

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2022.06.016

杜舒阳, 丁昌峰, 王兴祥. 三种有机物料对稻田土壤汞甲基化及水稻汞积累的影响. 土壤, 2022, 54(6): 1219–1224.

三种有机物料对稻田土壤汞甲基化及水稻汞积累的影响^①

杜舒阳^{1,2}, 丁昌峰^{1,2}, 王兴祥^{1,2*}

(1 中国科学院土壤环境与污染修复重点实验室(南京土壤研究所), 南京 210008; 2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 采用盆栽试验, 设置空白对照组、只添加外源汞(Hg)老化 1 个月的 Hg 对照组, 以及外源 Hg 老化后分别添加 3% (m/m) 油菜秸秆、猪粪和水稻秸秆生物炭的有机物料处理组, 对比分析不同有机物料施用对水稻产量及 Hg 在稻田系统中迁移转化的影响。结果表明: 3 种有机物料的施用均显著提高了水稻产量, 但对土壤 Hg 甲基化和糙米 Hg 的积累影响则不一致。与空白对照相比, 油菜秸秆、猪粪和水稻秸秆生物炭处理下水稻产量分别提高 17.6%、33.0% 和 39.9%。与 Hg 对照相比, 施用猪粪提高了土壤 Hg 的生物有效性, 促进了土壤甲基汞(MeHg)的生成, 提高了糙米总汞(THg)的富集系数, 使糙米 THg 和 MeHg 的含量分别提高了 34.5% 和 30.3%; 施用油菜秸秆降低了土壤 Hg 的生物有效性, 抑制了土壤 Hg 甲基化过程和水稻对 Hg 的富集, 糙米 THg 和 MeHg 的含量分别降低了 34.6% 和 36.2%; 施用水稻秸秆生物炭降低了土壤 Hg 生物有效性和糙米 THg 的富集系数, 糙米 THg 和 MeHg 的含量分别降低了 46.9% 和 48.4%。因此, 在 Hg 污染稻田中应慎重施用猪粪, 可选择施用水稻秸秆生物炭和油菜秸秆, 以达到提高水稻产量和阻控糙米 Hg 积累的双重效果。

关键词: 油菜秸秆; 猪粪; 生物炭; 甲基汞

中图分类号: X53 **文献标志码:** A

Effects of Three Kinds of Organic Materials on Mercury Methylation in Paddy Soil and Mercury Accumulation in Brown Rice

DU Shuyang^{1,2}, DING Changfeng^{1,2}, WANG Xingxiang^{1,2*}

(1 CAS Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In this study, pot experiments were conducted with a blank control (CK), a mercury (Hg) control prepared by adding exogenous Hg in soil over one month-long aging, and three organic material treatments including rape straw, pig manure and rice straw biochar at a dosage of 3% (m/m) to Hg-amended soil aged as the Hg control, respectively. The effects of application of different organic materials were compared on rice yield and Hg migration and transformation in paddy field system. The results showed that the application of the three kinds of organic materials significantly increased rice yield, but the effects on Hg methylation in soil and Hg accumulation in brown rice were not consistent. Compared with the blank control, rice yield was increased by 17.6%, 33.0% and 39.9% under the treatments of rape straws, pig manure and rice straw biochar, respectively. Compared with the Hg control, the application of pig manure increased the bioavailability of Hg in soil and promoted methylmercury (MeHg) production and the bioaccumulation factor of total mercury (THg) in brown rice, with the concentrations of THg and MeHg in brown rice being increased by 34.5% and 30.3%, respectively. However, the application of rape straws reduced Hg bioavailability in soil and inhibited the methylation of Hg in soil and the bioaccumulation of Hg in brown rice, with the concentrations of THg and MeHg in brown rice being decreased by 34.6% and 36.2%, respectively. Hg bioavailability in soil and the bioaccumulation factor of THg in brown rice were decreased by applying rice straw biochar, and THg and MeHg content in brown rice were decreased by 46.9% and 48.4%, respectively. Therefore, application of rice straw biochar and rape straw is potential measure to achieve the dual effects of increasing rice yield and preventing Hg accumulation in brown rice in Hg contaminated paddy fields, while pig manure is not recommended.

Key words: Rape straw; Pig manure; Biochar; Methylmercury

①基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFC1604501)和国家自然科学基金项目(41501347)资助。

* 通讯作者(xxwang@issas.ac.cn)

作者简介: 杜舒阳(1995—), 女, 安徽芜湖人, 博士研究生, 主要从事土壤环境监测与风险管理研究。E-mail: sydu@issas.ac.cn

汞(Hg)是一种对人体健康有害的重金属元素,具有广泛性和持久性,被列为优先污染物之一^[1]。更严重的是, Hg 可以转化成毒性更强的甲基汞(MeHg), 严重威胁人类健康。稻田系统作为一种特殊的湿地生态系统, 为土壤中汞甲基化细菌提供了有利的生存环境^[2], 加剧了土壤 Hg 甲基化过程, 且水稻对 MeHg 的富集高于无机汞(IHg), Zhang 等^[3]发现糙米对 MeHg 的富集系数是 IHg 的 800 倍。有研究表明, 摄取大米是中国内陆居民 Hg 暴露的主要途径^[4]。因此, 研究稻田土壤中 Hg 甲基化和水稻积累 Hg, 对于进一步研发 Hg 污染耕地修复与安全利用技术, 保障国家粮食安全具有重要意义。

在水稻生产中, 配施有机物料通常能提高土壤肥力, 促进水稻生长, 从而提高产量^[5]。有机物料施用进入土壤后会逐渐被腐解, 有效提高土壤活性有机碳的含量^[6], 可以为作物缓慢而持续地提供养分, 有利于作物生长。然而, 施用有机物料对稻田系统 Hg 迁移转化的作用受其来源和种类的影响。研究表明, 水稻秸秆还田提高土壤 MeHg 的生成和水稻 Hg 的积累^[7-8]。孙涛^[9]发现, 施用 6% 的猪粪, 稻米中总 Hg(THg)的含量提高了约 35%, 而 Shu 等^[10]研究表明, 向稻田土壤中施用 1% ~ 4%(m/m)的生物质炭, 能有效降低稻米对 MeHg 的富集。但有机物料的施用对土壤 Hg 甲基化过程和水稻富集 Hg 过程的影响尚缺乏系统研究, 其影响机制也不清晰。

为科学评估 Hg 污染稻田有机物料施用的效应, 本研究选择了油菜秸秆、猪粪和水稻秸秆生物质炭 3 种有机物料, 研究不同有机物料对土壤 Hg 甲基化和糙米 Hg 富集的影响, 以为 Hg 污染稻田合理选择有机物料种类提供科学指导。

1 材料与方法

1.1 供试材料

在江西省鹰潭市余江区刘家站采集 0 ~ 20 cm 表层稻田土壤作为供试土壤, 在室温下风干后去除植物残体(如根系等)过 2 mm 筛备用。同时取部分土壤研磨后过 0.149 mm 筛用于土壤理化性质的测定, 土壤理化性质的测定方法参考鲁如坤^[11]编著的《土壤农业化学分析方法》, 其中土壤 pH 用电位法测定, CEC 用乙酸铵法测定, 有机质用高温外热重铬酸钾氧化-容量法测定, 有效硫用磷酸盐-乙酸浸提-硫酸钡比浊法测定, 其值分别为 4.56、16.5 cmol/kg、22.6 g/kg、35.8 mg/kg。供试有机物料选取成熟油菜秸秆、腐熟

猪粪和水稻秸秆生物质炭, 油菜秸秆、腐熟猪粪取自江西鹰潭, 水稻秸秆生物质炭购于南京三聚生物质新材料科技有限公司, 有机物料的基本性质如表 1 所示。

表 1 有机物料基本性质
Table 1 Basic properties of organic materials tested

性质	油菜秸秆	猪粪	水稻秸秆生物质炭
有机质(g/kg)	428	358	527
全氮(g/kg)	3.10	23.9	12.6
无机汞(mg/kg)	0.002	0.021	—

注: 供试有机物料以烘干基计, — 表示未检出, 有机物料中未检出 MeHg。

1.2 试验设计

将 5 kg 土壤装入塑料盆后按照设定的用量(0、1 mg/kg)添加外源 Hg(以 HgCl₂ 溶液的形式添加), 并加水至土表 2 ~ 3 cm 淹水老化 30 d 后达到平衡^[12], 随后向 Hg 处理的土壤中添加 3 种有机物料, 添加量均为 3%(m/m, 以干重计)。试验共计 5 个处理: ①空白对照(CK), 不添加外源 Hg 和有机物料; ②添加外源 Hg 但不添加有机物料, 即 Hg 对照(Hg); ③添加外源 Hg 和油菜秸秆(Hg+RS), 油菜秸秆为鲜样, 剪成 2 cm 长后施用; ④添加外源 Hg 和猪粪(Hg+M); ⑤添加外源 Hg 和生物质炭(Hg+BC)。每个处理 3 次重复。添加有机物料后充分搅拌均匀, 继续保持淹水腐解 30 d, 随后采集土壤样品用于水溶性有机碳(DOC)、土壤 THg 和 MeHg 的测定。

供试水稻品种为杂交籼型稻天优华占(中国水稻研究所、中国科学院遗传与发育生物学研究所和广东省农业科学院水稻研究所选育, 全生育期平均 123.1 d)。用 30% H₂O₂ 溶液浸泡水稻种子 15 min 后, 在 25℃ 的黑暗条件下浸种 24 h, 去除瘪粒后将水稻种子放在湿纱布上催芽 24 h, 随后从中挑选出生长状况良好且基本一致的种子进行育苗。待出苗后培育 30 d 移栽至对应编号的盆中, 每盆 3 穴, 每穴 2 株。移栽前一周向每盆土壤中加入基肥: N 0.20 g/kg(尿素), P₂O₅ 0.15 g/kg(CaH₂PO₄·H₂O), K₂O 0.20 g/kg(KCl), 并采集土壤样品测定土壤中 DOC、THg 和 MeHg 的含量。整个水稻生育期保持淹水, 待水稻成熟后收获测定产量, 并在 -50℃ 下冻干后脱壳磨碎, 测定糙米中 THg 和 MeHg 的含量。

1.3 测定指标与方法

土壤 DOC 的测定参考王艳等^[13]的方法: 称取 5 g 新鲜土样, 加入 25 ml 超纯水充分混合, 230 r/min 振荡 1 h, 4 000 r/min 离心 10 min, 取上清液过 0.45 μm

滤膜,用 TOC-V_{CPH} 自动分析仪(岛津,日本,检出限为 0.005 g/kg)测定滤液中有机碳含量。

土壤样品 THg 的测定参考 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》^[14]:准确称取 0.25 g 土壤样品于消解管中,加入 10 ml(1+1)王水溶液(盐酸:硝酸=3:1 配成王水后,用超纯水稀释一倍),在 100℃水浴中消解 2 h;待消解结束后,冷却至室温,用去离子水定容至 25 ml,摇匀后用原子荧光光度计(AF-610D2,北京北分瑞利分析仪器公司,检出限为 0.005 ng/g,下同)测定。

糙米 THg 的测定参考 GB 5009.17—2014《食品安全国家标准 食品中总汞及有机汞的测定》,利用高压密封消解罐法来进行^[15]:称取 0.25 g 左右糙米粉末样品,置于聚四氟乙烯管内管,加入浓硝酸(优级纯)4 ml 浸泡过夜,次日加入 3 ml 30%(V/V)H₂O₂(优级纯),盖上内盖,旋紧不锈钢外罐后放入烘箱,140℃条件下维持 4 h;在箱内冷却后,将消解液转移至离心管并定容,用冷原子荧光光度计(CVAFS, AF-610D2,北京北分瑞利分析仪器公司)测定消解液中 THg 的含量。

土壤和糙米样品 MeHg 的测定参考赵家印等^[16]的方法:称取适量样品置于 15 ml 离心管中,加入 2 ml 氢氧化钾-甲醇溶液(*m/m*=1:4),涡旋混匀后置于恒温振荡箱中消解 4 h,消解条件为 60℃、250 r/min;冷却后定容,摇匀管中溶液后离心(20 min, 4 000 r/min, 25℃);上清液经过滤后经乙基化反应,用美国 Brooks Rand MERX 全自动甲基汞分析仪(检出限为

0.028 ng/kg)测定。

采用土壤标准物质(GBW07445)和大葱标准物质(GBW10049)作为 THg 的质控样品,其回收率分别为 93%~105%、97%~103%。由于我国尚无糙米 MeHg 的标准物质,MeHg 的质控样品选用沉积物标准物质(ERM-CC580),其回收率为 99%~105%。

1.4 数据处理

糙米 Hg(包括 THg 和 MeHg)的富集系数可通过如下公式计算:

$$BCF_{Hg} = \frac{Hg_{rice}}{Hg_{soil}}$$

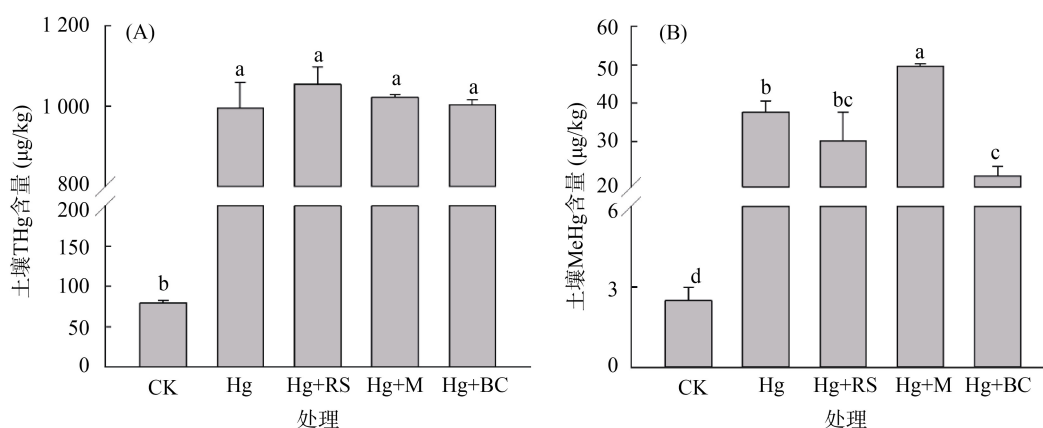
式中: Hg_{rice} 表示糙米中 Hg 的含量($\mu\text{g/kg}$); Hg_{soil} 表示土壤中 Hg 的含量($\mu\text{g/kg}$)。公式中糙米和土壤 Hg 的形态应保持一致。

用 Excel 2013 进行试验数据处理, SigmaPlot 14.0 进行绘图,相关性分析采用 Pearson 法,差异显著性分析采用 LSD 法。

2 结果与分析

2.1 有机物料对土壤汞甲基化的影响

与 Hg 对照相比,添加有机物料没有改变土壤中 THg 的含量,但不同处理下土壤 MeHg 含量差异显著($P<0.05$,图 1),施用猪粪处理下土壤 MeHg 含量升高了 31.7%,而油菜秸秆和水稻秸秆生物质炭处理下土壤 MeHg 含量下降了 20.3% 和 44.5%。CK、Hg、Hg+RS、Hg+M 和 Hg+BC 处理土壤 MeHg 比率分别为 3.14%、3.79%、2.85%、4.85% 和 2.08%。



(柱图上方不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$),下同)

图 1 不同处理下土壤 THg (A)和 MeHg (B)的含量

Fig. 1 THg (A) and MeHg (B) concentrations in soils under different treatments

施用不同种类的有机物料后,土壤 DOC 含量出现差异(图 2A)。与 Hg 对照相比,油菜秸秆和水稻秸秆生物质炭处理下土壤 DOC 含量分别下降了 12.2%

和 27.1%,而猪粪处理下土壤 DOC 含量上升了 14.1%。4 个加 Hg 处理的土壤 DOC 含量与土壤 MeHg 比率显著正相关($R^2=0.991$, $P<0.01$, $n=4$)(图 2B)。

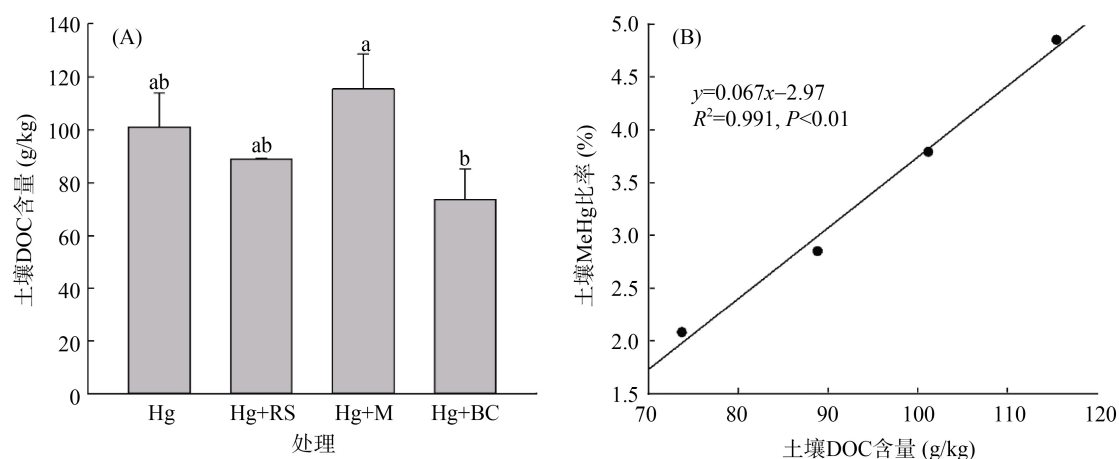


图 2 腐解 30 d 后不同处理下土壤中 DOC 的含量(A)及其与土壤 MeHg 比率的关系(B)

Fig. 2 DOC concentrations in soils under different treatments after 30d-decomposition (A) and their relationship between MeHg/THg ratio in soil (B)

2.2 有机物料添加对水稻产量和稻米汞含量的影响

空白对照 CK 与 Hg 对照(Hg)处理下水稻的产量没有显著性差异,而施用有机物料处理都显著提高了水稻的产量。与空白对照相比,油菜秸秆、猪粪和水稻秸秆生物质炭的施用分别提高水稻产量 17.6%、33.0% 和 39.9%(图 3)。

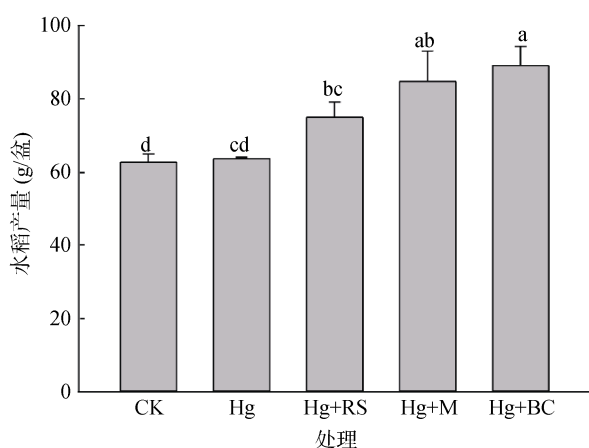


图 3 不同处理下水稻的产量

Fig. 3 Rice yields under different treatments

与 CK 处理相比, Hg 对照及有机物料处理的糙米 THg 和 MeHg 含量显著提高(图 4)。与 Hg 对照相比,不同有机物料处理下糙米 THg 和 MeHg 含量呈现出了明显差异。其中,施用猪粪使糙米 THg 和 MeHg 含量分别升高了 34.5% 和 30.3%,而油菜秸秆和水稻秸秆生物质炭的施用使糙米 Hg 含量下降,其中 THg 含量下降了 34.6% 和 46.9%, MeHg 含量下降了 36.2% 和 48.4%。Hg、Hg+RS、Hg+M 和 Hg+BC 处理下糙米 MeHg 占 THg 比率分别为 98.5%、96.1%、95.4% 和 95.8%。

Hg 对照及有机物料处理的糙米对 THg 的生物富集系数 (BCF)大小排序为 $Hg+BC < Hg+RS < Hg < Hg+M$, 与 Hg 对照相比,油菜秸秆和水稻秸秆生物质炭处理下糙米 THg 的富集系数分别降低 38.3% 和 47.4%,而猪粪处理下糙米 THg 的富集系数比 Hg 处理高 30.0%(图 5A)。糙米 MeHg 的富集系数大小排序为 $Hg+RS < Hg+BC \approx Hg+M \approx Hg$, 与 Hg 对照相比,油菜秸秆处理下糙米 MeHg 的富集系数降低 20.1%,而猪粪和水稻秸秆生物质炭处理下分别下降 1.06% 和 7.00%(图 5B)。

3 讨论

3.1 有机物料对土壤汞甲基化的影响

3 种有机物料的添加对土壤 DOC 含量的影响出现了显著差异,土壤 MeHg 含量也随之呈现出差异。土壤 DOC 作为土壤中较活泼的一类有机质,不仅可以为甲基化细菌提供充足的碳源^[17],还能与土壤中 Hg 形成 Hg-DOC 复合物来控制土壤 Hg 的生物有效性^[18]。猪粪施用显著提高了土壤 DOC 的含量,促进了土壤 Hg 甲基化过程的进行。近期研究表明,无机 Hg 与 DOC 复合物在沉积物中更易溶解,也更易被微生物吸收并发生 Hg 甲基化作用^[19-21]。水稻秸秆生物质炭具有比表面积大、孔隙度高的特点,可通过吸附土壤中 Hg 的方式来降低土壤中 Hg 的生物有效性,抑制土壤 MeHg 的产生,从而降低稻田 Hg 污染风险^[22-23]。油菜秸秆中含有丰富的硫素,进入土壤后在腐解过程中硫素也会被释放^[24],土壤中的 Hg 与硫结合形成较稳定的复合物,从而降低了土壤中 Hg 的生物有效性,进一步降低了土壤中 MeHg 的含量。

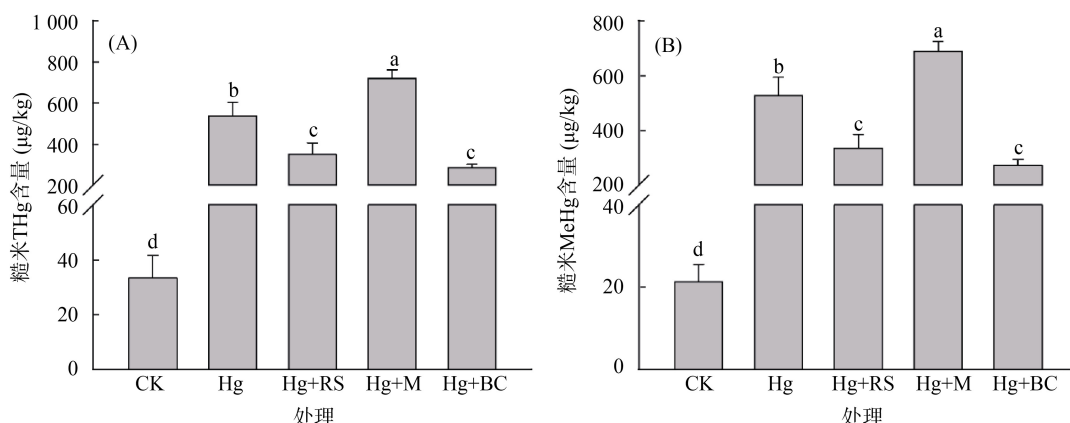


图 4 不同处理下糙米 THg(A) 和 MeHg (B) 的含量

Fig. 4 THg (A) and MeHg (B) concentrations in brown rice under different treatments

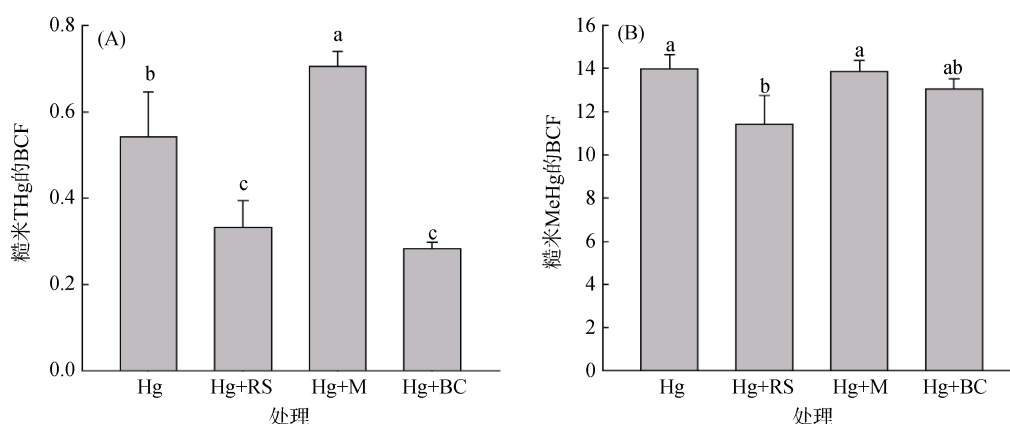


图 5 不同处理下糙米 THg(A)和 MeHg(B)的富集系数

Fig. 5 BCFs of THg (A) and MeHg (B) in brown rice under different treatments

3.2 有机物料对糙米 Hg 的影响

本研究选用的 3 种有机物料均提高了水稻产量。与水稻产量表现不同的是, 3 种有机物料对糙米 Hg 含量的影响出现了显著差异, 但有机物料的添加对糙米中 MeHg 占 THg 比例并没有显著影响。糙米 Hg (包括 THg 和 MeHg) 主要来源于土壤^[25], 有机物料的添加能通过影响土壤 Hg 甲基化和水稻富集 Hg 过程影响糙米对 Hg 的积累。施用猪粪使糙米 THg 和 MeHg 的含量显著升高, 而油菜秸秆和水稻秸秆生物质炭处理下糙米 THg 和 MeHg 含量则显著下降, 说明猪粪的施用促进了糙米对 THg 和 MeHg 的积累, 提高了糙米的健康风险。

猪粪处理下糙米 THg 的 BCF 高于单加 Hg 处理, 说明猪粪进入土壤腐解后产生的 DOC 不仅促进了土壤 MeHg 的生成, 还提高了土壤 Hg 的生物有效性, 从而提高了糙米 THg 含量。而油菜秸秆和水稻秸秆生物质炭处理下糙米 THg 的 BCF 均低于单加 Hg 处理, 说明这两种有机物料可以通过影响土壤 Hg 的生物有效性降低水稻对 THg 的富集。与糙米 THg 的富

集规律不同, 猪粪和水稻秸秆生物质炭处理下糙米 MeHg 的 BCF 与单加 Hg 处理没有显著差异, 说明猪粪和水稻秸秆生物质炭的施用对糙米富集 MeHg 过程的影响可以忽略。与以上 2 种有机物料不同, 油菜秸秆的添加能有效降低糙米 MeHg 的 BCF, 说明油菜秸秆可以在水稻 Hg 甲基化过程和水稻富集 MeHg 过程中均起到抑制作用, 这是因为油菜秸秆在土壤中腐解后产生的含硫化合物可以与 Hg 和 MeHg 螯合形成稳定结构^[26], 从而降低土壤 Hg 的生物有效性, 达到阻控糙米 Hg 积累的效果。此外, 油菜秸秆和水稻秸秆生物质炭处理下糙米 MeHg 含量的降幅均高于 THg, 说明施用油菜秸秆和水稻秸秆生物质炭对降低糙米 MeHg 积累的效果优于 THg。

本文仅测定了有机物料施用 30 d 后的土壤 MeHg 和 DOC 含量变化, 及收获期水稻 Hg 富集特征。实际上, 有机物料组分及其矿化与腐殖化过程不同^[5,27], 将对土壤 Hg 甲基化和水稻吸收 Hg 有重要影响, 有机物料施用后不同时期土壤 Hg 甲基化过程及水稻 Hg 富集特征的监测, 将有利于进一步深入理解

Hg 污染土壤施用有机物料的环境效益。

4 结论

1)施用猪粪可以有效提高水稻产量,但猪粪提高了土壤 Hg 的生物有效性。施用猪粪不但提高糙米吸收 THg 的能力,增加糙米 THg 含量,而且促进了土壤 Hg 甲基化过程的发生,增加土壤和糙米 MeHg 含量,但 MeHg 的富集系数没有显著改变。

2)施用水稻秸秆生物质炭和油菜秸秆可以增加水稻产量,且均降低了糙米 THg 和 MeHg 的含量,但作用机制并不完全相同。油菜秸秆不仅能抑制土壤 Hg 甲基化过程,还能降低糙米对 THg 和 MeHg 的富集系数,而水稻秸秆生物质炭主要通过抑制土壤 Hg 甲基化过程,降低土壤 MeHg 含量和糙米 THg 的富集系数。

3)在 Hg 污染稻田中应当慎重施用猪粪,建议施用油菜秸秆或水稻秸秆生物质炭来提高土壤肥力,并阻控水稻吸收 Hg。

致谢:感谢华中农业大学刘玉荣教授和郝芸芸在甲基汞测定中的指导和帮助!

参考文献:

- [1] Jiang G B, Shi J B, Feng X B. Mercury pollution in China[J]. Environmental Science & Technology, 2006, 40(12): 3672–3678.
- [2] 冯新斌,洪业汤. 汞的环境地球化学研究进展[J]. 地质地球化学, 1997, 25(4): 104–108.
- [3] Zhang H, Feng X B, Larssen T, et al. Bioaccumulation of methylmercury versus inorganic mercury in rice (*Oryza sativa* L.) grain[J]. Environmental Science & Technology, 2010, 44(12): 4499–4504.
- [4] Zhang H, Feng X B, Larssen T, et al. In inland China, rice, rather than fish, is the major pathway for methylmercury exposure[J]. Environmental Health Perspectives, 2010, 118(9): 1183–1188.
- [5] 宋蒙亚,李忠佩,刘明,等. 不同有机物料组合对土壤养分和生化性状的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(17): 3594–3603.
- [6] 魏夏新,熊俊芬,李涛,等. 有机物料还田对双季稻田土壤有机碳及其活性组分的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(7): 2373–2380.
- [7] Liu Y R, Dong J X, Han L L, et al. Influence of rice straw amendment on mercury methylation and nitrification in paddy soils[J]. Environmental Pollution, 2016, 209: 53–59.
- [8] Tang W L, Hintelmann H, Gu B H, et al. Increased methylmercury accumulation in rice after straw amendment[J]. Environmental Science & Technology, 2019, 53(11): 6144–6153.
- [9] 孙涛. 农田管理对稻田系统汞甲基化及其分布与积累的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2019.
- [10] Shu R, Wang Y J, Zhong H. Biochar amendment reduced methylmercury accumulation in rice plants[J]. Journal of Hazardous Materials, 2016, 313: 1–8.
- [11] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [12] Du S Y, Wang X X, Zhang T L, et al. Kinetic characteristics and predictive models of methylmercury production in paddy soils[J]. Environmental Pollution, 2019, 253: 424–428.
- [13] 王艳,杨丽娟,周崇峻,等. 长期施肥对设施蔬菜栽培土壤水溶性有机碳含量及其剖面分布的影响[J]. 中国农学通报, 2010, 26(11): 178–181.
- [14] 中华人民共和国质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 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: GB/T 22105.1—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [15] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中总汞及有机汞的测定: GB 5009.17—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [16] 赵家印,王永杰,钟寰. 三种修复剂对稻米甲基汞富集的影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(2): 284–289.
- [17] Gray J E, Hines M E. Biogeochemical mercury methylation influenced by reservoir eutrophication, Salmon Falls Creek Reservoir, Idaho, USA[J]. Chemical Geology, 2009, 258(3/4): 157–167.
- [18] Yin D L, He T R, Yin R S, et al. Effects of soil properties on production and bioaccumulation of methylmercury in rice paddies at a mercury mining area, China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2018, 68: 194–205.
- [19] Frohne T, Rinklebe J, Langer U, et al. Biogeochemical factors affecting mercury methylation rate in two contaminated floodplain soils[J]. Biogeosciences, 2012, 9(1): 493–507.
- [20] Mazrui N M, Jonsson S, Thota S, et al. Enhanced availability of mercury bound to dissolved organic matter for methylation in marine sediments[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2016, 194: 153–162.
- [21] Zhao J Y, Ye Z H, Zhong H. Rice root exudates affect microbial methylmercury production in paddy soils[J]. Environmental Pollution, 2018, 242: 1921–1929.
- [22] 戴顺利. 稻草秸秆生物炭对矿区重金属污染土壤的修复试验研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2019.
- [23] 徐振涛,梁鹏,吴胜春,等. 不同生物质炭对土壤中有有效态汞的影响及其吸附特征分析[J]. 环境化学, 2019, 38(4): 832–841.
- [24] Wu J, O'Donnell A G, Syers J K. Microbial growth and sulphur immobilization following the incorporation of plant residues into soil[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1993, 25(11): 1567–1573.
- [25] Meng B, Feng X B, Qiu G L, et al. The process of methylmercury accumulation in rice (*Oryza sativa* L.)[J]. Environmental Science & Technology, 2011, 45(7): 2711–2717.
- [26] Hammerschmidt C R, Fitzgerald W F, Balcom P H, et al. Organic matter and sulfide inhibit methylmercury production in sediments of New York/New Jersey Harbor[J]. Marine Chemistry, 2008, 109(1/2): 165–182.
- [27] 宋蒙亚,李忠佩,刘明,等. 不同农田有机物料组合对物料分解过程的影响[J]. 土壤通报, 2014, 45(3): 685–690.