

有机改良材料对矸石山复垦区芒果铅、镉吸收的影响

孙晋涛¹, 孙晋睿², 陈显坤³, 宋一鸣¹, 彭 雄², 雍 芳^{2*}

1. 成都大学食品与生物工程学院, 四川成都 610106; 2. 攀枝花市西区生态环境监测站, 四川攀枝花 617063; 3. 四川川煤华荣能源有限责任公司, 四川攀枝花 617000

摘 要: 攀西采煤区内部分土壤存在 Pb、Cd 含量较高的问题, 开发种植业存在一定的食品安全隐患。本研究通过大田试验, 对比分析 3 组有机改良材料 (芒草秸秆、菌渣、菌渣+芒草秸秆) 施用前后矸石山复垦区芒果 Pb、Cd 吸收的变化趋势, 研究不同用量的有机改良材料对该区域芒果 Pb、Cd 的降解情况及其对芒果品质的影响效应。结果表明: (1) 试验选用的 3 组有机改良材料均能提高土壤的有机质含量和 pH, 其中菌渣+芒草秸秆组提升效果最显著 ($P<0.05$), 与对照组相比分别提高了 10.85%~25.66%、3.55%~8.06%。(2) 3 组有机改良材料均对降低芒果 Pb、Cd 含量有一定效果, 对芒果中 Pb 含量的降低效果表现为菌渣+芒草秸秆>芒草秸秆>菌渣; 对芒果中 Cd 含量的降低效果表现为菌渣+芒草秸秆>菌渣>芒草秸秆, 其中施加菌渣+芒草秸秆组对芒果中 Pb、Cd 含量的降幅最显著, 使芒果中 Pb 含量降低 13.80%~27.87%, Cd 含量降低 6.32%~27.58%; 有机改良材料不同施用量对降低芒果 Pb、Cd 含量的效果存在一定的差异, 在试验区, 施加 8 kg/株菌渣+芒草秸秆材料能将芒果中的 Pb、Cd 含量分别降低 27.87%、27.58%, 效果最佳 ($P<0.05$)。(3) 健康风险评价显示, 食用各处理组的芒果对不同人群产生的 HQ_i 值均小于 1, 无健康风险, 可放心食用。综上, 在试验区施加 8 kg/株菌渣+芒草秸秆材料能更好地抑制芒果对 Pb、Cd 的吸收, 有效地减少 Pb、Cd 在芒果中的富集, 可作为攀西采煤区芒果种植区农艺调控的理想材料。

关键词: 芒果; 有机改良材料; 铅; 镉; 健康风险

中图分类号: S667.6; X171.5 文献标志码: A

Effect of Organic Amendment Materials on the Uptake of Pb and Cd in Mango from Gangue Mountain Reclamation Area

SUN Jintao¹, SUN Jinrui², CHEN Xiankun³, SONG Yiming¹, PENG Xiong², YONG Fang^{2*}

1. College of Food and Biological Engineering, Chengdu University, Chengdu, Sichuan 610106, China; 2. West District Ecological Environment Monitoring Station, Panzhihua, Sichuan 617063, China; 3. Sichuan Chuanmei Huarong Energy Co. Ltd., Panzhihua, Sichuan 617000, China

Abstract: Some soil in the coal mining area of Western Panzhihua has high Pb and Cd contents, and there are certain food safety risks in the development of the plantation. In this paper, we compared and analyzed the trends of Pb and Cd uptake in mango in the region before and after the application of three groups of organic amendment materials (mango grass straw, mushroom residue, mushroom residue+mango grass straw) through a large field experiment, and investigated the degradation of Pb and Cd in the mango in the region by different dosages of organic amendment materials and their influence effects on the quality of mango. Three groups of organic amendment materials improved the organic matter content and pH value of the soil, among which the fungus residue+mango straw group had the most significant effect ($P<0.05$), and the effect increased by 10.85%~25.66% and 3.55%~8.06%, respectively, compared with that of the control. All three groups of organic improvement materials had certain effects on reducing Pb and Cd content in mango.

收稿日期 2024-02-06; 修回日期 2024-03-09

基金项目 川煤集团 2021 年度重点科技攻关项目[川煤发展 (2021) 24 号]; 四川省自然资源厅 2022 年度科研项目 (No. KJ-2022-11); 四川省农村发展研究中心项目 (No. CR2001)。

作者简介 孙晋涛 (1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 生态农业与食品安全。*通信作者 (Corresponding author): 雍 芳 (YONG Fang), E-mail: 601737920@qq.com。

The effect of reducing Pb in mango was shown as mushroom residue+mango straw>mango straw>mushroom residue; the effect of reducing Cd in mango was shown as mushroom residue+mango straw>mushroom residue>mango straw; the effect of applying mushroom residue+mango straw was most significant, the reduction of Pb and Cd in mango for the mushroom residue+mango straw was 13.80%–27.87% and 6.32%–27.58%, respectively; there were some differences in the effect of different application amounts of organic amendment materials on degrading Pb and Cd in mango. Within the experimental interval, applying 8 kg/plant of mushroom residue+mangrove straw material could reduce Pb and Cd in mango by 27.87% and 27.58%, respectively, which was the best effect ($P<0.05$). The health risk evaluation showed that the HQ_i values produced by consumption of mango in each treatment group were less than one, and there was no health risk, so it could be safely consumed. In conclusion, applying 8 kg/plant of mushroom residue+mango grass straw in the experimental range can better inhibit the absorption of Pb and Cd in mango, effectively reducing the enrichment of Pb and Cd in mango. It can be used as an ideal material for the agronomic control of mango cultivation in the coal-mining area of western Panzhihua.

Keywords: mango; organic modified materials; Pb; Cd; health risk

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2024.09.020

攀西地区是西南地区大型钢铁、钒钛冶炼基地和主要煤炭生产供应基地,拥有得天独厚的自然资源,也是我国主要的芒果种植基地之一^[1]。但由于重型工业的大力发展、矿产资源的持续开发,致使煤矿开采过程中高浓度的重金属元素经径流、沉降和淋溶等途径进入土壤,造成煤矿区土壤重金属富集^[2-4]。煤矿开采、煤矸石的堆积占用大面积土地,致使耕地稀缺,在矿区种植芒果等经济作物已成为当地矿区可持续利用的重要手段。相较于普通农用地,生长在矿区的农作物更易受矿业活动的影响^[5]。前人研究发现,攀枝花市西区某矸石堆场芒果种植区内芒果中 Pb 含量 (0.11 mg/kg) 略高于污染物限量标准 (0.10 mg/kg),处于轻污染状态,芒果中 Cd 含量也临界于限量标准^[6]。随时间推移,工业活动加剧,受降雨、盛行风等自然因素影响,极可能造成土壤中重金属的富集,经过吸收-迁移-积累最终在作物系统(芒果)中富集^[7-8],进而影响其品质,危害人体健康^[9-10]。因此,采取安全有效的措施降低该种植区内芒果 Pb、Cd 含量已成为当前亟待解决的食品安全问题。

常见的调控技术中,化学调控技术是通过向土壤施加有机改良材料来改变重金属在土壤中的赋存形态,降低其生物有效性,抑制作物对重金属吸收的调控技术,由于成本低、操作简单,且具有明显的效果,被广泛应用^[11-14]。芒草秸秆、菌渣是攀枝花市主要的农业废弃物,若以此作为有机改良材料变废为宝,并应用到矿区芒果治理上,则具有重要意义。因此,研究芒草秸秆、菌渣对芒果 Pb、Cd 吸收的影响,对充分利用农业废弃资源实现 Pb、Cd 污染芒果安全生产意义重

大。目前,针对芒草秸秆、菌渣、菌渣+芒草秸秆 3 组有机改良材料影响芒果 Pb、Cd 吸收、积累的研究鲜见报道。鉴于此,为探究 3 组改良材料施用前后芒果对 Pb、Cd 吸收情况和土壤理化性质的变化,本研究以攀枝花市西区某矸石堆场芒果种植区内的芒果为研究对象,采用田间试验,开展为期 2 a (2022—2023) 的农艺调控,对比芒草秸秆、菌渣、菌渣+芒草秸秆 3 组改良材料,探究其对土壤 pH、有机质含量、土壤有效态 Pb、Cd 含量、芒果 Pb、Cd 含量和富集效应的影响,以期改善芒果质量、保证食品安全和降低人体健康风险提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 试验区域概况 试验地位于四川省攀枝花市西区某矸石堆场芒果种植区 (26°59'33"N, 101°56'58"E),属亚热带干热河谷气候,年均气温 20.3 °C,年均降水量 836.5 mm。该矸石堆场形成于 2013 年,并于 2017 年通过压实-覆土-果树移栽的方式对其进行复垦。复垦区是由矸石山表层 (0~90 cm) 经客土混层稀释 (客土质量:矸石质量=1:1) 后形成的芒果种植区,面积约 2000 m²,主要成分由 SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃、CaO 和 MgO 等组成,土层贫瘠、有机质含量低。土壤基本理化性质为:速效钾 (AK) 72.24 mg/kg,碱解氮 57.84 mg/kg,速效磷 (AP) 11.98 mg/kg,有机质 (OM) 1.05%,阳离子交换量 (CEC) 21.47 mg/kg, pH 6.2。

1.1.2 供试材料 供试有机改良材料为菌渣 (菌类培养基废料),采自攀枝花市某农场用于栽培黑木耳的培养基废料,主要原材料为桑木屑、棉籽

壳、甘蔗渣等；芒草秸秆采自攀枝花市某农产品加工厂。有机改良材料基本理化性质见表 1。分别将 2 种有机物料（菌渣、芒草秸秆）风干、磨细，过 100 目筛，装入封袋置于阴凉干燥处保存、备用。

主要设备及试剂。OPTIMA 7000 电感耦合等离子分析仪（ICP，美国 PerkinElmer 公司）。HNO₃（优级纯）、HCl（优级纯）、CH₄N₂S（优级纯）、C₆H₈O₆（优级纯）、KBH₄（优级纯）、NaOH（优级纯）、CH₃SO₃H（优级纯）以及 Pb、Cd 标准液。

表 1 有机改良材料基本理化性质
Tab. 1 Basic physical and chemical properties of organic improved materials

材料 Material	pH	有机质 OM/(g·kg ⁻¹)	全氮 TN/(g·kg ⁻¹)	全磷 TP/(g·kg ⁻¹)	全钾 TK/(g·kg ⁻¹)	C/N	Pb /(mg·kg ⁻¹)	Cd /(mg·kg ⁻¹)
芒草秸秆	6.40	364.53	4.77	1.48	14.13	49.25	—	—
菌渣	7.80	625.14	12.55	1.22	11.65	38.78	—	—

注：—表示未检出。
Note: — indicates it was not detected.

1.2 方法

1.2.1 试验设计 供试芒果品种为椰香(Dasheri)，种植于攀枝花市西区某砷石堆场芒果种植区，树龄 6 a，栽植株行距 3 m×3 m。供试有机改良材料分别为芒草秸秆、菌渣、菌渣+芒草秸秆，于 2022 年 2 月芒果花芽期间开展试验，共设置 16 组处理，每组处理设置 5 个重复，共计 80 个小区，每个小区面积为 30 m²（5 m×6 m），栽植株数为 3 株，各小区之间用宽 0.4 m 的田埂隔离，避免不同处理间相互影响。16 个处理分别为不施加任何有机改良材料的对照（CK）；芒草秸秆处理标记为 G-MS，5 组芒草秸秆处理，施加量分别为 2、4、6、8、10 kg/株，分别标记为 G-MS₁、G-MS₂、G-MS₃、G-MS₄、G-MS₅；菌渣处理标记为 G-MB，5 组菌渣处理，施加量分别为 2、4、6、8、10 kg/株，分别标记为 G-MB₁、G-MB₂、G-MB₃、G-MB₄、G-MB₅；菌渣+芒草秸秆处理标记为 G-MIX，5 组菌渣+芒草秸秆处理，施加量分别为 2、4、6、8、10 kg/株，分别标记为 G-MIX₁、G-MIX₂、G-MIX₃、G-MIX₄、G-MIX₅。有机改良材料施加方式采用沟施，沿芒果树冠边缘开沟，深度 40 cm，将改良材料填埋于沟内（3 组有机改良材料均 1 次性施入），并参考当地生产习惯进行田间管理（浇水、施肥等）。于 2022、2023 年芒果成熟期进行芒果 Pb、Cd 含量及土壤理化性质的测定。

1.2.2 项目测定 （1）测定方法。参考 HJ 962—2018^[15]测定土壤 pH；参照 NT/Y 1121.6—2006^[16]，采用高温外热重铬酸钾氧化法对土壤有机质进行测定；芒果可食部分中 Pb、Cd 含量的测定分别参考 GB 5009.12—2017^[17]和 GB 5009.15—2014^[18]进行测定。

（2）样品制备。芒果成熟期（2022 年 7 月、2023 年 7 月），按照 5 点采样法分别采集各处理的芒果样品，将芒果洗净，切块后放入烘箱，置于 85 ℃下烘干至恒重，研磨备用。精密称取研磨后的待测样品 5.00 g 于坩埚中，350 ℃炭化至无烟后，550 ℃灰化 4~5 h；冷却后，加入数滴 HNO₃ 润湿，再次灰化 2 h。取出灰化好的试样冷却后加入 HNO₃ 定容至 250 mL，混匀备用。

（3）工作条件。使用 OPTIMA 7000 电感耦合等离子分析仪（ICP）对芒果样品中目标元素含量进行测定。

ICP 工作参数：发射功率 1150 W、载气流量 0.7 L/min、辅助气流量 1.0 L/min、冷却器流量 12.0 L/min。

1.2.3 评价方法 芒果中重金属 Pb、Cd 降低率（RP）计算公式为：

$$RP = \frac{C_s - C_{bs}}{C_s} \times 100\%$$

式中，C_s为施加改良材料前芒果中重金属的浓度（mg/kg）；C_{bs}为施加改良材料后芒果中重金属的可萃取浓度（mg/kg）。

生物积累系数(bioaccumulation factor, BAF) 为芒果可食用部位中 Pb、Cd 含量与根际土壤中该元素含量的比值，表征芒果从土壤中积累目标元素的能力。

$$BAF = \frac{C_i}{C_s}$$

式中，BAF 为芒果对 Pb、Cd 生物积累系数；C_i 为芒果可食用部位中目标元素含量；C_s 为种植土壤中 Pb、Cd 含量。

本研究基于美国国家环境保护局（USEPA）推荐的健康风险评价，对摄入芒果中污染物可能引起

的健康风险进行评价。

$$ADI = \frac{C_i \times I_R \times E_F \times F_I \times E_D}{B_W \times A_T}$$

式中, ADI 为目标元素经果蔬摄入的平均日摄取量 $[\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})]$; E_F 为暴露频率 (d/a) ; F_I 为摄入分数, 本研究默认该值为 1; E_D 为持续暴露时间; I_R 为平均每日水果摄入量 (kg/d) ; C_i 为芒果中被监测元素 i 含量 (mg/kg) ; RfD 为被监测目标元素 i 平均每日摄入参考剂量 $[\mu\text{g}/(\text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1})]$; B_W 为平均体重 (kg) 。其他具体参数见表 2。

表 2 评价模型参数

Tab. 2 Evaluation model parameters for heavy metals

指标 Index	参数 Parameter	参考值 Reference value	文献来源 Ref.
E_D	暴露时间/a	30 (成人), 6 (儿童)	[19]
A_T	平均暴露时间/d	$365 \times E_D$	[19]
B_W	平均体重/kg	70 (成人), 15.9 (儿童)	[20]
RfD	摄入参考剂量 $[(\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1})]$	$\text{Pb}=3.5, \text{Cd}=1.0$	[20]
F_I	生物可利用分数	1	[19]
I_R	摄入量 $(\text{kg} \cdot \text{d}^{-1})$	0.0557	[20]
E_F	暴露频率 $(\text{d} \cdot \text{a}^{-1})$	180	[21]

果蔬类摄入的风险表征 (HQ_i) 计算公式如下:

$$\text{HQ}_i = \frac{ADI}{RfD} \times 1000$$

式中, HQ_i 为单一重金属致癌风险指数; $\text{HQ}_i < 1$, 表明没有明显的健康风险; $\text{HQ}_i \geq 1$, 则存在潜在健康风险。

1.3 数据处理

利用 Excel 2022 软件对原始数据进行处理, 利用 Origin 2021 软件进行图表绘制, 使用 SPSS 20 新复极差检验法 (Duncan's multiple range test, DMRT) 检验不同处理组间的显著性。

2 结果与分析

2.1 有机改良材料对土壤 pH、有机质的影响

3 组有机改良材料在不同施加量下对土壤 pH 有不同影响 (图 1A)。有机改良材料 G-MS、G-MB、G-MIX 在不同添加量处理下均能明显提高土壤 pH, 且 G-MIX 组效果最显著; G-MS 组在不同施加量下提高土壤 pH 0.15~0.41 个单位, 以 G-MS₄ 处理效果最佳; G-MB 组随施加量的增加土壤 pH 呈先升高后降低的趋势, 在 G-MB₄ 处理下土壤 pH 提升效果最好, 提升 0.29 个单位; G-MIX 组随着

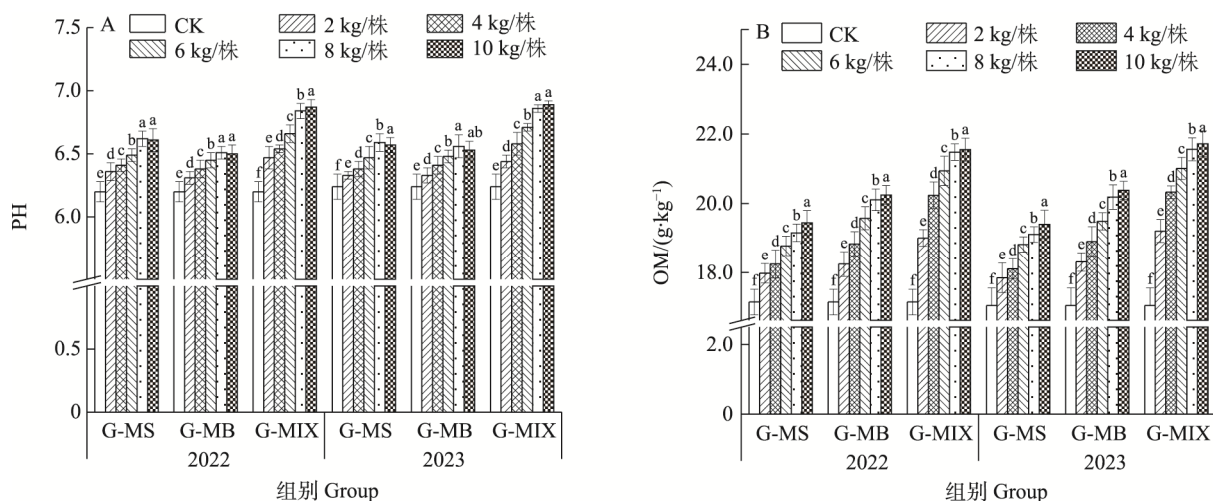
施用量的增加土壤 pH 明显升高, 其中 G-MIX₅ 处理下对土壤 pH 提升效果最好, 提高 0.51 个单位。总体上, 3 组有机改良材料中 G-MIX 组对土壤 pH 的提升效果最好, 所有处理中 G-MIX₅ 效果最优 ($P < 0.05$)。2023 年 3 组有机改良材料对土壤 pH 的提升效果与 2022 年效果无显著性差异。

不同有机改良材料对土壤有机质含量的影响如图 1B 所示。与 CK 相比, 有机改良材料 G-MS、G-MB、G-MIX 使土壤有机质含量提高 4.84%~25.66%, 其中, 有机改良材料 G-MIX 对土壤有机质含量的提升效果最好。随着施加量的增加, 土壤有机质含量逐渐增加, 以 G-MIX₅ 处理效果最好, 相比 CK 提升了 25.66%。可见, 3 组有机改良材料中 G-MIX 组对土壤有机质含量的提升效果最好, 所有处理中 G-MIX₅ 处理效果最优 ($P < 0.05$)。2023 年处理组对土壤有机质提升效果与 2022 年效果无显著性差异。

2.2 有机改良材料对土壤有效态 Pb、Cd 含量变化的影响

施用有机改良材料后土壤中有有效态 Pb 含量如图 2A 所示, 有机改良材料 G-MS、G-MB、G-MIX 处理均可降低土壤中有有效态 Pb 含量, 且随着改良材料施加量的增加, 降幅逐渐增大。其中, G-MS 组使土壤中有有效态 Pb 含量降低 10.58%~22.51%; G-MB 组使土壤中有有效态 Pb 含量降低 7.85%~20.01%; G-MIX 组使土壤中有有效态 Pb 含量降低 13.80%~27.87%; 经 G-MS、G-MB 组处理后土壤中有有效态 Pb 含量均高于同一施加量的 G-MIX 组; G-MIX₄ 处理后土壤中有有效态 Pb 含量均显著低于其他处理 ($P < 0.05$)。由此可见, 施用 3 组有机改良材料均可显著降低土壤中有有效态 Pb 含量, 施用 G-MIX 组对降低土壤有效态 Pb 含量的效果优于 G-MS 组和 G-MB 组, 其中, 以 G-MIX₄ 处理效果最佳。从 2022 年与 2023 年 2 组数据可知, 施加同组改良材料后, 随时间推移土壤中有有效态 Pb 含量 2 a 内无显著性差异, 说明本研究所采用改良材料短期内作用效果相对稳定。

施用改良材料后土壤中有有效态 Cd 含量如图 2B 所示。3 组有机改良材料在不同施加量下对土壤中有有效态 Cd 含量有明显降低且有机改良材料 G-MIX 效果最好。G-MS 组在不同施加量下降低土壤中有有效态 Cd 含量 1.47%~18.95%, 以 G-MS₅ 效果最佳; G-MB 组在不同施加量下降低土壤中有有效态 Cd 含量 4.84%~24.01%, 以 G-MS₄ 效果最

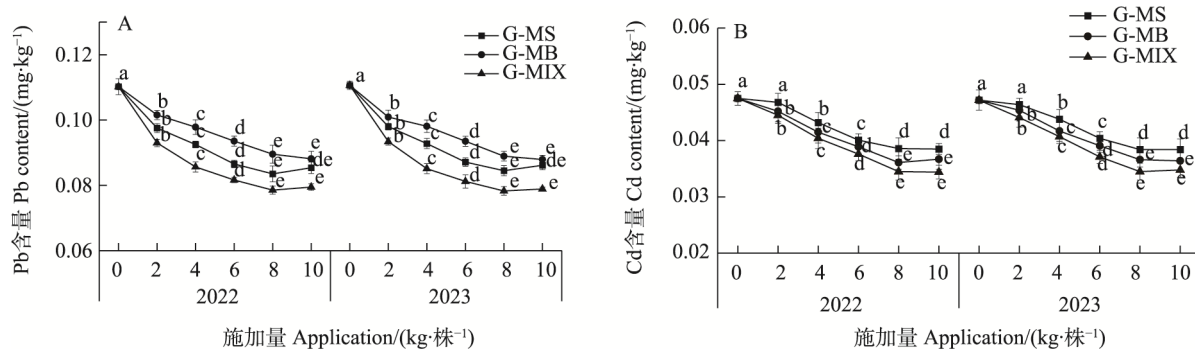


不同小写字母表示同一改良材料在不同施放量间差异显著 ($P<0.05$)。

Different lowercases indicate significant difference between applications of the same improved material ($P<0.05$).

图1 有机改良材料对土壤 pH、有机质的影响

Fig. 1 Effect of organic amendment materials on soil pH and organic matter



不同小写字母表示同一改良材料在不同施放量间差异显著 ($P<0.05$)。

Different lowercases indicate significant difference between applications of the same improved material ($P<0.05$).

图2 有机改良材料对土壤中有效态 Pb、Cd 含量的影响

Fig. 2 Effect of organic amendment materials on effective state Pb and Cd content in soil

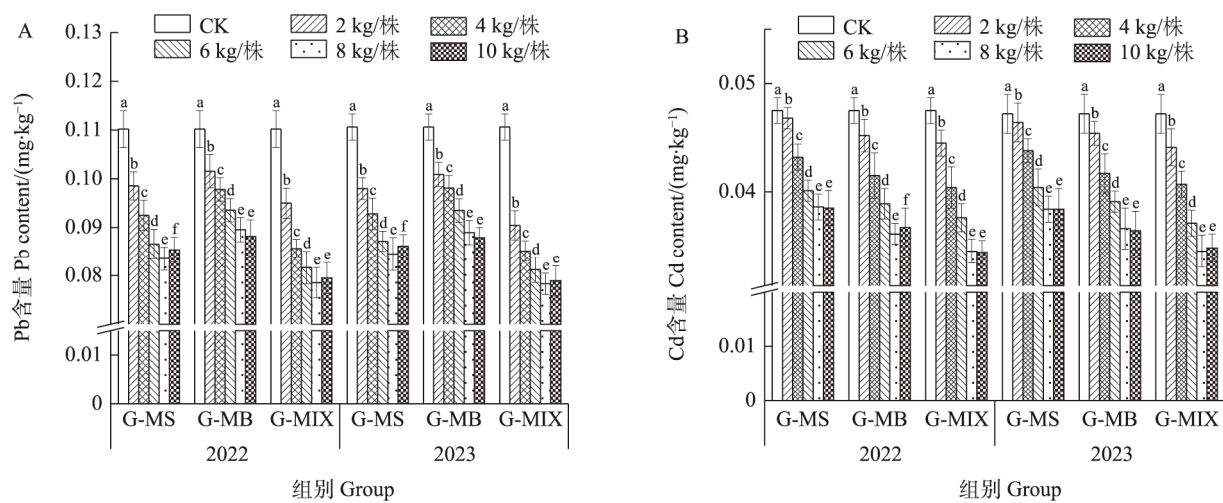
佳; G-MIX 组在不同施放量下降低土壤中有有效态 Cd 含量 6.32%~27.58%, 以 G-MIX₄ 效果最佳。由此可见, 3 组有机改良材料均能在一定程度上降低土壤中有有效态 Cd 含量, 3 组中 G-MIX 组的效果最好, 所有处理中 G-MIX₄ 效果最佳。从 2022 年与 2023 年数据可知, 施加同组改良材料后, 随时间推移土壤中有有效态 Cd 含量 2 a 内无显著性差异。

2.3 有机改良材料对芒果中 Pb、Cd 含量的影响

施用 3 组有机改良材料对芒果中 Pb 含量的影响如图 3A 所示, 与 CK 相比, 3 组有机改良材料能不同程度地降低芒果中 Pb 含量。G-MS 组的芒果中 Pb 含量降低至 83.53~98.55 $\mu\text{g}/\text{kg}$, G-MS₄ 处理效果最好; G-MB 组中芒果 Pb 含量的降低效果低于 G-MS 组, 施加后芒果中 Pb 含量降低至 88.16~

101.56 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 以 G-MB₅ 组效果最好, 需注意的是 G-MB₁ 处理后芒果中 Pb 含量为 101.56 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 未能将 Pb 含量降低至《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2017) [22] 规定的污染物限量标准以内 (100.00 $\mu\text{g}/\text{kg}$); 相较于 G-MS、G-MB 两组, G-MIX 组的芒果 Pb 降低效果更好, Pb 含量从 110.21 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 降低至 79.51~95.01 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 以 G-MIX₄ 组的处理效果最好 ($P<0.05$)。可见, 除 G-MB₁ 处理无法将芒果中 Pb 含量降低到食品污染物限量标准外, 其他处理均能有效降低芒果中 Pb 含量, 其中 G-MIX₄ 处理效果最优。从 2022 年与 2023 年 2 组数据可知, 施加同组改良材料后, 芒果中 Pb 含量 2 a 内无显著性差异。

由图 3B 可知, 3 组有机改良材料对降低芒果中 Cd 含量有一定的效果, 降低作用由大到小依



不同小写字母表示同一改良材料在不同施放量间差异显著 ($P<0.05$)。
Different lowercases indicate significant difference between applications of the same improved material ($P<0.05$).

图 3 有机改良材料对芒果中 Pb、Cd 含量的影响

Fig. 3 Effect of organic amendment materials on content of Pb and Cd in mango

次为: G-MIX (34.42~44.51 $\mu\text{g/kg}$)、G-MB (36.74~45.26 $\mu\text{g/kg}$)、G-MS (38.53~46.81 $\mu\text{g/kg}$)。芒果中 Cd 含量受有机改良材料施加量的影响,在 G-MS 组中,施放量越大,芒果中 Cd 含量越低,以 G-MS₄ 效果最明显, Cd 含量降低至 38.53 $\mu\text{g/kg}$; G-MB₄ 能使芒果中 Cd 含量降至 36.15 $\mu\text{g/kg}$, 同组内效果最好, G-MB 组对芒果中 Cd 含量降低效果优于 G-MS 组;G-MIX 组对芒果中 Cd 含量的降低效果明显优于 G-MB、G-MS 组,以 G-MIX₅ 处理效果最佳。可见, 3 组有机改良材料均能有效的降低芒果中 Cd 含量, 所有处理中 G-MIX₅ 效果最好。经 2 a 数据对比, 改良材料对芒果中 Cd 含量的降低效果未发生明显变化。

2.4 有机改良材料对芒果 Pb、Cd 生物积累系数的影响

由表 3 可知, 施用 3 组有机改良材料后芒果

的 Pb 生物积累系数由高到低为 G-MB>G-MS>G-MIX, G-MIX 组的芒果 Pb 生物积累系数最低, 相较于 CK 降低 13.80%~27.87%, 其中 G-MIX₄ 处理下芒果 Pb 生物积累系数最低, G-MIX₄ 与 G-MIX₅ 处理无显著差异。施用 3 组有机改良材料后芒果 Cd 生物积累系数由高到低为 G-MS>G-MB>G-MIX, 其中 G-MIX 组中芒果的 Cd 富集最弱, 较 CK 降低 6.32%~27.58%。由此可见, 有机改良材料均对芒果 Pb、Cd 生物积累系数产生影响, G-MIX 组的芒果 Pb、Cd 的生物积累系数最小。

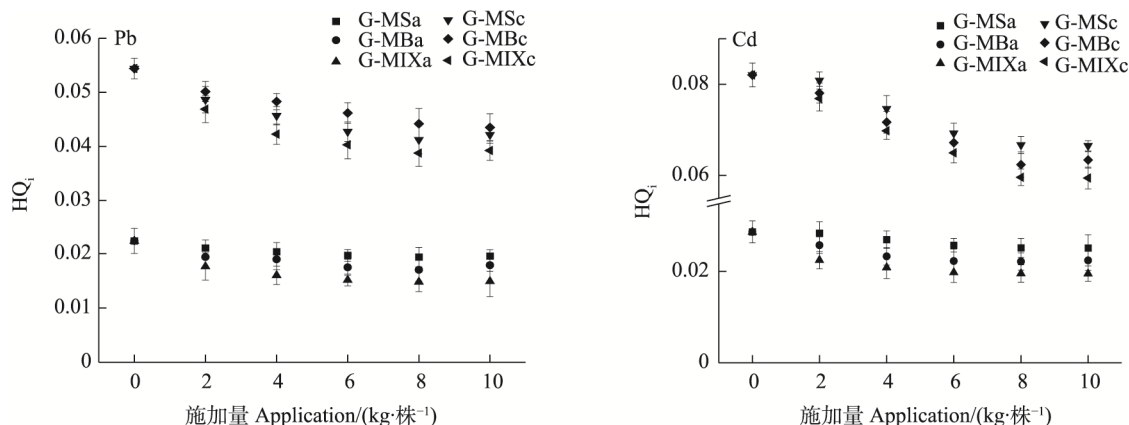
2.5 芒果摄入健康风险评价

依据健康风险评价法, 分别对成人、儿童食用不同处理后的芒果产生的 HQ_i 值进行计算 (图 4)。其中 G-MS_a、G-MB_a、G-MIX_a 分别表示成人摄入 G-MS、G-MB、G-MIX 组处理的芒果, G-MS_c、G-MB_c、G-MIX_c 分别表示儿童摄入 G-MS、G-MB、

表 3 有机改良材料对芒果 Pb、Cd 生物积累系数 (BAF) 的影响
Tab. 3 BAF values of mangoes after conditioning with different organic amendments

重金属 Heavy metal	组别 group	BAF($\times 10^{-2}$)					
		CK	2 kg·株 ⁻¹	4 kg·株 ⁻¹	6 kg·株 ⁻¹	8 kg·株 ⁻¹	10 kg·株 ⁻¹
Pb	G-MS	0.58±0.03 ^a	0.52±0.01 ^b	0.49±0.02 ^c	0.45±0.01 ^d	0.43±0.01 ^e	0.44±0.03 ^{de}
	G-MB		0.53±0.01 ^b	0.51±0.02 ^c	0.49±0.06 ^d	0.47±0.05 ^e	0.46±0.03 ^e
	G-MIX		0.49±0.05 ^b	0.45±0.02 ^c	0.43±0.06 ^d	0.41±0.03 ^e	0.41±0.05 ^e
Cd	G-MS	0.54±0.04 ^a	0.53±0.02 ^b	0.49±0.01 ^c	0.46±0.01 ^d	0.44±0.03 ^e	0.44±0.01 ^e
	G-MB		0.51±0.03 ^b	0.47±0.02 ^c	0.44±0.05 ^d	0.41±0.02 ^e	0.41±0.01 ^e
	G-MIX		0.50±0.02 ^b	0.46±0.03 ^c	0.43±0.01 ^d	0.39±0.06 ^e	0.39±0.05 ^e

注: 不同小写字母表示同一改良材料在不同施放量间差异显著 ($P<0.05$)。
Note: Different lowercases indicate significant difference between applications of the same improved material ($P<0.05$).



不同小写字母表示同一改良材料在不同施加量间差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercases indicate significant difference between applications of the same improved material ($P < 0.05$).

图4 不同处理芒果 Pb、Cd 健康风险指数

Fig. 4 Health risk index of Pb and Cd in mango with different treatments

G-MIX 组处理的芒果。

不同处理组的芒果对成人和儿童产生的 HQ_i 值均小于 1, 表明成人和儿童食用该芒果不存在健康风险, 不同处理组芒果中 Pb 产生的健康风险由高到低为 G-MB>G-MS>G-MIX, 其中儿童食用芒果产生的健康风险高于成人。成人、儿童食用矿区芒果所摄入 Cd 对人体健康产生的 HQ_i 值均小于 1, 不会对人体产生健康风险。不同处理组芒果中 Cd 产生的健康风险由高到低为 G-MS>G-MB>G-MIX。摄入相同芒果产生的健康风险表现为儿童>成人。

3 讨论

3.1 不同有机改良材料对土壤 pH、有机质的影响

有机改良材料对重金属污染地的调控效果主要是受土壤 pH、有机质含量、有机改良材料种类和施加量等因素影响。本研究结果表明, 施用 3 组有机改良材料能显著提高土壤有机质含量, 随着施用量的增加, 土壤有机质有不同程度的提升, 这与臧小平等^[23]的研究结果一致。其原因可能是菌渣本身含有大量有机质; 秸秆类中含有丰富的有机碳; 菌渣、秸秆联合施用后 2 种改良材料相互作用, 官能团与土壤中微生物产生反应, 致使土壤有机质显著提升。有机质的增加能改善土壤理化性质, 调节土壤酸碱平衡, 本研究所有改良材料均能提高土壤 pH。施加芒草秸秆后土壤 pH 相比 CK 有所提高, 施加菌渣也能提高土壤 pH, 且提升效果优于芒草秸秆组, 但效果不如菌渣+芒草秸秆组。其原因可能与不同种类改良材料

对土壤 pH 的提升效果存在差异, 其理化性质也有所差异有关。秸秆类材料对土壤 pH 的影响与该材料的腐解程度有关^[24]; 秸秆与菌渣联合施用, 菌渣中菌丝体所分泌的酶能促进秸秆的腐解, 从而更好提升土壤 pH。另外, 土壤 pH 变化也受到施加量的影响, 试验区间范围内不同施加量对土壤 pH 的影响由小到大依次为: 2、4、6、8、10 kg/株, 呈递进关系。这与王娇等^[25]施加有机材料对土壤 pH 的影响与添加量有关的结论一致。但也有研究表明, 施用有机改良材料后土壤 pH 降低^[26], 与本研究观点不一致。这可能与试验地理化性质及改良材料不同有关, 本研究采用的改良材料均为碱性, 且土壤偏酸性, 有机改良材料对土壤 pH 提升有一定的作用。

3.2 不同有机改良材料对土壤中有有效态 Pb、Cd 含量变化的影响

重金属以不同形态存在于土壤中, 其中有效态重金属被芒果吸收。因此, 降低芒果 Pb、Cd 含量的关键在于降低芒果种植区土壤中有有效态重金属含量, 以此达到改善该区域芒果品质的目的。本研究中, 3 组改良材料对土壤中有有效态 Pb、Cd 降低效果明显, 其中菌渣+芒草秸秆组降低效果最好。究其原因: 菌渣中菌丝体可以促进芒草秸秆的腐解, 芒草秸秆腐解后产生腐殖酸, 腐殖酸分子中含有羧基、醇羟基等官能团, 这些官能团可以与腐殖质中的化学基团相互作用, 加速有机物降解, 并增加腐殖化程度, 降低重金属在土壤中的生物有效性和可交换性^[27-28]。本研究中, 土壤有效态 Pb、Cd 的降低率会随改良材料施用量的增加而提升, 试验区间范围内菌渣+芒草秸秆组施

加量为 8 kg/株时,对土壤有效态 Pb、Cd 的降低作用最好。可能是因为秸秆和菌渣在腐解的过程中,大量的菌渣所含的酶类和微生物更丰富,可加速降解从而转化更多腐殖质,增加土壤对目标重金属的吸附,降低其迁移性。这与路克国等^[29]在研究有机肥对土壤中 Cd 的生物有效性的研究结果相似,也有研究表明大量或长期施用该类型有机改良材料可能增加土壤中重金属有效态含量^[30],与本文观点相悖。这可能是因为有机肥中成分复杂,肥料中极可能含有大量重金属,过量施用导致材料中自身含有的重金属向土壤中迁移。本研究采用的芒草秸秆、菌渣改良材料中未检测出 Pb、Cd 含量。从 2022、2023 年 2 组试验数据表明,施加同组改良材料后,随时间推移芒果中 Pb、Cd 含量 2 a 年内无显著性差异,说明本研究所采用改良材料作用效果相对稳定,但施用有机改良材料只能降低土壤中有效态 Pb、Cd 含量,限制重金属向芒果内迁移,并不会减少土壤中重金属的总量。土壤受到环境等外在因素影响,也可能使重金属生物有效性增加,导致芒果中 Pb、Cd 含量增加。因此有机改良材料施用后的长期稳定性是改善矿区芒果品质的重要因素。

3.3 不同有机改良材料对芒果中 Pb、Cd 含量的影响

本研究表明,3 组有机改良材料能有效降低芒果中 Pb、Cd 含量,且存在差异。在苏祖祥^[31]的研究中,施用菌渣能改变土壤理化性质(pH、有机质),降低土壤有效态 Pb、Cd 含量,进而降低水稻中 Pb、Cd 含量,与本研究结果相似。究其原因:一方面是菌渣含有丰富的官能团、蛋白质和其他营养成分,与 Cd^{2+} 产生络合反应,使其形成不易被作物吸收的络合物,降低 Cd 的迁移性^[32];另一方面是菌渣还能改善土壤理化性质,土壤 pH 升高,土壤中负电荷增加,Pb、Cd 形成碳酸盐后沉淀,从而降低重金属的有效性,同时有机质的升高也能抑制土壤中 Cd 向芒果中迁移^[33-34]。本研究中,施用秸秆类改良材料对芒果中 Pb 含量的降低作用略优于菌渣,可能是因为芒草秸秆通过分解产生有机酸,与重金属离子反应,形成稳定的螯合物,以此达到调控的目的^[35-37]。但也有研究表明,长期施加秸秆类材料,不仅不能降低作物中 Cd 的含量,反而加剧 Cd 污染^[38],与本研究结论相悖。吴佳琪等^[39]进行长期秸秆还田试验后指出,常量秸秆还田能降低土壤有效 Cd 含量,但

大量秸秆还田导致土壤中 Cd 含量增加。本研究中秸秆材料施用量最高为 10 kg/株均为一次性施入,属于常量秸秆还田,并不会导致土壤中 Cd 含量增加。单一有机改良材料对重金属抑制作用一般只针对单一重金属,如施用芒草秸秆对芒果中 Pb 的降低效果优于菌渣,但对芒果中 Cd 的降低效果不如菌渣。将芒草秸秆与菌渣混合施用时,芒果中 Pb、Cd 含量显著低于 CK,与李业等^[40]等不同处理可降低杭白菊中 Pb、Cd 含量的研究结果相似。其原因可能是本研究施加的改良材料能直接为芒果提供一定营养成分,从而促进芒果的生长;另外,不同改良材料均具备降低土壤 Pb、Cd 有效性的作用,能够使芒果在生长过程中更少富集 Pb、Cd,降低其对芒果的胁迫。

4 结论

(1) 施加 3 组有机改良材料可使土壤 pH、有机质增加,有效抑制芒果对土壤中 Pb、Cd 的富集,从而缓解重金属对芒果的毒害作用。

(2) 不同改良材料在降低不同重金属的效果上有较大差异,3 组改良材料对芒果中 Pb 的降低效果表现为 $\text{G-MIX} > \text{G-MS} > \text{G-MB}$;对芒果中 Cd 的降低效果表现为 $\text{G-MIX} > \text{G-MB} > \text{G-MS}$,综合比较 3 组改良材料发现,G-MIX 组对芒果 Pb、Cd 含量的降低效果最好;随着改良材料施用量的增加,矿区芒果 Pb、Cd 含量呈明显降低趋势,各处理中除 G-MB_1 处理芒果中 Pb 含量为 $101.56 \mu\text{g/kg}$,仍略高于食品中污染物限量标准($\text{Pb} < 100.00 \mu\text{g/kg}$),其他处理均低于该标准。其中,G-MIX₄ 处理对芒果中 Pb、Cd 降低效果最好,Pb、Cd 分别降低 27.87%、27.58%。

(3) 健康风险评价表明,食用矿区种植的芒果后,不会对成人、儿童身体健康产生影响。

综上,攀西采煤区芒果种植区内芒果可能受到 Pb、Cd 污染,结合该种植区实际情况及 3 组改良材料对芒果中 Pb、Cd 含量降低效果分析,在试验区间范围内,施用 8 kg/株菌渣+芒草秸秆材料能有效降低芒果中 Pb、Cd 含量,从而改善该地芒果质量安全,为矿区芒果产业的健康发展提供参考。

参考文献

- [1] JARUP L, AKESSON A. Current status of cadmium as an environmental health problem[J]. Toxicology and Applied Pharmacology, 2009, 238(3): 201-208.

- [2] XU P, ZENG G M, HUANG D L, LIU L, ZHAO M H, LAI C, LI N J, WEI Z, HUANG C, ZHANG C. Metal bioaccumulation, oxidative stress and antioxidant defenses in *Phanerochaete chrysosporium* response to Cd exposure[J]. Ecological Engineering, 2016, 87: 150-156.
- [3] DE A R P, DE A A F, PEREIRA L S, MANGABEIRA P A O, SOUZA J O, PIROVANI C P, AHNERT D, BALIGAR V C. Photosynthetic, antioxidative, molecular and ultrastructural responses of young cacao plants to Cd toxicity in the soil[J]. Ecotoxicology & Environmental Safety, 2017, 144: 148-157.
- [4] 杜邦, 刘斌, 黄云, 李洪雯, 李贵利. 攀西芒果选育种研究综述[J]. 中国热带农业, 2013, 5(54): 43-45.
DU B, LIU B, HUANG Y, LI H W, LI G L. A review of selective breeding research on mango in Panxi[J]. China Tropical Agriculture, 2013, 5(54): 43-45. (in Chinese)
- [5] 范英宏, 陆兆华, 程建龙, 周忠轩, 吴钢. 中国煤矿区主要生态环境问题及生态重建技术[J]. 生态学报, 2003(10): 2144-2152.
FAN Y H, LU Z H, CHEN J L, ZHOU Z X, WU G. Major ecological and environmental problems and the ecological reconstruction technologies of the coal mining areas in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2003(10): 2144-2152. (in Chinese)
- [6] 潘声旺, 宋一鸣, 孙晋涛, 周钰潇, 毛勇坡, 李娟, 董仕萍. 攀西采矿区芒果中几种典型元素积累特征与健康风险评估[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2023, 45(4): 937-948.
PAN S W, SONG Y M, SUN J T, ZHOU Y X, MAO Y P, LI J, DONG S P. Accumulation characteristics and health risk assessment of several typical elements in mangoes in mining area of Panxi area[J]. Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition), 2023, 45(4): 937-948. (in Chinese)
- [7] 高文文, 白中科, 余勤飞. 煤矿工业场地土壤重金属污染评价[J]. 中国矿业, 2015, 24(8): 59-64.
GAO W W, BAI Z K, YU Q F. Evaluation of soil heavy metal pollution in coal mine industrial site[J]. China Mining Magazine, 2015, 24(8): 59-64. (in Chinese)
- [8] 袁兴超, 李博, 朱仁凤, 药栋, 湛方栋, 陈建军, 祖艳群, 何永美, 李元. 不同钝化剂对铅锌矿区周边农田镉铅污染钝化修复研究[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(4): 807-817.
YUAN X C, LI B, ZHU R F, YAO D, ZHAN F D, CHEN J J, ZU Y Q, HE Y M, LI Y. Immobilization of Cd and Pb using different amendments of cultivated soils around lead-zinc mines[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, 38(4): 807-817. (in Chinese)
- [9] RUPERT L H, NEIL B, SCOTT D Y, NEIL M J C, ANDREW M T, ANN M M, IAIN M. Assessing potential risk of heavy metal exposure from consumption of home-produced vegetables by urban populations[J]. Environmental Health Perspectives, 2004, 112(2): 215-221.
- [10] MOHAMMAD A H B, LUTFAR P, ISLAM M A, SAMUEL B D, SHIGEYUKI S. Heavy metal pollution of coal mine-affected agricultural soils in the northern part of Bangladesh[J]. Hazard Mater, 2010, 173(1/3): 384-392.
- [11] 黄雁飞, 陈桂芬, 熊柳梅, 刘斌, 黄玉溢, 刘永贤, 唐其展. 不同作物秸秆生物炭对水稻镉吸收的影响[J]. 西南农业学报, 2020, 33(10): 2364-2369.
HUANG Y F, CHEN G F, XIONG L M, LIU B, HUANG Y Y, LIU Y X, TANG Q Z. Effects of different crop straw biochars on cadmium absorption in rice[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2020, 33(10): 2364-2369. (in Chinese)
- [12] 蒋攀, 王钰茜, 赵钰婷, 赵志杰, 王金玲, 李辉, 闫秋洁, 黄泰涵, 刘雷, 杜世章. 钝化剂对土壤重金属镉含量及其在川麦冬中累积的影响[J]. 中草药, 2021, 52(24): 7638-7644.
JIANG P, WANG Y X, ZHAO Y T, ZHAO Z J, WANG J L, LI H, YAN Q J, HUANG T H, LIU L, DU S Z. Effects of passivators on content of heavy metal cadmium in soil and its accumulation in *Ophiopogon japonicus*[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2021, 52(24): 7638-7644. (in Chinese)
- [13] 刘勇, 刘燕, 朱光旭, 伍廷亮, 梁清, 王星星. 石灰对 Cu、Cd、Pb、Zn 复合污染土壤中重金属化学形态的影响[J]. 环境工程, 2019, 37(2): 158-164.
LIU Y, LIU Y, ZHU G X, WU T L, LIANG Q, WANG X X. Effects of lime on chemical forms of heavy metals under combined pollution of Cu, Cd, Pb and Zn in soils[J]. Environmental Engineering, 2019, 37(2): 158-164. (in Chinese)
- [14] WAN Y N, HUANG Q Q, WANG Q, YU Y, SU D C, QIAO Y H, LI H F. Accumulation and bioavailability of heavy metals in an acid soil and their uptake by paddy rice under continuous application of chicken and swine manure[J]. Journal of Hazardous Materials, 2019, 384: 121293-121293.
- [15] 生态环境部. 土壤 pH 值的测定电位法: HJ 962—2018[S]. 北京: 中国环境出版社, 2018.
Ministry of Ecological Environment. Soil-determination of pH-potentiometry: HJ 962—2018[S]. Beijing: China Environmental Press, 2018. (in Chinese)
- [16] 行业标准-农业. 土壤检测. 第6部分: 土壤有机质的测定: NY/T 1121.6—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
Industry Standard-Agriculture. Soil testing. Part 6: method for determination of soil organic matter: NY/T 1121.6—2006[S]. Beijing: China Standards Press, 2006. (in Chinese)
- [17] 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. 食品安全国家标准食品中铅的测定: GB 5009.12—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China, State Food and Drug Administration. National food safety standard determination of lead in foods: GB 5009.12—2017[S]. Beijing: China Standards Press, 2017. (in Chinese)
- [18] 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. 食品安全国家标准食品中镉的测定: GB 5009.15—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China, State Food and Drug Administration. National standard for food safety determination of cadmium in food: GB 5009.15—2014[S]. Beijing: China Standards Press, 2014. (in Chinese)
- [19] 杨彦, 张梦迪, 陈浩佳, 麦碧娴, 徐建. 中国人群暴露参数研究进展[J]. 环境科学研究, 2022, 35(9): 2205-2215.
- YANG Y, ZHANG M D, CHEN H J, MAI B X, XU J. Research progress in environmental exposure factors of Chinese population[J]. Research of Environmental Sciences, 2022, 35(9): 2205-2215. (in Chinese)
- [20] 严靖, 周骏, 丁媛媛, 涂传涛. 中国膳食平衡指数及其应用的研究进展[J]. 现代预防医学, 2023, 50(20): 3702-3705.
- YAN J, ZHOU J, DING Y Y, TU C T. Research progress on the Chinese diet balance index and its application[J]. Modern Preventive Medicine, 2023, 50(20): 3702-3705. (in Chinese)
- [21] 韩晋仙, 李二玲. 山西寿阳县玉米籽粒重金属含量及健康风险评价[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(5): 160-165.
- HAN J X, LI E L. Heavy metals contents and health risk assessment of corn kernels growing in Shouyang county, Shanxi province[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2022, 36(5): 160-165. (in Chinese)
- [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. 食品安全国家标准食品中污染物限量: GB 2762—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China, State Food and Drug Administration. National standard for food safety limits of contaminants in food GB 2762—2017[S]. Beijing: China Standards Press, 2017. (in Chinese)
- [23] 臧小平, 周兆禧, 林兴娥, 戴敏洁, 葛宇, 刘永霞, 马蔚红. 不同用量有机肥对芒果果实品质及土壤肥力的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2016(1): 98-101.
- ZANG X P, ZHOU Z X, LIN X E, DAI M J, GE Y, LIU Y X, MA W H. Effects of different amounts of organic fertilizers on fruit quality and soil fertility of mango fruit[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2016(1): 98-101. (in Chinese)
- [24] JOHNSON M F, NOVAK J M, VARVEL G E, STOTT D E, OSBORNE S L, KARLEN D L, LAMB J A, BAKER J, ADLER P R. Crop residue mass needed to maintain soil organic carbon levels: can it be determined[J]. BioEnergy Research, 2014, 7(2): 481-490.
- [25] 王娇, 王鸿斌, 赵兴敏, 赵兰坡. 添加秸秆对不同有机含量土壤酸度及缓冲性能的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(6): 361-368.
- WANG J, WANG H B, ZHAO X M, ZHAO L P. Effect of addition on acidity and buffering performance of soil with different organic contents[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(6): 361-368. (in Chinese)
- [26] 于秀丽, 赵明家. 增施生物有机肥对盐碱土壤养分的影响[J]. 吉林农业大学学报, 2013, 35(1): 54-57.
- YU X L, ZHAO M J. Effect of bio-organic fertilizer application on nutrients in saline-alkaline soil[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2013, 35(1): 54-57. (in Chinese)
- [27] PELICA J, BARBOSA S, REBOREDO F, LIDON F, PESSOA F, CALVAO T. The paradigm of high concentration of metals of natural or anthropogenic origin in soils-The case of Neves-Corvo mine area (Southern Portugal)[J]. Journal of Geochemical Exploration: Journal of the Association of Exploration Geochemists, 2018, 186: 12-23.
- [28] 高跃, 韩晓凯, 李艳辉, 关连珠, 颜丽. 腐殖酸对土壤铅赋存形态的影响[J]. 生态环境, 2008(3): 1053-1057.
- GAO Y, HAN X K, LI Y H, GUAN L Z, YAN L. Effects of humic acid on lead fractions in soil[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2008(3): 1053-1057. (in Chinese)
- [29] 路克国. 生物有机肥的土壤学效应及其对红富士苹果根系吸收镉、铜的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2003.
- LU K G. The effect of bio-fertilizer on soil and absorption to cadmium & copper of Fuji apple root[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2003. (in Chinese)
- [30] 罗遥, 陈效民, 刘巍, 景峰, 喻清鑫, 徐艳玲. 有机肥添加对镉污染稻田土壤养分及镉有效性的影响[J]. 土壤通报, 2019, 50(6): 1471-1477.
- LUO Y, CHEN X M, LIU W, JING F, YU Q X, XU Y L. Effects of organic fertilizer addition on soil nutrients and cadmium availability in cadmium-contaminated paddy soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2019, 50(6): 1471-1477.
- [31] 苏祖祥. 改良剂对水稻 Pb、Zn 积累和土壤的影响[D]. 南宁: 广西大学, 2014.
- SU Z X. Effects of amendment on Pb, Zn contaminated in rice plant and soil[D]. Nanning: Guangxi University, 2014. (in Chinese)
- [32] YUAN J, LI Y, WANG G Y, ZHANG D F, SHEN Y J, MA R N, LI D Y, LI S Y, LI G X. Biodrying performance and combustion characteristics related to bulking agent amend-

- ments during kitchen waste biodrying[J]. *Bioresource Technology*, 2019, 284: 56-64.
- [33] MENG L Q, LI W G, ZHANG X C, ZHAO Y, CHEN L, ZHANG S M. Influence of spent mushroom substrate and molasses amendment on nitrogen loss and humification in sewage sludge composting[J]. *Heliyon*. 2020; 6(9): e04988.
- [34] JIA Z L, DENG J, CHEN N J, SHI W J, TANG X, XU H. Bioremediation of cadmium-dichlorophen co-contaminated soil by spent *Lentinus edodes* substrate and its effects on microbial activity and biochemical properties of soil[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2016, 17(2): 315-325.
- [35] 鲁长娟, 张菊, 董杰, 郭娜, 邓焕广, 张梦月, 王爱静. 聊城市城区水岸带土壤 Hg, As 含量分布特征及污染评价[J]. *河南师范大学学报 (自然科学版)*, 2017, 45(2): 43-47.
- LU C J, ZHANG J, DONG J, GUO N, DENG H G, ZHANG M Y, WANG A J. Distribution character and pollution assessment of mercury and arsenic concentrations in riparian soils of liaocheng urban area[J]. *Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition)*, 2017, 45(2): 43-47. (in Chinese)
- [36] JURATE K, ANDERS L, CHRISTIAN M. Stabilization of As, Cr, Cu, Pb and Zn in soil using amendments--a review[J]. *Waste Management*, 2008, 28(1): 215-225.
- [37] 徐晔. 施用稻草秸秆与工程菌对 Cu、Cd 污染土壤生物化学性质的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2011.
- XU Y. Application of rice straw and engineered bacteria on the biochemical properties of Cu and Cd-polluted soil[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2011. (in Chinese)
- [38] YI K X, FAN W, CHEN J Y, JIANG S H, HUANG S J, PENG L, ZENG Q R, LUO S. Annual input and output fluxes of heavy metals to paddy fields in four types of contaminated areas in Hunan province, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 634: 67-76.
- [39] 吴佳琪, 黄运湘, 尹力初, 梁玉文, 黄玲, 向艳艳, 施强. 长期秸秆还田和地下水位对土壤镉积累及有效性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(9): 1957-1963.
- WU J Q, HUANG Y X, YIN L C, LIANG Y W, HUANG L, XIANG Y Y, SHI Q. Effect of long-term straw returning and groundwater level on cadmium accumulation and availability in soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(9): 1957-1963. (in Chinese)
- [40] 李业, 刘建英, 奚君阳, 韩佳佳, 王宏鹏, 周一峰, 于林凯, 赵倩, 郝培应, 叶子弘, 俞晓平, 孟俊, 李元源, 黄俊. 不同钝化剂处理下镉和铅在土壤-杭白菊体系中富集迁移特性及菊花品质的变化[J]. *现代食品科技*, 2023, 39(4): 325-332.
- LI Y, LIU J Y, XI J Y, HAN J J, WANG H P, ZHOU Y F, YU L K, ZHAO Q, HAO P Y, YE Z H, YU X P, MENG J, LI Y Y, HUANG J. Enrichment and migration of cadmium and lead in a soil-chrysanthemum system and changes in chrysanthemum quality under different passivating agents[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2023, 39(4): 325-332. (in Chinese)