

DOI: 10.11689/sc.2023040701

李正真, 谭静, 李小林, 等. 云南喀斯特地貌区土壤重金属污染风险评估及水稻叶面肥筛选[J]. 土壤与作物, 2024, 13 (1) : 39 – 51.

LI Z Z, TAN J, LI X L, et al. Soil heavy metal pollution risk assessment and foliar fertilizer screening for rice in Yunnan karst landscape area[J]. Soils and Crops, 2024, 13 (1) : 39 – 51.

云南喀斯特地貌区土壤重金属污染风险评估及 水稻叶面肥筛选

李正真^{1,2}, 谭静¹, 李小林³, 涂建², 唐昆⁴, 谷安宇², 管俊娇², 董维², 邓伟², 吕莹², 奎丽梅²

(1. 云南大学, 云南 昆明 650504; 2. 云南省农业科学院, 粮食作物研究所, 云南 昆明 650205;

3. 云南省农业科学院, 云南 昆明 650205; 4. 泸西县农业技术推广中心, 云南 泸西 652400)

摘 要: 为探究云南水稻种植区土壤重金属含量与叶面肥种类对水稻中重金属迁移, 以及对糙米质量安全的影响, 本研究选取地质高背景区泸西县水稻种植区作为研究区, 采用单因子污染指数法、内梅罗综合污染指数法、潜在生态风险指数法对研究区稻田土壤污染情况进行了评估, 并以锰锌肥、硅硒肥两种不同成分叶面肥作为试验材料, 通过转运系数等指标探究不同成分叶面肥在田间大规模应用中的效果。研究结果表明: 研究区稻田土壤中 As、Cd、Cr 的平均值均超过云南省土壤重金属背景值且变异系数较大, 主要以 Cd 污染最为严重。研究区土壤总体上处于轻度污染状态, As、Pb、Cr 均处于轻微潜在生态危害, 40% 的 Cd 处于中等潜在生态危害, 但综合潜在生态危害指数仍为轻微潜在生态危害。喷施叶面肥的处理较仅喷施清水的处理而言, 茎叶-糙米间转运系数降低, 糙米及茎叶中重金属含量显著降低, 产量无显著差异。供试的锰锌肥的肥效较硅硒肥更为显著, 适合在田间大规模种植使用。

关键词: 土壤; 重金属; 污染评价; 水稻; 叶面肥

中图分类号: S15

文献标识码: A

Soil heavy metal pollution risk assessment and foliar fertilizer screening for rice in Yunnan karst landscape area

LI Zhengzhen^{1,2}, TAN Jing¹, LI Xiaolin³, TU Jian², TANG Kun⁴, GU Anyu², GUAN Junjiao², DONG Wei²,
DENG Wei², LYU Ying², KUI Limei²

(1. Yunnan University, Kunming 650504, China;

2. Institute of Food Crops Research, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Kunming 650205, China;

3. Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Kunming 650205, China;

4. Luxi Agricultural Technology Popularization Center, Luxi 652400, China)

Abstract: To investigate the impact of soil heavy metal content and foliar fertilizer types on heavy metal migration in rice, as well as the quality and safety of brown rice, the study was conducted in the rice planting areas with high geological background in Luxi County, Yunnan Province. The contamination status of paddy soil in the study area was assessed using the single factor pollution index method, Nemerow comprehensive pollution index method, and potential ecological risk index method. Additionally, two different types of foliar fertilizers, manganese-zinc fertilizer and silicon-selenium fertilizer, were used as experimental materials. The effects of various foliar fertilizers in large-scale field application were examined by using transfer coefficients and other indicators. The results showed that the average concentrations of As, Cd, and Cr in the paddy soil exceeded the background values of soil heavy metals in Yunnan Province, and the variation coefficients were high; Cd pollution was significantly severe. However, the overall soil

收稿日期: 2023 – 04 – 07; 修回日期: 2023 – 08 – 14.

基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项 (CARS-01-83); 云南省科技人才与平台计划 (院士专家工作站, 202305AF150159); 云南省重大科技专项计划 (202102AE090016); “兴滇英才支持计划”项目。

第一作者简介: 李正真 (1998-), 硕士研究生, 主要从事水稻遗传育种与应用研究. E-mail: LIZhengzhen122@163.com.

通信作者: 奎丽梅 (1970-), 研究员, 主要从事水稻遗传育种与应用研究. E-mail: 1025572990@qq.com.

pollution in the study area was classified as light. As, Pb, and Cr showed slight potential ecological hazards, while 40% of Cd exhibited medium potential ecological hazards. Nonetheless, the comprehensive potential ecological hazard index indicated a slight potential ecological hazard. Compared with control, the application of foliar fertilizers was observed that the transfer coefficient between stem and leaf-brown rice decreased, resulting in a significant reduction in heavy metal content in brown rice and stem and leaf. Importantly, no significant differences were found in yield among the different foliar fertilizer treatments. Manganese-zinc fertilizer demonstrated more significant fertilizer efficiency compared with silicon-selenium fertilizer, making it suitable for large-scale field planting.

Key words: soil; heavy metals; pollution evaluation; rice; foliar fertilizer

0 引言

随着工业化、城镇化和农业现代化的推进,土壤重金属污染问题日益受到关注^[1]。云南省红河州泸西县内喀斯特地貌特征显著,其重金属污染来源于成土母质及人为活动,是我国典型的地质高背景区^[2]。土壤重金属污染不仅导致水稻减产,也对人体健康产生威胁。大量研究表明:食用重金属富集的稻米是重金属进入人体的主要途径^[3]。人类长期摄入低剂量重金属会导致慢性中毒,增加多种疾病的发生风险^[4]。随着土地重金属污染面积加大,稻米重金属超标事件发生频率增加,耕地土壤污染评估和安全利用污染土壤问题亟待解决。

土壤重金属污染评价主要包括指数法、毒理法和风险评估法。目前对重金属污染进行评估最快捷有效的方法是指数法^[5]。梁晓曼等^[6]利用单因子污染指数法、内梅罗综合污染指数法及潜在生态风险指数法对唐山南部稻田土壤的污染状况及生态风险进行评估,发现稻田土壤中 Cd 和 Hg 污染问题最为突出, Cd 对综合潜在生态危害的贡献率最大。Adeyeye 等^[7]对尼日利亚 Ado-Ekiti 地区锯木厂周围土壤中重金属的污染水平进行了研究,结果表明该地区重金属处于无污染状态。

2014 年公布的《全国土壤污染状况调查公报》^[8]显示,全国土壤污染类型以无机型为主,镉、汞、砷、铜、铅、铬、锌、镍为主要无机污染物。在多种无机污染物中, As、Cd 较易在水稻植株体内转运和富集^[9-10]。因此,目前以 As、Cd 为目标元素的研究居多^[11-12],而缺乏以多种重金属为目标元素的研究^[13]。当前,喷施叶面肥降低稻米重金属含量是安全利用污染土壤的有效方法之一。叶面肥可弥补土壤施肥的不足,在作物生长发育过程中针对性提供养分元素和生长调节物质等,喷施后可增加水稻产量,有助于改善水稻品质,且能改善土壤质地,活化土壤微生物,降低土壤重金属的毒性和生物有效性,从而减少重金属积累^[14]。相关研究包括新型叶面肥的开发、不同类型叶面肥效果的比较和作用机制^[15]。但在实际生产中,由于缺乏技术指导,盲目地施用叶面肥,无法达到预期的效果^[14],因此,田间大规模应用较少。

云南省是我国主要的水稻产区之一,以种植业为主的泸西县土壤背景值偏高,却尚未开展土壤污染风险评估。该区域生产的稻米存在重金属含量超标的风险不明,且未开展过针对当地土壤污染特征的安全利用措施摸索。因此,本研究以泸西县某水稻种植区作为研究区,对该地区土壤进行风险评估,并以当地主栽品种云两优 501 为研究对象,分析水稻茎叶、糙米中重金属含量特征。基于评估结果,结合生产实际,选择锰锌肥、硅硒肥两种叶面肥,比较其在实际生产中大规模应用的效果,为重金属污染土壤的安全利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于云南省红河州泸西县的某水稻种植区(103°30'~104°03'E, 24°15'~24°46'N),海拔约 1 680 m。其气候为亚热带季风气候,年平均气温为 21℃,年降水量 1 100 mm。研究区以种植业为主,主要种植的粮食作物有水稻、玉米和小麦。其中,水田面积为 415.3 hm²,占种植粮食总面积的 16.8%。

1.2 土壤样品采集及测定

样品采集地点位于研究区, 面积共 6.67 hm²。参照《农田土壤环境监测技术规范》(NY/T 395-2012)^[16] 的相关要求, 于水稻种植前采用对角线法在该区域采集 0~20 cm 的土壤样品 20 个。每 0.33 hm² 设置一个采样点, 进行 GPS 卫星定位, 用数码相机记录其周围情况, 并在每个采样点周围 10 m × 10 m 范围内布置 5 个采样点, 将采集的 5 份土壤样品均匀混合为 1 份。

采集到的土壤样品自然风干, 剔除样品中大于 15 mm 的杂质, 研磨后过筛, 四分法取 1 kg 土壤样品作为待测样品。根据《土壤环境监测技术规范》(HJ/T 166-2004)^[17] 对土壤 pH、有机质、As、Cd、Pb、Cr 含量进行检测。

1.3 重金属污染及生态风险评价方法

1.3.1 单因子污染指数法

单因子污染指数法用于评估土壤中单一污染元素的风险等级, 计算公式为:

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

式中: P_i 为土壤中物质 i 污染指数; C_i 为污染物 i 的实测含量; S_i 为污染物 i 的标准值 (以农用地土壤污染风险筛选值进行计算)。

1.3.2 内梅罗综合污染指数法

综合污染指数法用以识别环境中的高浓度污染物, 从而判断需要重点关注的环境污染物, 公式为:

$$P_{\text{综}} = \sqrt{\frac{\bar{P}^2 + P_{\text{imax}}^2}{2}} \quad (2)$$

式中: $P_{\text{综}}$ 为内梅罗综合污染指数; $\bar{P}$ 为每一个因素环境质量因子平均值; P_{imax} 为单因子污染指数的最大值。

1.3.3 潜在生态风险指数法

由瑞典科学家 Hakanson^[18] 提出的潜在生态危害指数法在环境风险评价中已被广泛运用。其表达式如下:

$$C_f^i = C_s^i / C_n^i \quad (3)$$

$$E_r^i = T_r^i \times C_f^i \quad (4)$$

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \times C_f^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \times \frac{C_s^i}{C_n^i} \quad (5)$$

式中: C_f^i 为单一重金属污染系数; C_s^i 为重金属元素的实际含量; C_n^i 为原始材料的污染物含量 (农用地土壤污染风险筛选值进行计算); E_r^i 为单一污染物的潜在生态危害系数; T_r^i 为单一污染物的毒性系数 (As、Cd、Pb、Cr 的毒性效应因子分别为 15、30、7、10^[19]); RI 为多因素的潜在生态危害指数。

1.4 水稻叶面肥试验处理

试验作物为两系杂交粳稻, 云两优 501, 试验采用的叶面肥为锰锌肥和硅硒肥。详见表 1。

表 1 供试叶面肥

Table 1 Foliar fertilizers in the test

叶面肥 Foliar fertilizer	主要成分 Main Ingredients	生产厂家 Manufacturers
锰锌肥 Mn and Zn fertilizer	Mn+Zn≥10.0%, Mn≥5.0%, Zn≥5.0%	湖南美鑫隆环保科技有限公司 Hunan Xinlong Ecological Environmental Protection Technology Co., Ltd
硅硒肥 Si and Se fertilizer	Si、Se	云南省农业科学院质量标准与检测技术研究所 Quality Standardizing and Testing Technology Institute, Yunnan Academy of Agricultural Sciences

1.5 水稻叶面肥筛选试验设计

试验区域位于面积为 6.67 hm² 的研究区，每 0.33 hm² 划分为一个区组，该区组包括 9 个小区。将 9 个小区划分为 3 部分，设仅喷施清水（CK），叶面喷施锰锌肥（A）和叶面喷施硅硒肥（B）3 种处理。

于水稻秧龄 45 d 左右移栽秧苗。肥料施用量按当地推荐用量进行，不施用底肥，分蘖肥一次性施用，肥料种类为尿素。除喷施叶面肥外，其余病、虫、草、鼠害等田间管理均按当地常规管理模式进行。依据叶面肥厂商的施用说明，选择无风的傍晚人工喷施，以达到充分降低水稻籽粒中重金属含量的目的。具体的喷施方法如下：于水稻抽穗比例达 30%~50% 时第一次喷施锰锌肥，施用时将一包叶面调理剂（240 g）和 2 包助剂共同溶解于 30 L 水中，充分混匀后均匀喷施在 0.067 hm² 田块中，3~5 d 后进行第二次喷施；硅硒肥于水稻孕穗期和灌浆期各喷施 1 次，喷施时将叶面肥原液稀释 500 倍后均匀喷施 0.067 hm² 田块中。

1.6 水稻叶面肥筛选试验样品采集、测定及数据分析

1.6.1 样品采集和测定

于水稻成熟期采集土壤和植株样品，土壤采样方法与先前一致。与土壤采集的采样点布置一致，每个采样点按五点取样法取植株地上部样品，每个点位取 2 株，一个采样点共取 10 株植株。将 10 份样品的茎叶和糙米分别混合，烘干后粉碎备用。依据《食品安全国家标准中砷及无机砷的测定》（GB 5009.11-2014）^[20]、《食品安全国家标准中镉的测定》（GB 5009.15-2014）^[21]、《食品中铅的测定》（GB 5009.12-2017）^[22]、《食品中铬的测定》（GB 5009.123-2014）^[23] 分别对水稻茎叶、糙米中的 As、Cd、Pb、Cr 含量进行检测。

1.6.2 数据分析

采用 Excel 2019 和 R Core Team(2022) 对数据进行统计分析。通过计算 pearson 相关系数和对应 *P* 值，分析土壤-水稻系统中重金属含量相关性；利用多元方差分析和水稻样品茎叶及糙米转运系数，进行叶面肥筛选。转运系数计算公式如下：

$$\text{转运系数}(\text{TF}_{\text{L-G}}) = \text{糙米中重金属含量} / \text{茎叶中重金属含量} \quad (6)$$

2 结果与分析

2.1 土壤及水稻地上部分重金属含量统计

2.1.1 土壤重金属含量特征

研究区土壤样品 pH 值和重金属含量如表 2 所示。土壤 pH 平均值为 7.09，变化范围为 6.51~7.39，为中性红壤土。土壤中 As、Cd、Pb、Cr 平均含量分别为 25.7、0.689、39.7 和 224 mg·kg⁻¹。其中，As、Cd 含量超过《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准（试行）》（GB 15618-2018）^[24] 农用地土壤污染风险筛选值。20 份土壤样品中有 10 件 As、11 件 Cd 和 2 件 Cr 超过风险筛选值，点超标率分别为 50%、55% 和 10%。总体来看，研究区土壤为 As、Cd 复合污染型水稻土，其农产品质量安全可能存在风险。土壤 As、Cd、Pb、Cr 的平均含量分别为云南省土壤背景值的 1.4、3.1、0.98、3.4 倍。土壤 As、Cd 含量的变异系数均大于 36%，属高度变异，Pb、Cr 的变异系数在 16%~35% 之间，属中度变异，表明受 As、Cd 污染土壤的空间分布不均匀，受局部点源污染较为明显。结合研究区以种植业为主的产业模式，推测其耕地土壤重金属富集的来源可能主要受人类活动影响。

2.1.2 水稻地上部分重金属含量特征

研究区未处理水稻茎叶样品 As、Cd、Pb、Cr 的平均含量分别为 5.66、0.06、0.65 和 5.45 mg·kg⁻¹，糙米中的平均含量分别为 0.187、0.007、0.293 和 0.511 mg·kg⁻¹（表 3）。根据《食品安全国家标准食品中污染物限量》（GB 2762-2022）^[25]，本次采集的糙米样品有 6 件 As，7 件 Pb，1 件 Cr 元素超过食品安全最大限量值，超标率依次为 30%，35%，5%。糙米样品中仅有 5 件检测出 Cd 元素。

表 2 土壤中重金属含量
Table 2 Heavy metal content in soil

指标 Index	平均值 Average	最大值 Maximum	最小值 Minimum	标准差 Standard deviation	变异系数 % Coefficient of variation	土壤背景值 Soil background values
pH	7.09	7.39	6.51	0.24	3.40	-
As/ (mg·kg ⁻¹)	25.7	56.3	8.82	12.6	48.9	18.4
Cd/ (mg·kg ⁻¹)	0.689	1.40	0.217	0.42	61.2	0.22
Pb/ (mg·kg ⁻¹)	39.7	58.3	17.3	11.6	29.2	40.6
Cr/ (mg·kg ⁻¹)	224	317	78.2	62.0	27.7	65.2

注：云南省土壤背景值引自中国环境监测总站（1990）。

Note: Soil background values in Yunnan Province are quoted from China Environmental Inspection Station (1990).

表 3 水稻地上部分重金属含量
Table 3 Heavy metal content in rice aboveground part

指标 Index	茎叶 Stems and leaves					糙米 Brown rice				
	平均值 Average/ (mg·kg ⁻¹)	最大值 Maximum/ (mg·kg ⁻¹)	最小值 Minimum/ (mg·kg ⁻¹)	标准差 Standard deviation	变异系数 Coefficient of variation/%	平均值 Average/ (mg·kg ⁻¹)	最大值 Maximum/ (mg·kg ⁻¹)	最小值 Minimum/ (mg·kg ⁻¹)	标准差 Standard deviation	变异系数 Coefficient of variation/ %
As	5.66	11.3	2.53	2.51	44.4	0.187	0.287	0.101	0.053	28.4
Cd	0.06	0.175	0.023	0.047	78.9	0.007	0.037	-	0.013	187
Pb	0.65	1.04	0.42	0.21	31.6	0.293	1.200	0.014	0.383	131
Cr	5.45	12.6	1.81	2.39	43.8	0.511	1.100	0.204	0.248	48.6

2.2 研究区土壤与水稻地上部重金属含量相关性分析

为了研究土壤-作物系统中典型重金属的关系，对研究区土壤、水稻茎叶及糙米中重金属进行了相关性分析，如图 1 所示。土壤中 As、Cd、Pb、Cr 两两之间呈显著正相关性关系，表明研究区土壤中这几种元素可能有相似的来源。结合前面的研究内容，研究区土壤 As、Cd、Cr 含量均超过云南省土壤背景值，进一步证明该地区重金属来源严重受人为活动影响。土壤中 As、Cd、Pb、Cr 的含量与水稻茎叶与糙米中对应元素的含量呈正相关关系，表明这些重金属元素会被水稻吸收并转运，最后在糙米中累积^[26]。水稻地上部分 As、Pb 含量具有显著相关性，Cr 与其他元素之间呈负相关关系。

2.3 研究区土壤环境质量评价

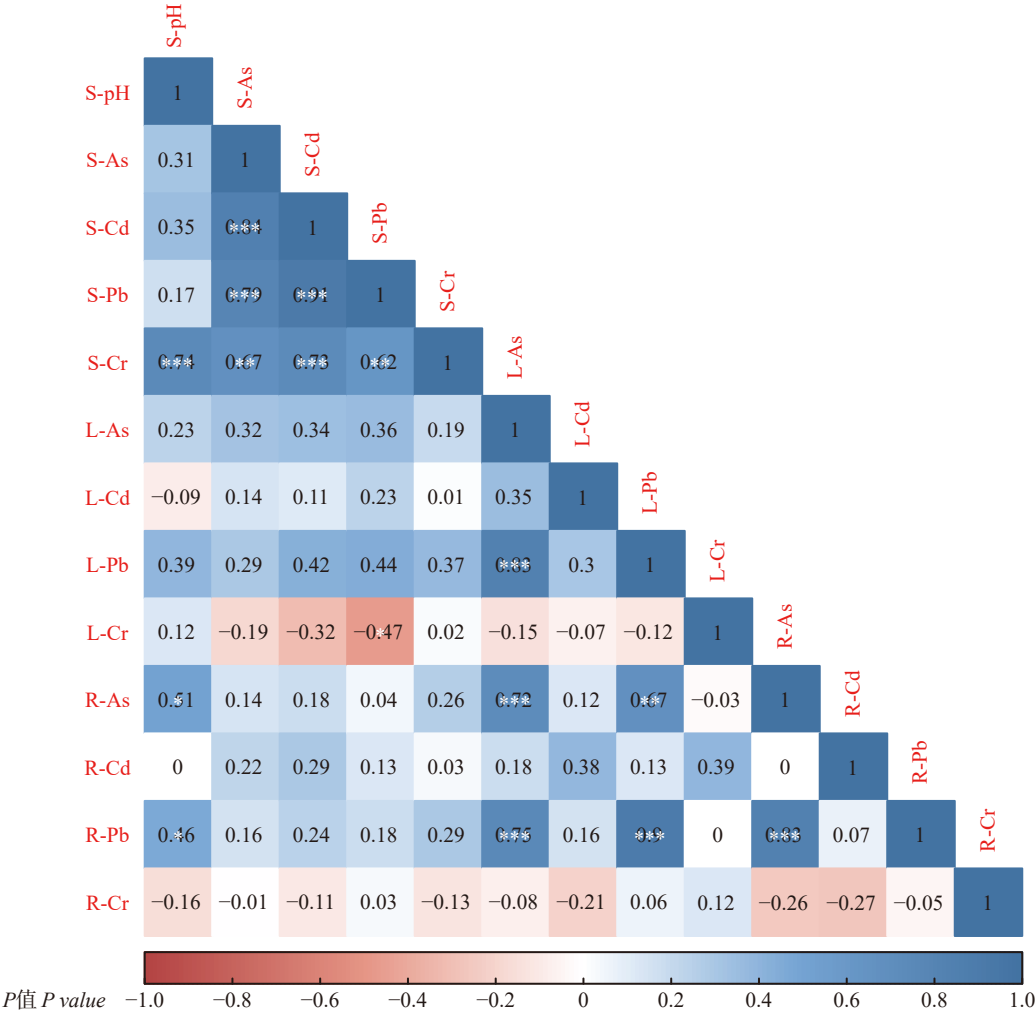
运用单因子污染指数法和内梅罗综合污染指数法对研究区土壤重金属含量进行评价。单因子污染指数法评价结果（表 4）表明，研究区土壤不受 Pb 污染，基本不存在 Cr 污染。As、Cd 污染较为严重，约 50% 的土壤存在不同程度的污染；其中 Cd 污染较为显著，20% 土壤存在 Cd 中度污染的现象。通过内梅罗综合污染指数法进一步对研究区土壤进行综合性评价（表 5），研究区仅 35% 的土壤安全，10% 的土壤处于警戒线，55% 的土壤受到轻度污染。分析表明，该地区土壤确实存在 As、Cd 复合污染的情况，需引起相关部门的重视。

2.4 研究区土壤潜在生态风险评价

研究区各个点位 As、Pb、Cr 的潜在生态危害系数均小于 40（表 6），属于轻微生态危害，有 60% 的点位 Cd 元素属轻微生态危害，40% 的点位 Cd 元素属中等生态危害。综合潜在生态危害指数表明研究区土壤为轻微潜在生态危害，其中，Cd 元素对研究区潜在生态危害的影响最大。

2.5 叶面肥对水稻重金属含量的影响

基于研究区土壤受 As、Cd 复合污染的现状，采用喷施叶面肥的方式减少所种植农产品可食用部分重金属富集是有必要的。



注：S-pH、S-As、S-Cd、S-Pb、S-Cr 分别代表土壤中的 pH、As、Cd、Pb 和 Cr 含量；L-As、L-Cd、L-Pb、L-Cr 分别代表水稻茎叶中的 As、Cd、Pb 和 Cr 含量；R-As、R-Cd、R-Pb、R-Cr 分别代表水稻糙米中的 As、Cd、Pb 和 Cr 含量。*代表 $P<0.05$ ，**代表 $P<0.01$ ，***代表 $P<0.001$ 。

Note: S-pH, S-As, S-Cd, S-Pb and S-Cr indicate content of pH, As, Cd, Pb and Cr in soil, respectively; L-As, L-Cd, L-Pb, L-Cr indicate content of As, Cd, Pb and Cr in stem and leaf of rice, respectively; R-As, R-Cd, R-Pb, R-Cr indicate content of As, Cd, Pb and Cr in brown rice, respectively. * indicates $P<0.05$; ** indicates $P<0.01$; *** indicates $P<0.001$.

图 1 土壤、水稻茎叶及糙米中重金属含量相关系数可视化图

Fig. 1 Visualization of the correlation coefficients of heavy metal content in soil, stems and leaves, and brown rice

表 4 土壤单项污染指数

Table 4 Single pollution index of paddy soil

单项污染指数 Individual pollution index	污染等级 Pollution level	污染占比 Proportion of pollution/%			
		砷 As	镉 Cd	铅 Pb	铬 Cr
$P_i \leq 1$	无污染 No contamination	50	45	100	90
$1 < P_i \leq 2$	轻度污染 Mild contamination	45	35		10
$2 < P_i \leq 3$	中度污染 Moderate contamination	5	20	-	-
$3 < P_i$	重度污染 Heavy pollution	-	-	-	-

2.5.1 不同叶面肥对水稻重金属累积的影响

分别用锰锌肥和硅硒肥处理云两优 501，其茎叶和糙米中重金属累积情况如表 7 所示，可以初步看出喷施叶面肥后水稻茎叶和糙米中不同重金属的含量均低于对照组。未处理的糙米样品中 30%As 超标，

35%Pb 超标, 5%Cr 超标。喷施硅硒肥后, 水稻茎叶中 As、Cd、Pb、Cr 的含量分别下降 13.7%、13.3%、23.3%、16.8%; 糙米中 As、Cd、Pb、Cr 的含量分别下降 16.6%、42.9%、65.5%、46.6%, As、Pb 的超标率分别为 15%、25%, 不存在 Cd、Cr 超标的现象。喷施锰锌肥后, 水稻茎叶中 As、Cd、Pb、Cr 的含量分别下降 21.4%、31.7%、35.5%、46.4%; 糙米中 As、Cd、Pb、Cr 的含量分别下降 31.0%、71.4%、76.5%、65.0%, 糙米中 As、Pb 的超标率分别为 5%、5%, 不存在 Cd、Cr 超标的现象。对照组产量为 $11\,028\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 喷施硅硒肥、锰锌肥后产量为 $11\,020\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $11\,229\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。两种叶面肥均能降低水稻重金属含量, 但对产量影响不显著。相较而言, 喷施锰锌肥的处理重金属含量更低且产量小幅提高。

表 5 土壤综合污染指数

Table 5 Comprehensive pollution index of paddy soil

综合污染指数 Comprehensive pollution index	污染等级 Pollution level	污染占比 Proportion of pollution/%
$P \leq 0.7$	安全 Safe	35
$0.7 < P_{\text{综}} \leq 1.0$	警戒线 Cordon	10
$1.0 < P_{\text{综}} \leq 2.0$	轻度污染 Mild contamination	55
$2.0 < P_{\text{综}} \leq 3.0$	中度污染 Moderate contamination	-
$3.0 < P_{\text{综}}$	重度污染 Heavy pollution	-

表 6 土壤单项重金属潜在生态危害系数及综合潜在生态危害指数

Table 6 Potential ecological hazard coefficients and comprehensive potential ecological hazard indexes of single heavy metals in soil

潜在生态危害 系数(E_i^i) Potential ecological hazard factors	生态风险级别 Ecological risk level	各金属占比 Proportion of each metal/%				潜在生态危害 指数(RI) Potential ecological hazard index	生态风险级别 Ecological risk level	污染点位 占比 Proportion of pollution points/%
		As	Cd	Pb	Cr			
$40 < E_i^i$	轻微生态危害 Minor ecological hazards	100	60	100	100	$RI < 160$	轻微 Slight	100
$40 \leq E_i^i < 80$	中等生态危害 Moderate ecological hazard	-	40	-	-	$160 \leq RI < 320$	中等 Medium	-
$80 \leq E_i^i < 160$	强生态危害 Strong ecological hazards	-	-	-	-	$320 \leq RI < 640$	强 Strong	-
$160 \leq E_i^i < 320$	很强生态危害 Very strong ecological hazard	-	-	-	-	640	很强 Very strong	-
$320 \leq E_i^i$	极强生态危害 Extremely strong ecological hazard	-	-	-	-	-	-	-

表 7 不同品牌叶面肥处理下水稻茎叶和糙米不同重金属平均积累量

Table 7 Average accumulation amount of different heavy metals in rice stems and leaves and brown rice under different foliar fertilizer treatments

重金属 Heavy metals	茎叶 Stem and leaf			糙米 Brown rice		
	锰锌肥 Mn and Zn fertilizer	硅硒肥 Si and Se fertilizer	CK	锰锌肥 Mn and Zn fertilizer	硅硒肥 Si and Se fertilizer	CK
As	4.451	4.886	5.663	0.129	0.156	0.187
Cd	0.041	0.052	0.06	0.002	0.004	0.007
Pb	0.420	0.499	0.651	0.069	0.101	0.293
Cr	2.919	4.532	5.447	0.179	0.273	0.511

mg·kg⁻¹

进一步通过多元方差分析（MANOVA），对比喷施锰锌肥、硅硒肥和未处理 3 种处理下水稻糙米中各元素含量（表 8）。对于 As 而言，喷施硅硒肥和锰锌肥的处理间不存在显著差异，喷施锰锌肥与对照处理间存在显著差异，表明喷施锰锌肥可显著降低水稻糙米 As 含量，在糙米中存在 As 超标问题时，可优先选择锰锌肥。对于 Cd 而言，各处理间不存在显著差异。对于 Pb 而言，喷施两种叶面肥的处理间不存在显著差异，但喷施叶面肥与对照组间存在差异，表明两种叶面肥均可显著降低水稻糙米 Pb 含量，Cr 与 Pb 结论相同。因此，若该地区受多元素污染，则可优先考虑使用锰锌肥。

表 8 多元方差分析
Table 8 Multivariate analysis of variance

因变量 Dependent variable	(I)处理 Treatment(I)	(J) 处理 Treatment(J)	平均值差值 (I-J) Mean Deviation	标准误差 Standard error	显著性 Statistical significance
As	硅硒肥	锰锌肥 Mn Zn fertilizer	0.027	0.015	0.184
	Si and Se fertilizer	未处理 Untreatment	-0.031	0.015	0.099
	锰锌肥	硅硒肥 Si Se fertilizer	-0.027	0.015	0.184
	Mn and Zn fertilizer	未处理 Untreatment	-0.058*	0.015	0.001
	未处理	硅硒肥 Si Se fertilizer	0.031	0.015	0.099
	Untreatment	锰锌肥 Mn Zn fertilizer	0.058*	0.015	0.001
Cd	硅硒肥	锰锌肥 Mn Zn fertilizer	0.002	0.003	0.787
	Si and Se fertilizer	未处理 Untreatment	-0.003	0.003	0.679
	锰锌肥	硅硒肥 Si Se fertilizer	-0.002	0.003	0.787
	Mn and Zn fertilizer	未处理 Untreatment	-0.005	0.003	0.297
	未处理	硅硒肥 Si Se fertilizer	0.004	0.003	0.679
	Untreatment	锰锌肥 Mn Zn fertilizer	0.005	0.003	0.297
Pb	硅硒肥	锰锌肥 Mn Zn fertilizer	0.031 7	0.073	0.902
	Si and Se fertilizer	未处理 Untreatment	-0.192*	0.073	0.03
	锰锌肥	硅硒肥 Si Se fertilizer	-0.032	0.073	0.902
	Mn Zn fertilizer	未处理 Untreatment	-0.223*	0.073	0.009
	未处理	硅硒肥 Si Se fertilizer	0.192*	0.073	0.03
	Untreatment	锰锌肥 Mn Zn fertilizer	0.223*	0.073	0.009
Cr	硅硒肥	锰锌肥 Mn Zn fertilizer	0.094	0.054	0.199
	Si and Se fertilizer	未处理 Untreatment	-0.152*	0.054	0.018
	锰锌肥	硅硒肥 Si Se fertilizer	-0.094	0.054	0.199
	Mn and Zn fertilizer	未处理 Untreatment	-0.246*	0.054	0
	未处理	硅硒肥 Si Se fertilizer	0.152*	0.054	0.018
	Untreatment	锰锌肥 Mn Zn fertilizer	0.246*	0.054	0

2.5.2 不同叶面肥对水稻重金属转运的影响

研究结果表明（表 9）两种叶面调节剂均可降低重金属在茎叶糙米间的转运系数，从而降低重金属在糙米中的富集。锰锌肥可以使 As 转运系数降低 8.3%，Cd 转运系数降低 34.9%，Pb 转运系数降低 56.7%，Cr 转运系数降低 19.6%；硅硒肥可使 As 转运系数降低 5.5%，Cd 转运系数降低 33.1%，Pb 转运系数降

低 51.3%, Cr 转运系数降低 31.8%。两种叶面肥均可显著降低水稻中 Cd、Pb 的转运系数, 从而降低其在糙米中的富集。但对水稻中 As 元素茎叶糙米间转运系数的影响不显著, 可能是导致在糙米中依旧存在 As 超标现象的原因之一。

表 9 不同品牌叶面肥处理后水稻茎叶糙米间转运系数

Table 9 Transport coefficients between brown rice-stems and leaves under different foliar fertilizer treatments

处理 Treatment	As	Cd	Pb	Cr
锰 锌 肥 Mn and Zn fertilizer	0.033	0.175	0.183	0.086
硅 硒 肥 Si and Se fertilizer	0.034	0.180	0.206	0.073
CK	0.036	0.269	0.423	0.107

3 讨 论

3.1 土壤重金属污染与潜在生态风险评价

研究区喀斯特地貌显著, 土壤样品中存在 As、Cd、Cr 总量超标的现象, 但如果遵循《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618-2018)^[24], 可能会造成污染土壤面积被高估, 导致耕地面积的浪费^[27]。

土壤重金属污染评价方法包括单项污染指数法、内梅罗指数法、潜在生态危害指数法等。土壤单项污染指数表明, As、Cd 污染等级处于中度污染的样品分别占 5% 和 20%, 不受 Pb 污染。内梅罗综合污染指数法表明有 10% 的土壤样品处于警戒, 55% 的土样品壤属于轻度污染。上述两种方法反映了高浓度污染物对土壤环境质量的作用, 将实测数据与历史数据作为一个整体研究, 但忽略了不同污染物种类对作物产生毒性的不同影响^[28]。潜在生态危害系数将重金属污染及其产生的生态环境影响与毒理学原理结合起来。数据分析结果表明, 除 40% 的样品中 Cd 元素处于中等生态危害外, 所有样品均处于轻微生态危害, 与单项污染指数法的评价结果不一致。而综合潜在生态危害指数则表明研究区土壤全部处于轻微生态危害, 两者评价结果不一致。可能原因是潜在生态危害指数法引入了毒性响应系数, 主观性较强, 且对毒性响应系数较小的重金属元素评价分级较差^[28]。

研究区 Cd 元素污染指数较高, 毒性系数较高, 呈现出较高的生态风险, 对综合生态风险指数贡献最大。其变异系数为 61.2%, 受点源污染严重, 因此需要关注研究区中 Cd 的来源。由于作物对土壤中重金属的富集主要受其中有效态含量的制约, 但至今仍难以实现对不同区域和不同类型土壤重金属有效性的比较与评价^[29]。本研究仅从土壤重金属元素总量的角度, 对土壤重金属污染与潜在生态风险进行了初步评价。下一步应测定研究区 As、Cd、Pb 和 Cr 存在形态, 综合其生物有效性进行进一步评价。

3.2 土壤重金属含量与水稻重金属含量相关性

相关性分析结果表明, 研究区土壤中同时存在多种重金属元素且存在复杂的相互作用, 这与 Xiang 等^[30]的研究结果一致。研究区稻田土受到不同程度的 As、Cd、Cr 污染, 不存在 Pb 污染。对照组糙米样品中检测出 As、Pb 超标, 未检出 Cd, 表明稻田土壤重金属含量与水稻糙米重金属含量之间没有显著相关性。这可能是由于土壤重金属全量与土壤重金属残渣态存在显著正相关关系, 但残渣态无法被水稻吸收利用, 使得糙米中重金属富集量较低^[2]。因此, 水稻糙米的重金属含量应受土壤重金属的生物有效性影响, 与土壤重金属总量间无显著相关性。

研究区土壤受 Cd 污染却在糙米中未检出 Cd 的原因可能为: 其一, Cd 在土壤中存在的形态受大气沉积、土壤 pH 及氧化还原状态影响, 土壤中有效态含量越高, Cd 迁移率及生物有效性越高^[31]; 其中, 土壤 pH 被认为是影响重金属可利用性的关键土壤因子, 李思民等^[32]研究表明, 当土壤 pH 为 6.5 时, 重金属有效态含量较高, 随着 pH 的进一步升高, 其有效态含量显著降低, 研究区土壤呈中性, 其有效 Cd 含量较低, 不易迁移至水稻植株中。其二, 水稻对重金属富集能力方面的差异主要源于金属转运体、解毒机

理和遗传特性的不同^[33], Li等^[34]研究表明, 籼稻品种地上部和稻米的镉积累量高于粳稻品种。云两优501作为粳稻品种, 对于Cd的低积累可能是受其基因型决定的。研究区土壤不受Pb污染, 糙米Pb超标的原因可能为糙米中Pb积累受大气干湿沉降和土壤背景值的影响^[35], 郭朝晖等^[36]研究也表明, 截断大气沉降后, 糙米中Pb含量显著下降, 因此, 供试品种糙米Pb超标, 大气沉降可能是主要原因; 其次, 同一品种在同一背景中对不同元素的吸收存在差异^[37], 云两优501对Pb吸收转运能力较强, 可能与其遗传特性有关。

本研究表明水稻地上部分As、Pb含量具有显著相关性, 表明其可能具有相似来源。与Cd相同, 水稻对土壤As的吸收也受土壤pH、氧化还原特征、共存元素及水稻品种的影响^[38]。推测糙米样品中富集的As可能来源于植株从土壤中吸收的有效As及大气沉降。

3.3 不同叶面肥对水稻重金属积累的影响

普遍研究认为大气沉降是水稻重金属富集的主要影响因素之一^[27, 39]。外源施用Zn类、Si类叶面肥不仅能为作物生长提供营养, 而且可降低其对重金属的吸收^[40]。

目前研究主要认为Zn、Cd之间存在着拮抗作用^[41]。虞银江等^[42]研究表明, 叶面施用锌肥能对降低水稻叶片Cd含量产生作用, 是因为Zn、Cd共用亲和性质膜转运蛋白所产生的Zn/Cd拮抗作用。

Si类叶面肥减少水稻镉含量的作用机制为增强根系细胞壁对Cd的吸附固定能力, 提高保护酶活性, 抑制Cd进入细胞; 在幼苗期, 可促进水稻体内合成植物螯合肽(PCs), 降低重金属的生物有效性, 或通过降低蒸腾作用, 阻断Cd向糙米的转运, 从而减少Cd在水稻可食用部位的累积^[40]。Si还可竞争性地抑制As(Ⅲ)的吸收^[43], Si浓度的增加可以下调硅转运蛋白的表达量, 减少水稻根系对As的吸收和转运, 且可以促进根系泌氧能力和根表铁膜的形, 进一步减少土壤中As进入植物体内的通道^[44]。外源Si可抑制Pb在水稻地上部分的转运, 进而降低Pb在糙米中的累积^[45]。Si能在一定程度上促进土壤中可交换态Cr向沉淀Cr和有机Cr转化, 降低毒性大、易迁移的有效态Cr在土壤中的含量, 从而缓解Cr对水稻的毒害作用^[46]。

本研究喷施Zn类、Si类叶面肥可明显降低云两优501茎叶-糙米间Cd、Pb、Cr转运系数, 但对As的转运系数影响较小。糙米中累积的As主要来自于根系吸收的As, 其经木质部装载随蒸腾流向糙米^[47], Si与As对外流和内流转运蛋白的竞争, 导致施Si类叶面肥可显著抑制As从水稻向地上部的转运^[48], 但对于茎叶和糙米间的转运无明显抑制效果。

本研究针对当地环境因素, 选用一种大面积推广的杂交稻品种以及锌类、硅类两种叶面肥, 以探究两种叶面肥在田间大规模应用的效果。结果虽不全面, 但对农业生产中大规模推广仍具一定参考价值。今后需选用市场上不同类型、品牌的叶面肥, 按照厂商施用说明进行喷施, 以期获得各类叶面肥在农业生产中实际应用效果的全貌。

4 结 论

(1) 单因子污染指数法表明, 研究区水稻种植区土壤中As、Cd、Cr的污染程度依次为Cd>As>Cr; 内梅罗综合污染指数法表明该地区水稻种植区土壤受As、Cd复合污染, 污染程度为轻度污染; 其综合潜在生态危害指数较低。研究区四种重金属元素中, Cd的变异系数最大, As次之, 表明其空间分布不均匀, 受点源污染现象明显。相关性分析结果说明土壤中四种重金属元素之间两两具有显著相关性, 具有相同来源。

(2) 研究区水稻糙米样品中存在As、Pb、Cr超标的现象, 大多数样品中未检出Cd元素富集。相关性分析表明, 土壤As、Pb、Cd、Cr会被水稻吸收转运, 但不是影响水稻茎叶糙米中对应重金属元素累积的决定性因素。水稻茎叶与糙米中的As、Pb元素也表现出显著相关性, 表明其来源可能相似。

(3) 锰锌肥和硅硒肥均可通过降低水稻转运能力从而减少四种重金属元素在水稻糙米中的累积。相较而言, 锰锌肥减少重金属积累的效果更加明显, 且小幅提高单产, 可在当地农业生产中大规模推广。

参考文献 (References):

- [1] 王成尘, 田稳, 向萍, 等. 土壤-水稻/小麦重金属吸收机制与安全调控[J]. *中国环境科学*, 2022, 42 (2): 794–807.
WANG C C, TIAN W, XIANG P, et al. Mechanism of heavy metal uptake and transport in soil-rice/wheat system and regulation measures for safe production[J]. *China Environmental Science*, 2022, 42 (2): 794–807.
- [2] 蔚蓝. 西南地质高背景区土壤-水稻系统重金属富集特征及影响因素[D]. 沈阳: 沈阳化工大学, 2022.
YU L. Enrichment characteristics and influencing factors of heavy metals in soil-rice system in high geological background area of southwest China [D]. Shenyang: Shenyang University of Chemical Technology, 2022.
- [3] KONG X Y, LIU T, YU Z H, et al. Heavy metal bioaccumulation in rice from a high geological background area in Guizhou Province, China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, 15 (10): 2281.
- [4] CLEMENS S, MA J F. Toxic heavy metal and metalloid accumulation in crop plants and foods[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2016, 67: 489–512.
- [5] 蔡昂祖. 邯郸市工业区周边土壤重金属来源解析及污染评估研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2022: 5-6.
CAI A Z. Source apportionment and pollution assessment of heavy metals in industrial area soil in Handan [D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2022: 5-6.
- [6] 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 X M, CUI X T. 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.
- [7] ADEYEYE E I, SHITTU O S, AYODELE O J, et al. Heavy metal pollution potential in soil influenced by sawmill operations at Ado-ekiti, Nigeria[J]. *Bangladesh Journal of Scientific and Industrial Research*, 2018, 53 (1): 29–34.
- [8] 全国土壤污染情况调查公报[EB/OL]. (2014-04-17)[2023-03-05]. http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/qt/201404/t20140417_270670.htm.
Report on the national general survey of soil contamination [EB/OL]. (2014-04-17) [2023-03-05]. http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/qt/201404/t20140417_270670.htm.
- [9] SU Y H, MCGRATH S P, ZHAO F J. Rice is more efficient in arsenite uptake and translocation than wheat and barley[J]. *Plant and Soil*, 2010, 328 (1/2): 27–34.
- [10] 敖明, 柴冠群, 刘桂华, 等. 水稻对镉的吸收与转运规律研究进展[J]. *南方农业*, 2018, 12 (24): 127–128+131.
AO M, CHAI G Q, LIU G H, et al. Research progress on cadmium absorption and transport in rice[J]. *South China Agriculture*, 2018, 12 (24): 127–128+131.
- [11] 曾翔, 张玉烛, 王凯荣, 等. 不同品种水稻糙米含镉量差异[J]. *生态与农村环境学报*, 2006, 22 (1): 67–69+83.
ZENG X, ZHANG Y Z, WANG K R, et al. Genotype difference of brown rice in Cd content[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2006, 22 (1): 67–69+83.
- [12] 陈菲. 水稻低砷品种的筛选以及OsPTR7基因功能的鉴定[D]. 南京: 南京农业大学, 2016.
CHEN F. Screening rice cultivars with low arsenic accumulation and functional study of OsPTR7 gene [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2016.
- [13] 冯爱焯, 贺红周, 李娜, 等. 基于多目标元素的重金属低累积水稻品种筛选及其吸收转运特征[J]. *农业资源与环境学报*, 2020, 37 (6): 988–1000.
FENG A X, HE H Z, LI N, et al. Screening of rice varieties with low accumulation of heavy metals based on multiple target elements and their absorption and transport characteristics in rice plants[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, 37 (6): 988–1000.
- [14] 杜海萌, 韦还和, 余清源, 等. 水稻叶面肥研究的应用进展与展望[J]. *作物杂志*, 2022 (3): 33–38.
DU H M, WEI H H, YU Q Y, et al. Application progress and prospect of rice foliar fertilizer[J]. *Crops*, 2022 (3): 33–38.
- [15] 周其耀, 倪元君, 徐顺安, 等. 叶面调理剂对浙江东部镉污染农田水稻主栽品种安全生产的影响[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2021, 47 (6): 768–776.
ZHOU Q Y, NI Y J, XU S A, et al. Effects of foliar conditioners on safety production of main rice varieties in cadmium contaminated farmland in eastern Zhejiang Province[J]. *Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences)*, 2021, 47 (6): 768–776.
- [16] 中华人民共和国农业部. 农田土壤环境质量监测技术规范: NY/T 395—2012 [S/OL]. (2012-09-01)[2023-02-01]. <https://www.doc88.com/p-74287093481894.html>.
Ministry of Agriculture of the PRC. Technial rules for monitroing of environmentalai quality of farmland soil: NY/T 395—2012 [S/OL]. (2012-09-01)[2023-02-01]. <https://www.doc88.com/p-74287093481894.html>.
- [17] 国家环境保护总局. 土壤环境监测技术规范: HJ/T 166—2004 [S/OL]. (2004-12-09)[2023-02-01]. <https://www.doc88.com/p-1176168347658.html>.

- State Environmental Protection Administration. The technical specification for soil environmental monitoring: HJ/T 166—2004 [S/OL]. (2004-12-09)[2023-02-01]. <https://www.doc88.com/p-1176168347658.html>.
- [18] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control a sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, 14 (8) : 975–1001.
- [19] 林逸凡, 林春野, 刘希涛. 土壤重金属污染潜在生态风险指数评价方法改进和案例验证[J]. *土壤与作物*, 2021, 10 (4) : 467–473. LIN Y F, LIN C Y, LIU X T. Improvement and case verification of potential ecological risk index assessment method for soil heavy metal contamination[J]. *Soils and Crops*, 2021, 10 (4) : 467–473.
- [20] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准中砷及无机砷的测定: GB 5009.11—2014 [S/OL]. (2016-03-21)[2023-02-01]. <http://down.foodmate.net/standard/yulan.php?itemid=47736>. National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. Determination of total arsenic and abio-arsenic in foods: GB 5009.11—2014[S]. (2016-03-21)[2023-02-01]. <http://down.foodmate.net/standard/yulan.php?itemid=47736>.
- [21] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准中镉的测定: GB 5009.15—2014 [S]. (2015-07-28)[2023-02-01]. <https://www.doc88.com/p-0901729802645.html>. National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. Determination of cadmium in foods: GB 5009.15—2014 [S/OL]. (2015-07-28)[2023-02-01]. <https://www.doc88.com/p-0901729802645.html>.
- [22] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品中铅的测定: GB 5009.12—2017 [S/OL]. (2017-10-06)[2023-02-01]. <https://www.doc88.com/p-7478488525823.html>. National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China, China Food and Drug Administration. Determination of lead in foods: GB 5009.12—2017 [S/OL]. (2017-10-06)[2023-02-01]. <https://www.doc88.com/p-7478488525823.html>.
- [23] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品中铬的测定: GB 5009.123—2014 [S]. (2015-07-28)[2023-02-01]. <https://www.doc88.com/p-1196401680397.html>. National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. Determination of chromium in foods: GB 5009.12—2017 [S]. (2015-07-28)[2023-02-01]. <https://www.doc88.com/p-1196401680397.html>.
- [24] 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: GB 15618—2018 [S/OL]. (2018-08-01)[2023-02-01]. <https://www.doc88.com/p-2068702253397.html>. Ministry of Ecological Environment, State Administration for Market Regulation. Soil environmental quality-Risk control standard for soil contamination of agricultural land: GB 15618—2018[S/OL]. (2018-08-01)[2023-02-01]. <https://www.doc88.com/p-2068702253397.html>.
- [25] 国家市场监督管理总局, 中华人民共和国国家卫生健康委员会. 食品安全国家标准食品中污染物限量: GB 2762-2022 [S/OL]. (2022-06-30)[2023-06-30]. <http://wjw.nmg.gov.cn/zfxgk/fdzzgknr/hybz/spbz/202208/P020220824606851329551.pdf>. State Administration for Market Regulation, National Health Commission of the PRC. National Food Safety Standard - Maximum Levels of Contaminants in Foods: GB 2762-2022 [S/OL]. (2022-06-30)[2023-06-30]. <http://wjw.nmg.gov.cn/zfxgk/fdzzgknr/hybz/spbz/202208/P020220824606851329551.pdf>.
- [26] 李姣姣, 赵学强, 王嘉林, 等. 废旧电器拆解场地周边污染区土壤-植物系统重金属积累特征和生态风险[J]. *生态学杂志*, 2022, 41 (12) : 2432–2439. LI J J, ZHAO X Q, WANG J L, et al. Accumulation and ecological risk of heavy metals in soil-plant system of the contaminated area around an E-waste dismantling site[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2022, 41 (12) : 2432–2439.
- [27] 郎笛, 王宇琴, 张芷梦, 等. 云南省农用地土壤生态环境基准与质量标准建立的思考及建议[J]. *生态毒理学报*, 2021, 16 (1) : 74–86. LANG D, WANG Y Q, ZHANG Z M, et al. The establishment of soil eco-environmental criteria and environmental quality standards for agricultural land in Yunnan Province[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2021, 16 (1) : 74–86.
- [28] 徐建明. 土壤学进展-第二卷 [M]. 北京: 科学出版社, 2021. XU J M. Advances in soil science-Volume 2 [M]. Beijing: Science Press, 2021.
- [29] 陈莹, 刘汉焱, 刘娜, 等. 农地土壤重金属Pb和Cd有效性测定方法的筛选与评价[J]. *环境科学*, 2021, 42 (7) : 3494–3506. CHEN Y, LIU H Y, LIU N, et al. Screening and evaluation of methods for determining available lead(Pb) and cadmium(Cd) in farmland soil[J]. *Environmental Science*, 2021, 42 (7) : 3494–3506.
- [30] XIANG M T, LI Y, YANG J Y, et al. Heavy metal contamination risk assessment and correlation analysis of heavy metal contents in soil and crops[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 278: 116911.
- [31] WANG F, PENG L, ZHOU X H, et al. Typical sources of Cd to paddy fields in different contaminated areas and their impacts on Cd accumulation in topsoil and rice in Changzhutan, China[J]. *Environmental Research*, 2021, 193: 110523.
- [32] 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 S M, WANG H J, ZHU X, et al. Effects of soil pH and organic matter on the content of bioavailable heavy metals[J]. *Journal of Yunnan*

- Normal University (Natural Sciences Edition), 2021, 41 (1) : 49–55.
- [33] 邹文莉. 水稻苗期镉耐性和籽粒低镉积累基因挖掘 [D]. 南昌: 江西农业大学, 2019: 1-2.
ZOU W L. Genetic dissection of Cd tolerance at seedling stage and grain low Cd accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) [D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2019: 1-2.
- [34] LI H, LUO N, LI Y W, et al. Cadmium in rice: transport mechanisms, influencing factors, and minimizing measures[J]. *Environmental Pollution*, 2017, 224: 622–630.
- [35] 杨贺, 刘杰. 矿业生产影响区水稻田系统砷、铅、镉的污染特征及风险评价——以西江流域大环江下游为例[J]. *江苏农业科学*, 2018, 46 (15) : 205–209.
YANG H, LIU J. Pollution characteristics and risk assessment of As, Cd and Pb in paddy field system in mining production area—taking Huanjiang downstream of Xijiang River Basin as an example[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2018, 46 (15) : 205–209.
- [36] 郭朝晖, 冉洪珍, 封文利, 等. 阻隔主要外源输入重金属对土壤-水稻系统中镉铅累积的影响[J]. *农业工程学报*, 2018, 34 (16) : 232–237.
GUO Z H, RAN H Z, FENG W L, et al. Effect of impeding main exogenous heavy metal input on accumulation of Cd and Pb in paddy soil-rice system[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34 (16) : 232–237.
- [37] JIANG S L, SHI C H, WU J G. Genotypic differences in arsenic, mercury, lead and cadmium in milled rice (*Oryza sativa* L.)[J]. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 2012, 63 (4) : 468–475.
- [38] 杨文蕾, 沈亚婷. 水稻对砷吸收的机理及控制砷吸收的农艺途径研究进展[J]. *岩矿测试*, 2020, 39 (4) : 475–492.
YANG W L, SHEN Y T. A review of research progress on the absorption mechanism of arsenic and agronomic pathways to control arsenic absorption[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2020, 39 (4) : 475–492.
- [39] 张国忠. 华北地区大气干湿沉降及其对农田土壤的影响研究 [D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2015: 43-45.
ZHANG G Z. Atmospheric wet and dry deposition and its impacts on agricultural soils in northern China [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2015: 43-45.
- [40] 张梅华, 姜朵朵, 于松, 等. 叶面肥对农作物阻镉效应机制研究进展[J]. *大麦与谷类科学*, 2017, 34 (3) : 1–5.
ZHANG M H, JIANG D D, YU S, et al. Research progress on the cadmium resistant mechanisms of foliar fertilizers on crop[J]. *Barley and Cereal Sciences*, 2017, 34 (3) : 1–5.
- [41] 石桔岐. 叶面硅肥、锌肥对小麦镉积累及品质的影响研究 [D]. 雅安: 四川农业大学, 2022.
SHI G Q. Effects of foliar silicon fertilizer and zinc fertilizer on cadmium accumulation and quality of wheat [D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2022.
- [42] 虞银江, 廖海兵, 陈文荣, 等. 水稻吸收、运输锌及其籽粒富集锌的机制[J]. *中国水稻科学*, 2012, 26 (3) : 365–372.
YU Y J, LIAO H B, CHEN W R, et al. Mechanism of Zn uptake, translocation in rice plant and Zn-enrichment in rice grain[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2012, 26 (3) : 365–372.
- [43] 赵方杰. 水稻砷的吸收机理及阻控对策[J]. *植物生理学报*, 2014, 50 (5) : 569–576.
ZHAO F J. Mechanisms of arsenic uptake by rice and mitigation strategies[J]. *Plant Physiology Journal*, 2014, 50 (5) : 569–576.
- [44] 王雅芸. 砷胁迫下硅对水稻生长的影响及其机制研究 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2019: 11.
WANG Y Y. Influence and mechanisms of silicon on rice growth under arsenic stress [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2019: 11.
- [45] LIU J G, CAI H, MEI C C, et al. Effects of nano-silicon and common silicon on lead uptake and translocation in two rice cultivars[J]. *Frontiers of Environmental Science and Engineering*, 2015, 9 (5) : 905–911.
- [46] 张婧婷. 加硅降低碱性土壤铅生物有效性的机制 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2019: 11-12.
ZHANG J T. Mechanism of silicon to reduce lead bioavailability in alkaline soil [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2019: 11-12.
- [47] ZHAO F J, STROUD J L, KHAN M A, et al. Arsenic translocation in rice investigated using radioactive ⁷³As tracer[J]. *Plant and Soil*, 2012, 350 (1/2) : 413–420.
- [48] 李林峰, 文伟发, 徐梓盛, 等. 施硅对水稻铁膜砷固定和体内砷转运的影响[J]. *环境科学*, 2023, 44 (5) : 2899–2907.
LI L F, WEN W F, XU Z S, et al. Effects of silicon application on arsenic sequestration in iron plaque and arsenic translocation in rice[J]. *Environmental Science*, 2023, 44 (5) : 2899–2907.