

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2024.02.016

曹雪莹, 谭长银, 杨佳, 等. 有机物料对农田土壤肥力及镉有效性的影响. 土壤, 2024, 56(2): 367–374.

有机物料对农田土壤肥力及镉有效性的影响^①

曹雪莹¹, 谭长银^{2*}, 杨佳^{1,2}, 赵信林³, 张培育², 马军²

(1 长沙学院乡村振兴研究院, 长沙 410022; 2 湖南师范大学地理科学学院, 长沙 410081; 3 中国农业科学院麻类研究所, 长沙 410205)

摘要: 以我国南方两种不同程度 Cd 污染农田土壤为研究对象, 通过不同有机物料(猪粪、商品有机肥、水稻秸秆及其生物质炭)施肥处理探究了土壤肥力水平及 Cd 有效性的变化, 并对施用有机物料情况下土壤 Cd 有效性与土壤养分进行了关联分析。结果表明: 施用有机物料显著提高了土壤氮磷钾含量及其有效性, 商品有机肥提高了土壤全氮含量, 施用猪粪处理土壤的全磷和有效磷含量显著升高, 商品有机肥和生物质炭明显提高了土壤全钾和速效钾含量。水稻秸秆及其生物质炭处理的轻污染土壤有机质含量均达土壤肥力 1 级(>40 g/kg)。与不施肥相比, 施加有机物料对轻污染土壤有效态 Cd 含量的影响不大, 但中污染土壤有效态 Cd 含量显著下降, 最高降幅达 20.00%。土壤有效态 Cd 含量与全氮、全磷、全钾和有效磷含量均呈显著负相关关系。轻污染土壤上施加猪粪和生物质炭处理的上海青地上部 Cd 含量均低于 0.20 mg/kg。施加商品有机肥处理两种土壤肥力综合指数最高, 是其他处理的 1.50 倍~3.18 倍, 但其上海青地上部 Cd 含量存在较高风险。因此, 针对南方 Cd 污染农田土壤的培肥及安全利用可考虑施用猪粪有机肥。

关键词: 土壤质量; 有机物料; 镉(Cd); 土壤肥力综合指数; 有效性

中图分类号: X53 文献标志码: A

Effects of Organic Material on Farmland Soil Fertility and Cd Availability

CAO Xueying¹, TAN Changyin^{2*}, YANG Jia^{1,2}, ZHAO Xinlin³, ZHANG Peiyu², MA Jun²

(1 Rural Vitalization Research Institute, Changsha University, Changsha 410022, China; 2 School of Geographic Sciences, Hunan Normal University, Changsha 410081, China; 3 Institute of Bast Fiber Crops, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Changsha 410205, China)

Abstract: In this study, farmland soils with two different degrees of Cd contaminated in southern China were used to study the changes of soil fertility and Cd availability during crop growth by applying different organic manures (pig manure, commercial organic manure, rice straw and biochar), and the correlations between soil Cd availability and nutrients. The results showed that the application of organic materials significantly increased the contents and availability of soil nitrogen, phosphorus and potassium, commercial organic manure increased soil total nitrogen content, pig manure significantly increased the contents of soil total and available phosphorus, and commercial organic manure and rice straw biochar significantly increased the contents of soil total and available potassium. Soil organic matter contents of the lightly-contaminated soil treated with rice straw and biochar increased to level 1 (>40 g/kg). Compared with the treatment without fertilizer, the effects of organic materials on the contents of available Cd in lightly-contaminated soil were not significant, but the contents of available Cd in moderately-contaminated soil decreased significantly, with a maximum reduction of 20.00%. The content of available Cd was negatively correlated with the contents of total nitrogen, phosphorus and potassium as well as available phosphorus. Cd contents in the aboveground of *Brassica chinensis* L. treated with pig manure and biochar were lower than 0.20 mg/kg. Soil nutrient index treated with commercial organic manure was the highest, which was 1.50–3.18 times of other treatments, but Cd content in the aboveground of *Brassica chinensis* L. had a higher risk. Therefore, the application of pig manure can be considered for the cultivation and safe utilization of Cd contaminated farmlands in southern China.

Key words: Soil quality; Organic materials; Cd; Soil nutrient index; Availability

①基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(42107018), 湖南省自然科学基金青年基金项目(2021JJ40630)和湖南省科技厅创新性省份建设专项经费(2020NK2001)资助。

* 通讯作者(chytan@hunnu.edu.cn)

作者简介: 曹雪莹(1988—), 女, 湖南宜章人, 博士, 讲师, 主要从事区域生态环境保护与修复研究。E-mail: xycao2016@163.com

耕地是粮食生产的根本和载体,土壤重金属污染影响农产品安全,并通过食物链对人体健康构成潜在威胁^[1]。与欧美国家相比,我国农业土壤和耕地资源相对缺乏,人均耕地面积仅为世界平均水平的 42%^[2]。因此,我国农田土壤污染防治与修复技术发展过程中须要更多关注农田土壤的安全生产能力,以保障我国的耕地红线。近年来,不同尺度或地区的农田土壤重金属污染状况调查结果表明,我国由于长期不合理施用化肥导致耕地土壤养分失衡,重金属有效性升高等^[3]。Zhu 等^[4]对我国南方水稻种植区土壤研究发现,单施化肥处理土壤 pH 从 1980—2014 年平均下降了 0.94 个单位,76% 的稻米 Cd 超标,土壤酸化是该区域稻米 Cd 超标的主要原因之一。中轻度 Cd 污染农田土壤质量改善及农产品安全生产是南方水稻土区域面临的重要问题。施用有机物料是提升土壤肥力,改善土壤质量的常用措施。通过有机肥替代部分化肥,在不减产甚至增产的前提下减少化肥施用,是我国深入开展化肥零增长行动、加快推进农业绿色发展的重要措施^[5]。中国农业科学院祁阳红壤实验站连续 25 年定位试验表明,与不施肥处理相比,长期施用化肥可使土壤 pH 下降 1.15~1.28 个单位,而长期施用有机肥土壤 pH 升高了 0.69 个单位,且增施有机肥处理土壤有机碳、全氮、全磷、碱解氮、有效磷、速效钾等养分含量均显著升高^[6]。

农业生产过程中会产生大量的秸秆和畜禽粪便,如果处理不当将带来一系列的生态环境问题。例如,秸秆田间焚烧会释放大量的温室气体和颗粒污染物造成大气污染,而畜禽粪便已经成为面源污染的主要来源。有机物料如秸秆、畜禽粪便中富含腐殖质、微生物活体等有机胶体和各种黏土矿物的无机胶体,是提高土壤养分的重要资源,农业有机废弃物的肥料化处理是其综合利用的重要方式^[7]。据估计,我国秸秆的有机养分总量约为 2 209.8 万 t,其中粮食秸秆占总产量的 80% 以上^[8]。生物质炭是植物残体在缺氧的环境下,经高温热解产生的一类富含碳素的物质,碳含量一般在 55% 以上,还含有丰富的磷、钾、钙、镁等营养元素,添加生物质炭可以有效提高土壤肥力^[9]。且生物质炭多呈碱性,表面带大量负电荷和含氧、含氮、含硫官能团,能吸附土壤重金属,有效降低土壤重金属有效性并抑制作物对重金属的吸收^[10]。碱性有机物料既可以提高土壤肥力,改良土壤性质,促进作物生长,又能降低土壤 Cd 有效性,抑制作物对 Cd 的吸收,是 Cd 污染耕地修复培肥的有效性措施。

《土壤污染防治行动计划》^[11]提出对中轻度污染土壤制定实施耕地安全利用方案。本研究通过施用不同有机物料探究其对不同程度 Cd 污染农田土壤肥力及作物 Cd 吸收的影响,根据全国第二次土壤普查及有关标准对单个土壤养分指标进行分级,统计分析土壤肥力综合指数(Soil nutrient index, SNI),以及土壤 Cd 有效性和作物不同部位 Cd 积累情况,以筛选出适宜提升南方农田土壤肥力的措施,为南方 Cd 污染农田的安全利用和养分利用效率的提高等提供科学依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试有机物料选用猪粪(醴陵市某饲养场提供,已发酵,含水率 15.4%)、商品有机肥(安琪酵母股份有限公司提供)、水稻秸秆(采自醴陵市浦口镇农田,晒干后切成 2~3 cm 小段)和生物质炭(采用水稻秸秆在 450 °C 高纯氮气制造缺氧环境下制备)。供试有机物料的 pH、Cd 含量、养分含量见表 1。供试作物选择上海青(*Brassica chinensis* L.),种子从江苏恒通种业有限公司购买。

表 1 供试材料基本化学性质
Table 1 Basic chemical properties of tested materials

| 有机物料 | pH | Cd 含量 (mg/kg) | 养分含量(g/kg) | | |
|----------|------|------------------|------------|-------------------------------|------------------|
| | | | N | P ₂ O ₅ | K ₂ O |
| 猪粪 | 8.07 | 0.33 | 33.3 | 50.4 | 21.7 |
| 商品有机肥 | 6.71 | 0.15 | 44.8 | 2.7 | 105.0 |
| 水稻秸秆 | - | 1.02 | 10.1 | 1.6 | 41.6 |
| 水稻秸秆生物质炭 | 9.04 | 1.91 | 8.3 | 2.7 | 47.4 |

供试土壤采自湖南醴陵市(轻污染土壤)和株洲县(中污染土壤)农田表层(0~20 cm),成土母质均为河流冲积物,土壤 Cd 含量分别为 0.55 mg/kg 和 1.85 mg/kg,有效态 Cd 含量分别为 0.26 mg/kg 和 0.76 mg/kg。将采集的土壤风干后,过 2.0 mm 尼龙筛,混合均匀后装盆,每盆装土 2.50 kg(花盆上口径为 25.0 cm,高为 16.5 cm)。供试土壤基本性质见表 2。

1.2 试验设计

盆栽试验在湖南师范大学气象园温室内进行,共设置 5 个处理:①对照(CK),不施肥;②施用猪粪(PM);③施用商品有机肥(COF);④施用水稻秸秆(RS);⑤施用水稻秸秆生物质炭(RSB),每个处理 3 个重复,有机物料的添加量均为 10.0 g/kg。有机物料在上海青播种前一周施加,并与土壤充分混匀。上海青于 2017 年 7 月 12 日播种,9 月 21 日收获。在上

海青3~4片真叶时间苗,每盆保留4株长势相似的幼苗。定期补充水分,保持土壤60%左右田间持水量。

1.3 样品采集与测定

分地上部和地下部采集植物样品,分别称重和洗净后,烘干、粉碎、装袋备用。收获植物同时采集土壤样品,风干、过筛、装袋备用。

土壤pH利用pHs-3C雷磁酸度计通过土壤悬浊液(土水比1:2.5, $m:V$)测定。土壤全氮采用凯氏定氮法测定;土壤全磷采用氢氧化钠熔融-钼锑抗比色法测定;土壤全钾采用氢氧化钠熔融-原子分光光度

法测定;土壤 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 采用2 mol/L KCl溶液浸提,流动分析仪测定;土壤有效磷用 NaHCO_3 浸提,钼锑抗比色法测定;土壤速效钾采用乙酸铵浸提,原子分光光度计测定;土壤有效态Cd含量采用DTPA溶液浸提,原子吸收光谱仪测定。植物样品收获洗净后105℃杀青30 min,70℃烘至恒重,分别粉碎后,参考美国环保署的标准方法(US EPA3051a),放入微波消解仪对样品进行消解,原子吸收光谱仪测定Cd浓度,测试过程中加空白和标样以质量控制^[12]。

表2 供试土壤基本性质
Table 2 Basic properties of tested soils

| 供试土壤 | pH | 有机质 (g/kg) | 全氮 (g/kg) | 全磷 (g/kg) | 全钾 (g/kg) | 碱解氮 (mg/kg) | 有效磷 (mg/kg) | 速效钾 (mg/kg) |
|-------|------|---------------|--------------|--------------|--------------|----------------|----------------|----------------|
| 轻污染土壤 | 5.17 | 27.2 | 2.01 | 0.42 | 12.4 | 98.3 | 16.7 | 125 |
| 中污染土壤 | 6.33 | 21.7 | 1.76 | 0.38 | 10.6 | 79.6 | 15.9 | 108 |

1.4 土壤肥力分级及土壤肥力综合指数的计算

1.4.1 土壤肥力分级标准 土壤肥力是土壤为植物生长供应和协调养分、水分、空气和热量的能力,是土壤物理、化学、生物学性质的综合反映^[13]。土壤养分(氮、磷、钾)是土壤化学肥力和性质的主要部分,其含量高低直接影响土壤肥力水平。根据全国第二次土壤普查推荐的土壤肥力分级标准^[14],对试验过程中土壤相应的单个养分(全氮、全磷、全钾、有效氮、有效磷、速效钾、有机质等)指标按土壤肥力分级标准进行分级评估。

1.4.2 土壤肥力综合指数(SNI)统计方法 土壤肥力分级只能针对单个指标划定肥力等级,对土壤综合肥力的评估具有一定局限性。SNI是土壤养分综合评价的依据^[15],SNI值越大,说明土壤肥力越高。其计算过程为:

$$Y_i = \sum_{p=1}^n |Y_{ip}| \times F_p \quad (i=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7; p=1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中: Y_i 是第*i*个指标的权重分配系数; Y_{ip} 是第*i*个指标在第*p*个主成分上的载荷值; F_p 是第*p*个主成分的特征值。

$$W_i = \left(Y_i / \sum_{i=1}^7 Y_i \right) \times 100 \quad (2)$$

式中: W_i 表示第*i*个指标的权重; Y_i 是第*i*个指标的权重分配系数。

$$\text{SNI} = \sum_{i=1}^7 Q_i \times W_i \quad (3)$$

式中: Q_i 表示第*i*个指标的隶属度值。

要计算SNI,一是土壤指标的选择;二是指标权重的确定;三是隶属函数的建立。①土壤指标的选择:根据全国第二次土壤普查推荐土壤肥力分级标准^[14]中涉及的土壤肥力指标,选择土壤有机质、全氮、全磷、全钾和碱解氮(有效氮,本研究采用土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量之和表示)、有效磷、速效钾7个肥力指标进行土壤综合肥力评价。②指标权重的确定:利用主成分分析对上述土壤指标进行权重确定。③隶属函数建立和隶属度的计算:隶属函数实际上是评价指标与作物生长曲线之间关系的数学表达式,它可以将不同量纲的指标转化成数值为0~1的无量纲值,单一指标隶属度越大,反映该指标的肥力水平越高^[16]。隶属度的计算公式为:

$$D(X_i) = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (4)$$

式中: X_i 表示第*i*个指标的测定值; X_{\max} 和 X_{\min} 分别表示所有处理中第*i*个指标的最大值和最小值。

1.5 数据处理与分析

试验结果采用Excel 2016和SPSS 20.0软件进行数据统计,采用ANOVA中Duncan多重比较法($P < 0.05$)进行差异显著性分析和Pearson双变量相关性分析,采用Origin 2021软件绘制图表。

2 结果与分析

2.1 施用有机物料对土壤pH和有机质的影响

土壤pH的变化受有机物料本身pH的影响较大,有机物料pH(表1)均高于土壤pH(表2)。轻污染土壤

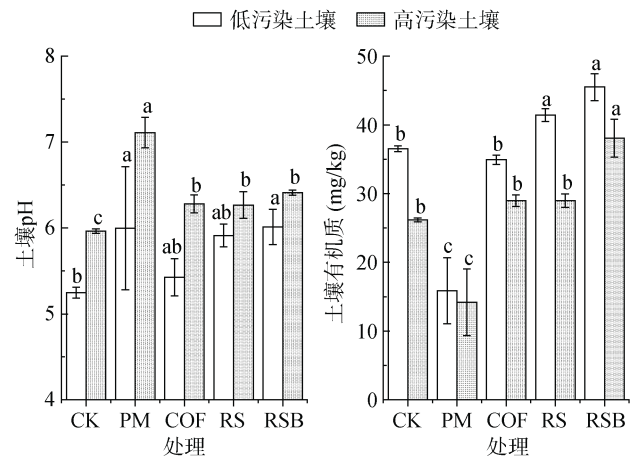
和中污染土壤施用有机物料土壤 pH 较 CK 处理分别提高了 0.18 ~ 0.76 和 0.31 ~ 1.15 个 pH 单位(图 1), 其中 PM 和 RSB 处理与 CK 处理差异显著。土壤有机质的数量和质量不仅是衡量土壤肥力的重要指标, 其形成、转化及稳定过程还与土壤重金属生物有效性和作物产量等密切相关^[17]。轻污染土壤有机质为 15.86 ~ 45.50 g/kg, RS 和 RSB 处理有机质含量较 CK 处理分别升高了 13.30% 和 24.49%, 均达土壤肥力 1 级(>40.00 g/kg)。中污染土壤本身有机质含量(21.7 g/kg)较轻污染土壤(27.2 g/kg)低(表 2)。中污染土壤有机质为 14.19 ~ 38.08 g/kg, RSB 处理有机质含量显著高于其他处理, 较 CK 处理升高了 45.40%, 属土壤肥力 2 级(30.00 ~ 40.00 g/kg)。

2.2 施用有机物料对土壤养分的影响

2.2.1 施用有机物料对土壤氮含量的影响

两种土壤中, COF 处理土壤全氮、NO₃-N 和 NH₄⁺-N 含量均高于其他处理(表 3)。轻污染土壤中, 不同处理土壤全氮含量为 2.17 ~ 2.44 g/kg, 均达到土壤肥力 1 级(>2.00 g/kg)。中污染土壤中, 不同处理土壤全氮含量为 1.70 ~ 1.85 g/kg, 均属土壤肥力 2 级(1.50 ~

2.00 g/kg)。土壤 NO₃-N 和 NH₄⁺-N 是作物可直接吸收利用的养分, 两种土壤中 NO₃-N 含量均为 COF 和 CK 处理明显较高, 其他处理间无显著差异; 而土壤 NH₄⁺-N 含量各处理间相差不大。



(图中不同小写字母表示同一土壤不同处理间差异显著 ($P < 0.05$), 下同)

图 1 有机物料对土壤 pH 和有机质的影响

Fig. 1 Soil pH and organic matter contents under different organic manures

表 3 有机物料对土壤氮含量的影响

Table 3 Soil nitrogen contents under different organic manures

| 处理 | 轻污染土壤 | | | 中污染土壤 | | |
|-----|---------------|---------------------------|--|----------------|---------------------------|--|
| | 全氮(g/kg) | NO ₃ -N(mg/kg) | NH ₄ ⁺ -N(mg/kg) | 全氮(g/kg) | NO ₃ -N(mg/kg) | NH ₄ ⁺ -N(mg/kg) |
| CK | 2.17 ± 0.06 b | 3.22 ± 1.31 b | 1.43 ± 0.11 b | 1.72 ± 0.09 b | 2.55 ± 1.29 ab | 1.78 ± 0.68 a |
| PM | 2.26 ± 0.01 b | 1.09 ± 0.40 c | 1.34 ± 0.23 b | 1.70 ± 0.06 b | 1.06 ± 0.20 b | 1.62 ± 0.56 a |
| COF | 2.44 ± 0.11 a | 50.12 ± 1.87 a | 2.59 ± 0.43 a | 1.85 ± 0.02 a | 4.49 ± 2.78 a | 1.84 ± 0.45 a |
| RS | 2.20 ± 0.03 b | 1.82 ± 0.79 bc | 1.27 ± 0.05 b | 1.77 ± 0.05 ab | 0.62 ± 0.02 b | 1.46 ± 0.42 a |
| RSB | 2.24 ± 0.05 b | 1.00 ± 0.23 c | 1.26 ± 0.21 b | 1.77 ± 0.02 ab | 1.21 ± 0.20 b | 1.29 ± 0.23 a |

注: 表中同列不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$), 下同。

2.2.2 施用有机物料对土壤磷含量的影响

与 CK 处理相比, 施加有机物料对土壤全磷和有效磷含量的影响均表现为 PM 处理显著升高而其他处理略有下降(表 4)。土壤全磷含量均较低, 轻污染和中污染土壤分别为 0.51 ~ 0.65 g/kg 和 0.36 ~ 0.66 g/kg。不同处理土壤有效磷含量差异较大, 最高的是 PM 处理, 轻污

染和中污染土壤中分别为 58.94 mg/kg 和 53.47 mg/kg, 均达土壤肥力 1 级(>40 mg/kg); 其次是 COF 和 CK 处理, 两个处理间无显著差异, 轻污染土壤中均属土壤肥力 2 级(20.00 ~ 40.00 mg/kg), 中污染土壤中均属 3 级(10.00 ~ 20.00 mg/kg); RS 和 RSB 处理土壤有效磷含量最低, 处理间无显著差异, 均属土壤肥力 3 级。

表 4 有机物料对土壤磷含量的影响

Table 4 Soil phosphorus contents under different organic manures

| 处理 | 轻污染土壤 | | 中污染土壤 | |
|-----|---------------|-----------------|----------------|-----------------|
| | 全磷(g/kg) | 有效磷(mg/kg) | 全磷(g/kg) | 有效磷(mg/kg) |
| CK | 0.58 ± 0.03 b | 39.88 ± 6.87 b | 0.48 ± 0.04 b | 18.02 ± 5.31 b |
| PM | 0.65 ± 0.05 a | 58.94 ± 13.98 a | 0.66 ± 0.03 a | 53.47 ± 5.01 a |
| COF | 0.51 ± 0.02 c | 30.33 ± 5.20 b | 0.36 ± 0.04 c | 15.64 ± 9.17 bc |
| RS | 0.51 ± 0.02 c | 13.64 ± 5.54 d | 0.44 ± 0.08 bc | 6.09 ± 0.53 c |
| RSB | 0.52 ± 0.01 c | 19.68 ± 0.10 cd | 0.45 ± 0.06 bc | 10.44 ± 0.83 bc |

2.2.3 施用有机物料对土壤钾含量的影响 有机物料对土壤全钾含量的影响不大,而土壤速效钾含量不同处理差异显著(表 5)。轻污染土壤全钾含量(12.23 ~ 17.17 g/kg)均高于中污染土壤(10.97 ~ 12.90 g/kg),均表现为 COF 处理最高。轻污染土壤中,COF、CK 和 RS 处理全钾含量属土壤肥力 3 级(15.00 ~ 20.00 g/kg),其他处理均属土壤肥力 4 级(10.00 ~ 15.00 g/kg)。除个别处理外,土壤速效钾含

量表现为中污染土壤略高于轻污染土壤,但两种土壤中均表现为 COF 处理最高,其次是 RSB 处理,均属土壤肥力 1 级(>200.00 mg/kg)。RS、PM 和 CK 处理土壤速效钾含量最低且处理间无显著差异。与 CK 处理相比,施加有机物料处理土壤钾的有效性(速效钾与全钾含量的比值)均明显升高,轻污染土壤和中污染土壤中 COF 处理土壤钾的有效性分别是 CK 处理的 9.92 倍和 5.20 倍。

表 5 有机物料对土壤钾含量的影响
Table 5 Soil potassium contents under different organic manures

| 处理 | 轻污染土壤 | | 中污染土壤 | |
|-----|-----------------|------------------|----------------|------------------|
| | 全钾(g/kg) | 速效钾(mg/kg) | 全钾(g/kg) | 速效钾(mg/kg) |
| CK | 15.97 ± 1.29 ab | 61.51 ± 6.82 c | 11.00 ± 0.89 a | 90.16 ± 19.70 c |
| PM | 14.73 ± 1.90 b | 58.17 ± 10.88 c | 11.04 ± 1.55 a | 113.67 ± 6.14 c |
| COF | 17.17 ± 0.06 a | 664.20 ± 92.78 a | 12.90 ± 0.96 a | 553.68 ± 58.29 a |
| RS | 15.93 ± 0.64 ab | 76.11 ± 4.18 c | 12.65 ± 0.35 a | 135.06 ± 14.17 c |
| RSB | 12.23 ± 0.81 c | 242.46 ± 36.63 b | 10.97 ± 0.40 a | 324.41 ± 14.77 b |

2.2.4 施用有机物料对 SNI 的影响 轻污染和中污染土壤中,COF 处理 SNI 值分别为 0.70 和 0.64,分别是其他处理的 1.50 倍 ~ 3.18 倍和 1.71 倍 ~ 2.86 倍,均显著高于其他处理(图 2)。轻污染土壤中,施加有机物料处理 SNI 较 CK 处理略有升高或下降,除 COF 处理外,不同处理 SNI 为 0.22 ~ 0.46,均与 CK 处理无显著差异。中污染土壤中,施加有机物料处理 SNI 与 CK 处理相比均显著升高,是 CK 处理的 1.50 倍 ~ 2.91 倍。

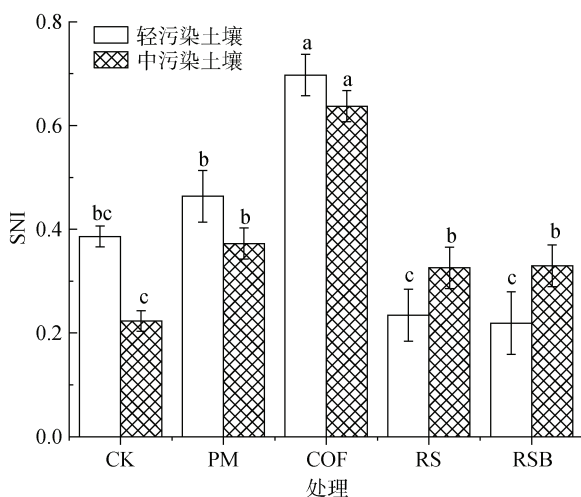


图 2 土壤肥力综合指数

Fig. 2 Soil nutrient indexes under different organic manures

2.3 施用有机物料对土壤有效态 Cd 含量及作物 Cd 吸收的影响

2.3.1 土壤有效态 Cd 含量

有机物料施加对土壤

有效态 Cd 含量的影响不大(表 6)。轻污染土壤中,有效态 Cd 含量为 0.23 ~ 0.27 mg/kg,不同处理间无显著差异。中污染土壤中,有效态 Cd 含量为 0.68 ~ 0.85 mg/kg,施加有机物料处理土壤有效态 Cd 含量较 CK 处理下降了 2.35% ~ 20.00%,其中 PM 处理土壤有效态 Cd 含量显著下降。

2.3.2 作物 Cd 吸收情况 图 3 是不同处理上海青地上部及地下部 Cd 含量(以鲜重计)变化。轻污染土壤中,上海青地上部 Cd 含量为 0.14 ~ 0.28 mg/kg,其中 PM 和 RSB 处理地上部 Cd 含量较 CK 处理分别下降了 25.00% 和 41.67%;施加有机物料处理地下部 Cd 含量均显著下降,与 CK 处理相比,地下部 Cd 含量降低了 50.70% ~ 66.15%。中污染土壤中,施加有机物料处理地上部和地下部 Cd 含量为 0.19 ~ 0.78 mg/kg 和 0.22 ~ 0.57 mg/kg,均显著低于 CK 处理(1.13 mg/kg 和 1.36 mg/kg)。两种土壤中 PM 处理上海青地上部 Cd 含量均低于 GB 2762—2022《食品安全国家标准 食品中污染物限量》^[18]标准中叶菜蔬菜 Cd 的限量标准(0.20 mg/kg)。

2.4 土壤肥力水平与作物 Cd 吸收的相关关系

图 4 是土壤肥力相关指标与有效态 Cd 含量及上海青不同部位 Cd 含量的相关分析。由图 4 可知,上海青地上部和地下部 Cd 含量均与土壤有效态 Cd 含量显著正相关($P < 0.01$),与土壤全氮、全磷和有效磷含量显著负相关。而土壤有效态 Cd 含量与全氮、全磷、全钾和有效磷含量均呈显著负相关关系,说明提高土壤的氮、磷、钾养分含量,有效降低了土壤的有效态 Cd 含量,减少了上海青对 Cd 的吸收。

表 6 有机物料对土壤有效态 Cd 含量的影响
Table 6 Soil available Cd contents under different organic manures

| 供试土壤 | CK | PM | COF | RS | RSB |
|-------|---------------|---------------|---------------|---------------|----------------|
| 轻污染土壤 | 0.23 ± 0.03 a | 0.27 ± 0.03 a | 0.27 ± 0.04 a | 0.27 ± 0.04 a | 0.24 ± 0.04 a |
| 中污染土壤 | 0.85 ± 0.06 a | 0.68 ± 0.04 b | 0.79 ± 0.04 a | 0.83 ± 0.03 a | 0.76 ± 0.09 ab |

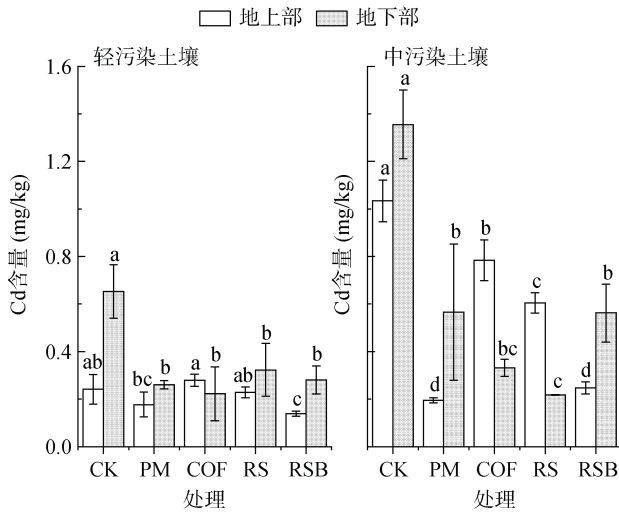


图 3 有机物料对上海青 Cd 含量的影响

Fig. 3 Cd contents in *Brassica chinensis* L. under different organic manures

3 讨论

3.1 有机物料对土壤肥力的影响

在土壤其他肥力因素变化不大的情况下,氮、磷、钾等养分元素是土壤肥力的核心要素。大量研究表明,有机物料可以有效改善土壤氮、磷、钾等养分的平衡状况、提高氮肥利用率和增加土壤有机质含量,提高土壤肥力和生态系统的生产力^[19]。施加有机物料在一定程度上影响土壤的养分水平,与 CK 处理相比,两种土壤中 COF 处理均提高了土壤全氮、NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 含量(表 3), PM 处理土壤全磷和有效磷含量显著高于其他处理(表 4)。两种土壤中,COF 和 RSB 处理土壤速效钾含量均为土壤肥力 1 级,显著高于其他处理(表 5)。究其原因:一方面是因为有机物料本身含有较高的养分,通过增施有机物料,直接增加土

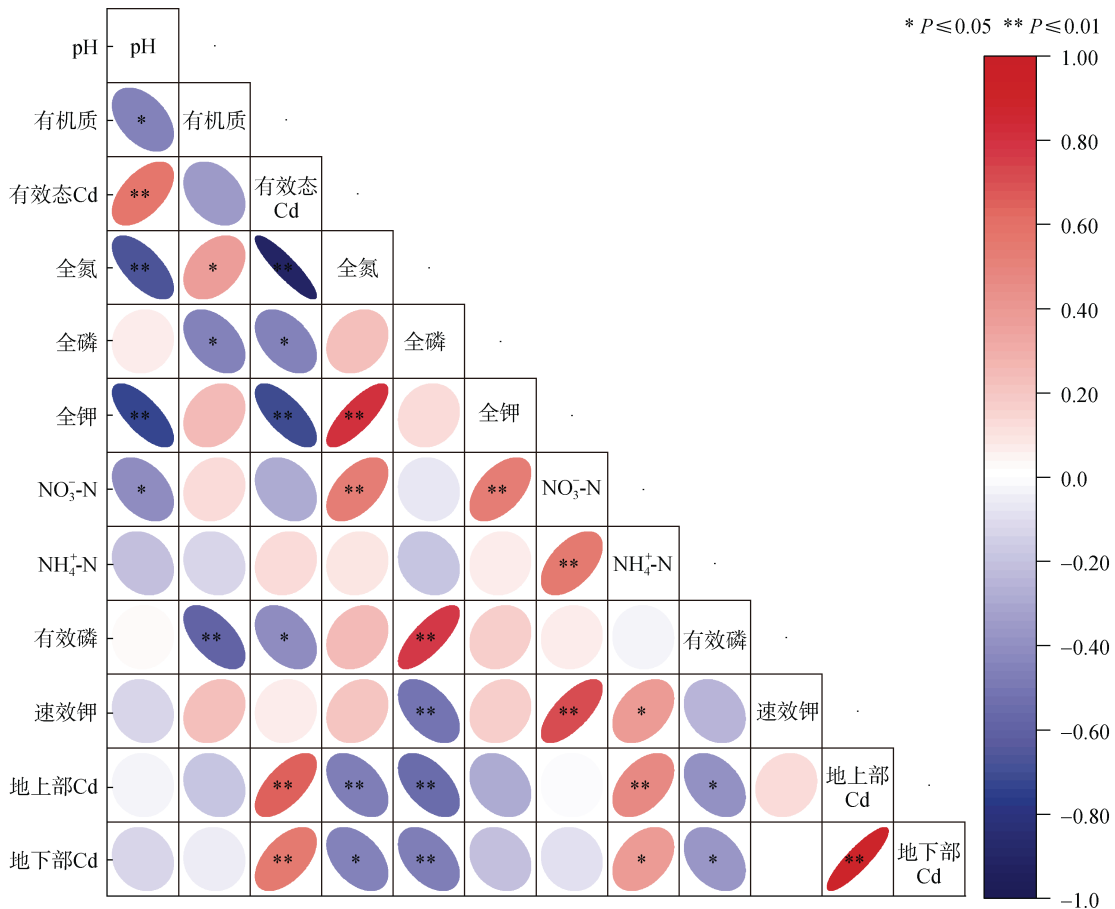


图 4 土壤肥力水平与作物 Cd 吸收的相关关系

Fig. 4 Relationships between soil nutrient contents and Cd contents of *Brassica chinensis* L.

壤养分含量。本研究中,猪粪含 P_2O_5 量较高(50.4 g/kg),商品有机肥中氮(44.8 g/kg)和 K_2O (105.0 g/kg)含量较高,高养分含量有机物料的施用直接提高了土壤中相应养分的含量。朱晓晖等^[20]研究发现,不同有机物料(猪粪、鸡粪、牛粪)对土壤有效磷含量的影响明显不同,有机物料中有效磷含量高则表层土壤中水溶性磷和有效磷含量也高。Khaliq 和 Abbasi^[21]发现与单施化肥相比,有机物料配施土壤全氮含量提高了 14.0% ~ 29.0%。另一方面可能是有机物料的施用改变土壤养分状况的同时,有机-无机养分的转化提高了养分利用效率。例如,磷肥施入土壤后极易被吸附形成难溶性磷酸盐,从而影响磷的释放。增施有机物料能使有机磷向无机磷转化,且通过腐殖质包裹铁、铝、钙等的氧化物而降低对磷的吸附,提高磷的有效性^[22]。有机物料中有机营养进入土壤还可以增加土壤中有益微生物群落的多样性及其代谢活力,加速有机质的分解、转化和养分释放速率,促进土壤中有机质的稳定和团聚体形成^[23]。本研究中,PM 处理采用的是已发酵的猪粪,含水量也比较适中,其中的微生物活性较强,可能加速了有机物质的矿质化过程,从而导致施用猪粪后的土壤中有机质含量反而出现降低的情况^[24]。施加有机物料明显增加土壤 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N 和速效钾含量(表 3 和表 5),轻污染和中污染土壤中 COF 处理土壤钾的有效性分别是 CK 处理的 9.92 倍和 5.20 倍。与 CK 处理相比,中污染土壤施加有机物料处理 SNI 升高了 0.50 倍 ~ 1.91 倍,两种土壤中均为 COF 处理最高,分别是其他处理的 1.50 倍 ~ 3.18 倍和 1.71 倍 ~ 2.86 倍。李树山等^[25]发现,增施有机物料显著提高土壤养分有效性。生物质炭是生物质在缺氧条件下热解炭化产生的具有高度芳香化结构的难溶性有机物,具有很强的碳封存能力^[26]。生物质炭加入土壤后参与土壤有机质的分解转化,并影响土壤有机碳的矿化和腐殖化过程^[27]。本研究中,两种土壤中 RSB 处理有机质含量均显著升高(图 1),同样地,温延臣等^[28]采用有机肥配施化肥 3 年后,发现与单施化肥相比,土壤有机碳含量也增加 19.5%。

3.2 有机物料对土壤 Cd 有效性及作物 Cd 吸收的影响

有关有机物料对土壤重金属有效性及作物 Cd 吸收的影响结论还存在较大分歧,因为有机物料本身含有少量重金属,长期施用可能增加土壤中重金属累积的风险^[29]。本研究中,水稻秸秆和水稻秸秆生物质炭本身 Cd 含量较高,分别为 1.02 mg/kg 和 1.91 mg/kg

(表 1)。但轻污染土壤中施加有机物料处理有效态 Cd 含量均与 CK 处理无显著差异,中污染土壤中有效态 Cd 含量较 CK 处理均显著下降,其中 PM 处理下降了 20.00%(表 6)。研究表明,有机物料增加了土壤中交换位点的数量,通过表面吸附和稳定的络合作用降低重金属的迁移性^[30]。有机物料施入土壤后也可以通过腐殖化作用转变成富含羟基、羧基、酚羟基等官能团和配位体的腐殖质,能够螯合土壤中的 Cd^{2+} ,在一定程度可降低土壤 Cd 有效性^[31]。此外,有机物料本身 pH 较高(6.71 ~ 9.04),土壤中施加有机物料后土壤 pH 不同程度升高(图 1)。有机物料分解过程中产生的腐植酸类物质会降低土壤中交换态 Al^{3+} 的含量,抑制因交换态 Al^{3+} 水解而产生更多的 H^+ ,缓解土壤酸化而引起的土壤 Cd 有效性升高^[32]。土壤-作物系统重金属的累积和转运主要取决于土壤重金属的生物有效性^[33]。本研究中,土壤有效态 Cd 含量与全氮、全磷、全钾和有效磷含量均呈显著负相关关系,上海青地上部和地下部 Cd 含量均与土壤有效态 Cd 含量显著正相关(图 4),提高土壤氮、磷、钾含量,有效降低有效态 Cd 含量且抑制了作物对 Cd 的吸收。轻污染土壤中,PM 和 RSB 处理地上部 Cd 含量较 CK 处理分别下降了 25.00% 和 41.67%,符合 GB 2762—2022^[18]中 Cd 的限量标准。与 CK 处理相比,中污染土壤中,施加有机物料处理地上部和地下部 Cd 含量分别下降 24.27% ~ 81.55% 和 58.09% ~ 83.82%,其中 PM 处理地上部 Cd 含量符合 GB 2762—2022^[18]中 Cd 的限量标准(图 3)。说明施加有机物料可实现 Cd 污染农田土壤的安全利用。

4 结论

本试验条件下,有机物料本身养分含量直接影响土壤养分的变化。施加猪粪有效提高了土壤全磷和有效磷含量,施加商品有机肥土壤全氮、全钾和速效钾含量均明显升高。上海青地上部和地下部 Cd 含量均与土壤有效态 Cd 含量显著正相关,与土壤全氮、全磷和有效磷含量显著负相关。施加有机物料显著降低了中污染土壤中有效态 Cd 含量,明显抑制作物对 Cd 的吸收。两种土壤中,施加猪粪处理上海青地上部 Cd 含量均符合 GB 2762—2022 限量标准。综合考虑,商品有机肥对提升土壤肥力效果最好,但在南方 Cd 污染农田中要实现作物安全生产还存在一定风险。针对南方中轻度 Cd 污染农田土壤的培肥及安全利用可考虑施用猪粪有机肥。

参考文献:

- [1] Hu Y A, Cheng H F, Tao S. The challenges and solutions for cadmium-contaminated rice in China: A critical review[J]. *Environment International*, 2016, 92/93: 515–532.
- [2] 朱兆良, 金继运. 保障我国粮食安全的肥料问题[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(2): 259–273.
- [3] Liu J, Liu M, Wu M, et al. Soil pH rather than nutrients drive changes in microbial community following long-term fertilization in acidic Ultisols of Southern China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2018, 18(5): 1853–1864.
- [4] Zhu H H, Chen C, Xu C, et al. Effects of soil acidification and liming on the phytoavailability of cadmium in paddy soils of central subtropical China[J]. *Environmental Pollution*, 2016, 219: 99–106.
- [5] 杜春燕. 有机肥替代化肥对果实产量、品质及土壤肥力的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
- [6] 刘佳, 陈晓芬, 刘明, 等. 长期施肥对旱地红壤细菌群落的影响[J]. *土壤学报*, 2020, 57(2): 468–478.
- [7] Aguilera E, Lassaletta L, Sanz-Cobena A, et al. The potential of organic fertilizers and water management to reduce N₂O emissions in Mediterranean climate cropping systems. A review[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2013, 164: 32–52.
- [8] 杜为研, 唐杉, 汪洪. 我国有机肥资源及产业发展现状[J]. *中国土壤与肥料*, 2020(3): 210–219.
- [9] Yao Y, Gao B, Zhang M, et al. Effect of biochar amendment on sorption and leaching of nitrate, ammonium, and phosphate in a sandy soil[J]. *Chemosphere*, 2012, 89(11): 1467–1471.
- [10] Ahmad M, Rajapaksha A U, Lim J E, et al. Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review[J]. *Chemosphere*, 2014, 99: 19–33.
- [11] 国务院. 土壤污染防治行动计划[EB/OL]. (2016-05-31) [2024-03-18]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-05/31/content_5078377.htm.
- [12] 曹雪莹, 谭长银, 蔡润众, 等. 植物轮作模式对镉污染农田的修复潜力[J]. *农业环境科学学报*, 2022, 41(4): 765–773.
- [13] 段海芹, 秦秦, 吕卫光, 等. 有机肥长期施用对设施土壤全镉和有效态镉含量的影响[J]. *土壤学报*, 2021, 58(6): 1486–1495.
- [14] 中国土壤调查办公室. 全国第二次土壤普查养分分级标准[M]. 北京: 中国农业出版社, 1979.
- [15] 杨旭初, 叶会财, 李大明, 等. 基于模糊数学和主成分分析的长期施肥红壤旱地土壤肥力评价[J]. *中国土壤与肥料*, 2018(3): 79–84.
- [16] 郭郁频, 米福贵, 闫利军, 等. 不同早熟禾品种对于旱胁迫的生理响应及抗旱性评价[J]. *草业学报*, 2014, 23(4): 220–228.
- [17] 汪景宽, 徐英德, 丁凡, 等. 植物残体向土壤有机质转化过程及其稳定机制的研究进展[J]. *土壤学报*, 2019, 56(3): 528–540.
- [18] 中华人民共和国国家卫生健康委员会, 国家市场监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中污染物限量: GB 2762—2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- [19] 陈贵, 张红梅, 沈亚强, 等. 猪粪与牛粪有机肥对水稻产量、养分利用和土壤肥力的影响[J]. *土壤*, 2018, 50(1): 59–65.
- [20] 朱晓晖, 杜晓玉, 张维理. 有机肥种类对土壤有效磷累积量的影响及其流失风险[J]. *中国土壤与肥料*, 2013(5): 14–18.
- [21] Khaliq A, Abbasi M K. Improvements in the physical and chemical characteristics of degraded soils supplemented with organic-inorganic amendments in the Himalayan Region of Kashmir, Pakistan[J]. *CATENA*, 2015, 126: 209–219.
- [22] 王琛, 林启美, 赵小蓉, 等. 有机肥替代化肥对土壤养分动态及甜玉米生产的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2020(5): 132–140.
- [23] 王娟娟, 朱紫娟, 钱晓晴, 等. 减施化肥与不同有机肥配施对稻季土壤细菌群落结构的影响[J]. *土壤*, 2021, 53(5): 983–990.
- [24] 王晓娇, 张仁陟, 齐鹏, 等. Meta分析有机肥施用对中国北方农田土壤 CO₂排放的影响[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(10): 99–107.
- [25] 李树山, 杨俊诚, 姜慧敏, 等. 有机无机肥氮素对冬小麦季潮土氮库的影响及残留形态分布[J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32(6): 1185–1193.
- [26] Kim H S, Kim K R, Kim H J, et al. Effect of biochar on heavy metal immobilization and uptake by lettuce (*Lactuca sativa* L.) in agricultural soil[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74(2): 1249–1259.
- [27] 王英惠, 杨旻, 胡林潮, 等. 不同温度制备的生物质炭对土壤有机碳矿化及腐殖质组成的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32(8): 1585–1591.
- [28] 温延臣, 张曰东, 袁亮, 等. 商品有机肥替代化肥对作物产量和土壤肥力的影响[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(11): 2136–2142.
- [29] Yang S Y, Zhao J, Chang S X, et al. Status assessment and probabilistic health risk modeling of metals accumulation in agriculture soils across China: A synthesis[J]. *Environment International*, 2019, 128: 165–174.
- [30] Shakoor M B, Niazi N K, Bibi I, et al. Unraveling health risk and speciation of arsenic from groundwater in rural areas of punjab, Pakistan[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2015, 12(10): 12371–12390.
- [31] 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.
- [32] Elouear Z, Bouhamed F, Bouzid J. Evaluation of different amendments to stabilize cadmium, zinc, and copper in a contaminated soil: Influence on metal leaching and phytoavailability[J]. *Soil and Sediment Contamination*, 2014, 23(6): 628–640.
- [33] Wan Y N, Huang Q Q, Wang Q, et al. Accumulation and bioavailability of heavy metals in an acid soil and their uptake by paddy rice under continuous application of chicken and swine manure[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 384: 121293.