

## 缙云县某复垦地块土壤环境质量调查及生态风险评价

周 杨<sup>1</sup>, 周文斌<sup>1</sup>, 马嘉伟<sup>2</sup>, 阮忠强<sup>2</sup>, 叶正钱<sup>2</sup>, 柳 丹<sup>2</sup>

(1. 缙云县农业农村局, 浙江 缙云 321400; 2. 浙江农林大学 浙江省土壤污染生物修复重点实验室, 浙江 杭州 311300)

**摘要:** 【目的】进一步探索浙江省缙云县某复垦地土壤环境质量。【方法】于2020年在缙云县某复垦地开展土壤环境质量调查, 共采集17组土壤-水稻 *Oryza sativa* 籽粒复合样品, 测定土壤和籽粒中镉、铅、铬、汞、砷等重金属的质量分数, 利用单因子污染指数评价法、内梅罗综合指数法、潜在生态风险评价法和生态风险预警指数对土壤重金属污染程度进行评价。【结果】缙云县某复垦地块0~20 cm土层土壤重金属镉、铬、铅、汞、砷质量分数分别为0.33、107.74、53.40、0.03、18.42 mg·kg<sup>-1</sup>。其中35.29%的点位土壤砷超标, 其余4种重金属均未超过农用地土壤污染风险筛选值, 镉、砷平均质量分数高于浙江省土壤背景值。复垦地块个别点位水稻籽粒铬和铅超标。该复垦地块的内梅罗综合污染指数平均值为0.69, 有58.82%的点位处于警戒范围; 地累积指数从大到小依次为镉(0.08)、铅(0.01)、砷(-0.32)、铬(-0.35)、汞(-3.02); 潜在生态风险指数的平均值为74.10, 存在轻微生态风险; 土壤生态风险预警指数达到中度预警级别。【结论】复垦地块个别点位水稻籽粒铬和铅超标; 土壤重金属无点位超标, 但具有一定的生态风险, 其中重金属镉、铬、铅和砷是研究区最主要的生态风险因子, 后续应加强关注。表7参24

**关键词:** 水稻; 重金属; 土壤安全利用; 生态风险评价

中图分类号: S153; X53 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2022)02-0388-08

## Soil environmental quality investigation and ecological risk assessment of a reclamation land in Jinyun County

ZHOU Yang<sup>1</sup>, ZHOU Wenbin<sup>1</sup>, MA Jiawei<sup>2</sup>, RUAN Zhongqiang<sup>2</sup>, YE Zhengqian<sup>2</sup>, LIU Dan<sup>2</sup>

(1. Agriculture and Rural Bureau of Jinyun County, Jinyun 321400, Zhejiang, China; 2. Key Laboratory of Soil Contamination Bioremediation of Zhejiang Province, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China)

**Abstract:** [Objective] This study aims to explore the soil environmental quality of a reclaimed land in Jinyun County, Zhejiang Province. [Method] A soil environmental quality survey was carried out in the reclaimed land in Jinyun County in 2020. A total of 17 groups of soil-rice grain composite samples were collected to determine the contents of cadmium (Cd), lead (Pb), chromium (Cr), mercury (Hg), and arsenic (As) in soil and grain. The degree of soil heavy metal pollution was evaluated by single-factor pollution index evaluation method, Nemerow comprehensive index method, potential ecological risk evaluation method and ecological risk early warning index ( $I_{ER}$ ). [Result] The contents of Cd, Cr, Pb, Hg, and As in 0–20 cm soil layer of the reclaimed plot in Jinyun County were 0.33, 107.74, 53.40, 0.03, and 18.42 mg·kg<sup>-1</sup>, respectively. Among them, arsenic in 35.29% of the points exceeded the standard, and the other four heavy metals did not exceed the screening value of soil pollution risk of agricultural land. The average contents of Cd and As were higher than the soil background value of Zhejiang Province. Cr and Pb contents in rice at some points of the plot exceeded

收稿日期: 2021-04-15; 修回日期: 2021-12-14

基金项目: 浙江省重点研发计划项目(2018C03028)

作者简介: 周杨(ORCID: 0000-0002-2357-8046), 从事耕地土壤质量提升研究。E-mail: 1364284769@qq.com。通信作者: 柳丹(ORCID: 0000-0003-1102-6639), 教授, 博士, 从事土壤污染与生态修复研究。E-mail: liudan7812@aliyun.com

the national standard. The average value of Nemeiro Comprehensive Pollution Index in the study area was 0.69, and 58.82% of the points in the study area were in the alert range. The geo-accumulation index ranging from large to small was Cd (0.08), Pb (0.01), As (-0.32), Cr (-0.35), and Hg(-3.02). The average value of potential ecological risk index ( $I_R$ ) was 74.10, indicating a slight ecological risk.  $I_{ER}$  reached the moderate early warning level. [Conclusion] Cr and Pb contents exceed the national standard in rice at some points of the reclaimed land. No heavy metals exceeding the standard are observed in soil at any point, but there exists a certain ecological risk. Cd, Cr and Pb are the main ecological risk factors in the study area, which should be paid more attention to in the future. [Ch, 7 tab. 24 ref.]

**Key words:** rice; heavy metals; safe use of soil; ecological risk assessment

近年来, 由于工业、交通等多重因素的影响, 使得土壤环境遭受重金属污染的威胁<sup>[1]</sup>。重金属污染不仅会导致土壤质量退化, 降低作物品质和粮食产量, 从时间尺度上来看, 还会通过食物链危害人类和动物的健康<sup>[2]</sup>。重金属流入土壤后很难被发现, 其长期性、不可逆性等特性也导致重金属污染极难从土壤中完全去除, 极大限制了中国的农业发展<sup>[3]</sup>。作为中国主要的粮食作物之一, 水稻 *Oryza sativa* 占据了我国 55% 的谷物年消耗量, 其安全问题受到许多学者的关注<sup>[4]</sup>。研究发现: 水稻对土壤中的镉、铬、铅、砷和汞等重金属元素均具有吸收作用<sup>[5]</sup>, 而水稻植株累积重金属会抑制其对营养元素锌、铁、镁等的吸收<sup>[6]</sup>, 降低水稻籽粒品质。中国南方的水稻土壤重金属污染较为普遍, 严重威胁中国的粮食安全。因此, 评估重金属污染土壤所产水稻对人体健康产生的风险, 研究稻田土壤-水稻系统重金属的健康风险具有重要意义。

土壤复垦指在矿产资源开采、化工产业和燃煤发电等生产过程中被破坏的土地, 采取整治措施, 使其恢复到可利用状态。复垦地具有基质复杂、干扰因素较多、前处理困难、污染物种类多等特点<sup>[7-8]</sup>。本研究区域(浙江省缙云县某自然村废弃场地复垦点, 以下称复垦地块)原为金属镍提炼点。调查显示: 复垦地块部分地区存在重金属超标现象, 因此复垦后有必要对农产品的安全风险进行评估。早期的研究在进行重金属健康风险评价时, 或只考虑土壤直接暴露途径<sup>[9-10]</sup>, 或只考虑稻米途径<sup>[11-12]</sup>, 评价结果可能被低估。本研究共采集复垦地块 17 组土壤-水稻籽粒复合样品(其中有 1 地块无水稻样品), 研究水稻籽粒及根际土中重金属分布特征, 结合 GB 15618—2018《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》、GB/T 36869—2018《水稻生产的土壤 镉、铅、铬、汞、砷安全阈值》等相关标准, 评价重金属污染土壤所产水稻的健康风险, 为土壤污染防控及农产品质量安全提供科学依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区域

缙云县地处浙江省中南部丘陵山区(28°25′~28°57′N, 119°52′~120°25′E)。缙云县属中亚热带季风气候区, 总体上热量充足, 降水充沛, 温暖湿润, 冬夏略长, 春秋略短, 四季分明。年平均气温为 18.3 ℃, 年降水量为 1 387.7 mm, 年日照时数为 1 504.3 h。

复垦地块由缙云县某公司(用地面积约 3 557 m<sup>2</sup>)完成复垦, 并种植水稻。于 2020 年 9 月水稻收获期对复垦地块进行采样调查, 分别采集土壤及水稻籽粒样品, 分析土壤及水稻籽粒样品的重金属质量分数, 进行风险评价。

### 1.2 样品采集与处理

分别采集土壤样品 17 个, 水稻籽粒样品 16 个。采用全球定位系统定位, 在 0~20、20~40 cm 分层采集土壤样品, 同时采集对应的水稻籽粒样品。在每个取样点以周围 5 m×5 m 正方形范围内设置 5~6 个采样点, 均匀混合为 1 个样品。土壤样品自然风干后挑拣出石子、动植物残体等, 混匀磨碎过 2.00 mm 筛和 0.15 mm 筛备用。水稻籽粒用去离子水洗净, 70 ℃ 烘干至恒量, 使用脱壳机脱壳粉碎后备用。

### 1.3 样品分析与测定

土壤 pH 采用水土质量比 2.5:1.0 浸提, pH 计测定; 土壤有机质采用重铬酸钾容量法加热法测定;

全氮采用凯氏定氮法测定；有效磷采用氟化钠-盐酸提取，紫外/可见分光光度计测定；有效钾以  $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  中性乙酸铵提取，火焰分光光度法测定。

土壤重金属全量采用  $\text{HNO}_3\text{-HCl-HClO}_4$  微波消解后测定；水稻籽粒重金属采用硝酸微波消解后测定。待测液中的镉、铅采用石墨炉原子吸收光谱仪测定，汞、砷采用原子荧光光谱仪测定，铬采用火焰原子吸收光谱仪测定。测定时均加入国家标准土壤标样和大米国家标准参比物分别进行质量控制。分析结果符合质量控制要求。

#### 1.4 污染评价方法与标准

1.4.1 单因子污染指数评价法和内梅罗综合指数法 单因子污染指数法针对土壤中单一污染物进行评价。其计算公式为：

$$P_i = C_i/T_i \quad (1)$$

式(1)中： $P_i$ 为重金属元素*i*的污染指数； $C_i$ 为重金属元素*i*的质量分数( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )； $T_i$ 为重金属元素*i*的评价标准( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )。

内梅罗综合污染指数法<sup>[13-14]</sup>是在单因子污染指数评价的基础上对重金属污染进行综合性评价。其计算公式为：

$$P_{\text{综}} = \sqrt{(P_{i\text{max}}^2 + P_{i\text{ave}}^2)/2} \quad (2)$$

式(2)中： $P_{\text{综}}$ 为土壤污染综合指数； $P_{i\text{ave}}$ 为土壤中各污染指数平均值； $P_{i\text{max}}$ 为土壤中各污染指数最大值。

1.4.2 地累积指数法 地累积指数( $I_{\text{geo}}$ )法<sup>[15]</sup>被应用于自然成岩作用对背景值及人为活动对环境的影响评价。 $I_{\text{geo}}$ 的计算公式如下：

$$I_{\text{geo}} = \log_2 \left[ \frac{C_i}{1.5B_i} \right] \quad (3)$$

式(3)中： $I_{\text{geo}}$ 为地累积指数； $C_i$ 为重金属元素*i*的质量分数( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )； $B_i$ 为重金属元素*i*的地球化学背景值( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )。

1.4.3 潜在生态风险评价指数法和生态风险预警指数法 潜在生态风险评价指数法采用 HAKANSON<sup>[16]</sup>提出的生态风险指数法进行评价，以沉积学理论为基础，综合考虑了元素的富集程度及独特的毒性和综合生态危害<sup>[17-18]</sup>。其计算公式如下：

$$F_{ri} = C_i/C \quad (4)$$

$$E_{ri} = T_{ri}F_{ri} \quad (5)$$

$$I_R = \sum_{i=1}^n E_{ri} \quad (6)$$

式(4)~(6)中： $C_i$ 为重金属元素*i*的质量分数( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )； $C$ 为重金属元素*i*的参比值。 $F_r$ 、 $T_r$ 、 $E_r$ 分别为重金属污染系数、毒性响应系数和潜在生态危害指数。镉、铅、汞、砷、铬的毒性响应系数分别为30、5、40、10、2<sup>[19]</sup>。 $I_R$ 为5种重金属元素的综合潜在生态风险值。

采用生态风险预警指数<sup>[20]</sup>对水稻土生态风险进行预警评估。 $I_{\text{ER}}$ 的计算公式为：

$$I_{\text{ER}} = \sum_{i=1}^n I_{\text{ER}i} = \sum_{i=1}^n \left( \frac{C_{Ai}}{C_{Ri-1}} \right) \quad (7)$$

式(7)中： $I_{\text{ER}}$ 为生态风险预警指数； $I_{\text{ER}i}$ 为重金属元素*i*的生态风险指数； $C_{Ai}$ 为重金属元素*i*的质量分数( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )； $C_{Ri}$ 为重金属元素*i*的参比值。

#### 1.5 数据处理

采用 Excel 2016 对土壤及水稻籽粒重金属质量分数进行描述性统计分析。采用 SPSS 22.0 进行 Spearman 相关性分析。数据可视化绘制由 Origin 8.5 完成。

## 2 结果与讨论

### 2.1 土壤 pH 和养分状况

土壤 pH 和有机质质量分数对土壤重金属有效性均具有较大的影响。在相同的重金属污染水平下, 土壤高 pH、高有机质质量分数有利于降低重金属生物有效性, 抑制作物对重金属的吸收和积累, 降低其重金属污染风险<sup>[21]</sup>。根据调研结果, 复垦地块 0~20 cm 土层土壤 pH 为 6.73~8.53, 平均为 8.15, 属于碱性土壤; 土壤有机质为 3.98~9.94 g·kg<sup>-1</sup>, 平均为 6.51 g·kg<sup>-1</sup>。20~40 cm 土层土壤 pH 为 7.42~8.52, 平均为 8.24; 土壤有机质质量分数为 4.79~10.10 g·kg<sup>-1</sup>, 平均为 6.97 g·kg<sup>-1</sup>(表 1)。

表 1 复垦地块土壤 pH 和养分质量分数

Table 1 Status of soil pH and nutrient content in reclaimed land

项目	pH		有机质/(g·kg <sup>-1</sup> )		全氮/(g·kg <sup>-1</sup> )		有效磷/(mg·kg <sup>-1</sup> )		有效钾/(mg·kg <sup>-1</sup> )	
	0~20	20~40	0~20	20~40	0~20	20~40	0~20	20~40	0~20	20~40 cm
最小值	6.73	7.42	3.98	4.79	189.90	205.00	4.99	5.31	205.00	207.80
最大值	8.53	8.52	9.94	10.10	406.90	431.40	37.78	24.24	431.40	293.40
平均值	8.15	8.24	6.51	6.97	284.04	288.85	14.54	12.70	288.85	245.79
标准差	0.48	0.30	1.70	1.34	57.38	59.32	8.55	5.59	59.32	23.73
变异系数/%	5.85	3.68	26.12	19.23	20.20	20.54	58.77	44.05	20.54	9.65

复垦地块 0~20 cm 土层土壤有机质质量分数 < 10.00 g·kg<sup>-1</sup>, 全氮平均值为 284.04 mg·kg<sup>-1</sup>, 有效磷平均质量分数为 14.54 mg·kg<sup>-1</sup>。从总体来看, 调查地块养分质量分数偏低。

### 2.2 土壤重金属质量分数

复垦地块 0~20 cm 土层土壤重金属镉、铬、铅、汞、砷的质量分数分别为 0.209~0.598、71.80~145、43.10~67.10、0.021~0.034、8.61~23.70 mg·kg<sup>-1</sup>, 均值分别为 0.330、107.74、53.40、0.030 mg·kg<sup>-1</sup>、18.42 mg·kg<sup>-1</sup>。20~40 cm 土层土壤镉、铬、铅、汞、砷的质量分数分别为 0.240~0.497、72.80~139.00、44.60~65.30、0.029~0.058、7.39~21.40 mg·kg<sup>-1</sup>, 均值分别为 0.310、106.67、54.06、0.040、16.60 mg·kg<sup>-1</sup>(表 2)。2 层土壤中重金属质量分数从高到底依次为为铬、铅、砷、镉、汞。

表 2 复垦地块土壤重金属质量分数

Table 2 Soil heavy metal content of reclaimed land

项目	镉/(mg·kg <sup>-1</sup> )		铬/(mg·kg <sup>-1</sup> )		铅/(mg·kg <sup>-1</sup> )		汞/(mg·kg <sup>-1</sup> )		砷/(mg·kg <sup>-1</sup> )	
	0~20	20~40	0~20	20~40	0~20	20~40	0~20	20~40	0~20	20~40 cm
最小值	0.209	0.240	71.80	72.80	43.10	44.60	0.021	0.029	8.61	7.39
最大值	0.598	0.497	145.00	139.00	67.10	65.30	0.034	0.058	23.70	21.40
平均值	0.330	0.310	107.74	106.67	53.40	54.06	0.030	0.040	18.42	16.67
标准差	0.098	0.064	22.17	20.28	6.90	6.37	0.004	0.014	3.46	3.95
变异系数/%	30.05	20.61	20.58	19.01	12.93	11.79	14.81	35.12	18.77	23.72
超标率/%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

依据农用地土壤污染风险筛选值, 耕层土壤砷有 35.29% 的点位超标, 镉、铬、铅和汞 4 种重金属质量分数均未超标; 但以 GB/T 36869—2018《水稻生产的土壤 镉、铅、铬、汞、砷安全阈值》作为对比, 有少数点位的镉元素超出安全阈值, 同时有 88.24% 点位的耕层土壤砷元素超出安全阈值, 从长期来看, 对水稻安全生产而言, 重金属镉与砷仍然具有一定的风险。这是因为土壤 pH 会随着作物种植年份的延长而逐渐下降<sup>[22-23]</sup>, 而重金属的绝对值不会降低, 重金属的生物有效值就会随之增加<sup>[24]</sup>。因此, 镉和砷为复垦地块需要重点关注的重金属元素。试验测定重金属元素质量分数变异程度较低, 变异系数均小于 40%, 说明复垦后人为活动对该区域的重金属影响不大, 5 种重金属元素在空间上存在相似的污染程度。

### 2.3 水稻籽粒重金属质量分数

根据 GB 2762—2017《食品安全国家标准 食品中污染物限量》可知：复垦地块水稻个别点位铬和铅超标，超标率为 12.50%~18.75% (表 3)，可能原因是土壤中重金属铬和铅质量分数分别为 71.80~145.00 和 43.10~67.10  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，虽然未超出风险筛选值，但其质量分数相对比较高，从而导致水稻吸收的铬和铅超出限量值。

表 3 复垦地块水稻籽粒重金属质量分数

Table 3 Heavy metal content of rice in reclaimed land

项目	镉( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	铬( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	铅( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	汞( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	砷( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )
最小值	0.019	0.30	0.04	0.01	—
最大值	0.072	1.60	0.31	0.02	—
平均值	0.037	0.74	0.11	0.01	—
标准差	0.015	0.37	0.09	0.00	—
限量值	0.200	1.00	0.20	0.02	0.50
变异系数/%	40.71	49.57	82.05	24.75	—
超标率/%	0	18.75	12.50	0	0

说明：—表示未检测出，其中检测限制镉为 $<0.003\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，铬为 $<0.03\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，铅为 $<0.04\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，汞为 $<0.01\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，砷为 $<0.04\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

### 2.4 水稻土壤重金属污染评价

2.4.1 单因子污染指数评价和内梅罗综合指数评价 以 GB 15618—2018《农用地土壤污染风险筛选值》为依据，计算复垦地块土壤重金属的单因子污染指数和综合污染指数。以 0~20 cm 耕层土壤进行评价，重金属镉、铅、汞、砷、铬的单因子污染指数平均值分别为 0.43、0.24、0.01、0.90、0.32 (表 4)，部分点位重金属砷单因子污染指数大于 1.00，其余 4 种重金属单因子污染指数平均值均小于 1.00。

表 4 水稻土壤重金属污染指数

Table 4 Heavy metal pollution index of paddy soil

项目	单因子污染指数					综合指数
	镉	铅	汞	砷	铬	
最大值	0.75	0.36	0.05	1.19	0.47	0.88
最小值	0.26	0.18	0.00	0.43	0.21	0.37
平均值	0.43	0.24	0.01	0.90	0.32	0.69
标准差	0.14	0.05	0.02	0.18	0.08	0.11
变异系数/%	32.77	21.96	145.97	20.42	24.02	17.70

根据重金属元素不同污染级别点位占比可知 (表 5)：有 64.61% 的点位土壤砷单因子污染指数小于 1.00，其余 35.29% 的点位土壤砷超标。镉、铅、汞、铬等 4 种元素的单因子污染指数全部都小于 1.00，无超标点位。从内梅罗综合指数 (表 5) 看，复垦地块土壤镉、铅、汞、砷、铬综合指数为 0.37~0.88，其中 41.18% 的点位处于安全范围，58.82% 的点位处于警戒线。总体来看，复垦地块土壤环

表 5 基于污染指数法重金属污染点位分布

Table 5 Distribution of heavy metal pollution points based on pollution index method

单因子指数	污染等级	点位占比/%					综合指数	污染等级	点位占比/%
		镉	铅	汞	砷	铬			
$P_i \leq 1$	清洁	100	100	100	64.71	100	$P_{\text{综}} \leq 0.7$	安全	41.18
$1 < P_i \leq 2$	轻度污染	0	0	0	35.29	0	$0.7 < P_{\text{综}} \leq 1.0$	警戒	58.82
$2 < P_i \leq 3$	中度污染	0	0	0	0	0	$1.0 < P_{\text{综}} \leq 2.0$	轻度污染	0
$P_i > 3$	重度污染	0	0	0	0	0	$2.0 < P_{\text{综}} \leq 3.0$	中度污染	0

境受到重金属威胁，后续应加大保护修复力度，防止重金属污染，保护农产品安全。

2.4.2 地累积指数法 以浙江省土壤背景值为参比，对镉、铅、汞、砷、铬等 5 种重金属元素进行地累积指数评价 (表 6)。可以得出：5 种重金属元素的  $I_{geo}$  从大到小依次为镉 (0.08)、铅 (0.01)、砷 (-0.32)、铬 (-0.35)、汞 (-3.02)。在所有采样点位中，汞的  $I_{geo}$  均小于 0，呈现出无污染状态，污染最严重的为镉，其次为铅，地累积指数分别为 0.08 和 0.01，呈现出轻微污染的状态。铅和镉在复垦地块仅有 58.82% 的点位处于未被污染状态，其余 41.18% 的点位处于轻微富集状态，个别样点的砷、铬元素存在轻微富集现象 (表 6)。

表 6 重金属元素地累积指数评价特征值统计表

Table 6 Statistical table of evaluation characteristic values of accumulation index of heavy metal elements

元素	$I_{geo}$		$I_{geo} \leq 0$		$0 < I_{geo} \leq 1$		$1 < I_{geo} \leq 2$		$2 < I_{geo} \leq 3$		$3 < I_{geo} \leq 4$	
	变化范围	平均值	样品数	比率/%	样品数	比率/%	样品数	比率/%	样品数	比率/%	样品数	比率/%
镉	-0.52~1.00	0.08	10	58.82	7	41.18	0	0	0	0	0	0
铅	-0.28~0.35	0.01	10	58.82	7	41.18	0	0	0	0	0	0
汞	-3.40~-2.72	-3.02	6	35.29	0	0	0	0	0	0	0	0
砷	-1.39~0.07	-0.32	16	94.12	1	5.88	0	0	0	0	0	0
铬	-0.91~0.10	-0.35	15	88.24	2	11.76	0	0	0	0	0	0

2.4.3 潜在生态风险评价和生态风险预警 重金属元素铅、汞、砷、铬在研究区域的  $E_r$  平均值均小于 40，表明这 4 种重金属元素均处于轻度生态危害程度且各个采样点生态危害程度相差不大。5 种重金属元素潜在危害程度从高到低排序为镉 (49.16)、砷 (12.28)、铅 (7.63)、汞 (2.64)、铬 (2.39)，镉的潜在生态风险指数最高。这说明镉是复垦地块最主要的生态风险因子，主要在“中等”生态危害等级中分布，占比 64.71%，其次为轻微生态风险点位，占比 29.41%。依据  $I_R$  进行评价，复垦地块总体处于轻微生态风险状态。研究区域土壤生态风险预警指数 ( $I_{ER}$ ) 变化范围为 3.22~4.02，平均值为 3.67，达到中度预警级别 (表 7)。

表 7 水稻土重金属潜在生态风险评价

Table 7 Evaluation of potential ecological risks of heavy metals in paddy soils

项目	$E_r$					$I_R$	$I_{ER}$
	镉	铅	汞	砷	铬		
最大值	89.7	9.59	9.09	15.80	3.22	121.15	4.02
最小值	31.35	6.16	0.00	5.74	1.60	52.96	3.22
平均值	49.16	7.63	2.64	12.28	2.39	74.10	3.67
标准差	14.77	0.99	3.73	2.31	0.49	17.19	0.21
变异系数/%	30.05	12.93	141.53	18.77	20.58	23.19	5.68

### 3 结论

在整体空间内，复垦地块土壤砷元素有 35.29% 的点位超标，镉、铬、铅和汞 4 种重金属均未超过土壤重金属污染筛选值，但以 GB/T 36869—2018《水稻生产的土壤 镉、铅、铬、汞、砷安全阈值》作为参比，少数点位镉元素超出安全阈值，砷元素有 88.24% 的点位超出安全阈值。在对应的水稻籽粒样品中，复垦地块个别点位有铬和铅超标。根据生态风险评价结果，镉的潜在生态风险指数最高，是研究区最主要的生态风险因子。从总体来看，复垦地个别点位水稻籽粒铬和铅超标；土壤砷元素有部分点位超标，其他重金属存在着一定的生态风险。由于土壤 pH 会随着种植年限的延长而下降，可能会导致重金属超标。因此，重金属镉、铬、铅和砷是研究区最主要的生态风险因子，后续需要进一步加强农田土壤环境监管，保障土壤环境安全和农产品安全。

## 4 参考文献

- [1] 任露陆, 蔡宗平, 王固宁, 等. 不同钝化机制矿物对土壤重金属的钝化效果及微生物响应[J]. *农业环境科学学报*, 2021, **40**(7): 1470 – 1480.  
REN Lulu, CAI Zongping, WANG Guning, *et al.* Effects of minerals with different immobilization mechanisms on heavy metal availability and soil microbial responses [J]. *J Agro-Environ Sci*, 2021, **40**(7): 1470 – 1480.
- [2] 胡雪芳, 田志清, 梁亮, 等. 不同改良剂对铅镉污染农田水稻重金属积累和产量影响的比较分析[J]. *环境科学*, 2018, **39**(7): 3409 – 3417.  
HU Xuefang, TIAN Zhiqing, LIANG Liang, *et al.* Comparative analysis of different soil amendment treatments on rice heavy metal accumulation and yield effect in Pb and Cd contaminated farmland [J]. *Environ Sci*, 2018, **39**(7): 3409 – 3417.
- [3] 马佳燕, 马嘉伟, 柳丹, 等. 杭嘉湖平原水稻主产区土壤重金属状况调查及风险评价[J]. *浙江农林大学学报*, 2021, **38**(2): 336 – 345.  
MA Jiayan, MA Jiawei, LIU Dan, *et al.* Survey and risk assessment of soil heavy metals in the main rice producing areas in Hangjiahu Plain [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2021, **38**(2): 336 – 345.
- [4] YE Xinxin, MA Yibing, SUN Bo. Influence of soil type and genotype on Cd bioavailability and uptake by rice and implications for food safety [J]. *J Environ Sci*, 2012, **24**(9): 1647 – 1654.
- [5] 郝社锋, 任静华, 范健, 等. 江苏某市水稻籽粒重金属富集特征及健康风险评价[J]. *环境污染与防治*, 2021, **43**(2): 217 – 222.  
HAO Shefeng, REN Jinghua, FAN Jian, *et al.* Heavy metals accumulation characteristics and health risk assessment of rice grain produced in Jiangsu area [J]. *Environ Pollut Prev*, 2021, **43**(2): 217 – 222.
- [6] LIU J G, LIANG J S, LI K Q, *et al.* Correlations between cadmium and mineral nutrients in absorption and accumulation in various genotypes of rice under cadmium stress [J]. *Chemosphere*, 2003, **52**(9): 1467 – 1473.
- [7] 李忠煜, 李艳广, 黎卫亮, 等. 衍生化气相色谱-质谱法测定复垦土地样品中 19 种酚类污染物[J]. *岩矿测试*, 2021, **40**(2): 239 – 249.  
LI Zhongyu, LI Yanguang, LI Weiliang, *et al.* Determination of 19 phenolic pollutants in reclaimed land samples by derivation gas chromatography-mass spectrometry [J]. *Rock Mineral Anal*, 2021, **40**(2): 239 – 249.
- [8] 郭英英. 平朔矿区复垦地不同植被下苔藓植物群落数量生态研究[D]. 太原: 山西大学, 2020.  
GUO Yingying. *Quantitative Ecology of Bryophyte Community under Different Revegetation Patterns on the Reclaimed Dumps in Pingshuo Mining Area* [D]. Taiyuan: Shanxi University, 2020.
- [9] WANG Feifei, GUAN Qingyu, TIAN Jing, *et al.* Contamination characteristics, source apportionment, and health risk assessment of heavy metals in agricultural soil in the Hexi Corridor [J/OL]. *Catena*, 2020, **191**(3). doi: [10.1016/j.catena.2020.104573](https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104573).
- [10] 李春芳, 曹见飞, 吕建树, 等. 不同土地利用类型土壤重金属生态风险与人体健康风险[J]. *环境科学*, 2018, **39**(12): 342 – 352.  
LI Chunfang, CAO Jianfei, LÜ Jianshu, *et al.* Ecological risk assessment of soil heavy metals for different types of land use and evaluation of human health [J]. *Environ Sci*, 2018, **39**(12): 342 – 352.
- [11] CHEN Xiuxiu, LIU Yumin, ZHAO Qingyue, *et al.* Health risk assessment associated with heavy metal accumulation in wheat after long-term phosphorus fertilizer application [J/OL]. *Environ Pollut*, 2020, **262**: 114348 [2021-03-30]. doi: [10.1016/j.envpol.2020.114348](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114348).
- [12] 田美玲, 钟雪梅, 张云霞, 等. 矿业活动影响区稻田土壤和稻米中重金属含量及健康风险[J]. *环境科学*, 2018, **39**(6): 2919 – 2926.  
TIAN Meiling, ZHONG Xuemei, ZHANG Yunxia, *et al.* Concentrations and health risk assessments of heavy metal contents in soil and rice of mine contaminated areas [J]. *Environ Sci*, 2018, **39**(6): 2919 – 2926.
- [13] 李卫平, 王非, 杨文焕, 等. 包头市南海湿地土壤重金属污染评价及来源解析[J]. *生态环境学报*, 2017, **26**(11): 1977 – 1984.  
LI Weiping, WANG Fei, YANG Wenhuan, *et al.* Pollution assessment and source apportionment of heavy metals in Nanhai wetland soil of Baotou City [J]. *Ecol Environ Sci*, 2017, **26**(11): 1977 – 1984.

- [14] 李伟, 布多, 孙晶, 等. 拉萨巴嘎雪湿地土壤重金属分布及生态风险评价[J]. *环境化学*, 2021, **40**(1): 195 – 203.  
LI Wei, BU Duo, SUN Jing, *et al.* Distribution and ecological risk assessment of heavy metal elements in the surface sediments of Bagaxue wetlands in Lhasa [J]. *Environl Chem*, 2021, **40**(1): 195 – 203.
- [15] 杜昊霖, 王莺, 王劲松, 等. 青藏高原典型流域土壤重金属分布特征及其生态风险评价[J]. *环境科学*, 2021, **42**(9): 4422 – 4431.  
DU Haolin, WANG Ying, WANG Jinsong, *et al.* Distribution characteristics and ecological risk assessment of soil heavy metals in typical watersheds of Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Environ Sci*, 2021, **42**(9): 4422 – 4431.
- [16] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach [J]. *Water Res*, 1980, **14**(8): 975 – 1001.
- [17] SAEEDDI M, ZANJANI A J. Development of a new aggregative index to assess potential effect of metals pollution in aquatic sediments [J]. *Ecol Indic*, 2015, **58**: 235 – 243.
- [18] ZHANG Zhaoyong, LI Juying, MAMAT Z, *et al.* Sources identification and pollution evaluation of heavy metals in the surface sediments of Bortala River, Northwest China [J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2016, **126**: 94 – 101.
- [19] GUO Weihua, LIU Xianbin, LIU Zhanguang, *et al.* Pollution and potential ecological risk evaluation of heavy metals in the sediments around dongjiang harbor, Tianjin [J]. *Procedia Environ Sci*, 2010, **2**(1): 729 – 736.
- [20] 张云芸, 马瑾, 魏海英, 等. 浙江省典型农田土壤重金属污染及生态风险评价[J]. *生态环境学报*, 2019, **28**(6): 1233 – 1241.  
ZHANG Yunyun, MA Jin, WEI Haiying, *et al.* Heavy metals in typical farmland soils of Zhejiang Province: levels, sources and ecological risks [J]. *Ecol Environ Sci*, 2019, **28**(6): 1233 – 1241.
- [21] 李思民, 王豪吉, 朱曦, 等. 土壤 pH 和有机质含量对重金属可利用性的影响[J]. *云南师范大学学报(自然科学版)*, 2021, **41**(1): 49 – 55.  
LI Simin, WANG Haoji, ZHU Xi, *et al.* Effects of soil pH and organic matter on the content of bioavailable heavy metals [J]. *J Yunnan Norm Univ Nat Sci Ed*, 2021, **41**(1): 49 – 55.
- [22] 郭红伟, 郭世荣, 黄保健. 大棚辣椒不同连作年限土壤理化性质研究[J]. *江苏农业科学*, 2011, **39**(5): 452 – 455.  
GUO Hongwei, GUO Shirong, HUANG Baojian. Study on soil physical and chemical properties of different continuous cropping years of hot pepper in greenhouse [J]. *Jiangsu Agric Sci*, 2011, **39**(5): 452 – 455.
- [23] 孙小花, 胡新元, 陆立银, 等. 黄土高原马铃薯不同连作年限土壤理化性质及微生物特性[J]. *干旱地区农业研究*, 2019, **37**(4): 184 – 192.  
SUN Xiaohua, HU Xinyuan, LU Liyin, *et al.* Soil physical and chemical properties and microbial characteristics of potato in different continuous cropping years on the Loess Plateau [J]. *Agric Res Arid Areas*, 2019, **37**(4): 184 – 192.
- [24] 邢金峰, 仓龙, 任静华. 重金属污染农田土壤化学钝化修复的稳定性研究进展[J]. *土壤*, 2019, **51**(2): 224 – 234.  
XING Jinfeng, CANG Long, REN Jinghua. Remediation stability of in situ chemical immobilization of heavy metals contaminated soil: a review [J]. *Soil*, 2019, **51**(2): 224 – 234.