

曲靖市周边稻田土壤—籽粒中 Pb、Cd、Cu 和 Zn 的风险评价

李青

(杨凌职业技术学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 农田重金属污染导致的粮食安全已危机到人类健康,对农田重金属污染迁移累积到可食部分的风险评价亟待解决。本文研究对象为云南省曲靖市富源县黄泥河镇五乐滇东电厂附近的上评子、城里头、姜家扎外和普祥四个样品区域的土壤—籽粒,实验分别采集了土壤和水稻籽粒样品,测定了土壤和水稻籽粒中 Pb、Cd、Cu、Zn 的含量,对土壤及水稻籽粒中 Pb、Cd、Cu、Zn 进行单因子和综合污染指数评价。结果表明:上评子和城里头采样区综合生态风险指数分别为 201.26 和 153.3,达到中等生态危害,而姜家扎外和普祥采样区土壤达到轻微生态危害。在上评子、城里头和普祥的采样点实验结果表明,水稻籽粒中构成重度污染的为 Pb 和 Cd,构成轻度污染的为 Zn,Cu 未造成污染。而姜家扎外采样点水稻籽粒中构成重度污染的为 Pb 和 Cd,Cu 和 Zn 未达到污染水平。研究区域 Cd 为主要污染元素,达到重度污染,而 Pb、Cu、Zn 的 P_i 值 < 1 ,不能构成污染。通过对土壤—水稻籽粒的污染指数进行综合评价得出:该研究区域水稻的重金属污染综合指数都达到了重度污染水平。

关键词: 重金属污染;土壤;水稻;风险评价

中图分类号: S155 **文献标识码:** A **文章编号:** 0488-5368(2024)05-0063-05

Risk Assessment of Pb, Cd, Cu and Zn in Farmland and Rice System Around Qujing City

LI Qing

(Yangling Vocational and Technical College, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Food security is threatened by heavy metal contamination in farmland, posing risks to human health. Urgent efforts are needed to assess migration of heavy metal pollutants in farmland and their accumulation in edible parts of crops. This study focuses on soil and rice samples collected from four sample locations near Wule Diandong Power Plant in Huangnihe Town, Fuyuan County, Yunnan Province, namely, Shangpingzi, Chenglitou, Jiangjiazawai and Puxiang. The concentrations of Pb, Cd, Cu, and Zn were determined in both soil and rice grain samples. The single factor and comprehensive pollution index of Pb, Cd, Cu, and Zn in the soil and rice grains were evaluated. The results showed that the comprehensive ecological risk indexes for Shangpingzi and Chengtong were 201.26 and 153.3, respectively, indicating a medium level of ecological damage. Conversely, the soil in Jiangjiazawai and Puxiang was slightly damaged. Analysis of rice grain samples from Shangpingzi, Chengtong, and Puxiang revealed heavy pollution of Pb and Cd, with Zn showing light pollution, and Cu not reaching pollution levels. However, the most serious pollutant in the rice grains were Pb and Cd, while Cu and Zn did not reach the pollution level. Cd was the main pollution element in the study area and reached the level of severe pollution. P_i value of Pb, Cu and Zn was less than 1, which did not constitute pollution. According

收稿日期:2023-09-13 修回日期:2023-10-16

基金项目:2023 年度陕西省教育厅科学研究计划项目(23JK);杨凌职业技术学院自然科学基金(ZK22-58)。

第一作者简介:李青(1990-),女,主要从事重金属污染研究。

to the comprehensive evaluation of the pollution index of soil rice grain, the comprehensive index of heavy metal pollution of rice in the study area has reached the level of heavy pollution.

Key words: Heavy metal pollution; Soil; Rice; Risk Assessment

作为一种人们生活中的主要食物,水稻同样也成为了人体摄入重金属的重要载体之一^[1]。水稻可以富集土壤中的重金属离子,同时导致水稻的品质降低,重金属通过水稻进入人体也会危害人体健康^[2]。目前,重金属对土壤污染的治理方式较多但难度较大,而农产品安全性一直受到人们的广泛关注^[3]。研究重金属对土壤、水稻造成的污染,对保护当地农田生态系统和人体健康具有重大意义。由此,对重金属在土壤、水稻中的污染指数进行研究以及评价是非常重要的一项工作。

目前对土壤—水稻中的重金属污染风险评价的研究已有不少。通过测定黄石市某农田水稻中重金属含量,蔡苇发现该区域水稻整体已被 Pb 所污染,重度 Pb 污染存在于阳新县和大冶市区域,但未检测到其他类型重金属的污染^[4]。吴迪由某铅锌矿区域的水稻土壤重金属水平分析研究得出:该矿区污染程度最高的重金属是 Cd,已经超过正常水平的 34.22 倍和 84.92 倍,Cd、Pb、As、Ni、Zn、Hg 污染程度均比较明显^[5]。通过对比分析佳木斯市某稻田重金属分布,李永亮等得出:该稻田土壤所含重金属差异性较低,但 Hg 的变异系数却比较大,其它重金属的变异系数均维持在中下强度^[6],且相对较低。

然而,农田土壤实际上是受诸多因素影响的,重金属的污染状况以及土壤的各种理化性质也会随地区的变化而有所不同^[7]。云南省气候适宜,土壤肥沃,极其适合种植。本研究以云南省曲靖市富源县黄泥河镇五乐滇东电厂的农田为研究对象,充分采集土壤样品及水稻样品,测定土壤 pH、有机质含量和 Cd、Pb、Zn、Cu 在种植土壤和水稻中的含量,然后进行重金属污染风险评价分析。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

对上评子、城里头、姜家扎外、普祥四个自然村水稻田进行采样。研究区域如表 1 所示。

表 1 研究区域

自然村	纬度	经度	高程/m
上评子	25°12'01.5"	104°40'27.8"	1 386
城里头	25°12'09.4"	104°40'54.4"	1 367
姜家扎外	25°11'21.1"	104°40'19.1"	1 301
普祥	25°11'20.5"	104°41'20.5"	1 298

1.2 样品采集

土壤样品采集方法参考《土壤环境监测技术规范》,将单元内各样点用对角线法,把进水口和出水口之间引一条对角斜线,在每等分点上取样,混合均匀后装于自封袋中,带回实验室将土壤中的残根、杂物挑出,进行自然风干后研磨过 200 目的尼龙筛后用聚乙烯塑料瓶将其密封保存,供分析测试重金属元素 Pb、Cd、Cu、Zn,同时在对应的等分点上取水稻籽粒,烘干磨粉末状待用。

1.3 样品测定

(1)土壤样品 $\text{HNO}_3 - \text{HClO}_4$ 消解:称取 5 g 土壤样品,放入锥形瓶中,加入 50 mL 王水(盐酸:硝酸=3:1),静置过夜。在锥形瓶口放入漏斗,置于沙浴电热板,恒温加热,观察到棕色物质基本消失后,取出锥形瓶冷却。冷却完成后用移液管沿壁加入 15 mL 高氯酸,放于沙浴电热板继续加热,直至产生浓白烟,锥形瓶中物质变成灰白色或者透明后取下冷却。最后用蒸馏水将其过滤定容于塑料瓶中,以备测定。

(2)水稻籽粒样品 $\text{HNO}_3 - \text{HClO}_4$ 消解:称取 1 g 水稻样品,加入 15 mL 浓硝酸,静置过夜。在锥形瓶口放入漏斗,置于沙浴电热板,恒温加热,观察到棕色物质基本消失后,取出锥形瓶冷却。冷却完成后用移液管沿壁加入 5 mL 高氯酸,继续放到沙浴电热板上进行加热,直至产生浓白烟,锥形瓶中物质变为灰白色或透明后取下冷却。最后用蒸馏水将其过滤定容于塑料瓶中,以备测定。

(3)土壤及水稻样品 pH、有机碳的测定:使用电位法测量土壤的 pH;通过重铬酸钾容量法—外加热法^[8]来完成土壤中有机质的检测。

(4)土壤及水稻样品重金属含量的测定:根据土壤及水稻籽粒样品消解液的 Pb、Cd、Cu、Zn 含量和仪器的最低检测限度^[9]来配置标准溶液和绘制标准曲线。用火焰原子吸收分光光度计来测定重金属 Pb、Cd、Cu、Zn 的含量。

1.4 土壤和水稻籽粒评价方法

单因子污染指数法,计算公式为: $P_i = C_i / S_i$,式中: P_i 为第*i*种污染物的单因子污染指数; C_i 为第*i*种污染物实测值; S_i 为第*i*种污染物的评价标准。

综合污染指数法, 计算公式为: $P = \sqrt{\frac{(Pi)_{av}^2 + (Pi)_{max}^2}{2}}$, 式中: P 为综合污染指数; $(Pi)_{av}$ 为各重金属污染指数平均数; $(Pi)_{max}$ 为各重金属污染指数中的最大值^[9]。

表 2 土壤重金属单因子污染指数法分级标准

等级	Pi 值大小	污染评价
I	$Pi \leq 1$	未污染
II	$1 < Pi \leq 2$	轻微污染
III	$2 < Pi \leq 3$	轻度污染
IV	$3 < Pi \leq 5$	中度污染
V	$Pi > 5$	重度污染

表 3 土壤重金属综合污染指数法分级标准

等级	Pi 值大小	污染评价
I	$Pi \leq 0.7$	安全
II	$0.7 < Pi \leq 1$	尚清洁
III	$1 < Pi \leq 2$	轻度污染
IV	$2 < Pi \leq 3$	中度污染
V	$Pi > 3$	重度污染

潜在生态风险评价法, 计算公式为: $RI = f(x)$

$= \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \cdot \frac{C_i}{S_i}$ 式中: RI 为多种重金属潜在的生态风险指标; 为重金属单项潜在的生态风险

害参数; 为重金属毒性相对应的不同系数。

表 4 土壤重金属潜在生态风险评价法分级标准

等级	E 值大小	RI	污染评价
I	$E < 40$	$RI < 150$	轻微
II	$40 \leq E < 80$	$150 \leq RI < 300$	中度
III	$80 \leq E < 160$	$300 \leq RI < 600$	强烈
IV	$160 \leq E < 320$	$RI \geq 600$	很强烈
V	$E \geq 320$		极极强

1.5 数据分析

实验数据采用 Excel(Microsoft)、DPS 数据处理系统中 Duncan 新复极差法进行差异显著性分析, 其中 $P < 0.05$ 表示处理间差异较显著。

2 结果与分析

2.1 土壤基本理化性质

曲靖市富源县黄泥河镇采样区土壤 pH 值和土壤有机质的含量两项基本理化性质见表 5。四个采样区的土壤 pH 值在 6.04~6.40, 故研究地区皆为偏酸性土壤。而四个采样区土壤中有机质含量在 27.68~44.02 g/kg, 将其换算即土壤中有机质含量在 2.77%~4.40%, 根据国家土壤养分含量分级表可知, 上评子土壤有机质含量为二级水平, 城里头土壤有机质含量为三级水平, 姜家扎外、普祥地区土壤有机质含量为一级水平。

	上评子	城里头	姜家扎外	普祥	最小值	最大值	平均值
pH	6.04	6.32	6.27	6.40	6.04	6.40	6.25
土壤有机质含量(g/kg)	33.89	27.68	40.51	44.02	27.68	44.02	36.53

2.2 土壤重金属含量和土壤质量评价

研究区域土壤和水稻籽粒中 Pb、Cd、Cu、Zn 四种重金属的含量如表 6 所示, 可根据土壤环境质量二级标准^[11]进行以下评价。通过单因子污染指数

法可得到各重金属元素影响效果: 土壤中重金属单因子污染指数排序为 $Cd > Cu > Zn > Pb$ 。从而得出: 研究区域土壤中 Cd 为主要污染物, 且属于中、重度污染。其余三个重金属元素, 都未构成污染。

表 6 土壤重金属含量和土壤质量评价

采样点	元素	Pb	Cd	Cu	Zn
	土壤环境质量二级标准	≤ 350	≤ 0.6	≤ 100	≤ 300
上评子	实测值(mg/kg)	45.95	3.96	46.52	77.42
	污染指数	0.13	6.60	0.47	0.26
	污染程度	未污染	重度污染	未污染	未污染
城里头	实测值(mg/kg)	22.89	3.01	42.52	61.17
	污染指数	0.07	5.02	0.43	0.20
	污染程度	未污染	重度污染	未污染	未污染
姜家扎外	实测值(mg/kg)	31.97	2.47	59.74	78.94
	污染指数	0.09	4.12	0.60	0.26
	污染程度	未污染	中度污染	未污染	未污染
普祥	实测值(mg/kg)	46.14	2.27	47.40	63.12
	污染指数	0.13	3.78	0.47	0.21
	污染程度	未污染	中度污染	未污染	未污染

2.3 土壤重金属污染风险评价

应用潜在生态风险指数法(土壤环境质量二级标准为依据)评价五乐电厂附近土壤重金属污染的生态风险。其评价结果(表 7)为:土壤 Cd 生态风险水平很强的采样区为上评子,土壤 Cd 生态风险水平强烈的采样区为城里头、姜家扎外、普祥。但

上评子、城里头、姜家扎外以及普祥 Pb、Cu、Zn 均为轻微生态风险水平。从综合的潜在生态风险指数来看,上评子和城里头采样区综合生态风险指数分别为 201.26 和 153.3,达到中度水平,姜家扎外和普祥采样区土壤达到轻微生态风险水平。

表 7 土壤重金属污染风险评价

采样点		单项风险指数				综合风险指数
		Pb	Cd	Cu	Zn	
上评子	指数值	0.65	198.00	2.35	0.26	201.26
	等级	轻微	很强	轻微	轻微	中度
城里头	指数值	0.35	150.60	2.15	0.20	153.3
	等级	轻微	强烈	轻微	轻微	中度
姜家扎外	指数值	0.45	123.60	3.00	0.26	127.31
	等级	轻微	强烈	轻微	轻微	轻微
普祥	指数值	0.65	113.40	2.35	0.21	116.61
	等级	轻微	强烈	轻微	轻微	轻微

2.4 水稻籽粒重金属风险评价

根据中国食品重金属限量标准,水稻中:Pb \leq 0.2 mg/kg,Cd \leq 0.2 mg/kg,Cu \leq 10 mg/kg,Zn \leq 20 mg/kg。使用前面提到的评价方法对水稻籽粒中重金属风险进行评价,从评价结果(表 8)可知,在上评子、城里头和普祥采样点,水稻籽粒中

Zn 为轻微污染,Pb 和 Cd 为重度污染,Cu 未达到污染水平。在姜家扎外的采样点,水稻籽粒中 Pb 和 Cd 检测为重度污染,Cu 和 Zn 均未达到污染标准。根据对综合污染指数的评价得知,采样区范围内水稻籽粒的重金属综合污染达到重度污染水平。

表 8 水稻籽粒重金属风险评价

采样点		单因子污染指数				综合污染指数
		Pb	Cd	Cu	Zn	
	重金属限量标准	0.2	0.2	10	20	
上评子	实测值(mg/kg)	10.81	10.04	5.32	23.99	42.56
	指数值	54.05	50.20	0.53	1.20	
	等级	重度污染	重度污染	未污染	轻微污染	重度污染
城里头	实测值(mg/kg)	10.16	1.54	4.76	29.68	37.48
	指数值	50.80	7.70	0.48	1.48	
	等级	重度污染	重度污染	未污染	轻微污染	重度污染
姜家扎外	实测值(mg/kg)	7.72	0.99	4.90	17.39	28.43
	指数值	38.60	4.95	0.49	0.87	
	等级	重度污染	中度污染	未污染	未污染	重度污染
普祥	实测值(mg/kg)	10.10	17.64	4.81	24.11	67.12
	指数值	50.50	88.20	0.48	1.21	
	等级	重度污染	重度污染	未污染	轻微污染	重度污染

3 讨论

通过对云南省曲靖市富源县黄泥河镇五乐滇东电厂四个区域采集的土壤与水稻样品进行处理分析,采样区土壤 pH $<$ 7,为酸性土壤;且上评子

土壤有机质含量为二级水平,城里头土壤有机质含量为三级水平,姜家扎外、普祥地区土壤有机质含量为一级水平。与土壤环境质量标准对比,研究区土壤重金属含量中 Pb、Cu、Zn 皆处于正常值范围内,而 Cd 含量都严重超标。以食品重金属限量标

准作参照,研究区水稻中 Pb、Cd 含量严重超标,Zn 稍微超标,而 Cu 则处于正常值范围内。

研究区域 Cd 的 Pi 值在 3.78~6.60,均大于重度污染规范的标准值。而其余三个重金属元素的单因子污染指数介于 0 和 1 之间,即未构成污染。上评子 Cd 的潜在生态风险指数则为 198.00,达到了很强生态风险水平,可能是因为电厂排放污染物所致;而 Pb、Cu 和 Zn 均小于 150,构成轻微生态危害。城里头、姜家扎外和普祥的 Cd 介于 80~160 之间,构成强生态危害,Pb、Cu 和 Zn 构成轻微生态危害。表明研究区土壤中 Cd 的潜在生态危害可能较大,Cd 的生态风险应引起高度的关注,这与陆泗进^[12]等对会泽铅锌矿周边农田土壤风险评价结果相近。

在上评子、城里头和普祥采样区,水稻籽粒中 Zn 的单因子污染指数介于 1.20~1.48 之间,构成轻度污染;Pb 和 Cd 的 Pi 值均大于 3,即构成重度污染水平,Cu 未达到污染指标。在姜家扎外采样区,水稻籽粒中 Pb 和 Cd 的单因子污染指数均在 3 以上,达到重度污染水平,Cu 和 Zn 未达到污染水平,与包丹丹等^[13]对于江苏南部冶炼厂周边污染水稻田风险评价的结论不同。综合评价后可得出结论即实验研究区域的水稻籽粒重金属已达到重度污染水平。

4 结论

四个地区农田的 Cd 污染最严重,为主要污染物,应该引起高度关注。Pb、Cu 和 Zn 的污染指标尚处于较低水平,未达到较大污染水平。四个地区水稻籽粒中重金属污染综合指数均达到重度污染水平,应该加大对当地农田土壤环境质量的观察监测,及时掌握土壤中重金属含量变化情况,减轻重金属对农田造成的污染,保证水稻的品质和质量,保护人体健康。

(上接第 42 页)

方法也可在改进栽培容器的基础上进行其它种类食用菌菌株的筛选,在适宜秸秆培养基质栽培食用菌的菌株选育上有待于进一步研究试验。

参 考 文 献:

- [1] 中国食用菌协会. 2021 年度全国食用菌统计调查结果分析[J]. 中国食用菌, 2023, 42(1): 118-127.
- [2] 桂明英, 王刚, 郭永红, 等. 食用菌育种技术的研究进

参 考 文 献:

- [1] 关共凑, 徐颂, 黄金国. 重金属在土壤—水稻体系中的分布、变化及迁移规律分析[J]. 生态环境, 2006, 15(2): 7-8.
- [2] 王硕, 罗杰, 蔡立梅, 等. 土壤-水稻系统中重金属的富集特征及对土壤元素标准限的判定[J]. 环境化学, 2018, 37(7): 68-74.
- [3] 王勇, 窦森. 长春市郊区土壤-水稻体系重金属含量及迁移规律[J]. 吉林农业大学学报, 2008, 30(5): 9-10.
- [4] 蔡苇. 黄石市基本农田水稻中重金属污染评价分析[J]. 黄石理工学院学报, 2009, 25(6): 21-25.
- [5] 吴迪, 杨秀珍, 李存雄, 等. 贵州典型铅锌矿区水稻土壤和水中重金属含量及健康风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(10): 1 992-1 998.
- [6] 李永亮, 李健, 李桂莲. 水稻田重金属污染调查及环境风险评价[J]. 甘肃农业大学学报, 2016, 51(5): 95-99.
- [7] 刘兰英, 黄薇, 吕新, 等. 田间环境下土壤-水稻系统重金属的迁移特征[J]. 福建农业学报, 2018, 33(1): 66-72.
- [8] 吴恙, 陈江. 重铬酸钾容量法测定土壤有机质-加热法研究[J]. 中国高新技术企业, 2016(26): 11-12.
- [9] 董霁红, 于敏, 程伟, 等. 矿区复垦土壤种植小麦的重金属安全性[J]. 农业工程学报, 2010, 26(12): 280-286.
- [10] 雷鸣, 曾敏, 郑表明, 等. 湖南采矿业和冶炼区水稻土重金属污染及其潜在风险评价[J]. 环境科学学报, 2008, 28(6): 1 212-1 220.
- [11] GB15618-1995, 中华人民共和国国家标准土壤环境质量标准.
- [12] 陆泗进, 王业耀, 何立环. 会泽某铅锌矿周边农田土壤重金属风险评价研究[J]. 中国环境监测, 2015(6): 7-8.
- [13] 包丹丹, 李恋卿, 潘根兴, 等. 苏南某冶炼厂周边农田土壤重金属分布及风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(8): 1 546-1 552.
- [1] 展[J]. 中国食用菌, 2006(5): 3-5.
- [3] 唐梦瑜, 么越, 荣丹, 等. 食用菌育种技术的研究进展[J]. 中国食用菌, 2022, 41(8): 1-6+10.
- [4] 李艳芳. 绥化学院校园三种野生食用菌研究[J]. 黑龙江农业科学, 2019, 305(11): 119-122.
- [5] 苏蓉, 尚晓冬, 徐珍, 等. 金针菇自交后代生物学特性的研究[J]. 菌物学报, 2009, 28(3): 378-384.
- [6] 潘保华, 李彩萍, 郭明慧, 等. 金针菇单孢结实性的研究及其应用[J]. 中国食用菌, 1994(3): 21-22.