

杭嘉湖平原水稻主产区土壤重金属状况调查及风险评价

马佳燕^{1,2}, 马嘉伟^{1,2}, 柳 丹^{1,2}, 傅伟军^{1,2}, 叶正钱^{1,2}

(1. 浙江农林大学 省部共建亚热带森林培育国家重点实验室, 浙江 杭州 311300; 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】进一步了解杭嘉湖平原水稻 *Oryza sativa* 主产区嘉兴市稻田土壤重金属污染及水稻生产安全现状。

【方法】于2018年选择嘉兴市典型水稻主产区开展调查分析。在水稻收获期进行土壤和水稻协同采样, 测定土壤和大米样品中镉、铅、铬和砷等4种重金属元素质量分数, 采用单因子污染指数法和内梅罗综合污染指数法、潜在生态风险指数法及生态风险预警指数法等对水稻土重金属污染水平及污染风险进行评价。【结果】研究区域土壤镉、铅、铬和砷质量分数变幅分别为0.01~1.92、17.60~34.80、47.00~123.00、3.97~9.89 mg·kg⁻¹, 平均质量分数分别为0.36、25.78、72.73和7.55 mg·kg⁻¹; 土壤重金属镉质量分数超过水稻生产的土壤安全阈值(GB/T 36869–2018《水稻生产的土壤镉、铅、铬、汞、砷安全阈值》)的样本比例占31.82%; 4种重金属的潜在生态风险由强至弱依次为镉、砷、铅、铬, 区域整体上表现为轻微潜在生态风险; 部分土壤镉质量分数超标, 但水稻籽粒镉质量分数均没有超标。【结论】研究区稻米各项指标均符合GB 2762–2017《食品中污染物限量》, 土壤总体上处于安全水平。在今后的水稻生产管理中仍需加强动态监测, 关注土壤镉形态转化和有效性的变化, 充分保障水稻粮食生产安全。图1表8参29

关键词: 水稻土; 重金属污染; 农产品安全; 风险评价; 稻米镉; 嘉兴市

中图分类号: S153; X53 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2021)02-0336-10

Survey and risk assessment of soil heavy metals in the main rice producing areas in Hangjiahu Plain

MA Jiayan^{1,2}, MA Jiawei^{1,2}, LIU Dan^{1,2}, FU Weijun^{1,2}, YE Zhengqian^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Subtropical Silviculture, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, 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 investigate the status of heavy metal pollution in soil and rice safety in Jiaying, the main paddy field of *Oryza sativa* in Hangjiahu Plain. [Method] In 2018, Jiaying City was selected as the main rice producing area for investigation and analysis. Soil and rice were sampled during rice harvest period to determine the contents of four heavy metal elements (Cd, Pb, Cr, and As) in soil and rice samples. The pollution level and risk of heavy metals in paddy soil were evaluated by single factor pollution index method, Nemero comprehensive pollution index method, potential ecological risk index method and ecological risk early warning index method. [Result] Contents of Cd, Pb, Cr, and As in soil were 0.01–1.92, 17.60–34.80, 47.00–123.00 and 3.97–9.89 mg·kg⁻¹, with an average of 0.36, 25.78, 72.73, and 7.55 mg·kg⁻¹ respectively. The proportion of soil samples whose Cd content exceeded the soil safety threshold for rice production (*Safety Threshold Values of Cadmium, Lead, Chromium, Mercury and Arsenic in Soil For Rice*

收稿日期: 2020-05-10; 修回日期: 2020-11-18

基金项目: 浙江省重点研发计划项目 (2018C03028)

作者简介: 马佳燕 (ORCID: 0000-0002-2583-164X), 从事土壤重金属污染评价及修复研究。E-mail: 1025679438@qq.com。通信作者: 叶正钱 (ORCID: 0000-0002-6321-815X), 教授, 博士, 从事土壤肥力与植物营养研究。E-mail: yezhq@zafu.edu.cn

Production, GB/T 36869–2018) reached 31.82%. The potential ecological risks of the four heavy metals from strong to weak were Cd, As, Pb, and Cr, and the region as a whole presented slight potential ecological risks. Cd content in rice grain was safe according to the national criterion, although Cd content exceeded the national standard (GB/T 36869–2018) in some soil. [Conclusion] All indexes of rice in the study area are in line with *National Food Safety Standard Limits of Contaminants in Food* (GB 2762–2017) and the soil is generally at a safe level for rice production. In the future it's necessary to monitor changes of heavy metals in soil, especially transformation and availability of Cd, in order to guarantee safe rice production. [Ch, 1 fig. 8 tab. 29 ref.]

Key words: paddy soil; heavy metal pollution; agricultural product safety; risk assessment; rice cadmium; Jiaxing City

土壤是人类赖以生存的自然环境，也是农业生产的重要资源。然而，随着国民经济的加速发展，城市化、工业化进程的不断加快，农药、化肥的长期使用和污水灌溉等，农田土壤中的重金属不断累积，引发农田土壤重金属污染问题，导致农产品重金属积累和污染，并通过食物链进入人体，威胁人类的健康。农产品重金属污染问题变得越来越严峻^[1-4]。土壤重金属污染具有隐蔽性、不可逆性和长期性的特点^[5-6]，治理难度大。对土壤重金属污染状况进行监测，预防土壤重金属污染，开展土壤重金属污染农产品的风险评价极为重要，这也是国内外研究和社会关注的热点^[7-9]。土壤重金属污染状况的正确评价可以为土壤安全利用、保障农产品安全生产及政府制定土壤保护政策等提供科学依据。评价土壤重金属污染的方法较多，常见的有内梅罗综合指数法、富集系数法、地累积指数法、潜在生态危害指数法等，迄今尚未形成一个成熟的方法和统一的标准^[10-13]。水稻 *Oryza sativa* 是世界第二大粮食作物，也是中国第一大粮食作物。镉容易被水稻吸收，也是目前中国水稻生产中最主要的重金属污染元素^[14]。在浙江省农产区不同土地利用类型中，稻田土壤中重金属平均含量最高^[15]，但对稻米重金属污染状况的调查，特别是土壤和稻米协同采样的调查和污染评价研究却甚少^[16]。嘉兴是浙江省杭嘉湖平原重要产粮基地之一。已有文献报道：嘉兴市稻田土壤重金属总体状况良好，也存在着一些零星分布的土壤重金属超标区域，但尚未开展土壤-水稻系统协同采样和进行风险评价。基于此，本研究于 2018 年在水稻收获季，以已报道嘉兴市受重金属污染的稻田土壤区域及重点企业周边区域为主要对象，开展土壤-水稻样品协同采样，测定土壤和稻米中镉、铅、铬、砷等 4 种重金属元素质量分数，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》和 GB 2762–2017《食品中污染物限量》，对土壤重金属污染状况和对水稻安全生产的污染风险进行评价，旨在进一步保护和利用土壤，为今后嘉兴市水稻土质量安全管理与土壤重金属污染治理方案的确定提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

嘉兴市地处浙江省东北部、长江三角洲杭嘉湖平原腹地，30°21′~31°02′N，120°18′~121°06′E。全市现辖海宁、桐乡、平湖、海盐、嘉善 5 个县(市)和南湖、秀洲 2 个区，陆地总面积 4275.05 km²，全市户籍人口 352.12 万人。该市地处北亚热带南缘，属东亚季风区，冬夏季风交替，四季分明，气温适中，雨水丰沛，日照充足，年平均气温 15.9 ℃，年平均降水量 1168.6 mm，年平均日照 2017.0 h。地势低平。土壤母质主要为浅海沉积物、河流冲积物及湖沼相沉积物。

1.2 土壤样品采集与处理

以公开报道的嘉兴市土壤重金属信息为导向，并结合实地咨询和调查，本研究试验区域覆盖重金属接近和达到污染的土壤，同时兼顾选取重点行业企业等污染源周围稻田土壤(疑似)，并开展土壤和水稻样品协同采集。采用全球定位系统(GPS)定位，于 2018 年 10 月水稻收获时期，采集稻田 0~20 cm 土层土样，同时采集对应的水稻籽粒样品。为确保样品的代表性，在每个取样点以周围 5 m×5 m 正方形范围内设置 6~8 个采样点。每个采样点取土约 0.5 kg，均匀混合为 1 份，按四分法保留分析样品约 1.0 kg。

土壤样品自然风干后混匀磨碎, 过 2.00 mm 筛, 用以测定 pH 和重金属有效态质量分数; 取其中一部分过 0.15 mm 筛, 用以测定土壤有机质和重金属全量。水稻样品选取籽粒部分, 以自来水冲洗和去离子水洗净, 70 °C 烘干至恒量, 脱壳粉碎后备用。

1.3 样品分析与测定

土壤重金属全量采用硝酸-盐酸-高氯酸 (HNO₃-HCl-HClO₄) 混合酸微波消解后测定; 土壤重金属镉有效态采用 0.1 mol·L⁻¹ 盐酸提取剂提取后测定; 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, 铬采用火焰原子吸收光谱仪测定, 砷采用原子荧光光谱仪测定。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。土壤 pH 用 pH 计按水土比 2.5:1.0 浸提测定; 土壤有机质采用重铬酸钾氧化-外加热法测定^[17]。

1.4 污染评价方法与标准

目前, 对于重金属污染的评价方法有很多, 根据评价结果反映的主体可分为 2 类: 以重金属元素为主体的评价方法和以采样点为主体的评价方法^[18]。本研究主要选取以重金属元素为主体的评价方法, 单因子指数法和内梅罗综合指数法、富集系数法和地累积指数法、潜在生态指数评价法和生态风险预警指数法对嘉兴市水稻土壤重金属污染及其生态危害做出定量评价和风险预估。

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^[19]针对土壤中单一污染物的污染程度进行评价。其计算公式为:

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

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 的实测质量分数 (mg·kg⁻¹); S_i 为重金属元素 i 的评价标准 (mg·kg⁻¹)。 P_i 的分级标准参见文献 [19]。

内梅罗综合污染指数法^[19]是在单因子指数的基础上对重金属污染进行综合评价。其计算公式为:

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

式 (2) 中: P 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; $P_{i\max}$ 为土壤中各污染指数最大值。 P 的分级标准参见文献 [19]。

1.4.2 富集系数法和地累积指数法 采用富集系数法^[12]主要是评估和识别污染物来源。富集系数 (E) 的计算公式如下:

$$E = \frac{(C_i/C_n)_s}{(C_i/C_n)_r} \quad (3)$$

式 (3) 中: $(C_i/C_n)_s$ 为土壤样品中重金属元素 i 与标准化元素 n 的测量质量分数比值, $(C_i/C_n)_r$ 为土壤中重金属元素 i 与标准化元素 n 的背景值比。本研究选择锰为参比元素^[20-21]。 E 值越大, 富集程度就越高。 E 的分级标准参见文献 [12]。

地累积指数 (I_{geo}) 法^[12]被应用于人为活动产生的重金属对土壤污染的评价。 I_{geo} 的计算公式如下:

$$I_{\text{geo}} = \log_2 \left[\frac{C_i}{kB_i} \right] \quad (4)$$

式 (4) 中: I_{geo} 为地累积指数; C_i 为重金属元素 i 的实测值 (mg·kg⁻¹); B_i 为重金属元素 i 的地球化学背景值 (mg·kg⁻¹); k 为考虑造岩运动导致重金属背景值存在差异而设定的系数, 一般为 1.5。 I_{geo} 的分级标准参见文献 [12]。

1.4.3 潜在生态风险评价指数法和生态风险预警指数法 潜在生态风险采用 Hakanson 提出的生态风险指数法进行评价。潜在生态风险指数 I_R 的计算公式如下:

$$F_{ri} = C_i/C_n \quad (5)$$

$$E_{ri} = T_{ri}F_{ri} \quad (6)$$

$$I_R = \sum_{i=1}^n E_{ri} \quad (7)$$

式(5)~式(7)中： C_i 为重金属元素*i*的实测值； C_n 为重金属元素*i*的参比值(采用浙江省土壤环境背景值)^[22]。 F_{Ti} 、 T_{Ti} 、 E_{Ti} 分别为第*i*种重金属污染系数、毒性响应系数和潜在生态危害指数。镉、铅、铬、砷的毒性响应系数分别为30、10、2、10^[23]。潜在生态危害指数(E_{Ti})越高，表明土壤受某个重金属污染的风险越高； I_R 被称为潜在生态风险指数，为多种重金属元素的潜在生态风险综合值，其值越大，土壤风险越高，据此可以根据 E_r 和 I_R 进行分类和风险评价^[24]。

采用 Rapan 提出的生态风险预警指数(I_{ER})对水稻土生态风险进行预警评估。 I_{ER} 的计算公式为：

$$I_{ER} = \sum_{i=1}^n I_{ERi} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{C_{Ai}}{C_{Ri} - 1} \right) \quad (8)$$

式(8)中： I_{ER} 为生态风险预警指数； I_{ERi} 为重金属元素*i*的生态风险指数； C_{Ai} 为重金属元素*i*的实测质量分数； C_{Ri} 为重金属元素*i*的参比值。预警分级标准根据 I_{ER} 进行分类和风险评价^[25]。

1.5 数据处理与分析

采用 Excel 2018 对土壤重金属进行描述性统计分析。采用 SPSS 22.0 进行 Spearman 相关性分析。数据统计图表的绘制由 Excel 2018 和 Origin 11.0 完成。

2 结果与分析

2.1 土壤 pH 和有机质质量分数

土壤重金属的生物有效性受诸多因子的影响。在水稻生产上，土壤 pH 和有机质质量分数对土壤重金属有效性的影响极为重要。相同的重金属质量分数，土壤高 pH、高有机质有利于重金属有效性的降低，抑制水稻吸收积累重金属，稻米重金属污染风险下降。因此，国家标准中将土壤 pH 和有机质质量分数状况列为 2 个参数，制定土壤中重金属元素镉、铅、铬、汞、砷的最大允许质量分数，其允许值(阈值)随土壤 pH 和有机质质量分数的提高而增大，如当 pH<5、有机质质量分数<20 g·kg⁻¹时，土壤镉的安全阈值定为 0.2 mg·kg⁻¹；而当土壤 pH≥7、有机质质量分数≥20 g·kg⁻¹时，土壤镉的安全阈值定为 0.5 mg·kg⁻¹(GB/T 36869-2018《水稻生产的土壤镉、铅、铬、汞、砷安全阈值》)。调研结果显示：本研究所调查的水稻土土壤 pH 和有机质质量分数的变化都较大，土壤 pH 为 5.0~8.0，pH 相差达 3 个单位，而土壤有机质质量分数为 6.8~61.0 g·kg⁻¹，相差近 10 倍(表 1)，因而，允许的土壤重金属阈值不同。

表 1 土壤 pH 和有机质状况

Table 1 Soil pH and organic matter content

项目	pH	有机质/(g·kg ⁻¹)	项目	pH	有机质/(g·kg ⁻¹)
最小值	4.96	6.84	标准差	0.74	14.43
最大值	7.99	60.97	变异系数/%	12.06	39.91
平均值	6.15	36.15			

2.2 土壤和大米重金属质量分数状况

本研究所调查区域水稻土重金属质量分数变幅较大，因不同元素而异。测定结果及描述性统计分析见表 2 和表 3。土壤镉、铅、铬、砷质量分数范围分别为 0.01~1.92、17.60~34.80、47.00~123.00、3.97~9.89 mg·kg⁻¹，平均分别为 0.36、25.78、72.73、7.55 mg·kg⁻¹。土壤重金属质量分数与浙江省土壤重金属背景值相比，镉、铅、铬、砷分别有 68.18%、13.64%、22.73%、54.55% 的样品超过浙江省土壤背景值；与土壤环境质量标准 [GB 15618-2018《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》] 中农用地土壤污染风险筛选值相比，只有部分稻田土壤镉质量分数有所超标，点位超标率为 22.73%，但都低于风险管制值；与水稻安全生产标准 (GB/T 36869-2018《水稻生产的土壤镉、铅、汞、砷安全阈值》) 的土壤安全阈值相比，也只有镉质量分数超过规定限值，点位超标率为 31.82%。

变异系数可以反映一定区域内重金属元素的分布和污染程度的差异，变异系数越大代表元素质量分数差异越大、离散度越高，重金属质量分数受外界因素影响越大^[26]。由表 2 可以看出：土壤重金属质量分数变异系数最大的是镉，达 120.10%，表明土壤中镉的空间分布差异比较大，可能受人类活动及周边环境(企业工厂)的影响所致，其他重金属元素铅、铬、砷的变异系数都很小，为 15.56%~21.53%，在空间上存在相似的污染程度。

表 2 与图 1 结果表明：除部分样点镉质量分数高于对应的风险筛选值和安全阈值外，土壤镉、铅质

表2 水稻土和稻米重金属质量分数

Table 2 Contents of heavy metals in paddy soils and rice grains

序号	土壤重金属/(mg·kg ⁻¹)				稻米镉/(mg·kg ⁻¹)	序号	土壤重金属/(mg·kg ⁻¹)				稻米镉/(mg·kg ⁻¹)
	镉	铅	铬	砷			镉	铅	铬	砷	
1	1.07	28.00	69.00	6.86	0.056	12	0.17	27.70	68.00	7.47	0.024
2	0.14	25.60	68.00	7.69	0.006	13	0.01	24.90	123.00	7.30	0.029
3	0.22	23.80	78.00	7.53	0.019	14	0.17	22.20	65.00	6.95	0.045
4	0.09	19.90	69.00	7.64	0.004	15	0.11	27.30	69.00	7.63	0.061
5	0.45	17.60	63.00	6.92	0.024	16	0.15	27.60	73.00	7.98	0.026
6	0.30	27.90	67.00	8.35	0.015	17	0.09	23.30	59.00	5.89	0.005
7	0.27	29.40	90.00	9.64	0.041	18	0.56	23.90	61.00	6.56	0.030
8	0.24	29.10	69.00	7.85	0.018	19	0.09	20.30	73.00	7.86	0.028
9	0.17	34.20	64.00	7.40	0.009	20	0.33	23.80	98.00	8.19	0.025
10	0.47	34.80	73.00	9.89	0.051	21	0.18	21.00	47.00	3.97	0.049
11	0.29	24.10	61.00	8.13	0.009	22	1.92	30.70	93.00	8.49	0.062

表3 水稻土重金属质量分数空间变异状况及超标率

Table 3 Variation of heavy metal contents and exceeding standard rate in paddy soils

重金属	重金属/(mg·kg ⁻¹)			标准差	变异系数/%	超标率 I /%	超标率 II /%
	最小值	最大值	平均值				
镉	0.01	1.92	0.36	0.41	120.10	31.82	22.73
铅	17.60	34.80	25.78	4.30	16.70	0	0
铬	47.00	123.00	72.73	15.66	21.53	0	0
砷	3.97	9.89	7.55	1.18	15.56	0	0

说明：超标率 I 以水稻生产的安全阈值(GB/T 36869-2018)为参比值；超标率 II 以风险筛选值(GB 15618-2018)为参比值。

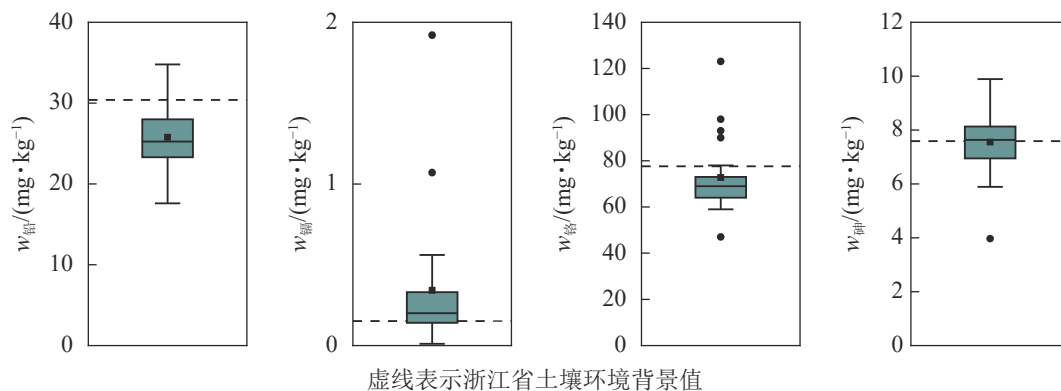


图1 水稻土重金属质量分数分布箱线图

Figure 1 Box plot of soil heavy metal content distribution in paddy soils

量分数水平均未超出对应安全阈值，说明被调查的土壤重金属污染(疑似)区域内水稻土虽然存在普遍的镉、铬、铅富集，但铬、铅未超出国家相关标准限值。土壤砷质量分数均低于水稻生产安全阈值和农用土壤污染风险筛选值。因此，对水稻安全生产而言，土壤镉累积现象最为凸显，可能会影响水稻的安全生产。

虽然研究区域内有部分稻田土壤镉超过国家标准限值，但是稻米测定结果显示所采集的稻谷稻米镉质量分数为 0.006~0.062 mg·kg⁻¹，平均为 0.029 mg·kg⁻¹，均在安全范围以内，没有超过 GB 2762-2017《食品中污染物限量》限额(0.200 mg·kg⁻¹)。说明目前的土壤环境对所栽水稻品种是安全的。除了水稻自身因素外，稻米镉质量分数积累低还可能与重金属镉污染土壤的环境条件特别是土壤 pH 和有机质质量分数较高有关^[27]。但是在本研究中，研究区稻米镉质量分数与土壤全量镉、有效态镉质量分数和土壤

pH、有机质质量分数的相关性都不高，显示水稻土中全量镉、有效态镉、有机质质量分数和 pH 都不是影响稻米中镉质量分数高低的决定性因素(表 4)。虽然稻米镉积累与有效态镉、有机质质量分数有一定的正相关性，而与 pH 呈负相关，但许多研究表明重金属的有效性会随着有机质的增加而降低^[28]。说明稻米镉质量分数、土壤镉有效性与土壤环境条件关系复杂，同时这些结果还可能与水稻品种有关。因为水稻基因型是影响土壤-水稻系统中重金属的转移和生物利用度的主要因素，不同的水稻品种对土壤重金属的吸收、转移、富集能力不同，导致籽粒中重金属质量分数的差异。镉低积累水稻品种籽粒吸收积累镉少，在一定的土壤镉污染超标条件下，大米镉不会超标^[19, 29]。

2.3 水稻土重金属污染评价

2.3.1 单因子指数评价和内梅罗综合指数评价

以国家水稻生产的土壤安全阈值 (GB/T 36869–2018《水稻生产的土壤镉、铅、铬、汞、砷安全阈值》) 为依据，计算研究区域水稻土土壤重金属的单项污染指数和综合污染指数。从表 5 可以看出：土壤重金属镉、铅、铬、砷的单项污染指数平均值分别为 0.96、0.25、0.42、0.36。所有重金属单因子污染指数均小于 1.00，属于清洁水平，说明研究区域水稻土处于安全水平。与稻米重金属质量分数测定结果一致。

根据各重金属元素不同污染级别样点数占比可知(表 6)，有 68.18% 的样点土壤镉单因子污染指数小于 1.00，其余 31.82% 样点的土壤镉超标，其中轻度污染、中度污染、重度污染样点数分别占样点总数的 22.73%、4.55%、4.55%。铅、铬、砷等 3 种元素的单因子污染指数全部都小于 1.00，不存在污染情况。由此，镉是 4 种元素中积累最为严重的重金属元素。从内梅罗综合指数(表 5 和表 6)看，研究区域土壤镉、铅、铬、砷重金属综合指数为 0.28~2.84，各点位差异较明显。所有点位中 63.64% 的样点综合污染指数均小于 0.70，也说明嘉兴市水稻土环境状况整体良好。处于警戒线的占 13.64%，受污染的占 22.72%，其中轻度污染的占 18.18%，中度污染的占 4.54%，无重度污染。对于处于警戒线，特别是部分已处于中、轻度污染的土壤应当引起高度重视。

表 6 基于污染指数法重金属污染程度占比

Table 6 Proportion of heavy metal pollution based on pollution index method						
单因子指数	污染等级	各污染等级点位占比/%				综合指数
		镉	铅	铬	砷	
$P \leq 1$	清洁	68.18	100	100	100	$P_i \leq 0.7$
$1 < P \leq 2$	轻度污染	22.72	0	0	0	$0.7 < P_i \leq 1.0$
$2 < P \leq 3$	中度污染	4.55	0	0	0	$1.0 < P_i \leq 2.0$
$P > 3$	重度污染	4.55	0	0	0	$2.0 < P_i \leq 3.0$
						污染等级
						各污染等级 点位占比/%
						安全
						警戒
						轻度污染
						中度污染
						63.64
						13.64
						18.18
						4.54

2.3.2 富集系数评价和地累积指数评价 以浙江省土壤背景值作为依据，以锰元素作为校准元素进行对比，计算富集系数。对 4 种重金属元素的富集系数(E) 进行分析比较(表 7)，可以得出：4 种重金属元素富集程度从大到小依次为镉、砷、铬、铅。铅、铬、砷区域富集污染程度为Ⅱ级，属于轻微富集、轻微污染；镉区域富集污染程度为Ⅲ级，属于中度富集、中度污染。镉、铅、铬、砷分别有 18.18%、36.36%、27.27%、13.64% 的采样点呈现无富集、无污染状态；分别有 31.82%、59.09%、68.18%、81.82%

表 4 土壤全量镉、有效态镉、稻米镉和土壤 pH、有机质的相关性分析

Table 4 Correlation analysis of total soil Cd, available Cd, rice grain Cd, soil pH and SOM

项目	土壤全量镉	土壤有效态镉	稻米镉	土壤pH	有机质
土壤全量镉	1				
土壤有效态镉	0.508*	1			
稻米镉	-0.090	0.138	1		
pH	0.007	-0.169	-0.013	1	
有机质	-0.233	-0.107	0.296	-0.306	1

说明：*表示在0.05水平上相关

表 5 水稻土重金属污染指数

Table 5 Heavy metal pollution index of paddy soil

统计指标	单因子污染指数				综合指数
	镉	铅	铬	砷	
最大值	3.84	0.46	0.82	0.52	2.84
最小值	0.04	0.09	0.24	0.20	0.28
平均值	0.96	0.25	0.42	0.36	0.81
标准差	0.84	0.10	0.12	0.08	0.57
变异系数/%	86.92	40.15	28.72	21.66	70.36

表7 水稻土重金属元素富集系数和地累积指数评价特征值统计

Table 7 Evaluation eigen value statistics of heavy metal element enrichment coefficient and geoaccumulation index in paddy soil

重金属	E		$E \leq 1$		$1 < E \leq 2$		$2 < E \leq 5$		$5 < E \leq 20$		$20 < E \leq 40$	
	变化范围	平均值	样品数/个	比率/%	样品数/个	比率/%	样品数/个	比率/%	样品数/个	比率/%	样品数/个	比率/%
镉	0.10~9.86	2.81	4	18.18	7	31.82	7	31.82	4	18.18	0	0
铅	0.60~2.13	1.23	8	36.36	13	59.09	1	4.55	0	0	0	0
铬	0.84~2.40	1.33	6	27.27	15	68.18	1	4.55	0	0	0	0
砷	0.87~2.13	1.41	3	13.64	18	81.82	1	4.55	0	0	0	0

重金属	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/个	比率/%	样品数/个	比率/%	样品数/个	比率/%	样品数/个	比率/%	样品数/个	比率/%
镉	-4.51~3.07	-0.11	12	54.55	6	27.27	2	9.09	1	4.55	1	4.55
铅	-1.37~-0.39	-0.84	22	100.00	0	0	0	0	0	0	0	0
铬	-1.31~0.08	-0.71	21	95.45	1	4.55	0	0	0	0	0	0
砷	-1.52~-0.20	-0.61	22	100.00	0	0	0	0	0	0	0	0

的采样点表现为重金属轻微富集、轻微污染；分别有 31.82%、4.55%、4.55%、4.55% 的采样点表现为重金属中度富集、中度污染；还有 18.18% 的样点存在镉元素显著富集、强污染。

仍以浙江省土壤背景值进行参比。4 种重金属的地累积指数法统计结果如表 7 所示。可以看出：4 种元素 I_{geo} 从大到小依次为镉、砷、铬、铅。在所有样点中，砷、铅的地累积指数均小于 0，呈现无富集无污染状态。污染最严重的重金属为镉，其平均地累积指数为 -0.11，处于轻微污染的边界。但是各样点指数差异悬殊，特别是镉，在研究区中仅有 54.55% 的样点处于无富集、无污染状态，27.27% 的样点处于轻微富集状态，9.09% 的样点处于中度富集状态，4.55% 的样点处于中强富集状态，4.55% 的样点处于强富集状态。总体而言，该地区在人类生产、生活活动的影响下，镉元素积累明显，富集程度高；个别样点存在镉元素轻微富集污染，其他元素富集污染程度均为无污染。

2.3.3 稻田土壤中重金属潜在生态风险评价分析 以水稻生产的土壤安全阈值 (GB/T 36869-2018《水稻生产的土壤镉、铅、铬、汞、砷安全阈值》) 指标为参比值，根据生态风险划分标准，对水稻土重金属污染进行潜在生态风险评价，评价结果 (表 8) 显示：研究区域水稻土不同重金属单项潜在生态危害指数 (E_r) 平均值从大到小表现为镉、砷、铅、铬。所有样点铅、铬、砷的潜在生态风险指数 (I_R) 均小于 40，处于轻微风险水平。土壤镉的潜在生态危害程度最高，平均值为 28.83，生态危害系数变化幅度大，最高值为 115.2，最低值为 1.2，变异系数为 86.92%。达到中等、较强生态危害的样点数分别占样点总数的 18.18%、4.55%。土壤重金属综合潜在生态风险指数 (I_R) 变化范围为 9.08~121.36，平均值为 35.73，变异系数为 70.01%，呈现轻微生态风险水平，主要贡献因子是镉。从变异系数可以看出：研究区域内生态危害分布差异性大。但是所有样点的 I_R 均小于 150，全部样点均处于轻微生态风险水平。而土壤生态风险预警指数 (I_{ER}) 变化范围为 -2.97~0.73，平均值为 -2.01，处于无风险至预警级，仅有 1 个样点最大的 I_{ER} 为 0.73，也在轻度预警级别。因此，采用潜在生态风险评价指数法和生态风险预警指数法都表明：研究区土壤重金属处于安全级别，污染风险较小。

表8 水稻土重金属潜在生态风险评价

Table 8 Potential ecological risk assessment of heavy metals in paddy soil

统计指标	潜在生态危害指数(E_r)				潜在生态风险指数(I_R)	土壤生态风险预警指数(I_{ER})
	镉	铅	铬	砷		
最大值	115.20	4.56	1.64	5.24	121.36	0.73
最小值	1.20	0.90	0.48	1.99	9.08	-2.97
平均值	28.83	2.47	0.84	3.58	35.72	-2.01
标准差	25.06	0.99	0.24	0.78	25.02	0.83
变异系数/%	86.92	40.15	28.72	21.66	70.01	-41.15

采用不同的方法对研究区域稻田土壤重金属污染风险评价的结果都表明：研究区域总体上处于安全水平；就单个重金属而言，土壤铅、铬、砷属于没有污染风险或轻微风险水平，而镉在某些点位稻田土壤中呈显著富集、轻中度污染，对水稻安全生产构成一定的风险。本研究协同采样测定结果显示：稻米各项指标均符合国家粮食安全标准 (GB 2762-2017《食品中污染物限量》)。考虑到不同水稻品种对土壤镉吸收积累的差异，以及土壤环境条件特别是 pH 易受人为施肥管理等措施的影响，对土壤镉质量分数较高的点位，在今后的水稻生产管理中需要加强动态监测，关注土壤镉形态转化和有效性的变化，以保障水稻粮食生产安全^[26, 28]。

3 结论

采用多种方法对研究区域稻田土壤重金属污染风险进行评价，结果显示：研究区域水稻土壤总体上处于安全水平。协同采样测定结果显示：稻米各项指标均符合国家粮食安全标准 (GB 2762-2017《食品中污染物限量》)。

采用 E 和 I_{geo} 的评价结果均得出 4 种元素富集程度从大到小依次为镉、砷、铬、铅，潜在生态危害由强至弱依次为镉、砷、铅、铬。研究区内镉富集 (污染) 最为明显，个别样点存在镉元素中轻度污染，镉是当前最主要的生态风险因子。

目前的土壤环境对当地的水稻栽培品种来说是安全的。在今后的水稻生产管理中仍需加强动态监测，关注土壤镉形态转化和有效性的变化，充分保障水稻粮食生产安全。

4 参考文献

- [1] 骆永明. 中国土壤环境污染态势及预防、控制和修复策略[J]. *环境污染与防治*, 2009, **31**(12): 27-31.
LUO Yongming. Trends in soil environmental pollution and the prevention-controlling-remediation strategies in China [J]. *Environ Poll Prev*, 2009, **31**(12): 27-31.
- [2] 任婧, 袁旭, 卞春梅, 等. 贵阳白云区工业园区周边水稻土重金属含量状况及风险评价[J]. *西南农业学报*, 2015, **28**(3): 233-238.
REN Jing, YUAN Xu, BIAN Chunmei, et al. Risk assessment on heavy metal pollution of paddy soil around Baiyun industrial park, Guiyang [J]. *Southwest China J Agric Sci*, 2015, **28**(3): 233-238.
- [3] ZHU Yuen, ZHAO Ye, SUN Ke, et al. Heavy metals in wheat grain and soil: assessment of the potential health risk for inhabitants in a sewage-irrigated area of Beijing, China [J]. *Fresenius Environ Bull*, 2011, **20**(5): 1109-1116.
- [4] ALMASOUD F I, USMAN A R, AL-FARRAL A S. Heavy metals in the soils of the Arabian Gulf coast affected by industrial activities: analysis and assessment using enrichment factor and multivariate analysis [J]. *Arabian J Geosci*, 2015, **8**(3): 1691-1703.
- [5] 宋伟, 陈百明, 刘琳. 中国耕地土壤重金属污染概况[J]. *水土保持研究*, 2013, **20**(2): 292-298.
SONG Wei, CHEN Baiming, LIU Lin. Soil heavy metal pollution of cultivated land in China [J]. *Res Soil Water Conserv*, 2013, **20**(2): 292-298.
- [6] 王振中, 张友梅, 邓继福, 等. 重金属在土壤生态系统中的富集及毒性效应[J]. *应用生态学报*, 2006, **17**(10): 1948-1952.
WANG Zhenzhong, ZHANG Youmei, DENG Jifu, et al. Enrichment and toxicity effect of heavy metals in soil ecosystem [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2006, **17**(10): 1948-1952.
- [7] CHAI Yuan, GUO Jia, CHAI Sheli, et al. Source identification of eight heavy metals in grassland soils by multivariate analysis from the Baicheng-Songyuan area, Jilin Province, northeast China [J]. *Chemosphere*, 2015, **134**: 67-75.
- [8] ZHANG Chaosheng. Using multivariate analyses and GIS to identify pollutants and their spatial patterns in urban soils in Galway, Ireland [J]. *Environ Poll*, 2006, **142**: 501-511.
- [9] 钱力, 张超, 齐鹏, 等. 永康城市土壤重金属污染评价及来源分析[J]. *浙江农林大学学报*, 2016, **33**(3): 427-433.
QIAN Li, ZHANG Chao, QI Peng, et al. Sourcing and evaluating heavy metal pollution in the urban topsoil of Yongkang City [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2016, **33**(3): 427-433.
- [10] 王宏. 东洞庭湖湿地土壤重金属的分布特征及风险评价[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2012.

- WANG Hong. *Distribution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Wetland Soil of Dongting Lake*[D]. Changsha: Hunan Normal University, 2012.
- [11] 秦鱼生, 喻华, 冯文强, 等. 成都平原北部水稻土重金属含量状况及其潜在生态风险评价[J]. *生态学报*, 2013, **33**(19): 6335 – 6344.
- QIN Yusheng, YU Hua, FENG Wenqiang, *et al.* Assessment on heavy metal pollution status in paddy soils in the northern Chengdu Plain and their potential ecological risk [J]. *Acta Ecol Sin*, 2013, **33**(19): 6335 – 6344.
- [12] 赵庆令, 李清彩, 谢江坤, 等. 应用富集系数法和地累积指数法研究济宁南部区域土壤重金属污染特征及生态风险评价[J]. *岩矿测试*, 2015, **34**(1): 129 – 137.
- ZHAO Qingling, LI Qingcai, XIE Jiangkun, *et al.* Characteristics of soil heavy metal pollution and its ecological risk assessment in south Jining District using methods of enrichment factor and index of geoaccumulation [J]. *Rock Miner Anal*, 2015, **34**(1): 129 – 137.
- [13] SUN Yuebing, ZHOU Qixing, XIE Xiaokui, *et al.* Spatial, sources and risk assessment of heavy metal contamination of urban soils in typical regions of Shenyang, China [J]. *J Hazardous Mater*, 2010, **174**(1/3): 455 – 462.
- [14] 赵科理, 刘杏梅, 徐建明. 浙江省水稻产地环境镉污染分布及其风险评价[J]. *土壤通报*, 2009, **40**(2): 192 – 197.
- ZHAO Keli, LIU Xingmei, XU Jianming. Pollution distribution and risk assessment of soil Cd in rice-production areas in Zhejiang Province [J]. *Chin J Soil Sci*, 2009, **40**(2): 192 – 197.
- [15] 程街亮, 史舟, 朱有为, 等. 浙江省优势农产区土壤重金属分异特征及评价[J]. *水土保持学报*, 2006, **20**(1): 103 – 107.
- CHENG Jieliang, SHI Zhou, ZHU Youwei, *et al.* Differential characteristics and appraisal of heavy metals in agricultural soils of Zhejiang Province [J]. *J Soil Water Conserv*, 2006, **20**(1): 103 – 107.
- [16] 董良潇. 浙江省农田土壤和农作物重金属污染评价[D]. 温州: 温州大学, 2017.
- DONG Liangxiao. *Evaluation of Heavy Metal Pollution in Farmland Soil and Crops in Zhejiang Province*[D]. Wenzhou: Wenzhou University, 2017.
- [17] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [18] 李春芳, 王菲, 曹文涛, 等. 龙口市污水灌溉区农田重金属来源、空间分布及污染评价[J]. *环境科学*, 2017, **38**(3): 1018 – 1027.
- LI Chunfang, WANG Fei, CAO Wentao, *et al.* Source analysis, spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in sewage irrigation area farmland soil of Longkou City [J]. *Environ Sci*, 2017, **38**(3): 1018 – 1027.
- [19] 陈京都, 戴其根, 许学宏, 等. 江苏省典型区农田土壤及小麦中重金属含量与评价[J]. *生态学报*, 2012, **32**(11): 3487 – 3496.
- CHEN Jingdu, DAI Qigen, XU Xuehong, *et al.* Heavy metal contents and evaluation of farmland soil and wheat in typical area of Jiangsu Province [J]. *Acta Ecol Sin*, 2012, **32**(11): 3487 – 3496.
- [20] 李倩, 秦飞, 季宏兵, 等. 北京市密云水库上游金矿区土壤重金属含量、来源及污染评价[J]. *农业环境科学学报*, 2013, **32**(12): 2384 – 2394.
- LI Qian, QIN Fei, JI Hongbing, *et al.* Contents, sources and contamination assessment of soil heavy metals in gold mine area of upstream part of Miyun Reservoir, Beijing, China [J]. *J Agro-Environ Sci*, 2013, **32**(12): 2384 – 2394.
- [21] BERGAMASCHI L, RIZZIO E, VALCUVIA M G, *et al.* Determination of trace elements and evaluation of their enrichment factors in Himalayan Lichens [J]. *Environ Poll*, 2002, **120**(1): 137 – 144.
- [22] 汪庆华, 董岩翔, 周国华, 等. 浙江省土壤地球化学基准值与环境背景值[J]. *生态与农村环境学报*, 2007, **23**(2): 81 – 88.
- WANG Qinghua, DONG Yanxiang, ZHOU Guohua, *et al.* Soil geochemical baseline and environmental background values of agricultural regions in Zhejiang Province [J]. *J Ecol Rural Environ*, 2007, **23**(2): 81 – 88.
- [23] SHEN Feng, LIAO Renmei, ALI A, *et al.* Spatial distribution and risk assessment of heavy metals in soil near a Pb/Zn smelter in Feng County, China [J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2017, **139**: 254 – 262.
- [24] ISLAM M S, AHMED M K, HABIBULLAH-AL-MAMUN M, *et al.* Potential ecological risk of hazardous elements in different land-use urban soils of Bangladesh [J]. *Sci Total Environ*, 2014, **512/513**: 94 – 102.
- [25] 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.
- [26] 王美青, 章明奎. 杭州市城郊土壤重金属含量和形态的研究[J]. *环境科学学报*, 2002, **22**(5): 603 – 608.
- WANG Meiqing, ZHANG Mingkui. Concentrations and chemical associations of heavy metals in urban and suburban soils of the Hangzhou City, Zhejiang Province [J]. *Acta Sci Circumstant*, 2002, **22**(5): 603 – 608.
- [27] 李永涛, 刘科学, 张池, 等. 广东大宝山地区重金属污染水田土壤的 Cu、Pb、Zn、Cd 全量与 DTPA 浸提态含量的相互关系研究[J]. *农业环境科学学报*, 2004, **23**(6): 1110 – 1114.
- LI Yongtao, LIU Kexue, ZHANG Chi, *et al.* Relationships between total and DTPA extractable contents of Cu, Pb, Zn, Cd in trace metal-contaminated paddy soils of Dabaoshan, Guangdong [J]. *J Agro-Environ Sci*, 2004, **23**(6): 1110 – 1114.
- [28] ZENG Fanrong, MAO Ying, CHENG Wangda, *et al.* Genotypic and environmental variation in chromium, cadmium and lead concentrations in rice [J]. *Environ Poll*, 2008, **153**(2): 309 – 314.
- [29] 程旺大, 张国平, 姚海根, 等. 晚粳稻籽粒中 As、Cd、Cr、Ni、Pb 等重金属含量的基因型与环境效应及其稳定性[J]. *作物学报*, 2006, **32**(4): 572 – 579.
- CHENG Wangda, ZHANG Guoping, YAO Haigen, *et al.* Genotypic and environmental variation and their stability of As, Cr, Cd, Ni and Pb concentrations in the grains of Japonica rice [J]. *Acta Agromomica Sin*, 2006, **32**(4): 572 – 579.