



长期施肥对双季稻田土壤重金属剖面分布的影响

贺双玲, 饶中秀, 魏孔洋, 王建伟, 黄道友, 朱奇宏

引用本文:

贺双玲, 饶中秀, 魏孔洋, 等. 长期施肥对双季稻田土壤重金属剖面分布的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2026, 43(1): 163-174.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2024.0940>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

长期有机无机肥配施对红壤性水稻土微生物生物量和有机质结构的影响

蓝贤瑾, 刘益仁, 侯红乾, 吕真真, 冀建华, 冯兆滨, 刘秀梅

农业资源与环境学报. 2021, 38(5): 810-819 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0584>

长期施用污泥对土壤-萝卜系统重金属积累及土壤养分含量的影响

董文, 张青, 王焯平, 罗涛

农业资源与环境学报. 2021, 38(4): 647-654 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0449>

我国不同区域粮食作物产量对有机肥施用的响应差异

任科宇, 徐明岗, 张露, 段英华, 王伯仁

农业资源与环境学报. 2021, 38(1): 143-150 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0150>

不同种类有机物对污染农田土壤重金属活性的影响

倪中应, 邱志腾, 石一珺, 章明奎

农业资源与环境学报. 2017, 34(6): 517-524 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0146>

长期定位施肥和地膜覆盖对棕壤团聚体稳定性及其有机碳含量的影响

吕欣欣, 丁雪丽, 张彬, 孙海岩, 汪景宽

农业资源与环境学报. 2018, 35(1): 1-10 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0199>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

贺双玲, 饶中秀, 魏孔洋, 等. 长期施肥对双季稻田土壤重金属剖面分布的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2026, 43(1): 163-174.

HE S L, RAO Z X, WEI K Y, et al. Effects of long-term fertilization on the distribution of heavy metal profiles in double cropping paddy field[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2026, 43(1): 163-174.



开放科学 OSID

长期施肥对双季稻田土壤重金属剖面分布的影响

贺双玲^{1,2}, 饶中秀³, 魏孔洋^{1,2}, 王建伟², 黄道友², 朱奇宏^{2*}

(1. 中国科学院大学, 北京 100049; 2. 中国科学院亚热带农业生态研究所/长沙农业环境观测研究站, 长沙 410125; 3. 湖南省土壤肥料研究所, 长沙 410125)

摘要:本研究旨在解析长期不同施肥方式对双季稻田剖面土壤中重金属分布特征的影响。本研究依托始于1986年的长期定位施肥试验, 采集施肥30年后的剖面(0~10、10~20、20~30、30~40、40~50、50~60 cm)土壤样品, 对比分析不施肥(CK)、全化肥(NPK)、高氮化肥(HN)、稻草还田配施化肥(ST)、低量有机肥配施化肥(LM)、高量有机肥配施化肥(HM)6个处理下剖面土壤Pb、Cu、Zn、Fe和Mn全量和有效态含量变化与分布特征, 并结合土壤有机碳(SOC)含量探讨了其成因。结果表明:长期施用化肥和有机肥均会导致Pb、Cu和Zn在耕层(0~20 cm)聚集, Fe和Mn则是在中下层土壤出现聚集现象;长期施用高量猪粪有机肥显著提高0~20 cm层土壤Cu、Zn和Pb全量, 与CK相比其增幅分别为99.89%~195.13%、20.92%~55.03%和25.80%~42.16%, 土壤有效态Cu和Zn在0~30 cm层较其他处理显著提高45.76%~857.15%和75.54%~2 290.32%, 其效应随有机肥用量增加而增强, 但对Fe和Mn无明显影响;长期不同施肥处理的剖面土壤中Pb、Cu、Zn全量和有效态含量与SOC含量关系密切, 两者累积特征呈现高度一致性。长期施用高量猪粪有机肥会导致耕层乃至更深层土壤中Cu、Zn和Pb等重金属全量和有效性显著提升, 因而施用有机肥过程需关注和防控土壤重金属的累积风险。

关键词:稻田; 重金属; 剖面土壤; 有机肥; 长期施肥

doi: 10.13254/j.jare.2024.0940

Effects of long-term fertilization on the distribution of heavy metal profiles in double cropping paddy field

HE Shuangling^{1,2}, RAO Zhongxiu³, WEI Kongyang^{1,2}, WANG Jianwei², HUANG Daoyou², ZHU Qihong^{2*}

(1. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 2. Changsha Agricultural Environment Observation and Research Station, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 3. Hunan Institute of Soil and Fertilizer, Changsha 410125, China)

Abstract: This study aims to clarify the distribution characteristics of heavy metals in paddy soil profiles under long-term different fertilizations. The study was based on a long-term fertilization experiment conducted in 1986. Soil samples (0-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-50, 50-60 cm) were collected from profiles after 30 years of fertilization. There were 6 treatments as control without fertilization (CK), chemical fertilizer (NPK), high nitrogen chemical fertilizer (HN), rice straw incorporation (ST), low and high dosage of pig manure (LM and HM). The changes and distribution patterns of total and available contents of Pb, Cu, Zn, Fe, and Mn in the soil profile under 6 treatments were compared and analyzed. The results were discussed in conjunction with the content of soil organic carbon (SOC). The findings indicated that long-term application of chemical and organic fertilizers resulted in the gathering of Pb, Cu, and Zn in the plow layer (0-20 cm), while Fe and Mn predominantly gathering in the middle and lower soil layers. Long-term application of high amounts of pig manure organic fertilizer significantly increased the total contents of Cu, Zn, and Pb in the 0-20 cm soil layer, compared with CK, the HM treatment showed increases of 99.89%-195.13%, 20.92%-55.03%, and 25.80%-42.16%, respectively. Moreover, the available Cu and Zn in the 0-30 cm soil layer significantly increased by 45.76%-857.15% and 75.54%-2 290.32%, respectively. This effect intensified with the

收稿日期: 2024-11-28 录用日期: 2025-02-27

作者简介: 贺双玲(2000—), 女, 安徽安庆人, 硕士研究生, 研究方向为农田重金属污染风险表征与防控。E-mail: heshuangling22@mailsucas.ac.cn

*通信作者: 朱奇宏 E-mail: qhzh@isa.ac.cn

基金项目: 国家重点研发计划课题(2023YFD1700102); 国家自然科学基金项目(42077374)

increased application of organic fertilizer. While, the long-term application of manure showed limited accumulation effect on Fe and Mn in 0–30 cm soil. The total and available contents of Pb, Cu, and Zn in the soil profile under long-term different fertilization treatments were closely correlated with SOC content, and their accumulation patterns were highly consistent. Our research indicates that long-term application of high amounts of pig manure significantly enhances the total content and bioavailability of heavy metals such as Cu, Zn, and Pb in both the plow layer and deeper soil layers. Therefore, attention should be given to the potential risks of heavy metal accumulation in soils during organic fertilizer application, and appropriate preventive measures should be implemented.

Keywords: paddy; heavy metal; profile soil; organic fertilizer; long-term fertilization

土壤重金属污染已成为制约我国农业可持续发展的一大难题^[1]。根据2014年发布的《全国土壤污染状况调查公报》，我国耕地土壤污染物点位超标率高达19.4%，南方水稻种植区问题尤为突出。多数重金属污染物一旦进入土壤便会长期存在并逐渐积累，其既可在浓度梯度势能作用下向根际土壤水平/斜向迁移，也可在重力作用下发生垂直扩散^[2-3]，进而对生态系统和人类健康构成潜在威胁^[4]。然而，我国南方双季稻区长期施肥下土壤重金属剖面分布特征仍不明确，亟待开展系统研究并探讨其成因。

施用化肥和有机肥是提高粮食产量的重要手段之一^[5]，目前国家严格控制了其有毒有害物质的含量，但部分仍含有微量重金属，尤其是有机肥中Cu和Zn等含量水平较高^[6]。长期大量施肥会导致重金属在表层土壤累积^[7]，并通过降雨或灌溉随水流发生垂直迁移，威胁下层土壤和地下水质量。研究表明，畜禽粪便富含Pb、Cu和Zn等重金属^[8]，长期施用粪肥会对土壤环境造成较大负担^[9]。例如，杨敏等^[10]发现，施用有机肥处理显著提高了耕层土壤Cu和Zn等重金属含量，且随施用量的增加而增加。关天霞等^[11]发现，施用鸡粪和猪粪有机肥可改善土壤性质、提高作物产量和品质，但也造成Cu和Zn在耕层(0~20 cm)土壤的积累。叶必雄等^[12]的研究显示，持续施用猪粪10年，Cu、Zn和Pb在旱地表层或亚表层土壤出现明显聚集现象，而持续施用鸡粪则导致Cu和Pb等在土壤剖面中的淋溶迁移。长期施用重金属含量较高的粪肥，不仅会增加土壤中重金属的含量，还可能提升其有效性，进而加大潜在的环境风险。此外，长期施用化学氮肥可能导致土壤酸化，进而增强Cu和Zn的活性和迁移能力^[13-14]，加速其向下层土壤的迁移。目前，关于长期施肥对稻田剖面土壤重金属累积与分布特征的研究仍较为匮乏。

基于此，本研究依托湖南省始于1986年的长期定位施肥试验，以施肥30年后的剖面土壤为研究对象，系统分析了长期单施化肥、高氮化肥、秸秆还田配

施化肥和施用低/高量有机肥模式下剖面土壤Pb、Cu、Zn、Fe和Mn等重金属的全量和有效态含量的差异，并探讨了其与土壤有机质积累等之间的关系，以为稻田科学施肥和重金属污染防治提供理论依据和实践参考。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

长期定位施肥试验位于湖南省宁乡市郊区(112°18'E, 28°07'N)，始于1986年。该区域年平均降雨量为1 358 mm，降雨丰沛，年平均气温为16.8℃，无霜期平均274 d，气候温暖，是传统的双季稻种植区。供试土壤成土母质为近代河流冲积物，属于河沙泥。试验前基础土壤pH值为5.6，有机碳(SOC)含量为21.10 g·kg⁻¹、全氮(TN)为2.17 g·kg⁻¹、全磷(TP)为1.08 g·kg⁻¹、全钾(TK)为22.3 g·kg⁻¹^[15]。

1.2 试验设计

本研究选取长期定位施肥试验的6个处理：不施肥(CK)、全化肥(NPK)、高氮化肥(HN)、稻草还田配施化肥(ST)、低量有机肥配施化肥(LM)和高量有机肥配施化肥(HM)。试验采取随机小区排列，面积为66.7 m²(10 m×6.67 m)，不设重复。小区之间采用深埋(埋深>30 cm)水泥埂隔断，确保相互间无影响。初始种植制度为稻-稻-麦，后调整为稻-稻-冬闲^[10,15]。CK为不施用任何肥料或有机物料；NPK处理为测土配方施肥，其化肥用量由土壤供肥能力和植物生长需求所决定；HN处理为习惯施肥，在NPK处理基础上施用过量氮肥；ST处理秸秆还田量为稻草3 000 kg·hm⁻²，并补施化肥；LM和HM分别采用有机肥代替30%和60%的氮肥。氮、磷和钾肥分别用市售尿素(含N 46%)、钙-镁-磷肥(含P₂O₅ 12%)和氯化钾(含K₂O 60%)；有机肥为当地厩肥，主要为猪粪肥和鸡粪肥。ST、LM和HM处理，年N、P、K施入量与NPK处理基本相当，在有机物料的基础上由化肥使用量调节。各处理施肥量见表1^[10,15]。

表1 供试土壤各处理施肥量(kg·hm⁻²)Table 1 Fertilization amounts in treatments of tested soil(kg·hm⁻²)

处理 Treatment	化肥 Chemical fertilizer			稻草/厩肥 Straw/Manure			总量 Total amount		
	N	P	K	N	P	K	N	P	K
CK	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NPK	457	44	160	0	0	0	457	44	160
HN	757	44	160	0	0	0	757	44	160
ST	378	36	1	81	12	167	459	48	168
LM	313	30	61	147	56	106	460	86	167
HM	164	36	0	293	111	211	457	147	211

注:P以P₂O₅计,K以K₂O计。

1.3 样品采集与预处理

土壤样品采集于2015年晚稻成熟期。为保证样品的代表性,将每个小区等分为三个裂区(3.33 m×6.67 m)。在每个裂区,分别采用梅花五点法,利用带刻度不锈钢土钻(半径2 cm,高20 cm)分层采集0~10、10~20、20~30、30~40、40~50、50~60 cm剖面土壤样品。每个裂区的各个层次土壤样品均为混合样,经充分混合后装入聚乙烯塑料袋。土壤样品经自然风干后分别过20目和100目尼龙网筛,保存至自封袋备用。

1.4 指标测定与计算

土壤有机碳(SOC),采用重铬酸钾外加热法^[6]测定。土壤Pb、Cu、Zn、Fe和Mn含量,采用王水-高氯酸法消解;有效态Pb、Cu和Zn含量,采用DTPA法提取;消解液和提取液均采用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES 5110,美国安捷伦)测定。

剖面土壤重金属污染风险,采用单因子指数法进行评估。该方法是一种被广泛应用的基础评价方法,既可评价重金属污染风险,又可分析主要污染元素。单因子指数(P_i)即土壤单个重金属含量实测值与标准值的比值^[7],计算公式如下:

$$P_i = C_i / L_i$$

式中: C_i 为土壤重金属*i*的实测含量,mg·kg⁻¹; L_i 为金属*i*指标评价标准值,mg·kg⁻¹,即《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)风险筛选值。污染风险分级标准:当 $P_i \leq 1$ 时,为未受污染;当 $1 < P_i \leq 2$ 时,为轻度污染;当 $2 < P_i \leq 3$ 时,为中度污染;当 $P_i > 3$ 时,为重度污染。

1.5 统计分析

数据采用平均值表示,处理间或层次间指标差异,采用ANOVA方差分析、LSD法统计分析;指标间定量关系采用最小二乘线性回归法分析评价。显著水平选用 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 。统计分析和制图采用

SPSS 26.0和Origin 2024进行。

2 结果与分析

2.1 重金属全量的剖面分布特征

2.1.1 土壤Pb含量

CK、NPK、HN、ST、LM和HM处理的土壤Pb含量均呈现随土层深度增加而降低的变化趋势,范围在27.29~46.75 mg·kg⁻¹之间(图1a)。其中CK处理土壤Pb含量30~40 cm土层出现聚集现象,含量为38.92 mg·kg⁻¹;LM处理20~30 cm土层出现中间聚集现象,含量为37.83 mg·kg⁻¹。

在0~60 cm剖面土壤中,各层土壤Pb含量均以HM处理最高。与CK相比,HM处理的土壤Pb含量在10~20 cm土层中显著增加,增幅为42.16% ($P < 0.05$),其他施肥处理0~20 cm土层的Pb含量高于CK,而30~60 cm土层则相反。除CK和HM外,其他施肥处理各层(0~60 cm)剖面土壤Pb含量无明显差异($P > 0.05$)。

2.1.2 土壤Cu含量

各施肥处理土壤Cu含量在剖面中整体上呈现随土层深度增加而降低的变化趋势(图1b)。其中,HM和LM处理土壤Cu含量在0~30 cm土层中的降幅高于其他土层,HM处理由79.85 mg·kg⁻¹下降至26.05 mg·kg⁻¹,降幅最大,为67.38% ($P < 0.01$);LM处理次之,由59.65 mg·kg⁻¹下降至22.20 mg·kg⁻¹,降幅为62.78% ($P < 0.01$);ST处理土壤Cu含量10~20 cm土层出现聚集现象,含量为47.15 mg·kg⁻¹;其他处理在整个剖面中变化范围为19.09~27.06 mg·kg⁻¹。

在0~60 cm的剖面土壤中,各层土壤Cu含量以HM处理最高。与CK处理相比,HM处理的Cu含量在0~10 cm土层中增幅最大,为195.13% ($P < 0.01$);10~20 cm土层增幅次之,为99.89% ($P < 0.01$)。其他

处理与CK相比,除LM处理在0~10 cm土层Cu含量显著增加120.48% ($P<0.01$)和ST处理在10~20 cm土层Cu含量显著增加76.63% ($P<0.01$)以外,其他施肥处理0~60 cm土层的Cu含量均低于CK。

2.1.3 土壤Zn含量

各施肥处理土壤Zn含量在剖面中的分布整体上呈现出随着土层深度增加而降低的趋势(图1c)。其中, HM处理土壤Zn含量在0~30 cm土层中由258.86 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 快速下降至151.82 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,降幅为41.35% ($P<0.01$), 30~60 cm土层Zn含量下降速率减小;其他处理的变化范围在117.34~198.74 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间。

在0~10 cm土层中,各施肥处理间剖面土壤Zn含

量出现显著差异($P<0.01$),其中HM处理土壤Zn含量显著高于其他施肥处理,增幅在34.40%~55.03%之间。10~20 cm土层,NPK处理下Zn含量出现聚集现象,其含量达到198.74 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,高于其他处理。20 cm以下土层Zn含量在各施肥处理间均无显著差异。

2.1.4 土壤Fe含量

各施肥处理的土壤Fe含量在剖面中的变化趋势整体上呈现随土层深度的增加,先上升后下降的特征,范围在23.98~32.99 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间(图1d)。其中CK、NPK、ST和LM处理土壤Fe含量在10~20 cm土层出现聚集现象,范围在30.01~32.99 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间;ST处理在40~50 cm土层也出现聚集现象,含量为29.07 $\text{g}\cdot$

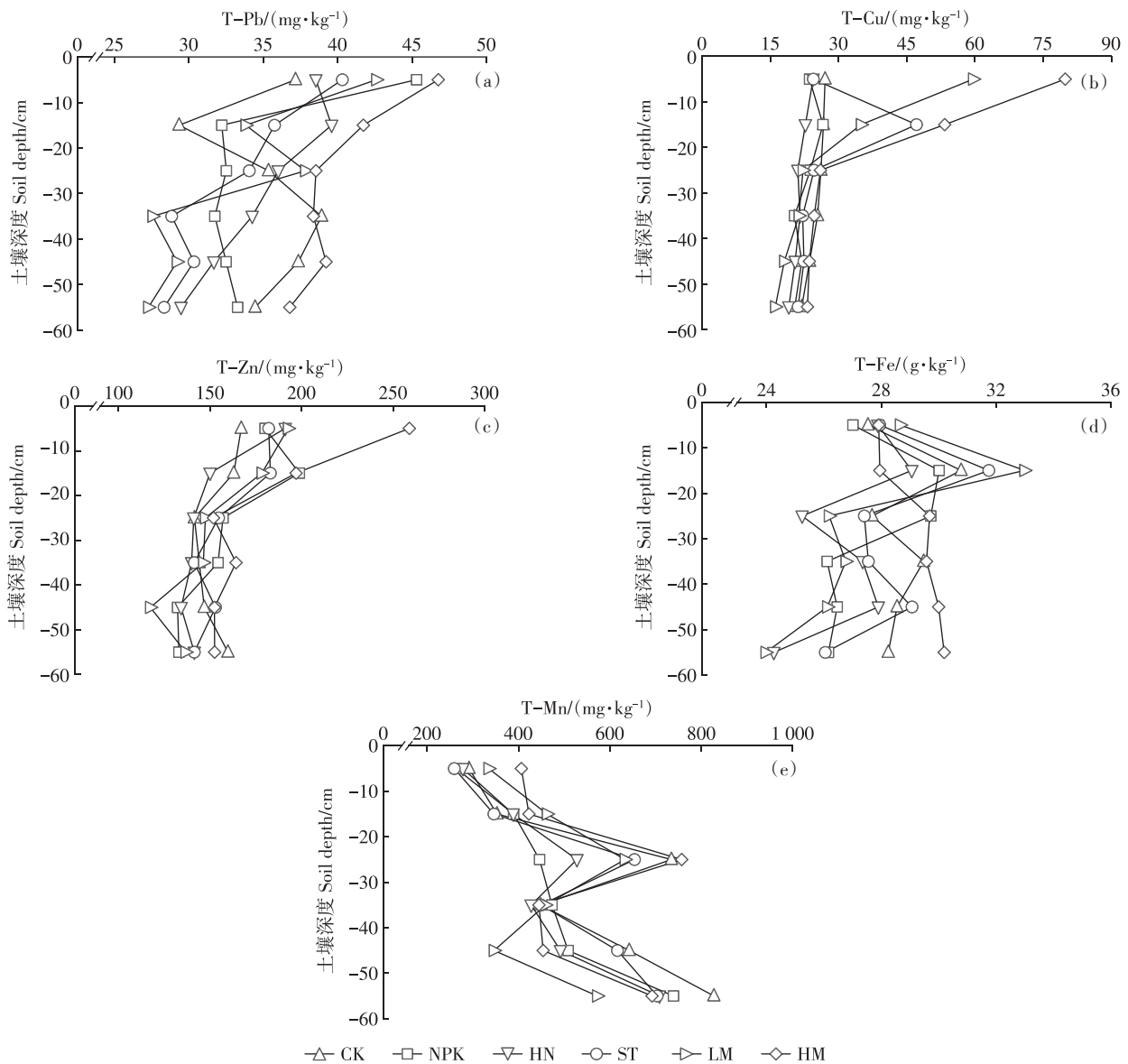


图1 长期施肥下土壤剖面中全量Pb、Cu、Zn、Fe和Mn的含量与分布

Figure 1 Content and distribution of total Pb, Cu, Zn, Fe, and Mn in soil profiles under long-term fertilization

kg⁻¹。

在0~60 cm剖面中,各施肥处理间土壤Fe含量的差异在不同土层间呈现一定的变化。在0~10 cm和10~20 cm土层中各施肥处理间以LM处理最高,ST处理次之,其中土壤Fe含量10~20 cm土层中达到最高值,两个处理分别为32.99 g·kg⁻¹和31.74 g·kg⁻¹。在20 cm以下土层的Fe含量均以HM处理最高,其中50~60 cm土层中,HM处理的土壤Fe含量与其他施肥处理的差异最大,但未达到显著水平($P>0.05$)。

2.1.5 土壤Mn含量

各施肥处理土壤Mn含量在剖面中的分布整体上均呈现随土层深度先增加后降低再增加的变化趋势,范围在259.44~827.72 mg·kg⁻¹之间(图1e)。各处理在20~30 cm和50~60 cm土层出现聚集现象,范围在446.19~757.29 mg·kg⁻¹和572.55~827.72 mg·kg⁻¹。

在0~10 cm层中HM和LM处理剖面土壤Mn含量显著高于CK,其中HM处理增幅最大,为39.27%($P<0.05$);LM处理次之,为31.14%($P<0.05$)。各施肥处理的10~30 cm土层Mn含量也呈现类似的变化趋势,但处理间差异未达到显著水平($P>0.05$)。30~40 cm

层中土壤的Mn含量在各施肥处理间保持稳定,范围为427.85~473.33 mg·kg⁻¹。在40 cm以下剖面中,各层土壤Mn含量均低于CK处理,其中LM处理降幅最大,在30.83%~46.06%之间($P<0.05$)。

综上所述,稻田土壤长期施肥,尤其是高量猪粪有机肥,会导致Cu、Zn和Pb在0~20 cm耕层土壤发生明显聚集,而Fe和Mn则在中下层聚集。

2.2 重金属有效态含量的剖面分布特征

针对稻田剖面土壤中出现明显累积的Pb、Cu和Zn 3种重金属元素,进一步分析了其在剖面土壤中的有效态含量变化。

2.2.1 土壤有效态Pb含量

各施肥处理土壤有效态Pb含量在剖面中的分布整体上均呈现出随土层深度增加而降低的趋势(图2a)。各处理土壤有效态Pb含量在0~30 cm土层中的降幅高于其他土层,其中CK处理土壤由6.02 mg·kg⁻¹下降至1.76 mg·kg⁻¹,降幅最大,为70.76%($P<0.01$);NPK处理次之,由5.77 mg·kg⁻¹下降至1.69 mg·kg⁻¹,降幅为70.71%($P<0.01$);其余处理降幅在21.51%~68.87%之间。在30 cm土层以下各处理土壤有效态Pb含量保持

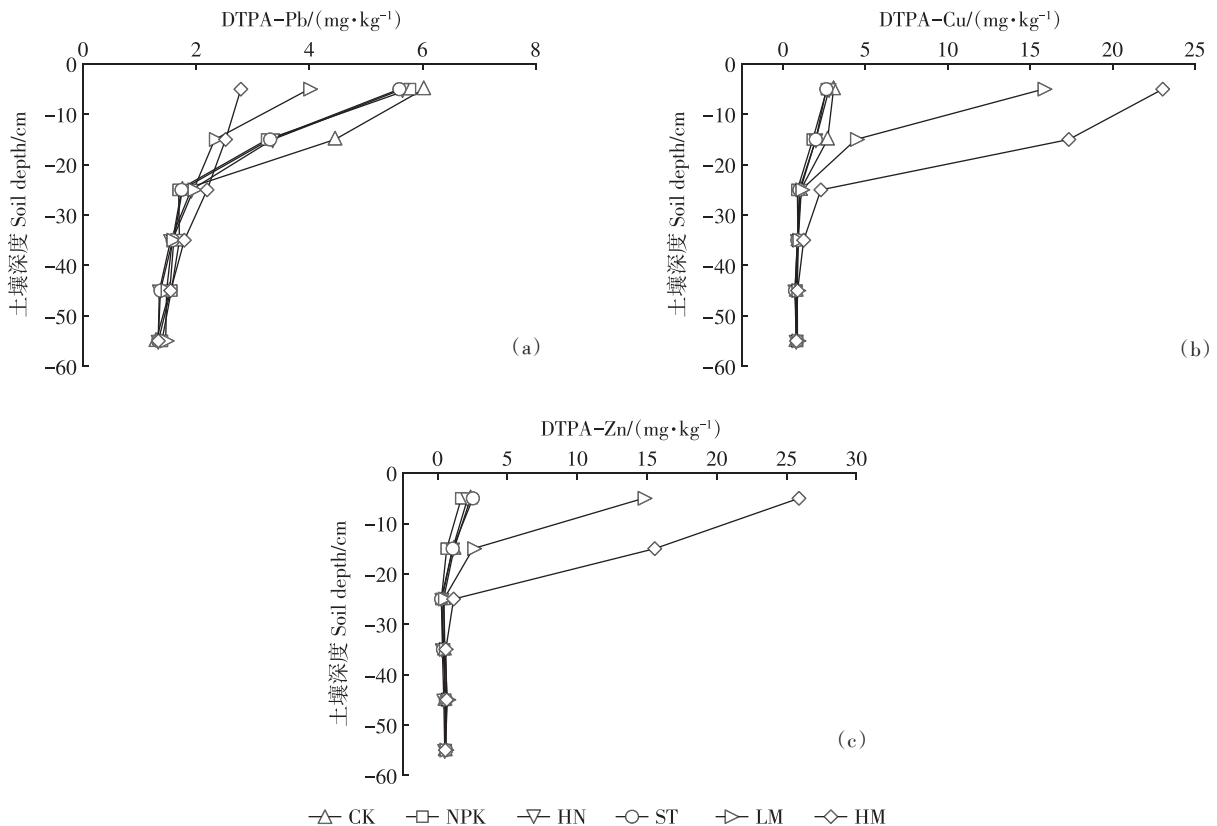


图2 长期施肥下土壤剖面中Pb、Cu和Zn有效态的含量与分布

Figure 2 Content and distribution of available Cd, Pb, Cu, and Zn in soil profiles under long-term fertilization

相对稳定,范围在1.29~1.79 mg·kg⁻¹之间。

不同施肥方式持续30年后,在0~20 cm剖面中,各施肥处理的土壤有效态Pb含量均低于CK,其中HM处理降幅最大,在43.39%~53.61%之间($P<0.01$)。在20 cm以下剖面中,各层之间土壤有效态Pb含量以HM处理最高,但不同施肥处理土壤间差异未达到显著水平($P>0.05$)。

2.2.2 土壤有效态Cu含量

各施肥处理土壤有效态Cu含量在剖面中分布整体上均呈现随土层深度增加而降低的趋势(图2b)。各处理土壤有效态Cu含量在0~30 cm土层中的降幅高于其他土层,其中LM处理由15.80 mg·kg⁻¹下降至1.11 mg·kg⁻¹,降幅最大,为92.97%($P<0.01$);HM处理次之,由23.03 mg·kg⁻¹下降至2.30 mg·kg⁻¹,降幅为90.01%($P<0.01$);其余处理降幅在62.12%~67.04%($P<0.01$)之间。在30 cm土层以下各处理有效态Cu含量保持相对稳定,范围在0.73~1.26 mg·kg⁻¹之间。

各施肥处理间的土壤有效态Cu含量在0~30 cm土层出现显著差异($P<0.01$)。在0~20 cm土层中, HM处理土壤有效态Cu含量显著高于其他施肥处理土壤,增幅在45.76%~857.15%之间;LM处理土壤有效态Cu含量显著高于除HM处理外其他施肥处理土壤,增幅在63.24%~499.28%之间。在20~30 cm土层中, HM处理土壤有效态Cu含量显著高于其他施肥处理土壤,增幅在106.93%~161.85%之间。30 cm以下土层土壤的有效态Cu含量在各施肥处理间均无显著差异。

2.2.3 土壤有效态Zn含量

各施肥处理的土壤有效态Zn含量在剖面中的分布整体上均呈现随土层深度增加而降低的趋势(图2c)。各处理土壤有效态Zn含量在0~30 cm土层中的降幅高于其他土层,其中LM处理土壤由14.75 mg·kg⁻¹下降至0.45 mg·kg⁻¹,降幅最大,为96.95%($P<0.01$);HM处理次之,由25.89 mg·kg⁻¹下降至1.14 mg·kg⁻¹,降幅为95.60%($P<0.01$);其余处理降幅在81.78%~90.12%之间($P<0.01$)。在30 cm土层以下各处理土壤有效态Zn含量保持相对稳定,范围在0.34~0.69 mg·kg⁻¹之间。

各施肥处理间的土壤有效态Zn含量在0~30 cm土层出现显著差异($P<0.01$)。在0~20 cm土层中, HM处理土壤有效态Zn含量显著高于其他施肥处理,增幅在75.54%~2 290.32%之间;LM处理土壤有效态Zn含量显著高于除HM处理外其他施肥处理,增幅在

116.52%~770.15%之间。在20~30 cm土层中, HM处理土壤有效态Zn含量显著高于其他施肥处理,增幅在154.79%~352.17%之间。30 cm以下土层土壤的有效态Zn含量在各施肥处理间均无显著差异。

综上所述,长期施肥下有效态Pb、Cu和Zn含量在剖面上表现出明显的表层聚集现象,主要在0~20 cm土层中聚集。长期施用有机肥配施化肥增加了土壤表层有效态Cu和Zn的含量,且高量有机肥配施化肥还导致了有效态Pb、Cu和Zn向更深层剖面的迁移。

2.3 重金属污染风险

土壤中的Pb是一种备受关注的重金属元素,而Cu和Zn虽是作物生长必需的微量营养元素,但土壤中的含量超过一定程度也会带来污染风险。基于土壤中Pb、Cu和Zn的含量计算单因子指数(P_i),对其进行风险评估,结果如表2所示。土壤Pb在各处理各土层中 P_i 均小于1,为无污染。土壤Cu在LM处理0~10 cm土层、HM处理0~20 cm土层中 P_i 在1~2之间,为轻度污染;其他处理和土层中Cu均为无污染。土壤Zn在HM处理0~10 cm土层中 P_i 在1~2之间,为轻度污染;其他各处理和土层中Zn均为无污染。相较于无机肥和稻草还田处理,施用有机肥增加了Cu和Zn在表层土壤的污染风险,且高量有机肥的影响

表2 长期施肥下土壤剖面中Pb、Cu和Zn的单因子污染指数
Table 2 Single factor pollution indices of Pb, Cu and Zn in soil profiles under long-term fertilization

元素 Element	土壤深度 Soil depth/cm	处理Treatment					
		CK	NPK	HN	ST	LM	HM
Pb	0~10	0.41	0.50	0.43	0.45	0.47	0.52
	10~20	0.33	0.36	0.44	0.40	0.38	0.46
	20~30	0.39	0.36	0.40	0.38	0.42	0.43
	30~40	0.43	0.35	0.38	0.32	0.31	0.43
	40~50	0.42	0.36	0.35	0.34	0.32	0.44
	50~60	0.38	0.37	0.33	0.31	0.30	0.41
Cu	0~10	0.54	0.47	0.49	0.49	1.19	1.60
	10~20	0.53	0.53	0.45	0.94	0.70	1.07
	20~30	0.52	0.48	0.42	0.49	0.44	0.52
	30~40	0.51	0.41	0.43	0.44	0.43	0.49
	40~50	0.47	0.44	0.41	0.45	0.36	0.47
	50~60	0.44	0.41	0.38	0.42	0.32	0.46
Zn	0~10	0.83	0.90	0.96	0.91	0.96	1.29
	10~20	0.81	0.99	0.75	0.91	0.89	0.98
	20~30	0.71	0.79	0.71	0.77	0.74	0.76
	30~40	0.72	0.77	0.70	0.71	0.73	0.82
	40~50	0.73	0.66	0.67	0.76	0.59	0.76
	50~60	0.80	0.66	0.71	0.71	0.68	0.76

更显著。

2.4 SOC含量的剖面分布特征

长期不同施肥处理下剖面土壤SOC含量如图3所示。各施肥处理土壤SOC在剖面的分布整体上均呈现随土层深度增加而降低的趋势。各处理土壤SOC含量在0~30 cm土层中的降幅高于其他土层,其中LM处理由29.04 g·kg⁻¹下降至6.36 g·kg⁻¹,降幅最大,为78.10% ($P<0.01$);ST处理次之,由23.59 g·kg⁻¹下降至6.61 g·kg⁻¹,降幅为71.98% ($P<0.01$);其余处理降幅在67.44%~71.83%之间 ($P<0.01$)。在30 cm土层以下各处理SOC含量保持相对稳定,范围在4.04~6.21 g·kg⁻¹。

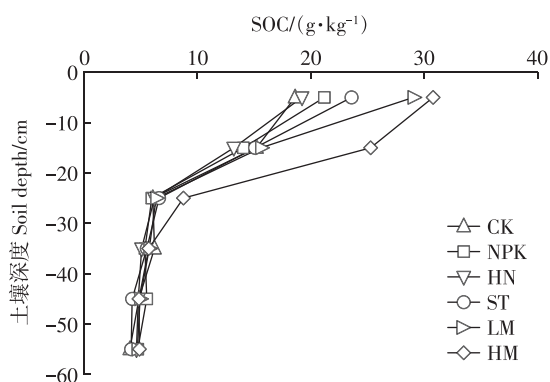


图3 长期施肥下土壤剖面各层中SOC的含量

Figure 3 Content of SOC in each layer of soil profile under long-term fertilization

长期不同施肥处理主要影响0~30 cm土层中土壤SOC含量。在0~10 cm土层中, HM和LM处理的土壤SOC含量显著高于其他施肥处理,增幅分别为30.52%~65.42%和23.11%~56.04% ($P<0.01$);在10~20 cm土层中, HM处理的土壤SOC含量显著高于其他施肥处理,增幅为62.02%~91.46% ($P<0.01$);在20~30 cm土层中, HM处理土壤SOC含量显著高于CK和NPK处理,增幅为44.47%和46.62% ($P<0.05$);30 cm以下土层土壤SOC含量在各施肥处理间均无显著差异。这表明稻田土壤长期施肥会导致土壤SOC的表层聚集,主要在0~20 cm土层;长期施用高量猪粪有机肥,可以提高耕层乃至更深层土壤的肥力。

2.5 土壤重金属与SOC含量的相关性分析

土壤SOC的剖面分布是影响重金属分布特征的重要因素。本研究对土壤重金属全量和有效态含量与土壤SOC进行线性回归分析,在一定程度上反映了SOC对土壤重金属剖面分布的影响,结果如图4所示。土壤Pb、Cu、Zn的全量(T)和有效态(DTPA)含量

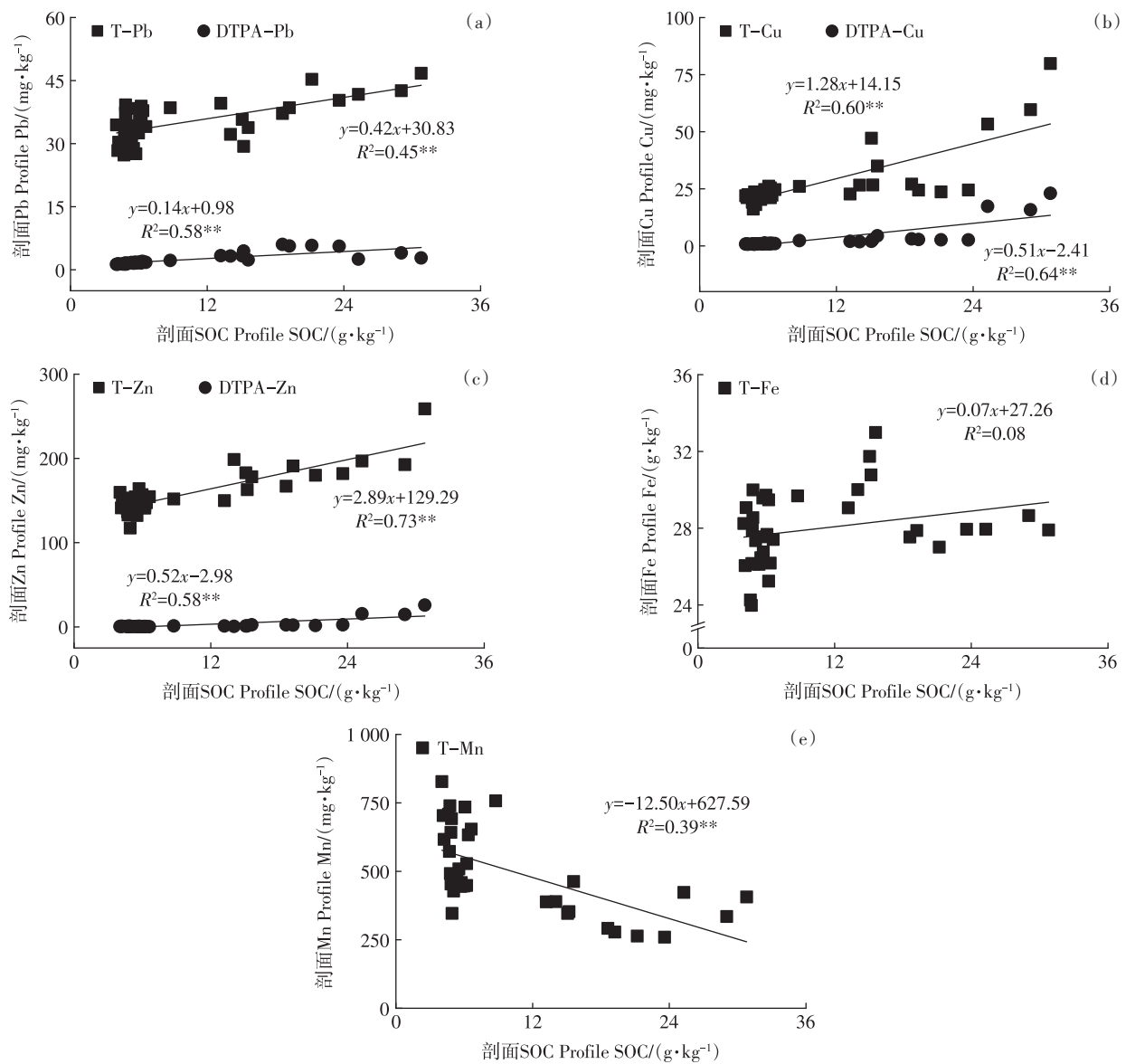
均与土壤SOC之间呈极显著正相关 ($P<0.01$)。在各重金属全量与土壤SOC的线性回归分析中, T-Zn与SOC回归方程决定系数(R^2)最高,为0.73;在各重金属有效态含量与土壤SOC的线性回归分析中, DTPA-Cu与SOC的 R^2 最高,为0.64。土壤T-Mn和SOC之间呈极显著负相关 ($R^2=0.39, P<0.01$), 土壤T-Fe与SOC之间无显著相关性。相关性分析结果表明剖面土壤重金属全量与SOC的分布显著相关,且有效态含量在剖面的分布规律也与剖面SOC的分布一致,这表明剖面中土壤SOC很大程度上影响了重金属的分布特征和有效性。

重金属在土壤表层的聚集程度和有效性与表层土壤中SOC含量密切相关。对各层土壤重金属全量和有效态含量与SOC进行线性回归分析,结果显示,各施肥处理下, T-Pb与SOC含量在0~10 cm和20~30 cm土层中呈显著正相关(图5a); T-Cu与SOC含量在0~10 cm和10~20 cm土层中呈极显著正相关(图5b); T-Zn与SOC含量在0~10 cm土层中呈极显著正相关(图5c); T-Fe与SOC含量在40~50 cm土层中的决定系数最高,但未达到显著水平(图5d); T-Mn与SOC含量在0~10 cm和30~40 cm土层中呈显著正相关(图5e);其余各土层中的重金属含量与SOC含量无显著相关性。同样, DTPA-Pb与SOC含量在0~10 cm土层中呈极显著负相关,在20~30 cm土层中呈显著正相关(图6a); DTPA-Cu和DTPA-Zn与SOC含量在0~30 cm各土层中均呈极显著正相关(图6b、6c),而其余各土层中的重金属有效态含量与SOC含量无显著相关性。剖面土壤SOC与重金属在不同土层中的聚集特征呈现出高度一致性,且剖面中SOC主要影响40 cm以上土层中重金属的全量和有效态含量。

3 讨论

3.1 长期施肥对剖面重金属累积与分布的影响

在本研究中,与CK相比, NPK和HN对剖面土壤Cu、Zn、Fe和Mn等重金属的全量和Cu、Zn等重金属有效态含量无显著影响。秸秆还田配施化肥处理显著提高了10~20 cm层土壤Cu全量,这可能由于水稻在生长过程中从土壤中吸收部分重金属,还田后影响了重金属的分布。施用有机肥,尤其是高量有机肥,显著提高了0~20 cm层土壤中Cu、Zn和Pb的全量以及0~30 cm层土壤中Cu和Zn的有效态含量。值得注意的是,长期施用猪粪有机肥后各层土壤Pb虽并未达到污染水平,但其潜在累积风险不容忽视,而高量



*表示 $P < 0.05$; **表示 $P < 0.01$; 下同。

图4 土壤剖面中Pb、Cu、Zn、Fe、Mn全量和有效态分布与SOC的关系

Figure 4 Relationship between the total and available distribution of Pb, Cu, Zn, Fe, Mn in soil profiles and SOC

施用猪粪有机肥30年后耕层土壤Cu和Zn的含量均已超出了风险筛选值。施肥对土壤重金属含量及其有效性的影响主要体现在两个方面：一方面，肥料中含有少量重金属，长期施用可能会造成土壤中重金属的累积和迁移；另一方面，施肥促进了作物生长，使作物对土壤中重金属的吸收增加，从而可能降低土壤重金属的含量^[18]。研究表明，水稻秸秆能够积累一定量的重金属，秸秆还田后可能会对土壤重金属的累积与分布以及农产品的品质产生影响^[19]。化学氮肥和钾肥等无机肥中重金属元素含量较低，而畜禽粪便等有机肥中重金属含量相对较高^[8]。郝慧娟等^[20]对湖南省

20个以畜禽粪便为主要生产原料的有机肥样品进行测定，其中Pb、Cu和Zn的平均值分别为7.59、126.48 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和277.52 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ；张树清等^[21]的研究表明猪粪中Fe和Mn含量平均值分别为8.64 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和395.62 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。施用猪粪后，稻田耕作层土壤Cu和Zn含量及有效性明显增加，且其含量随施用量增大而升高^[22-23]。长期试验结果显示，长期施用粪肥会导致耕层土壤Cd和Cu等重金属的累积，这与有机肥中重金属含量较高、施入量和施用年限密切相关^[24-25]。随着土壤深度的增加，各施肥处理中土壤深层重金属含量及其有效性降低。廖碧霞等^[4]也发现重金属含量在表

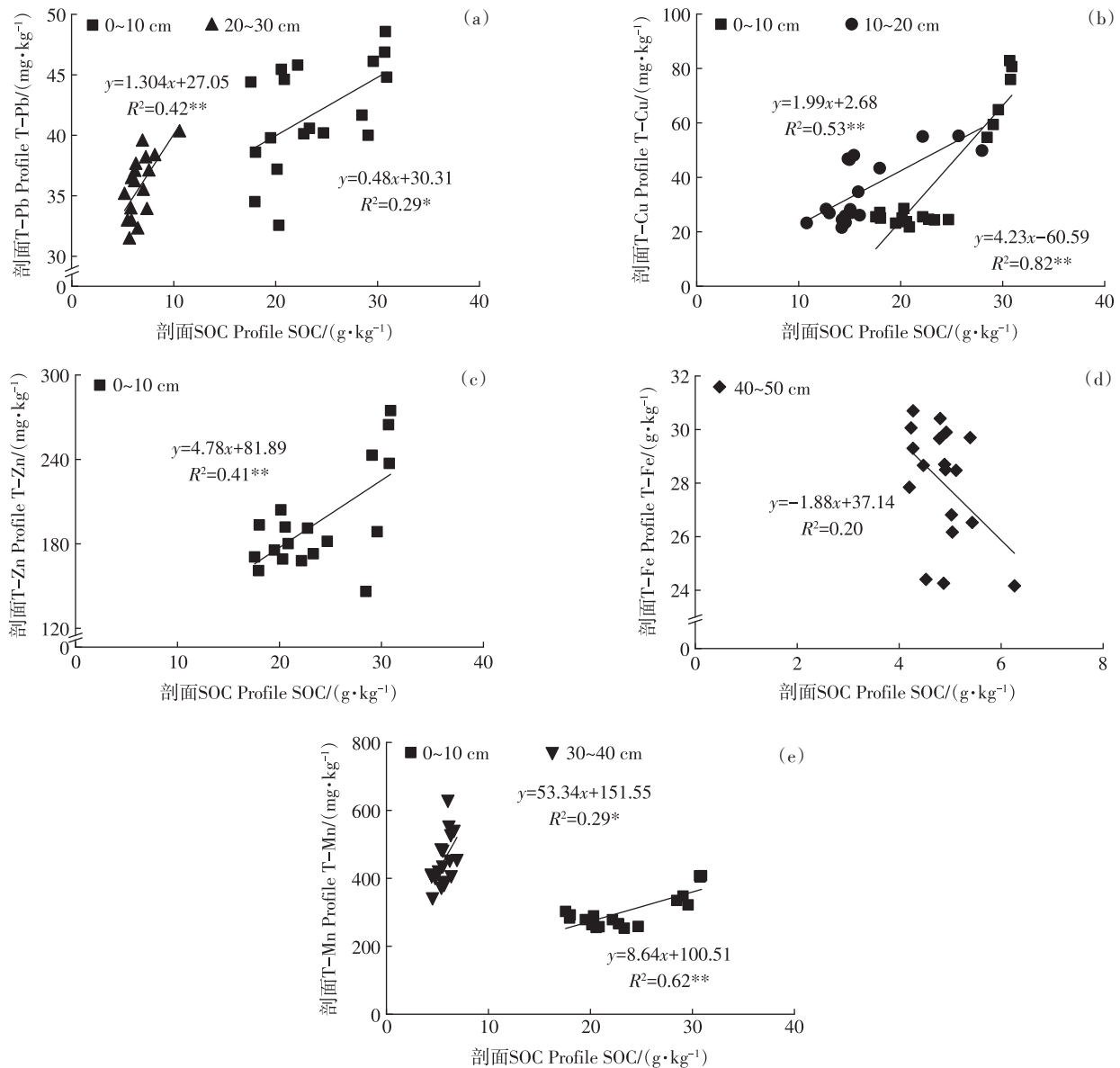


图5 土壤剖面各层中Pb、Cu、Zn、Fe、Mn全量与SOC含量的关系

Figure 5 Relationship between the total content of Pb, Cu, Zn, Fe, Mn and SOC in each layer of soil profile

层土壤中富集,随深度增加而降低。此外,本研究中稻田土壤中的Fe、Mn含量丰富,但以猪粪为主的有机肥中其含量较低,因此施用有机肥未对土壤Fe、Mn的含量产生显著影响。

长期施肥下土壤剖面Pb、Cu和Zn等重金属全量和有效态含量整体表现为耕层含量高于底层,且底层土壤中含量相对较低,这表明在长期施肥下,耕层土壤中的重金属出现了明显的聚集现象。各施肥处理中,尤其是施用高量有机肥处理时,土壤Pb、Cu和Zn的全量和有效态含量分别在剖面0~20 cm和0~30 cm土层呈现表层聚集现象。本试验中有机肥处理施用

的主要是畜禽粪肥,其Pb、Zn和Cu等重金属含量通常较高^[20]。高重金属含量的粪肥施入土壤后,会直接导致土壤重金属的累积与有效性的增加^[26-27]。本研究中,与不施肥和施用化肥相比,施用有机肥加重了土壤剖面重金属的表层聚集现象,提高了Cu、Zn在表层土壤的污染风险,这表明猪粪有机肥的投入增加了外源污染,导致重金属在土壤剖面上层的累积。此外,高量有机肥施用还导致了有效态Pb、Cu和Zn向更深层剖面的迁移,这可能与土壤SOC含量的增高有关^[23]。Fe和Mn的聚集则出现在土壤剖面中下层,主要是稻田的耕作管理措施导致的。

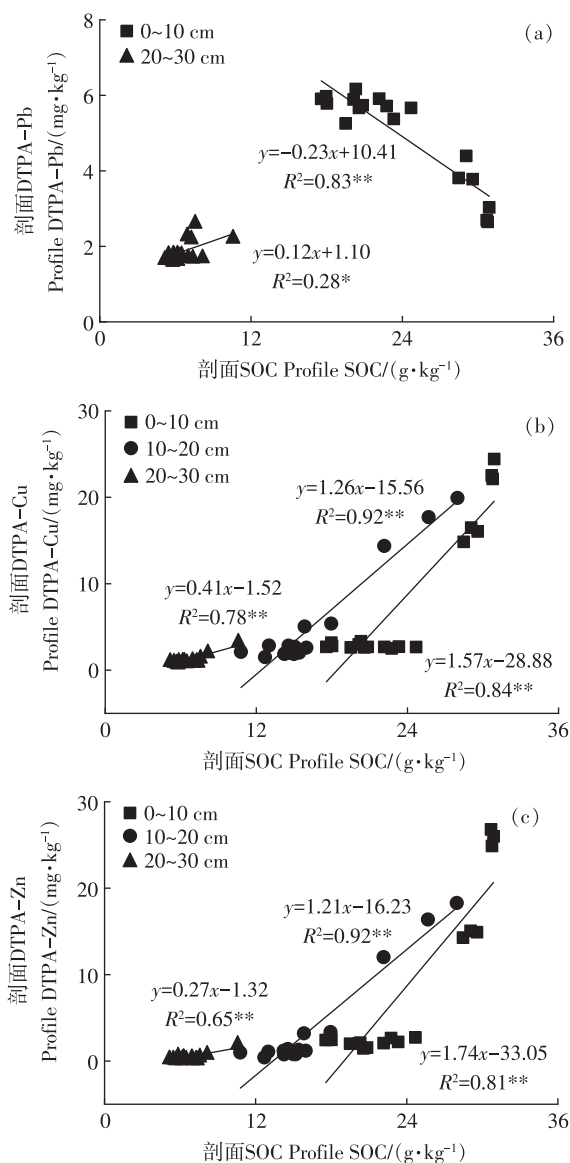


图6 土壤剖面各层中有效态Pb、Cu、Zn与SOC含量的关系
Figure 6 Relationship between the available contents of Pb, Cu, Zn and SOC in each layers of soil profile

3.2 土壤SOC累积与重金属剖面分布的关联

土壤重金属含量及其有效性与SOC呈显著正相关,其原因主要有两个方面:一方面,本研究施用的猪粪有机肥本身含有较高含量的Cu、Zn和Pb,长期施用会导致土壤中相应重金属元素的累积;另一方面,长期施用有机肥增加了土壤SOC含量,尤其是分子量较小和移动能力较强的可溶性SOC含量,其吸附能力较强,可吸附土壤中的重金属,并提升其有效性^[28]。施用猪粪显著提高了土壤中Zn和Cu的有效性,可能是因为Zn和Cu以有效形式存在于猪粪中,猪粪施用后直接提高了土壤Zn和Cu有效态含量,或者是因为

粪肥提高土壤SOC含量和pH,通过络合作用激活Zn和Cu等重金属^[14,23]。张丽芳等^[29]研究也发现,长期施用猪粪显著提高了土壤Cu、Zn等的总量及有效态含量,并提升了土壤SOC及氮、磷养分含量,且两者之间呈显著正相关关系,这表明土壤剖面中SOC分布规律在很大程度上影响了土壤剖面中重金属总量和有效性的分布状态。

已有研究发现,施用高量猪粪、鸡粪时,Cu、Zn等重金属存在明显向土壤深层迁移现象^[27],这可能是因为猪粪、鸡粪分解时会产生大量可溶性有机质和有机酸^[30],这些分解产物会影响重金属的存在形态和土壤颗粒对重金属的吸附,提高重金属的溶解度和移动性,使其更易向土壤下层迁移^[31]。此外,在强降雨或频繁灌溉等环境影响下,土壤结构孔隙和作物根系所造成的水分优势流也会增加重金属向下迁移^[32-33]。有研究认为,表层重金属和SOC含量会影响重金属垂直迁移距离,表层重金属含量越高,其向下的迁移距离会越大^[34]。在本研究中,长期高量有机肥配施化肥处理显著增加了0~20 cm土层中重金属的总量和0~30 cm土层中重金属的有效态含量,加重了剖面重金属在耕层土壤的表层聚集现象,同时也在一定程度上影响了深层土壤(20~60 cm)中Pb、Cu和Zn等的累积和有效性的增加,这表明高量有机肥的长期投入可能会导致剖面表层中重金属向更深层土壤中迁移累积。

综上所述,长期施肥带来的人为干扰会导致土壤剖面上层重金属的含量和有效性提升,这种现象在长期施用有机肥处理中尤为突出。有机肥的长期投入不仅导致了重金属在剖面上层的累积,其高用量还可能提高深层重金属的迁移能力。因此,在控制有机肥品质减少外源重金属投入的同时,还应控制长期投入有机肥的用量,以控制重金属在土壤剖面的累积和迁移,减轻其可能对周边环境带来的潜在污染风险。

4 结论

(1) 双季稻田长期不同施肥模式下,Pb、Cu和Zn在土壤剖面中均呈现表层聚集现象,而Fe和Mn则主要在剖面中下层聚集。

(2) 长期施用猪粪有机肥会显著提高0~20 cm土层中Cu、Zn、Pb的总量及有效态含量,且随有机肥施用量增加而提升幅度增大,但对该土层土壤中Fe和Mn含量无显著影响。

(3) 长期施用猪粪有机肥引起的剖面土壤Cu、Zn、Pb累积和有效态含量升高与其SOC含量的变化

趋势高度一致,且长期投入高量有机肥会加剧Cu、Zn和Pb等重金属在深层土壤中的累积。

参考文献:

- [1] 黄道友,朱奇宏,朱捍华,等. 重金属污染耕地农业安全利用研究进展与展望[J]. 农业现代化研究, 2018, 39(6): 1030-1043. HUANG D Y, ZHU Q H, ZHU H H, et al. Advances and prospects of safety agro-utilization of heavy metal contaminated farmland soil[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2018, 39(6): 1030-1043.
- [2] 贺灵,吴超,曾道明,等. 中国西南典型地质背景区土壤重金属分布及生态风险特征[J]. 岩矿测试, 2021, 40(3): 384-396. HE L, WU C, ZENG D M, et al. Distribution of heavy metals and ecological risk of soils in the typical geological background region of southwest China[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2021, 40(3): 384-396.
- [3] WANG X P, WANG L Q, ZHANG Q, et al. Integrated assessment of the impact of land use types on soil pollution by potentially toxic elements and the associated ecological and human health risk[J]. *Environmental Pollution*, 2022, 299: 118911.
- [4] 廖碧霞,沈文灵,贺灵. 四川省沐川县典型土壤剖面重金属分布特征和生态风险评价[J]. 岩矿测试, 2023, 42(6): 1203-1219. LIAO B X, SHEN W L, HE L. Distribution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in typical soil profiles of Muchuan County, Sichuan Province[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2023, 42(6): 1203-1219.
- [5] ZHANG T, SUN Y F, PARIKH S J, et al. Water-fertilizer regulation drives microorganisms to promote iron, nitrogen and manganese cycling: a solution for arsenic and cadmium pollution in paddy soils[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2024, 477: 135244.
- [6] 穆虹宇,庄重,李彦明,等. 我国畜禽粪便重金属含量特征及土壤累积风险分析[J]. 环境科学, 2020, 41(2): 986-996. MU H Y, ZHUANG Z, LI Y M, et al. Heavy metal contents in animal manure in China and the related soil accumulation risks[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(2): 986-996.
- [7] 刘灿,秦鱼生,赵秀兰. 长期不同施肥对钙质紫色水稻土重金属累积及有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(7): 1494-1502. LIU C, QIN Y S, ZHAO X L. Long-term effect of fertilization on accumulation and availability of heavy metal in a calcareous paddy soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(7): 1494-1502.
- [8] 贾武霞,文炯,许望龙,等. 我国部分城市畜禽粪便中重金属含量及形态分布[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(4): 764-773. JIA W X, WEN J, XU W L, et al. Content and fractionation of heavy metals in livestock manures in some urban areas of China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(4): 764-773.
- [9] LOPES C, HERVA M, FRANCO U A, et al. Inventory of heavy metal content in organic waste applied as fertilizer in agriculture: evaluating the risk of transfer into the food chain[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2011, 18(6): 918-939.
- [10] 杨敏,何璐璐,饶中秀,等. 长期施肥对稻田土壤镉锌铜积累及其有效性的影响[J]. 农业现代化研究, 2021, 42(2): 302-310. YANG M, HE L L, RAO Z X, et al. Effects of long-term fertilization on accumulation and availability of Cd, Zn and Cu in paddy soil[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2021, 42(2): 302-310.
- [11] 关天霞,李彩霞,马国泰,等. 连续施用有机肥对菜田土壤Cu和Zn积累及辣椒产量品质的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(3): 219-225. GUAN T X, LI C X, MA G T, et al. Effects of continuous application of organic fertilizer on Cu and Zn accumulation in soil and the yield and quality of pepper (*Capsicum annuum* L.)[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(3): 219-225.
- [12] 叶必雄,刘圆,虞江萍,等. 施用不同畜禽粪便土壤剖面中重金属分布特征[J]. 地理科学进展, 2012, 31(12): 1708-1714. YE B X, LIU Y, YU J P, et al. Characteristics of the distribution of heavy metals in the profiles of the soils fertilized with different livestock manures[J]. *Progress in Geography*, 2012, 31(12): 1708-1714.
- [13] CUI H B, FAN Y C, FANG G D, et al. Leachability, availability and bioaccessibility of Cu and Cd in a contaminated soil treated with apatite, lime and charcoal: a five-year field experiment[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2016, 134: 148-155.
- [14] HUSSAIN B, LI J M, MA Y B, et al. A field evidence of Cd, Zn and Cu accumulation in soil and rice grains after long-term (27 years) application of swine and green manures in a paddy soil[J]. *Sustainability*, 2021, 13(4): 2404.
- [15] RAO Z X, HUANG D Y, WU J S, et al. Distribution and availability of cadmium in profile and aggregates of a paddy soil with 30-year fertilization and its impact on Cd accumulation in rice plant[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 239: 198-204.
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000. BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd Edition. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [17] 刘春红,张亮,贾学桦,等. 我国土壤重金属污染环境风险评价方法及防治措施探讨[J]. 环境影响评价, 2024, 46(6): 1-5. LIU C H, ZHANG L, JIA X H, et al. 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.
- [18] 王美,李书田,马义兵,等. 长期不同施肥措施对土壤和作物重金属累积的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(1): 63-74. WANG M, LI S T, MA Y B, et al. Effect of long-term fertilization on heavy metal accumulation in soils and crops[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(1): 63-74.
- [19] 郑顺安,刘代丽,章明奎,等. 长期秸秆还田对污染农田土壤与农产品重金属的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(2): 354-359. ZHENG S A, LIU D L, ZHANG M K, et al. Effects of long-term straw returning on heavy metals of soil and agricultural products in the polluted farmland[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(2): 354-359.
- [20] 郝慧娟,陈万明,吕运涛,等. 有机肥中重金属含量分析及在土壤、蔬菜中的累积状况评估[J]. 湖南农业科学, 2018(12): 50-54. HAO H J, CHEN W M, LÜ Y T, et al. Analysis of heavy metal content in organic fertilizers and evaluation of its accumulation in soil and vegetable[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2018(12): 50-54.

- [21] 张树清, 张夫道, 刘秀梅, 等. 规模化养殖畜禽粪主要有害成分测定分析研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(6): 822-829. ZHANG S Q, ZHANG F D, LIU X M, et al. Determination and analysis on main harmful composition in excrement of scale livestock and poultry feedlots[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2005, 11(6): 822-829.
- [22] 夏文建, 张丽芳, 刘增兵, 等. 长期施用化肥和有机肥对稻田土壤重金属及其有效性的影响[J]. 环境科学, 2021, 42(5): 2469-2479. XIA W J, ZHANG L F, LIU Z B, et al. Effects of long-term application of chemical fertilizers and organic fertilizers on heavy metals and their availability in reddish paddy soil[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(5): 2469-2479.
- [23] ZHOU S W, LIU J, XU M G, et al. Accumulation, availability, and uptake of heavy metals in a red soil after 22-year fertilization and cropping[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2015, 22(19): 15154-15163.
- [24] 李嘉奇, 郭自春, 汪亚及, 等. 长期施肥对红壤侵蚀坡耕地重金属积累及其有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2025, 44(4): 964-974. LI J Q, GUO Z C, WANG Y J, et al. Effects of long-term fertilization on heavy metals accumulation and bioavailability in sloping cropland of red soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2025, 44(4): 964-974.
- [25] WANG X B, LIU W X, LI Z G, et al. Effects of long-term fertilizer applications on peanut yield and quality and plant and soil heavy metal accumulation[J]. *Pedosphere*, 2020, 30(4): 555-562.
- [26] ZHEN H Y, JIA L, HUANG C D, et al. Long-term effects of intensive application of manure on heavy metal pollution risk in protected-field vegetable production[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 263: 114552.
- [27] 何梦媛, 董同喜, 茹淑华, 等. 畜禽粪便有机肥中重金属在土壤剖面中积累迁移特征及生物有效性差异[J]. 环境科学, 2017, 38(4): 1576-1586. HE M Y, DONG T X, RU S H, et al. Accumulation and migration characteristics in soil profiles and bioavailability of heavy metals from livestock manure[J]. *Environmental Science*, 2017, 38(4): 1576-1586.
- [28] DUMAT C, QUENEA K, BERMOND A, et al. Study of the trace metal ion influence on the turnover of soil organic matter in cultivated contaminated soils[J]. *Environmental Pollution*, 2006, 142(3): 521-529.
- [29] 张丽芳, 夏文建, 张文学, 等. 长期施用猪粪和化肥对稻田土壤Cu、Zn和Cd含量及有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(9): 1944-1954. ZHANG L F, XIA W J, ZHANG W X, et al. Effects of long-term application of pig manure and chemical fertilizers on soil Cu, Zn, and Cd contents and their availability in paddy soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(9): 1944-1954.
- [30] 王林权, 周春菊, 王俊儒, 等. 鸡粪中的有机酸及其对土壤速效养分的影响[J]. 土壤学报, 2002, 39(2): 268-275. WANG L Q, ZHOU C J, WANG J R, et al. Organic acids in chicken feces and their effects on availability of nutrients in loess soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(2): 268-275.
- [31] FAN T T, WANG Y J, LI C B, et al. Effects of soil organic matter on sorption of metal ions on soil clay particles[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2015, 79(3): 794-802.
- [32] 孙福鑫, 宋莹. 降雨淋溶作用下铜矿尾矿库土壤的重金属迁移规律研究[J]. 有色金属(矿山部分), 2024, 76(4): 142-148. SUN F X, SONG Y. Study on the migration law of heavy metals in the soil of copper tailings pond under rainfall leaching[J]. *Nonferrous Metals (Mining Section)*, 2024, 76(4): 142-148.
- [33] LIU K H, LI C M, TANG S Q, et al. Heavy metal concentration, potential ecological risk assessment and enzyme activity in soils affected by a lead-zinc tailing spill in Guangxi, China[J]. *Chemosphere*, 2020, 251: 126415.
- [34] STERCKEMAN T, DOUAY F, PROIX N, et al. Vertical distribution of Cd, Pb and Zn in soils near smelters in the north of France[J]. *Environmental Pollution*, 2000, 107(3): 377-389.