

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

张丽芳, 夏文建, 张文学, 刘秀梅, 李祖章, 刘光荣

引用本文:

张丽芳, 夏文建, 张文学, 刘秀梅, 李祖章, 刘光荣. 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.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1021>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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

刘灿, 秦鱼生, 赵秀兰

农业环境科学学报. 2020, 39(7): 1494–1502 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0012>

长期施用有机物料对稻田生态系统服务功能的影响

全孝飞, 颜晓元, 王书伟, 周伟

农业环境科学学报. 2017, 36(7): 1406–1415 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0401>

长期施肥对土壤重金属积累和有效性的影响

王腾飞, 谭长银, 曹雪莹, 欧阳达, 聂军, 王伯仁, 何其辉, 梁玉峰

农业环境科学学报. 2017, 36(2): 257–263 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-0986>

猪场粪水施用对设施白菜及土壤重金属的影响

程娟, 刘沐衡, 肖能武, 杨柳, 杜会英, 杜连柱, 张克强

农业环境科学学报. 2021, 40(11): 2559–2567 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1030>

有机肥中重金属对菜田土壤微生物群落代谢的影响

林辉, 孙万春, 王飞, 王斌, 翁颖, 马军伟, 符建荣

农业环境科学学报. 2016, 35(11): 2123–2130 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-0674>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

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.



开放科学 OSID

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

张丽芳¹, 夏文建^{1*}, 张文学¹, 刘秀梅¹, 李祖章¹, 刘光荣^{2*}

(1. 江西省农业科学院土壤肥料与资源环境研究所/国家红壤改良工程技术研究中心/国家农业环境宜春观测实验站, 南昌 330200; 2. 江西省农业科学院, 南昌 330200)

摘要:为研究有机肥与化肥处理下稻田土壤 Cu、Zn、Cd 含量之间的差异,并探明关键影响因子,本研究利用持续了 35 a 的长期定位试验,分析了土壤重金属全量及有效态、土壤理化性质和水稻产量,并利用多种统计分析方法研究了猪粪组和化肥组土壤 Cu、Zn 和 Cd 与土壤理化指标之间的关系。结果表明:与对照(不施肥)相比,长期施用猪粪使土壤 Cu、Zn、Cd 全量和有效态含量分别提高了 134%~239%、57%~124%、58%~171% 和 191%~380%、285%~811%、61%~184%,并显著提升了土壤有机质(SOM)、阳离子交换量(CEC)及氮磷养分含量;而化肥处理对土壤重金属全量及有效态含量无显著影响,对土壤理化指标的提升相对较小。冗余分析(RDA)发现,猪粪组土壤全氮(TN)、CEC 和速效磷(AP)分别解释了重金属方差变异的 89.1%、6.4% 和 2.0%,化肥组土壤 pH 和全磷(TP)分别解释了方差变异的 45.0% 和 22.2%,达到显著水平。进一步通过偏最小二乘路径模型(PLS-PM)分析发现,猪粪对重金属有效态的贡献远大于化肥,主要通过影响土壤重金属全量和 CEC 从而影响重金属有效性,其路径系数分别为 0.621 7 和 0.295 3,均达到显著水平。猪粪组土壤重金属与理化指标之间由于“同源”关系呈显著正相关,而化肥组两者的关系受水稻生长活动等因素影响较大。研究表明,长期施肥可以通过调控土壤理化指标等影响重金属有效性,施用猪粪进行稻田土壤培肥的同时,需要注意土壤重金属的累积风险。

关键词:长期施肥;稻田;铜;锌;镉;有效性;偏最小二乘路径模型(PLS-PM)分析

中图分类号:S153.6 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2022)09-1944-11 doi:10.11654/jaes.2021-1021

Effects of long-term application of pig manure and chemical fertilizers on soil Cu, Zn, and Cd contents and their availability in paddy soil

ZHANG Lifang¹, XIA Wenjian^{1*}, ZHANG Wenxue¹, LIU Xiumei¹, LI Zuzhang¹, LIU Guangrong^{2*}

(1. Institute of Soil Fertilizer and Resource Environment, Jiangxi Academy of Agricultural Sciences / National Engineering and Technology Research Center for Red Soil Improvement / Yichun Scientific Observing and Experimental Station of Agro-Environment, Nanchang 330200, China; 2. Jiangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanchang 330200, China)

Abstract: This study investigated the effects of long-term application of pig manure and chemical fertilizers on paddy soil in a field experiment that started in 1984. The total and available contents of soil copper (Cu), zinc (Zn), cadmium (Cd), soil physicochemical properties, grain yields, and their relationships were analyzed. The treatments included CK (control, no fertilizer), PK (chemical fertilizer P and K), NK (chemical fertilizer N and K), NP (chemical fertilizer N and P), NPK (chemical fertilizer N, P and K), and different

收稿日期:2021-09-05 录用日期:2022-05-09

作者简介:张丽芳(1983—),女,湖北咸宁人,硕士,助理研究员,主要从事土壤重金属污染防治研究。E-mail: ydzlf001@126.com

*通信作者:夏文建 E-mail: xiawenjian@163.com; 刘光荣 E-mail: lgrts@vip.sina.com

基金项目:国家自然科学基金项目(32060726, 31560582);江西省科技项目(20203BBF63044, 20221ZDH04057)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China (32060726, 31560582); The Scientific Research Foundation of Jiangxi Province (20203BBF63044, 20221ZDH04057)

proportions of pig manure plus chemical fertilizer (M1NPK, 30% manure + 70%NPK; M2NPK, 50% manure + 50%NPK; M3NPK, 70% manure + 30%NPK). The results showed that compared with CK, pig manure treatments significantly increased the total and available contents of Cu, Zn, and Cd by 134%~239%, 57%~124%, and 58%~171%, and 191%~380%, 285%~811%, and 61%~184%, respectively, and also significantly increased the soil organic matter(SOM), cation exchange capacity(CEC), total nitrogen(TN), total phosphorus(TP), alkali hydrolyzed nitrogen(AN), and available phosphorus(AP); however, the effects of chemical fertilizer treatments were not significant. Redundancy analysis(RDA) revealed that the soil TN, CEC, and AP accounted for 89.1%, 6.4%, and 2.0% of the variation in heavy metals, respectively, in pig manure treatments, whereas pH and TP accounted for 45.0% and 22.2% of the variance variation in heavy metals, respectively in chemical fertilizer treatments. Partial least squares path model(PLS-PM) analysis showed that the contribution of pig manure on the availability of heavy metals was much greater than that of chemical fertilizers. The availability of heavy metals was mainly affected by total heavy metals(THM) and CEC, and the path coefficients were 0.621 7 and 0.295 3, respectively. There was a significant positive correlation between heavy metals and soil physicochemical properties in pig manure treatments because of a homologous relationship, whereas the relationship among chemical fertilizer treatments was mainly affected by rice growth and harvest. This study indicated that when pig manure was used to improve soil fertility, long-term fertilization affected the availability of heavy metals by regulating soil physicochemical properties; hence, more attention should be paid to the risk of heavy metal accumulation in soils.

Keywords: long-term fertilization; reddish paddy soil; Cu; Zn; Cd; availability; partial least squares path model(PLS-PM) analysis

施肥是提高作物产量和品质、培肥土壤地力的重要措施^[1-2],然而长期施肥可能造成土壤重金属累积^[3-6],其中畜禽粪便^[7-8]和磷肥^[9]等通常被认为是土壤重金属的主要农业来源。大量研究表明,长期施用猪粪等有机肥容易造成土壤中Cu、Zn和Cd全量累积^[10-12],但对重金属有效性的影响结论不一。杨敏等^[13]发现稻田施用厩肥30 a后,土壤Cu、Zn和Cd全量显著提高118.4%~180.2%、63.9%~82.6%、35.0%~80.0%,有效态显著提高336.6%~573.2%、407.1%~783.2%、28.6%~71.4%,有机肥中较高的Cu、Zn和Cd含量是土壤重金属累积和有效性提高的主要原因;而何其辉等^[14]却发现施用猪粪后,红黄泥土壤Cu、Pb、Cd有效态含量比对照降低了22.1%、13.4%、20.0%,同时也降低了水稻秸秆中的Cd含量。众多研究发现作物对重金属的吸收与土壤重金属全量之间相关性较低,而主要受有效态含量影响^[13-15]。农田土壤中重金属有效性受肥料来源、用量和土壤环境等多因素影响^[16-17],其含量并不一定随全量的增加而升高。

现有关于施肥对土壤重金属的影响研究,多侧重于重金属全量累积或有效态含量变化等方面,而对于重金属有效性的影响机制探索相对较少。土壤重金属有效态的提取和定量表征是土壤污染风险评估和修复技术效果评价的重要基础,但目前尚没有公认的土壤重金属有效性的测定与评价方法^[18]。当前应用较为广泛的方法是化学提取法,包括单一提取法和连续分级提取法,近年来梯度扩散薄膜技术(DGT)也被广泛应用到重金属有效性的评价中^[19]。陈莹等^[18]筛

选评价了DGT技术和多种提取剂对酸性紫色土、中性紫色土、石灰性黄壤和钙质紫色土中重金属有效态的提取效果,认为土壤Cd提取以DGT技术最好,而化学提取剂中以HCl较为适宜。王美等^[20]使用BCR连续提取法分析了长期施肥对土壤Cu、Zn和Cd形态的影响,认为Cu、Zn、Cd的全量和EDTA-可提取态含量是黑土和红壤重金属形态的主要影响因子。土壤pH和有机质均会影响土壤Cu、Zn等重金属的有效性^[21],杨敏等^[13]认为土壤磷会影响重金属的有效性,但其作用机制还有待研究。长期施用猪粪等有机肥虽然造成土壤Cu、Zn和Cd全量增加^[11,13],但更重要的作用是增加了土壤有机质,提高了土壤氮、磷等养分含量,并改变了土壤pH等理化性状^[11]。长期施肥条件下土壤pH、土壤有机质、阳离子交换量、氮、磷等均会影响重金属有效性^[22-24],但相关理化性质的变化对重金属有效性的贡献尚不清楚。长期施用猪粪和化肥处理之间的关键影响因子是否一致,以及环境因子对Cu、Zn和Cd有效性的影响机制还有待深入研究。

为了研究长期施用猪粪和化肥对稻田土壤Cu、Zn、Cd累积和有效性的影响,以及土壤环境作用机制,本文利用持续了35 a的长期定位试验,分析了土壤Cu、Zn和Cd的全量及有效态含量,通过相关分析、逐步回归方程、冗余分析和偏最小二乘路径模型(PLS-PM)等统计方法分析土壤Cu、Zn和Cd与环境因子之间的关系,以期解析土壤Cu、Zn和Cd有效性的关键影响因子,以及长期施用有机肥和化肥处理之间的差异,为减少红壤稻田Cu、Zn和Cd环境风险提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

长期定位试验于1984年开始^[11],地点位于江西省农业科学院试验基地(28°34'N, 115°56'E),该区域处于中亚热带,海拔高度25 m,年均温17.5℃,无霜期280 d,降雨量约1 600 mm,土壤为第四纪酸性红壤发育的中潜黄泥田。试验前土壤耕层基础理化状况为:pH 6.5,有机质25.6 g·kg⁻¹,全氮1.36 g·kg⁻¹,全磷0.49 g·kg⁻¹,缓效钾240 mg·kg⁻¹,速效氮81.6 mg·kg⁻¹,速效磷20.8 mg·kg⁻¹,速效钾35.0 mg·kg⁻¹,阳离子交换量(CEC)7.54 cmol·kg⁻¹。当地表层土壤中Cu、Zn、Cd的平均含量分别为47.0、115、0.171 mg·kg⁻¹^[25]。

1.2 试验设计

长期定位试验共设置8个处理,分别为:不施肥(CK)、施用磷钾化肥(PK)、施用氮钾化肥(NK)、施用氮磷化肥(NP)、施用氮磷钾化肥(NPK)、70%化肥+30%有机肥(M1NPK)、50%化肥+50%有机肥(M2NPK)、30%化肥+70%有机肥(M3NPK)。试验区常年种植模式为早稻-晚稻-冬闲,小区面积33.3 m²,水泥埂分隔,独立排灌。早稻季施用纯N 150 kg·hm⁻²,晚稻季施用纯N 180 kg·hm⁻²,早稻和晚稻季各施P₂O₅ 60 kg·hm⁻²、K₂O 150 kg·hm⁻²。各处理肥料用量详见表1。肥料品种:氮肥为尿素,磷肥为过磷酸钙(含P₂O₅ 12%),钾肥为氯化钾(含K₂O 60%),均为国内生产。有机肥:早稻为紫云英,晚稻为猪粪。猪粪含水率约85%,N 0.45%、P₂O₅ 0.19%、K₂O 0.6%;紫云英含水率约88%,N 0.3%、P₂O₅ 0.08%、K₂O 0.23%。猪粪中Cu、Zn、Cd含量分别为110、280、0.27 mg·kg⁻¹,紫云英中分别为1.3、3.8、0.04 mg·kg⁻¹,尿素中分别为0.13、2.31、0 mg·kg⁻¹,氯化钾中分别为1.31、5.80、0 mg·kg⁻¹,过磷酸钙中分别为5.80、22.80、0.33 mg·kg⁻¹。

磷肥和有机肥全作基肥,氮肥50%作基肥、25%作分蘖肥、25%作幼穗分化肥,钾肥全作追肥,50%作分蘖肥、50%作幼穗分化肥。所有小区的播种、移栽、灌溉和打药等日常管理措施与当地习惯相同。

1.3 研究方法

2018年晚稻收获后,采用5点取样法采集耕层(0~20 cm)土壤样品。样品风干磨细过2 mm和0.149 mm筛,用于土壤理化性质分析。土壤化学性质采用常规方法测定^[26]:土壤pH(2.5:1)采用酸度计电位法;CEC采用乙酸铵(NH₄OAc)交换法;土壤有机质(SOM)采用重铬酸钾外加热法;全氮(TN)用凯式定氮法;全磷(TP)用高氯酸浓硫酸消解-钼锑抗比色法;速效氮(AN)采用碱解扩散法;速效磷(AP)用Olsen法;土壤重金属全量(THM)采用HCl-HNO₃-HClO₄消煮,重金属有效态采用0.1 mol·L⁻¹ HCl溶液浸提^[27],Cu、Zn和Cd含量采用原子吸收分光光度计(PinAAcle 900T,美国PerkinElmer公司)测定。土壤重金属全量和有效态含量分析过程中分别采用国家标准样GSS-22及ASA-5a进行质量控制。水稻收获季,每个小区单打单收、单独记产,然后换算为每公顷产量,文中产量(GY)为2018年早稻和晚稻的合计总产量。

1.4 数据处理

试验数据利用Excel 2016进行整理、统计分析、计算和绘图,运用SPSS 17.0进行单因素方差分析和差异显著性检验(LSD法, $P < 0.05$);采用R(4.1.0)中的“pheatmap”包进行热图聚类分析,“corrplot”包进行相关性分析。采用“plsrm”包进行偏最小二乘路径回归(PLS-PM)分析,其中隐变量土壤碳、氮、磷(CNP)由SOM、TN、TP、AN和AP构成,重金属全量(THM)由全铜(TCu)、全锌(TZn)和全镉(TCd)构成,重金属有效态(AHM)由有效铜(ACu)、有效锌(AZn)和有效镉

表1 不同试验处理每年肥料纯养分用量(kg·hm⁻²)

Table 1 Annual application rates of fertilizer net nutrients for different treatments (kg·hm⁻²)

处理 Treatment	猪粪 Pig manure (m _N :m _{P₂O₅} :m _{K₂O})	紫云英 Milk vetch (m _N :m _{P₂O₅} :m _{K₂O})	尿素 Urea (N)	过磷酸钙 Superphosphate(P ₂ O ₅)	氯化钾 Potassium chloride(K ₂ O)
CK	0	0	0	0	0
PK	0	0	0	120	300
NK	0	0	330	0	300
NP	0	0	330	120	0
NPK	0	0	330	120	300
M1NPK	54:23:72	44:12:34	232	85	194
M2NPK	90:38:120	74:20:57	165	62	123
M3NPK	126:53:168	104:28:80	100	40	71

(ACd)构成,化肥(CF)由化肥氮、磷和钾用量构成,猪粪(PM)为猪粪用量,模型拟合优度GoF大于0.7表明整体预测性能较优^[28]。聚类之前将数据进行归一化处理,距离算法采用欧几里德距离,聚类采用最大距离法,通过层次聚类获得聚类树;采用“vegan”包进行环境因子蒙特尔检验(mantel test)和共线性分析,利用Canoco 5.0软件进行冗余分析(RDA)制图。

2 结果与分析

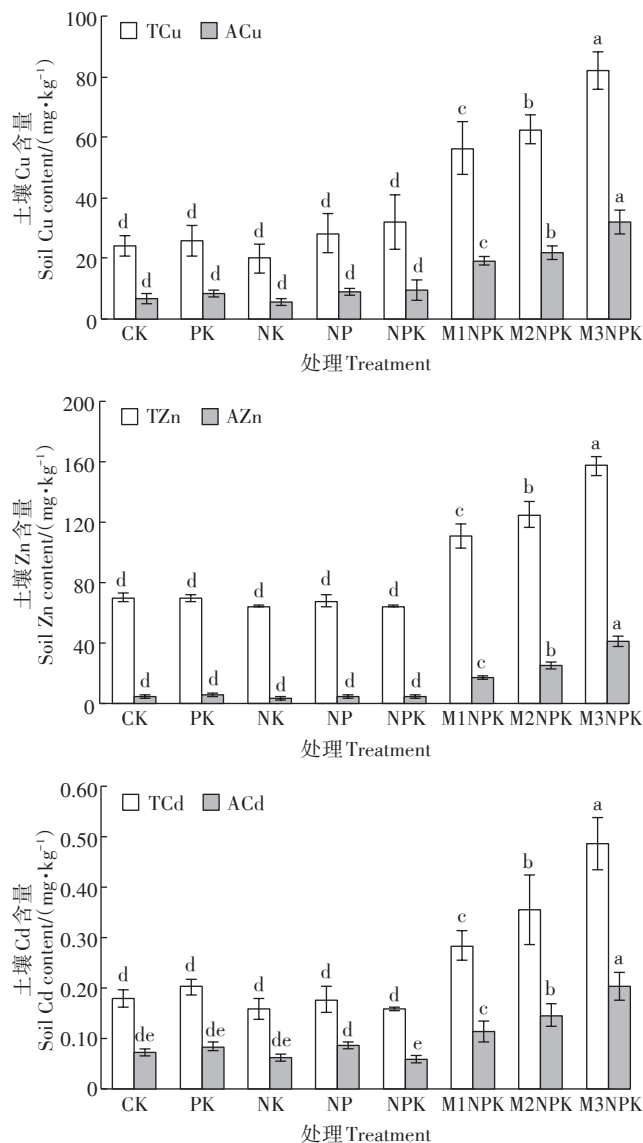
2.1 长期不同施肥土壤Cu、Zn和Cd含量

长期施肥土壤全量Cu、Zn、Cd的含量范围分别为19.96~82.01、64.21~157.02、0.16~0.49 mg·kg⁻¹(图1)。化肥处理(PK、NK、NP和NPK)下土壤Cu、Zn和Cd的含量与CK相比无显著差异,猪粪处理(M1NPK、M2NPK、M3NPK)下土壤Cu、Zn、Cd全量范围为56.5~82.01、110.24~157.02、0.28~0.49 mg·kg⁻¹,比CK提高了134%~239%、57%~124%、58%~171%。根据《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018),土壤pH 5.5~6.5时水田土壤Cu、Zn、Cd的风险筛选值分别为50、200、0.4 mg·kg⁻¹,3个猪粪处理下的土壤Cu以及M3NPK处理下的土壤Cd含量均超过了筛选值。

化肥处理(PK、NK、NP和NPK)下土壤Cu、Zn、Cd有效态含量范围为5.53~9.53、3.50~5.56、0.06~0.09 mg·kg⁻¹,与CK相比无显著差异。猪粪处理(M1NPK、M2NPK和M3NPK)下土壤Cu、Zn、Cd有效态含量范围为19.38~32.00、17.22~40.71、0.12~0.20 mg·kg⁻¹,比CK提高了191%~380%、285%~811%、61%~184%。

2.2 长期施肥对土壤理化性质和水稻产量的影响

经过长达35 a不同施肥处理,多数土壤理化性质发生了显著变化(表2)。土壤pH范围为5.17~6.05,各施肥处理与CK相比差异不显著,但NPK和M3NPK处理之间差异达显著水平;SOM含量范围为37.34~58.38 g·kg⁻¹,CEC范围为6.68~11.31 cmol·kg⁻¹,与CK和化肥处理相比,猪粪处理(M1NPK、M2NPK和M3NPK)显著提高了土壤SOM和CEC。土壤氮、磷养分含量主要受施肥影响,施用猪粪全面提高了土壤氮、磷含量,而施用氮、磷等化肥提高了土壤中对应元素的含量。与CK相比,猪粪处理土壤TN、TP、AN和AP含量分别提高54%~66%、209%~361%、69%~104%、860%~1 057%,达显著水平;PK处理土壤TP和AP分别提高了139%和747%,NK处理土壤TN提高了18%,NP处理土壤TN、TP和AP提高了15%、117%



不同字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。下同
Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments ($P < 0.05$). The same below

图1 长期不同施肥处理土壤Cu、Zn和Cd全量和有效态含量
Figure 1 Total and available contents of Cu, Zn and Cd in reddish paddy soil under long-term fertilization

和506%,NPK处理土壤TP、AN和AP分别提高了103%、29%和343%,均达显著水平。与CK和化肥处理相比,长期施用猪粪显著提高了双季水稻总产量。2018年CK处理水稻总产量为7 044 kg·hm⁻²,猪粪处理为12 060~12 488 kg·hm⁻²,比CK提高了71%~77%;化肥处理(PK、NK、NP和NPK)水稻总产量为8 226~11 569 kg·hm⁻²,比CK提高了17%~64%。

通过土壤理化性质的heatmap聚类分析(图2)发现,不同施肥处理可以分为两类:化肥及CK处理

表2 长期施肥对土壤理化性质和产量的影响

Table 2 Soil physiochemical properties and grain yield under long-term fertilizations

处理 Treatment	pH	土壤有机质 Soil organic matter/(g·kg ⁻¹)	阳离子交换量 Cation exchange capacity/(cmol·kg ⁻¹)	全氮 Total nitrogen/ (g·kg ⁻¹)	全磷 Total phosphorus/ (g·kg ⁻¹)	速效氮 Alkali hydrolyzed nitrogen/(mg·kg ⁻¹)	速效磷 Available phosphorus/ (mg·kg ⁻¹)	籽粒产量 Grain yield/ (kg·hm ⁻²)
CK	5.71±0.30ab	37.34±3.42e	6.68±0.36d	1.85±0.11c	0.69±0.05f	114.52±18.34d	5.73±2.78d	7 044±143f
PK	5.72±0.29ab	39.46±1.44de	7.18±0.09d	1.99±0.27bc	1.65±0.11d	126.76±8.48cd	48.53±11.10b	8 226±304e
NK	5.73±0.50ab	43.16±4.53cd	6.79±0.39d	2.18±0.13b	0.65±0.02f	130.18±19.99cd	3.51±0.32d	10 467±378c
NP	5.45±0.20ab	41.51±1.35cde	7.35±0.56d	2.13±0.14b	1.50±0.11de	142.91±8.97cd	34.72±4.92c	9 537±100d
NPK	5.17±0.30b	44.36±3.22c	7.57±0.50d	2.04±0.09bc	1.40±0.07e	147.80±19.99c	25.37±12.38c	11 569±277b
M1NPK	5.58±0.14ab	49.70±2.22b	8.79±0.33c	2.84±0.17a	2.13±0.10c	199.19±19.72b	55.00±9.13ab	12 271±212a
M2NPK	5.82±0.38ab	53.32±1.20b	9.81±0.65b	2.89±0.12a	2.40±0.20b	193.81±21.63b	55.78±2.10ab	12 060±293a
M3NPK	6.05±0.65a	58.38±0.58a	11.31±0.65a	3.08±0.05a	3.18±0.21a	233.94±10.31a	66.31±2.29a	12 488±146a

注:数据为平均值±标准差(n=3)。不同字母表示处理间差异显著(P<0.05)。
Note: Data are means ± standard deviation(n=3). Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments(P<0.05).

(CK、PK、NK、NP、NPK)和施用猪粪处理(M1NPK、M2NPK、M3NPK)。同时土壤理化指标可以分为三类:第一类为土壤pH,受施肥影响较小;第二类为TP和AP,受猪粪和磷肥影响较大;第三类包括SOM、CEC、TN和AN,受猪粪和氮肥影响较大。

2.3 土壤重金属含量与土壤物理化学性质及产量之间的相关性

考虑到长期施用猪粪与化肥处理之间土壤Cu、Zn和Cd以及土壤理化性质存在显著差异,将数据分为猪粪组(NPK、M1NPK、M2NPK和M3NPK)和化肥组(CK、PK、NK、NP和NPK)以及全处理组分别进行相关性分析。

猪粪组和全处理组呈现一致的规律,除猪粪组TCu、ACu与土壤pH相关性不显著外,土壤重金属与各土壤理化指标及产量之间均呈显著正相关(图3A、图3C)。化肥组则呈现截然不同的规律,土壤TCu和ACu与土壤理化指标间相关性相对较高,其中与TP、CEC和AN呈显著正相关,而与土壤pH呈显著负相关;土壤TZn与SOM和产量呈显著负相关,而AZn与TP和AP呈显著正相关;土壤TCd受pH、AN、SOM和产量影响较大,其中与pH呈正相关,与SOM、AN和产量呈显著负相关,而ACd仅与AP呈显著正相关(图3B)。长期不同施肥处理影响土壤重金属与土壤理化指标之间的相关性,猪粪组与化肥组之间存在明显不同的规律,预示着两组不同施肥措施对重金属累积和有效性有着不同的影响机制。

进一步利用逐步回归方程分析了土壤ACu、AZn和ACd含量与土壤理化指标及产量之间的关系,结果见表3。猪粪组和化肥组土壤重金属有效态含量的主要影响因素不一致,猪粪组主要受TP、SOM和CEC影响;而化肥组主要受AP、CEC和pH影响,同时ACu和ACd受到水稻生长吸收的影响较大,产量增加会造成ACu和ACd含量下降。全处理组显示土壤ACu、AZn和ACd含量主要受CEC、TP和AN影响,其中水

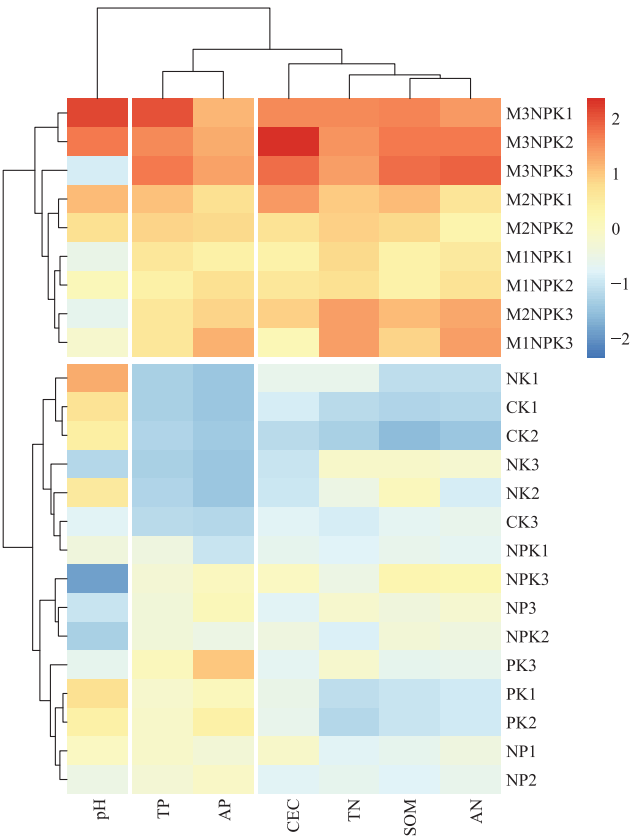
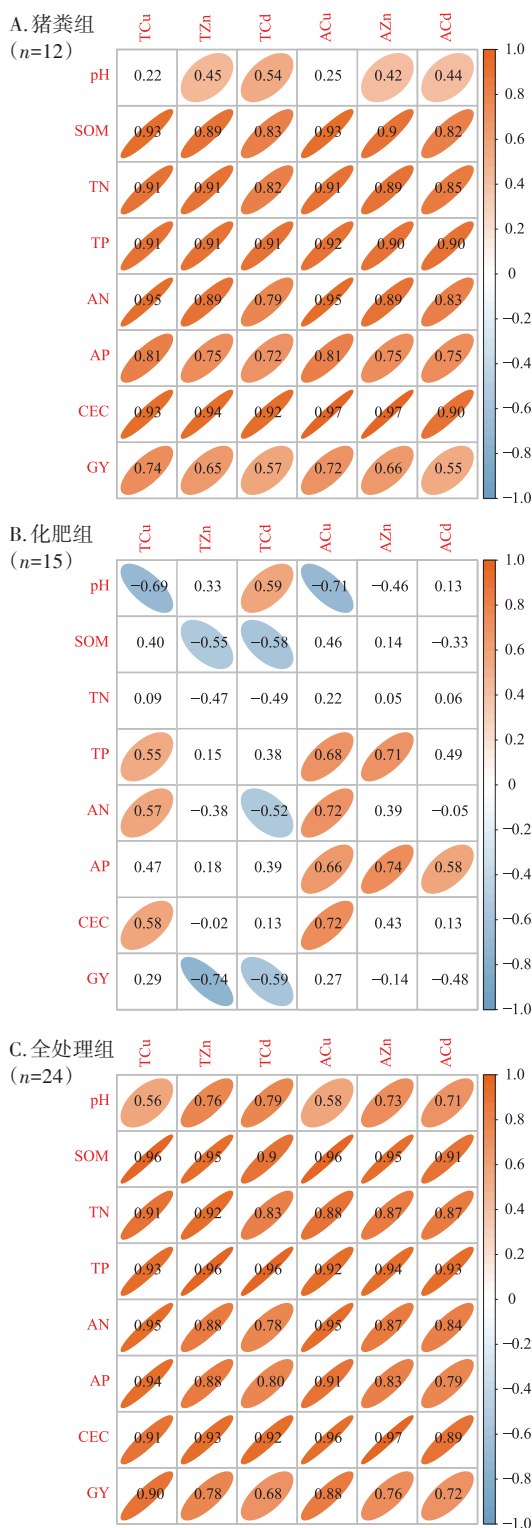


图2 长期不同施肥土壤理化性质的heatmap聚类分析

Figure 2 Cluster heatmap of the physiochemical properties of paddy soil under long-term fertilization



橙色椭圆表示土壤重金属含量与理化指标之间呈显著正相关($P < 0.05$),蓝色椭圆表示呈显著负相关($P < 0.05$)

Orange ellipse indicates a significant positive correlation between heavy metals contents and soil physiochemical indexes ($P < 0.05$), blue ellipse indicates a significant negative correlation ($P < 0.05$)

图3 土壤Cu、Zn和Cd与土壤理化指标之间的相关关系

Figure 3 Correlation between soil Cu, Zn, Cd and soil physiochemical properties

表3 土壤有效态Cu、Zn和Cd含量与土壤理化指标及水稻产量之间的逐步回归方程

Table 3 Stepwise regression models for available contents of Cu, Zn and Cd with soil physiochemical properties and grain yields

处理组 Treatment group	回归方程 Regression equation	R^2	n	P
猪粪组 Pig manure group	$ACu=1.50SOM-56.21$	0.930	12	<0.001
	$AZn=5.12CEC+9.04TP-46.58$	0.973	12	<0.001
	$ACd=0.082TP-0.055$	0.903	12	<0.001
化肥组 Chemical fertilizer group	$ACu=2.99CEC-0.43pH-5.05 \times 10^{-4}GY+15.22$	0.831	15	<0.001
	$AZn=0.035AP+3.80$	0.507	15	0.002
	$ACd=4.09 \times 10^{-4}AP-3.86 \times 10^{-6}GY+0.10$	0.501	15	0.006
全处理组 Total treatment group	$ACu=3.21CEC+0.12AN-7.32 \times 10^{-4}GY-24.15$	0.975	24	<0.001
	$AZn=7.74CEC-50.06$	0.932	24	<0.001
	$ACd=0.015CEC+0.028TP-0.062$	0.830	24	<0.001

稻产量对ACu含量影响较大。

2.4 土壤Cu、Zn和Cd的冗余分析

为了更好地揭示土壤理化性质与重金属之间的相互作用关系,本研究将土壤Cu、Zn和Cd看作物种,将土壤理化指标作为环境因子,进行冗余分析(RDA)。结果表明,土壤重金属与土壤理化指标间存在较强的约束关系,不同处理组关键的影响因素不同。猪粪组土壤重金属变异主要受TN、CEC和AP影响,其分别解释了方差变异的89.1%、6.4%和2.0%,达到显著水平(图4A);化肥组则主要受土壤pH和TP影响,其分别解释了方差变异的45.0%和22.2%,达到显著水平(图4B);全处理组与猪粪组土壤重金属变异主要影响因子较为相似,土壤CEC、TN、AP和pH分别解释了方差变异的87.7%、4.4%、1.4%和1.1%,达到显著水平(图4C)。RDA结果反映了土壤Cu、Zn、Cd与土壤pH、CEC、TN、TP、AP之间有较强的关联,猪粪组和化肥组主要影响因子存在明显的差异。

2.5 土壤Cu、Zn和Cd有效性的PLS-PM分析

PLS-PM是一种研究多个观测变量因果关系的路径分析方法,本文通过PLS-PM构建了施肥影响水稻产量、土壤理化性质和THM,进而影响AHM的路径模型(图5),拟合优度达0.829 8,大于0.7,表明模型的整体预测性能较优。猪粪和化肥对Cu、Zn和Cd有效态的间接效应系数分别为0.969 0和-0.009 5,其中猪粪通过THM、CEC和CNP的间接效应系数较高,分别为0.608 3、0.291 4和0.176 5,而化肥通过各参数的效应系数均较低(表4)。施肥主要通过影响CEC

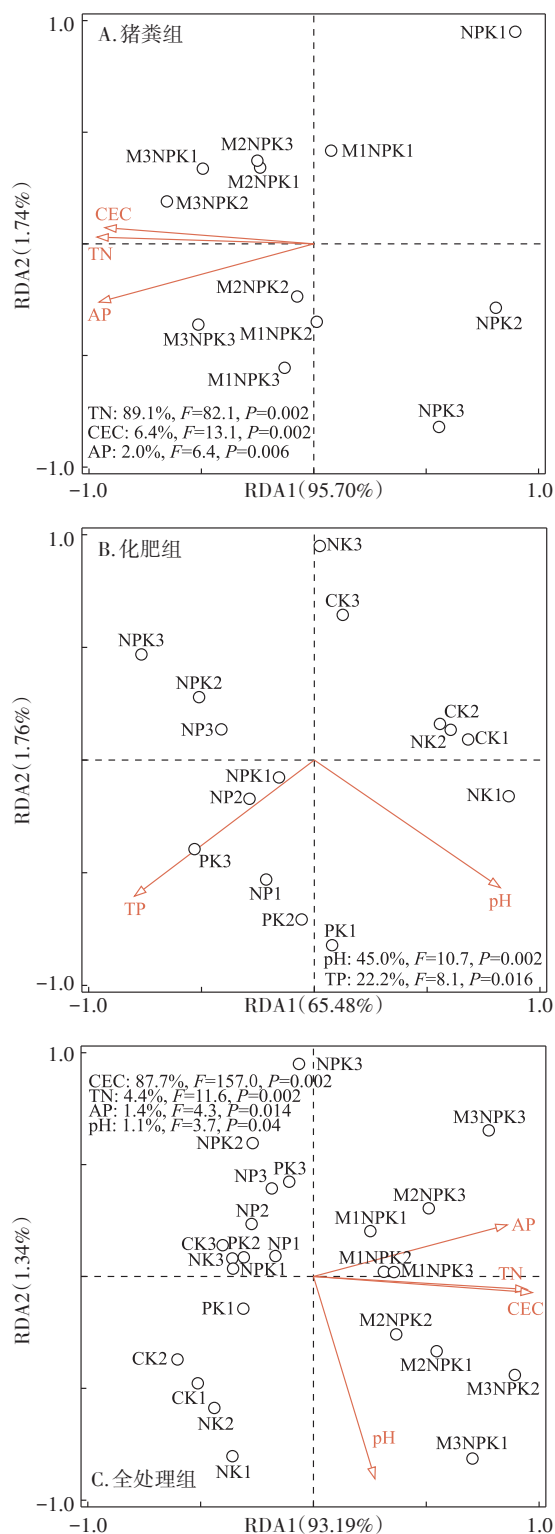


图4 土壤Cu、Zn和Cd与土壤理化指标的冗余分析

Figure 4 Redundancy analysis (RDA) of correlations between soil variables with Cu, Zn and Cd

和THM间接影响重金属有效性(图5),但两种肥料的影响机制存在差异。猪粪对CEC、CNP、GY和THM的影响较大,路径系数分别为0.986 8、0.999 9、0.916 9

和0.978 5,达到显著水平。化肥主要通过CNP和GY影响AHM,路径系数分别为0.231 2和0.713 1,达到显著水平。CEC和THM对AHM的路径系数分别为0.295 3和0.621 7,达到显著水平;土壤pH和GY对AHM的路径系数为负,有降低AHM的作用,但未达显著水平。

3 讨论

3.1 长期不同施肥对土壤Cu、Zn和Cd累积的影响

施肥影响土壤重金属含量变化,一方面是由于肥料中含有少量重金属,长期施用可能会造成土壤重金属累积^[29];另一方面是由于施肥促进了作物生长,作物的吸收使土壤重金属含量下降。化学氮肥和钾肥中重金属元素含量较低^[30],而化学磷肥中重金属Cd含量相对较高^[9]。任顺荣等^[31]发现25 a长期不同施肥处理下土壤重金属Cu、Zn和Cd均呈增加趋势,磷肥使重金属含量有所增加,而有机肥使Cu和Zn增幅较大。本研究发现持续35 a化肥处理(PK、NK、NP和NPK)下土壤Cu、Zn、Cd的全量分别为19.96~32.04、64.21~69.83、0.16~0.20 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,与CK(24.17、70.02、0.18 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)相比变化较小,也与本团队前期持续23 a的CK处理结果(25.8、80.9、0.21 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)差异较小^[32]。一般认为长期施用磷肥可能会造成Cd的累积^[9],但本研究并未发现施用磷肥处理(PK、NP和NPK)的土壤有Cd累积现象,可能与本研究施用的磷肥为国产磷肥,而我国磷矿的Cd含量较低有关^[31, 33]。相比较而言,本研究中NK和NPK处理下土壤Cd有所下降,这可能与氮肥促进作物对Cd的吸收^[34-35],钾、镉共存时降低了土壤对Cd的吸附有关^[36]。本研究中NK和NPK处理水稻产量分别为10 456 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和11 569 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,显著高于CK和其他化肥处理,因此作物吸收了土壤中更多的Cd。

有机肥施用对土壤重金属含量的影响与肥料的种类、来源和用量有关,有报道显示施用猪粪显著增加土壤Cu和Zn,而鸡粪显著增加土壤Cu、Zn和Cd^[37-38]。本研究发现持续35 a施用猪粪处理(M1NPK、M2NPK和M3NPK)下土壤Cu、Zn、Cd全量比CK提高了134%~239%、57%~124%、58%~171%,累积速率分别为0.92~1.65、1.15~2.49、0.003~0.009 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$;本团队前期研究发现持续23 a施用猪粪(M2NPK和M3NPK)处理下土壤Cu和Zn全量比CK提高了101%~147%和58%~76%,而Cd全量无显著变化^[32],累积速率分别为1.13~1.64、2.04~2.67 $\text{mg} \cdot$

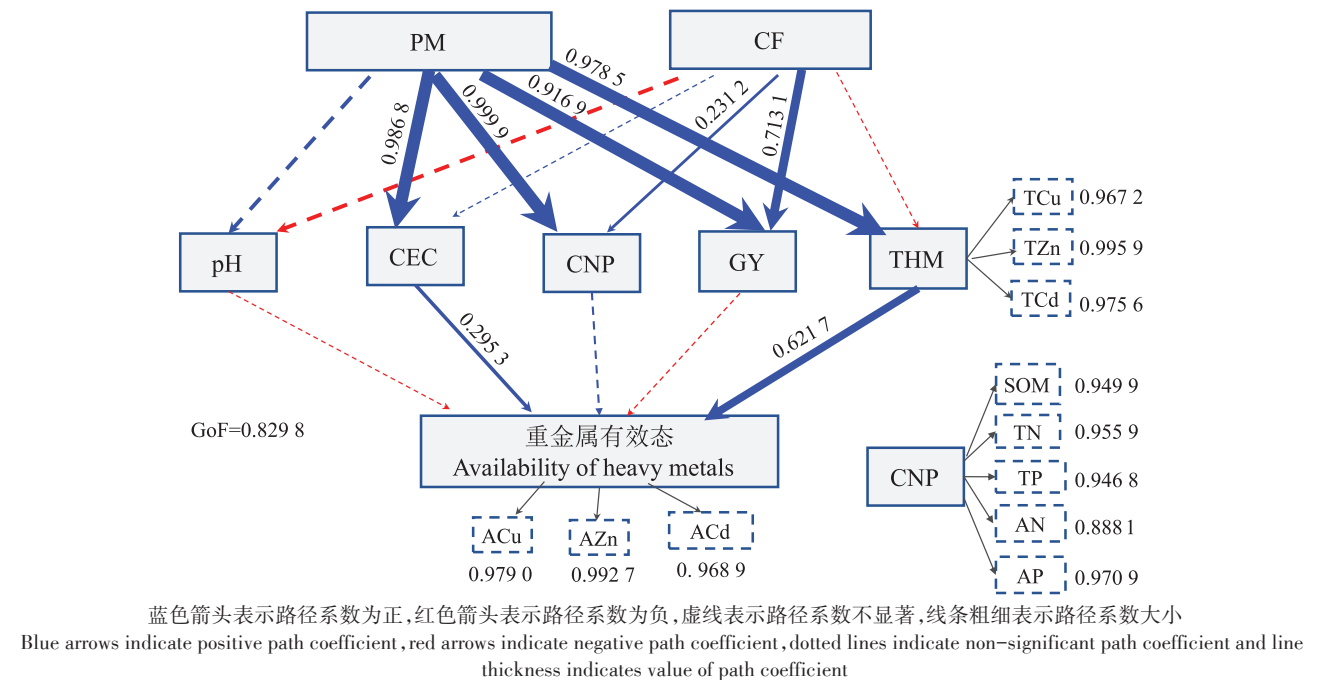


图5 长期施肥对土壤重金属有效性影响的偏最小二乘路径模型(PLS-PM)分析
Figure 5 Directed graph of partial least squares path model(PLS-PM) on the effect of soil available heavy metals under long-term fertilization

表4 长期施肥通过不同参数影响土壤重金属有效态的间接效应系数

肥料类型 Fertilizer type	pH	阳离子交换量 Cation exchange capacity	土壤碳、氮、磷 Soil C, N, and P	籽粒产量 Grain yield	重金属总量 Total content of heavy metal	合计 Sum
猪粪	-0.007 8	0.291 4	0.176 5	-0.099 4	0.608 3	0.969 0
化肥	0.007 8	0.031 1	0.040 8	-0.077 3	-0.011 8	-0.009 5

$\text{kg}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $0\sim0.001\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$,与本研究结果基本一致。土壤Cu和Zn含量大幅提高可能与江西省猪粪中Cu和Zn超过全国平均水平有关^[3],长期施用猪粪等有机肥时需要考虑环境承载力和粮食安全风险^[12]。经过35 a长期施用猪粪的土壤Cu轻微超标,高量猪粪M3NPK处理土壤Cd超过了筛选值,籽粒中Cd含量($0.28\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)超过国家标准^[11],MUHAMMAD等^[39]的研究也有相同的结论。可见在本试验条件下,该区域的猪粪用量不宜超过 $20\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ (M2NPK处理猪粪用量),一般应控制在 $15\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 以内^[32]。同时考虑到土壤中Cu的累积风险,猪粪在施用前需加工成有机肥并控制其中的重金属含量或进一步减少用量。

3.2 长期不同施肥下土壤理化性质与Cu、Zn和Cd的关系

长期不同施肥显著影响了土壤理化性质。与CK相比,施用化肥对土壤pH和CEC影响较小;NK和NPK处理下土壤SOM显著提升,与这两个处理水稻生物量较高,产生了较多的凋落物残留有关;化肥对

土壤养分的影响主要与肥料品种有关,施用某种化肥通常都会提升土壤对应养分的全量和速效态含量。施用猪粪显著提高了土壤CEC、SOM和氮、磷养分含量,并且对土壤氮、磷养分的提高远大于化肥处理。通过对土壤理化指标的heatmap聚类分析发现,施肥处理可以分为化肥处理(CK、PK、NK、NP、NPK)和猪粪处理(M1NPK、M2NPK、M3NPK)两大类(图2),反映出猪粪和化肥对土壤理化性状的影响存在显著差异。

长期不同施肥处理通过肥料带入显著影响了土壤Cu、Zn和Cd的全量(图1),本研究中猪粪施用造成了土壤Cu、Zn和Cd大幅累积。同时长期施肥影响了土壤pH、SOM、CEC和氮、磷养分含量,并直接或间接影响了重金属的有效性^[22-24]。分组相关性分析结果显示猪粪组与化肥组具有明显不同的规律。猪粪组土壤Cu、Zn和Cd全量及有效态含量与土壤理化指标(pH除外)间均呈显著正相关(图3),可能是由于该组土壤中重金属主要来源于猪粪,同时该组各土壤理化指标也随猪粪用量增加而增加(表

2),两者均由猪粪施用引起,由于同源关系而造成两者之间呈正相关关系。

化肥组由于肥料本身带入的重金属较少,相关性分析的结果可能更真实反映了土壤理化性质变化及产量对重金属的影响。总体上化肥组土壤重金属全量及有效态含量与土壤理化指标及产量间的相关性较低。土壤TCu、ACu与AN、TP、CEC呈显著正相关,可能是由于化学磷肥中带入了少量Cu,土壤Cu含量在一定范围内可以提高微生物对聚合类碳源的转化与利用能力,并促进水解酶活性^[40],从而与AN呈现一定的正相关;NP和NPK处理下土壤pH相对较低,而TCu和ACu相对较高,可能是造成TCu和ACu与pH呈显著负相关的原因。土壤酸化导致Cd更容易被作物吸收^[41-42],因此土壤Cd含量随pH下降而降低,表现出Cd与pH呈显著正相关。土壤SOM及水稻产量与Zn和Cd含量呈显著负相关,这是由于化肥组主要通过作物根系和凋落物残留提高土壤SOM,作物生长更好时会残留更多的有机物,同时也吸收更多土壤Zn和Cd。土壤AN含量受SOM影响^[43],本研究中化肥组AN与SOM的相关系数达0.83,同时AN与pH相关系数达-0.88,可能是造成AN与TCd呈显著负相关的原因。提高土壤速效氮含量能否促进土壤Cd的移除还有待进一步研究。一般认为土壤中磷与重金属,特别是Zn具有拮抗作用,但张淑香等^[44]研究发现施磷有促进Cu、Zn有效性的趋势,并且土壤速效磷和有效Zn呈显著正相关,王美等^[20]研究发现红壤施磷肥提高了Zn酸提取态和有机结合态比例,磷锌肥施用可以减少土壤对Zn的固定^[45]。本研究中化肥组土壤AZn含量($0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ HCl}$ 浸提)为 $3.50 \sim 5.56 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,占全量的4.7%~9.1%,磷和Zn的含量均较低,在低浓度条件下土壤中磷锌拮抗未起主导作用,反而由于无机磷的投入促进了根系生长和土壤微生物活动^[46],根系分泌的有机酸和微生物活动使重金属有效性增强;同时本研究磷肥中Zn含量为 $22.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,长期施磷带入的Zn可能对土壤Zn有效性有较大影响。杨敏等^[13]也发现土壤磷会影响重金属有效性,相关机制还有待进一步探索。

逐步回归分析发现土壤重金属有效态含量主要受CEC、AP、TP和SOM影响,其次是土壤pH和AN,猪粪组与化肥组关键影响因子存在较大差异(表3)。同时逐步回归结果也显示化肥组ACu和ACd及全处理组ACu随着水稻产量提高而下降(表3),但相关性分析并未体现出此规律(图3),表明虽然水稻生长会

吸收移除部分重金属,但并不是简单的直接关系,而是受到了其他土壤理化性质影响。通过RDA分析发现,猪粪组影响土壤Cu、Zn和Cd方差变异的关键因素为TN、CEC和AP,化肥组为土壤pH和TP,全处理组为土壤CEC、TN、AP和pH(图4)。化肥组与猪粪组差异较大,而全处理组与猪粪组基本一致。进一步通过PLS-PM分析发现,化肥对重金属有效态的间接效应系数为-0.009 5,猪粪的间接效应系数为0.969 0(表4),可见猪粪对重金属有效性的贡献远大于化肥,长期施用猪粪使土壤Cu、Zn和Cd发生累积,同时也通过影响土壤CEC而影响重金属有效性。稻田土壤中碳、氮、磷对重金属的固定和活化受到土壤pH、氧化还原条件和水稻根表铁膜等的影响^[47-48],通过调节土壤理化性状可以降低重金属有效性。长期来看,施用化肥可促进作物生长移除,总体上会降低重金属有效态含量,但过程比较缓慢。本研究发现土壤CEC对Cu、Zn和Cd有效态起关键调控作用(图5),猪粪和化肥虽然对土壤碳、氮、磷(CNP)和产量(GY)的影响显著,但CNP和GY对重金属有效态的贡献较小,土壤碳、氮、磷与重金属有效态之间存在较为复杂的关系,相关调控机制还有待进一步研究。

4 结论

(1)长期施用猪粪显著提高了土壤Cu、Zn和Cd全量及有效态含量,提升了土壤SOM、CEC及氮、磷养分含量,由于同源关系造成了两者之间呈显著正相关关系;而化肥处理之间土壤重金属全量及有效态含量无显著差异。

(2)通过RDA和PLS-PM分析发现,猪粪对重金属有效性的贡献远大于化肥,猪粪主要通过影响土壤重金属全量和CEC影响重金属有效性。

参考文献:

- [1] KUMAR U, NAYAK A K, SHAHID M, et al. Continuous application of inorganic and organic fertilizers over 47 years in paddy soil alters the bacterial community structure and its influence on rice production[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2018, 262:65-75.
- [2] ZHANG H, XU M, ZHANG F. Long-term effects of manure application on grain yield under different cropping systems and ecological conditions in China[J]. *Journal of Agricultural Science*, 2009, 147(1):31-42.
- [3] 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.

- [4] 徐明岗, 武海雯, 刘景. 长期不同施肥下我国3种典型土壤重金属的累积特征[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(12): 2319–2324. XU M G, WU H W, LIU J. Evolution of heavy metal contents of three soils under long-term fertilizations[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(12): 2319–2324.
- [5] CAI Z J, WANG B R, ZHANG L, et al. Striking a balance between N sources: Mitigating soil acidification and accumulation of phosphorous and heavy metals from manure[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 754: 142189.
- [6] 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.
- [7] GUO T, LOU C L, ZHAI W W, et al. Increased occurrence of heavy metals, antibiotics and resistance genes in surface soil after long-term application of manure[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 635: 995–1003.
- [8] AWASTHI S K, DUAN Y M, LIU T, et al. Sequential presence of heavy metal resistant fungal communities influenced by biochar amendment in the poultry manure composting process[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 291: 125947.
- [9] CHEN X X, LIU Y M, ZHAO Q Y, et al. Health risk assessment associated with heavy metal accumulation in wheat after long-term phosphorus fertilizer application[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 262: 114348.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] GAO P, HUANG J, WANG Y, et al. Effects of nearly four decades of long-term fertilization on the availability, fraction and environmental risk of cadmium and arsenic in red soils[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 295: 113097.
- [13] 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.
- [14] 何其辉, 谭长银, 曹雪莹, 等. 肥料对土壤重金属有效态及水稻幼苗重金属积累的影响[J]. 环境科学研究, 2018, 31(5): 942–951. HE Q H, TAN C Y, CAO X Y, et al. Effects of fertilizer on the availability of heavy metals in soil and its accumulation in rice seedling[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2018, 31(5): 942–951.
- [15] CHOJNACKA K, CHOJNACKI A, GORECKA H, et al. Bioavailability of heavy metals from polluted soils to plants[J]. *Science of the Total Environment*, 2005, 337(1/2/3): 175–182.
- [16] 代鹏飞, 王帅, 钱坤, 等. 某铀矿区农田土壤重金属生物有效性分析[J]. 生态与农村环境学报, 2021, 37(5): 644–650. DAI P F, WANG S, QIAN K, et al. Analysis of bioavailability of heavy metals in farmland soil in uranium mining area[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2021, 37(5): 644–650.
- [17] 常同举, 崔孝强, 阮震, 等. 长期不同耕作方式对紫色水稻土重金属含量及有效性的影响[J]. 环境科学, 2014, 35(6): 2381–2391. CHANG T J, CUI X Q, RUAN Z, et al. Long-term effects of tillage methods on heavy metal accumulation and availability in purple paddy soil[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(6): 2381–2391.
- [18] 陈莹, 刘汉斌, 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.
- [19] 魏天娇, 管冬兴, 方文, 等. 梯度扩散薄膜技术(DGT)的理论及其在环境中的应用Ⅲ: 植物有效性评价的理论基础与应用潜力[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(5): 841–849. WEI T J, GUAN D X, FANG W, et al. Theory and application of diffusive gradients in thin-films (DGT) in the environment Ⅲ: Theoretical basis and application potential in phytoavailability assessment[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(5): 841–849.
- [20] 王美, 李书田, 马义兵, 等. 长期不同施肥措施对土壤铜、锌、镉形态及生物有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(8): 1500–1510. WANG M, LI S T, MA Y B, et al. Influence of different long-term fertilization practices on fractionations and bioavailability of Cu, Zn, and Cd in soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(8): 1500–1510.
- [21] DOLAR S G, KEENEY D R. Availability of Cu, Zn and Mn in soils: I. Influence of soil pH, organic matter, and extractable phosphorus[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 1971, 22(6): 273–278.
- [22] WEI B G, YU J P, CAO Z Q, et al. The availability and accumulation of heavy metals in greenhouse soils associated with intensive fertilizer application[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(15): 5359.
- [23] MOHAMMED S, ALSAFADI K, HENNAWI S, et al. Effects of long-term agricultural activities on the availability of heavy metals in Syrian soil: A case study in southern Syria[J]. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 2021, 20(8): 497–505.
- [24] 王芳婷, 包科, 陈植华, 等. 珠江三角洲海陆交互沉积物中镉生物有效性及生态风险评价[J]. 环境科学, 2021, 42(2): 653–662. WANG F T, BAO K, CHEN Z H, et al. Bioavailability and ecological risk assessment of cadmium in the sea-land interaction sediments of the Pearl River Delta[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(2): 653–662.
- [25] 毛大发, 鄢新华, 刘小兵, 等. 试论南昌-莲塘一带土壤环境地球化学特征及其环境质量[J]. 地质与勘探, 2003, 39(3): 72–77. MAO D F, YAN X H, LIU X B, et al. Soil geochemical characteristic and environment quality in Nanchang-Liantang region[J]. *Geology and Prospecting*, 2003, 39(3): 72–77.

- [26] 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 agriculture chemistry analysis[M]. 3rd Edition. Beijing: Chinese Agriculture Press, 2000.
- [27] 李发生, 韩梅, 熊代群, 等. 不同浸提剂对几种典型土壤中重金属有效态的浸提效率研究[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(6): 704–706. LI F S, HAN M, XIONG D Q, et al. Efficiency of some extractants for available heavy metals from several typical soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, 22(6): 704–706.
- [28] SANCHEZ G. PLS path modeling with R[EB/OL]. 2013. <http://www.gastonsanchez.com/PLS Path Modeling with R. pdf>.
- [29] 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.
- [30] RAVEN K P, LOEPFERT R H. Trace element composition of fertilizers and soil amendments[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1997, 26: 551–557.
- [31] 任顺荣, 邵玉翠, 高宝岩, 等. 长期定位施肥对土壤重金属含量的影响[J]. 水土保持学报, 2005, 19(4): 96–99. REN S R, SHAO Y C, GAO B Y, et al. Effects of long-term located fertilization on heavy-metal content of soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(4): 96–99.
- [32] 李祖章, 谢金防, 蔡华东, 等. 农田土壤承载畜禽粪便能力研究[J]. 江西农业学报, 2010, 22(8): 140–145, 149. LI Z Z, XIE J F, CAI H D, et al. Environmental loading capacity of farmland soil for dung of livestock and poultry[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2010, 22(8): 140–145, 149.
- [33] 杨旭, 余垚, 李花粉, 等. 我国与欧美化肥重金属限量标准的比较和启示[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(1): 149–156. YANG X, YU Y, LI H F, et al. Comparison of heavy metal limits for chemical fertilizers in China, EU and US and enlightenments[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(1): 149–156.
- [34] YANG Y J, XIONG J, CHEN R J, et al. Excessive nitrate enhances cadmium (Cd) uptake by up-regulating the expression of *OsIRT1* in rice (*Oryza sativa*) [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2016, 122: 141–149.
- [35] JALLOH M A, CHEN J H, ZHEN F R, et al. Effect of different N fertilizer forms on antioxidant capacity and grain yield of rice growing under Cd stress[J]. *Journal of Hazardous Material*, 2009, 162(2/3): 1081–1085.
- [36] 宋正国, 徐明岗, 丁永祯, 等. 钾对土壤镉有效性的影响及其机理[J]. 中国矿业大学学报, 2010, 39(3): 453–458. SONG Z G, XU M G, DING Y Z, et al. Effect of potassium cations on cadmium bioavailability and its mechanisms in lateritic red soils[J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2010, 39(3): 453–458.
- [37] 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.
- [38] 王飞, 邱凌, 沈玉君, 等. 华北地区饲料和畜禽粪便中重金属质量分数调查分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(5): 261–267. WANG F, QIU L, SHEN Y J, et al. Investigation and analysis of heavy metal contents from livestock feed and manure in north China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(5): 261–267.
- [39] MUHAMMAD Q, LIU Y R, HUANG J, et al. Soil nutrients and heavy metal availability under long-term combined application of swine manure and synthetic fertilizers in acidic paddy soil[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2020, 20: 2093–2106.
- [40] 郭星亮, 谷洁, 高华, 等. 重金属 Cu 对堆肥过程中微生物群落代谢和水解酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(2): 375–382. GUO X L, GU J, GAO H, et al. Effect of heavy metal Cu on microbial community metabolic profiles and hydrolytic enzyme activities in composting[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(2): 375–382.
- [41] ZHAO H C, YU L, YU M J, et al. Nitrogen combined with biochar changed the feedback mechanism between soil nitrification and Cd availability in an acidic soil[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 390: 121631.
- [42] ANZA M, GARBISU C, SALAZAR O, et al. Acidification alters the functionality of metal polluted soil[J]. *Applied Soil Ecology*, 2021, 163: 103920.
- [43] MOHANTY S, NAYAK A K, KUMAR A, et al. Carbon and nitrogen mineralization kinetics in soil of rice-rice system under long term application of chemical fertilizers and farmyard manure[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2013, 58: 113–121.
- [44] 张淑香, 王小彬, 金柯, 等. 干旱条件下氮、磷水平对土壤锌、铜、锰、铁有效性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2001, 7(4): 391–396. ZHANG S X, WANG X B, JIN K, et al. Effect of different N and P levels on availability of zinc, copper, manganese and iron under arid conditions[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2001, 7(4): 391–396.
- [45] 赵丽芳, 袁亮, 张水勤, 等. 锌与磷肥混合方式对土壤中磷、锌有效性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(9): 1614–1626. ZHAO L F, YUAN L, ZHANG S Q, et al. Effects of combining zinc and phosphate fertilizers using different methods on the availability of zinc and phosphorus in soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(9): 1614–1626.
- [46] WU W C, WU J H, LIU X W, et al. Inorganic phosphorus fertilizer ameliorates maize growth by reducing metal uptake, improving soil enzyme activity and microbial community structure[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2017, 143: 322–329.
- [47] TAHIR N, ULLAH A, TAHIR A, et al. Strategies for reducing Cd concentration in paddy soil for rice safety[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 316: 128116.
- [48] ZOU M M, ZHOU S L, ZHOU Y J, et al. Cadmium pollution of soil-rice ecosystems in rice cultivation dominated regions in China: A review[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 280: 116965.

(责任编辑: 宋潇)