·调查报告与分析·

重庆万州土壤水稻重金属迁移与健康风险评估

程龙凤[1]，刘汉林[1]，李成根[1]，唐永琼[1]，黄祥强[1]，向恋[1]，童磊[2]，黎吉[1]

1. 重庆市万州区疾病预防控制中心环境与食品卫生科，重庆 404000；
2. 重庆三峡医药高等专科学校公共卫生与管理学院，重庆 404000
通信作者：黎吉，E-mail：362856818@qq.com

【摘　要】目的 探究重庆市万州区土壤及稻谷中铅(Pb)、镉(Cd)、铬(Cr)、汞(Hg)、砷(As)、铜(Cu)、锌(Zn)和镍(Ni)的迁移特征，并对其可能存在的健康风险进行评估，为制定科学的防控策略提供数据支撑。**方法** 2023 年 8—9 月，基于前期土壤监测数据，在重庆万州区选取 5 个具有代表性的区域，采取分层抽样，设置 25 个采样点，结合地积累指数法和潜在生态风险法评价土壤污染状况，在每个采样点，挑选成片的稻田，并采集相应的土壤和稻谷样本，每种样本各 25 份。同时通过生物富集系数与健康风险评估模型，对重金属元素的迁移特性及其对人体健康的潜在影响进行分析。**结果** 共采集 25 份土壤样品，以酸性土壤为主。除锌(Zn)外，其余重金属均值均未超过土壤背景值。其中 3 个点位的镉(Cd)超过风险筛选值，但未超过风险管制值，其余重金属均未超过风险筛选值。汞(Hg)的变异系数最大且>1(1.03)，表明其分布非常不均匀。地积累指数评价显示土壤总体无污染。生态风险评估表明，汞(Hg)和镉(Cd)对生态危害的贡献率最高分别为 44.65% 和 36.76%。25 份稻谷样本中，铬(Cr)的超标率最高为 80.00%，其次是汞(Hg)、砷(As)和镉(Cd)均为 12.00%。富集系数分析显示，镉(Cd)和汞(Hg)在稻谷中的富集系数较高为 0.341 和 0.329。健康风险评估表明，除了砷(As)外，其他重金属的慢性健康风险较低，但稻谷中重金属的联合健康风险可能对人体健康产生慢性影响(均值为 3.53)。**结论** 重庆市万州区土壤水稻存在一定程度的 Cd 和 Hg 迁移污染，砷(As)可能对人体有慢性健康效应，存在多种金属协同影响效应。

【关键词】 土壤；水稻；重金属污染；迁移特征；健康风险评估；重庆市万州区

Heavy metal transfer in soil-rice systems and health risk assessment in Wanzhou, Chongqing

CHENG Longfeng[1], LIU Hanlin[1], LI Chenggen[1], TANG Yongqiong[1], HUANG Xiangqiang[1], XIANG Lian[1], TONG Lei[2], LI Ji[1] (*1. Environmental and Food Hygiene Section, Wanzhou District Center for Disease Control and Prevention, Chongqing* 404000, *China*; *2. School of Public Health and Management, Chongqing Three Gorges Medical College, Chongqing* 404000, *China*)
Corresponding author: LI Ji, E-mail: 362856818@qq.com

【Abstract】 Objective To investigate the migration characteristics of lead (Pb), cadmium (Cd), chromium (Cr), mercury (Hg), arsenic (As), copper (Cu), zinc (Zn), and nickel (Ni) in soil and rice in Wanzhou district, Chongqing city, and to assess their potential health risks, providing data support for the formulation of scientific prevention and control strategies. **Methods** Based on previous soil monitoring data, five representative areas were selected in Wanzhou district, Chongqing city, in August - September 2023. A stratified sampling method was used to establish 25 sampling points. The geo-accumulation index and potential ecological risk index methods were used to evaluate soil pollution. At each sampling point, contiguous paddy fields were selected, and corresponding soil and rice samples were collected, with 25 samples for each. The migration characteristics of heavy metals and their potential impact on human health were analyzed using the bioconcentration factor and health risk assessment model. **Results** A total of 25 soil samples were collected, mostly acidic. Except for zinc (Zn), the average values of other heavy metals did not exceed the soil background values. Cadmium (Cd) exceeded the risk screening value at three sampling points but did not exceed the risk control value; other heavy metals did not exceed the risk screening value. Mercury (Hg) had the largest coefficient of variation, > 1 (1.03), indicating its highly uneven distribution. The geo-accumulation index assessment showed no overall soil pollution. Ecological risk assessment indicated that Hg and Cd contributed the most to ecological hazards, at 44.65% and 36.76%, respectively. Among the 25 rice samples, Cr had the highest over-standard rate at 80.00%, followed by Hg, As, and Cd,

开放获取：CC BY-NC-ND 4.0 DOI：10.11847/zgggws1146151
基金项目：重庆市万州区科卫联合医学科研项目(wzstc-kw2022018)；重庆市教育委员会科学技术研究项目(KJQN202202709)；重庆市万州区公共卫生重点学科建设项目(万州卫〔2022〕63 号)；重庆市公共卫生重点专(学)科建设项目。
第一作者：程龙凤(1988—)，副主任医师，硕士，研究方向：环境与食品卫生。
收稿日期：2024-10-31 修回日期：2024-11-28 录用日期：2025-04-12
利益冲突：不存在 伦理审查：免除审查 出版授权：全体作者已与编辑部签署作者贡献声明及版权转让协议

all at 12.00%. Enrichment factor analysis showed that Cd and Hg had higher enrichment factors in rice, at 0.341 and 0.329, respectively. Health risk assessment showed that, except for As, other heavy metals posed low chronic health risks, but the combined health risk of heavy metals in rice may have chronic effects on human health (mean = 3.53). **Conclusions** There is a certain degree of Cd and Hg migration pollution in the soil and rice of Wanzhou district, Chongqing city. Arsenic (As) may have chronic health effects on humans, and there may be synergistic effects of multiple metals.

【**Keywords**】 soil; rice; heavy metal pollution; migration characteristics; health risk assessment; Wanzhou district, Chongqing city

工业化、城市化和现代化农业生产带来了严峻的农田土壤污染问题[1]。2014 年《全国土壤污染状况调查公报》[2] 显示，我国耕地土壤的点位超标率为 19.4%，主要污染物为重金属，其中镉（Cd）、镍（Ni）、砷（As）、铜（Cu）、汞（Hg）、铅（Pb）、铬（Cr）、锌（Zn）的超标率分别为 7.0%、4.8%、2.7%、2.1%、1.6%、1.5%、1.1%、0.9%。有研究显示重庆市万州区农村土壤中存在一定程度的镉（Cd）污染且有轻度生态风险[3]。土壤中的重金属通过稻谷的吸收和转运，可能影响到稻谷的食用安全[4]。经口摄入重金属是主要的人体重金属暴露途径，因此农田土壤重金属污染对食品安全和人体健康构成巨大的威胁[5]。目前，重庆市万州区对土壤中重金属在稻谷中的迁移特性以及对的人群健康风险评估研究较少。本研究以重庆市万州区代表性乡镇为研究对象，于 2023 年采集并检测分析土壤及稻谷样本中 8 种重金属浓度和迁移情况，并评价对人体健康影响的潜在风险，为制定有效的控制措施提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况　万州区位于重庆市东北部，是三峡库区的中心地带，地理坐标介于北纬 30°23′50″至 31°0′18″、东经 107°52′22″至 108°53′52″。总面积为 3 457 km^2，行政区划包括 14 个街道、27 个镇和 11 个乡。气候属于亚热带季风气候，四季分明，年均温度为 18.2 ℃，年均降水量达到 1 155.8 mm，汛期集中在 5—9 月[6]。至 2023 年，该区域拥有耕地总面积 860.03 km^2，水田占其中的 306.55 km^2（约 35.64%），而旱地则为 553.48 km^2（约 64.36%）。土壤类型主要包括紫色土、水稻土和黄壤[7]。本研究将李河镇、龙驹镇、龙沙镇、燕山乡和罗田镇作为调查地理范围。

1.2 样品采集　采样点首选在万州区前期监测中存在镉（Cd）超标的乡镇（李河镇、龙驹镇、龙沙镇、燕山乡）和行政村，同时在乡镇内设置了对照点和一个对照乡镇（罗田镇）。共布设 5 个乡镇，25 个采样点。在每个采样点，挑选成片的稻田，并采集相应的土壤和稻谷样本，每种样本各 25 份。采样时间为 2023 年 8—9 月，正值水稻成熟的季节。土壤样本的采集严格遵循《土壤环境监测技术规范：HJ/T166—2004》[8]，在 5～20 cm 的深度范围内，采用梅花布点法在 1 m^2 的面积内均匀采集土壤，并使用四分法缩分，最终保留 1 kg 土壤作为 1 份样本。稻谷样本在混合后也经过四分法缩分，保留 500 g 作为一份样本，并做好采样记录。

1.3 样品检测指标、方法与质量控制（表 1）　土壤和稻谷检测指标均采用标准方法。仪器电感耦合等离子体质谱仪 NexION 2000（美国 PE），全自动直接测汞仪 MAX-S（莱伯泰科），多参数测试仪 pH 计（梅特勒托利多）。主要使用硝酸 [赛默飞世尔科技（中国）有限公司] 和盐酸 [（优级纯）成都市科隆化学品有限公司]。所用仪器设备均经过检定校准，标准品均在合格有效期内。采样检测人员均统一培训，并要求双人同时进行。检测时采取实验室空白样，平行样和加标回收等质控手段，质控结果均在合格范围内。检测结果经过 3 级审核后进行最终结果报送。

表 1 土壤和稻谷检测指标与方法
Table 1 Detection indicators and methods for soil and rice

样品类型	检测指标	检测方法	检测方法代号
土壤	pH	土壤pH测定	NY/T 1377—2007[9]
	Hg	土壤和沉积物总汞的测定催化热解–冷原子吸收分光光度法	HJ 923—2017[10]
	Pb、Cd、Cr、As、Cu、Zn、Ni	土壤和沉积物 12种金属元素的测定王水提取–电感耦合等离子体质谱法	HJ 803—2016[11]
稻谷	Hg	食品中总汞及有机汞的测定第二法直接测汞法	GB 5009.17—2021 第二法[12]
	Pb、Cd、Cr、As、Cu、Zn、Ni	食品中多元素的测定电感耦合等离子体质谱法	GB 5009.268—2016 第一法[13]

1.4 评价方法

1.4.1 地累积指数法[14] 计算公式：$I_{geo}=\log_2(C_i/1.5B_i)$ I_{geo} 为地累积指数，C_i 是稻田土壤中 i 元素的浓度，B_i 是重庆市 i 元素土壤背景值[15]（由土地质量地球化学调查数据统计得出），校正因子取 1.5。地累积指数与污染程度分级为：无，$I_{geo}\leqslant 0$；轻度，$0<I_{geo}\leqslant 1$；中度，$1<I_{geo}\leqslant 2$；中～重度，$2<I_{geo}\leqslant 3$；重度，$3<I_{geo}\leqslant 4$；重度～极重，$4<I_{geo}\leqslant 5$；极重，$I_{geo}<5$。

1.4.2 潜在生态危害指数法[16]（表 2） 计算公式：$E_i=T_i\times(C_i/S_i)$ $RI=\Sigma E_i$ E_i 为 i 元素的单项潜在生态危害指数；T_i 是土壤 i 元素的毒性系数；C_i 是土壤中 i 元素的浓度，S_i 是重庆市 i 元素土壤背景值；RI 指多种重金属在土壤中的综合潜在生态危害指数。重金属的毒性响应系数分别为 Zn(1)、Cr(2)、Cu(5)、Ni(5)、Pb(5)、As(10)、Cd(30)、Hg(40)。

表 2 潜在生态风险程度分级
Table 2 Classification of potential ecological risk levels

单项潜在生态危害指数(E_i)	综合潜在生态危害指数(RI)	风险等级
≤40	≤150	轻度危害
41～80	151～300	中度危害
81～160	301～600	强度危害
161～320	601～1 200	很强危害
>320	>1 200	极强危害

1.4.3 稻谷生物富集系数[17] 生物富集系数是衡量植物对重金属吸收能力的指标。具体计算公式如下：

$$BCF=C_{rice}/C_{soil}$$

BCF 为生物富集系数，C_{ric} 是稻谷中重金属的浓度，C_{soil} 是重金属在相应土壤中的浓度。*BCF* 值>1 表明植物对重金属有显著的富集作用。

1.4.4 稻谷重金属的人群健康风险评估[18] 具体评价步骤如下：

（1）暴露量计算：通过计算每日摄入量（Estimated Daily Intake, *EDI*）来量化重金属一定时间内经口摄入的暴露量，计算公式：

$$EDI=\frac{C_i\times IR}{BW}$$

EDI 为重金属经稻谷每日摄入量，mg/kg/d；C_i 为稻谷中 i 元素的含量，mg/kg；IR 为是每日对稻谷的消费量，根据 2018 年重庆市居民消费量调查结果大米消费量成人 0.213 kg/d；BW 为成人平均体重，根据 2019 年万州区慢性病及危险因素监测结果为 60.8 kg。

（2）健康风险评估：目标危险商 THQ 用于估计与长期食用受某种重金属污染大米的潜在健康风险。危险指数（Hazard Index, HI）为多种重金属的协同健康风险。计算公式：

$$THQ=EDI/RfDHI=\sum_{i=1}^{n}THQ$$

EDI，每种重金属的每日摄入量，mg/kg/d；*RfD*，每种重金属暴露参考剂量取值 As（0.000 3）、Cd（0.001）、Cr（1.5）、Cu（0.04）、Hg（0.000 3）、Ni（0.02）、Pb（0.004）、Zn（0.3），mg/kg/d（USEPA，2014）。HI≤1 表明无明显的健康影响；HI>1 表明对人体健康产生影响的可能性大；HI>10 表明存在慢性毒性效应。

1.4.5 土壤和稻谷重金属含量评价 采用《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准（试行：GB 15618—2018）》[19] 对土壤重金属含量进行评价。25 份稻谷样品，用《食品安全国家标准 食品中污染物限量：GB 2762—2022》[20] 进行评价。

1.5 统计分析 应用 Excel2013 数据录入，SPSS 19.0 软件进行统计分析。当检测数据低于检出限时，以检出限的 1/2 带入计算；应用描述性分析、Pearson 相关性分析和单因素方差分析，以 $P<0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结 果

2.1 土壤重金属含量与污染特征（表 3） 本次研究共采集 25 份稻田土壤样品，土壤 pH 范围为 4.70～7.60，平均值为 5.99，其中 24 份样品 pH<7，占比 96.00%。土壤中 8 种重金属平均含量（以 mg/kg 计）分别为 Pb(20.14)、Hg(0.05)、As(6.18)、Cr(60.24)、Cd(0.27)、Cu(16.02)、Ni(25.65)、Zn(90.46)。其中 3 个点位（12.00%）的 Cd 含量超过风险筛选值，含量最高的点位在龙沙镇青龙村，但均未超过风险管制值，其余重金属含量均未超过风险筛选值。除 Zn 平均浓度超背景值 1.10 倍以外，其余重金属平均浓度均未超过土壤背景值。从具体点位来看，不同重金属超背景值点位占比情况为 Zn（60.00%）>As（44.00%）>Cd（36.00%）>Hg（12.00%）>Ni（8.00%）>Cu（4.00%）>Pb、Cr（0.00%）。Hg、Zn、Cd、Cu、Ni 最高值超背景值倍数分别为 4.42、2.48、1.82、1.71、1.53、1.06。不同重金属变异系数分布情况 Hg（103.92%）>Zn（60.00%）>Cu（36.00%）>Cd（32.68%）>As（26.90%）>Ni（19.39%）>Pb（17.92%）>Cr（15.90%）。

稻田土壤 pH 与 8 种重金属含量相关性分析，pH 与 Cu 和 Zn 浓度呈正相关（$P<0.05$）。土壤中 Pb 与 Hg 含量呈正相关（$P<0.05$），Pb 与 As、Cd、Ni、Cr 浓度呈正相关（$P<0.01$）。As 与 Cr 浓度呈正相关（$P<0.05$），与 Ni 浓度呈正相关（$P<0.01$）。Cr 与 Ni 含量呈正相关（$P<0.01$）。Cu 和 Zn 浓度呈正相关（$P<0.01$）。

表 3 稻田土壤中 8 种重金属含量和 pH 检测结果
Table 3 Detection results of 8 heavy metal contents and pH in paddy soil

项目	pH值	Pb	Hg	As	Cr	Cd	Cu	Ni	Zn
最小值/(mg/kg)	4.70	12.60	0.02	2.94	26.80	0.12	8.90	11.00	19.80
最大值/(mg/kg)	7.60	26.70	0.31	10.10	71.40	0.51	42.00	33.40	203.00
平均值/(mg/kg)	5.99	20.14	0.05	6.18	60.24	0.27	16.02	25.65	90.46
中位数		20.10	0.04	5.88	60.00	0.26	14.50	26.00	85.20
标准差		3.61	0.06	1.66	9.58	0.09	6.48	4.97	34.69
变异系数/%		17.92	103.92	26.90	15.90	32.68	40.43	19.39	38.35
超风险筛选值样本率/%		0.00	0.00	0.00	0.00	12.00	0.00	0.00	0.00
超过重庆背景值的样本率/%		0.00	12.00	44.00	0.00	36.00	4.00	8.00	60.00
重庆土壤背景值/(mg/kg)		28.10	0.07	6.62	74.40	0.28	24.60	31.60	81.90
农用地风险筛选值	≤5.5	80.00	0.50	30.00	250.00	0.30	50.00	60.00	200.00
农用地风险筛选值	5.5～6.5	100.00	0.50	30.00	250.00	0.40	50.00	70.00	200.00
农用地风险筛选值	6.5～7.5	140.00	0.60	25.00	300.00	0.60	100.00	100.00	250.00
农用地风险筛选值	>7.5	240.00	1.00	20.00	350.00	0.80	100.00	190.00	300.00

2.2 土壤重金属污染程度与潜在生态风险分析　Pb、Cd、Cr、Hg、As、Cu、Ni、Zn 地累积指数的平均值分别为–1.07、–0.66、–0.89、–0.97、–0.68、–1.20、–0.89、–0.44。其中 Cd 轻度污染点位占比 4.00%(1/25)。Hg 中度污染点位占比 4.00%(1/25)。As 轻度污染点位占比 4.00%(1/25)。Cu 轻度污染点位占比 4.00%(1/25)。Zn 轻度污染点位占比 8.00%(2/25)。不同重金属 E_i 的平均值 Hg(30.62)>Cd(28.41)>As(9.33)>Ni(4.06)>Pb(3.58)>Cu(3.26)>Cr(1.62)>Zn(1.11)，均<40。Cd 和 Hg 潜在生态危害较高，不同重金属的 E_i 差异有显著性，F=26.702，P=0.000。RI 范围为 46.40～243.32，平均值为 82.00。其中中度危害点位占比 4.00%(1/25)，不同金属对 RI 的贡献率分别为 Hg(37.34%)>Cd(34.65%)>As(11.38%)>Ni(4.95%)>Pb(4.37%)>Cu(3.98%)>Cr(1.98%)>Zn(1.34%)。

2.3 稻谷重金属污染特征(表 4)　稻谷中 Pb、Hg、As、Cr、Cd、Cu、Ni、Zn 的平均浓度分别为 0.056、0.012、0.218、1.557、0.073、2.060、0.962 和 16.161 mg/kg。Cr 超标率最高为 80.00%(20/25)，其次是 Hg、As、Cd 超标率均为 12.00%(3/25)。相关性分析结果显示，稻谷中的 Pb 与 Cu 浓度呈正相关(P<0.05)；Cr 与 Cu 浓度呈正相关(P<0.05)，与 Zn 呈正相关(P<0.01)，与 Ni 呈正相关(P<0.01)。Cd 与 Cu 和 Zn 呈正相关(P<0.01)。Cu 与 Ni 呈正相关(P<0.05)，与 Zn 呈正相关(P<0.01)。Ni 与 Zn 中呈正相关(P<0.01)。

表 4 稻谷中 8 种重金属含量检测结果
Table 4 Detection results of eight heavy metals in rice

项目	Pb	Hg	As	Cr	Cd	Cu	Ni	Zn
最小值/(mg/kg)	0.014	0.002	0.010	0.010	0.003	0.343	0.150	1.060
最大值/(mg/kg)	0.107	0.064	0.794	2.820	0.306	3.510	1.890	27.400
平均值/(mg/kg)	0.056	0.012	0.218	1.557	0.073	2.060	0.962	16.161
标准差	0.019	0.012	0.159	0.698	0.084	0.783	0.396	5.853
GB 2762—2022限值/(mg/kg)	0.2	0.02	0.35	1.0	0.2			
超标率/%	0.00	12.00	12.00	80.00	12.00			

2.4 重金属在稻谷中的富集特征　8 种重金属的富集系数的平均值为 Cd(0.341)> Hg(0.329)> Zn(0.208)> Cu(0.141)>Ni(0.039)>As(0.034)> Cr(0.027)> Pb(0.003)。其中 Cd 富集系数最大值为 1.667，12.00%(3/25)点位富集系数>1。Hg 富集系数最大值为 2.222，8.00%(2/25)点位富集系数>1。

2.5 稻谷重金属健康风险评估(表 5)　单个金属元素的目标危险商 THQ 的平均值为 As(2.55)> Cd(0.26)>Zn(0.19)>Cu(0.18)>Ni(0.17)>Hg(0.13)> Pb(0.05)> Cr(0.00)。除 As 的 THQ>1，存在慢性非致癌效应可能外，其他重金属的 THQ<1，不存在慢性健康效应。危害指数 HI 的范围为 0.55～9.91，平均值为 3.53。

表 5 稻谷中 8 种重金属健康风险评估结果
Table 5 Health risk assessment results of eight heavy metals in rice

项目	目标危险商THQ								危险指数HI
	Pb	Hg	As	Cr	Cd	Cu	Ni	Zn	
最小值	0.01	0.02	0.12	0.00	0.01	0.03	0.03	0.01	0.55
最大值	0.09	0.75	9.27	0.01	1.07	0.31	0.33	0.32	9.91
平均值	0.05	0.13	2.55	0.00	0.26	0.18	0.17	0.19	3.53

3 讨 论

本研究结果显示，万州区土壤以酸性土壤为主，稻田土壤中的 Zn(60.00%)、As(44.00%)、Cd(36.00%)、Hg(12.00%)、Ni(8.00%)、Cu(4.00%)点位各金属含量超过重庆土壤背景值。12.00% 采样点位的镉(Cd)含量超过了标准要求的风险筛选值，这与程龙凤等[3] 对万州区农村土壤的研究结果一致。说明该区域存在一定的重金属积累和镉(Cd)污染情况，作为长江干流城市与杨清可等[21] 的研究结果一致。汞(Hg)的变异系数>1，说明其在土壤中的分布极不均匀，这可能与汞的挥发性和迁移性[22] 有关。受研究的局限性，未对重金属来源进行深入分析，下一步需要深入分析土壤重金属的污染来源和迁移路径。地积累指数法和潜在生态风险法的评价结果表明，尽管土壤总体上未受到显著污染，但个别点位存在镉(Cd)和汞(Hg)污染现象，对生态的危害贡献率最高，与刘娅君等[23] 对三峡库区稻田土壤研究结果一致。

稻谷样品中铬(Cr)的超标率最高，铜(Cu)和镍(Ni)可能促进(Cr)向稻谷的转运，而镉(Cd)在中等浓度下也可能表现出协同作用。其次是汞(Hg)、砷(As)和镉(Cd)，这与土壤中这些元素的浓度和生物可利用性有关[24]。富集系数分析显示，镉(Cd)和汞(Hg)在稻谷中的富集系数较高，与张娟等[5] 的研究结果一致，表明这两种金属在水稻中的生物有效性较高，可能对食用者构成较大的健康风险。健康风险评估结果表明，砷(As)的慢性健康风险最高，应作为风险管理的重点污染物。同时，稻谷中多种重金属的复合健康风险对人体健康产生慢性影响的可能性较大，应高度重视多种重金属健康风险的相互作用效应。

综上所述，万州区土壤–水稻系统中存在一定程度的 Cd 和 Hg 迁移污染，As 可能对人体有慢性健康效应，存在多种金属协同影响效应。

数据可用性声明 根据国家相关法律法规和政策要求，数据必须严格保密，不得擅自公开。在研究过程中，研究团队采取了一系列严格的安全措施来保护数据的安全。因此，无法公开原始数据。

参考文献

[1] 王溯原, 胡芷萱, 王尔炜, 等. 1991—2022 年全球土壤重金属污染评价研究热点及演变 [J]. 环境污染与防治, 2024, 46(4): 589-595.
[2] 王玉军, 刘存, 周东美, 等. 客观地看待我国耕地土壤环境质量的现状—关于《全国土壤污染状况调查公报》中有关问题的讨论和建议 [J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(8): 1465-1473.
[3] 程龙凤, 黄祥强, 向恋, 等. 重庆市万州区农村土壤重金属污染及生态风险研究 [J]. 上海预防医学, 2024, 36(8): 760-764, 770.
[4] 张美, 刘金铜, 付同刚, 等. 农田残留地膜累积生态效应研究进展 [J]. 生态毒理学报, 2023, 18(3): 223-237.
[5] 张娟, 王明君, 郭掌珍. 朔州东部农田土壤–农作物重金属富集及健康风险评价 [J]. 环境化学, 2024, 43(4): 1315-1329.
[6] 重庆市万州区人民政府. 自然地理 [EB/OL]. (2024-04-11)[2024-04-11]. http://www.wz.gov.cn/zjwz/zrdl/202105/t20210519_9300000.html.
[7] 重庆市万州区统计局. 重庆市万州区 2024 年统计年鉴 [EB/OL]. (2024-08-23)[2024-08-23]http://www.wz.gov.cn/bmjz_89642/bm/tjj/zwgk_94960/fdzdgknr_94962/tjxx/sjfb/tjnj/202408/t20240823_13550019.html.
[8] 国家环境保护总局. 土壤环境监测技术规范: HJ/T 166—2004[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2004.
[9] 中华人民共和国农业部. 土壤 pH 的测定: NY/T 1377—2007[S]. 北京: 中国农业出版社, 2007.
[10] 环境保护部. 土壤和沉积物 总汞的测定 催化热解–冷原子吸收分光光度法: HJ 923—2017[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2017.
[11] 环境保护部. 土壤和沉积物 12 种金属元素的测定 王水提取–电感耦合等离子体质谱法: HJ 803—2016[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2016.
[12] 中华人民共和国国家卫生健康委员会, 国家市场监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中总汞及有机汞的测定: GB 5009.17—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
[13] 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 食品中多元素的测定: GB 5009.268—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
[14] Muller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River [J]. GeoJournal, 1969, 2(3): 108-118.
[15] 鲍丽然, 邓海, 贾中民, 等. 重庆秀山西北部农田土壤重金属生态健康风险评价 [J]. 中国地质, 2020, 47(6): 1625-1636.
[16] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach[J]. Water Research, 1980, 14(8): 975-1001.
[17] 祁浩, 庄坚, 庄重, 等. 不同种类蔬菜重金属富集特征及健康风险 [J]. 环境科学, 2023, 44(6): 3600-3608.
[18] Huang T, Deng Y X, Zhang X L, et al. Distribution, source identification, and health risk assessment of heavy metals in the soil-rice system of a farmland protection area in Hubei Province, Central China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(48): 68897-68908.
[19] 生态环境部, 国家市场监督管理总局. 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准 (试行): GB 15618—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
[20] 中华人民共和国国家卫生健康委员会, 国家市场监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中污染物限量: GB 2762—2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
[21] 杨清可, 王磊, 李平星, 等. 长江干流沿江地区土壤重金属的分布、来源及潜在生态风险 [J]. 农业工程学 报, 2024, 40(9): 190-198.
[22] 符倩, 李路, 张皓月, 等. 改性生物炭对汞污染土壤绿豆生长及汞含量的影响 [J]. 西北农业学报, 2023, 32(3): 358-367.
[23] 刘娅君, 李彩霞, 梅楠, 等. 三峡库区稻田土壤重金属污染特征及风险评价 [J]. 环境科学, 2023, 44(6): 3520-3530.
[24] 梁延鹏, 李宗林, 张学洪, 等. 重金属单一与复合污染下水稻对铬的富集特征 [J]. 生态环境学报, 2016, 25(9): 1540-1545.