

2021—2024 年无锡市自产稻米重金属污染状况及健康风险评估

周小新, 陈丽君, 龚燕, 孟元华

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** 了解无锡市产稻米中重金属[铬(Cr)、砷(As)、铅(Pb)、镉(Cd)、汞(Hg)]的污染状况,并评估其潜在健康风险。**方法** 2021—2024 年从无锡市辖 A 和 B 水稻种植区共采集 157 份稻米样本,采用电感耦合等离子体质谱法(inductively coupled plasma mass spectrometry, ICP-MS)对目标元素进行检测。采用单因子污染指数、内梅罗综合污染指数法评价无锡市产稻米的污染水平,运用环境健康风险评估模型评价食用无锡市产稻米的健康风险。**结果** 各重金属的年均浓度均在标准限值内,均值从高到低为:Cr>As>无机 As>Pb>Cd>Hg,各元素的变异系数范围为 33.12%~352.94%。A 和 B 地区的 Cr、As、Pb、Cd、Hg 单因子污染指数和综合污染指数均小于 0.6,处于安全水平。重金属的总致癌风险为 3.51×10^{-4} ,其中无机 As 的致癌风险最高,为 2.68×10^{-4} ;重金属的单独非致癌风险和多种重金属危害健康风险指数均小于 1,无机 As 的非致癌风险最高,为 5.95×10^{-1} 。**结论** 无锡市产稻米中重金属污染处于安全水平,样本中重金属污染分布不均,重金属的致癌和非致癌风险处于可接受水平。

关键词: 重金属;风险评估;无锡;稻米

中图分类号:R155.51 文献标志码:A 文章编号:1003-8507(2026)15-2746-07

DOI: 10.20043/j.cnki.MPM.202601316

Heavy metal pollution status and health risk assessment of rice produced in Wuxi City from 2021 to 2024

ZHOU Xiao-xin, CHEN Li-jun, GONG Yan, MENG Yuan-hua

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

Abstract: **Objective** To investigate the pollution status of heavy metals (Cr, As, Pb, Cd, and Hg) in rice produced in Wuxi City and assess their potential health risks. **Methods** From 2021 to 2024, 157 rice samples were collected from rice planting areas A and B under the jurisdiction of Wuxi. Inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) was used to detect target elements. Single factor pollution index (Pi) and Nemerow comprehensive pollution index method were used to evaluate the pollution level of rice produced in Wuxi City, and health risks were evaluated by environmental health risk assessment model. **Results** The annual average concentrations of various heavy metals were within the standard limits, with the mean values ranging from high to low as Cr>As>inorganic As>Pb>Cd>Hg. The coefficient of variation for each element ranged from 33.12% to 352.94%. The single factor pollution index and comprehensive pollution index of Cr, As, Pb, Cd, and Hg in areas A and B were all less than 0.6, indicating a safe level. The total carcinogenic risk of heavy metals was 3.51×10^{-4} , with inorganic As having the highest carcinogenic risk of 2.68×10^{-4} . The individual non-carcinogenic risks of heavy metals and the combined health risk index of multiple heavy metals were all less than 1, with inorganic As having the highest non-carcinogenic risk of 5.95×10^{-1} . **Conclusion** The heavy metal pollution in rice produced in Wuxi was at a safe level, and the distribution of heavy metal pollution in the samples was uneven. The carcinogenic and non-carcinogenic risks of heavy metals from rice produced in Wuxi were at acceptable levels.

Keywords: Heavy metals; Health risk assessment; Wuxi; Rice

基金项目:江苏省职业健康科研项目(JSZJ20251209);无锡市科技发展资金项目(K20253023);无锡市公共卫生中心(LCZX2021006)

作者简介:周小新(1985—),女,本科,副主任医师,研究方向:食品安全、环境卫生检测与风险评估

通信作者:孟元华, E-mail: 285859259@qq.com

重金属是一类对人体有害的物质,由于其高毒性、生物累积性、持久性以及对人类的健康风险,受到了公众的广泛关注^[1-2]。多项证据显示,长期暴露于高浓度重金属可能导致心脏毒性、神经毒性、免疫毒性和癌症等各种疾病,从而增加死亡率^[3-4]。

铅(Pb)、汞(Hg)、镉(Cd)是世界卫生组织和联合

国粮农组织重点关注的有毒重金属^[5-6]。无机砷(As)和六价铬(Cr⁶⁺)也被国际癌症研究中心列为 1 类致癌物,其致癌性与肾癌、肺癌和前列腺癌等密切相关^[7-8]。有证据显示^[9],过量摄入重金属(如 Hg、Pb、As、Cd 等)可能会破坏星形胶质细胞的稳态和神经保护功能,影响抗氧化机制和能量代谢,最终导致神经元损伤并引发神经退行性疾病。研究表明,Pb 暴露与骨痛、骨折风险增加相关,机制可能与影响维生素 D 代谢和骨转换有关^[10],Hg、Pb 和 Cd 等金属的联合暴露与股骨颈骨密度下降之间存在关联^[11]。此外,有毒金属离子会通过必需生物分子的相互作用,取代蛋白质、酶或骨骼和牙齿等组织中的重要金属离子,从而产生有害影响^[12-13]。

土壤重金属污染具有隐蔽性、累积性、难治理性和不可逆性的特点,重金属在土壤中不断蓄积,迁移和富集至农作物,再经食物进入人体,对人体健康产生威胁^[14-18]。无锡是江苏省下辖的地级市,位于长江三角洲中心地带,截至 2024 年底,常住人口为 750.5 万,国内生产总值为 16 263.29 亿元人民币。全年粮食播种面积为 82.78 千公顷,粮食总产量 56.80 万吨。稻米是无锡主要的粮食作物之一,大米也是居民主要的口粮,因此,监测和评估稻米的质量安全对于人体健康有重要意义。

有研究已对无锡地区市售谷物中重金属的污染状况和健康风险进行了评估^[9],但目前尚无关于无锡地区自产稻米中重金属含量和健康风险的研究,本研究旨在监测无锡市产稻米中重金属(Hg、Pb、As、Cd、Cr)的含量及污染状况,评估食用无锡市产稻米的健康风险,为农产品的质量安全治理提供数据支持。

1 材料与方法

1.1 样本采集及检测方法 2021—2024 年按照无锡市农村环境卫生监测工作方案,在无锡选择 A 县和 B 县作为水稻田水稻重金属项目监测县,每个监测县随机选择 5 个乡镇,每个乡镇随机选择 4 个行政村作为监测点,各市(县)采集 20 份水稻样本。稻谷样

品需保证 30 ~ 40 穗,约 500 g,现场将样本保存于自封口塑料袋中,记录稻米的采集位置并编号。采集的稻穗用蒸馏水清洗干净,自然晾晒至干燥、脱粒,脱壳制成精米,研磨成粉末状,装入 50 ml 康宁离心管中待测定。各目标元素按照《食品安全国家标准 食品中多元素的测定》(GB 5009.268—2016)中第一法 电感耦合等离子体质谱法(inductively coupled plasma mass spectrometry, ICP-MS)进行测定,并按《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2022)进行限量评价。实验过程中,在优化的仪器条件下,测量试剂空白、标准曲线系列、样品溶液和质控样品溶液,保证重金属结果的准确可靠。

1.2 仪器及试剂 Triple Quad 8900 型电感耦合等离子体质谱仪(美国 Agilent Technologies 公司);XS105DU 型万/十万分之一电子天平(瑞士梅特勒公司);Touchmin 2.0 型微波消解仪(中国奥普乐仪器有限公司);PURELAB ULTRA 纯水系统(英国 UK 公司)。

硝酸(UPS 级,晶瑞电子材料股份有限公司);双氧水(AR 级,国药集团);多元素标准溶液(Cr、As、Cd 和 Pb)(质量浓度:100 μg/ml,美国 PE 公司);单元素标准溶液(Hg)(质量浓度:10 mg/L,美国 PE 公司);内标元素贮备液(100 mg/L):钪(Sc)、锗(Ge)、铟(In)、铈(Rh)和铋(Bi)(美国 Agilent Technologies 公司)。

1.3 重金属污染状况的评价方法 采用单因子污染指数(P_i)和尼梅罗综合污染指数($P_{综合}$)对稻米中重金属污染状况进行评价^[20],公式如下:

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

$$P_{综合} = \sqrt[2]{(P_{avg}^2 + P_{max}^2)/2} \quad \text{公式(2)}$$

公式中: C_i 为样本中某金属的含量(mg/kg); S_i 代表重金属的限量值(mg/kg)。 P_{avg} 代表稻米中某元素单因子污染指数的平均值; P_{max} 为稻米中某元素单因子污染指数的最大值。评价方法参考 NY/T 398—2000《农、畜、水产品污染监测技术规范》执行。见表 1。

表 1 稻米重金属污染水平分级

Table 1 Grading of heavy metal contamination levels in rice

等级	单因子污染指数	污染程度	质量水平
1	$P_i \leq 0.6$	有污染物,污染物接近背景值或略高于背景值	安全
2	$0.6 < P_i \leq 1.0$	污染物残留量较多的样本	轻度污染
3	$P_i \geq 1.0$	污染产品,污染物超过限量标准	重度污染

1.4 重金属健康风险的评价方法 本研究采用美国环境保护署(United States Environmental Protection, Agency, US EPA)推荐的“四步法”健康风险评价模型^[21],评估无锡市产稻米中重金属的非致癌风险和致

癌风险。计算方法如公式(3)~(6):

$$ADD_{oral} = \frac{C \times IR \times EF \times ED}{BW \times AT \times 1000} \quad \text{公式(3)}$$

$$HQ = \frac{ADD_{oral}}{RfD} \quad \text{公式(4)}$$

$$HI = \sum HQ \quad \text{公式(5)}$$

$$RISK_i = ADD_{oral} \times SF \quad \text{公式(6)}$$

式中, ADD_{oral} : 经口途径非致癌日均暴露剂量 ($\text{mg}/\text{kg} \cdot \text{d}$)^[22]; C : 稻米中某重金属的浓度 (mg/kg); IR : 经口日均摄入稻米的量 (g/day); EF : 年暴露频率, $\text{d}/\text{年}$; ED : 持续暴露时间, 年; BW : 体重, kg ; AT : 暴露时长, 期望寿命 $\times 365$, 单位为 d 。 HQ : 非致癌效应的危险系数; HI : 多种重金属危害健康风险指数; $RISK$: 致癌效应的风险。 RfD : 参考剂量, $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$; SF : 致癌斜率因子, $[\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})]^{-1}$ 。

研究表明 $HQ \leq 1$ 时, 该污染物对暴露人群健康危害较小, 风险可接受; $HQ > 1$ 时, 该污染物对暴露人群健康危害较大, 需采取管控措施。 HI 为多种重金属的危害健康风险指数, 若 $HI > 1$ 则代表多种重金属产生的复合影响需要引起关注。 US EPA 认为, $RISK < 1 \times 10^{-6}$ 时风险可忽略; $RISK$ 在 $1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-4}$ 之间, 风险可接受; 若 $RISK > 1 \times 10^{-4}$, 风险为不可接受, 需要进一步管控。 人群暴露和毒理学相关参数见表 2、3。

表 2 健康风险模型人群暴露参数

Table 2 Population exposure parameters for the health risk model

参数	名称	单位	取值	文献
C	稻米中某重金属的浓度	mg/kg	本研究	本研究
IR	稻米日均摄入量	g/d	191	[19]
EF	年暴露频率	$\text{d}/\text{年}$	365	[19]
ED	持续暴露时间	年	70	[19]
BW	平均体重	kg	63.2	[19]
AT	暴露时长	d	82.54×365	2023 年度无锡市期望寿命

各重金属及类金属毒理学参数来源于加利福尼亚州环保局 (The California Environmental Protection Agency, CALEPA)^[23]、美国国家环保局综合风险信息查询系统(The Integrated Risk Information System, IRIS)^[24]及相关文献^[25]。见表 3。

表 3 重金属经口途径毒理学参数

Table 3 Toxicological parameters for heavy metals via the oral route

污染物	非致癌效应		致癌效应	
	RfD ($\text{mg}/\text{kg} \cdot \text{d}$)	文献	SF [$(\text{mg}/\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$]	文献
无机 As	0.000 3	[25]	1.5	[25]
Cd	0.000 5	IRIS	0.64	[25]
Cr ⁶⁺	0.003 0	[25]	0.27	IRIS
Hg	0.000 3	[25]	—	
Pb	0.001 4	[25]	0.008 5	CALEPA

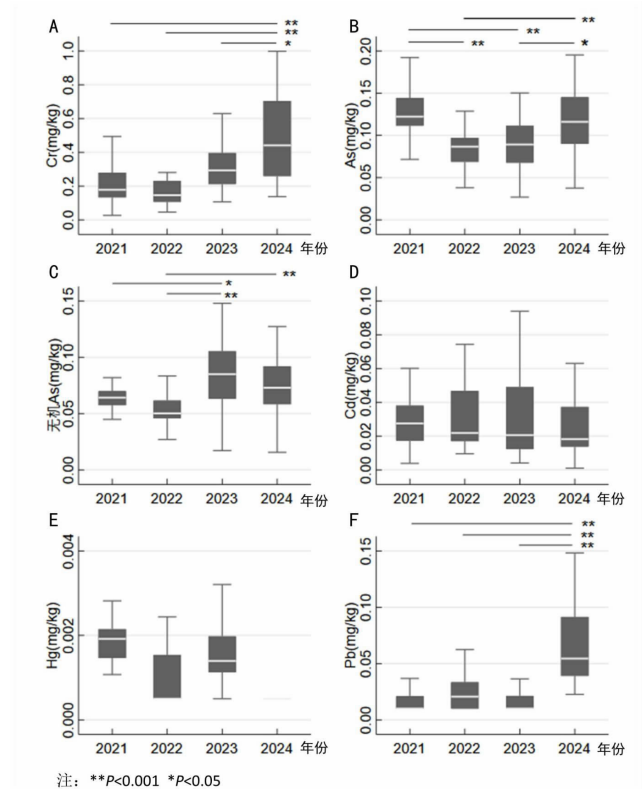
注: “—”表示该元素暂无致癌斜率因子。

1.5 数据处理 所有数据分析均采用 R 语言(版本 4.3.2)。低于检测限的浓度值以检测限的 1/2 替代。元素浓度以 $(\bar{x} \pm s)$ 或 $[M(P_{25}, P_{75})]$ 表示。对金属元素进行相关性分析, 计算相关系数; 对不同年份的金属元素浓度进行比较, 以检验水准 $\alpha=0.05$ 判断差异是否有统计学意义。本研究采用污染物均值计算健康风险。

2 结果

2.1 稻米中各重金属元素的含量及年度变化趋势

2021—2024 年无锡市产稻米中各重金属的检测结果见表 4, 其中 Cr、As 和无机 As 的年均检出率最高, 均为 100%, Hg 和 Pb 的年均检出率最低, 为 57.32%。2021、2023 和 2022 年 Pb 的检出率较低, 分别为 32.43%、40.00%、55.00%; 2024 年 Hg 的检出率最低, 为 0.00%。各重金属元素的平均浓度从高到低为: $\text{Cr} > \text{As} > \text{无机 As} > \text{Pb} > \text{Cd} > \text{Hg}$ 。Cr、无机 As、Pb、Cd 和 Hg 含量的年均值分别为: 0.311、0.070、0.035、0.032 和 0.002 mg/kg , 均低于《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2022) 规定的限量值。各元素的变异系数范围为 33.12% ~ 352.94%, 其中 As 的变异系数最小, 为 33.12%, Hg 的变异系数最大, 达到 352.94%, 说明 Cr、As、无机 As、Pb、Cd 和 Hg 含量的离散程度大, 分布不均。见图 1。



注: A ~ F 分别为 2021—2024 年稻米中元素 Cr、As、无机 As、Cd、Hg 和 Pb 年均含量的趋势。

图 1 2021—2024 年无锡市产稻米重金属含量年度变化趋势
Figure 1 Annual trend of heavy metal content in rice produced in Wuxi City (2021—2024)

表 4 2021—2024 年无锡市产稻米中重金属的监测结果($n=157$)Table 4 Monitoring results of heavy metals in rice production in Wuxi City, 2021—2024 ($n=157$)

年份(年)	元素	平均数 (mg/kg)	标准差 (mg/kg)	中位数 (mg/kg)	P_{25} (mg/kg)	P_{75} (mg/kg)	最小值 (mg/kg)	最大值 (mg/kg)	变异系数 (%)	检出率(%)
2021	Cr	0.236	0.171	0.178	0.133	0.279	0.026	0.691	72.49	100.00
	As	0.124	0.029	0.122	0.111	0.144	0.049	0.192	23.42	100.00
	无机 As	0.063	0.013	0.064	0.057	0.070	0.028	0.096	19.76	100.00
	Cd	0.032	0.026	0.028	0.017	0.038	0.004	0.149	79.82	100.00
	Hg	0.004	0.013	0.002	0.001	0.002	0.001	0.078	308.20	100.00
	Pb	0.021	0.022	0.010	0.010	0.021	0.010	0.100	105.51	32.43
2022	Cr	0.188	0.136	0.146	0.107	0.231	0.046	0.630	72.54	100.00
	As	0.085	0.027	0.087	0.069	0.097	0.038	0.159	31.63	100.00
	无机 As	0.054	0.016	0.050	0.046	0.062	0.027	0.113	29.70	100.00
	Cd	0.031	0.019	0.022	0.017	0.047	0.010	0.074	61.77	100.00
	Hg	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.001	0.004	66.59	47.50
	Pb	0.026	0.019	0.021	0.010	0.033	0.010	0.079	74.78	55.00
2023	Cr	0.323	0.147	0.293	0.212	0.396	0.107	0.694	45.48	100.00
	As	0.091	0.030	0.089	0.068	0.111	0.027	0.150	32.86	100.00
	无机 As	0.084	0.026	0.085	0.063	0.105	0.017	0.148	31.16	100.00
	Cd	0.034	0.031	0.021	0.012	0.049	0.004	0.153	93.13	100.00
	Hg	0.002	0.001	0.001	0.001	0.002	0.001	0.003	47.80	85.00
	Pb	0.024	0.032	0.010	0.010	0.021	0.010	0.179	135.78	40.00
2024	Cr	0.492	0.256	0.441	0.259	0.704	0.138	0.998	52.08	100.00
	As	0.116	0.036	0.116	0.090	0.145	0.038	0.195	30.70	100.00
	无机 As	0.077	0.025	0.073	0.058	0.092	0.016	0.127	32.81	100.00
	Cd	0.030	0.029	0.018	0.014	0.037	0.001	0.115	96.38	95.00
	Hg	0.001	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.00	0.00
	Pb	0.070	0.042	0.054	0.039	0.091	0.023	0.211	59.64	100.00
合计	Cr	0.311	0.216	0.247	0.153	0.406	0.026	0.998	69.61	100.00
	As	0.104	0.034	0.098	0.078	0.127	0.027	0.195	33.12	100.00
	无机 As	0.070	0.024	0.066	0.053	0.081	0.016	0.148	34.06	100.00
	Cd	0.032	0.027	0.022	0.014	0.044	0.001	0.153	83.63	98.73
	Hg	0.002	0.006	0.001	0.001	0.002	0.001	0.078	352.94	57.32
	Pb	0.035	0.036	0.021	0.010	0.045	0.010	0.211	102.97	57.32

2.2 稻米中各金属元素的相关性 金属元素之间的相关性反映了它们在中环境中可能具有共同的来源或相似的迁移转化路径,可为稻米中金属风险管控提供依据。本研究使用 R 语言(版本 4.3.2)对 157 份稻米样品中重金属含量进行了相关性分析,结果如图 2 所示:无机 As 和 As,无机 As 和 Cr, Cr 和 Pb 互为显著相关,协同作用强。Cd 和 As、无机 As 之间呈现弱相关,结果均有统计学意义($P<0.05$)。其他金属之间相

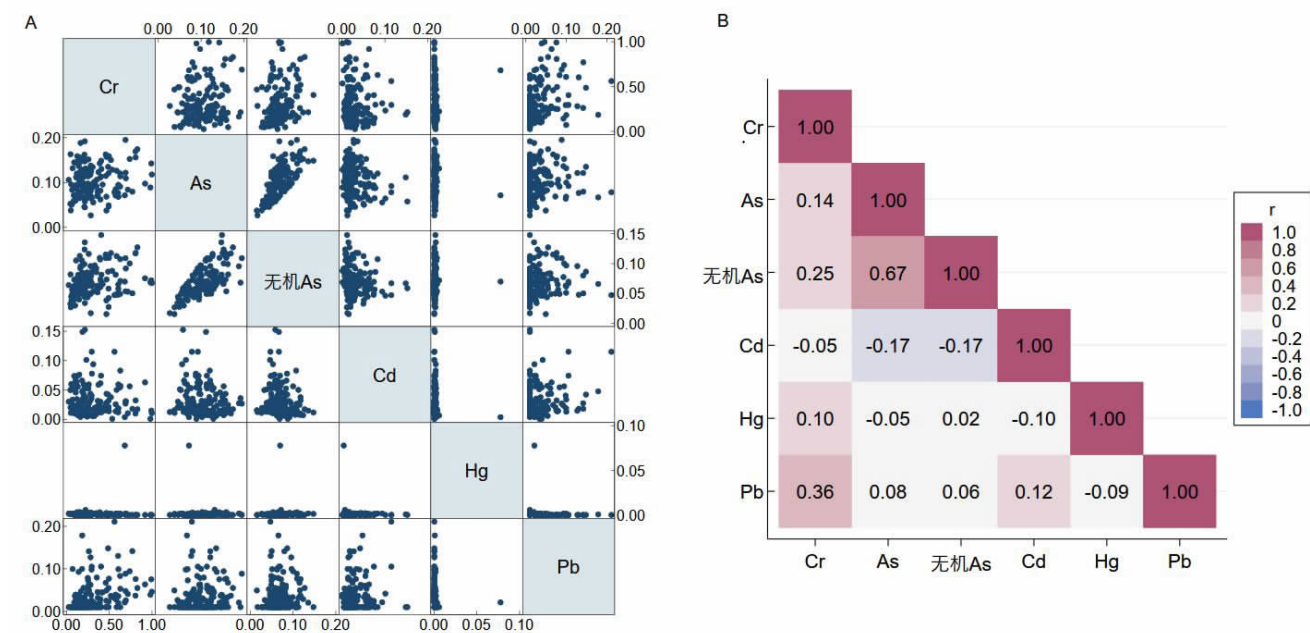
关性较弱。

2.3 稻米中各重金属元素的污染状况 采取单因子污染指数法和内梅罗综合污染指数法对稻米中重金属污染水平进行评价,见表 5。从单因子污染指数看,两个监测区域稻米中的重金属元素 P_i 都小于 0.6,均处于安全水平,稻米受重金属污染的水平排序为无机 As>Cr>Pb>Cd>Hg。根据内梅罗综合污染指数法计算,监测区域稻米中重金属的 $P_{综合}$ 均处于安全水平。

表 5 2021—2024 年无锡市产稻米中重金属的污染水平

Table 5 Heavy metal pollution levels in rice produced in Wuxi City, 2021—2024

地区	单因子污染指数(P_i)					内梅罗综合污染指数	污染水平
	总 Cr	无机 As	Cd	Hg	Pb		
A	0.333	0.346	0.143	0.108	0.148	0.373	安全
B	0.288	0.350	0.174	0.066	0.206	0.361	安全
合计	0.311	0.348	0.158	0.087	0.177	0.367	安全



注:A 为监测期间不同元素的分布情况;B 为监测期间不同元素的相关系数。

图 2 稻米中各重金属的相关性分析

Figure 2 Correlation analysis of heavy metals in rice

2.4 稻米中重金属对人体健康的风险评价

2.4.1 稻米中重金属对人体健康的致癌风险评价

根据公式 (6) 计算稻米中无机 As、Cd、Cr⁶⁺ 和 Pb 的 RISK, 结果见表 6, 无机 As、Cd、Cr⁶⁺ 和 Pb 分别为 2.68×10^{-4} 、 5.20×10^{-5} 、 3.07×10^{-5} 、 7.7×10^{-7} 。风险值从高到低为无机 As>Cd>Cr⁶⁺>Pb, 根据 US EPA 指导说明, 监测期间 Cd 和 Cr⁶⁺ 的致癌风险在可接受范围内, Pb 的致癌风险可忽略。无机 As 检测结果与其它地区的检测结果相近^[26], 虽含量没有超过限量标准, 但也存在一定健康风险。需注意, Cr 有 (Cr³⁺) 和

(Cr⁶⁺) 两种价态, Cr³⁺ 是人体必需微量元素, Cr⁶⁺ 的毒性远远高于 Cr³⁺, 因此在计算健康风险时, 以 Cr⁶⁺ 占 Cr 浓度的 1/7 作为转化比例^[27], 计算其风险系数。

2.4.2 稻米中重金属对人体健康的非致癌风险评价

由表 7 可见, Cr⁶⁺、无机 As、Pb、Cd 和 Hg 的 HQ 均小于 1, 风险处于可接受水平。分析全部样本得出, 无机 As 的非致癌风险最高, HQ 为 5.95×10^{-1} , Cd 的非致癌风险次之为 1.62×10^{-1} , 其余重金属的 HQ 大小依次为 Pb>Cr⁶⁺>Hg。多种重金属危害健康风险指数 HI 也均小于 1, 综合风险可接受。

表 6 稻米中重金属的致癌风险评估

Table 6 Cancer risk assessment of heavy metals in rice

风险	2021 年	2022 年	2023 年	2024 年	均值
Cr ⁶⁺	2.33×10^{-5}	1.86×10^{-5}	3.19×10^{-5}	4.86×10^{-5}	3.07×10^{-5}
无机 As	2.43×10^{-4}	2.09×10^{-4}	3.22×10^{-4}	2.94×10^{-4}	2.68×10^{-4}
Cd	5.29×10^{-5}	5.03×10^{-5}	5.54×10^{-5}	4.94×10^{-5}	5.20×10^{-5}
Pb	4.48×10^{-7}	5.57×10^{-7}	5.19×10^{-7}	1.53×10^{-6}	7.70×10^{-7}
合计	3.20×10^{-4}	2.78×10^{-4}	4.10×10^{-4}	3.94×10^{-4}	3.51×10^{-4}

表 7 稻米中重金属的非致癌风险评估

Table 7 Non-carcinogenic risk assessment of heavy metals in rice

HQ	2021 年	2022 年	2023 年	2024 年	均值
Cr ⁶⁺	2.88×10^{-2}	2.29×10^{-2}	3.94×10^{-2}	6.00×10^{-2}	3.80×10^{-2}
无机 As	5.41×10^{-1}	4.64×10^{-1}	7.15×10^{-1}	6.54×10^{-1}	5.95×10^{-1}
Cd	1.65×10^{-1}	1.57×10^{-1}	1.73×10^{-1}	1.54×10^{-1}	1.62×10^{-1}
Hg	3.47×10^{-2}	9.02×10^{-3}	1.33×10^{-2}	4.27×10^{-3}	1.49×10^{-2}
Pb	3.76×10^{-2}	4.68×10^{-2}	4.36×10^{-2}	1.29×10^{-1}	6.47×10^{-2}
HI	8.07×10^{-1}	7.00×10^{-1}	9.85×10^{-1}	1.00×10^1	8.75×10^{-1}

3 讨论

无锡地处江南水乡,大米是大部分居民的主食首选,2021—2024 年,无锡市产稻米的重金属浓度范围为 ND~0.998 mg/kg,浓度最高的为 2024 年的 Cr 元素。Cr、As 和无机 As 在监测期间的检出率,均达到了 100%。监测期间无机 As、Cr、Cd、Hg 和 Pb 元素的年均含量均达标。需要注意的是本研究选用 GB 2762—2022 作为限值标准,在该标准中糙米没有总 As 限值,而无机 As 要求不超过 0.35 mg/kg,后期应加强稻米及其他农产品中 As 成分的分析研究,为研制地方性食品卫生标准,助力国家级食品质量标准的完善,为食品质量监测提供依据。变异系数结果显示,无锡市产稻米中重金属浓度的分散程度较高,可能本研究的样本来源于不同的市县区,土壤重金属的背景值和种植技术的差异使不同位置重金属的含量差异较大,后续可重点关注浓度较大的监测点。

运用单因子污染指数及尼梅罗综合污染指数分析,结果显示,A 地区的综合污染水平略高于 B 地区但总体污染尚在安全范围内。

运用“四步法”模型评价无锡市产稻米中重金属的健康风险,结果显示无机 As 的 *RISK* 超过 1×10^{-4} , Cd、Cr⁶⁺ 的 *RISK* 在 $1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-4}$ 之间,致癌风险在可接受范围内,Pb 的 *RISK* $< 1 \times 10^{-6}$,致癌风险可忽略;Cr⁶⁺、无机 As、Pb、Cd 和 Hg 的 *HQ* 均小于 1,多种重金属的危害健康风险指数 *HI* 也小于 1,表明长期暴露不太可能对健康产生不良影响。

本研究仍存在一定的局限性。未计算 Hg 的致癌风险,主要是致癌斜率因子的不可获得(Hg),不能准确计算该金属的致癌风险,需加强文献阅读和研究,以明确风险。文中 AT 的期望寿命定值为 2023 年无锡市期望寿命,若根据其他文献中定的 70 年,计算出的风险将更高,这一点值得注意。另外 Cr³⁺ 和 Cr⁶⁺ 的风险差异巨大,Cr⁶⁺ 的毒性远高于 Cr³⁺,Cr³⁺ 是人体必需的微量营养素,另外 Cr⁶⁺ 则被国际癌症研究机构列为 I 类致癌物,可通过消化、呼吸道、皮肤和粘膜侵入人体,因此本研究在文献的基础上对 Cr⁶⁺ 直接进行了转换,评估了 Cr⁶⁺ 对健康产生的风险。但未对 Cr³⁺ 和 Cr⁶⁺ 的含量分别进行测量,仅通过查阅文献对 Cr⁶⁺ 直接进行了转换,未来的研究应侧重于价态研究,以提供更准确的 Cr⁶⁺ 和总铬的风险评估。

利益冲突声明 本研究不存在任何利益冲突

参考文献

[1] Teschke R, Xuan TD. Heavy metals like Aluminum, Arsenic, Cadmium, Chromium, Copper, Iron, Lead, Manganese, Mercury, Nickel, and Zinc polluting the drinking water: their individual health hazards [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2025, 26

(23): 11656.

- [2] Chen L, Zhang X, Zhou X, et al. Environmental surveillance of the health risk of PM_{2.5}-bound metals and metalloids in Wuxi, China, from 2020 to 2023[J]. Front Public Health, 2025, 13: 1599702.
- [3] Kumari S, Jain MK, Elumalai SP. Assessment of pollution and health risks of heavy metals in particulate matter and road dust along the road network of dhanbad, India [J]. Journal of Health and Pollution, 2021, 11(29): 210305.
- [4] Choi SH, Choi SW, Kim DY, et al. Evaluation of health risk from concentrations of heavy metal in PM-10 and PM-2.5 particles at sasang industrial complex of busan, Korea [J]. Journal of Environmental Analysis, Health and Toxicology, 2021, 24 (3): 133-148.
- [5] 李林艳,朱明元. 我国大米、蔬菜中铅镉污染监测的研究进展[J]. 实用预防医学,2011,18(9):1812-1813.
- Li LY, Zhu MY. Research progress on monitoring lead and cadmium pollution in rice and vegetables in China [J]. Practical Preventive Medicine, 2011, 18(9): 1812-1813.(In Chinese)
- [6] WHO. Application of risk analysis to food standards issues[R]. Geneva: WHO, 1995.
- [7] Chen CJ, Chen CW, Wu MM, et al. Cancer potential in liver, lung, bladder and kidney due to ingested inorganic Arsenic in drinking water[J]. British Journal of Cancer, 1992, 66(5): 888-892.
- [8] Toxicity CM, Cr CO. (VI)in animal models and humans [J]. Critical Reviews in Toxicology, 1997, 27(5): 431-442.
- [9] Li BM, Xia MS, Zorec R, et al. Astrocytes in heavy metal neurotoxicity and neurodegeneration[J]. Brain Research, 2021, 1752: 147234.
- [10] Mohammed RS, Mourad BH. The association between occupational Lead exposure and serum levels of vitamin D3 and a bone turnover biomarker in smelter workers [J]. International Archives of Occupational and Environmental Health, 2025, 98(3): 297-307.
- [11] Yang X, Li L, Nie L. Associations between coexposure to heavy metals and vertebral compression fracture,as well as femoral neck bone mineral density: A cross-sectional study from NHANES data[J]. PLOS One, 2024, 19(5): e0303418.
- [12] Witkowska D, S owik J, Chilicka K. Heavy metals and human health: possible exposure pathways and the competition for protein binding sites[J]. Molecules, 2021, 26(19): 6060.
- [13] Peana M, Pelucelli A, Medici S, et al. Metal Toxicity and speciation: A review[J]. Curr Med Chem, 2021, 28(35): 7190-7208.
- [14] 王晶云. 长沙望城区土壤-水稻系统重金属污染、迁移及风险评估[D]. 长沙:中南林业科技大学,2016.
- Wang JY. Pollution, migration and risk assessment of heavy metal in soil-rice system in Wangcheng distret of Changsha City [D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2016.(In Chinese)
- [15] Wang X, Liu L, Xie K, et al. Cross-regional assessment of heavy metal contamination and Cd exceedance risk in specialty vegetable-producing soils across China[J]. Environmental Research, 2026, 11: 124540.
- [16] Zhang Y, Li X, Kong F, et al. Trace metal pollution and ecological effects on five crops around a typical Manganese mining area in Chongqing,China[J]. Scientific Reports, 2026, 16(1): 6660.
- [17] Xu H, Han Q, Adnan M, et al. Global environmental geochemistry and molecular speciation of heavy metals in soils and groundwater

(下转第 2785 页)

- [15] Jiao YH, Tao YW, Du WZ, et al. Successful interdisciplinary retreatment after initial treatment failure in a cleft lip adolescent[J]. BMC Oral Health, 2025, 25(1): 675.
- [16] 国家卫生健康委.《健康儿童行动计划(2021—2025 年)》[EB/OL]. [2026-06-02]. <https://www.nhc.gov.cn/fys/c100078/202111/a89349aa60f94019bf93648ff377061b.shtml>. National Health Commission. Action plan for healthy children (2021–2025) [EB/OL]. [2026-06-02]. <https://www.nhc.gov.cn/fys/c100078/202111/a89349aa60f94019bf93648ff377061b.shtml>. (In Chinese)
- [17] Ahern DT, Bansal P, Faustino IV, et al. Isogenic hiPSC models of Turner syndrome development reveal shared roles of inactive X and Y in the human cranial neural crest network [J]. The American Journal of Human Genetics, 2025, 112(3): 615–629.
- [18] Azoulay L, Bouvattier C, Christin-Maitre S. Impact of intra-uterine Life on future health [J]. Annales d Endocrinologie, 2022, 83(1): 54–58.
- [19] Briffa JF, Gravina S, Richter VF, et al. Impact of diet and exercise in growth restricted female rats on nephron endowment in male fetuses [J]. Experimental Physiology, 2025, 111(3): 1365–1386.
- [20] Sivak E, Smirnov I. Parents mention sons more often than daughters on social media[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2019, 116(6): 2039–2041.
- [21] 国家卫生健康委.《对十四届全国人大三次会议第 3599 号建
- 议的答复》[EB/OL]. [2026-06-02]. <https://www.nhc.gov.cn/wjw/jiany/202507/c05b4b48af9c46098604f92b4ad0cbcd.shtml>. National Health Commission. Reply to Proposal No. 3599 of the Third Session of the 14th National People's Congress [EB/OL]. [2026-06-02]. <https://www.nhc.gov.cn/wjw/jiany/202507/c05b4b48af9c46098604f92b4ad0cbcd.shtml>. (In Chinese)
- [22] Pethő B, Váncsa S, Vári A, et al. Very young and advanced maternal age strongly elevates the occurrence of nonchromosomal congenital anomalies: a systematic review and meta-analysis of population-based studies [J]. American Journal of Obstetrics and Gynecology, 2024, 231(5): 490–500.e73.
- [23] Taylor L, Hood A, Mancuso F, et al. Effects of assisted reproductive technology on genetics, obstetrics, and neonatal outcomes [J]. NeoReviews, 2025, 26(2): e89–e99.
- [24] Chattopadhyay M, Mukherjee A, Sahana PK. Clinical and genotypic insights into turner syndrome: emphasis on cardiovascular abnormalities[J]. J ASEAN Fed Endocr Soc, 2025, 40(2): 132–137.
- [25] 李晓华, 轩妍, 郭朝金, 等. 海南省 2016–2021 年围产儿出生缺陷分析[J]. 现代预防医学, 2025, 52(8): 1412–1417.
- Li XH, Xuan Y, Guo CJ, et al. Analysis of birth defects in perinatal infants, Hainan Province, 2016–2021 [J]. Modern Preventive Medicine, 2025, 52(8): 1412–1417. (In Chinese)

收稿日期: 2025-11-13

(上接第 2751 页)

- from abandoned smelting sites: analysis of the contamination dynamics and remediation alternatives in karst settings [J]. Toxics, 2025, 13(7): 608.
- [18] 黄京柠. 江西省 H 县某典型种植区域多种农作物对土壤重金属富集吸收能力分析[D]. 上海: 上海海洋大学, 2025.
- Huang JN. Analysis on soil heavy metal enrichment and absorption capacity of various crops in a typical planting area of H County, Jiangxi Province[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2025. (In Chinese)
- [19] 刘萍, 任梁, 周伟杰, 等. 无锡市谷物重金属污染状况及健康风险评估[J]. 中国食品卫生杂志, 2024, 36(4): 420–425.
- Liu P, Ren L, Zhou WJ, et al. Pollution status and health risk assessment of heavy metals in grains in Wuxi city[J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2024, 36(4): 420–425. (In Chinese)
- [20] 关伯仁. 评内梅罗的污染指数 [J]. 环境科学, 1979, (4): 67–71.
- Guan BR. Evaluation of Nemerow's pollution index[J]. Environmental Science, 1979, (4): 67–71. (In Chinese)
- [21] Risk Assessment Guidance for Superfund. Volume I: Human health evaluation manual (Part A) [M]. Washington, DC: Office of Emergency and Remedial Response, 1989.
- [22] 黄永川, 曾婷婷, 付婷婷, 等. 重庆产玉米中重金属污染状况及健康风险评估 [J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(22): 222–229.
- Huang YC, Zeng TT, Fu TT, et al. Heavy metal pollution status and health risk assessment of Zea mays L. produced in Chongqing[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16 (22): 222–229. (In Chinese)
- [23] CALEPA. OEHA Acute, 8-hour and chronic reference exposure level (REL) summary [EB/OL]. [2026-05-10]. <https://oeha.ca.gov/>.
- [24] IRIS. IRIS advanced search [EB/OL]. [2026-05-10]. <https://www.epa.gov/iris>.
- [25] 洪宇伟, 薛鸣, 王磊, 等. 2017–2024 年富春江流域某地区生活饮用水中金属及类金属经口摄入健康风险评估[J]. , 2025, 42 (11): 1322–1329.
- Hong YW, Xue M, Wang L, et al. Health risk assessment of oral exposure to metals and metalloids in drinking water supplies within a region of Fuchun River Basin from 2017 to 2024 [J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2025, 42 (11): 1322–1329. (In Chinese)
- [26] 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 YL, Liu JL, 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. (In Chinese)
- [27] EPA. Regional screening levels (RSLs) [EB/OL]. [2026-05-10]. <https://www.epa.gov/risk/regional-screening-levels-rsls-users-guide>.

收稿日期: 2026-01-22