

doi: 10.11838/sfsc.1673-6257.19334

中度含镉鸡粪源有机肥对土壤镉积累及小白菜吸镉量的影响

甘 露¹, 蒋子旻¹, 黄柏豪¹, 罗 伟¹, 李 昆², 伍 钧^{1*}

(1. 四川农业大学环境学院, 四川 成都 611130; 2. 成都土壤肥料测试中心, 四川 成都 610041)

摘 要:为探讨施用鸡粪源有机肥对土壤-作物系统累积重金属镉的影响, 实现鸡粪源有机肥的安全利用, 以种植一季小白菜盆栽试验方式, 选择镉含量适中($\text{Cd } 1.58 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)的鸡粪源有机肥, 以不施肥空白(CK)和化肥常规施肥处理(F)为对照, 在与常规肥施加等量化肥的基础上, 设置4种不同施肥量有机肥处理, 分析施用鸡粪源有机肥对土壤基本理化性质和土壤镉累积量及小白菜镉吸收量的影响。结果表明: 鸡粪源有机肥施用量为 $0.5 \sim 2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时土壤全氮、碱解氮、速效钾及有效磷含量较高, 分别为 $0.725 \sim 0.760 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $111.50 \sim 141.48 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $205.86 \sim 230.44 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $19.13 \sim 28.54 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 土壤有机碳为 $10.27 \sim 11.84 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 但种植一季对土壤机械组成和阳离子交换量无明显影响。总体来看, 随着鸡粪源有机肥施用量的增加, 土壤pH值呈现缓慢降低趋势, 对土壤累积镉影响不明显, 土壤中镉的可交换态和可还原态含量呈增加趋势, 可氧化态和残渣态含量呈减少趋势, 而小白菜地上可食用部分镉的累积量有降低趋势。综上, 鸡粪源有机肥的施加有助于改善土壤基本理化性质, 影响镉在土壤中的形态分布, 在种植一季小白菜时对土壤累积镉影响不明显, 但有助于降低小白菜地上可食用部分的镉累积量。

关键词: 镉; 小白菜; 土壤; 鸡粪; 有机肥

随着人们对粮食需求量的增加, 要求单位面积耕地达到最高效率, 农用品如化肥的过度投入致使土壤和蔬菜中重金属累积的现象已十分普遍。为落实“化肥零增长”方案, 对化肥使用进行一定制约, 可改用有机肥。畜禽粪便有机肥的施加在改善土壤肥力的同时, 其丰富的养分还可进行再次循环, 对保护生态环境具有十分重要的意义^[1]。但在现代畜禽养殖业中, 往往为了防治病害、增加养殖收益而滥用微量元素添加剂等有害物质^[2]。由于其较低的利用率, 畜禽饲料中的重金属元素大部分会累积在畜禽粪便中, 从而导致部分以畜禽粪便为主要原料的有机肥中重金属含量超标^[3]。研究发现畜禽对无机Cd和有机Cd的吸收率分别为 $1\% \sim 3\%$ 、 $10\% \sim 25\%$, 证明了大量Cd会随排泄残留在粪便中^[4]。如Nicholson^[5]在测定英国的动物粪便后表明其中含有较高的重金属。土壤镉污染不仅会对土

壤中微生物的生存条件有所影响, 还会危害植物的生化特性, 导致植物体内酶的活性降低, 通过食物链对人体健康产生危害^[6]。

重金属随肥料施入土壤后积累残留, 引发了土壤及作物的安全隐患, 但在目前的土壤镉污染修复研究中, 更多关注的是有机肥钝化修复土壤中重金属污染, 忽略了其自身对土壤基本理化性质和对作物品质的影响, 关于重金属含量、贮积、运移、降解规律、积累特征、危害描述和风险预警等风险评估研究工作也相对滞后。因此, 本试验以小白菜盆栽的方式, 选择重金属镉含量适中的鸡粪源商品有机肥, 研究施用含镉畜禽粪便有机肥对农产品质量安全、土壤基本理化性质及土壤累积镉及小白菜吸收镉的影响, 具有现实意义; 同时, 也可为农业生产与环境协调发展, 评价畜禽粪便有机肥中重金属进入土壤后的生态风险^[7], 为畜禽粪便有机肥的产地环境污染和农产品质量监管、标准制订、生产指导、消费引导及科学评价农产品品质功能等, 提供一定的科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤采自四川省大邑县的中性紫色土, 其

收稿日期: 2019-07-25; 录用日期: 2019-09-03

基金项目: 四川省科技支撑计划项目(2016NZ0039)。

作者简介: 甘露(1998-), 女, 四川宜宾人, 本科, 主要从事土壤重金属污染研究。E-mail: 806261191@qq.com。

通讯作者: 伍钧, E-mail: wuj1962@163.com。

基本理化性质见表 1。供试小白菜为成熟期 45 d 的特种小白菜，购自成都。供试鸡粪源商品有机肥基
本性质如表 2 所示。供试化肥为 17-17-17（硫酸钾型）螯合能量肥，Cd 含量为 $0.11 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

表 1 供试土壤基本理化性质及 Cd 含量

pH 值	有机碳 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全氮 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	碱解氮 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	有效磷 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效钾 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	CEC ($\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全镉 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
7.28	11.55	0.780	98.03	7.32	181.9	7.36	0.32

表 2 鸡粪源有机肥基本性质

pH 值	有机质 (以烘干基计 %)	氮 (%)	磷 (%)	钾 (%)	总镉 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
7.9	19	0.7	1.3	2.5	1.58

1.2 试验方案

试验于 2018 年 10 月 20 日至 2019 年 4 月 16 日在四川农业大学试验大棚和实验室进行，种植一季小白菜，设 6 个处理，分别为不施肥对照（CK）、化肥常规施肥处理（F）、在施加与 F 等量化肥后再添加常量有机肥处理（M1）、2 倍量有机肥处理（M2）、3 倍量有机肥处理（M3）及 4 倍量有机肥处理（M4），具体施用量如表 3。每盆中

均装入经自然风干、压碎、过 2 mm 筛的供试土壤 2.0 kg，同时按表 3 加入化肥与有机肥后混匀，每盆均匀播种 10 粒小白菜种子，覆土，洒水浇透，将其置于试验大棚中培养，每处理 3 次重复。待小白菜种子发芽后匀苗，每盆保留 3 株长势一致的菜苗。根据土壤情况 1 ~ 2 d 浇水一次，出苗前润湿土壤即可，出苗后按小白菜的生长情况适量浇水。

表 3 各处理的有机肥和化肥施用量

处理	CK	F	M1	M2	M3	M4
化肥量 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) [$(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})$]	—	0.1 (225)	0.1 (225)	0.1 (225)	0.1 (225)	0.1 (225)
鸡粪源有机肥量 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) [$(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})$]	—	—	0.5 (1 125)	1.0 (2 250)	1.5 (3 375)	2.0 (4 500)

1.3 测定方法

土壤 pH 值、有机碳、全氮、碱解氮、有效磷、速效钾、CEC 的测定参考鲍士旦等^[8]的《土壤农化分析（第 3 版）》；土壤机械组成采用比重计速测法（国际制）；土壤镉含量参照 DZ/T 0279.5-2016^[9]测定，镉形态测定采用 BCR 分级连续提取法，将其分为可交换态、可还原态、可氧化态和残渣态^[10]。

供试有机肥样品基本养分按照 NY 525-2012 标准测定^[11]，肥料镉含量按照 NY/T 1978-2010^[12]标准测定。

待小白菜成熟后采样，洗净根部泥土并用吸水纸将水分吸干，分离植株地上部分和根部，经杀青（置于 105 ℃烘箱中杀青 20 min）后，于 50 ~ 60 ℃烘箱中烘至恒重。植物样品镉含量按照 GB 5009.268-2016 食品安全国家标准 食品中多元素的测定^[13]进行测定。

1.4 数据分析

数据处理及制图采用 Excel 2016，SPSS 22.0。结合单因素方差分析法和 LSD 法进行分析比较，显

著水平为 0.05，并用 Origin 9.0 软件制图。

2 结果与分析

2.1 土壤基本性质变化

2.1.1 土壤 pH 值

由图 1 可知，单施化肥和施加有机肥都能降低土壤 pH 值，与 CK 处理相比差异显著。其中 M4 处理土壤 pH 值最低，较 CK 处理降低了 0.28 个单位。添加有机肥后的 M1 ~ M4 处理与 F 处理相比，pH 值分别降低了 0.13、0.14、0.14、0.15 个单位，且随着鸡粪源有机肥投入量的增加，pH 值整体呈平缓降低趋势。

2.1.2 土壤有机碳

由图 2 可知，单施化肥和施加有机肥使土壤有机碳显著增加。与 F 处理相比，在施加有机肥的处理中，有机碳含量先降低再增加，在 M4 处理时达到最高值 $11.84 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，较 CK 增加 $1.57 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，较 F 增加 $0.33 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，在 M2 处理中最低，为 $10.86 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，但较 CK 也增加了 $0.59 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

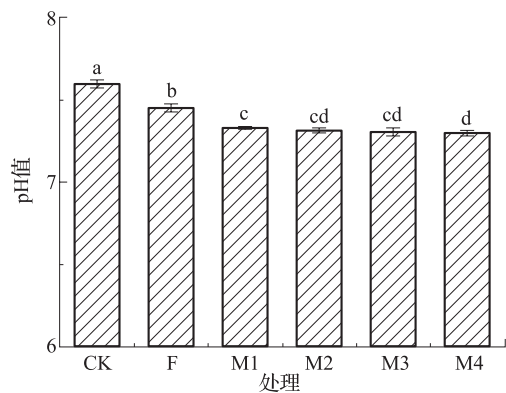


图1 施肥对土壤pH值的影响

注：图中不同小写字母表示处理间差异显著（ $P<0.05$ ）。下同。

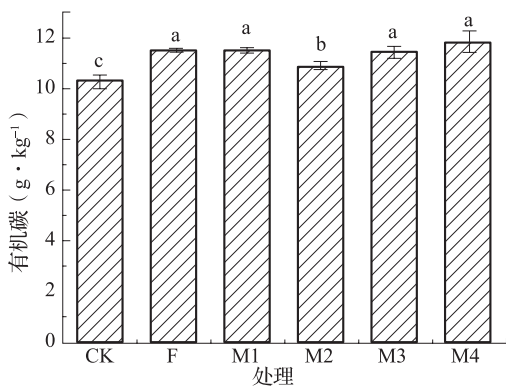


图2 施肥对土壤有机碳的影响

表4 施肥对土壤养分含量的影响

处理	施肥量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)		全氮 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	碱解氮 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效钾 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	有效磷 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
	化肥	鸡粪源有机肥				
CK	—	—	$0.662 \pm 0.03\text{c}$	$100.13 \pm 0.28\text{d}$	$191.17 \pm 2.87\text{e}$	$9.29 \pm 0.41\text{d}$
F	225	—	$0.676 \pm 0.03\text{bc}$	$113.27 \pm 0.92\text{c}$	$207.80 \pm 5.67\text{c}$	$13.98 \pm 0.45\text{c}$
M1	225	1 125	$0.733 \pm 0.03\text{abc}$	$111.50 \pm 1.29\text{c}$	$214.57 \pm 1.98\text{b}$	$19.13 \pm 0.46\text{c}$
M2	225	2 250	$0.725 \pm 0.03\text{abc}$	$114.96 \pm 2.95\text{c}$	$230.44 \pm 5.75\text{a}$	$20.29 \pm 0.50\text{b}$
M3	225	3 375	$0.760 \pm 0.02\text{a}$	$120.46 \pm 1.45\text{b}$	$226.07 \pm 4.14\text{a}$	$23.10 \pm 0.19\text{b}$
M4	225	4 500	$0.751 \pm 0.02\text{a}$	$141.48 \pm 3.22\text{a}$	$205.86 \pm 2.67\text{d}$	$28.54 \pm 1.34\text{a}$

注：表中的数据为平均值 ± 标准差，同列不同小写字母表示处理间差异显著（ $P<0.05$ ）。下同。

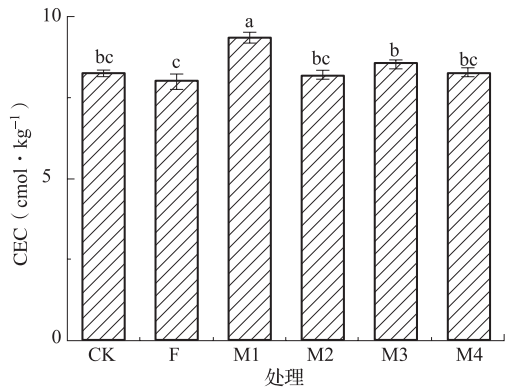


图3 施肥对土壤阳离子交换量的影响

2.1.3 土壤养分含量

由表4可知，单施化肥和施加鸡粪源有机肥均显著增加了土壤全氮、碱解氮、有效磷、速效钾的含量。全氮含量最高为M3处理，较CK、F相比分别提升了15%、12%；碱解氮含量最高为M4处理，较CK、F相比分别提升41%、25%；速效钾含量最高为M2处理，较CK、F相比分别提升21%、11%；有效磷含量最高为M4处理，较CK、F相比分别提升207%、104%；且除速效钾外，其余养分含量在施加鸡粪源有机肥处理后均呈稳定上升趋势。

2.1.4 土壤CEC和机械组成

由图3可知，6种处理之间土壤CEC含量变化无明显规律。含量最高为M1处理（ $9.35 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ ），较CK、F相比分别增加14%、17%。由表5可知，有机肥施加对土壤机械组成无明显影响，土壤质地与原供试土壤一致。

2.2 土壤镉含量及其形态分布情况

由图4可知，鸡粪源有机肥施用量对土壤中镉的累积量无明显影响，且不同处理之间无显著差异。镉含量最高为F处理，达到 $0.37 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，与CK处理相比提高10%；M1处理最低，为0.33

表5 施肥对土壤机械组成的影响 (%)

处理	砂粒	粘粒	粉粒
CK	99.96	0.03	0.01
F	99.96	0.02	0.02
M1	99.96	0.03	0.01
M2	99.96	0.03	0.01
M3	99.96	0.02	0.02
M4	99.96	0.02	0.02

mg · kg⁻¹，较 CK、F 分别降低 3%、11%。如图 5 所示，鸡粪源有机肥处理中，整体上土壤中可交换态镉和可还原态镉含量呈增加趋势，可氧化态和残渣态镉含量呈减少趋势。F 处理中镉主要以残渣态存在，占总镉的 36%，可交换态、可还原态、可氧化态含量分别占 21%、29%、13%；而 M4 处理中镉主要存在形态为可还原态，占总镉的 33%，较 F 相比提高了 4%，可交换态提高了 10%；可氧化态和残渣态含量分别降低了 2% 和 12%。

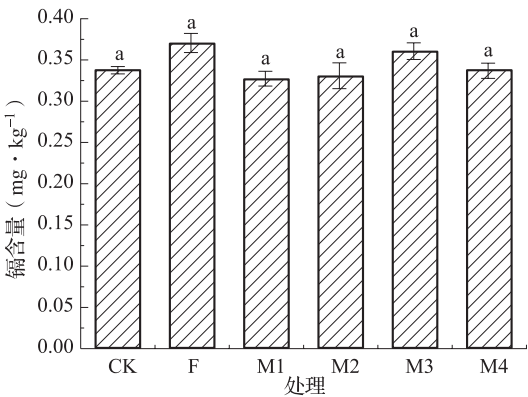


图 4 施肥对土壤镉含量的影响

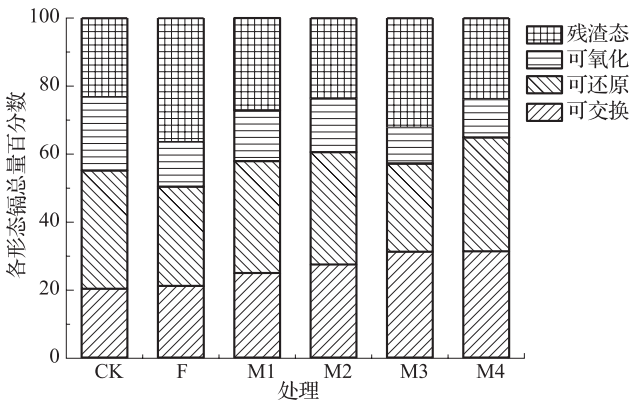


图 5 施肥对土壤镉形态的影响

2.3 土壤基本理化性质与镉形态相关性分析

对土壤基本理化性质与镉形态分级进行相关性分析，由表 6 可知，可交换态镉含量与 pH 值呈极显著负相关，与有机碳、全氮、碱解氮、有效磷含量呈极显著正相关，与速效钾含量显著正相关；可还原态镉含量与 pH 值呈显著正相关，与速效钾呈显著负相关；而可氧化态镉含量和 pH 值呈极显著正相关，和有机碳、全氮、碱解氮、有效磷呈极显著负相关，与速效钾呈显著负相关；残渣态镉含量

表 6 土壤镉形态与理化性质的相关性

项目	pH 值	有机碳	全氮	碱解氮	有效磷	速效钾
可交换态	-0.798**	0.592**	0.620**	0.766**	0.864**	0.556*
可还原态	0.484*	-0.335	-0.286	-0.102	-0.317	-0.498*
可氧化态	0.843**	-0.809**	-0.686**	-0.775**	-0.848**	-0.500*
残渣态	-0.873**	0.230	0.745**	0.798**	0.926**	0.606**

注：* 表示在 0.05 水平（双侧）上显著相关；** 表示在 0.01 水平（双侧）上显著相关。

与 pH 极显著负相关，与全氮、碱解氮、有效磷、速效钾含量极显著正相关。

2.4 小白菜镉吸收量

将小白菜茎和叶作为地上可食用部分，如表 7 所示，随着鸡粪源有机肥施用量的增加，小白菜地

上部分 Cd 含量总体呈减少趋势，但变化不明显，Cd 含量最大值为 F 处理，达到 0.023 mg · kg⁻¹，最小值为 M3 处理，含量为 0.016 mg · kg⁻¹，较 CK、F 分别降低 24%、30%，且 M3 处理小白菜根部 Cd 含量最低，为 0.036 mg · kg⁻¹，较 CK、F 分别降低

表 7 不同处理小白菜不同部位的镉含量及富集、转移系数

处理	镉含量 (mg · kg ⁻¹)		植物富集系数		转移系数
	地上	根部	地上	根部	
CK	0.021 ± 0.002ab	0.038 ± 0.001b	0.062 ± 0.007a	0.113 ± 0.004b	0.542 ± 0.527ab
F	0.023 ± 0.001a	0.040 ± 0.001ab	0.063 ± 0.006a	0.110 ± 0.002b	0.579 ± 0.434a
M1	0.021 ± 0.002ab	0.047 ± 0.002a	0.063 ± 0.005a	0.143 ± 0.001a	0.442 ± 0.330bc
M2	0.017 ± 0.001ab	0.039 ± 0.003b	0.051 ± 0.006a	0.119 ± 0.013ab	0.425 ± 0.009c
M3	0.016 ± 0.000b	0.036 ± 0.001b	0.045 ± 0.001a	0.101 ± 0.004b	0.446 ± 0.007bc
M4	0.019 ± 0.001ab	0.041 ± 0.003ab	0.058 ± 0.002a	0.120 ± 0.008ab	0.481 ± 0.177abc

5%、10%。施加鸡粪源有机肥处理的小白菜根部Cd含量与CK、F处理相比,整体呈上升趋势,根部含镉量最高的是M1处理,为 $0.047 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,较CK、F分别增加24%、18%。

2.5 小白菜不同部位的镉含量及富集、转移系数

用富集系数(BCF)和转移系数(TF)来判断重金属在植物体内富集转移情况。如表7所示,在有机肥带来的外源镉浓度增加时,小白菜地上部分和根部的镉富集系数总体呈降低趋势,且小白菜根部富集系数大于地上部。在F和M1处理中地上部分富集系数最大,均为0.063,根部富集系数最大是M1处理,为0.143;地上部分和根部富集系数最小为M3处理,分别为0.045和0.101。同时,随着鸡粪源有机肥施加量的增加,镉在小白菜根部到地上部分的转移系数整体呈增加趋势,转移系数最小为M2处理(0.425),最大为F处理(0.579)。

3 讨论

3.1 鸡粪源有机肥施用对土壤基本理化性质的影响

鸡粪类有机肥中的有机物在土壤中分解,大量低分子有机酸在微生物代谢时生成,同时官能团分离出 H^+ ^[14],所以在本试验中,施加有机肥后土壤pH值整体呈平缓下降趋势。植物根系养分输送和土壤微生物与土壤中的有机碳含量密切相关,根系的分泌物能大量产生有机碳^[15],长期使用有机肥可促进植物根系代谢,调控土壤微生物群落结构^[16],有机肥可通过土壤微生物作用分解为有机物,促进土壤团聚体形成和稳定,增加土壤有机碳在团聚体中聚集^[17],故可进一步提高土壤有机碳含量。

韩云素^[14]、温延臣等^[18]研究表明,施加畜禽有机肥能提高土壤氮磷钾等养分含量,本试验研究结果与其一致。化肥含有的氮在土壤中容易通过硝化-反硝化作用以及氨挥发、淋失与径流等途径损失,故不易大量累积^[19];相比之下,施用畜禽粪便有利于土壤团聚,延长土壤中有机氮保存时间,且畜禽粪便中碳氮比较高,需要更多的无机氮来转化并降解其中的有机物,故土壤氮素损失率会降低^[20]。在土壤有机碳含量增加的情况下,土壤的固磷作用会有所减弱,从而磷的有效性增强,故在本试验中,有效磷含量随施肥量增加而增加。由于小白菜生长过程中吸收了大量速效钾,在施加有机肥后促进了土壤中的非交换性钾释放为交换性钾^[21],在达到一定程度后反而使土壤中速效钾含

量得到了进一步增加,在本试验中速效钾含量先升后降,可能是部分处理中的小白菜生长所需速效钾的量大于释放的交换性钾量。

土壤负电荷含量随土壤黏粒含量及pH值的上升而增加,从而使土壤阳离子交换量增加。但在本试验中土壤黏粒含量无明显变化,土壤pH值变化幅度较小,土壤酸化有所延缓^[22],故土壤阳离子交换量呈现出无明显规律性变化,且与小白菜生长周期和有机肥施加时间较短有关。

3.2 鸡粪源有机肥的施加对土壤中镉的累积及其形态的影响

腐植酸的活化性能随土壤有机碳含量的增加而提高,存在于有机肥中的重金属随着有机物的分解逐渐释放出来,有效性增强,部分重金属会与有机物结合,使其形态和生物有效性发生转化^[7]。在施用一季鸡粪源有机肥的情况下,鸡粪源有机肥对土壤中镉的累积无明显影响。其中,土壤pH值是影响土壤中重金属形态的要素之一,可溶态重金属浓度随pH值降低而升高,生物有效性也随之提高;同时施入鸡粪源有机肥后增加的有机质能通过吸附、螯合等方式固定重金属。在本试验中随着鸡粪源有机肥施用量的增加,可交换态和可氧化态镉含量整体呈增加趋势,可氧化态镉含量整体呈降低趋势,可能是因为腐植酸活化性能随土壤有机质增加后也逐渐增强,有机物质的分解过程中会与 Cd^{2+} 形成络合物,导致游离的可氧化态镉逐渐减少^[23-24]。

3.3 鸡粪源有机肥施加对镉在小白菜中累积、富集、转移的影响及安全评价

研究表明小白菜对镉的吸收累积受以下因素影响:一是土壤类型,何平等^[25]研究发现,由于黏土表面积大,表面带负电荷,能有较好的重金属吸附性能,有助于降低小白菜对镉的吸收累积。在本试验使用的紫色土中粘粒含量少,故降低小白菜对镉吸收累积的效果不明显;二是肥料用量,三是pH值,增加肥料用量、降低土壤pH值一般会提高植株中镉的累积,本试验的变化趋势与此一致。试验结果表明,小白菜根部更易富集镉,有研究表明,重金属离子跨液泡膜转运及其在液泡中的固定是植物耐重金属的重要机理,重金属离子可以在液泡和植物不同组织内被固定下来,如在小白菜中更易在根部中固定下来^[26]。随着鸡粪源有机肥用量的增加,小白菜地上可食用部分对外源镉的累积能力变弱,根部对外源镉的累积能力变强,与CK处

理对比说明, 整体而言小白菜地上可食用部分不易富集重金属镉, 增施鸡粪源有机肥可降低小白菜地上可食部分镉含量的主要原因是增加了镉在小白菜茎、叶中的分配比例, 并且会对小白菜地上可食用部分富集重金属镉的能力起到一定的抑制作用; 施加鸡粪源有机肥的处理整体与 CK、F 处理相比, 转移系数较小。根据国家食品安全标准 GB 2762-2017^[27] 规定, 新鲜蔬菜中镉含量的最大允许值为 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 在本试验中鸡粪源有机肥处理下的小白菜可食用部分镉含量均在该安全标准限值内, 能实现鸡粪源有机肥的安全利用。

4 结论

施加鸡粪源有机肥能显著提高土壤氮磷钾养分含量, 降低土壤 pH 值, 对土壤机械组成和阳离子交换量无显著影响。

单季施加鸡粪源有机肥对土壤镉的累积无明显影响, 但会影响土壤镉的形态分布, 整体上土壤中可交换态镉和可还原态镉含量呈增加趋势, 可氧化态镉和残渣态镉含量呈减少趋势。

鸡粪源有机肥对小白菜地上部分富集镉的能力和小白菜对镉的转移具有一定的抑制作用, 小白菜可食用部分镉含量符合国家食品安全标准 GB 2762-2017^[27] 限值。

参考文献:

- [1] 鲁洪娟, 李江遐, 陈海燕, 等. 畜禽有机肥对土壤-番茄体系作物产量和重金属平衡的影响 [J]. 水土保持学报, 2014, 28 (4): 237-242.
- [2] Barker A V, Bryson G M. Bioremediation of heavy metals and organic toxicants by composting [J]. The Scientific World Journal, 2003, 2: 407-420.
- [3] Nanthi B, Domy A, Santiago M, et al. Distribution and bioavailability of trace elements in livestock and poultry manure by-products [J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2004, 34 (3): 291-338.
- [4] 刘全东, 蒋代华, 高利娟, 等. 畜禽粪便有机肥源重金属在土壤-蔬菜系统中累积、迁移规律的研究进展 [J]. 土壤通报, 2014, 45 (1): 252-256.
- [5] Nicholson F A. Heavy metal contents of livestock feeds and animal manures in England and Wales [J]. Bioresource Technology, 1999, 70 (1): 23-31.
- [6] 任旭喜. 土壤重金属污染及防治对策研究 [J]. 环境保护科学, 1999, 25 (5): 31-33.
- [7] 董同喜, 张涛, 李洋, 等. 畜禽粪便有机肥中重金属在水稻土中生物有效性动态变化 [J]. 环境科学学报, 2016, 36 (2): 621-629.
- [8] 鲍士旦, 江荣风, 杨超光, 等. 土壤农化分析 (第3版) [M]. 北京: 中国农业出版社, 2008. 30-173.
- [9] DZ/T 0279.5-2016, 区域地球化学样品分析方法-镉量测定电感耦合等离子体质谱法 [S].
- [10] Pueyo M, Mateu J, Rigol A, et al. Use of the modified BCR three-step sequential extraction procedure for the study of trace element dynamics in contaminated soils [J]. Environmental pollution, 2008, 152 (2): 330-341.
- [11] NY 525-2012, 有机肥料 [S].
- [12] NY/T 1978-2010, 肥料汞、砷、镉、铅、铬含量的测定 [S].
- [13] GB 5009.268-2016, 食品安全国家标准 食品中多元素的测定 [S].
- [14] 韩云素. 不同土壤改良剂对铬污染土壤及盆栽油菜品质的影响 [D]. 晋中: 山西农业大学, 2016.32-33.
- [15] 谢凯. 不同施肥模式对柑橘果园土壤有机碳库的影响 [D]. 福州: 福建农林大学, 2014.3.
- [16] 付丽军, 张爱敏, 王向东, 等. 生物有机肥改良设施蔬菜土壤的研究进展 [J]. 中国土壤与肥料, 2017, (3): 1-5.
- [17] 龙攀. 有机物料还田对麦玉两熟农田土壤有机碳和系统碳净平衡影响研究 [D]. 北京: 中国农业大学, 2014.65.
- [18] 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.
- [19] 张妹婷. 石灰性土壤中不同硝化抑制剂的抑制效果及其机理探讨 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010.6-7.
- [20] 李江涛, 钟晓兰, 赵其国. 畜禽粪便施用对稻麦轮作土壤质量的影响 [J]. 生态学报, 2011, 31 (10): 2837-2845.
- [21] 黄昌勇. 土壤学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1999. 203-208.
- [22] 邢鹏飞, 高圣超, 马鸣超, 等. 有机肥替代部分无机肥对华北农田土壤理化特性、酶活性及作物产量的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2016, (3): 98-104.
- [23] Anita S, Madhoolika A, Fiona M, et al. The role of organic vs. inorganic fertilizers in reducing phytoavailability of heavy metals in a wastewater-irrigated area [J]. Ecological Engineering, 2010, 36 (12): 1733-1740.
- [24] Iman T, Ali A S S. Monitoring the effects of chelating agents and electrical fields on active forms of Pb and Zn in contaminated soil [J]. Environmental monitoring and assessment, 2013, 185 (11): 8847-8860.
- [25] 何平, 冯先翠, 朱凤榕, 等. 改性黏土对重金属污染土壤中小白菜吸收累积 Pb 的影响 [J]. 安徽农业科学, 2017, 45 (18): 73-76.
- [26] 王晓芳. 植物中重金属的生物效应 [D]. 北京: 中国地质科学院, 2009.
- [27] GB 2762-2017, 食品安全国家标准 食品中污染物限量 [S].

Effects of chicken manure source organic fertilizer of moderately cadmium-containing on cadmium accumulation in soil and cadmium absorption in Chinese cabbageGAN Lu¹, JIANG Zi-yang¹, HUANG Bo-hao¹, LUO Wei¹, LI Kun², WU Jun^{1*}

(1. College of Environment, Sichuan Agricultural University, Chengdu Sichuan 611130; 2. Chengdu Soil Fertilizer Testing Center, Chengdu Sichuan 610041)

Abstract: In order to explore the effect of applying chicken manure source organic fertilizer on the accumulation of heavy metal cadmium in soil-crop system and realize the safe utilization of chicken manure source organic fertilizer, the chicken manure source organic fertilizer with moderate cadmium content (cadmium concentration is $1.58 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) was selected by pot experiment of Chinese cabbage, soil basic physical and chemical properties and the accumulation of heavy metal cadmium in soil and absorption in Chinese cabbage were analyzed. Six treatments were set up, including no fertilizer control (CK), conventional fertilizer (F), and four different organic fertilizer treatments with different manure application levels on the basis of applying the same amount of chemical fertilizer as the conventional fertilizer treatment. The results showed that the contents of total nitrogen, alkali-hydrolyzed nitrogen, available potassium and available phosphorus in soil were higher when the application amount of organic fertilizer was $0.5 \sim 2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, which were $0.725 \sim 0.760 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, $111.50 \sim 141.48 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $205.86 \sim 230.44 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $19.13 \sim 28.54 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively, and the content of soil organic carbon were $10.27 \sim 11.84 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, but the soil texture and cation exchange capacity had no significant changes after cabbage planting. With the increase of the application amount of chicken manure source organic fertilizer, the overall pH value of the soil showed a slow decreasing trend, and the accumulation of cadmium in the soil was not obviously changed, the content of exchangeable and reducible state of cadmium in soil increased, and oxidizable and residue state of cadmium decreased, moreover, the accumulation amount of edible cadmium in the ground of Chinese cabbage showed a decreasing trend on the whole. In conclusion, the application of chicken manure source organic fertilizer helps to improve the basic physical and chemical properties of soil, and affects the form and distribution of cadmium in soil, it has no obvious influence on the accumulation of heavy metal cadmium in soil when planting one season of Chinese cabbage, but helps to reduce the accumulation of cadmium in edible parts of Chinese cabbage.

Key words: cadmium; Chinese cabbage; soil; chicken manure; organic fertilizer