

分次施用碱性肥料对土壤pH及土壤镉有效性的影

曹巧滢, 詹曜玮, 丁尔全, 高诚祥, 张立丹, 樊小林

引用本文:

曹巧滢, 詹曜玮, 丁尔全, 高诚祥, 张立丹, 樊小林. 分次施用碱性肥料对土壤pH及土壤镉有效性的影[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(7): 1483–1489.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0252>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

改良剂对不同性质镉污染土壤中有效镉和小白菜镉吸收的影响

代允超, 吕家珑, 刁展, 刘金, 安伟强, 陈曦

农业环境科学学报. 2015, 34(1): 80–86 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.01.012>

不同肥料对镉污染土壤中两种菜心生长与Cd吸收的影响

许杨贵, 李琦, 刘晖, 李晶, 黎华寿

农业环境科学学报. 2016, 35(11): 2059–2066 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-0623>

联合施肥对复合污染农田水稻As、Cd吸收的影响

卢维宏, 张乃明, 苏友波, 李懋松, 熊润忠, 秦太峰

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2217–2226 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0573>

钝化剂对土壤性质及镉生物有效性的影响研究

武晓微, 翟文珺, 高超, 荣飒爽, 郭小彪, 赵会薇, 刘微

农业环境科学学报. 2021, 40(3): 562–569 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0826>

碱性缓释肥对水稻吸收积累Cd的影响

田发祥, 纪雄辉, 谢运河, 吴家梅, 官迪

农业环境科学学报. 2016, 35(11): 2116–2122 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-0381>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

曹巧滢, 詹曜玮, 丁尔全, 等. 分次施用碱性肥料对土壤pH及土壤镉有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(7): 1483–1489.

CAO Q Y, ZHAN Y W, DING E Q, et al. Influences of alkaline fertilizer application on soil pH and soil available cadmium[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(7): 1483–1489.



开放科学 OSID

分次施用碱性肥料对土壤pH及土壤镉有效性的影响

曹巧滢¹, 詹曜玮^{1,2}, 丁尔全^{1,2}, 高诚祥^{1,2}, 张立丹^{1,2}, 樊小林^{1,2*}

(1. 华南农业大学资源环境学院, 广州 510642; 2. 广东高校环境友好型肥料工程技术研究中心, 广州 510642)

摘要:为探究碱性肥料治酸改土的效果,以碱性肥料为供试肥料,以湖南松柏村典型镉污染农田土为供试土壤,以镉高累积菜心“特青四号”及镉低累积菜心“绿宝”为供试作物,设置不施氮对照CK、碱性肥料及尿素三个处理,研究盆栽条件下,分次施用碱性肥料对土壤pH及土壤镉生物有效性的影响。结果表明:分次施用碱性肥料能在移栽后65 d内使土壤pH维持在较高的水平,特青四号盆栽施用碱性肥料处理土壤的pH分别比尿素及CK处理的高出0.61个及0.20个单位,绿宝盆栽施用碱性肥料处理土壤的pH分别比尿素及CK的高出0.36个及0.12个单位;分次施肥65 d内,各取样时期施用碱性肥料处理土壤的有效镉含量均显著低于CK。而65 d时,特青四号及绿宝盆栽碱性肥料处理的有效镉含量与施用尿素处理相比分别降低了0.11 mg·kg⁻¹和0.08 mg·kg⁻¹;与CK相比,尿素及碱性肥料均能显著提高菜心氮量;分次施肥条件下,施用尿素及碱性肥料均能显著降低菜心镉含量。研究表明,在镉污染农田土壤中施用碱性肥料,不仅能提高菜心生物量,保证土壤供氮,还能长效提高土壤pH并降低土壤有效镉含量。

关键词:碱性肥料;土壤pH;镉有效性;菜心

中图分类号:S153.4;X53 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2022)07-1483-07 doi:10.11654/jaes.2021-0252

Influences of alkaline fertilizer application on soil pH and soil available cadmium

CAO Qiaoying¹, ZHAN Yaowei^{1,2}, DING Erquan^{1,2}, GAO Chengxiang^{1,2}, ZHANG Lidan^{1,2}, FAN Xiaolin^{1,2*}

(1. College of Nature Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2. Environment Friendly Fertilizer Engineering Technology Research Center of Guangdong College, Guangzhou 510642, China)

Abstract: To study the effects of alkaline fertilizer (a new type of fertilizer) on reduction of soil acidity and cadmium pollution, a pot experiment was conducted using cadmium-contaminated soil from Zhuzhou, Hunan Province, and two varieties of flowering Chinese cabbage, which had either high (Te Qing 4) or low (Lv Bao) cadmium accumulation. The experiment included the following three treatments: alkaline fertilizer, urea, and no nitrogen (CK) treatment. Sixty-five days after transplanting (DAT), the soil pH value in the alkaline fertilizer treatment was 0.61 and 0.20 units higher than that in the urea and CK treatments with Te Qing 4, respectively, whereas the soil pH in the alkaline fertilizer treatment was 0.36 and 0.12 higher than that in the urea and CK treatments with Lv Bao, respectively. The results implied that application of alkaline fertilizer could improve the soil pH over an extended period. The available cadmium content of the soil treated with alkaline fertilizer was significantly lower than that with CK in each sampling period, and the available cadmium content in the urea treatment was 0.11 and 0.08 mg·kg⁻¹ of Te Qing 4 and Lv Bao pots higher than that in the alkaline fertilizer treatment at 65 DAT. Compared with CK, urea and alkaline fertilizers significantly increased the nitrogen content of flowering Chinese cabbage. Furthermore, urea and alkaline fertilizers significantly reduced the cadmium content of cabbage. Based on these findings, application of alkaline fertilizer in cadmium-contaminated farmland soil can not only ensure cabbage biomass and soil nitrogen supply but also continually reduce soil acidity and available cadmium content.

Keywords: alkaline fertilizer; soil pH; available cadmium; flowering Chinese cabbage

收稿日期: 2021-03-03 录用日期: 2022-03-15

作者简介: 曹巧滢(1994—), 女, 广东佛山人, 硕士研究生, 研究方向为植物营养。E-mail: 911341033@qq.com

*通信作者: 樊小林 E-mail: xlfan@scau.edu.cn

基金项目: 国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-31-06); 国家重点研发计划项目(2018YFD0201100)

Project supported: China Agriculture Research System(CARS-31-06); The National Key Research and Development Program of China(2018YFD0201100)

我国受重金属重度污染耕地约有 232.5 万 hm^2 , 而轻微-轻度污染耕地则有 526.6 万 hm^2 , 并呈逐渐扩大的趋势。镉是耕地、林地、草地及未利用地的主要重金属污染物^[1]。针对我国 402 个工业地区及 1 041 个农业地区的调查显示, 工业地区镉的平均浓度比国家二级土壤标准规定的 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 超标了 79.2 倍, 农业地区则平均超标 2.9 倍, 而南方地区受污染的程度远高于北方地区^[2]。土壤酸化程度是影响土壤中镉生物有效性的重要因素, 土壤酸化程度越高, 镉的生物有效性越高^[3]。

几十年来农田土壤面临着严重的酸化问题^[4]。在不合理施肥、酸沉降、不合理灌溉、长期集约化农业活动等诸多人为因素中, 不合理施肥被视为土壤酸化的主要原因^[5-7]。研究表明, 长期且单一施用化学氮肥会导致土壤显著酸化, 化学氮肥每增施 $100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 水稻土 pH 下降 0.65 个单位, 土壤的起始 pH 越高, 下降越明显^[8]。长期过量施用尿素或铵态氮肥均会促使土壤 pH 下降、交换性阳离子流失, 降低土壤的酸碱缓冲能力, 对土壤健康造成威胁^[9-10]。硝化作用、硝酸盐淋溶以及作物对阳离子选择性吸收是不合理施肥导致农田土壤酸化加剧的重要原因^[11]。其中硝化过程每产生一个 NO_3^- , 就会生成 4 个 H^+ 。这种酸化现象在干旱农田中会表现得更加明显, 如施用尿素后, 尽管土壤 pH 会短暂上升, 而 7 d 后因为硝化作用, 土壤 pH 会下降到比原来更低的水平^[12]。长期大量施用化学氮肥不仅会使土壤 pH 显著下降, 其产生的大量 H^+ 被土壤吸附后会增大土壤的潜性酸总量, 降低土壤对酸的缓冲能力, 使土壤肥力下降, 影响农业生产。因此, 选用新型肥料替代常规肥料是治酸改土、降低农田土壤镉污染的重要措施和有效方法之一。碱性肥料是广东高校环境友好型肥料工程技术研究中心研发的以羟基脲为原料的无钠碱性长效氮肥, 具有缓释长效和碱性功能^[13]。在水肥质量比为 250:1 时肥液 pH 可达到 8.50 以上, 氮素可以处于碱性环境中且不会明显挥发损失^[14]。前人研究结果显示, 碱性肥料肥效明显大于常规氮肥, 能提高作物的氮肥利用率, 增加作物产量, 改善土壤微生物环境, 且施用碱性肥料后, 香蕉园土壤 pH 能提高 0.64~1.04 个单位^[15]。因此碱性肥料既能正常供应养分, 又能同时改良土壤酸性。但是, 迄今分次施用碱性肥料对提升土壤 pH 的效果及其持续效应, 以及土壤 pH 持续提升后对土壤镉活性有何影响尚无研究报道。本研究以碱性肥料为供试肥料, 研究其对土壤 pH、土壤有效镉含量、

菜心累积镉能力及土壤硝化作用的影响, 以期为施用碱性肥料降低土壤酸度和镉生物有效性提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤与作物

试验土壤采自湖南松柏村典型镉污染农田土壤, 理化性质为: 全氮含量为 $1.74 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 有机质含量为 $48.80 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效钾含量为 $8.20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效磷含量为 $65.61 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, pH 值为 4.90, 全镉含量为 $2.46 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 有效镉含量为 $1.89 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 土壤质地为中壤土。供试土壤土经风干、粉碎后过 1 cm 筛备用。

试验菜心品种为镉高累积品种“特青四号”及镉低累积菜心“绿宝”^[16]。供试肥料碱性肥料(氮含量 20%)是华南农业大学广东高校环境友好型肥料工程技术研究中心研发的碱性长效液体肥料, 普通肥料为尿素。

1.2 试验方案

研究采用盆栽试验, 为肥料和作物品种两因素 3×2 完全随机设计, 肥料因素包括尿素、碱性肥(施氮量均为 $200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、无肥(对照 CK); 作物包括两种菜心品种: 镉高累积菜心“特青四号”, 镉低累积菜心“绿宝”。每个处理设置 5 个重复, 单盆为一个重复。

每盆分层装入过 1 cm 筛的风干供试土壤 4 kg, 使土壤容重保持一致。移栽长势健康均一、生长至三叶一心的菜心幼苗。肥料分配如下: 基肥 30%, 追肥 70%。基肥在移栽当日施, 5 次追肥在移栽后第 5、10、15、20、25 天施肥, 分别占总量的 15%、15%、15%、15%、10%。钾肥为氯化钾(含 K_2O 62.7%), 用量为 $0.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (以 K_2O 计), 磷肥为过磷酸钙(ssp, 含 P_2O_5 20%), 用量为 $0.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (以 P_2O_5 计), 磷肥和钾肥做基肥施用。每隔 5 d 测试土壤的含水量, 使土壤含水量保持至田间持水量的 70%。分别在移栽后第 1、5、6、10、11、15、16、20、21、25、26、35、45、55、65 天采集新鲜土壤样品 50 g, 测量其 pH 及有效镉含量。第 35 天收获菜心植株, 称量鲜、干质量, 测试其地上部、根系镉含量及氮含量。

1.3 测定方法

取鲜土 10 g, 计算土壤含水量后按水土比 2.5:1 用电位法测定土壤 pH 值。取过 2 mm 筛的风干土壤, 按国家标准 GB/T 23739—2009 测定土壤有效镉含量。菜心收获后称量鲜质量, 用去离子水洗净、烘干, 称量干质量。样品磨碎过 1 mm 筛, 菜心植株全氮按 NY/T

2419—2013标准测定,菜心植株镉含量按GB 5009.15—2014标准测定。

1.4 数据处理

采用Excel 2010和SPSS 19.0软件进行统计分析,采用邓肯氏新复极差法进行方差分析和差异显著性检验,用Excel 2010及OriginPro 8.0绘图。数据均为5次重复的平均值±标准差。

2 结果与分析

2.1 碱性肥对土壤pH的影响

由图1可知,施肥后3个处理土壤pH均呈先升高后降低的变化趋势,其中绿宝和特青四号盆栽CK土壤的pH均在第5天达到最大值,分别为5.29及5.28,此后CK土壤pH下降并保持在4.90~5.20之间。而分次施用尿素及碱性肥土壤的pH均在第26天达到最大值,施用尿素时,绿宝和特青四号盆栽土壤的最大pH均为5.70;施用碱性肥时,绿宝和特青四号盆栽土壤的最大pH分别为5.72及5.74。移栽第25天,即停止施肥后,施用尿素土壤的pH急剧下降,在第65天,绿宝和特青四号施用尿素土壤pH分别降至4.82及4.62,比同时期的CK降低了0.24个及0.41个单位,而施用碱性肥处理土壤的pH在第65 d分别为5.18及5.23,分别较同时期CK土壤pH高出0.12个及0.20个单位,比移栽前原土pH高0.28个及0.33个单位。

在连续施肥期间,施用尿素及碱性肥处理土壤的pH均显著高于CK,而两种肥料对土壤pH的影响没有明显差异。停止施肥后,即移栽25 d后,施用尿素土壤的pH均显著低于施用碱性肥的处理,移栽后25~65 d期间,碱性肥处理下绿宝和特青四号盆栽土壤的pH比尿素处理平均高出0.18个及0.20个单位

($P<0.05$),可见碱性肥有维持土壤高pH的能力。

2.2 碱性肥对土壤有效镉含量影响

由图2可知,初次施肥5 d后,特青四号盆栽土壤在CK与施用尿素处理下有效镉含量没有显著差异,而施用碱性肥处理土壤的有效镉含量显著降低,比尿素处理降低了 $0.02 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;绿宝盆栽初次施肥5 d后各处理下土壤有效镉含量没有显著差异。多次施肥35 d后(即菜心收获时),两种菜心盆栽土壤CK有效镉含量均显著高于施用尿素和施用碱性肥的处理,CK土壤有效镉含量比两个施肥处理提高了 $0.07\sim 0.09 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,施用尿素和施用碱性料的处理间没有显著差异。对菜心收获后的土壤检测结果表明,停止施肥后(试验第65天),特青四号菜心盆栽施用碱性肥料土壤的有效镉含量显著低于CK及施用尿素的处理,而绿宝施用碱性肥土壤的有效镉含量与CK没有显著差异,但显著低于施用尿素的处理。在同一施氮量下,绿宝及特青四号施用尿素土壤有效镉含量比施用碱性肥的土壤有效镉含量分别高出 $0.08 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 及 $0.11 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

2.3 碱性肥对菜心生长的影响

由表1可知,施用尿素的菜心的地上部生物量显著降低,特青四号鲜质量为CK的93.77%,干质量为CK的82.51%,绿宝鲜质量为CK的96.51%,干质量为CK的79.02%,这可能是因为过量施用尿素对菜心产生了盐害。施用碱性肥处理的则和CK没有显著差异,两处理下特青四号的鲜质量均在85 g以上,绿宝鲜质量均在80 g以上。这说明在等施氮量条件下,施用碱性肥比施用尿素更能促进菜心生长,施肥的安全性更高,其可能原因之一是碱性肥为长效氮肥。

施用尿素及碱性肥均能显著提高菜心地上部的含氮量,与CK相比,特青四号氮含量提高了23.70%~

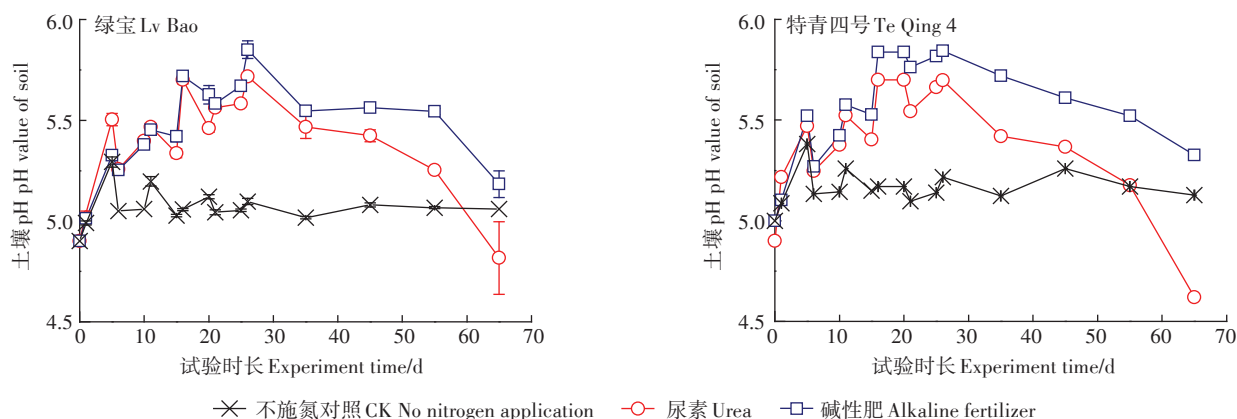


图1 肥料对土壤pH的影响

Figure 1 Changes of soil pH with different fertilizers

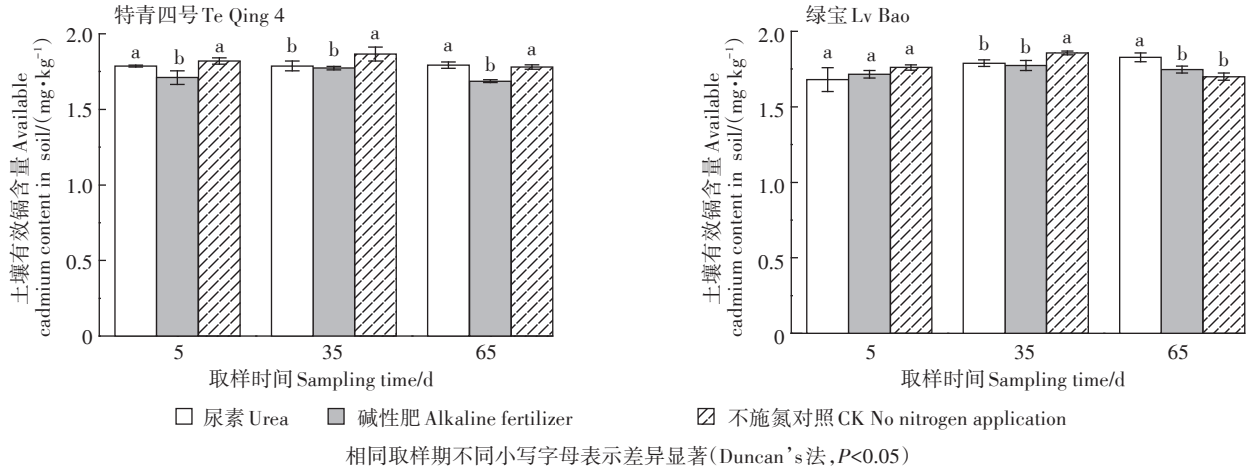


图2 碱性肥对土壤有效镉含量的影响

Figure 2 Effects of alkaline fertilizer on the content of available cadmium in soil

表1 碱性肥对菜心生物量及氮含量的影响

Table 1 Effects of alkaline fertilizer on biomass and nitrogen content of flowering Chinese cabbage

品种 Variety	施肥处理 Fertilizer treatment	鲜质量/(g·棵 ⁻¹) Fresh weight/(g·plant ⁻¹)	干质量/(g·棵 ⁻¹) Dry weight/(g·plant ⁻¹)	含氮量 Nitrogen content/(g·kg ⁻¹)
特青四号	CK	85.79±3.59a	2.63±0.20a	27.13±0.56b
	尿素	79.59±0.92b	2.17±0.07b	35.90±0.82a
	碱性肥	88.76±3.46a	2.81±0.32a	33.56±1.03a
绿宝	CK	80.79±2.56a	3.48±0.50a	21.20±2.65b
	尿素	77.97±1.62b	2.75±0.04b	29.39±1.51a
	碱性肥料	81.48±4.46a	3.40±0.43a	26.15±3.89a

注: 同列不同小写字母者表示同品种菜心不同施肥处理下差异显著 (Duncan's 法, $P < 0.05$)。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate that the difference is significant under different fertilization treatments with the same variety ($P < 0.05$, Duncan's test).

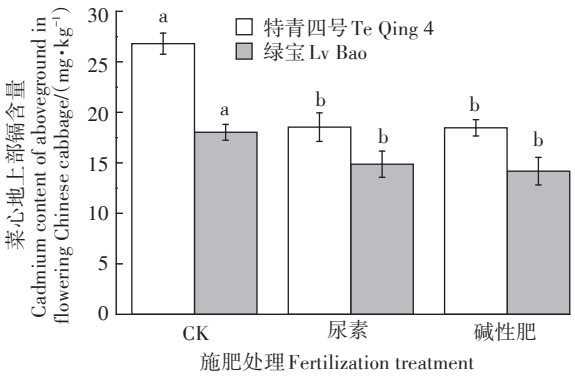
31.74%, 绿宝氮含量提高了 23.35%~38.63%。而施用尿素及碱性肥处理之间菜心的含氮没有显著差异。

2.4 碱性肥对菜心吸收累积镉的影响

多次施肥过程中, CK 的地上部及根部镉含量最高。其中特青四号 CK 处理地上部镉含量达到施用尿素及施用碱性肥处理的 1.45 倍 (图 3), 根部镉含量则为施用尿素及施用碱性肥处理的 2.0 倍 (图 4)。绿宝地上部 CK 处理镉含量达到施用尿素及施用碱性肥处理的 1.05~1.21 倍 (图 3), 根部镉含量则为施用尿素及施用碱性肥处理的 1.45~1.51 倍 (图 4)。说明在生长期分次施用尿素和碱性肥均能抑制菜心对土壤中镉的吸收。而在菜心 35 d 生长期分次施用尿素和碱性肥料处理下, 两种菜心的地上部及根部镉含量均没有显著差异。

2.5 碱性肥对土壤硝态氮含量的影响

由图 5 可知, 施肥后, 各处理土壤的硝态氮含量在



不同小写字母表示不同施肥处理间差异显著 (Duncan's 法, $P < 0.05$)。下同
Different lowercase letters indicate significant differences between different fertilization treatments ($P < 0.05$, Duncan's test). The same below

图3 碱性肥对菜心地上部镉累积的影响

Figure 3 Effects of alkaline fertilizer on cadmium content of shoot in flowering Chinese cabbage

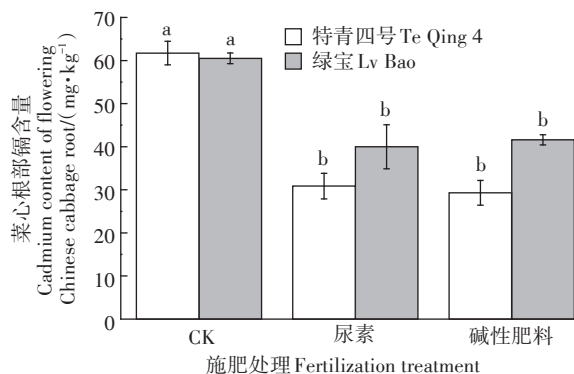


图4 碱性肥对菜心根部镉含量的影响

Figure 4 Effects of alkaline fertilizer on cadmium content of root in flowering Chinese cabbage

第21天左右达到最大值,随后下降。施用尿素处理土壤的硝态氮含量显著高于施用碱性肥及CK,其中特青四号菜心盆栽土壤在第45天、第55天及第65天分别比施加碱性肥土壤的硝态氮含量高出23.05%、15.48%及42.95%;绿宝盆栽土壤在第45天、第55天及第65天分别比施加碱性肥土壤的硝态氮含量高出22.43%、25.07%及21.18%。由此可知,碱性肥施入土壤后,其硝化率显著低于尿素,并在停止施肥一段时间内仍能保持较低的硝化率,而尿素的硝化率在后期较高。

3 讨论

3.1 碱性肥对土壤pH的影响

试验结果表明,25 d内多次施肥期间,施用尿素的土壤pH与施用碱性肥处理土壤的pH没有显著差异,而35 d后,施用尿素土壤的pH急剧下降,至第65天时,其pH显著小于施用碱性肥的土壤,而施用碱性肥土壤的pH仍高于原始pH。其可能的原因是尿素

处理的土壤硝化作用在菜心收获后仍然保持较高的水平(图5)。由此可见,分次施用碱性肥对缓解土壤酸化有持续的作用和效果。

研究显示,尿素施入土壤后迅速矿化,水解生成碳酸铵,导致土壤pH上升,并在4~7 d内达到最大值,随后土壤中水解产生的铵态氮发生硝化作用,土壤pH急剧下降至低于原土壤pH的水平,这也是长期施用尿素致土壤酸化的主要原因之一^[17-20]。本试验中,在分次施肥的条件下,新补充的尿素不断水解,因此在施肥期间土壤的pH能维持在较高水平,但停止施肥后,施用尿素土壤的pH急剧下降。

碱性肥(即聚脲甲醛类肥料)在土壤中的释放速率缓慢,并且在大田试验中有明显的缓释效果^[21],以脲醛为氮源的碱性肥施入土壤后,其较缓和的矿化速率和硝化作用可能是维持后期土壤pH较高的主要原因之一^[22]。过去的研究也证明,盆栽及田间试验中,施用碱性肥土壤的pH显著高于施用尿素土壤,即施用碱性肥有提高土壤pH的作用,因此,碱性肥施入土壤中不仅持续中和了土壤酸性,还能为土壤提供长效氮素,提高氮肥利用率^[23-24]。

此外,碱性肥除了作为一种碱性物质中和土壤酸性、提高土壤pH外,施入土壤后,其硝态氮含量及表观硝化率明显小于尿素处理。硝化作用减弱后,可使土壤pH维持在较高水平。研究认为,土壤的硝化率与潜在硝化能力均与碳氮比呈负相关关系,相同的氮含量下,碳含量越高,土壤的硝化作用越弱^[25]。碱性肥为脲醛缩合肥,其碳氮比要大于酰胺态氮肥及无机氮肥,较高的碳氮比也是抑制土壤硝化作用的原因之一。另外,氮源显著影响土壤中硝化细菌的活性,研究证明,尿素会激发土壤中硝化细菌的活性,从而促进硝

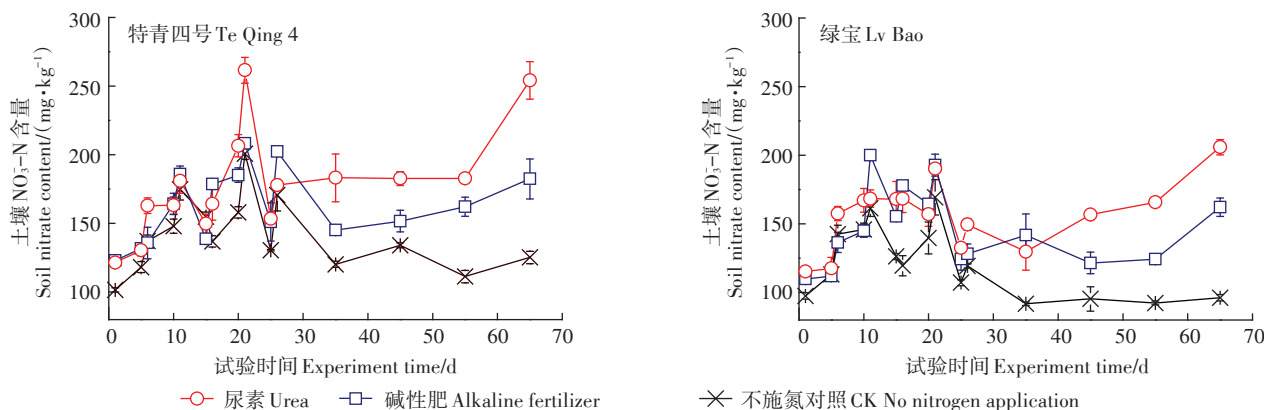


图5 碱性肥对土壤硝态氮含量的影响

Figure 5 Effects of alkaline fertilizer on nitrate content of soil with alkaline fertilizer

化作用,加剧土壤酸化^[26]。碱性肥究竟是否对土壤硝化细菌有抑制作用,仍需进一步探讨。

3.2 碱性肥对菜心镉含量的影响

试验结果进一步表明,施用碱性肥不仅能持续长久提高土壤pH,还能降低土壤有效镉含量。土壤镉生物有效性与土壤pH呈极显著负相关关系。随着pH升高,土壤中残渣态镉含量比例明显上升^[27]。研究认为,土壤对镉离子的吸附分为3个pH区域,吸附率随pH升高而增大,当pH>6.0时,高pH下土壤表面含氧基团活化,与镉形成络合物,土壤对镉的吸附以专性吸附为主,解吸率显著降低,有利于土壤对镉的钝化,从而使植物对镉的累积量显著降低^[28-29]。

前人研究结果显示,施用尿素60 d后,土壤中镉有效性含量显著增加^[30],而碱性肥中氮素部分为脲醛缓释氮,改善了土壤氮素供应状,从而降低了土壤的有效镉含量,且在一次施肥条件下,碱性肥显著降低植株的镉含量,土壤镉生物有效性明显下降^[31]。

碱性肥还能显著提高菜心的生物量和氮含量,证明其能代替常规肥料。另一方面,碱性肥将施肥和土壤酸性改良合二为一,节约了施用改良剂的人工成本。与CK相比,施用尿素和碱性肥均能降低菜心镉含量,而尿素处理及碱性肥处理之间菜心镉含量差异不显著,这可能是因为本试验采取分次施肥模式,对比一次施肥更能显著降低蔬菜可食部位镉含量,更加有利于保障蔬菜的安全生产^[32]。

4 结论

(1)分次施肥条件下,短期内碱性肥和尿素均能有效提高土壤pH,同时显著降低土壤有效镉含量,并抑制菜心对土壤镉的吸收积累。

(2)分次施肥条件下,停止施肥后,施用尿素土壤的pH急剧下降且土壤有效镉含量显著升高,而施用碱性肥能长效持续抑制土壤酸化。

(3)分次施肥条件下,碱性肥料肥效长,能有效提高菜心生物量,增加菜心含氮量。

参考文献:

- [1] 苗亚琼,林清. 广西土壤重金属镉污染及对人体健康的危害[J]. 环境与可持续发展, 2016, 41(5): 171-173. MIAO Y Q, LIN Q. Pollution caused by heavy metal cadmium to the soil in Guangxi and its harm to human health[J]. *Environment and Sustainable Development*, 2016, 41(5): 171-173.
- [2] YANG Q Q, LI Z Y, LU X N, et al. A review of soil heavy metal pollution from industrial and agricultural regions in China: Pollution and risk assessment[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 642: 690-700.
- [3] MARTÍN-TORRE M C, RUIZ G, GALAN B, et al. Generalised mathematical model to estimate Zn, Pb, Cd, Ni, Cu, Cr and As release from contaminated estuarine sediment using pH-static leaching tests[J]. *Chemical Engineering Science*, 2015, 138: 780-790.
- [4] 徐仁扣,李九玉,周世伟,等. 我国农田土壤酸化调控的科学问题与技术措施[J]. 中国科学院院刊, 2018, 33(2): 160-167. XU R K, LI J Y, ZHOU S W, et al. Scientific issues and controlling strategies of soil acidification of croplands in China[J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 2018, 33(2): 160-167.
- [5] 许中坚,刘广深,刘维屏. 人为因素诱导下的红壤酸化机制及其防治[J]. 农业环境保护, 2002, 21(2): 175-178. XU Z J, LIU G S, LIU W P. Mechanism and control of red soil acidification induced by man-made factors[J]. *Agro-environmental Protection*, 2002, 21(2): 175-178.
- [6] KAZUMICHIF J, CHIE H K, TAWATCHAI P K, et al. Acidification and buffering mechanisms of tropical sandy soil in northeast Thailand [J]. *Soil and Tillage Research*, 2017(165): 80-87.
- [7] 周晓阳,徐明岗,周世伟. 长期施肥下我国南方典型农田土壤的酸化特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(6): 1615-1621. ZHOU X Y, XU M G, ZHOU S W. Soil acidification characteristics in southern China's croplands under long-term fertilization[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2015, 21(6): 1615-1621.
- [8] 周晓阳,周世伟,徐明岗,等. 中国南方水稻土酸化演变特征及影响因素[J]. 中国农业科学, 2015, 48(23): 4811-4817. ZHOU X Y, ZHOU S W, XU M G, et al. Evolution characteristics and influence factors of acidification in paddy soil of southern China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(23): 4811-4817.
- [9] YANG X D, NI K, SHI Y Z, et al. Effects of long-term nitrogen application on soil acidification and solution chemistry of a tea plantation in China[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2018, 252: 74-82.
- [10] ZHANG Y T, DE VKIES W, THOMAS D B W, et al. Impacts of long-term nitrogen fertilization on acid buffering rates and mechanisms of a slightly calcareous clay soil[J]. *Geoderma*, 2017, 305: 92-99.
- [11] 宋文峰,王超,陈荣府,等. 长期不同施肥下小麦离子吸收对土壤酸化贡献能力的比较[J]. 土壤, 2017, 49(1): 7-12. SONG W F, WANG C, CHEN R F, et al. Comparison of contribution of wheat ionic uptake to soil acidification under long-term different fertilization [J]. *Soils*, 2017, 49(1): 7-12.
- [12] 蒋朝晖,曾清如,皮荷杰,等. 不同品种尿素施入土壤后pH值的变化和氨气释放差异[J]. 环境化学, 2009, 28(2): 177-180. JIANG Z H, ZENG Q R, PI H J, et al. Change of pH and volatilization of ammonia by fertilizing different types of urea in soil[J]. *Environmental Chemistry*, 2009, 28(2): 177-180.
- [13] 曹巧滢,江家泉,王学江,等. 新型碱性肥料治酸改土降镉的效果和机理[J/OL]. (2021-07-09). 土壤学报, doi: 10. 11766/202102100092. CAO Q Y, JIANG J Q, WANG X J, et al. A novel alkaline fertilizer and its function as well as mechanism to remediation soil acid and Cd pollution[J/OL]. (2021-07-09). *Acta Pedologica Sinica*, doi: 10. 11766/202102100092.
- [14] 黄丽娜,樊小林. 脲甲酰胺肥料对小白菜产量和氮肥利用率的影响

- [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2012, 40(11):42-56. HUANG L N, FAN X L. Effects of urea-formaldehyde fertilizer on yield of Chinese cabbage and its nitrogen use efficiency[J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2012, 40(11): 42-56.
- [15] 桂莎, 刘芳, 樊小林. 碱性肥料和生防菌制剂配合施用对香蕉枯萎病的防效[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(11):104-113. GUI S, LIU F, FAN X L. Preventing effects of combined application of alkaline fertilizer and biocontrol actinomyces agent on banana fusarium wilt[J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2019, 47(11):104-113.
- [16] QIU Q, WANG Y T, YANG Z Y, et al. Responses of different Chinese flowering cabbage (*Brassica parachinensis* L.) cultivars to cadmium and lead exposure: Screening for Cd+Pb pollution-safe cultivars[J]. *Clean-Soil Air, Water*, 2011, 39(11):925-932.
- [17] 林清美, 廖超林, 谢丽华, 等. 地下水位和长期施肥对红壤性水稻土有机碳矿化特征的影响[J]. 土壤学报, 2019, 56(6):1414-1424. LIN Q M, LIAO C L, XIE L H, et al. Effects of groundwater tables and long-term fertilization on mineralization of organic carbon in red paddy soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(6):1414-1424.
- [18] BARAE P L, BABOUO J, ANMAND R K, et al. Effects of long-term soil acidification due to nitrogen fertilizer inputs in Wisconsin[J]. *Plant and Soil*, 1997, 197:61-69.
- [19] 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):249-252. ZENG Q R, LIAO B H, JIANG Z H, et al. Short-term changes of pH value and Al activity in acid soils after urea fertilization[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(2):249-252.
- [20] 孟红旗, 刘景, 徐明岗, 等. 长期施肥下我国典型农田耕层土壤的pH演变[J]. 土壤学报, 2013, 50(6):1109-1116. MENG H Q, LIU J, XU M G, et al. Evolution of pH in topsoils of typical Chinese croplands under long-term fertilization[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(6):1109-1116.
- [21] 黄巧义, 张木, 黄旭, 等. 聚脲甲醛缓释氮肥一次性基施在双季稻上的应用效果[J]. 中国农业科学, 2018, 51(20):3996-4006. HUANG Q Y, ZHANG M, HUANG X, et al. Effect of one-off application of poly urea-formaldehyde fertilizer under reduced N rate on double cropping rice[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(20):3996-4006.
- [22] YAMAMOTO C F, PEREIRA E I, MATTOSO L H. Slow release fertilizers based on urea/urea-formaldehyde polymer nanocomposites[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2016, 287:390-397.
- [23] 郭春铭, 刘卫军, 樊小林. 碱性长效缓释氮肥对蕉园土壤pH和香蕉氮肥利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(1):128-136. GUO C M, LIU W J, FAN X L. Effect of alkaline slow release nitrogen fertilizer on soil pH and nitrogen use efficiency of banana[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(1):128-136.
- [24] 樊小林, 李进. 碱性肥料调节香蕉园土壤酸度及防控香蕉枯萎病的效果[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(4):938-946. FAN X L, LI J. Effectiveness of alkaline fertilizer on the control of banana fusarium wilt and regulation of soil acidity in banana orchard[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(4):938-946.
- [25] ZHANG Y, LIU S Y, CHENG Y, et al. Composition of soil recalcitrant C regulates nitrification rates in acidic soils[J]. *Geoderma*, 2019, 337:965-972.
- [26] CHAUDHARY M, MOBBS H J, NSGEIR R, et al. Effect of soil acidity and saturating cation on adsorption of urea in soil[J]. *Plant and Soil*, 1984, 79:437-439.
- [27] 侯青叶, 杨忠芳, 杨晓燕, 等. 成都平原区水稻土成土剖面Cd形态分布特征及影响因素研究[J]. 地学前缘, 2008, 15(5):36-46. HOU Q Y, YANG Z F, YANG X Y, et al. Study of distribution of geochemical speciation of cadmium and factors controlling the distribution in paddy soil profiles, Chengdu Plain, southwest China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2008, 15(5):36-46.
- [28] 周鑫斌, 黄建国, 赖凡. pH和有机酸对酸性紫色土吸附-解吸镉的影响[J]. 水土保持学报, 2007, 21(6):139-142. ZHOU X B, HUANG J G, LAI F. Effects of pH, organic acids on cadmium adsorption-desorption from acidic purple soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(6):139-142.
- [29] 廖敏, 黄昌勇, 谢正苗. pH对镉在土水系统中的迁移和形态的影响[J]. 环境科学学报, 1999, 19(1):83-88. LIAO M, HUANG C Y, XIE Z M. Effect of pH on transport and transformation of cadmium in soil-water system[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1999, 19(1):83-88.
- [30] 刘安辉, 赵鲁, 李旭军, 等. 氮肥对镉污染土壤上小油菜生长及镉吸收特征的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2014(2):77-81. LIU A H, ZHAO L, LI X J, et al. Effect of nitrogen fertilizer on rape growth and uptake characteristics of cadmium[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2014(2):77-81.
- [31] 张亮亮, 樊小林, 张立丹, 等. 碱性肥料对稻田土壤和稻米镉含量的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(3):891-896. ZHANG L L, FAN X L, ZHANG L D, et al. Effects of alkaline fertilizer on cadmium content in rice and paddy soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(3):891-896.
- [32] FAN S K, ZHU J, TIAN W H, et al. Effects of split applications of nitrogen fertilizers on the Cd level and nutritional quality of Chinese cabbage[J]. *Journal of Zhejiang University Science B: Biomedicine & Biotechnology*, 2017, 18(10):897-905.

(责任编辑:叶飞)