



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2303314

引用格式:林小兵,陈国钧,周利军,等.南方典型稻田土壤-水稻系统环境质量评价[J].科学技术与工程,2024,24(16):6973-6979.

Lin Xiaobing, Chen Guojun, Zhou Lijun, et al. Environmental quality assessment of soil-rice system in typical paddy fields in southern China [J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(16): 6973-6979.

南方典型稻田土壤-水稻系统环境质量评价

林小兵^{1,2}, 陈国钧¹, 周利军¹, 黄尚书^{1,2}, 何绍浪¹, 王斌强¹,
武琳¹, 黄欠如¹, 万长艳^{1*}

(1. 江西省红壤及种质资源研究所, 国家红壤改良工程技术研究中心, 南昌 331717;

2. 江西农业大学国土资源与环境学院, 南昌 330045)

摘 要 为研究南方典型区域稻田土壤-水稻系统中重金属含量,采集江西省进贤县、金溪县、渝水区、高安市、安福县和兴国县6个水稻主产区典型田块土壤、水稻和灌溉水,重点分析土壤和水稻铅、镉、砷和汞含量及其土壤养分,并采用单因子污染指数和内梅罗综合指数对土壤-水稻系统中重金属含量进行评价。结果表明:研究区稻田土壤pH、有机质、总氮、总磷、总钾、碱解氮、有效磷和速效钾总均值分别为5.48、32.99 g/kg、2.06 g/kg、0.54 g/kg、16.04 g/kg、156.71 mg/kg、14.00 mg/kg和94.98 mg/kg。研究区土壤铅、镉、砷和汞含量总均值分别为35.46、0.18、7.21、0.17 mg/kg,单因子污染指数均小于1,内梅罗综合污染指数为0.56,土壤环境质量等级为清洁;但渝水土壤镉含量为0.37 mg/kg,超过限量标准(0.30 mg/kg),土壤环境质量属于警戒状态。研究区糙米铅、镉、砷和汞的含量总均值分别为0.06、0.17、0.24、0.008 6 mg/kg,单因子污染指数均小于1,内梅罗综合污染指数均值为0.77,糙米环境质量等级为警戒限;但兴国和渝水糙米镉含量分别为0.22、0.35 mg/kg,均超过限量标准(0.20 mg/kg),环境质量等级分别为警戒限和轻度污染。相关性表明,糙米镉与土壤镉和铅呈显著正相关,而与土壤砷呈显著负相关;糙米砷与土壤砷和有效磷呈显著正相关。总之,重金属镉是调查区域水稻安全性最主要的潜在污染元素,需重点关注兴国和渝水两地水稻食品安全。

关键词 稻田;土壤养分;重金属;环境质量;评价

中图法分类号 X825 X53; **文献标志码** A

Environmental Quality Assessment of Soil-rice System in Typical Paddy Fields in Southern China

LIN Xiao-bing^{1,2}, CHEN Guo-jun¹, ZHOU Li-jun¹, HUANG Shang-shu^{1,2}, HE Shao-lang¹,
WANG Bin-qiang¹, WU Lin¹, HUANG Qian-ru¹, WAN Chang-yan^{1*}

(1. National Engineering and Technology Research Center for Red Soil Improvement, Jiangxi Institute of Red Soil and Germplasm Resources, Nanchang 331717, China; 2. College of Land Resources and Environment, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China)

[Abstract] In order to study the content of heavy metals in paddy soil-rice system in typical areas of southern China. Soil, rice and irrigation water samples were collected from six typical paddy fields in Jinxian County, Jinxi County, Yushui District, Gao'an City, Anfu County and Xingguo County of Jiangxi Province. The contents of lead, cadmium, arsenic and mercury in soil and rice and soil nutrients were analyzed. The content of heavy metals in soil-rice system was evaluated by single factor pollution index and Nemero comprehensive index. Results show that the mean values of soil pH, organic matter, total nitrogen, total phosphorus, total potassium, available nitrogen, available phosphorus and available potassium are 5.48, 32.99 g/kg, 2.06 g/kg, 0.54 g/kg, 16.04 g/kg, 156.71 mg/kg, 14.00 mg/kg and 94.98 mg/kg, respectively. The total average contents of lead, cadmium, arsenic and mercury are 35.46, 0.18, 7.21, 0.17 mg/kg in the soil of the study area. The single factor pollution index is less than 1, the Nemero comprehensive pollution index is 0.56, and the soil environmental quality grade is clean. While the soil cadmium content is 0.37 mg/kg in Yushui, exceeding the limit standard (0.30 mg/kg), and the soil environmental quality is alert. The total average contents of lead, cadmium, arsenic and mercury are 0.06, 0.17, 0.24, 0.008 6 mg/kg in brown rice of the study area. The single factor pollution index is less than 1, and the average Nemero comprehensive pollution index is 0.77. The environmental quality grade of brown rice is alert. The cadmium contents

收稿日期:2023-05-06 修订日期:2024-03-04

基金项目:江西省重大科技研发专项(20194ABC28010);江西省重大科技研发专项“揭榜挂帅”项目(20213AAF02026);井冈山农高区省级科技专项“揭榜挂帅”项目(20222-051245)

第一作者:林小兵(1992—),男,汉族,江西丰城人,博士,助理研究员。研究方向:土壤资源与环境生态。E-mail:linxiaobing14@mails.ucas.ac.cn。

* 通信作者:万长艳(1983—),女,汉族,江西南昌人,农艺师。研究方向:农学。E-mail:50263190@qq.com。

in brown rice of Xingguo and Yushui are 0.22、0.35 mg/kg, which exceeds the limit standard (0.20 mg/kg). The environmental quality grades are warning limit and mild pollution, respectively. Correlation analysis show that cadmium in brown rice is significantly positively correlated with cadmium and lead in soil, while negatively correlates with arsenic in soil. The arsenic in brown rice is significantly positively correlated with arsenic and available phosphorus in soil. In short, heavy metal cadmium is the most important potential pollution element for rice safety in the survey area, and it is necessary to focus on rice food safety in Xingguo and Yushui.

[Keywords] paddy field; soil nutrients; heavy metals; environmental quality; evaluation

随着中国经济的快速发展,矿石及有色金属开采、工业“废水、废气、废渣”和交通运输等^[1-2]引起土地退化、土壤污染问题日益突出。其中,土壤重金属污染具有长期累积性、隐蔽滞后性、不可逆性及富集性等^[3]特点。据报道显示^[4],中国耕地土壤点位超标率为19.4%,其中土壤重金属镉、砷、汞和铅等污染物的点位超标率分别为7.0%、2.7%、1.6%和1.5%。土壤重金属污染会导致土壤肥力退化、作物产量和品质下降,并通过食物链危害人类健康^[5-6],农田环境质量特别是重金属污染已成为当前的研究热点和难点。

江西省作为中国粮食主产区和重要的稻米产区,水稻占全国总播种面积的11.27%,占中国稻谷总产的9.77%^[7]。江西省矿产资源特别是有色金属丰富,随着矿产开采、金属冶炼等活动带来了重金属污染^[8]。同时江西稻田土壤酸化,土壤重金属污染严重制约着江西水稻绿色安全生产^[9]。水稻(*Oryza sativa* L.)作为中国主要的粮食作物,与其他农作物相比,对土壤重金属特别是镉具有很强的转运和富集能力^[10-11]。江西部分区域受矿山开发、污水灌溉等影响,土壤镉、铜、砷、汞等重金属出现累积,水稻重金属超标危险逐年增加^[12]。周墨等^[13]对江西赣州主要水稻产区调查发现,水稻食品安全总体较好,但重金属镉的超标率(9.12%)仍较高。

基于此,通过调查江西省不同区域典型农田土壤养分特征及土壤-水稻重金属元素镉(Cd)、汞(Hg)、铅(Pb)和砷(As)污染富集状况,通过单因子指数和内梅罗综合指数对研究区重金属的污染状况进行评价,并采用相关性分析探究糙米重金属与环境因子的相互关系。以期为准掌握江西省水稻主产区土壤-糙米重金属污染状况,保障水稻品质和食用安全提供数据支撑和理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究地概况

调查点1位于江西省南昌市进贤县罗溪镇新厦周家村(116°9'3.57"E, 28°26'3.58"N),水稻种植面积133.33 hm²,晚稻品种为五优308;调查点2位于抚州市金溪县合市镇坪上村(115°24'8.60"E, 26°14'10.72"N),水稻种植面积153.33 hm²,晚稻品种为荣优225;调查

点3位于新余市渝水区罗坊镇罗家村(115°6'23.01"E, 27°51'20.38"N),水稻种植面积600.00 hm²晚稻品种为五优308;调查点4位于宜春市高安市荷岭镇清溪村(115°23'39.77"E, 28°20'43.27"N),水稻种植面积266.67 hm²,晚稻品种为荣优华占;调查点5位于吉安市安福县瓜畲乡蓼里村(114°42'9.50"E, 27°27'11.46"N),水稻种植面积166.67 hm²,晚稻品种为荣优225;调查点6位于赣州市兴国县瓜杰村镇大江村(115°24'8.60"E, 26°14'10.72"N),水稻种植面积233.33 hm²,晚稻品种为荣优225。

1.2 样品采集与测试

于2018年晚稻成熟期分别在江西省进贤县、金溪县、渝水区、高安市、安福县和兴国县6个水稻主产区进行取样。选择能代表被调查区域的地块作为采样单元,采集样品区域远离公路、地势平坦、土壤均匀,采样方法为“S”形布点采样。各采样点均采集深度为0~20 cm的表层土壤样本,选取5个样本混合后作为该采样点的土壤,每个区域重复3次,采集土壤样同时对应采集水稻植株样品和田块附近的进水和出水口。

土壤有机质、pH、全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷、速效钾等理化性质采用常规分析方法测定^[14]。土壤和糙米重金属铅和镉采用电感耦合等离子体发射光谱法测定,砷和汞采用原子荧光光谱法测定。水质pH采样电极法测定,总铜、总锌、总铅、总镉采用原子吸收分光光度法测定,总砷和总汞采用原子荧光法测定,化学需氧量采用重铬酸盐法测定,氨氮采用流动注射分析-分光光度法测定,硝酸盐氮采用紫外分光光度法测定。

1.3 研究方法

1.3.1 单因子指数法

计算污染指数 P_i ^[15],计算公式为

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

式(1)中: P_i 为第*i*种重金属单因子污染指数; C_i 和 S_i 分别为第*i*种土壤重金属的实测值和标准值, $P_i < 1$,无污染; $1 \leq P_i < 2$,轻度污染; $2 \leq P_i < 3$,中度污染; $P_i \geq 3$,严重污染。

1.3.2 内梅罗综合指数法

计算污染指数 P_N ^[15],计算公式为

$$P_N = \left\{ \frac{1}{2} \left[\text{average} \left(\frac{C_i}{S_i} \right)^2 + \max \left(\frac{C_i}{S_i} \right)^2 \right] \right\}^{1/2} \quad (2)$$

式(2)中: P_N 为内梅罗综合指数; $\text{average} \left(\frac{C_i}{S_i} \right)$ 和 $\max \left(\frac{C_i}{S_i} \right)$ 分别为土壤中各重金属污染指数的平均值和最大值; $P_N \leq 0.7$,清洁; $0.7 < P_N \leq 1.0$,警戒限; $1.0 < P_N \leq 2.0$,轻度污染; $2.0 < P_N \leq 3.0$,中度污染; $3.0 < P_N$,重度污染。

1.4 数据处理

本试验数据统计分析采用 R 语言软件(www.r-project.org,R 4.2.1)完成,所有制图通过 R 语言软件程序包 ggplot2 完成。

$$E_{co} = \frac{B_c}{S_c} \quad (3)$$

式(3)中: E_{co} 为富集系数; B_c 为糙米中重金属含量; S_c 为土壤中重金属含量。

2 结果与分析

2.1 不同区域稻田土壤养分含量

参照《江西红壤》土壤养分等级标准及文献[16-17],不同区域稻田土壤养分特征如表1所示,从均值来看,调查区域土壤 pH 为 5.48,大部分土壤呈酸性,其中以高安土壤 pH 最高,金溪最低;土壤有机质含量为 32.99 g/kg,属中等偏上水平,其中以金溪土壤有机质最高,兴国最低;土壤总氮和碱解氮含量分别为 2.06 g/kg 和 156.71 mg/kg,均达到丰富水平,其中以金溪土壤总氮和碱解氮最高,兴国最低;土壤总磷和有效磷含量分别为 0.54 g/kg 和 14.00 mg/kg,属较低和中等水平,其中以安福土壤总磷和有效磷最高,兴国最低;土壤总钾和速效钾含量分别为 16.04 g/kg 和 94.98 mg/kg,达到丰富和中等水平,其中以兴国土壤总钾最高,进贤最低,但土壤速效钾以进贤最高,兴国最低。

2.2 不同区域稻田土壤重金属含量

由表2可知,研究区土壤重金属铅、镉、砷和汞的平均含量分别为 35.46、0.18、7.21、0.17 mg/kg,均未超过《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618—2018)^[18]。进一步分析发现渝水区域稻田土壤镉含量为 0.37 mg/kg,超过土壤镉限量标准(0.30 mg/kg),超标率达 66.66%,为该地区稻田土壤环境质量首要的限制因子。

以标准值为评价标准时,从表3可以看出,研究区土壤重金属铅、镉、砷和汞的单因子污染指数均值分别为 0.44、0.59、0.24 和 0.35,单因子污染指数均值均小于 1,表明土壤重金属污染较低。土壤重金

表2 不同区域稻田土壤重金属含量
Table 2 Heavy metals content from paddy soil in different areas

地区	金属含量/(mg·kg ⁻¹)			
	铅	镉	砷	汞
均值	35.46	0.18	7.21	0.17
安福	22.73	0.16	4.95	0.14
高安	26.26	0.17	10.41	0.20
金溪	42.46	0.17	8.70	0.31
进贤	22.57	0.11	9.35	0.15
兴国	56.06	0.11	4.84	0.12
渝水	42.67	0.35	5.02	0.12

表3 不同区域稻田土壤中不同重金属 P_i 及 P_N
Table 3 P_i and P_N of different heavy metals from paddy soil in different areas

地区	P_i				P_N	综合评价
	铅	镉	砷	汞		
均值	0.44	0.59	0.24	0.35	0.56	清洁
安福	0.28	0.53	0.16	0.27	0.44	清洁
高安	0.33	0.57	0.35	0.39	0.52	清洁
金溪	0.53	0.57	0.29	0.62	0.61	清洁
进贤	0.28	0.36	0.31	0.29	0.34	清洁
兴国	0.70	0.38	0.16	0.24	0.56	清洁
渝水	0.53	1.16	0.17	0.25	0.90	警戒限

表1 不同区域稻田土壤养分特征
Table 1 Characteristics of nutrient from paddy soil in different areas

地区	pH	含量						
		有机质/ (g·kg ⁻¹)	总氮/ (g·kg ⁻¹)	总磷/ (g·kg ⁻¹)	总钾/ (g·kg ⁻¹)	碱解氮/ (mg·kg ⁻¹)	有效磷/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾/ (mg·kg ⁻¹)
均值	5.48	32.99	2.06	0.54	16.04	156.71	14.00	94.98
安福	5.83	36.72	2.34	0.63	15.50	161.26	25.96	105.19
高安	5.87	30.83	1.99	0.58	11.56	161.13	10.17	100.96
金溪	4.87	43.61	2.60	0.61	13.27	203.16	24.01	98.65
进贤	5.47	35.75	2.31	0.62	10.65	187.33	11.23	117.82
兴国	5.11	22.84	1.42	0.37	31.53	110.19	5.67	39.80
渝水	5.71	28.19	1.72	0.41	13.73	119.25	6.33	107.46

属内梅罗综合污染指数均值为 0.56,表明研究区稻田土壤环境质量等级为清洁,环境质量较好。仅有渝水土壤重金属镉单因子污染指数为 1.16,内梅罗综合污染指数为 0.90,土壤环境质量属于警戒状态,存在一定的环境风险。

2.3 不同区域稻田糙米重金属含量

由图 1 可知,研究区糙米重金属铅、镉、砷和汞的平均含量分别为 0.06、0.17、0.24、0.008 6 mg/kg,均未超过现行《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2022)^[19]。进一步分析发现渝水区域糙米镉含量为 0.35 mg/kg,超过食品中污染物限量标准(0.20 mg/kg),超标率达 66.66%,兴国区域糙米镉含量为 0.22 mg/kg,也超过食品中污染物限量标准,超标率达 66.66%,研究区水稻以重金属镉超标为主,应特别重点关注渝水和兴国的糙米镉污染。

采用单因子和内梅罗综合指数评价研究区水稻污染特征,结果如表 4 所示,研究区糙米重金属铅、镉、砷和汞的单因子污染指数均值分别为 0.28、0.87、0.49 和 0.33,单因子污染指数均值均小于 1,表明水稻糙米重金属污染较低。糙米重金属内梅罗综合污染指数均值为 0.77,表明研究区糙米环境质量等级为警戒限,存在一定的风险。其中兴国糙米镉单因子污染指数均值为 1.11,糙米重金属处于

表 4 不同区域糙米中不同重金属 P_i 及 P_N

Table 4 P_i and P_N of different heavy metals from brown rice in different areas

地区	P_i				P_N	综合评价
	铅	镉	砷	汞		
均值	0.28	0.87	0.49	0.33	0.77	警戒限
安福	0.22	0.60	0.69	0.32	0.66	清洁
高安	0.22	0.47	0.44	0.36	0.47	清洁
金溪	0.24	0.80	0.45	0.20	0.64	清洁
进贤	0.39	0.50	0.28	0.56	0.54	清洁
兴国	0.30	1.11	0.53	0.22	0.94	警戒限
渝水	0.30	1.74	0.54	0.31	1.36	轻度

轻微污染,内梅罗综合污染指数均值为 0.94,糙米环境质量等级为警戒限。其中渝水糙米镉单因子污染指数均值为 1.74,糙米重金属处于轻微污染,内梅罗综合污染指数均值为 1.36,糙米环境质量等级为轻度污染。

2.4 不同区域重金属富集特征

从图 2 可以看出,水稻糙米中重金属铅、镉、砷和汞的富集系数均值分别为 0.001 9、1.11、0.05 和 0.05。水稻从土壤中富集重金属的能力大小依次为:镉>砷>汞>铅。不同地区表现为进贤地区糙米对铅和汞富集系数最高,分别为 0.003 4 和 0.08;兴国地区糙米对镉和砷富集系数最高,分别为 2.23 和 0.07,其中兴国和渝水地区糙米对镉富集系数均

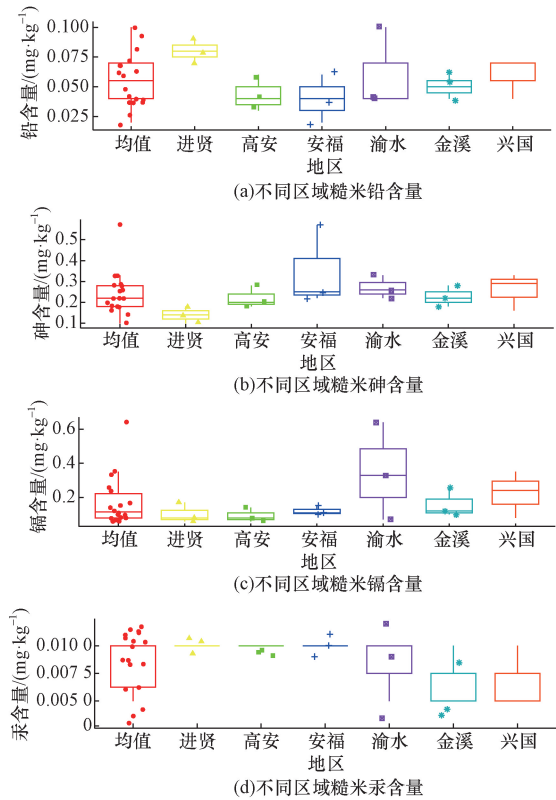


图 1 不同区域糙米重金属含量

Fig. 1 Heavy metal content of brown rice in different areas

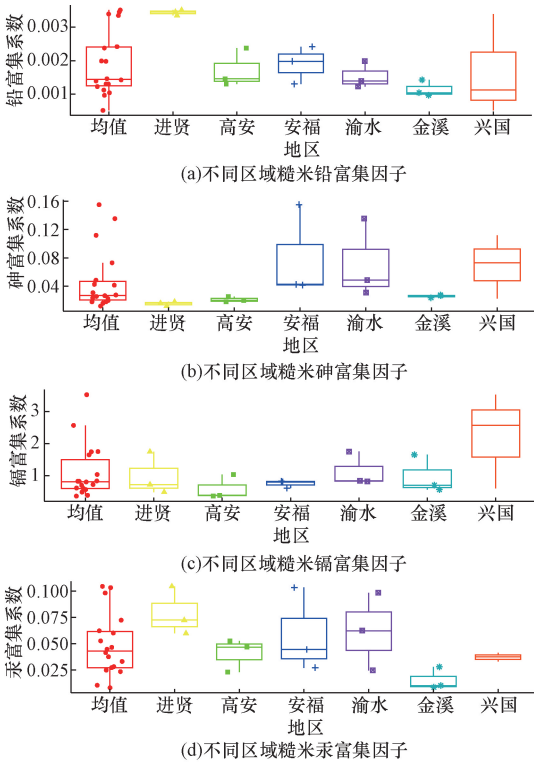


图 2 不同区域糙米重金属富集因子

Fig. 2 Heavy metal bioaccumulation factors of brown rice in different areas

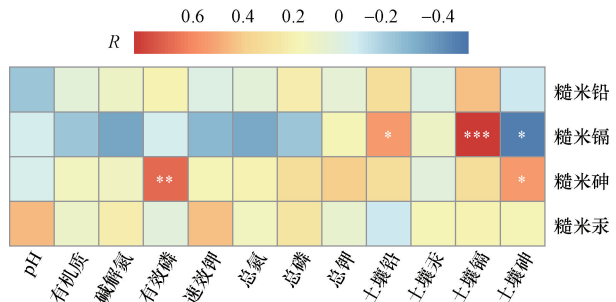
大于1,说明该地区糙米对镉的吸收累积能力相对较强。

2.5 不同区域稻田灌溉水质环境质量评价

分析稻田进水和出水的pH、氨氮、硝酸盐氮、化学需氧量、总铜、总锌、总砷和总汞8项水质指标(表5)。依据《农田灌溉水质标准》(GB 5084—2021)^[20],以水稻农田灌溉用水水质标准作为基础值,结果表明研究区进水和出水水质环境质量较好,农田灌溉水pH、氨氮、硝酸盐氮、化学需氧量、总铜、总锌、总砷和总汞8项指标均在标准范围内。

2.6 相关性分析

将土壤pH、有机质、碱解氮、有效磷、速效钾、全氮、全磷、全钾、铅、汞、镉与糙米铅、镉、砷、汞进行相关性分析(图3),结果表明:糙米镉与土壤镉和铅呈显著正相关,其相关系数分别为 $R=0.77^{***}$ 和 0.49^{*} ,而与土壤砷呈显著负相关,其相关系数为 $R=-0.51^{*}$;糙米砷与土壤砷和有效磷的相关性均达



* 为 $P < 0.05$; ** 为 $P < 0.01$; *** 为 $P < 0.001$
图3 研究区域土壤养分及重金属与糙米重金属的相关性分析

Fig.3 Correlation analysis of soil nutrients and heavy metals with heavy metals of brown rice in study areas

显著水平,其相关系数分别为 $R=0.56^{*}$ 和 0.63^{**} 。糙米铅和汞与土壤理化性质及其他重金属相关性较弱($P > 0.05$)

3 讨论

重金属是影响农田土壤环境质量的主要污染物^[21]。研究发现,研究区稻田土壤重金属含量大部分低于中国土壤环境质量标准中规定的标准限值^[18],但也存在少量土壤重金属镉超标;总体上水稻糙米重金属污染较低,内梅罗综合污染指数表明,研究区糙米环境质量为警戒限,存在一定的风险,其中兴国糙米镉处于轻微污染,环境质量等级为警戒限;渝水糙米镉处于轻微污染,环境质量等级为轻度污染。水稻对不同重金属富集能力差异显著,对重金属镉的富集系数最高,其中兴国和渝水地区糙米对镉富集系数均大于1,远高于其他重金属元素^[13]。余鸿燕等^[22]针对重庆稻田土壤重金属调查发现,部分区域存在镉元素污染,目前镉已成为中国土壤中主要污染重金属元素^[23],特别是西南、中南、长三角等地区,部分区域农用地土壤污染问题相当突出^[24]。

相关性表明,糙米镉与土壤镉和铅呈显著正相关,而与土壤砷呈显著负相关;糙米砷与土壤砷和有效磷呈显著正相关。研究表明土壤镉含量是影响糙米镉含量的主要因素之一^[25],土壤—水稻系统中重金属镉的迁移和累积主要取决于人为污染和土壤的化学性质^[26]。渝水区作为典型的工业城市,发展过程中会带来的环境污染,部分区域农用地出现糙米Cd超标现象^[27],研究表明赣州地区水稻对重金属镉的富集能力最强,其中兴国县存在一定的

表5 不同区域稻田灌溉水质环境质量评价

Table 5 Environmental quality assessment of irrigation water quality from paddy in different areas

地区	进、出水情况	pH	含量/(mg·L ⁻¹)						
			氨氮	硝酸盐氮	化学需氧量	总铜	总锌	总砷	总汞
均值	进水	7.34	<0.02	0.99	24.79	0.002 5	0.059 6	0.001 0	0.000 5
	出水	7.57	0.13	0.23	31.75	0.002 4	0.058 9	0.001 3	0.000 6
安福	进水	7.39	<0.02	1.82	37.58	0.001 3	0.056 7	0.000 7	0.000 4
	出水	7.77	0.06	0.22	35.22	0.002 7	0.058 3	0.002 3	0.000 6
高安	进水	7.38	<0.02	1.65	39.93	0.001 7	0.057 3	0.001 7	0.000 4
	出水	7.37	0.10	0.27	28.73	0.002 3	0.059 3	0.001 0	0.000 5
金溪	进水	7.18	<0.02	0.57	9.54	0.001 3	0.060 7	0.000 3	0.000 5
	出水	7.65	0.03	0.09	21.84	0.001 7	0.057 7	0.001 0	0.000 9
进贤	进水	7.24	<0.02	0.49	9.77	0.001 0	0.056 3	0.001 3	0.000 5
	出水	7.52	0.10	0.13	16.60	0.001 3	0.058 7	0.001 0	0.000 5
兴国	进水	7.49	<0.02	0.62	9.89	0.003 0	0.058 3	0.000 7	0.000 5
	出水	7.51	0.13	0.33	52.42	0.003 3	0.059 3	0.001 0	0.000 7
渝水	进水	7.33	0.23	0.69	36.94	0.007 0	0.068 3	0.001 3	0.000 8
	出水	7.58	0.37	0.27	35.70	0.003 3	0.060 3	0.001 7	0.000 5
农田水质标准		5.5~8.5	50	30	150	0.5	2	0.05	0.001

注:灌溉水中总铅和总镉均为未检出;农田水质标准依据《农田灌溉水质标准》(GB 5084—2021)^[20]。

风险^[13]。调查区域农田灌溉水质(表3)进水和出水水质环境质量较好。研究发现,江西农业用地土壤重金属的主要来源为施肥(磷肥、有机肥)等^[28]。穆虹宇等^[29]调查发现,过磷酸钙和磷肥中镉、砷、汞等重金属含量明显偏高,长期施用肥料会造成土壤重金属存在超标风险。

综上,总体上调查区域土壤-水稻重金属污染较轻,但存在部分地区重金属超标现象。调查发现,镉元素是研究区域土壤污染监测和控制的重点,渝水和兴国两地糙米镉存在超标风险。针对渝水和兴国土壤-水稻中重金属镉超标地区,种植户和农业有关部门需引起重视,采取有效措施防范其风险。如使用低积累水稻品种、水分调控和深翻耕等农艺措施;避免农药、动物粪肥和含重金属化肥等使用;针对研究区土壤具有酸性强、养分不均等特点,建议采取科学措施平衡和补充土壤养分,防范土壤酸化导致的重金属活化。

4 结论

调查区域大部分土壤呈酸性,除全磷外,土壤有机质、全量和速效养分处于中等偏上水平;总体上,除渝水外,土壤重金属含量均低于限量值,水稻糙米重金属污染较低,但兴国和渝水两地糙米镉处于轻微污染,存在一定风险。建议对兴国和渝水两地调查区域适时开展农业生态和生物修复工作。

参 考 文 献

[1] 梁晓曼,崔邢涛. 唐山南部稻田土壤和稻米中重金属状况调查及风险评价[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(35): 14953-14961.
Liang Xiaoman, Cui Xingtao. Investigation and risk assessment of heavy metals in paddy soil and rice in southern Tangshan[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(35): 14953-14961.

[2] 刘进,潘月鹏,师华定. 华北地区农田土壤镉来源及大气沉降的贡献[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(8): 1698-1708.
Liu Jin, Pan Yuepeng, Shi Huading. Atmospheric deposition as a dominant source of cadmium in agricultural soils of north China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2022, 41(8): 1698-1708.

[3] Wang C, Yang Z F, Zhong C, et al. Temporal-spatial variation and source apportionment of soil heavy metals in the representative river-alluviation depositional system[J]. Environmental Pollution, 2016, 216: 18-26.

[4] 中华人民共和国生态环境部, 中华人民共和国自然资源部. 全国土壤污染状况调查公报[R]. 北京: 中华人民共和国生态环境部, 中华人民共和国自然资源部, 2014.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. National soil pollution status survey report[R]. Beijing: Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China, 2014.

[5] 陆文龙,李智伟,任凯,等. 镉胁迫下生物质炭对小白菜生长特性的影响[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(21): 335-338.
Lu Wenlong, Li Zhiwei, Ren Kai, et al. Effects of biomass charcoal on growth characteristics of pakchoi under cadmium stress[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(21): 335-338.

[6] Qin S, Liu H, Nie Z, et al. Toxicity of cadmium and its competition with mineral nutrients for uptake by plants: a review[J]. Pedosphere, 2020, 30(2): 168-180.

[7] 贺晓鹏,边建民,欧阳林娟,等. 江西省水稻种业创新发展对策建议[J]. 江西农业大学学报 2021, 43(3): 479-487.
He Xiaopeng, Bian Jianmin, Ouyang Linjuan, et al. Suggestions on innovative development of rice seed industry in Jiangxi Province[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2021, 43(3): 479-487.

[8] 张笑辰,刘煜,张兴绘,等. 江西省主要城市土壤重金属污染及风险评价[J]. 环境科学与技术, 2022, 45(8): 206-217.
Zhang Xiaochen, Liu Yu, Zhang Xinghui, et al. Heavy metal pollution and risk assessment of top-soil in major cities of Jiangxi Province[J]. Environmental Science & Technology, 2022, 45(8): 206-217.

[9] 周泉,黄国勤. 江西省水稻绿色生产的问题与对策研究[J]. 中国农业资源与区划, 2020, 41(2): 9-15.
Zhou Quan, Huang Guoqin. Research on green development of rice in Jiangxi Province[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2020, 41(2): 9-15.

[10] 柳赛花,陈豪宇,纪雄辉,等. 高镉累积水稻对镉污染农田的修复潜力[J]. 农业工程学报, 2021, 37(10): 175-181.
Liu Saihua, Chen Haoyu, Ji Xionghui, et al. Remediation potential of rice with high cadmium accumulation to cadmium contaminated farmland[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(10): 175-181.

[11] Zhou Y M, Long S S, Li B Y, et al. Enrichment of cadmium in rice (*Oryza sativa* L.) grown under different exogenous pollution sources[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27(35): 44249-44256.

[12] 夏文建,徐昌旭,刘增兵,等. 江西省农田重金属污染现状及防治对策研究[J]. 江西农业学报, 2015, 27(1): 86-89.
Xia Wenjian, Xu Changxu, Liu Zengbing, et al. Status of heavy metal pollution in farmland soil of Jiangxi Province and its control counter measures[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2015, 27(1): 86-89.

[13] 周墨,唐志敏,张明,等. 江西赣州地区土壤-水稻系统重金属含量特征及健康风险评价[J]. 地质通报, 2021, 40(12): 2149-2158.
Zhou Mo, Tang Zhimin, Zhnag Ming, et al. Characteristics and health risk assessment of heavy metals in soil-rice system in the Ganzhou area, Jiangxi Province[J]. Geological Bulletin of China, 2021, 40(12): 2149-2158.

[14] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000.
Lu Rukun. Analytical methods of soil and agro-chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.

[15] 林小兵,武琳,王惠明,等. 不同功能区蔬菜地土壤重金属污染特征及其风险评价[J]. 生态环境学报, 2020, 29(11): 2296-2306.
Lin Xiaobing, Wu Lin, Wang Huiming, et al. Heavy metals pollution characteristics and risk assessment of vegetable soil in different functional areas[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2020, 29(11): 2296-2306.

- 2296-2306.
- [16] 江西省土地利用管理局, 江西省土壤普查办公室. 江西土壤[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 1991.
- Jiangxi Provincial Land Use Management Bureau, Jiangxi Provincial Soil Survey Office. Jiangxi soil[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1991.
- [17] 林圣玉, 李英, 张华明, 等. 鄱阳湖区坡耕地土壤肥力质量评价[J]. 中国水土保持, 2018, 39(11): 60-67.
- Lin Shenyu, Li Ying, Zhang Huaming, et al. Assessment on soil fertility quality of slope farmland in Poyang Lake area[J]. Soil and Water Conservation in China, 2018, 39(11): 60-67.
- [18] 中华人民共和国生态环境部, 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.
- Ministry of Ecological and Environment of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation of the People's Republic of China. Standard for soil environmental quality and quantity standard for soil pollution risk control of agricultural land (for trial implementation): GB 15618—2018[S]. Beijing: China Environment Branch, Academic Press, 2018.
- [19] 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.
- National Health Commission of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation of the People's Republic of China. National food safety standard pollutants in food limit: GB 2762—2022[S]. Beijing: China Environment Branch, Academic Press, 2022.
- [20] 中华人民共和国生态环境部, 国家市场监督管理总局. 农田灌溉水质标准: GB 5084—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- Ministry of Ecological and Environment of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation of the People's Republic of China. The quality standard for irrigation water: GB 5084—2021[S]. Beijing: China Standard Press, 2021.
- [21] 刘海, 魏伟, 宋阳, 等. 皖江经济带耕地重金属健康风险评价及环境基准[J]. 环境科学, 2023, 44(6): 3531-3543.
- Liu Hai, Wei Wei, Song Yang, et al. Health risk assessment and environmental benchmark of heavy metals in cultivated land in Wanjiang Economic Zone[J]. Environmental Science, 2023, 44(6): 3531-3543.
- [22] 余鸿燕, 唐子茜, 王娜, 等. 重庆稻田土壤重金属污染特征分析及风险评价[J]. 西南农业学报, 2023, 36(5): 1066-1073.
- Yu Hongyan, Tang Ziqian, Wang Na, et al. Analysis and risk assessment of heavy metal pollution of paddy soil in Chongqing[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2023, 36(5): 1066-1073.
- [23] 陈雅丽, 翁莉萍, 马杰, 等. 近十年中国土壤重金属污染源解析研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(10): 2219-2238.
- Chen Yali, Weng Liping, Ma Jie, et al. Review on the last ten years of research on source identification of heavy metal pollution in soils[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, 38(10): 2219-2238.
- [24] 汪洁, 朱有为, 杨肖娥, 等. 农用地土壤可持续安全利用的研究与实践——以浙江省镉污染农田为例[J/OL]. (2022-10-27)[2023-05-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20221026.1252.004.html>.
- Wang Jie, Zhu Youwei, Yang Xiaoe, et al. Research and practice on sustainable and safe utilization of soil in agricultural land: a case study of cadmium contaminated farmland in Zhejiang Province[J/OL]. (2022-10-27)[2023-05-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20221026.1252.004.html>.
- [25] 程韵韵, 周其文, 赵玉杰, 等. 基于蒙特卡洛模拟技术的杭嘉湖平原稻田土壤镉安全阈值研究[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(7): 88-93.
- Cheng Yunyun, Zhou Qiwen, Zhao Yujie, et al. The study on Cd safety benchmarks of paddy soil based on Monte Carlo simulation technology on Hangjiahu Plain[J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(7): 88-93.
- [26] 张良运, 李恋卿, 潘根兴. 南方典型产地大米 Cd、Zn、Se 含量变异及其健康风险探讨[J]. 环境科学, 2009, 30(9): 2792-2797.
- Zhang Liangyun, Li Lianqing, Pan Genxing. Variation of Cd, Zn and Se contents of polished rice and the potential health risk for subsistence-diet farmers from typical areas of south China[J]. Environmental Science, 2009, 30(9): 2792-2797.
- [27] 林小兵, 张秋梅, 周利军, 等. 南方红壤区喷施叶面硅肥对水稻 Cd 累积的影响[J]. 土壤与作物, 2022, 11(4): 428-436.
- Lin Xiaobing, Zhang Qiumei, Zhou Lijun, et al. Effects of foliar silicon fertilizer on cadmium accumulation in rice in red soil region of Southern China[J]. Soils and Crops, 2022, 11(4): 428-436.
- [28] 张笑辰, 刘煜, 张兴绘, 等. 江西省主要城市土壤重金属污染及风险评价[J]. 环境科学与技术, 2022, 45(8): 206-217.
- Zhang Xiaochen, Liu Yu, Zhang Xinghui, et al. Heavy metal pollution and risk assessment of top-soil in major cities of Jiangxi Province[J]. Environmental Science & Technology, 2022, 45(8): 206-217.
- [29] 穆虹宇, 庄重, 李彦明, 等. 我国畜禽粪便重金属含量特征及土壤累积风险分析[J]. 环境科学, 2020, 41(2): 986-996.
- Mu Hongyu, Zhuang Zhong, Li Yanming, et al. Heavy metal contents in animal manure in China and the related soil accumulation risks[J]. Environmental Science, 2020, 41(2): 986-996.