter manual (adult volume) [M]. Beijing: China Environment Press, 2013.

- [21] 周永林,戴月.江苏省居民营养与健康状况变迁追踪研究[M].南京:东南大学出版社,2020.  
ZHOU Y L, DAI Y. Study on transition of dietary pattern in Jiangsu province [M]. Nanjing: Southeast University Press, 2020.
- [22] LIAO N, SETO E, ESKENAZI B, et al. A comprehensive review of arsenic exposure and risk from rice and a risk assessment among a cohort of adolescents in Kunming, China[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2018, 15 (10): 2191.
- [23] 秦周,李依玲,刘佳琳,等.我国居民经大米摄入无机砷的暴露水平及其健康风险评估[J].中国食品卫生杂志,2021, 33(6): 727-732.  
QIN Z, LI Y L, LIU J L, et al. Exposure level and health risk assessment of inorganic arsenic in rice among Chinese residents [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2021, 33(6): 727-732.
- [24] 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.
- [25] JAAFAR M, MARCILLA A L, FELIPE-SOTELO M, et al. Effect of food preparation using naturally-contaminated groundwater from La Pampa, Argentina: estimation of elemental dietary intake from rice and drinking water[J]. Food Chemistry, 2018, 246: 258-265.
- [26] 吴永宁,赵云峰,李敬光.第五次中国总膳食研究[M].北京:科学出版社,2018.  
WU Y N, ZHAO Y F, LI J G. The fifth China total diet study [M]. Beijing: Science Press, 2018.