

风险评估

山东省小麦粉镉污染状况调查及膳食暴露评估

杨永浩¹,董文亚¹,刘静¹,褚遵华²,赵金山²,赵秀兰¹,肖培瑞²(1. 山东大学公共卫生学院, 山东 济南 250012; 2. 山东省疾病预防控制中心,
山东大学预防医学研究院, 山东 济南 250014)

摘要:目的 了解山东省各市小麦、小麦粉的镉污染水平,对居民经小麦粉摄入镉的健康风险进行初步评估。方法 在山东省16市农贸市场、商店超市、农户中采集小麦、小麦粉共计1789份样品,采用电感耦合等离子体质谱法进行镉含量测定;结合小麦粉消费量数据,对山东省居民通过小麦粉途径的镉暴露风险进行评估。结果 检测数据表明,小麦镉含量明显高于小麦粉中镉含量($Z=-12.50, P<0.001$)。小麦和小麦粉镉含量均存在地区差异。风险评估结果显示,小麦粉平均消费水平的人群每月镉摄入量(EMI)为 $1.18 \mu\text{g}/\text{kg}\cdot\text{BW}$,占暂定每月耐受摄入量(PTMI)的4.72%;小麦粉高消费人群EMI为 $2.87 \mu\text{g}/\text{kg}\cdot\text{BW}$,占PTMI的11.47%。结论 山东省居民平均消费人群通过小麦粉途径的镉暴露风险较低,但镉含量较高的地市的小麦粉高消费人群膳食镉暴露风险仍需进一步关注。

关键词:镉;小麦;小麦粉;暴露评估

中图分类号:R155 文献标识码:A 文章编号:1004-8456(2023)07-1042-07

DOI:10.13590/j.cjfh.2023.07.011

Investigation of cadmium contamination in wheat flour and assessment on dietary exposure in Shandong ProvinceYANG Yonghao¹, DONG Wenya¹, LIU Jing¹, CHU Zunhua², ZHAO Jinshan²,
ZHAO Xiulan¹, XIAO Peirui²(1. School of Public Health, Shandong University, Shandong Ji'nan 250012, China;
2. Shandong Center for Disease Prevention and Control, Academy of Preventive Medicine,
Shandong University, Shandong Ji'nan 250014, China)

Abstract: Objective This study was designed to investigate cadmium (Cd) pollution levels in wheat and wheat flour in different cities of Shandong Province, as well as conduct preliminary health risk assessment of Cd intake *via* wheat flour.

Methods 1789 samples of wheat or wheat flour were collected from farmers' markets, supermarkets, and farmers in 16 cities of Shandong Province. Inductively coupled plasma-mass spectrometry (ICP-MS) was performed to determine the Cd content in wheat. Based on the data of residents' wheat flour consumption, the risk of Cd exposure of residents through wheat flour was estimated. **Results** The Cd level of wheat was higher than that of wheat flour ($Z=-12.50, P<0.001$), and there were differences among cities in Cd levels in both wheat and wheat flours. The estimated monthly intake (EMI) of the average consumer group in Shandong Province was $1.18 \mu\text{g}/\text{kg}\cdot\text{BW}$, accounting for 4.72% of the provisional tolerable monthly intake (PTMI). The EMI of the high-consumption population of wheat flour was $2.87 \mu\text{g}/\text{kg}\cdot\text{BW}$, accounting for 11.47% of the PTMI. **Conclusion** The exposure risk of dietary Cd from wheat flour in the average consumer population of Shandong Province is low; however, further attention should be paid to the exposure risk to dietary Cd in high wheat-flour consumers in cities with relatively high Cd content.

Key words: Cadmium; wheat; wheat flour; exposure assessment

收稿日期:2022-05-01

基金项目:国家自然科学基金(82073587);山东省重点研发计划(重大科技创新工程)项目(2020CXGC10604)

作者简介:杨永浩 男 硕士研究生 研究方向为公共卫生应急与管理 E-mail:y.yh539329@163.com

通信作者:肖培瑞 男 副主任医师 研究方向为食品安全与营养 E-mail:sdcdexpr@163.com

赵秀兰 女 教授 研究方向为环境与健康 E-mail:zhao.xl@sdu.edu.cn

肖培瑞和赵秀兰为共同通信作者

镉(Cadmium, Cd)是一种重金属,在工业生产中应用广泛。随着工业化、城市化进程的加快,镉可通过一些工农业活动如化肥、农药及塑料薄膜的生产和使用,工业废物排放和污水灌溉以及大气中沉降等活动污染土壤^[1]。土壤中的镉极易被农作物吸收并通过食物链进入人体。镉在体内的半衰期长达 10~30 年,可在肾脏、肝脏、骨骼、睾丸、肺脏、胸腺等多种器官蓄积并产生广泛的健康损伤效应,其中肾脏、骨骼损伤最为明显^[2]。镉是联合国粮农组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO)和世界卫生组织(World Health Organization, WHO)公布的人体毒性最强的 3 种重金属(铅、镉、汞)之一^[3]。国际癌症研究机构(International Agency for Research on Cancer, IARC)将镉归类为人类 I 级致癌物^[4],美国环境保护署(U. S. Environmental Protection Agency, EPA)也将镉列为 126 种优先控制污染物之一^[5]。膳食是非吸烟和非职业人群镉暴露的主要途径,食物中镉含量检测和风险评估受到越来越多的关注^[6]。小麦是山东省主要的粮食作物,小麦粉也是山东居民的主粮。检测山东省小麦、小麦粉中镉含量水平,描述其暴露特征,评价其健康风险,可为预防和控制镉污染导致的健康损伤效应提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 主要仪器

电感耦合等离子体质谱仪(iCAP RQ, 美国 Thermo Fisher 公司);电子天平(XS205, Mettler 公司);微波消解仪(Mars 6, 美国 CEM 公司);研磨仪(GM200, 德国 Retsch 公司);均质器(T18, 德国 IKA 公司);

1.2 样品来源

2013、2014 年分别在山东省 16 市农贸市场和

商店超市随机采集小麦粉 415 份(本省产 306 份)、350 份(本省产 297 份),共计 765 份(本省产 603 份)。2015、2019、2020 年分别在山东省 16 市农户家中随机采集当年自产小麦 210、518、296 份,共计 1 024 份。

1.3 检测方法

粮食中镉含量按照国家食品污染物和有害因素监测工作手册规定的电感耦合等离子体质谱法(Inductively coupled plasma-mass spectrometry, ICP-MS)标准操作程序进行检测,样品采集后一个月内完成检测,检出限(Limit of detection, LOD)为 3 $\mu\text{g}/\text{kg}$,低于 LOD 采用 1/2 LOD 值替代^[7]。检测结果依据现行国家标准《食品安全国家标准 食品中污染物限量》GB 2762—2017^[8]的限量标准($\leq 100 \mu\text{g}/\text{kg}$)进行合格判定。

1.3.1 样品前处理

取有代表性的小麦样品每份 50 g 左右用研磨仪粉碎。称取混匀后的小麦粉样品或粉碎后的小麦 0.2 g(精确至 0.001 g)于微波消解罐中,加入 5 mL 硝酸,加盖放置 1 h,按照微波消解仪标准操作程序进行消解(表 1),100 $^{\circ}\text{C}$ 赶酸后,用水定容至 25 mL,混匀,供 ICP-MS 仪器分析。

表 1 微波消解仪条件

Table 1 Microwave digester conditions

步骤	控制温度/ $^{\circ}\text{C}$	升温时间/min	恒温时间/min
1	120	5	5
2	150	5	10
3	190	5	20

1.3.2 仪器分析条件

将仪器性能调至最佳状态。仪器分析条件见表 2。采取碰撞反应池分析模式。在调谐仪器达到测定要求后,编辑测定方法,根据 Cd 的性质选择 103Rh/115In 为内标元素,Cd 元素测定选择质荷比(m/z)为 111。

表 2 电感耦合等离子体质谱仪分析条件

Table 2 Analysis conditions of inductively coupled plasma mass spectrometer

参数名称	参数	参数名称	参数
射频功率	1 500 W	雾化器	高盐/同心雾化器
等离子体气流量	15 L/min	采样锥/截取锥	镍/铂锥
载气流量	0.80 L/min	采样深度	8~10 mm
辅助气流量	0.40 L/min	采集模式	跳峰
氮气流量	4~5 mL/min	检测方式	自动
雾化室温度	2 $^{\circ}\text{C}$	每峰测定点数	1~3
样品提升速率	0.3 r/s	重复次数	2~3

1.3.3 标准曲线的制作

取 Cd 标准溶液,配制浓度分别为 0、1、5、10、50、100 ng/mL 的标准系列,将标准系列溶液分别注入 ICP-MS 中,测定 Cd 和内标元素的信号响应值,

以 Cd 的浓度为横坐标,Cd 与内标元素响应信号值的比值为纵坐标,绘制标准曲线。

1.3.4 样品消解液的测定

将空白溶液和消解溶液分别注入 ICP-MS 中,

测定 Cd 和内标元素的信号响应值,根据标准曲线得到消解液中 Cd 的浓度。根据取样质量换算得样品中 Cd 含量。

1.3.5 方法检出限

连续制备 21 份空白样品并进行测定,把 3 倍空白值的标准偏差相对应的样品浓度作为方法检出限。

1.3.6 质控措施

样品检测过程中,每 10 份样品取 1 份进行标准加标回收测试,并取 1 份进行平行样品检测。加标回收率需在 85%~110% 之间。样品中 Cd 含量 >1 mg/kg 时,两次独立重复测定结果的绝对差值不得超过算术平均值的 10%;Cd 含量在 0.1~1 mg/kg 时,两次独立重复测定结果的绝对差值不得超过算术平均值的 15%;Cd 含量 ≤0.1 mg/kg 时,两次独立重复测定结果的绝对差值不得超过算术平均值的 20%。

1.4 膳食暴露评估

1.4.1 消费量数据来源

应用 2015 年山东居民总膳食研究及健康状况调查数据。

1.4.2 每月暴露量计算

由小麦粉摄入镉采用每月暴露量(Estimated monthly intake,EMI),按照以下公式进行评估($\mu\text{g}/\text{kg BW}$)。

$$\text{EMI} = \frac{c \times \text{FIR} \times 30}{1\,000 \times W}$$

其中, c 为小麦粉中镉含量($\mu\text{g}/\text{kg}$); FIR 是人均每日小麦粉消费量(g/d ,除以 1 000 后单位换算为 kg/d);30 为平均每月的天数(d/m); W 为成人体质量(以 60 kg 计)。

1.5 统计学分析

采用 SPSS 26.0 软件对数据进行统计学描述和分析,应用 Kruskal-Wallis 检验、Mann-Whitney U 检验、 χ^2 检验对不同市来源样品中镉污染水平进行比较, $P < 0.05$ 为差异有统计学意义;采用 ArcGIS 10.6 软件制作不同市镉含量分布图,应用自然间断点分级法(Jenks)对不同市小麦、小麦粉的镉含量进行分类。

2 结果

2.1 山东省小麦、小麦粉中镉污染情况比较

山东省及各市小麦及小麦粉样品中镉污染状况及其统计学特征见表 3。小麦镉检出率为

表 3 2013—2020 年山东省及各市小麦、小麦粉镉污染状况

Table 3 Cadmium pollution of wheat and wheat flour in Shandong Province from 2013 to 2020

市	种类	样本量/(份)	检出率/%	检出范围/ $(\mu\text{g}/\text{kg})$	均值/ $(\mu\text{g}/\text{kg})$	中位数/ $(\mu\text{g}/\text{kg})$	P_{95} 位数/ $(\mu\text{g}/\text{kg})$	不合格份数
滨州	小麦	59	91.53	1.50~74.20	20.46	14.90	51.10	0
	小麦粉	64	84.38	1.50~40.40	15.43	14.70	32.00	0
德州	小麦	94	88.30	1.50~84.30	17.79	13.60	55.60	0
	小麦粉	64	68.75	1.50~41.00	15.94	12.00	35.00	0
东营	小麦	47	82.98	1.50~49.40	16.56	17.80	44.80	0
	小麦粉	15	93.33	1.50~49.00	14.89	13.60	49.00	0
菏泽	小麦	90	97.78	1.50~262.00	42.26	34.10	118.00	5
	小麦粉	37	78.38	1.50~72.00	18.09	13.80	44.00	0
济南	小麦	47	89.36	1.50~59.00	15.41	9.25	39.00	0
	小麦粉	15	80.00	1.50~24.00	9.68	10.20	24.00	0
济宁	小麦	100	95.00	1.50~79.20	25.56	18.40	70.40	0
	小麦粉	95	63.16	1.50~140.00	12.88	12.10	34.00	1
聊城	小麦	86	95.35	1.50~73.70	17.77	13.90	40.10	0
	小麦粉	41	51.22	1.50~140.00	11.54	3.00	24.70	2
临沂	小麦	79	73.42	1.50~91.40	20.97	16.50	57.30	0
	小麦粉	36	22.22	1.50~38.80	4.78	1.50	24.20	0
青岛	小麦	60	95.00	1.50~50.50	14.56	11.40	33.50	0
	小麦粉	32	78.13	1.50~32.00	12.14	13.40	21.50	0
日照	小麦	31	93.55	1.50~119.00	41.52	35.50	99.00	1
	小麦粉	58	58.62	1.50~210.00	18.76	8.60	80.00	2
泰安	小麦	62	95.16	1.50~410.00	44.95	27.35	115.00	4
	小麦粉	35	14.29	1.50~39.00	5.01	1.50	30.00	0
威海	小麦	43	93.02	1.50~68.30	21.06	18.30	42.00	0
	小麦粉	12	75.00	1.50~21.00	11.82	12.50	21.00	0
潍坊	小麦	73	98.63	1.50~43.40	19.56	19.10	37.60	0
	小麦粉	54	85.19	1.50~32.30	13.81	13.30	27.00	0
烟台	小麦	41	85.37	1.50~68.40	33.65	35.10	65.40	0
	小麦粉	16	93.75	1.50~95.00	23.89	16.70	95.00	0
枣庄	小麦	49	75.51	1.50~62.10	18.20	14.00	46.00	0
	小麦粉	13	76.92	1.50~22.00	10.45	9.70	22.00	0
淄博	小麦	63	98.41	1.50~45.50	17.34	14.00	39.10	0
	小麦粉	16	75.00	1.50~17.00	8.41	9.55	17.00	0
合计	小麦	1024	91.01	1.50~410.00	24.00	18.00	62.40	10
	小麦粉	603	66.00 ^a	1.50~210.00	13.44	11.00 ^b	35.00	5

注:^a与小麦相比, $\chi^2=159.11, P < 0.001$; ^b与小麦相比, $Z=-12.50, P < 0.001$

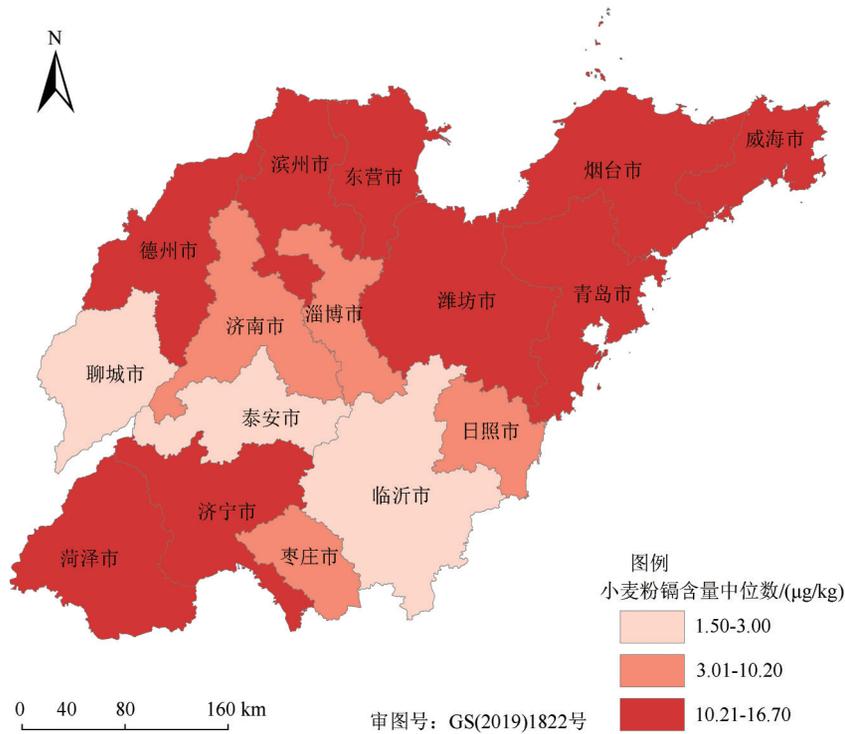


图2 山东省各市小麦粉镉含量分布图

Figure 2 Distribution of cadmium content in wheat flour in various cities in Shandong Province

表4 山东省各市居民经小麦粉镉暴露水平及贡献率

Table 4 Exposure levels and contribution rate of cadmium via wheat flour among residents in Shandong Province

	均值		中位数		P_{99}	
	月暴露量/($\mu\text{g}/\text{kg}\cdot\text{BW}$)	贡献率/%	月暴露量/($\mu\text{g}/\text{kg}\cdot\text{BW}$)	贡献率/%	月暴露量/($\mu\text{g}/\text{kg}\cdot\text{BW}$)	贡献率/%
菏泽市	2.28	9.13	2.15	8.62	5.55	22.19
滨州市	1.74	6.96	1.64	6.57	4.23	16.90
潍坊市	1.65	6.61	1.56	6.24	4.01	16.06
青岛市	1.63	6.52	1.54	6.16	3.96	15.85
东营市	1.60	6.42	1.51	6.05	3.9	15.58
枣庄市	1.60	6.39	1.51	6.03	3.88	15.53
烟台市	1.54	6.18	1.46	5.83	3.75	15.00
济宁市	1.47	5.87	1.39	5.54	3.57	14.26
济南市	1.26	5.05	1.19	4.76	3.06	12.26
德州市	1.22	4.89	1.15	4.62	2.97	11.89
淄博市	1.17	4.70	1.11	4.43	2.85	11.41
威海市	1.05	4.22	1.00	3.98	2.56	10.25
聊城市	0.16	0.65	0.15	0.62	0.4	1.58
临沂市	0.16	0.65	0.15	0.62	0.4	1.58
日照市	0.16	0.65	0.15	0.62	0.4	1.58
泰安市	0.16	0.65	0.15	0.62	0.4	1.58
合计	1.18	4.72	1.11	4.46	2.87	11.47

3 讨论

经食物来源是人群镉暴露的主要途径,约占非吸烟人群镉摄入量的90%以上^[10]。小麦是全球第二大粮食作物,也是世界上种植最为广泛的粮谷类食物,对镉富集能力较强,可通过食物链给人类健康带来风险^[11]。山东省小麦镉含量均值与全国平均水平相当^[12],但低于湖北和江苏^[13]。这可能是由于山东地处黄淮海小麦优势产区,土壤镉污染程度较轻有关^[13]。有研究报道小麦籽粒中50%以上的

蓄积镉来自根系吸收^[14]。小麦进入灌浆期后镉可经穗部韧皮部运输到小麦籽粒^[15]。调查显示土壤中的镉污染程度与小麦籽粒中含量存在相关关系。盆栽试验证实,生长在不同含镉水平土壤中的小麦茎、叶、谷壳、籽粒中镉含量均与土壤镉含量呈显著正相关^[16]。

本研究发现,小麦粉的镉检出率和含量均低于小麦籽粒。一般麦麸镉含量高于小麦其他部分,小麦加工去掉麦麸,可使小麦粉镉含量降低^[17]。从小

麦和小麦粉中镉含量不合格情况来看,1 024 份小麦样品中有 10 份样品不合格,均为 2019 年样品,分别产自菏泽(5 份)、泰安(4 份)和日照(1 份);765 份小麦粉中有 6 份样品不合格,均为 2013 年样品,分别产自日照(2 份)、聊城(2 份)、济宁(1 份)、省外(1 份)。此次未同时检测样品来源土壤镉含量,推测样品中较高的镉含量可能与以下述及的土壤镉污染原因相关。菏泽样品镉含量高可能与当地化肥消耗量相关。据统计,菏泽市 2019 年化肥使用量为 1 427 454 吨,居山东省第一位^[18];有调查显示菏泽市使用农膜、化肥、农药量较大地区土壤中镉含量明显高于其他土壤含量^[19]。泰安和日照超标样品可能与当时矿产开采及工业污染相关。泰安市煤矿资源丰富,2020 年原煤产量达 1 268.9 万吨^[20],此外也与当地一些高污染高耗能的企业如稀土公司、玻璃纤维厂工业生产活动有关^[21]。日照市也属于矿产资源丰富地区,2020 年锌产量达 860 吨^[22]。监测数据显示,产自菏泽市、烟台市的小麦和小麦粉样品中镉含量均较高,产自聊城的小麦和小麦粉样品中镉含量均较低,泰安市、滨州市、德州市、青岛市的小麦和小麦粉样品中镉含量分布不一致,可能与小麦粉生产原料来源不固定以及在加工和储存过程存在污染有关,具体原因还需进一步研究。

本研究采用平均消费量×浓度中位数、消费量中位数×浓度中位数、消费量 P_{99} ×浓度中位数三种方式评估山东省及各市居民膳食镉暴露情况。山东省居民膳食镉平均暴露量均在联合国粮农组织/世界卫生组织食品添加剂联合专家委员会(JECFA)提出的健康指导值范围内。平均消费人群 EMI 仅占 PTMI 的 4.72%,表明通过小麦粉的膳食镉暴露风险较低。这与南京^[23]、杭州^[24]等地膳食镉暴露评估结果基本一致。高消费人群 EMI 占 PTMI 的 11.47%,其中菏泽、滨州、潍坊市高消费人群膳食镉贡献率分别达到 22.19%、16.90%、16.06%。依据 2015 年山东居民总膳食研究及健康状况调查数据,山东省居民食物消费量为 2 041.1 g/d,小麦粉的平均消费量为 217.48 g/d,小麦粉摄入比例为 10.66%。考虑到居民每日食物种类多,经小麦粉摄入镉对镉含量较高地区的小麦粉高消费人群存在一定的健康风险。

由于镉可经多种途径进入体内,本次研究仅以小麦粉经膳食途径作为单一暴露源进行了镉暴露的点评估,未涵盖其他食品及其他途径来源的镉暴露,未区别不同年龄阶段人群的镉暴露情况,可能导致评估结果存在一定的不确定性。今后仍需对小麦相关产品镉污染状况开展持续监测,逐步完善风险评估模型及相关参数,为预防和控制镉污染导

致的健康损伤效应提供数据支持。

参考文献

- [1] WANG M, CHEN Z F, SONG W, et al. A review on cadmium exposure in the population and intervention strategies against cadmium toxicity [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2021, 106(1): 65-74.
- [2] GENCHI G, SINICROPI M S, LAURIA G, et al. The effects of cadmium toxicity [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(11): 3782.
- [3] 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.
- [4] IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Arsenic, metals, fibres, and dusts. [M/OL]. (2021-04-08)[2022-04-19]. <https://publications.iarc.fr/120>.
- [5] NORDBERG G F. Historical perspectives on cadmium toxicology [J]. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 2009, 238(3): 192-200.
- [6] WANG Z, PAN L B, LIU G H, et al. Dietary exposure to cadmium of Shenzhen adult residents from a total diet study [J]. *Food Additives & Contaminants Part A, Chemistry, Analysis, Control, Exposure & Risk Assessment*, 2018, 35(4): 706-714.
- [7] 宫春波, 王朝霞, 孙月琳, 等. 食品安全风险监测数据统计处理常见问题探讨 [J]. *中国食品卫生杂志*, 2013, 25(6): 575-578.
GONG C B, WANG Z X, SUN Y L, et al. Application of statistic analysis processing on food safety risk surveillance data [J]. *Chinese Journal of Food Hygiene*, 2013, 25(6): 575-578.
- [8] 中华人民共和国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 of the People's Republic of China, State Food and Drug Administration. National standard for Food safety Limit of pollutants in food: GB 2762-2017 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [9] VERGER P. WHO FOOD ADDITIVES SERIES: 59 Safety evaluation of certain food additives and contaminants [R]. Geneva WHO, 2011: 305-380.
- [10] XINGW Q, CAO E Z, SCHECKELK G, et al. Influence of phosphate amendment and zinc foliar application on heavy metal accumulation in wheat and on soil extractability impacted by a lead smelter near Jiyuan, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2018, 25(31): 31396-31406.
- [11] REHMAN M Z U, RIZWAN M, GHAFOR A, et al. Effect of inorganic amendments for *in situ* stabilization of cadmium in contaminated soils and its *Phyto*-availability to wheat and rice under rotation [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2015, 22(21): 16897-16906.
- [12] 张朝正, 薛建杰, 闫晓, 等. 我国小麦重金属污染状况分析 [J]. *食品安全导刊*, 2022(11): 128-134, 138.

- ZHANG C Z, XUE J J, YAN X, et al. Analysis of heavy metal contamination of wheat in China[J]. *China Food Safety Magazine*, 2022(11): 128-134, 138.
- [13] 陆美斌, 陈志军, 李为喜, 等. 中国两大优势产区小麦重金属镉含量调查与膳食暴露评估[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(19): 3866-3876.
- LU M B, CHEN Z J, LI W X, et al. Survey and dietary exposure assessment of cadmium in wheat from two main wheat-producing regions in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(19): 3866-3876.
- [14] OBATA H, UMEBAYASHI M. Production of SH compounds in higher plants of different tolerance to Cd[J]. *Plant and Soil*, 1993, 155-156(1): 533-536.
- [15] HERREN T, FELLER U. Transfer of zinc from xylem to phloem in the peduncle of wheat[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 1994, 17(9): 1587-1598.
- [16] 张婧, 李仁英, 徐向华, 等. 土壤镉污染对小麦生长及镉吸收的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2019, 36(4): 522-527.
- ZHANG Q, LI R Y, XU X H, et al. Effects of cadmium pollution in soil on growth and cadmium uptake of wheat[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(4): 522-527.
- [17] 吴亚楠, 鞠兴荣, 何荣, 等. 粮食中镉的分布及消减技术研究进展[J]. *粮食与饲料工业*, 2015(12): 35-39.
- WU Y N, JU X R, HE R, et al. Advances of distribution and removal techniques of cadmium in grain[J]. *Cereal & Feed Industry*, 2015(12): 35-39.
- [18] 山东省统计局, 国家统计局山东调查总队. 山东统计年鉴2020[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- Shandong Provincial Bureau of Statistics, National Bureau of Statistics Shandong Survey Corps. *Shandong Statistical Yearbook 2020* [M]. Beijing: China Statistics Press, 2020.
- [19] 陶美娟, 高尚赞, 汤海波, 等. 菏泽市不同类型村庄土壤主要无机元素的监测与评价[J]. *中国环境监测*, 2019, 35(5): 120-126.
- TAO M J, GAO S Z, TANG H B, et al. Monitoring and evaluation of soil inorganic elements in different types of villages in Heze[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2019, 35(5): 120-126.
- [20] 泰安市统计局, 国家统计局泰安调查队. 2021泰安统计年鉴[M/OL]. (2021-10-12) [2022-01-07]. http://tjj.taian.gov.cn/art/2021/10/12/art_46886_10286991.html.
- Taian City Bureau of Statistics, National Bureau of Statistics Tai'an Survey Team. 2021 Taian Statistical Yearbook [M/OL]. (2021-10-12) [2022-01-07]. http://tjj.taian.gov.cn/art/2021/10/12/art_46886_10286991.html.
- [21] 李梦红, 黄现民, 郑家文, 等. 新泰市农田重金属污染现状及评价[J]. *安徽农业科学*, 2009, 37(31): 15605-15608, 15623.
- LI M H, HUANG X M, ZHENG J W, et al. Status and evaluation of heavy metals pollution in farmland soil of Xintai City[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2009, 37(31): 15605-15608.
- [22] 日照市统计局, 国家统计局日照调查队. 2021日照统计年鉴[M/OL]. (2021-07-29) [2022-01-07]. http://tjj.rizhao.gov.cn/art/2021/7/29/art_121734_10263106.html.
- Rizhao City Bureau of Statistics, National Bureau of Statistics Rizhao Survey Team. 2021 Sunshine Statistical yearbook [M/OL]. (2021-07-29) [2022-01-07]. http://tjj.rizhao.gov.cn/art/2021/7/29/art_121734_10263106.html.
- [23] 祝白春, 王艳莉, 郭宝福, 等. 2013—2016年南京市民膳食中镉暴露风险评估[J]. *实用预防医学*, 2019, 26(9): 1027-1030.
- ZHU B C, WANG Y L, GUO B F, et al. Risk assessment of cadmium dietary exposure among residents in Nanjing, 2013-2016[J]. *Practical Preventive Medicine*, 2019, 26(9): 1027-1030.
- [24] 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.