

引文格式: 杨育文, 陈秋会, 席运官, 等. 不同施肥模式对酸性土壤镉、铜有效态含量及在结球生菜中累积的影响[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2022, 37(2): 344–350. DOI: 10.12101/j.issn.1004-390X(n).202109046

不同施肥模式对酸性土壤镉、铜有效态含量及在结球生菜中累积的影响*

杨育文¹, 陈秋会¹, 席运官^{1**}, 刘明庆¹, 高 丽¹, 杨涛明², 和丽萍²

(1. 生态环境部南京环境科学研究所, 江苏 南京 210042; 2. 云南生态环境科学研究院, 云南 昆明 650034)

摘要:【目的】研究不同施肥模式对降低农田土壤重金属污染风险和减少蔬菜重金属含量的效果, 为重金属污染农田土壤安全利用提供参考。【方法】采用田间试验方法, 研究施用有机肥和化肥及其与碳酸钙石粉配施对镉(Cd)和铜(Cu)污染酸性土壤的pH值和重金属有效态含量动态变化以及结球生菜生长及其可食用部位Cd和Cu含量的影响。【结果】施用有机肥和碳酸钙石粉能提高土壤pH值, 施用化肥会降低土壤pH值; 与对照相比, 单施有机肥22.5 t/hm²和配施有机肥22.5 t/hm²+碳酸钙石粉1.5 t/hm²处理在45 d时对土壤有效态Cd和Cu含量的降低效果更为明显(有效态Cd含量分别降低38.41%和43.12%, 有效态Cu含量分别降低54.79%和53.79%), 而施用化肥不利于土壤有效态Cd和Cu含量的降低; 与对照相比, 单施有机肥22.5 t/hm²和配施有机肥22.5 t/hm²+碳酸钙石粉1.5 t/hm²分别使结球生菜产量增加184.33%和153.31%, 生菜中Cd含量分别降低60.17%和36.40%, 生菜中Cu含量分别降低47.27%和19.35%; 施用化肥不能降低结球生菜中Cd和Cu含量。【结论】单施有机肥和有机肥与碳酸钙石粉配施能提高土壤pH, 降低土壤Cd和Cu生物有效性, 提高蔬菜产量及其安全品质。研究结果可为降低类似区域农田Cd和Cu污染风险以及提高蔬菜安全品质提供借鉴。

关键词: 农田土壤修复; 施肥模式; 碳酸钙石粉; 土壤有效态Cd; 土壤有效态Cu

中图分类号: S636.906.2

文献标志码: A

文章编号: 1004-390X(2022)02-0344-07

Effects of Different Fertilization Patterns on Available Cadmium and Copper in Acidic Soil and Its Impact on Cd and Cu Accumulation in Head Lettuce

YANG Yuwen¹, CHEN Qiuhui¹, XI Yunguan¹, LIU Mingqing¹,
GAO Li¹, YANG Taoming², HE Liping²

(1. Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Nanjing 210042, China;

2. Yunnan Research Academy of Eco-environmental Sciences, Kunming 650034, China)

Abstract: [Purpose] To study the effects of different fertilization patterns on reducing the risk of heavy metal pollution in farmland soil and the content of heavy metals in vegetables, so as to provide reference for the safe utilization of heavy metal polluted farmland soil. [Method] A field experi-

收稿日期: 2021-09-29

修回日期: 2022-02-15

网络首发日期: 2022-03-24

*基金项目: 云南省生态环境厅土壤修复项目(YNZDZB[2017]002); 中央级公益性科研院所基本科研业务专项(GYZX210514)。

作者简介: 杨育文(1991—), 女, 甘肃武威人, 硕士, 助理研究员, 主要从事有机农业与农村面源污染防治研究。E-mail: yywofrc@126.com

**通信作者 Corresponding author: 席运官(1966—), 男, 江西抚州人, 博士, 研究员, 主要从事有机农业与农业环境保护研究。E-mail: xyg@nies.org

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/53.1044.S.20220322.2127.003.html>



ment was conducted to investigate the effects of organic fertilizer, chemical fertilizer and their combined application with calcium carbonate powder on the dynamic changes of pH value and available content of Cd and Cu in acidic soil, the growth of head lettuce and the enrichment of Cd and Cu in its edible parts. [**Results**] Combined application of organic fertilizer and calcium carbonate powder could increase the soil pH, while the application of chemical fertilizer reduced the soil pH. Compared with the control, the effect of application of organic fertilizer 22.5 t/hm² and combined application of organic fertilizer 22.5 t/hm²+calcium carbonate powder 1.5 t/hm² on reducing the content of available Cd and Cu in soil was more obvious at 45 days (the content of available Cd in soil decreased by 38.41% and 43.12%, respectively, and the content of available Cu in soil decreased by 54.79% and 53.79%, respectively); the application of chemical fertilizer was not conducive to the reduction of the content of available Cd and Cu in soil. Compared with the control, the application of organic fertilizer 22.5 t/hm² and the combination of organic fertilizer 22.5 t/hm²+calcium carbonate powder 1.5 t/hm² increased the yield of head lettuce by 184.33% and 153.31%, respectively; the content of Cd in lettuce decreased by 60.17% and 36.40%, respectively; the content of Cu in lettuce decreased by 47.27% and 19.35%, respectively; the application of chemical fertilizer could not reduce the contents of Cd and Cu in head lettuce. [**Conclusion**] The application of organic fertilizer and the combination of organic fertilizer and calcium carbonate powder can improve soil pH, reduce the bioavailability of soil Cd and Cu, and improve the yield and safety quality of vegetables. The results can provide reference for reducing the risk of Cd and Cu pollution in farmland in similar areas and improving the safety and quality of vegetables.

Keywords: farmland soil remediation; fertilization pattern; calcium carbonate powder; available Cd of soil; available Cu of soil

中国耕地重金属污染形势严峻, 根据 2014 年发布的《全国土壤污染状况调查公报》, 中国耕地土壤点位超标率达 19.4%; 从污染物超标情况来看, 镉 (Cd) 的点位超标率为 7.0%, 铜 (Cu) 的点位超标率为 2.1%, 在所有污染因子中分别位居第一和第四^[1]。Cd 和 Cu 等重金属在农田土壤中不断积累, 会影响农作物生长, 导致农产品中重金属含量超标, 严重影响食品安全和消费者健康^[2-3]。因此, 土壤重金属污染修复技术及其应用一直是国内外研究的热点^[4-5]。

土壤重金属污染修复主要有物理修复、化学修复、生物修复和农业生态修复等方法^[6]。对于中轻度受污染农田, 应尽量在不影响农业生产的前提下, 选择环境友好型方式修复重金属污染, 同时综合考虑修复效果和修复成本, 以便应用于实际生产并能大面积推广。原位化学钝化法具有经济、高效和简单易行等优点, 在农田重金属污染修复中运用广泛^[7], 常用的钝化剂包括石灰性物质、炭材料、粘土矿物、有机肥和农业废弃物等。碳酸钙是一种来源广泛、成本低廉和性质稳

定的石灰类钝化剂, 它能与重金属发生反应生成沉淀, 并通过调节土壤 pH 使土壤中的重金属生成氢氧化物沉淀, 具有较好的钝化效果^[8-9]。有机物料是国内外常用于重金属污染钝化修复的材料^[10-11], 研究表明: 施用有机肥不仅能够降低土壤 Cd 活性, 减少农作物对重金属的吸收积累, 还能改善土壤理化性质, 增加土壤肥力, 是一种较为经济有效的农田土壤重金属污染修复方法^[12]。

赵家印等^[13]通过盆栽试验研究发现: 碳酸钙与有机肥配施对降低云南重金属污染农田土壤中有效态 Cd 和 Cu 及生菜中 Cd 和 Cu 的含量效果显著。为进一步探究在实际生产条件下降低该地区土壤及生菜中 Cd 和 Cu 含量的方法, 本研究以云南重金属污染农田土壤为研究对象, 通过大田试验研究不同肥料及其与碳酸钙石粉配施对土壤 pH 和有效态 Cd、Cu 含量动态变化以及生菜产量和生菜可食用部位中重金属含量的影响, 以寻求高效低成本并符合当地农民生产习惯的重金属污染农田安全利用技术, 同时为降低类似地区农田重金属污染风险、改善土壤质量和提高蔬菜安全

品质提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况及供试材料

试验于 2019 年 10—12 月在云南省昆明市盘龙区某蔬菜种植基地开展 (N25.05°, E102.7°, 海拔 1 975 m)。试验区属中亚热带高原季风气候区, 全年平均气温 14.9 ℃, 年平均降水量 1 000.5 mm, 月最大降水量 208.3 mm。

供试土壤为红壤, 参考文献 [14] 的方法测定大田基础土样基本理化性质为: pH 5.86, 全氮含量 2.3 g/kg, 有机质含量 48.32 g/kg, 速效磷含量 41.96 mg/kg, 阳离子交换量 18.55 cmol/kg; 全 Cd 含量 0.70 mg/kg, 有效态 Cd 含量 0.26 mg/kg, 全 Cu 含量 193.27 mg/kg, 有效态 Cu 含量 11.10 mg/kg。该地区土壤重金属 Cu 和 Cd 含量超过《农用地土壤污染风险管控标准 (试行)》^[15] 的土壤风险筛选值 (5.5 < pH ≤ 6.5 时, 全 Cu ≤ 50 mg/kg、全 Cd ≤ 0.3 mg/kg)

试验蔬菜品种为结球生菜 (*Lactuca sativa* var. capitata L.), 苗龄 20 d 后移栽至大田。试验所用有机肥为农场利用羊粪和鸽粪等原料充分发酵腐熟所生产, 其基本理化性质为: pH 7.67, 总氮含量 24.70 g/kg, 总磷含量 17.45 g/kg, 总钾含量 32.60 g/kg, 有机质含量 505.00 g/kg, 全 Cd 含量 1.05 mg/kg, 全 Cu 含量 59.00 mg/kg。有机肥中 Cd 含量符合 NY/T 525—2021^[16] 的规定 (总 Cd ≤ 3 mg/kg)。供试碳酸钙石粉由石灰石 (购自云南昆钢钙镁熔剂有限公司) 磨制过 250 目筛后所得, 其 Cd 和 Cu 含量均低于检出限, pH 值为 10.18。

1.2 试验设计

试验共设置 5 个处理 (表 1), 每个处理 3 次重复; 共设置随机排列试验小区 15 个, 每个小区规格为 4 m×5 m。为防止串水, 每个小区之间设置宽 50 cm、高 25 cm 的田埂; 地块四周设保护行, 保护行各边宽度不少于 1 m。有机肥和化肥作为基肥撒施, 不进行追肥, 施用量根据农民施肥经验及生菜需氮量确定。结球生菜移栽前 1 d 进行土壤翻耕, 同时根据各试验小区的施肥方案撒施基肥, 碳酸钙石粉与基肥同时撒施。2019 年 10 月 15 日移栽结球生菜, 行距 30 cm, 株距 20 cm。在其生长过程中, 各小区采取相同的浇水、除草和病虫害防治等田间管理方式。

表 1 田间试验处理设计

Tab. 1 Design for treatments of the field experiment

处理 treatment	施肥模式及施用量 fertilization pattern and amount
CK	不施肥 no fertilization
OM	有机肥 22.5 t/hm ² organic fertilizer 22.5 t/hm ²
OMC	有机肥 22.5 t/hm ² +碳酸钙石粉 1.5 t/hm ² organic fertilizer 22.5 t/hm ² +calcium carbonate powder 1.5 t/hm ²
CF	化肥 (尿素 1.2 t/hm ² +过磷酸钙 2.95 t/hm ² +硫酸钾 0.38 t/hm ²) chemical fertilizer (urea 1.2 t/hm ² +calcium superphosphate 2.95 t/hm ² +potassium sulfate 0.38 t/hm ²)
CFC	化肥+碳酸钙石粉 1.5 t/hm ² chemical fertilizer+calcium carbonate powder 1.5 t/hm ²

1.3 样品采集与处理

考虑到土壤的异质性, 各处理在翻耕与施肥前都采集土样, 测定土壤有效态 Cd 和 Cu 含量及 pH 值; 在试验开始后第 15、30、45、60、75 天时采集各小区 0~20 cm 表层土壤样品, 经风干和粉碎后过 100 目筛用于土壤参数分析。约 60 d 结球生菜成熟后, 在各小区随机采集 10 颗测其鲜质量, 计算各小区生菜的平均鲜质量, 估算产量; 随后用去离子水清洗干净, 烘干和粉碎后过 100 目筛, 待测。

土壤 Cd 含量的测定采用石墨炉原子吸收分光光度法^[17], 土壤 Cu 含量的测定采用火焰原子吸收分光光度法^[18]; 土壤重金属有效态 Cd 和 Cu 含量的测定采用二乙烯三胺五乙酸浸提—电感耦合等离子体发射光谱法^[19]; 生菜总 Cd 和总 Cu 含量的测定采用原子吸收光谱法^[20-21]。

1.4 数据处理

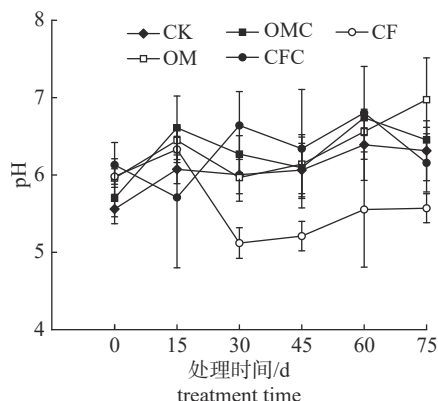
采用 Microsoft Excel 2010 和 Origin 2019 进行数据处理和制图; 采用 SPSS 22.0 软件进行显著性检验, 检验方法采用 Duncan 法, 显著水平为 $P<0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 不同施肥模式下土壤 pH 值的动态变化

由图 1 可知: 单施有机肥 (OM) 和有机肥与碳酸钙石粉配施 (OMC) 处理的土壤 pH 值总体呈增加趋势, 在试验第 15 天时出现第 1 次较为明显的增加, pH 值提高 0.49~0.91; OM 处理在第 75 天时 pH 值达最大值, 比处理前增加 1.01, OMC 处理在第 60 天时 pH 值达最大值, 比处理前增加 1.04。单施化肥 (CF) 处理的土壤 pH 值总体呈先增加后降低的趋势, 在第 15~30 天降幅明

显, pH 值降低 1.21; 化肥与碳酸钙石粉配施 (CFC) 处理的土壤 pH 值呈总体先降低后增加的趋势, 在第 0~15 天 pH 值短暂下降, 随后波动升高。



注: CK. 不施肥; OM. 单施有机肥; OMC. 有机肥+碳酸钙石粉; CF. 单施化肥; CFC. 化肥+碳酸钙石粉; 下同。

Note: CK. no fertilization; OM. organic fertilizer; OMC. organic fertilizer+calcium carbonate powder; CF. chemical fertilizer; CFC. chemical fertilizer+calcium carbonate powder; the same as below.

图1 不同施肥模式下土壤 pH 值动态变化趋势

Fig. 1 Dynamic change trend of soil pH under different fertilization patterns

2.2 不同施肥模式下土壤中有效态重金属含量的动态变化

由图2可知: 各处理土壤有效态 Cd 含量随处理时间的延长呈先降低后升高的趋势。在 45 d 时, OM 和 OMC 处理的土壤有效态 Cd 含量降至最低, 与处理前相比降幅分别为 38.41% 和 43.12%, 同期 CK 处理的降幅为 21.99%; CF 处理的土壤有效态 Cd 含量也在 45 d 时降至最低, 降幅为 12.98%; CFC 处理的土壤有效态 Cd 含量在 30 d 时最低, 降幅为 24.46%, 同期 CK 处理的降幅为 14.45%。OM 和 OMC 处理的土壤有效态 Cd 含量在 0~15 和 30~45 d 时降幅较大, 其中 OM 处理的降幅分别为 16.05% 和 21.10%, OMC 处理的降幅分别为 23.67% 和 23.46%; CF 和 CFC 处理的土壤有效态 Cd 含量降低主要发生在 15~30 d, 分别降低 7.54% 和 21.43%。到 75 d 时, 与处理前相比, OM 和 OMC 处理的土壤有效态 Cd 含量分别降低 12.50% 和 16.67%, CFC 处理的土壤有效态 Cd 含量升高 13.04%, CF 处理的土壤有效态 Cd 含量基本不变。可见, 有机肥以及化肥配施碳酸钙石粉均能在短时间内促进土壤有效态 Cd 含量降低。

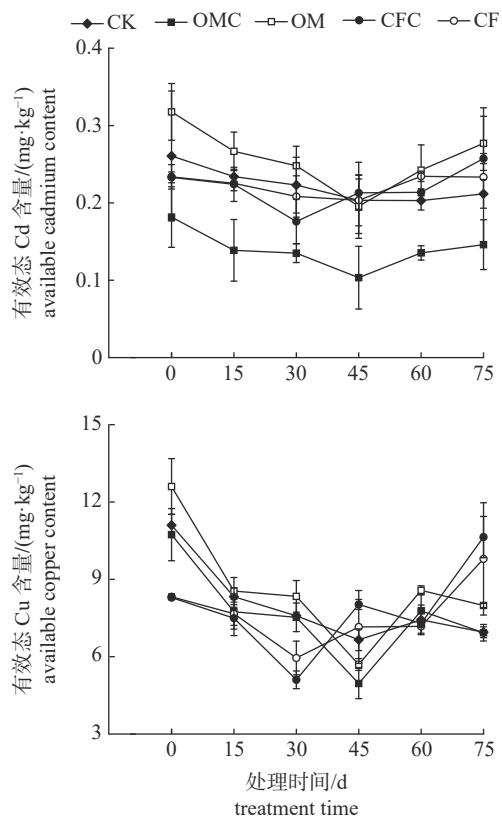


图2 不同施肥模式下土壤中有效态 Cd 和 Cu 含量的动态变化

Fig. 2 Dynamic changes of available Cd and Cu content in soil under different fertilization patterns

由图2还可知: 土壤中有有效态 Cu 含量变化趋势与有效态 Cd 基本一致, 均呈先降低后升高的趋势。OM 和 OMC 处理的土壤有效态 Cu 含量在 45 d 时降至最低, 较处理前分别降低 54.79% 和 53.79%, 同期 CK 处理的降幅为 40.03%。CF 和 CFC 处理的土壤有效态 Cu 含量在 30 d 时降至最低, 降幅分别达 28.51% 和 38.46%, 同期 CK 处理的降幅为 31.67%。OM 和 OMC 处理在 0~15 和 30~45 d 降幅较大, OM 处理降幅分别为 32.17% 和 31.69%, OMC 处理降幅分别为 27.86% 和 34.10%; CF 和 CFC 处理则在 15~30 d 时降幅最大, 降幅分别为 22.39% 和 31.90%。到 75 d 时, 与处理前相比, OM 和 OMC 处理的土壤有效态 Cu 含量分别降低 36.61% 和 35.43%, 而 CF 和 CFC 处理土壤有效态 Cu 含量分别升高 17.66% 和 28.30%。可见, 长期施用化肥不利于土壤有效态 Cu 的降低, 化肥配施碳酸钙石粉可以在短期内促进土壤有效态 Cu 含量降低。

2.3 不同施肥模式对结球生菜产量及其重金属含量的影响

由表 2 可知: OM 处理的结球生菜产量最高, 其次是 OMC 处理, 两者分别比对照增产 184.33% 和 153.31%; CFC 处理的结球生菜产量显著高于 CF 处理, CF 与 CK 处理的结球生菜产量无显著差异。各处理的结球生菜可食用部位 Cd 含量顺序为 CFC>CF>CK>OMC>OM, Cd 含量均未超过食品安全国家标准限值 (0.2 mg/kg)^[22]。CFC 处理结球生菜中 Cd 含量显著高于 CK 处理, 与 CF 处理差异不显著; OM 处理生菜 Cd 含量显著低于 CFC、CF 和 CK 处理。与 CK 相比, OM 和 OMC 处理生菜 Cd 含量分别降低 60.17% 和 36.40%。各处理的结球生菜可食用部位 Cu 含量顺序为 CF>CFC>CK>OMC>OM, 且 OM 处理的 Cu 含量显著低于其他处理, 仅为 CF 处理的 49.89%。与 CK 相比, OM 和 OMC 处理的生菜 Cu 含量分别降低 47.27% 和 19.35%。

表 2 各处理下结球生菜的产量及其 Cd 和 Cu 含量

Tab. 2 Yield and Cd and Cu content of head lettuce under different treatments

处理 treatment	产量/(kg·667 m ⁻²) yield	Cd 含量/(mg·kg ⁻¹) Cd content	Cu 含量/(mg·kg ⁻¹) Cu content
CK	930.35±108.96 c	0.08±0.01 bc	0.86±0.08 a
OM	2645.25±291.11 a	0.03±0.01 d	0.46±0.04 b
OMC	2356.65±140.81 ab	0.05±0.02 cd	0.70±0.07 a
CF	1273.48±129.54 c	0.09±0.01 ab	0.91±0.20 a
CFC	2141.23±241.81 b	0.11±0.00 a	0.89±0.00 a

注: 各处理施肥方式见表 1; 同列数据后不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。

Note: Fertilization patterns of each treatment list in Tab. 1; different lowercase letters indicate significant differences at 0.05 level.

3 讨论

本研究 OM 和 OMC 处理土壤 pH 值总体呈增加趋势, 可能是有机物料加入土壤后产生的铵离子导致 pH 值上升, 而后期 pH 值短暂下降可能与铵的硝化作用、有机肥腐解及植物根系分泌的有机酸增多等因素有关^[23-24]。CF 处理土壤 pH 值总体呈先增加后降低的趋势, 可能是尿素的水解作用使土壤 pH 值在短期内上升, 之后的硝化作用又使 pH 值降低。曾清如等^[25]研究发现: 酸性红壤中施用尿素后, 硝化作用主要集中在第 2~4 周; 刘小燕等^[26]研究发现: 在砷污染土壤施入尿素, pH 值先短暂上升至最大值然后下

降, 其中 3~4 周降幅最大, 与本研究结果类似, 从长期来看, 施用尿素等化肥会导致土壤酸化。CFC 处理因为碳酸钙的施入促进了土壤硝化作用^[27], 再加上尿素的硝化作用使土壤 pH 值先短暂下降, 随后由于碳酸钙溶解产生 OH⁻使土壤 pH 值升高^[28]。李明等^[29]在重度酸性镉污染菜地 (Cd 含量 1.06 mg/kg) 施用 4.5 t/hm² CaCO₃, 9 个月后仍保持较好的调酸效果; 而本研究 OMC 和 CFC 处理在试验第 75 天还维持着降酸效果, 其中第 60 天时降酸效果最佳, pH 值分别较处理前增加 1.04 和 0.67。

土壤有效态 Cd 和 Cu 含量降低主要发生在试验开始的 45 d 内, 且 OM 和 OMC 处理的土壤有效态 Cd 和 Cu 含量降幅明显大于 CK, 表明有机肥单施和有机肥与碳酸钙石粉配施均有利于降低土壤有效态 Cd 和 Cu 含量, 且有机肥与碳酸钙石粉配施对土壤有效态 Cd 的降低效果优于单施有机肥。施用有机肥能够提高土壤 pH, 增加有机质含量, 有机质可通过与土壤重金属发生络合作用从而对重金属的移动性及其植物有效性^[30-31], 但不同有机肥对土壤重金属具有活化和固定双重影响。赵家印等^[13]研究发现: 有机肥的活化作用可明显提高土壤有效态 Cd 和 Cu 含量; JONES 等^[32]研究发现: 生物炭和堆肥配施可显著降低 Cu 的移动能力; 叶俊文^[33]指出: 随着土壤有机质增加, 土壤 Cu 和 Cd 可交换态含量显著降低, 施用有机肥可有效治理 Cu 和 Cd 污染土壤。导致上述研究产生差异的原因可能是有机肥中重金属含量^[34]、有机质含量、有机质中胡敏酸和富里酸组成差异^[35]以及土壤的理化性质和种植条件 (盆栽、大田和温室等) 不同。碳酸钙对土壤重金属 Cd 和 Cu 的钝化机理相似, 一方面通过调节土壤 pH 使其生成氢氧化物沉淀, 另一方面可与 Cd 和 Cu 发生反应生成碳酸盐沉淀, 且一定范围内钝化效果随着碳酸钙添加剂量的增大而增强^[36-38]。CF 处理的土壤有效态 Cd 和 Cu 含量降幅均小于 CK, CFC 处理的降幅小于或略高于 CK, 表明施用化肥不利于降低土壤有效态 Cd 和 Cu 含量, 配施碳酸钙的效果主要体现在试验初期, 能在短期内促进土壤有效态 Cd 和 Cu 含量降低。

施用有机肥和碳酸钙石粉可显著增加结球生菜产量, 而单施化肥对其增产效果不显著。施用化肥会导致土壤 pH 降低, 进而引起土壤 Al 溶解

导致铝毒伤害,抑制蔬菜生长^[25];而有机肥可提高土壤 pH,增加有机质含量,优化土壤结构,提高作物产量,唐明灯等^[39]研究证实:施用猪粪、牛粪、鸡粪和花生麸 4 种有机肥均可显著提高生菜生物量。有研究发现:对酸性土壤增施 2.25~4.50 t/hm² CaCO₃ 可增加土壤微生物量及其活性,进而促进土壤溶解性有机碳增加及土壤氮素转化^[26,40],有利于作物生长^[29]。施用化肥使 pH 值降低,土壤重金属生物有效性提高,蔬菜对重金属的吸收增加^[41];施用有机肥可提高土壤有机质含量,使土壤中易被植物吸收的重金属通过有机络合反应变为有机结合态;施用碳酸钙石粉能降低土壤有效态 Cd 和 Cu 含量,进而降低蔬菜重金属含量^[42]。因此,本研究 OM 和 OMC 处理均有利于降低结球生菜可食用部位的重金属 Cu 和 Cd 含量,且前者效果略优。李明等^[29]在 Cd 污染菜地施用 CaCO₃ 后,各类蔬菜 Cd 含量均降低,其中叶菜类蔬菜 Cd 含量降幅最大。唐希望等^[43]研究发现:整个生长阶段生菜地上部 Cd 含量和 Ca 含量呈正相关,同时与生菜地上部生物量的变化高度相关,这可能是本研究 CFC 处理生菜 Cd 含量大于 CF 处理以及 OM 处理生菜 Cd 含量小于 OMC 处理的原因。

4 结论

施用有机肥和碳酸钙石粉有利于提高土壤 pH 值,增加结球生菜产量,降低结球生菜可食用部位 Cd 和 Cu 的含量;施用化肥对结球生菜的增产效果不明显且不利于降低土壤及结球生菜中的 Cd 和 Cu 含量。可见,单施有机肥以及有机肥与碳酸钙石粉配施是降低酸性农田土壤重金属 Cd 和 Cu 污染风险、提高蔬菜产量及其安全品质的良好措施。

[参考文献]

- [1] 环境保护部,国土资源部.全国土壤污染状况调查公报[J].中国环保产业,2014(5): 10.
- [2] 赵江宁,王云霞,沈春晓,等.土壤铜污染对水稻产量形成的影响:5年定位试验[J].农业环境科学学报,2012,31(11): 2073.
- [3] DIXIT R, WASIULLAH, MALAVIYA D, et al. Bioremediation of heavy metals from soil and aquatic environment: an overview of principles and criteria of fundamental processes[J]. Sustainability, 2015, 7(2): 2189. DOI: 10.3390/su7022189.
- [4] ZENG F R, ALI S, ZHANG H T, et al. The Influence of pH and organic matter content in paddy soil on heavy metal availability and their uptake by rice plants[J]. Environmental Pollution, 2011, 159: 84. DOI: 10.1016/j.envpol.2010.09.019.
- [5] ZHAO F J, MA Y, ZHU Y G, et al. Soil contamination in China: current status and mitigation strategies[J]. Environmental Science & Technology, 2014, 49(2): 750. DOI: 10.1021/es5047099.
- [6] 师艳丽,陈明,李凤果,等.土壤重金属污染修复技术研究进展[J].有色金属科学与工程,2018,9(5): 66. DOI: 10.13264/j.cnki.ysjksx.2018.05.012.
- [7] 谢玉峰,刘迪,陈振宁,等.耕地土壤重金属污染钝化修复技术研究进展[J].江苏农业科学,2020,48(18): 30. DOI: 10.15889/j.issn.1002-1302.2020.18.006.
- [8] 刘丽,吴燕明,周航,等.大田条件下施加组配改良剂对蔬菜吸收重金属的影响[J].环境工程学报,2015,9(3): 1489. DOI: 10.12030/j.cjee.20150382.
- [9] 任露陆,吴文成,陈显斌,等.碳酸钙与氢氧化钙修复重金属污染土壤效果差异研究[J].环境科学与技术,2016,39(5): 22. DOI: 10.3969/j.issn.1003-6504.2016.05.004.
- [10] MAHAR A, WANG P, LI R H, et al. Immobilization of lead and cadmium in contaminated soil using amendments: a review[J]. Pedosphere, 2015, 25(4): 555. DOI: 10.1016/S1002-0160(15)30036-9.
- [11] 刘娜,薛中俊,叶文玲,等.不同钝化材料对铜污染土壤修复的影响[J].农业环境科学学报,2018,37(12): 2694. DOI: 10.11654/jaes.2018-0084.
- [12] 薛毅,尹泽润,盛浩,等.连续4a施有机肥降低紫泥田镉活性与稻米镉含量[J].环境科学,2020,41(4): 1880. DOI: 10.13227/j.hjks.201910025.
- [13] 赵家印,席运官,代慧杰,等.钝化剂与有机肥配施对土壤有效态重金属及其在生菜中累积的影响[J].生态与农村环境学报,2019,35(11): 1460. DOI: 10.19741/j.issn.1673-4831.2018.0793.
- [14] 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.
- [15] GB 15618—2018.农用地土壤污染风险管控标准(试行)[S].
- [16] NY/T 525—2021.有机肥料[S].
- [17] GB/T 17141—1997.土壤质量 铅、镉的测定 石墨炉原子吸收分光光度法[S].
- [18] HJ 491—2019.土壤和沉积物 铜、锌、铅、镍、铬的测定 火焰原子吸收分光光度法[S].
- [19] HJ 804—2016.土壤8种有效态元素的测定 二乙烯三胺五乙酸浸提—电感耦合等离子体发射光谱法[S].
- [20] GB 5009.15—2014.食品安全国家标准 食品中镉的测定[S].
- [21] GB 5009.13—2003.食品中铜的测定[S].
- [22] GB 2762—2017.食品安全国家标准 食品中污染物限量[S].
- [23] YAN F, SCHUBERT S, MENGEL K. Soil pH increase due to biological decarboxylation of organic anions[J]. Soil Biology & Biochemistry, 1996, 28(4/5): 617. DOI: 10.1016/0038-0717(95)00180-8.

- [24] 吴景贵, 吕岩, 王明辉, 等. 有机肥腐解过程的红外光谱研究[J]. 植物营养学报, 2004, 10(3): 259. DOI: [10.3321/j.issn:1008-505X.2004.03.008](#).
- [25] 曾清如, 廖柏寒, 蒋朝辉, 等. 施用尿素引起红壤pH及铝活性的短期变化[J]. 应用生态学报, 2005, 16(2): 249. DOI: [10.13287/j.10019332.2005.0426](#).
- [26] 刘小燕, 曾清如, 周细红, 等. 尿素施用对砷污染土壤pH值及砷活性的影响[J]. 土壤通报, 2008, 39(6): 1441. DOI: [10.3321/j.issn:0564-3945.2008.06.045](#).
- [27] 郭安宁, 段桂兰, 赵中秋, 等. 施加碳酸钙对酸性土壤微生物氮循环的影响[J]. 环境科学, 2017, 38(8): 3483. DOI: [10.13227/j.hjxx.201701145](#).
- [28] 张湘茗, 任学昌, 万建新, 等. 碳酸钙对污染土壤中Pb、Zn、Cd的稳定化作用[J]. 有色金属工程, 2019, 9(6): 114. DOI: [10.3969/j.issn.2095-1744.2019.06.018](#).
- [29] 李明, 陈宏坪, 王子萱, 等. 石灰钝化法原位修复酸性镉污染菜地土壤[J]. 环境工程学报, 2018, 12(10): 2864. DOI: [10.12030/j.cjee.201804036](#).
- [30] 尚爱安, 刘玉荣, 梁重山, 等. 土壤中重金属的生物有效性研究进展[J]. 土壤, 2000, 3(6): 294. DOI: [10.13758/j.cnki.tr.2000.06.003](#).
- [31] 杜彩艳, 祖艳群, 李元. pH和有机质对土壤中镉和锌生物有效性影响研究[J]. 云南农业大学学报, 2005, 20(4): 539. DOI: [10.16211/j.issn.1004-390x\(n\).2005.04.018](#).
- [32] JONES S, BARDOS R P, KIDD P S, et al. Biochar and compost amendments enhance copper immobilisation and support plant growth in contaminated soils[J]. Journal of Environmental Management, 2016, 171: 101. DOI: [10.1016/j.jenvman.2016.01.024](#).
- [33] 叶俊文. 不同土壤条件下重金属Cu、Cd的存在形态规律研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2018.
- [34] 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. DOI: [10.13872/j.1000-0275.2021.0041](#).
- [35] 陕红, 刘荣乐, 李书田. 施用有机物料对土壤镉形态的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(1): 136. DOI: [10.11674/zwyf.2010.0120](#).
- [36] 马荣生, 陈杰, 夏鹏, 等. 碳酸钙对铜铅铬复合污染土壤的修复机制[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2017, 45(1): 119. DOI: [10.13207/j.cnki.jnwafu.2017.01.017](#).
- [37] 黄擎, 刘博睿, 王梦远, 等. 碳酸钙对潮土Cd²⁺的固定及土壤酶活性的影响[J]. 环境污染与防治, 2016, 38(6): 1. DOI: [10.15985/j.cnki.1001-3865.2016.06.001](#).
- [38] 曹永强, 荆延德, 申磊, 等. 生物炭与磷肥配施对棕壤中Cd形态及其有效性的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2018, 34(10): 939. DOI: [10.11934/j.issn.1673-4831.2018.10.011](#).
- [39] 唐明灯, 艾绍英, 李盟军, 等. 有机肥对生菜生长及其Cd含量的影响[J]. 广东农业科学, 2011, 38(24): 42. DOI: [10.3969/j.issn.1004-874X.2011.24.016](#).
- [40] 李玲, 仇少君, 刘京涛, 等. 土壤溶解性有机碳在陆地生态系统碳循环中的作用[J]. 应用生态学报, 2012, 23(5): 1407. DOI: [10.13287/j.1001-9332.2012.0193](#).
- [41] 李顺江, 李鹏, 李新荣, 等. 不同肥源、施氮量对土壤-作物系统中铬、镉含量的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2015, 32(3): 235. DOI: [10.13254/j.jare.2014.0291](#).
- [42] 丁凌云, 蓝崇钰, 林建平, 等. 不同改良剂对重金属污染农田水稻产量和重金属吸收的影响[J]. 生态环境学报, 2006, 15(6): 1204. DOI: [10.16258/j.cnki.1674-5906.2006.06.016](#).
- [43] 唐希望, 吉普辉, 同延安, 等. 生菜地上部镉累积规律及其与矿质元素浓度的关系[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(5): 860. DOI: [10.11654/jaes.2017-1350](#).

责任编辑: 何馨成