

DOI: 10.7524/AJE.1673-5897.20200410003

田威, 李娜, 倪才英, 等. 江西省稻渔系统中土壤和稻谷重金属污染特征及健康风险评价[J]. 生态毒理学报, 2021, 16(3): 331-339

Tian W, Li N, Ni C Y, et al. Characteristics and health risk assessment of heavy metals pollution in soil and rice for Jiangxi rice-fish co-culture system [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2021, 16(3): 331-339 (in Chinese)

江西省稻渔系统中土壤和稻谷重金属污染特征及健康风险评价

田威¹, 李娜¹, 倪才英^{1,*}, 简敏菲², 孟草¹

1. 江西师范大学地理与环境学院, 南昌 330022

2. 江西师范大学生命科学学院, 南昌 330022

收稿日期: 2020-04-10 录用日期: 2020-06-06

摘要: 为了解江西省采用稻渔综合种养模式的土壤中重金属的污染现状, 采集土壤和稻谷样品, 测定 Cu、Cd 和 Pb 的含量, 采用单因子污染指数法、内梅罗综合指数法、潜在生态危害综合指数法和地累积指数法等对重金属污染状况进行了分析评价, 同时进行了膳食暴露风险评估。结果表明, 研究区稻田土壤中仅 Cd 元素的平均含量高于国家农业土壤的限定值。内梅罗指数法评价结果表明, 重度污染点位占 31.03%, 相关性分析表明, 稻谷与土壤中 Pb 含量呈显著正相关性。综合潜在生态风险指数平均值为 113.55 属于无风险级别, 其中, Cd 的贡献率为 87.8%。从地累积指数法的评价结果来看, Cu 属于无污染等级, 而 Cd 和 Pb 均属于轻度污染等级。膳食风险评估结果表明, 稻谷中 Cu 和 Pb 的平均风险商均 <1, 无摄入风险; Cd 元素对成人的风险商 >1, 说明对成人的健康存在风险。总体而言, Cd 元素对研究区稻田土壤影响较大。

关键词: 稻渔系统; 重金属; 健康风险评价; 土壤; 稻谷

文章编号: 1673-5897(2021)3-331-09 中图分类号: X171.5 文献标识码: A

Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals Pollution in Soil and Rice for Jiangxi Rice-Fish Co-culture System

Tian Wei¹, Li Na¹, Ni Caiying^{1,*}, Jian Minfei², Meng Cao¹

1. School of Geography and Environment, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China

2. College of Life Sciences, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China

Received 10 April 2020 accepted 6 June 2020

Abstract: In order to find the characteristics of soil heavy metal pollution of rice-fish co-culture systems in Jiangxi Province, the soil and rice samples were collected systematically, and the concentrations of Cu, Cd and Pb in the samples were determined. The single factor pollution index, Nemerow comprehensive pollution index, potential ecological risk index, geoaccumulation index were applied for the evaluation of heavy metal pollution, and the dietary exposure risk assessment was conducted. The results showed that the concentrations of Cd in paddy soil were higher than the screening value for national agricultural soil. The results of Nemerow comprehensive pollution index method showed that the number of severe contamination points accounted for 31.03%. The correlation analysis

基金项目: 江西省现代农业产业技术体系建设专项资金资助项目(JXARS-12-环境控制); 江西省研究生创新基金项目(YC2020-S153)

第一作者: 田威(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为土壤重金属修复, E-mail: tw98765@qq.com

* 通讯作者(Corresponding author), E-mail: ncy1919@126.com

showed that the concentrations of Pb in brown rice were significantly positively correlated with Pb concentrations in paddy soil. The average value of comprehensive potential ecological risk index is 113.55, which indicates risk-free level, and the contribution rate of Cd for potential ecological risk is 87.8%. According to the results of the geoaccumulation index method, Cu shows the pollution-free level, while Cd and Pb show the mild pollution level. According to the results of dietary exposure risk assessment, the average risk quotients of Cu and Pb in rice are less than 1, which means no risk of ingestion; the risk quotient of Cd to adults is more than 1, indicating a risk to the health of adults. In general, there is a risk of heavy metal pollution of soil in the study area, and Cd pollution is more serious than that of Cu and Pb.

Keywords: rice-fishery-farming system; heavy metal; health risk assessment; soil; rice

随着工农业的发展,大量污水和固体废弃物排入环境,化肥、农药的施用不合理,导致农用土壤受到严重污染。重金属污染物进入土壤后具有隐蔽性、滞后性、持久性和不可逆性等特征,并且可以通过食物链对人体健康产生威胁。2015年,我国土壤重金属中-重度污染或超标的点位达到2.5%,覆盖面积达23万 hm^2 ,轻微-轻度污染或超标的点位达到5.7%,覆盖面积526万 hm^2 ^[1]。

稻渔综合种养是指通过优化物质能量循环,利用稻渔一体化养殖,以提升稻田生态系统功能的一种模式。赵敏^[2]对全国稻渔综合种养体系中大米的重金属及营养水平进行了评价,发现使用水稻水作作物共培方式,可以减少化学肥料和农药的使用,从而减少水稻中的重金属污染,并且采用稻渔综合种养模式生产的时间越长,稻米中重金属含量越低。

江西省拥有丰富的矿产资源,种类多样,其中,稀有金属、有色金属和贵金属在全国占有重要地位,但由于过去粗放式的开采,导致大量含重金属的污染物进入农用土壤,严重污染了农业用地。吕贵芬等^[3]根据江西省粮食主产区监测数据研究发现,江西省优势水稻区1 000个土壤样本中,农田土壤的主要污染物为Cd、Cu、As、Hg和Pb,土壤Cd超标率最大,为4.7%,超标最大倍数为64,其次是Cu的超标率,为4.2%,最大超标倍数为10.1,As超标率为2.3%,最大超标倍数为3.8。赵杰等^[4]研究发现,环鄱阳湖地区农田土壤中Cu的超标率最高,为12.24%,且超标率排序为 $\text{Cu} > \text{Cd} > \text{As} > \text{Hg} > \text{Pb}$ 。Chang等^[5]考察了江西省典型水稻土对Pb的吸附解吸特性,发现在等配比条件下,潜育型水稻土和潜育型水稻土对Pb的吸附能力均高于Cd。因此,笔者选择超标率和超标倍数较高的Cu和Cd以及易被土壤吸附的Pb这3种重金属进行研究。

江西省作为全国13个稻渔综合种养示范区之

一,种养面积在全国有稻渔综合种养的省份中排名第8位,水产品的总产量在全国有稻渔综合种养的省份中排名第7位^[6]。笔者以江西省为研究区域,系统采集该区域内稻渔综合种养田块中的土壤和稻谷样品,对研究区内土壤和稻谷的重金属污染进行风险评价,以期为江西省及其他地区农业的健康发展提供参考。

1 材料与方法 (Materials and methods)

1.1 研究区概况

江西省位于长江中下游南岸,是典型的农业省份,全省拥有土地面积16.69万 km^2 ,东西南三面环山,中部丘陵起伏,气候属于中亚热带温暖湿润季风气候,年均温度约16.3~19.5℃。作物以水稻为主,全省水稻种植面积占总作物面积的85%~90%,是我国的13个粮食主产区之一。近年来,江西省根据各地独特资源,因地制宜发展稻渔产业,截至目前全省有近40个县在发展稻渔综合种养,总面积达8万 hm^2 ^[7]。

1.2 样品采集

2019年10月,选择江西省大规模综合种养的基地作为采样目标,共采取29个土壤样品,由于时间因素的限制,共采取14个稻谷样品,用GPS定位软件ArcGIS10.2生成的采样点示意图如图1所示。土壤样品采用五点取样法,选择较平整的稻田,将5个点的土壤样品混合,并装入聚乙烯自封袋中保存,以防止污染。在土壤样品的周围采取适量水稻样品,组成一个样品,用聚乙烯自封袋保存,带回实验室分析。

1.3 样品处理与分析

去除土壤样品中的石块和杂草等杂质,于实验室自然风干,研磨后过100目筛;水稻样品选取完整饱满的籽粒,并烘干,处理后的样品分别用聚乙烯自封袋保存备用。

用于配制土壤样品消解液的硝酸(分析纯,质量分数为65%~68%)、盐酸(优级纯,质量分数为36%~38%)和过氧化氢(分析纯,体积分数为30%)均购自西陇科学股份有限公司。采用725-ES型电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)(美国Varian公司)测定土壤样品中的Cu、Cd和Pb含量。稻谷(未脱壳)样品采用硝酸和过氧化氢消解,采用725-ES型ICP-OES(美国Varian公司)测定Cu、Cd和Pb含量。称取(10±0.1)g土壤,加入25mL氯化钾溶液,于离心管中震荡5min,静置1~3h,用pH-100型pH计(上海力辰仪器科技有限公司)测定土壤pH。每个样品做3组重复。

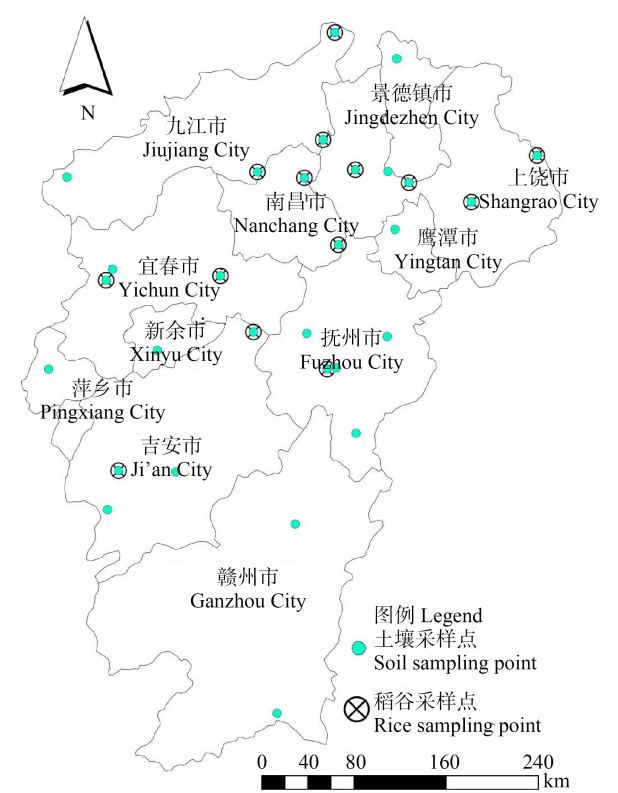


图1 研究区域和采样点示意图

Fig. 1 Study area and location of sampling sites

1.4 重金属污染风险评价方法

(1)单因子污染指数

$$p_i = c_i / S_i$$

式中: p_i 为单因子污染指数; c_i 为重金属元素的实测浓度; S_i 为重金属元素的背景浓度值,江西省土壤中Cu、Cd和Pd背景值分别为20.8、0.1和32.1 mg·kg⁻¹^[8]; p_i 的评价标准如表1所示。

(2)内梅罗综合指数法

内梅罗指数法是目前国内外进行综合污染指数

计算的常用方法,其兼顾了单因子污染指数平均值和最高值,可以突出污染较重的重金属元素的作用^[9]。计算公式为:

$$P_{\text{综}} = \sqrt{\frac{(P_i)_{\text{max}}^2 + (P_i)_{\text{avg}}^2}{2}}$$

式中: $P_{\text{综}}$ 为综合污染指数; P_{max} 为污染指数的最大值; P_{avg} 为污染指数的算术平均值, $P_{\text{综}}$ 的评价标准如表2所示。

(3)潜在生态危害指数评价

1980年,瑞典学者Hakanson提出了潜在生态危害综合指数法,不仅考虑了重金属的含量,而且综合考虑了多元素协同作用、毒性水平以及环境对重金属污染的敏感性等因素,因此在环境风险评价中得到广泛应用^[10]。计算公式为:

$$RI = \sum E_r^i$$

$$E_r^i = T_r^i \cdot C_f^i$$

$$C_f^i = \frac{c_i}{c_n^i}$$

式中: E_r^i 为单项潜在生态风险指数,RI为综合潜在生态风险指数, T_r^i 为重金属元素的毒性响应系数,Cu、Cd和Pb的毒性系数为5、30和5^[11]。 C_f^i 为单

表1 单因子污染指数评价标准

Table 1 Single factor pollution index evaluation standards

单因子污染指数(p_i)	污染等级
Single factor pollution index (p_i)	Pollution level
$p_i \leq 1$	无污染 No pollution
$1 < p_i \leq 2$	轻微污染 Slight pollution
$2 < p_i \leq 3$	轻度污染 Mild pollution
$3 < p_i \leq 5$	中度污染 Moderate pollution
$p_i > 5$	重度污染 Heavy pollution

表2 综合污染指数评价标准

Table 2 Comprehensive pollution index evaluation standards

综合污染指数($P_{\text{综}}$)	污染等级
Comprehensive pollution index ($P_{\text{综}}$)	Pollution level
$P_{\text{综}} \leq 0.7$	清洁 Clean
$0.7 < P_{\text{综}} \leq 1.0$	尚清洁 Still clean
$1.0 < P_{\text{综}} \leq 2.0$	轻度污染 Mild pollution
$2.0 < P_{\text{综}} \leq 3.0$	中度污染 Moderate pollution
$P_{\text{综}} > 3.0$	重度污染 Heavy pollution

项污染系数, c_i 为实测浓度, c_n^i 为参比值; Hakanson 潜在生态危害综合指数评价标准如表 3 所示。

(4)地累积指数法

地累积指数(I_{geo})是 1969 年德国科学家 Muller 提出,是用来表征沉积物和土壤中重金属富集程度的常用指标,不仅可以反映重金属的自然变化特征,还可以判别人为活动对环境的影响^[12]。计算公式为:

$$I_{\text{geo}} = \log_2 \frac{c_i}{k \times B_i}$$

式中: c_i 为重金属元素实测浓度, B_i 为土壤中该元素的背景值, k 值考虑各地岩石差异可能引起的背景值变动而取的系数,一般为 1.5^[13]; I_{geo} 的等级划分标准如表 4 所示。

(5)膳食暴露及风险评估方法

通过膳食途径摄入的重金属暴露风险评估采用

美国环境保护局(US EPA)推荐的暴露模型,计算公式为:

$$EDI = \frac{c \times IR \times EF \times ED}{BW \times AT}$$

式中: EDI(estimated daily intake dose)为重金属每日暴露量($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$); c 为重金属的含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); IR 为稻谷摄入量($\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$),成人、青年和儿童的稻谷日均摄入量分别为 279.4、239.2 和 65.1 $\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$; EF 为暴露频率($\text{d} \cdot \text{a}^{-1}$); ED 为暴露持续时间(a),成人、青年和儿童的暴露持续时间为 30、12 和 4 a; BW 为体重(kg),成人、青年和儿童体重分别为 62.7、54.4 和 16.5 kg; AT 为平均时间(d),致癌 70 $\text{a} \times 365 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$,非致癌 $\text{ED} \times 365 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$,其中 Cd 被国际癌症研究机构(IARC)归类于第一类致癌物, Pb 被归类于可能致癌物^[14-15]。

采用风险商值(HQ)表示由大米摄入引起的重金属暴露风险,计算公式为:

$$HQ = \frac{EDI}{\text{RfD}}$$

式中: RfD 为重金属暴露参考剂量, US EPA 规定 Cu、Pb 和 Cd 的 RfD 值分别为 37、3.5 和 1 $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 。若 $HQ \leq 1$, 无摄入风险;若 $HQ > 1$, 则存在风险,且数值越大其健康风险越大^[16]。

表 3 Hakanson 潜在生态风险指数评价标准
Table 3 Hakanson potential ecological risk index evaluation standards

单项潜在生态 风险指数(E_i^j) Single potential ecological risk index (E_i^j)	综合潜在生态 风险指数(RI) Comprehensive potential ecological risk index (RI)	风险等级 Risk level
$E_i^j < 40$	$RI < 150$	无风险 No risk
$40 \leq E_i^j < 80$	$150 \leq RI < 300$	一般风险 General risk
$80 \leq E_i^j < 160$	$RI \geq 300$	中等风险 Moderate risk
$E_i^j \geq 160$		高风险 High risk

表 4 地累积指数及等级划分
Table 4 The geo-accumulation index evaluation standards

地累积指数(I_{geo}) Geo-accumulation index (I_{geo})	污染等级 Pollution level
$I_{\text{geo}} < 0$	无污染 No pollution
$0 < I_{\text{geo}} \leq 1$	轻度污染 Mild pollution
$1 < I_{\text{geo}} \leq 2$	偏中度污染 Mild-moderate pollution
$2 < I_{\text{geo}} \leq 3$	中度污染 Moderate pollution
$3 < I_{\text{geo}} \leq 4$	偏重度污染 Moderate-heavy pollution
$4 < I_{\text{geo}} \leq 5$	重度污染 Heavy pollution
$I_{\text{geo}} > 5$	严重污染 Serious pollution

2 结果与分析 (Results and analysis)

2.1 稻田土壤和稻谷中重金属含量

如表 5 所示,土壤的 pH 变化范围为 4.17 ~ 6.83,属于偏酸性土壤。稻田土壤中 Cd、Cu 和 Pb 含量变化范围分别为 0.12 ~ 0.77、4.33 ~ 25.91 和 7.03 ~ 109.34 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,平均含量为 0.33、13.25 和 68.50 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。其中, Cd 和 Pb 的平均值均高于江西省的背景值,分别是背景值的 3.3 倍和 2.13 倍,说明研究区内 3 种重金属元素中 Cd 和 Pb 存在人为污染。根据《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB15618—2018)^[17],研究区稻田土壤中仅 Cd 的平均含量高于限定值 0.3 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Cu 和 Pb 的平均含量低于限定值,说明研究区内 3 种重金属元素仅 Pb 存在污染。变异系数能在一定程度上反映出样品受到的人为影响,3 种重金属的变异系数为 $\text{Cd}(54.55\%) > \text{Cu}(44.98\%) > \text{Pb}(37.1\%)$,变异系数均超过 36%,为强变异,表明江西省稻田土壤中重金属受人为活动影响较大^[18]。

研究区稻谷中, Cd、Cu 和 Pb 含量的变化范围分别为 0.10 ~ 1.70、2.36 ~ 5.64 和 0.11 ~ 0.50 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,平均含量为 0.93、4.08 和 0.19 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。其中,

Cu 含量最高,但根据《粮食(含谷物、豆类、薯类)及制品铅、铬、镉、汞、硒、砷、铜、锌等八种元素限量》(NY861—2004)^[19],Cu 含量未超过标准限值 10 mg·kg⁻¹;根据《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB2762—2017)^[20],Cd 含量的平均值超过了标准限值 0.2 mg·kg⁻¹,Pb 含量的平均值低于标准限值 0.2 mg·kg⁻¹,说明稻谷中 Cd 元素有超标。稻谷中 3 种重金属元素的变异系数差异较大,分别为 Cd (62.37%)>Pb(57.89%)>Cu(24.26%)。

2.2 土壤及稻谷重金属含量相关性分析

相关分析是研究变量之间密切度的一种常用的统计方法,通过相关性分析,可以明确看出变量间的相互关系,重金属元素之间的相关性在一定程度上可以反映污染程度的相似性或污染源的相似性^[21]。

对研究区内土壤和稻谷重金属含量进行相关性分析发现,稻田土壤与稻谷中的 Pb 含量呈显著性正相关,说明稻谷中 Pb 含量可能随着土壤中 Pb 含量的增加而增加。而土壤和稻谷中 3 种元素之间不具有显著相关性,说明其污染程度以及来源可能不

同(表 6)。

2.3 土壤环境质量评价

对研究区内稻田土壤重金属的单项和综合污染评价结果如表 7 所示。Cd、Cu 和 Pb 的单项污染指数为 3.32、0.64 和 2.13,范围分别为 1.16 ~ 7.71、0.21 ~ 1.25 和 0.21 ~ 3.41。其中,Cd 元素中度及重度污染的点位达 44.83%,轻度污染的点位达 34.48%,清洁及尚清洁的点位为 20.69%;Pb 中度污染的点位达 17.24%,轻度污染的点位达 51.72%,清洁及尚清洁的点位为 31.03%;Cu 元素清洁及尚清洁的点位为 100%,说明研究区内稻田土壤主要存在 Cd 和 Pb 污染。内梅罗污染指数反映了研究区 3 种重金属元素的综合污染状况(图 2),其中,重度污染的点位达 31.03%,中度污染的点位为 31.03%,轻度污染点位为 37.93%,说明研究区内土壤受重金属综合污染较为严重。

2.4 土壤潜在生态风险评价

土壤重金属潜在生态风险评价结果如表 8 所示,Cd 的单项潜在生态风险指数最高,为 99.70;Cu

表 5 研究区土壤和稻谷重金属含量统计分析

Table 5 Statistical analysis of heavy metal contents in soil and rice of study area

统计指标 Statistics index	土壤 pH Soil pH	土壤含量/(mg·kg ⁻¹) Content in soil/(mg·kg ⁻¹)			稻谷含量/(mg·kg ⁻¹) Content in rice/(mg·kg ⁻¹)		
		Cu	Pb	Cd	Cu	Pb	Cd
最小值 Minimum	4.17	4.33	7.03	0.12	2.36	0.11	0.10
最大值 Maximum	6.83	25.91	109.34	0.77	5.64	0.50	1.70
平均值 Average	5.11	13.25	68.50	0.33	4.08	0.19	0.93
标准差 Standard deviation	0.67	5.96	25.41	0.18	0.99	0.11	0.58
变异系数/% Variable coefficient/%	13.11	44.98	37.1	54.55	24.26	57.89	62.37
筛选值/(mg·kg ⁻¹) Screening values/(mg·kg ⁻¹)	—	50	80	0.3	10	0.2	0.2

表 6 稻田土壤和稻谷重金属含量相关性分析

Table 6 Correlation analysis for heavy metals in soil and rice of study area

	S-pH	S-Cu	S-Pb	S-Cd	R-Cu	R-Pb	R-Cd
S-pH	1						
S-Cu	-0.039	1					
S-Pb	-0.187	0.213	1				
S-Cd	0.169	0.186	0.092	1			
R-Cu	0.354	-0.070	0.013	-0.208	1		
R-Pb	-0.289	0.420	0.516*	0.121	-0.104	1	
R-Cd	-0.001	-0.021	-0.095	0.079	0.205	-0.361	1

注:S 表示土壤,R 表示稻谷。
Note: S represents soil; R represents rice.

和 Pb 次之,分别为 3.18 和 10.67。其中,Cu 和 Pb 的最大值均<40,无风险点位为 100%,而 Cd 元素属于高风险的点位达 20.69%,一般风险及中等风险的点位为 75.86%,说明 Cd 元素的潜在生态风险等级最高。综合潜在生态风险指数的变化范围为 46.32 ~ 240.49,平均值为 113.55。总体上风险等级较低,其中,一般风险和无风险点位所占比例分别为 31.03% 和 68.97%。从各元素对综合潜在生态风险指数的贡献率来看,Cu、Pb 和 Cd 的贡献率分别为 2.8%、9.4% 和 87.8%,说明 Cd 元素是研究区内土壤生态风险的主要来源。

2.5 地累积指数评价

如表 9 所示,3 种重金属元素的地累积指数分别为 Cd(0.95)>Pb(0.34)>Cu(-1.40)。Cd 元素的地累积指数最高,其中,属于中度污染等级的点位达 10.34%,轻度污染及偏中度污染的点位为 75.86%,无污染的点位为 13.79%。Pb 元素属于偏中度污染等级的点位达 17.24%,轻度污染的点位为 58.62%,无污染的点位为 24.14%。Cu 无污染的点位为 100%。这说明,研究区内稻田土壤中 Cd 和 Pb 的含量很可能受到了人类活动的影响,且 Cd 元素所受影响最大。

2.6 膳食风险评价

关于食品中 Cu 元素的限量问题,卫生部和国家标准化管理委员会于 2011 年发布公告,决定废止《食品中铜限量卫生标准》(GB 15199—1994)^[22],引起了较大争议。虽然 Cu 是人体必需微量元素,但摄入过量的 Cu 同样会危害人体健康,因此,本研究将 Cu 也纳入膳食风险评估中^[23]。

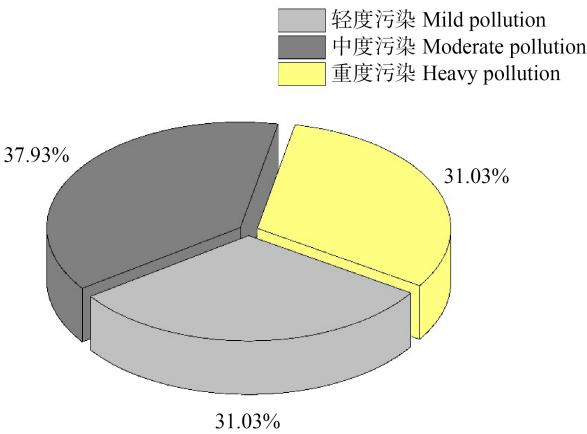


图 2 研究区内土壤重金属污染内梅罗指数评价结果
Fig. 2 The evaluation results of paddy soil heavy metal pollution by Nemerow method in the study area

表 7 稻田土壤重金属单因子评价结果

Table 7 Single factor evaluation results of heavy metal contamination in paddy soils

P_i	样品污染点个数 Pollution points of sample							
	最大值 Maximum	最小值 Minimum	平均值 Average	清洁 Clean	尚清洁 Still clean	轻度污染 Mild pollution	中度污染 Moderate pollution	重度污染 Heavy pollution
Cu	1.25	0.21	0.64	26	3	0	0	0
Pb	3.41	0.21	2.13	3	6	15	5	0
Cd	7.71	1.16	3.32	0	6	10	7	6
$P_{综}$	5.90	1.12	2.88	0	0	9	11	9

表 8 稻田土壤重金属潜在生态风险指数

Table 8 Index of potential ecological risk for heavy metals in paddy soils

E_r^i	样品污染点个数 Pollution points of sample						
	最大值 Maximum	最小值 Minimum	平均值 Average	无风险 No risk	一般风险 General risk	中等风险 Moderate risk	高风险 High risk
Cu	6.23	1.04	3.18	29	0	0	0
Pb	17.03	1.10	10.67	29	0	0	0
Cd	231.48	41.33	99.70	1	15	7	6
RI	240.49	46.32	113.55	20	9	0	0

根据稻谷中平均重金属含量(表 1)和重金属膳食风险评价模型,计算得到不同人群的重金属每日暴露量(EDI)的平均值(表 10)。从不同的人群来看,EDI 平均值的排序为成人>青年>儿童;从重金属元素来看,Cu 元素的 EDI 平均值最高,其中,成人、青年和儿童的 EDI 平均值分别为 18.18、17.94 和 16.10 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$,但未超过 US EPA 的推荐值。而对于

Pb 和 Cd 元素,成人的 EDI 平均值分别为 0.37 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 和 1.79 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$,是 US EPA 推荐值的 0.11 倍和 1.79 倍。由不同人群的风险商值(表 11)可知,Cu 和 Pb 的风险商均<1,无摄入风险,而成人、青年和儿童的 Cd 风险商分别是 1.79、0.71 和 0.21,其中,成人的风险商>1,说明 Cd 元素对成人的健康存在风险。

表 9 稻田土壤重金属地累积指数

Table 9 The geo-accumulation index of heavy metals in paddy soils

	I_{geo}			样品污染点个数 Pollution points of sample			
	最大值 Maximum	最小值 Minimum	平均值 Average	无污染 No pollution	轻度污染 Mild pollution	偏中度污染 Mild-moderate pollution	中度污染 Moderate pollution
Cu	-2.85	-0.27	-1.40	29	0	0	0
Pb	1.18	-1.51	0.34	7	17	5	0
Cd	2.36	-0.38	0.95	4	12	10	3

表 10 不同暴露人群对水稻籽实中重金属的每日暴露量(EDI)

Table 10 The estimated daily intake (EDI) of heavy metals in rice grain for different populations

元素 Elements	消费人群 Consumer group	最大值 $(\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1})$ Maximum	最小值 $(\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1})$ Minimum	平均值 $(\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1})$ Average	标准差 $(\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1})$ Standard deviation
		$(\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1})$	$(\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1})$	$(\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1})$	$(\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1})$
Cu	成人 Adult	25.12	10.53	18.18	4.39
	青年 Teenager	24.79	10.39	17.94	4.33
	儿童 Child	22.24	9.33	16.10	3.89
Pb	成人 Adult	0.77	0.20	0.37	0.18
	青年 Teenager	0.30	0.08	0.15	0.07
	儿童 Child	0.09	0.02	0.04	0.02
Cd	成人 Adult	3.26	0.17	1.79	1.10
	青年 Teenager	1.29	0.07	0.71	0.43
	儿童 Child	0.38	0.02	0.21	0.13

表 11 不同暴露人群对水稻籽实中重金属的摄入风险商(HQ)

Table 11 The hazard quotient (HQ) of heavy metals in rice grain for different populations

元素 Elements	消费人群 Consumer group	最大值 Maximum	最小值 Minimum	平均值 Average	标准差 Standard deviation
Cu	成人 Adult	0.68	0.28	0.49	0.12
	青年 Teenager	0.67	0.28	0.48	0.12
	儿童 Child	0.60	0.25	0.44	0.11
Pb	成人 Adult	0.22	0.06	0.11	0.05
	青年 Teenager	0.09	0.02	0.04	0.02
	儿童 Child	0.03	0.01	0.01	0.01
Cd	成人 Adult	3.25	0.17	1.79	1.10
	青年 Teenager	1.29	0.07	0.71	0.43
	儿童 Child	0.38	0.02	0.21	0.13

3 讨论 (Discussion)

研究结果表明,研究区中采用稻渔综合种养模式的土壤中 Cu、Pb 和 Cd 的平均含量分别为 (13.25 ± 5.96) 、 (68.50 ± 25.41) 和 (0.33 ± 0.18) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Cu 平均含量均未超标, Pb 和 Cd 的最大含量的超标倍数为 1.37 倍和 2.57 倍, Cd 超标最严重。刘娅菲^[24]对 7 个优势水稻县(市)的水稻土重金属含量进行监测,其中, Cd 和 Pb 的平均含量均低于本研究结果,其原因可能是样本量多于本研究;但 Cu、Pb 和 Cd 的最高含量及其最大超标倍数均高于本研究结果。其原因可能是在稻渔综合种养过程中通过控制化肥和农药的施用,减少了重金属的输入。

魏林根等^[25]对江西省 49 个县的部分农田及山地土壤重金属含量进行监测,发现江西省土壤重金属污染范围非常广,几乎每个县都存在土壤重金属污染问题,只是程度不同,污染元素不同。本研究区内大部分地区均有重金属累积现象,但仅 Cd 平均含量超标, Cu 和 Pb 的平均含量未超标,其他元素还有待进一步研究。

近年来,食品安全一直备受关注,对研究区内稻谷重金属进行膳食风险评估,结果得出 Cd 元素对成人健康存在风险,但由于稻谷样品未脱壳且现代人群的膳食结构多样化,所以研究区内稻谷的实际膳食风险值可能比估计值小。

本研究采用不同方法对土壤重金属含量进行评价,地累积指数结果表明,研究区内 Cd 和 Pb 含量受到人为污染的影响,并且潜在生态风险评估结果表明,研究区 3 种重金属元素中 Cd 元素是主要的风险来源,应该加强对 Cd 污染土壤的环境监管以及污染农田的修复工作。由于本研究采集样品数量有限,尤其是稻谷样品数量较少,因此研究结果只适用于本论文采样区,对江西省的代表性有一定的局限性,还有待进一步的研究。

通讯作者简介:倪才英(1968—),女,博士,教授,主要研究方向为土壤重金属污染修复。

参考文献 (References):

- [1] 中国地质调查局. 中国耕地地球化学调查报告[R]. 北京: 中国地质调查局, 2015
- [2] 赵敏. 稻渔综合种养大米重金属及营养评价[D]. 上海: 上海海洋大学, 2019: 33-34
Zhao M. Heavy metals and nutrition assessment in co-cultured rice [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2019: 33-34 (in Chinese)
- [3] 吕贵芬, 杨涛, 陈院华, 等. 江西省土壤重金属污染治理研究进展[J]. 能源研究与管理, 2016(2): 16-18
Lv G F, Yang T, Chen Y H, et al. Advance in remediation research of soil contaminated by heavy metals in Jiangxi Province [J]. Energy Research and Management, 2016(2): 16-18 (in Chinese)
- [4] 赵杰, 罗志军, 赵越, 等. 环鄱阳湖区农田土壤重金属空间分布及污染评价[J]. 环境科学学报, 2018, 38(6): 2475-2584
Zhao J, Luo Z J, Zhao Y, et al. Spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in farmland soils in Poyang Lake area [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, 38(6): 2475-2584 (in Chinese)
- [5] Chang J, Bai L, Leng J, et al. Adsorption and desorption characteristics of cadmium and lead in typical paddy soils of Jiangxi Province and its environmental risk assessment [J]. Agricultural Science & Technology, 2016, 17 (7): 1621-1626
- [6] 中华人民共和国农业农村部渔业渔政管理局. 中国稻渔综合种养产业发展报告(2019)[R]. 北京: 中华人民共和国农业农村部渔业渔政管理局, 2019
- [7] 中国水产科学研究院. 全国稻渔综合种养产业扶贫现场观摩活动经验交流[N]. 中国渔业报, 2019-08-01
- [8] 黄国勤. 江西省土壤重金属污染研究[C]// 中国环境科学学会. 2011 中国环境科学学会学术年会会议论文集: 第 2 卷. 北京: 中国环境科学出版社, 2011: 1731-1736
- [9] 张又文, 韩建华, 涂棋, 等. 天津市郊农田土壤重金属积累特征及评价[J]. 生态与农村环境学报, 2019, 35 (11): 1445-1452
Zhang Y W, Han J H, Tu Q, et al. Accumulation characteristics and evaluation of heavy metals in suburban farmland soils of Tianjin [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2019, 35(11): 1445-1452 (in Chinese)
- [10] 吴到懋, 李茂洁, 熊春莲, 等. 宜宾市江安县稻田土壤重金属现状评价[J]. 四川环境, 2015, 34(4): 128-136
Wu D M, Li M J, Xiong C L, et al. Current status assessment of paddy soil heavy metals in Jiang'an County, Yibin City [J]. Sichuan Environment, 2015, 34(4): 128-136 (in Chinese)
- [11] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach [J]. Water Research, 1980, 14(8): 975-1001
- [12] 顾思博, 周金龙, 曾妍妍, 等. 新疆民丰县农田土壤重金属污染特征与生态风险评价[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(12): 90-95

- Gu S B, Zhou J L, Zeng Y Y, et al. Characteristics and ecological risk assessment of heavy metal pollution in farmland soil in Minfeng County of Xinjiang [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2019, 33(12): 90-95 (in Chinese)
- [13] 叶嘉敏, 余厚平, 简敏菲, 等. 鄱阳湖流域农田重金属污染的生态风险评估[J]. 江西师范大学学报: 自然科学版, 2016, 40(4): 429-436
- Ye J M, Yu H P, Jian M F, et al. The ecological risk assessment of the heavy metals pollution on the typical wetland and farmland of Poyang Lake [J]. Journal of Jiangxi Normal University: Natural Science Edition, 2016, 40(4): 429-436 (in Chinese)
- [14] Zhang H D, Huang B, Dong L H, et al. Accumulation, sources and health risks of trace metals in elevated geochemical background soils used for greenhouse vegetable production in southwestern China [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2017, 137: 233-239
- [15] 范荣伟. 水稻中重金属复合污染富集特征及风险评价[D]. 苏州: 苏州科技大学, 2018: 17-18
- Fan R W. Enrichment characteristic and risk assessment of heavy metal in rice [D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2018: 17-18 (in Chinese)
- [16] 邹梦瑶, 张磊, 周遗品, 等. 某铅锌矿周边地区大米重金属污染评价及膳食暴露风险评估[J]. 广东农业科学, 2015, 16(4): 64-70
- Zou M Y, Zhang L, Zhou Y P, et al. Pollution evaluation and dietary exposure risk assessment of heavy metals in rice from a lead-zinc ore mine [J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2015, 16(4): 64-70 (in Chinese)
- [17] 中华人民共和国生态环境部. 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行) (GB15618—2018)[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2018
- [18] 敖明, 柴冠群, 范成五, 等. 稻田土壤和稻米中重金属潜在风险评估与来源解析[J]. 农业工程学报, 2019, 35(6): 198-205
- Ao M, Chai G Q, Fan C W, et al. Evaluation of potential pollution risk and source analysis of heavy metals in paddy soil and rice [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(6): 198-205 (in Chinese)
- [19] 中华人民共和国农业部. 粮食(含谷物、豆类、薯类)及制品铅、铬、镉、汞、硒、砷、铜、锌等八种元素限量(NY861—2004)[S]. 北京: 中国农业出版社, 2005
- [20] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中污染物限量(GB2762—2017)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017
- [21] 姜广羽. 安徽某地稻田土壤及稻米重金属调查研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2012: 16-18
- Jiang G Y. Investigation of heavy metal in the paddy soil and rice at an area of Anhui [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2012: 16-18 (in Chinese)
- [22] 中华人民共和国卫生部. 食品中铜限量卫生标准(GB 15199—1994)[S]. 北京: 中国标准出版社, 1994
- [23] 魏军晓, 耿元波, 岑况, 等. 北京市售大米重金属含量监测及膳食风险评估[J]. 现代食品科技, 2018, 34(6): 267-273
- Wei J X, Geng Y B, Cen K, et al. The heavy metal content monitoring and dietary risk assessment of commercial rice in Beijing [J]. Modern Food Science and Technology, 2018, 34(6): 267-273 (in Chinese)
- [24] 刘娅菲. 江西省优势水稻区域环境质量现状与污染防治对策[J]. 环境整治, 2005, 35(4): 35-38
- [25] 魏林根, 李建国, 刘光荣, 等. 江西土壤环境质量与绿色食品可持续发展[J]. 江西农业学报, 2008, 20(1): 159-162