



罗粤,郑玉婷,陈琳,张赛,王姝媚,李子奇,范祖玮,崔吉晓,陈源泉.不同有机物料长期还田对土壤重金属含量的影响[J].中国农业大学学报,2025,30(12):241-251.

LUO Yue, ZHENG Yuting, CHEN Lin, ZHANG Sai, WANG Shumei, LI Ziqi, FAN Zuwei, CUI Jixiao, CHEN Yuanquan. Effects of long-term return of different organic materials on soil heavy metal content[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(12): 241-251.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2025.12.20

不同有机物料长期还田对土壤重金属含量的影响

罗粤¹ 郑玉婷¹ 陈琳¹ 张赛¹ 王姝媚¹ 李子奇¹ 范祖玮¹
崔吉晓² 陈源泉^{1*}

(1. 中国农业大学 农学院, 北京 100193;

2. 中国农业科学院 农业环境与可持续发展研究所, 北京 100083)

摘要 为探究不同有机物料长期还田对土壤重金属含量影响及土壤重金属污染的风险,基于14年长期定位试验,采用单因素完全随机试验设计,设置秸秆(ST)、沼渣(BR)、菌渣(MR)、酒渣(WR)和猪粪(PM)配施无机肥还田,以单施无机肥为对照(CF),测定各处理土壤Cd、Hg、As、Pb、Cr、Cu、Zn 7种重金属含量的差异,采用内梅罗指数法和潜在生态风险指数法综合评估不同有机物料长期还田后土壤重金属污染程度和潜在生态风险水平。结果表明:ST的土壤Cd、As含量、MR的土壤Hg含量、PM的Hg、Cu、Zn和BR的Cd、Hg、As、Cr、Cu、Zn含量均显著高于CF,仅ST和BR的Pb含量、WR和PM处理的As含量显著低于CF。ST的土壤As最高,显著高于其他有机物料处理,BR的土壤Cd和Cr含量分别为0.177和68.0 mg/kg,显著高于ST、MR、PM和CF;PM的土壤Cu和Zn含量分别为59.00和154.33 mg/kg,高出其他有机物料处理67.0%~160.3%和73.4%~145.0%($P<0.05$),MR和WR的土壤重金属积累量均显著低于ST、BR和PM。内梅罗指数法评价各处理土壤重金属风险由高到低为PM(0.458)>BR(0.299)>ST(0.282)>CF(0.270)>MR(0.265)>WR(0.264);潜在生态风险指数法评价结果由高到低为BR(15.47)>PM(12.20)>ST(11.37)>WR(10.20)>MR(10.30)>CF(9.87)。有机物料长期还田较单施无机肥会增加多种土壤重金属含量。ST可导致土壤Cd、As含量增加,BR可使土壤Cd、Cu、Zn含量增加,PM增加土壤Cu、Zn含量的效果明显;施入等氮量情况下,ST、MR和WR这3种植物源的有机物料长期还田较BR和PM 2种动物源的有机物料对增加土壤重金属污染的风险更小。综上,菌渣(MR)和酒渣(WR)配施无机肥是防控土壤重金属污染较好的有机物料培肥方案。

关键词 有机物料; 长期还田; 土壤重金属; 风险评估

中图分类号 X171.3;S154.1

文章编号 1007-4333(2025)12-0241-11

文献标志码 A

Effects of long-term return of different organic materials on soil heavy metal content

LUO Yue¹, ZHENG Yuting¹, CHEN Lin¹, ZHANG Sai¹, WANG Shumei¹, LI Ziqi¹,
FAN Zuwei¹, CUI Jixiao², CHEN Yuanquan^{1*}

(1. College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. Institute of Agricultural Environment and Sustainable Development, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract To explore the effects of long-term field return of different organic materials on soil heavy metal content and the risk of heavy metal contamination, based on a 14-year long-term field experiment, one-way completely randomized design was adopted. Straw (ST), biogas residue (BR), mushroom residue (MR), wine residue

收稿日期: 2025-03-07

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFD2300901)

第一作者: 罗粤(ORCID:0009-0002-9151-7103), 硕士研究生, E-mail: sophiaumi@163.com

通讯作者: 陈源泉(ORCID:0000-0001-6947-1319), 教授, 主要从事农业生态和宏观农业研究, E-mail: chenyyq@cau.edu.cn

(WR) and pig manure (PM) combined with the equal amounts of nitrogen fertilizer treatments were set by taking single application of chemical fertilizer as a control (CF). The differences in the contents of Cd, Hg, As, Pb, Cr, Cu, Zn were determined. The Nemero index method and the Potential ecological risk index method were used to assess the level of potential ecological risk and the degree of contamination after long-term return of different organic materials to the field, so as to compare the heavy metal contents of the soils and the heavy metal contamination of soil after the long-term return of different organic materials to the field. The results showed that: Soil Cd and As content in ST treatment, soil Hg content in MR treatment, Hg, Cu and Zn in PM treatment and Cd, Hg, As, Cr, Cu and Zn in BR treatment were significantly higher than those in CF treatment, while only Pb content in ST and BR treatments and As content in WR and PM treatments were considerably lower than CF treatment. ST treatment had the highest soil As content, significantly exceeding other organic material treatments. The soil Cd and Cr contents of BR were 0.177 mg/kg and 68.0 mg/kg, which were significantly higher than those of the treatments of ST, MR, PM and CF. The soil Cu and Zn content of PM were 59.00 mg/kg and 154.33 mg/kg, which were 67.0% to 160.3% and 73.4% to 145.0% higher than those in other organic material treatments ($P < 0.05$). Soil heavy metal accumulation was significantly lower in the MR and WR treatments than in the ST, BR and PM treatments. The Nemero index method evaluating the soil heavy metal risk of each treatment in descending order was: PM (0.458) > BR (0.299) > ST (0.282) > CF (0.270) > MR (0.265) > WR (0.264). The evaluation results of potential ecological risk index method in descending order was: BR (15.47) > PM (12.20) > ST (11.37) > WR (10.20) > MR (10.30) > CF (9.87). In conclusion, long-term return of organic materials to the field increases the content of many soil heavy metals compared with the application of chemical fertilizer alone. ST can lead to an increase in soil Cd and As content. BR increases soil Cd, Cu and Zn content. PM increases soil Cu and Zn content significantly. Organic materials of plant origin (ST, MR and WR) have less risk of increasing soil heavy metal contamination in the long term than organic materials of animal origin (BR and PM) under the condition of equal nitrogen application. In conclusion, mushroom residue or wine residue combined with chemical fertilizer is an optimal organic material returning scheme to prevent and control soil heavy metal pollution.

Keywords organic material; long-term field return; soil heavy metal; risk assessment

有机肥替代部分化肥是实现化肥减量增效的重要途径,也是我国深化化肥零增长行动、加速推进农业绿色发展的一项关键举措^[1]。有机物还田在改善土壤结构^[2]、增加土壤有机质含量^[3]、提高土壤肥力以及促进土壤微生物活动等方面发挥着积极作用^[4]。但也有研究指出,有机物料还田可能会增加土壤重金属污染,即使重金属含量符合国家标准的有机肥,长期连续施用也可能导致重金属在土壤中不断积累,特别是Cu、Zn、Cd、Pb、As^[5-6],给土壤带来重金属污染的潜在风险^[7]。因此,研究不同有机物料长期还田后土壤重金属含量及可能存在的重金属污染风险对于农业可持续发展具有重要的意义。

目前关于有机物料还田对土壤重金属影响的研究已有很多,李孟飞等^[8]研究表明,长期秸秆还田可显著增加土壤Cd、Hg、Zn含量。猪粪还田对土壤中全量Cu、Zn、Cd含量及其有效态含量的增加效果

最显著^[9]。周武等^[10]整合了国内外发表的27篇文献的482条有效数据发现:菌渣还田可显著增加土壤全量Cd、As、Cr的含量,小幅增加土壤全量Cu、Pb、Zn的含量。若根据有机物料来源将其划分为动物源和植物源有机物料,则动物源有机物料通常较植物源有机物料含有更多的重金属,使得还田后土壤重金属污染风险较高^[11]。在土壤重金属污染的评价过程中常用单因子指数法^[12]、内梅罗指数法^[13]、地累积指数法^[14]、潜在生态风险指数法^[15]、污染负荷指数法等^[16]方法进行评价。不同评价方法均存在一定的优势和局限性,为避免单一方法所带来的误差,一般选用2种或2种以上的方法进行评价,从而更准确且全面地反映土壤重金属污染情况^[17]。目前对于沼渣、菌渣、酒渣等有机物料的研究以及多种典型有机物料的对比研究尚未见报道,且大多研究期限较短^[18-20],可能无法充分体现有机物料还田对土壤部分影响的滞后性和土壤重金属

的累积效应^[21]。本研究基于秸秆、沼渣、菌渣、酒渣和猪粪 5 种来自不同农业循环系统的典型有机物料还田 14 年的田间定位试验,通过测定土壤 Cd、Hg、As、Pb、Cr、Cu、Zn 7 种重金属含量,运用内梅罗指数法及潜在生态风险指数法对土壤重金属含量进行评价,旨在比较不同有机物料长期还田后对土壤重金属含量的影响及其可能引起的土壤重金属污染风险,以为不同农业有机物料的安全再利用提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于河北省沧州市吴桥县中国农业大学吴桥实验站(37°29′~37°47′ N,东经 116°19′~116°42′ E,海拔 14.0~22.6 m)进行,地下水位 6—9 m。年均降雨量 591 mm,年际间变化较大,年内季节性分布不均,主要分布在 6—8 月;年均气温 14.75℃,全年积温($\geq 0^{\circ}\text{C}$)为 5 002.1℃,年均日照时数 2 222.2 h,无霜期 120~200 d,属于温带季风气候。土壤为冲积型盐化潮土,土壤质地为粉砂壤土(美国制)^[2],其中砂粒含量 27.5 g/100 g,粉粒含量 58.0 g/100 g,粘粒含量 14.5 g/100 g。灌溉水电导率为 0.1 S/m,pH 8.25^[2]。

1.2 试验材料

定位试验 14 年来所用有机物料的来源较稳定。秸秆全部来源于试验地上一季的作物秸秆;沼渣和菌渣采购自河北省石家庄大伙旺农业发展有限公司;酒渣采购自河北省内黄县豆公乡仲原农资营销中心;猪粪来源于河北省吴桥县的养殖户并进行堆肥处理。玉米品种为‘郑单 958’,小麦品种为‘济麦 22’。

1.3 试验设计

试验始于 2010 年,采用 2 m×2 m 的水泥池微区试验设置。试验为单因素完全随机试验设计,设有机物料处理:秸秆+无机肥(ST)、沼渣+无机肥(BR)、菌渣+无机肥(MR)、酒渣+无机肥(WR)、猪粪+无机肥(PM),以单施无机肥为对照(CF),每个处理重复 3 次。种植模式为华北平原典型的麦玉一年两熟制,每年 6 月种植玉米,10 月种植小麦。在 5 种不同有机物料连续还田 14 年后,2024 年测定各处理土壤的重金属含量。

2010—2017 年,按照“总碳量相等”原则还入有机物料,即不同处理施入的全部有机物料的总含碳

量相等,化肥每生长季用量为 150 kg/hm²,2017 年起定位试验的有机物料分别在每季作物播种前按照“总氮量相等”原则还入;每生长季施入的总氮量为 180 kg/hm²,总无机磷为 P₂O₅ 26 kg/hm²,总无机钾为 K₂O 124 kg/hm²。其中无机肥为尿素(CO(NH₂)₂)、磷酸二铵((NH₄)₂HPO₄)和硫酸钾(K₂SO₄)。秸秆处理按照每年实际秸秆产出全量还田,剩余所需的 N 用无机肥补足;按照有机氮:无机氮质量比=3:1 来确定沼渣、菌渣、酒渣和猪粪剩余 4 种有机物料的还田量。无机氮肥(尿素)按照质量比=1:1 的基肥和追肥施入,其余的有机肥和无机肥均按照上述使用量在每季作物播种前一次性施入土壤。2023 年的施肥方案见表 1。有机物料翻耕还田,混拌均匀,还田深度约在土层 10—15 cm。

1.4 样品采集及指标测定

2024 年 6 月,于小麦收获后,采集 0—20 cm 的耕层土样。土样采集时先用铁铲挖出小剖面后,用塑料刀去除与金属采样器接触的部分土壤,最后用塑料刀取样。每个采样单元采用 S 型路线确定 5 个采样点,取 5 个采样点的土壤于塑料盆中混合均匀作为混合土样,用四分法^[22]调整土样重量为 1 kg,将取得的土壤样品自然风干、磨细、过筛后备用。

石墨炉原子吸收分光光度法(GB/T 17141—1997《土壤质量—铅、镉的测定—石墨炉原子吸收分光光度法》^[23])测定土壤全量 Cd、Pb、Cr 含量;火焰原子吸收分光光度法(HJ 491—2019《土壤和沉积物—铜、锌、铅、镍、铬的测定—火焰原子吸收分光光度法》^[24])测定土壤全量 Cu、Zn;原子荧光光谱法测定(GB/T 22105—2008《土壤质量—总汞、总砷、总铅的测定—原子荧光法—第 1 部分:土壤中总汞的测定》^[25]、GB/T 22105.2—2008《土壤质量—总汞、总砷、总铅的测定—原子荧光法—第 2 部分:土壤中总砷的测定》^[26])土壤全量 Hg、As。

1.5 计算公式

单因子污染指数和内梅罗综合指数计算公式如下:

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

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

式中: P_i 为单因子污染指数; C_i 为元素 i 的实测值,mg/kg; S_i 为元素 i 的标准值,mg/kg。标准值遵照 GB15618—2018《土壤环境质量—农用地土壤污染

表1 2023年不同处理具体施肥方案

Table 1 Fertilization schemes for different treatments in 2023

还田时期 Returning period	处理 Treatment	有机物料投入量/kg Organic material application rate	基肥/g Base fertilizer			追肥/g Top application
			尿素 Urea	磷酸二铵 Diammonium phosphate	硫酸钾 Potassium sulphate	尿素 Urea
玉米季 Maize season	ST	1.63	56.60	22.61	99.2	65.31
	BR	4.06	10.56	22.61	99.2	19.27
	MR	2.70	10.56	22.61	99.2	19.27
	WR	1.41	10.56	22.61	99.2	19.27
	PM	2.24	10.56	22.61	99.2	19.27
	CF		68.37	22.61	99.2	77.09
小麦季 Wheat season	ST	1.69	56.60	22.61	99.2	65.31
	BR	2.81	10.56	22.61	99.2	19.27
	MR	2.65	10.56	22.61	99.2	19.27
	WR	1.84	10.56	22.61	99.2	19.27
	PM	1.86	10.56	22.61	99.2	19.27
	CF		68.37	22.61	99.2	77.09

注:ST,秸秆配施无机肥;BR,沼渣配施无机肥;MR,菌渣配施无机肥;WR,酒渣配施无机肥;PM,猪粪配施无机肥;CF,单施无机肥。下同。

Note: ST, straw with chemical fertilizer; BR, biogas residue with chemical fertilizer; MR, mushroom residue with chemical fertilizer; WR, wine residue with chemical fertilizer; PM, pig manure with chemical fertilizer; CF, only chemical fertilizer. The same below.

风险管控标准》^[27]农用地土壤污染风险筛选值(表2),该值为是否对农产品质量安全、农作物生长和土壤生态环境产生威胁的临界值。单因子评价污染指数法分类标准: $P_i \leq 1.0$,清洁; $1.0 < P_i \leq 2.0$,轻度污染; $2.0 < P_i \leq 3.0$,中度污染; $P_i > 3.0$,重度污染。 P 为第 j 个样点的内梅罗综合指数, $P_{\max}$ 为土壤重金属中单因子污染指数的最大值; P_{ave} 为土壤重金属的单因子污染指数的平均值。 $P \leq 0.7$,污染等级为清洁; $0.7 < P \leq 1.0$ 时,污染等级为尚清洁(警戒限); $1.0 < P \leq 2.0$ 时,污染等级为轻度污染; $2.0 < P \leq 3.0$ 时,污染等级为中度污染; $P > 3.0$ 时,污染等级则为重度污染^[28]。

表2 各种重金属的河北省土壤背景值^[29]和土壤污染风险筛选值^[27]

Table 2 Soil background values for Hebei Province^[29] and soil contamination risk screening values^[27]

项目 Item	for various metals						mg/kg
	Cd	Hg	As	Pb	Cr	Cu	Zn
土壤背景值 Soil background values	0.09	0.036	13.6	21.5	68.3	21.8	78.4
土壤污染风险筛选值 Soil contamination risk screening values	0.60	3.400	25.0	170.0	250.0	100.0	300.0

注:河北省土壤背景值来自《中国土壤元素背景值》^[29];土壤污染风险筛选值来自GB15618—2018《土壤环境质量—农用地土壤污染风险管控标准》^[27]。

Note: The soil background values of Hebei Province were obtained from *The Background Values of Soil Elements in China*^[29]; the soil contamination risk screening values were obtained from GB15618-2018 Soil environmental quality: Soil pollution risk control standards for agricultural land^[27].

单项潜在生态风险指数和潜在生态风险指数公式如下：

$$P_i = C_i/S_i \tag{3}$$

$$E_r^i = T_r^i \cdot P_i \tag{4}$$

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \cdot C_i/S_i \tag{5}$$

式中： n 为所研究的重金属元素数量，本研究为7； E_r^i 为单项潜在生态风险指数； T_r^i 为毒性响应系数，采

用 Hakanson^[30]制定的标准化重金属毒性响应系数，Cd=30，Hg=40，As=10，Pb=5，Cr=2，Cu=5，Zn=1。RI为潜在生态风险指数。由于涉及到的重金属种类不同，采用原有的评价标准产生的评价结果参考性不强。故根据本研究所涉及的重金属种类，修正潜在生态风险指数评价标准，调整后的评价分级标准如表3。

表3 本研究 E_r^i 的和RI分级标准与 Hakanson^[30]分级标准的比较

Table 3 Comparison of E_r^i and RI grading criteria with Hakanson^[30] grading criteria in this study

生态风险级别 Ecological risk level	E_r^i 与污染程度 Individual potential ecological risk index and contamination level		RI与污染程度 Potential ecological risk index and contamination level	
	Hakanson	本研究 This study	Hakanson	本研究 This study
轻微 Slight	<40	<35	<150	<105
中等 Medium	≥40~80	≥35~70	≥150~300	≥105~210
较强 Strong	≥80~160	≥70~140	≥300~600	≥210~420
很强 Very strong	≥160~320	≥140~280	≥600	≥420
极强 Extreme strong	≥320	≥280		

1.6 数据分析

采用 Excel 2021 和 SPSS 27.0 进行数据处理和分析，不同处理间差异性采用单因素 ANOVA 分析，采用 LSD 多重比较法进行差异显著性分析 ($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同有机物料还田后土壤重金属含量状况

由表 4 可知，秸秆 (ST)、沼渣 (BR)、菌渣 (MR)、酒渣 (WR) 和猪粪 (PM) 5 种有机物料配施无机肥还田处理的多种重金属含量较无机肥处理 (CF) 均有不同程度的增加。ST 的土壤 Cd、As 含量、MR 的土壤 Hg 含量、PM 的 Hg、Cu、Zn 和 BR 的 Cd、Hg、As、Cr、Cu、Zn 含量均显著高于 CF。仅 ST 和 BR 的 Pb、MR 的 Cd、WR 和 PM 的 As 含量显著低于 CF。其中，有机物料处理的 Cd、Cu 和 Zn 的含量较 CF 分别增加了 8.7%~121.2%，1.4%~156.5% 和 7.3%~163.0% ($P<0.05$)；BR、MR 和 PM 处理的 Hg 含量较 CF 增加了 20.0%、16.0% 和 25.0% ($P<0.05$)；BR 的土壤 Cr 含量比 CF 高 19.3% ($P<0.05$)。5 种有机物料处理的土壤 Pb 含量均低于 CF 0.7%~17.0%，MR、WR、PM 的土壤

Pb 含量显著低于 ST 和 BR 处理；WR 的土壤 Cr 含量显著低于 CF；PM 的土壤 As 含量显著低于 CF。除 Pb 以外，随着秸秆、沼渣、菌渣、酒渣和猪粪配施无机肥带入土壤的重金属含量均高于单独施用无机肥，有机物料的长期投入使耕层土壤 Cd、Hg、As、Cr、Cu、Zn 存在一定程度的累积。

不同有机物料还田处理后，土壤中 Cd 含量为 0.087~0.177 mg/kg、Hg 0.020~0.032 mg/kg、As 7.52~8.80 mg/kg、Pb 12.03~13.97 mg/kg、Cr 51.7~68.0 mg/kg、Cu 22.67~59.00 mg/kg、Zn 63.00~154.33 mg/kg。ST 的土壤 As 含量显著高于其他有机物料处理，分别是 MR、BR、WR 和 PM 的 1.05、1.07、1.07 和 1.17 倍。BR 土壤中 Cd 和 Cr 含量均显著高于其他有机物料处理，其中，Cd 含量分别是 MR、WR、PM 和 ST 的 2.03、1.96、1.96、1.65 倍；此外，BR 的土壤 Cu 和 Zn 含量也分别比 ST、MR、WR 高出 1.43、1.55、1.51 倍和 1.41、1.39、1.36 倍。猪粪还田会大大增加土壤中 Cu 和 Zn 的含量，PM 的土壤 Cu 和 Zn 分别是 ST、BR、MR、WR 的 2.39、1.67、2.60、2.53 倍和 2.44、1.73、2.42、2.36 倍。除 MR 的土壤 Hg 含量显著高于 ST 处理、MR 和 WR 的 Pb 含量显著高于 ST、BR 处理外，MR 和 WR 处理的土壤 Cd、As、Cr、Cu、Zn

表4 不同处理的土壤重金属的含量

Table 4 Heavy metal content status of the soil under different treatments

处理 Treatment	Cd	Hg	As	Pb	Cr	Cu	Zn
ST	0.107±0.025 ^b	0.020±0.001 ^b	8.80±0.12 ^a	12.37±0.50 ^b	59.3±5.51 ^{bc}	24.67±3.06 ^c	63.00±5.00 ^c
BR	0.177±0.011 ^a	0.030±0.002 ^a	8.24±0.10 ^{bc}	12.03±0.38 ^b	68.0±1.73 ^a	35.33±3.53 ^b	89.00±1.00 ^b
MR	0.087±0.005 ^{bc}	0.029±0.002 ^a	8.32±0.17 ^{bc}	13.97±0.86 ^a	51.7±1.53 ^c	22.67±3.58 ^c	63.67±3.79 ^c
WR	0.090±0.010 ^{bc}	0.021±0.002 ^b	8.17±0.14 ^c	13.77±0.61 ^a	62.3±6.81 ^{ab}	23.33±3.15 ^c	65.33±4.16 ^c
PM	0.090±0.010 ^{bc}	0.032±0.003 ^a	7.52±0.12 ^d	13.63±0.25 ^a	56.3±2.31 ^{bc}	59.00±3.65 ^a	154.33±10.02 ^a
CF	0.080±0.001 ^c	0.025±0.005 ^b	8.26±0.12 ^b	14.07±0.15 ^a	57.0±4.58 ^{bc}	23.00±3.00 ^c	58.67±0.58 ^c

注:不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。
Note: Different lowercases indicate significant differences at 0.05 level. The same below.

含量整体较ST、BR、PM处理低。

2.2 内梅罗指数法的评价结果

由表5可知,基于不同处理的土壤重金属含量数据计算内梅罗指数,各处理之间土壤的单因子污染指数的差异与土壤重金属含量的差异基本一致。各处理土壤中As、Cu、Zn的单因子污染指数较高,分别达0.301~0.352、0.227~0.590、0.196~0.515。表明As、Cu和Zn是7种土壤重金属污染物

中污染程度较高的污染物,但本研究中所有处理的7种土壤重金属含量均未高于GB15618—2018《土壤环境质量—农用地土壤污染风险管控标准》^[26]中规定的土壤污染风险筛选值,且对应的单因子污染指数都<1,表明土壤处于清洁状态。土壤的内梅罗综合污染指数介于0.264~0.458,均<0.700,根据内梅罗综合指数法分级标准得出,不同有机物料连续14年后各处理的土壤仍处于清洁状态。

表5 不同物料处理的土壤单因子污染指数和内梅罗综合指数

Table 5 Single factor contaminant index and Nemero pollution index of soil under different material treatments

处理 Treatment	P_{Cd}	P_{Hg}	P_{As}	P_{Pb}	P_{Cr}	P_{Cu}	P_{Zn}	P_n
ST	0.178 ^b	0.006 ^b	0.352 ^a	0.073 ^b	0.237 ^{bc}	0.247 ^c	0.210 ^c	0.282 ^{bc}
BR	0.294 ^a	0.009 ^a	0.329 ^c	0.071 ^b	0.272 ^a	0.353 ^b	0.297 ^b	0.299 ^b
MR	0.144 ^{bc}	0.009 ^a	0.333 ^{bc}	0.082 ^a	0.207 ^c	0.227 ^c	0.212 ^c	0.265 ^c
WR	0.150 ^{bc}	0.006 ^b	0.327 ^c	0.081 ^a	0.249 ^{ab}	0.233 ^c	0.218 ^c	0.264 ^c
PM	0.150 ^{bc}	0.009 ^a	0.301 ^d	0.080 ^a	0.225 ^{bc}	0.590 ^a	0.515 ^a	0.458 ^a
CF	0.133 ^c	0.006 ^b	0.341 ^b	0.083 ^a	0.228 ^{bc}	0.230 ^c	0.196 ^c	0.270 ^c

注: P_i 为各重金属在不同施肥处理下的单因子污染指数, P_n 为不同处理下的内梅罗综合指数。
Note: P_i is the single factor contaminant index for each heavy metal under different fertilization treatments and P_n is the Nemero pollution index under different treatments.

不同处理的内梅罗综合污染指数由高到低为:PM(0.458)>BR(0.299)>ST(0.282)>CF(0.270)>MR(0.265)>WR(0.264),其中MR和WR较低,显著低于PM、BR和ST($P<0.05$),与CF无显著差异。PM的内梅罗综合指数最大,显著高于CF和其他有机物料处理($P<0.05$),BR的污染指数也显著大于ST、WR和MR。

2.3 潜在生态风险指数法的评价结果

由表6可知,有机物料还田14年后土壤的Cd、Hg、As、Pb、Cr、Cu、Zn的单项潜在生态风险指数分别为4.00~8.83、0.230~0.357、3.01~3.52、0.353~0.413、0.413~0.547、1.13~2.95、0.197~0.517,均处于轻微风险范围(<35)^[30]。结合各重金属的单项潜在生态风险指数(Er)和综合潜在生

态风险指数,不同处理的 7 种土壤重金属中,Cd 的
单项潜在生态风险指数达到 4.00~8.83,虽然仍
处于轻微风险范围内,但其在潜在生态危害指数
中占比最大,占到 36.9%~57.1%;Cd 的重金属污
染风险最高,As 和 Cu 次之,而 Hg、Pb、Cr、Zn 的生
态风险水平较低。

表 6 不同处理土壤重金属的单项潜在生态风险指数和潜在生态风险指数(RI)

Table 6 Individual potential ecological risk index and potential ecological risk index of soil heavy metals under different material treatments

处理 Treatment	单项潜在生态风险指数 Individual potential ecological risk index							RI
	E_{Cd}	E_{Hg}	E_{As}	E_{Pb}	E_{Cr}	E_{Cu}	E_{Zn}	
ST	5.33 ^b	0.233 ^b	3.52 ^a	0.363 ^b	0.473 ^{bc}	1.23 ^c	0.210 ^c	11.37 ^{bc}
BR	8.83 ^a	0.357 ^a	3.29 ^c	0.353 ^b	0.547 ^a	1.77 ^b	0.297 ^b	15.47 ^a
MR	4.33 ^{bc}	0.340 ^a	3.33 ^{bc}	0.413 ^a	0.413 ^c	1.13 ^c	0.213 ^c	10.20 ^{cd}
WR	4.50 ^{bc}	0.243 ^b	3.27 ^c	0.407 ^a	0.500 ^{ab}	1.17 ^c	0.217 ^c	10.30 ^{cd}
PM	4.50 ^{bc}	0.370 ^a	3.01 ^d	0.400 ^a	0.450 ^{bc}	2.95 ^a	0.517 ^a	12.20 ^b
CF	4.00 ^c	0.230 ^b	3.41 ^b	0.413 ^a	0.457 ^{bc}	1.15 ^c	0.197 ^c	9.87 ^d

注: E_r 为各重金属在不同施肥处理下的单项潜在生态风险指数,RI为不同处理下的潜在生态风险指数。

Note: E_r is the individual potential ecological risk index of each heavy metal under different fertilization treatments, RI is the potential ecological risk index under different treatments.

从潜在生态风险指数上看,由于Hg和Cd的毒性响应系数较高,而Cr、Zn、Cu、Pb、As的较低,使得不同处理下综合潜在生态危害指数由高到低为BR(15.47) > PM(12.20) > ST(11.37) > WR(10.20) > MR(10.30) > CF(9.87),但均 < 105(表3)^[30],说明土壤处于清洁状态。CF的土壤重金属污染水平最低,且显著低于ST、BR和PM($P < 0.05$)。BR的潜在生态风险指数最高,PM的潜在生态风险指数次之,虽显著低于BR($P < 0.05$),但仍处于相对较高的风险水平,而酒渣和菌渣的评价结果与内梅罗综合指数法相似,依然表现出较低的重金属污染风险水平。

3 讨 论

3.1 有机物料长期还田对土壤重金属含量的影响

土壤重金属污染是一个持久性的复杂问题^[31],施肥是耕地土壤重金属的主要来源之一^[32]。无论是有机肥还是无机肥,其生产和加工过程中都不可避免会混入重金属,当施肥携入土壤中的重金属含量大于作物吸收富集所携出的重金属含量,就会使土壤重金属含量呈现增长趋势,进一步影响粮食安全^[32]。我国针对化肥中的重金属含量制定了一系列国家或行业标准,如农业部制定针对水溶性水溶肥料中Hg、As、Cd、Pb、Cr的限量要求制定了NY 1110—2010《水溶肥料 汞、砷、镉、铅、铬的限量要

求》^[34]等农业行业标准,GB 38400—2019《肥料中有毒有害物质的限量要求》^[35]规定了肥料中有毒有害物质的限量要求、试验方法和检验规则等。各项标准中严格规定了化学肥料中各类重金属元素的限量值,正常使用条件下对土壤和作物的污染风险可控;而有机肥来源、成分复杂,国家对于有机肥的生产和监管难以全面实施,使得有机肥重金属含量常有超标的情况^[36]。

本研究中,无机肥处理(CF)土壤中,除Pb外的其他6种重金属均显著低于有机物料处理,这是由于本研究在等氮量施肥的原则下,CF处理施入土壤的无机氮肥总量较有机物料处理大,且相对于有机物料处理下的有机物料和少量的无机氮肥中携带的Pb含量高。总体上,CF的土壤重金属均没有超过土壤污染风险筛选值^[27],甚至除了Cu以外,也均未超过河北省的土壤背景值(表2)^[29]。从不同有机物料处理上看,各处理的Cu同河北省土壤背景值^[29]相比均有不同程度的增加,沼渣和猪粪处理的Zn也高出背景值13.5%和96.9%,秸秆和沼渣处理的土壤Cd含量是土壤背景值的1.2和2.0倍,但各有机物料连续还田14年后土壤中重金属含量仍远低于国家规定的土壤污染风险筛选值^[27],表明目前该含量对农产品质量安全、农作物生长或土壤生态环境的风险低,各处理的土壤仍属于清洁状态。

3.2 猪粪和沼渣等动物源有机物料长期还田对土壤重金属污染风险的影响

不同有机物料还田后对土壤重金属的影响与有机物料的成分以及不同有机物料对土壤理化性质的影响差异等有关^[37]。一般来说,大多数动物源有机肥中的重金属含量较高,且往往能够通过改变土壤环境条件(增加土壤有机质、提高土壤pH等多方面)改善土壤的理化性质来影响重金属的生物地球化学循环^[38],从而对土壤重金属的累积量产生影响。本研究中,2种重金属污染风险评估方法的结果显示,连续还田14年后不同有机物料处理的土壤均处于低风险状态;沼渣和猪粪对土壤造成的重金属污染风险最高,秸秆次之,菌渣和酒渣则较低,这与宋姿蓉等^[39]和陈露丹等^[40]的研究结果基本一致。其原因一方面在于猪粪和沼渣来源和生产过程中混入的重金属更多,相较于秸秆、菌渣和酒渣有着更高的重金属含量^[41];另一方面,沼渣和猪粪较其他物料还田可显著提高土壤中有机质的含量,而一般情况下有机质含量与重金属有效态均呈负相关^[42],即土壤有机质越高,土壤固相有机质对重金属的吸附能力越强,二者发生螯合反应后形成难溶性沉淀,降低了土壤中可迁移态重金属的含量。本研究中,土壤pH在8.71~8.85,更是有利于土壤中有机质对重金属的固定作用^[43],降低了猪粪和沼渣处理下土壤重金属的溶解性、迁移能力以及生物有效性,使得重金属在土壤中不断累积。此外,不同有机物料还田后对土壤不同种类重金属累积量的影响也不同。从本研究中,秸秆还田会导致土壤As的积累,沼渣可使土壤Cd、Cu、Zn的积累显著增加,猪粪可提升土壤Cu、Zn的积累,而酒渣和菌渣还田后对土壤各种重金属的积累相对不明显,这种差异主要与各种物料来源及其重金属的含量差异、物料还田后重金属在土壤-作物体系中的环境行为等有关^[44-46]。总之,要充分探明不同有机物料还田导致的土壤重金属含量差异及重金属在土壤-作物体系中的环境行为,还需要进一步研究重金属的赋存形态,并扩大研究的系统边界,对种植过程各环节的重金属实际携入量与携出量进行全面考量。

4 结 论

秸秆、沼渣、菌渣、酒渣、猪粪5种典型有机物料配施无机肥连续还田14年后较单施无机肥均有可

增加土壤中重金属的累积量,秸秆处理主要增加了土壤Cd、As的积累,沼渣主要增加了土壤Cd、Hg、Cr、Cu、Zn的积累,菌渣主要增加了土壤Hg、Pb的积累,酒渣主要增加了土壤Pb、Cr的积累,猪粪主要增加了土壤Hg、Pb、Cu、Zn的积累;猪粪和沼渣较秸秆、菌渣和酒渣显著增加了土壤Cu和Zn的积累。不同有机物料处理下土壤内梅罗综合指数和潜在生态风险指数均处于轻微风险范围,2种土壤重金属风险评价结果表明,施入等氮量的情况下秸秆、菌渣和酒渣3种植物源的有机物料长期还田处理较沼渣和猪粪2种动物源的有机物料对增加土壤重金属污染的风险更小。因此,菌渣(MR)和酒渣(WR)配施无机肥是防控土壤重金属污染较好的有机物料培肥方案。

参考文献 References

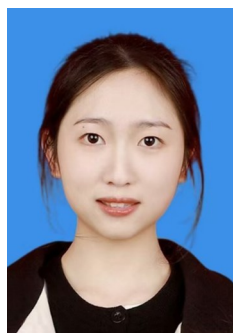
- [1] 晁赢,付钢锋,阎祥慧,杭中桥,杨全刚,王会,潘红,姜燕宏,诸葛玉平. 有机肥对作物品质、土壤肥力及环境影响的研究进展[J]. 中国农学通报, 2022, 38(29):103-107
Chao Y, Fu G F, Yan X H, Hang Z Q, Yang Q G, Wang H, Pan H, Lou Y H, Zhuge Y P. Effects of organic fertilizer on crop quality, soil fertility and environment: Research progress[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2022, 38(29):103-107 (in Chinese)
- [2] 龙攀,高旺盛,隋鹏,严玲玲,陈源泉. 农业废弃物还田对土壤团聚体及土壤C和N的影响[J]. 中国农业大学学报, 2014, 19(6):107-118
Long P, Gao W S, Sui P, Yan L L, Chen Y Q. Effects of agricultural organic wastes incorporation on soil water-stable aggregates and C, N contents[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2014, 19(6):107-118 (in Chinese)
- [3] 陈源泉,隋鹏,严玲玲,龙攀,李拓锦,王彬彬. 有机物料还田对华北小麦玉米两熟农田土壤有机碳及其组分的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(S2):94-102
Chen Y Q, Sui P, Yan L L, Long P, Li Z J, Wang B B. Effects of different organic wastes incorporation on soil organic carbon and its fraction under wheat-maize cropping system in North China Plain[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(S2):94-102 (in Chinese)
- [4] 尹春梅,谢小立,钟石仑. 长期不同养分投入对土壤养分和水稻生产持续性的影响[J]. 生态学报, 2009, 29(6):3059-3065
Yin C M, Xie X L, Zhong S L. Effect of different fertilizer applications on sustainable soil fertility and rice production in red soil paddy ecosystem[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(6):3059-3065 (in Chinese)
- [5] 刘荣乐,李书田,王秀斌,王敏. 我国商品有机肥料和有机废弃物中重金属的含量状况与分析[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(2):392-397
Liu R L, Li S T, Wang X B, Wang M. Contents of heavy metal in commercial organic fertilizers and organic wastes[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2005, 24(2):392-397 (in Chinese)
- [6] 宁川川,王建武,蔡昆争. 有机肥对土壤肥力和土壤环境质量的影响研究进

- 展[J]. 生态环境学报, 2016, 25(1): 175-181
- Ning C C, Wang J W, Cai K Z. The effects of organic fertilizers on soil fertility and soil environmental quality: A review [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, 25(1): 175-181 (in Chinese)
- [7] Ostermann A, He Y, Siemens J, Welp G, Heuser A, Wombacher F, Munker C, Xue Q Y, Lin X Y, Amelung W. Tracing copper derived from pig manure in calcareous soils and soil leachates by ⁶⁵Cu labeling[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(7): 4609-4617
- [8] 李孟飞. 长期定位施肥对土壤重金属含量的影响[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(14): 5959-5961
- Li M F. Effects of long-term located fertilization on soil heavy-metal content in soil[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2008, 36(14): 5959-5961 (in Chinese)
- [9] 刘景, 吕家珑, 徐明岗, 张文菊, 陈苗苗. 长期不同施肥对红壤 Cu 和 Cd 含量及活化率的影响[J]. 生态环境学报, 2009, 18(3): 914-919
- Liu J, Lv J L, Xu M G, Zhang W J, Chen M M. Effect of long-term fertilization on content and activity index of Cu and Cd in red soil[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(3): 914-919 (in Chinese)
- [10] 周武, 李鸣雷. 菌渣施用对中国土壤理化性质的影响: 基于 Meta 分析[J]. 江苏农业科学, 2024, 52(2): 205-213
- Zhou W, Li L M. Effects of mushroom residues application on soil physical and chemical properties in China: based on Meta-analysis [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2024, 52(2): 205-213 (in Chinese)
- [11] 解雪峰, 徐梓晴, 田再洋, 卜心国, 徐飞, 梁晶, 濮励杰. 不同改良物质添加对滨海盐碱地土壤重金属及酶活性的影响[J]. 环境科学, 2023, 44(10): 5649-5656
- Xie X F, Xu Z Q, Tian Z Y, Bu X G, Xu F, Liang J, Pu L J. Effects of supplementation of different amendments on soil heavy metals and enzyme activities in coastal saline soils land[J]. *Environmental Science*, 2023, 44(10): 5649-5656 (in Chinese)
- [12] 殷宗敏, 殷宗奇, 何文熹. 西安市高陵区土壤重金属污染现状分析[J]. 安徽农业科学, 2025, 53(4): 47-52
- Yin Z M, Yin Z Q, He W X. Analysis on the current situation of heavy metal contamination in soils in Gaoling district of Xi'an city[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2025, 53(4): 47-52 (in Chinese)
- [13] 陈佳林, 李仁英, 谢晓金, 王红, 徐静, 邵京, 简静, 阿克居里·乌尔曼, 沈嘉, 央宗. 南京市绿地土壤重金属分布特征及其污染评价[J]. 环境科学, 2021, 42(2): 909-916
- Chen J L, Li R Y, Xie X J, Wang H, Xu J, Shao J, Jian J, Akejuli·Wuerman, Shen J, Yangzong. Distribution characteristics and pollution evaluation of heavy metals in greenbelt soils of Nanjing City[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(2): 909-916 (in Chinese)
- [14] 邓旭东, 张超, 翟付杰, 李思敏, 单保庆. 白洋淀潜在新增淹没区土壤重金属赋存形态及生态风险评价[J]. 环境科学学报, 2023, 43(5): 398-408
- Deng X D, Zhang C, Zhai F J, Li S M, Shan B Q. Speciation and ecological risk assessment of heavy metals in soil of potential new submerged area in Baiyangdian Lake[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2023, 43(5): 398-408 (in Chinese)
- [15] 刘春红, 张亮, 贾学桦, 佟明恒, 程言君. 我国土壤重金属污染环境风险评估方法及防治措施探讨[J]. 环境影响评价, 2024, 46(6): 1-5, 14
- Liu C H, Zhang L, Jia X H, Tong M H, Cheng Y J. Discussion on the environmental risk assessment methods and prevention measures of soil heavy metal pollution in China[J]. *Environmental Impact Assessment*, 2024, 46(6): 1-5, 14 (in Chinese)
- [16] 周长松, 邹胜章, 李录娟, 申豪勇. 几种土壤重金属污染评价方法的对比[J]. 地球与环境, 2015, 43(6): 709-713
- Zhou C S, Zou S Z, Li L J, Shen H Y. Comparison of evaluation methods for soil heavy metals contamination[J]. *Earth and Environment*, 2015, 43(6): 709-713 (in Chinese)
- [17] 王朝, 林曼利, 彭位华, 闵宁. 基于多种方法的煤矿区农田土壤重金属污染评价[J]. 环境生态学, 2024, 6(5): 14-18
- Wang Z, Lin M L, Peng W H, Min N. Evaluation of heavy metal pollution in agricultural soils in coal mining areas based on multiple methods[J]. *Environmental Ecology*, 2024, 6(5): 14-18 (in Chinese)
- [18] 董同喜, 杨海雪, 李花粉, 乔玉辉, 苏德纯. 华北农田小麦-玉米轮作体系下土壤重金属积累特征研究[J]. 农业资源与环境学报, 2014, 31(4): 355-365
- Dong T X, Yang H X, Li H F, Qiao Y H, Su D C. Accumulation characteristics of soil heavy metals in the soil with wheat-corn crop rotation system in North China farmland[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2014, 31(4): 355-365 (in Chinese)
- [19] Huang Y, Chen Q Q, Deng M H, Japenga J, Li T Q, Yang X E, He Z L. Heavy metal pollution and health risk assessment of agricultural soils in a typical peri-urban area in southeast China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 207: 159-168
- [20] Xing W Q, Zhang H Y, Scheckel K G, Li L P. Heavy metal and metalloid concentrations in components of 25 wheat (*Triticum aestivum*) varieties in the vicinity of lead smelters in Henan Province, China [J/OL]. *Environmental Monitoring and Assessment*, (2015-12-11). DOI:doi.org/10.1007/s10661-015-5023-3
- [21] 倪中应, 姚玉才, 章明奎. 短期施用不同粪源堆肥对果园土壤肥力与重金属积累的影响[J]. 中国农学通报, 2017, 33(33): 100-106
- Ni Z Y, Yao Y C, Zhang M K. Soil fertility and heavy metal accumulation in orchard system: Under short-term application of compost with different manure sources[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2017, 33(33): 100-106 (in Chinese)
- [22] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000
- Bao S D. *Soil and Agricultural Chemistry Analysis* [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000 (in Chinese)
- [23] GB/T 17141—1997. 土壤质量: 铅、镉的测定: 石墨炉原子吸收分光光度法[S]. 北京: 国家环境保护局, 1997
- GB/T 17141—1997. Soil quality: Determination of lead, cadmium: Graphite furnace atomic absorption spectrophotometry [S]. Beijing: State Environmental Protection Bureau, 1997 (in Chinese)
- [24] HJ 491—2019. 土壤和沉积物: 铜、锌、铅、镍、铬的测定: 火焰原子吸收分光光度法[S]. 北京: 生态环境部, 2019
- HJ 491—2019. Soil and sediment: Determination of copper, zinc, lead, nickel and chromium: Flame atomic absorption spectrophotometry [S]. Beijing: Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, 2019 (in Chinese)
- [25] GB/T 22105.1—2008. 土壤质量—总汞、总砷、总铅的测定—原子荧光法—第1部分: 土壤中总汞的测定[S]. 北京: 农业农村部, 2008
- GB/T 22105.1-2008. Soil quality: Analysis of total mercury, arsenic and lead

- contents: Atomic fluorescence spectrometry-Part 1: Analysis of total mercury contents in soils[S]. Beijing: Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China, 2008 (in Chinese)
- [26] GB/T 22105.2—2008. 土壤质量总汞、总砷、总铅的测定—原子荧光法—第2部分:土壤中总砷的测定[S]. 北京:农业农村部, 2008
- GB/T 22105.2-2008. Soil quality: Analysis of total mercury, arsenic and lead contents: Atomic fluorescence spectrometry-Part 2: Analysis of total arsenic contents in soils[S]. Beijing: Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China, 2008 (in Chinese)
- [27] GB15618—2018. 土壤环境质量—农用地土壤污染风险管控标准[S]. 北京:生态环境部, 2018
- GB15618—2018. Soil environmental quality Risk control standard for soil contamination of agricultural land[S]. Beijing: Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, , 2018 (in Chinese)
- [28] 刘洋, 刘明庆, 王磊, 尹爱经, 黄忠林, 姚丹丹, 代威, 王宁, 王辉. 云南某废弃硅厂周边农田土壤重金属污染评价[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(4): 785-793
- Liu Y, Liu M Q, Wang L, Yin A J, Huang Z L, Yao D D, Dai W, Wang N, Wang H. Evaluation of heavy metal pollution in farmland soil around an abandoned silicon plant in Yunnan [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(4):785-793 (in Chinese)
- [29] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990
- China Environmental Monitoring General Station. *Soil Elemental Background Values in China* [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990 (in Chinese)
- [30] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, 14(8): 975-1001
- [31] 赵彬, 王亮, 魏雨泉, 祝文彬, 曹晗霖, 张昊. 我国农用地土壤重金属污染防治标准体系现状及展望[J]. 环境科学研究, 2024, 37(5):1092-1103
- Zhao B, Wang L, Wei Y Q, Zhu W B, Cao H L, Zhang H. Current status and prospects of agricultural soil heavy metal contamination prevention and control standard systems in China[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2024, 37(5):1092-1103 (in Chinese)
- [32] 樊霆, 叶文玲, 陈海燕, 鲁洪娟, 张颖慧, 李定心, 唐子阳, 马友华. 农田土壤重金属污染状况及修复技术研究[J]. 生态环境学报, 2013, 22(10):1727-1736
- Fan T, Ye W L, Chen H Y, Lu H J, Zhang Y H, Li D X, Tang Z Y, Ma Y H. Review on contamination and remediation technology of heavy metal in agricultural soil[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22(10): 1727-1736 (in Chinese)
- [33] 王美, 李书田. 肥料重金属含量状况及施肥对土壤和作物重金属富集的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(2): 466-480
- Wang M, Li S T. Heavy metals in fertilizers and effect of the fertilization on heavy metal accumulation in soils and crops[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(2): 466-480 (in Chinese)
- [34] NY 1110—2010. 水溶肥料 汞、砷、镉、铅、铬的限量要求[S]. 北京:中国农业出版社, 2011
- NY 1110-2010. water-soluble fertilizers: Content limits of mercury, arsenic, cadmium, lead and chromium[S]. Beijing: China Agriculture Press, 2010 (in Chinese)
- [35] GB 38400—2019. 肥料中有毒有害物质的限量要求[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019
- GB 38400-2019. Limitation requirements of toxic and harmful substance in fertilizers[S]. Beijing: Standards Press of China, 2019 (in Chinese)
- [36] 谢文凤, 吴彤, 石岳骄, 朱毅. 国内外有机肥标准对比及风险评价[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(12): 1958-1968
- Xie W F, Wu T, Shi Y J, Zhu Y. Chinese and international organic fertilizer standard comparison and risk assessment [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, 28(12): 1958-1968 (in Chinese)
- [37] 孙花, 谭长银, 黄道友, 王大娟, 刘利科, 杨燕, 余霞. 土壤有机质对土壤重金属积累、有效性及形态的影响[J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2011, 34(4): 82-87
- Sun H, Tan C Y, Huang D Y, Wan D J, Liu L K, Yang Y, Yu X. Effects of soil organic matter on the accumulation, availability and chemical speciation of heavy metal[J]. *Journal of Natural Science of Hunan Normal University*, 2011, 34(4): 82-87 (in Chinese)
- [38] 徐岩, 李静, 方文. 有机肥连续施用对菜园重金属行为的影响:基于地球化学模型研究[J]. 生态学报, 2022, 42(4):1512-1526
- Xu Y, Li J, Fang W. Effect and simulation of continuous application of organic fertilizer on heavy metal behavior in vegetable field soil based on geochemical model[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(4):1512-1526 (in Chinese)
- [39] 宋姿蓉, 俄胜哲, 袁金华, 贾武霞, 曾希柏, 苏世鸣, 白玲玉. 不同有机物料对灌漠土重金属累积特征及作物效应的影响[J]. 中国农业科学, 2019, 52(19): 3367-3379
- Song Z R, E S Z, Yuan J H, Jia W X, Zeng X B, Su S M, Bai L Y. Heavy metal accumulation in irrigated desert soils and their crop effect after applying different organic materials[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(19): 3367-3379 (in Chinese)
- [40] 陈露丹, 邓良基, 周伟, 刘子骁, 邹光基. 3种有机物料配肥下的宅基地复垦土壤重金属污染风险评估[J]. 四川农业大学学报, 2019, 37(2): 199-207
- Chen L D, Deng L J, Zhou W, Liu Z X, Zou G J. Risk assessment of heavy metal pollution in reclaimed soil of homestead under three organic material fertilizers[J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2019, 37(2): 199-207 (in Chinese)
- [41] Nicholson F A, Smith S R, Alloway B J, Carlton-Smith C, Chambers B J. Quantifying heavy metal inputs to agricultural soils in England and Wales[J]. *Water and Environment Journal*, 2006, 20(2): 87-95
- [42] 陈子扬, 孙孝龙. 土壤中有有机质与重金属关系的研究进展[J]. 环境与发展, 2017, 29(8): 141-142 (in Chinese)
- Chen Z Y, Sun X L. Research progress on the relationship between organic matter and heavy metals in soils[J]. *Environment and Development*, 2017, 29(8): 141-142 (in Chinese)
- [43] 魏祥, 李日升, 卢楠, 石海兰, 张钊熔. 三种秸秆生物炭对污染土壤中汞、砷钝化的研究[J]. 地球环境学报, 2025, 16(1): 99-106
- Wei Y, Li R S, Lu N, Shi H L, Zhang Z R. Study on passivation of mercury and arsenic in contaminated soil by three straw biochars[J]. *Journal of Earth Environment*, 2025, 16(1): 99-106 (in Chinese)
- [44] 邵云, 李向力, 李春喜, 姜丽娜, 鲁旭阳. As在小麦植株内吸收、分配和累积的研究[J]. 河南师范大学学报: 自然科学版, 2006, 34(1): 113-116
- Shao Y, Li X L, Li C X, Jiang L N, Lu X Y. Studies of as on uptake,

- distribution and accumulation in wheat [J]. *Journal of Henan Normal University: Natural Science Edition*, 2006, 34(1): 113-116 (in Chinese)
- [45] 赵睿, 吴智书, 罗阳, 董丽, 王淑楠, 王海斌, 喻礼怀. 猪粪与农田土壤中重金属累积污染的相关分析[J]. 土壤, 2017, 49(4): 753-759
- Zhao R, Wu Z S, Luo Y, Dong L, Wang S N, Wang H B, Yu L H. Correlation analysis of heavy metals accumulation pollution in pig manure and farmland soil[J]. *Soils*, 2017, 49(4): 753-759 (in Chinese)
- [46] 周伟, 邓良基, 贾凡凡, 李瀚. 菌渣猪粪还田下麦稻重金属富集特征及风险评估[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(2): 230-240
- Zhou W, Deng L J, Jia F F, Li H. Enrichment characteristic and risk assessment of heavy metals in wheat and rice organs under mushroom residue or swine manure recycling[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(2): 230-240 (in Chinese)

责任编辑: 吕晓梅



第一作者简介: 罗粤, 中国农业大学农学院作物栽培学与耕作学专业硕士研究生。参与项目: 国家重点研发计划(2022YFD2300901)。2023—2024 学年获中国农业大学校级二等学业奖学金。



通讯作者简介: 陈源泉, 博士, 现任中国农业大学农学院教授、博士生导师, 中国农业大学国家农业科技战略研究院副院长。主要从事农业生态和宏观农业研究, 中国农学会耕作制度分会常务理事。主要从事绿色高效低碳农作制度、农作系统生态经济评价、宏观农业与农业科技发展战略等研究。主持和参与完成了“十一五”和“十二五”国家科技支撑计划、“十三五”和“十四五”国家重点研发计划、国家自然科学基金项目等课题以及中国工程院关于农业科技的重大咨询战略研究项目 20 多项。在国内外学术期发表论文 100 余篇, 参编《农业科技自立自强若干政策问题研究》《农业宏观分析方法与应用》《中国工程科技 2035 发展战略·农业领域报告》等学术专著 20 余部。获省部级奖励 3 项。