

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2024.04.035

宗浩霖, 郑文魁, 李江华, 等. 长期施用控释尿素对潮土土壤酸碱缓冲体系与土壤肥力的影响[J]. 水土保持学报, 2024, 38(4): 354-361.

ZONG Haolin, ZHENG Wenkui, LI Jianghua, et al. Effects of long-term application of controlled-release urea on the acid-base buffering system and soil fertility in fluvo-aquic soils[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(4): 354-361.

长期施用控释尿素对潮土土壤酸碱缓冲体系与土壤肥力的影响

宗浩霖, 郑文魁, 李江华, 王 淳

(土肥高效利用国家工程研究中心, 山东农业大学资源与环境学院, 山东 泰安 271018)

摘 要: [目的] 为探究长期施用控释尿素对北方石灰性潮土土壤酸度、酸碱缓冲能力及肥力的影响。[方法] 基于自 2008 年开始的长期定位小麦玉米轮作施肥试验, 设计掺混控释尿素和普通尿素 2 种氮肥类型及不施氮[N 0 kg/(hm² · a)]、常量[N 540 kg/(hm² · a)]和增量[N 810 kg/(hm² · a)]3 个施氮水平, 于 2022 年玉米季成熟期采集 0—80 cm 土层土壤样品, 测定土壤酸碱缓冲容量、土壤碳酸钙含量与土壤养分。[结果] (1) 控释尿素减缓了因施氮导致的土壤缓冲容量和 pH 下降, 缓解了土壤酸化过程。常量掺混控释尿素、增量掺混控释尿素处理的缓冲容量分别较普通尿素处理常量普通尿素、增量普通尿素升高 5.22% 和 11.17%, 常量掺混控释尿素、增量掺混控释尿素处理的 pH 分别较常量普通尿素、增量普通尿素升高 0.17 和 0.08 个单位。(2) 控释尿素提高了土壤阳离子交换量与交换性钙镁含量, 提高了耕层土壤的活性碳酸钙含量, 常量掺混控释尿素和增量掺混控释尿素处理活性碳酸钙含量分别较常量普通尿素和增量普通尿素处理升高 52.08% 和 45.31%。同时, 控释尿素减缓了土壤深层次土壤碳酸钙含量损失。(3) 控释尿素提高了土壤全氮、有机质、硝态氮和铵态氮含量。[结论] 长期施用控释尿素缓解了因施用氮肥导致的土壤酸化, 提高了土壤活性碳酸钙含量, 提高了土壤肥力。

关键词: 控释尿素; 长期施肥; 土壤酸度; 酸碱缓冲性能

中图分类号: S158.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)04-0354-08

Effects of Long-term Application of Controlled-Release Urea on the Acid-Base Buffering System and Soil Fertility in Fluvo-aquic Soils

ZONG Haolin, ZHENG Wenkui, LI Jianghua, WANG Chun

(National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, College of Recourses and Environment, Shandong Agricultural University, Taian, Shandong 271018, China)

Abstract: [Objective] To investigate the effects of long-term application of controlled-release urea on soil acidity, acid-base buffering capacity and fertility of northern calcareous tidal soils. [Methods] Based on a long-term field trial of positioning fertilization since 2008, two types of nitrogen fertilizers, blended controlled-release urea(CRF) and ordinary urea(BBF), and three levels of nitrogen application, namely, no nitrogen application (N 0 kg/hm²), constant nitrogen application (N 540 kg/hm²) and incremental nitrogen application (N 810 kg/hm²), were designed, and soil samples were collected from 0—80 cm during the ripening of the maize season of 2022 to determine the acid-base buffering capacity, soil calcium carbonate content and soil fertility of soil. Samples were collected from 0—80 cm soil at the maturity of the corn season in 2022 to determine the soil acid-base buffer capacity, soil calcium carbonate content and soil nutrients. [Results] (1) CRF slowed down the decline of soil buffer capacity and pH value caused by N application and alleviated the process of soil acidification. The buffer capacity of constant CRF and incremental CRF treatments increased by 5.22% and 11.17%, respectively, and the pH of constant CRF and incremental CRF treatments increased by 0.17 and 0.08 units, respectively, compared with that of constant BBF and

收稿日期: 2024-03-09

修回日期: 2024-04-24

录用日期: 2024-04-28

网络首发日期(www.cnki.net): 2024-06-24

资助项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD1700605)

第一作者: 宗浩霖(2000—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事土壤化学过程与养分高效利用研究。E-mail: zonghaolin2022@163.com

通信作者: 郑文魁(1989—), 男, 硕士生导师, 主要从事土壤化学过程与养分高效利用研究。E-mail: wkzheng2013@163.com

http://stbcxb.alljournal.com.cn

incremental BBF. (2) CRF increased the soil cation exchange and exchangeable calcium and magnesium content and increased the active calcium carbonate content of the tillage soil, and the active calcium carbonate content of the constant CRF and incremental CRF treatments increased by 52.08% and 45.31% compared with that of the constant BBF and incremental BBF treatments. Meanwhile, CRF slowed down the loss of soil calcium carbonate content in deep soil layers. (3) CRF increased soil total nitrogen, organic matter, nitrate nitrogen and ammonium nitrogen content. [Conclusion] Long-term application of CRF alleviated soil acidification caused by nitrogen fertilizer application, increased soil active calcium carbonate content, and improved soil fertility.

Keywords: controlled-release urea; long-term fertilization; soil acidity; acid-base buffering capacity

Received: 2024-03-09

Revised: 2024-04-24

Accepted: 2024-04-28

Online(www.cnki.net): 2024-06-24

近年来,土壤酸化问题逐渐成为全球性的环境关注焦点^[1]。土壤酸化降低土壤中某些营养元素的可利用性,增加有毒金属离子的活性,抑制对生态有益的微生物的生长与活动^[2]。这些变化进一步影响到土壤有机质的分解,腐殖质的生成及土壤中碳、氮、磷、硫等元素的循环^[3]。近年来,农业生产中的肥料过量使用,尤其是氮肥的过度施用,已成为导致土壤酸化的主要因素^[4]。目前,中国为全球最大的化肥消费国,约占全球氮肥施用量的30%,但氮肥利用率仅为40%左右,低于发达国家水平^[5]。同时,在过去的几十年,中国农田的pH大约下降0.3~0.8个单位,下降趋势明显^[6]。

不同类型土壤上施用肥料会导致土壤不同程度的酸化^[7],而不同类型的氮肥种类对于土壤酸化的影响程度不同。氮肥添加试验显示,不同类型氮肥致酸能力大致为 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 > \text{NH}_4\text{Cl} > \text{NH}_4\text{NO}_3 > \text{CO}(\text{NH}_2)_2$ ^[8]。尿素在水解过程中消耗 H^+ ,使其对于土壤的酸化效果小于硫酸铵等 NH_4^+ 基的氮肥^[9]。氮肥施入土壤后的硝化作用和 NO_3^- 的淋溶是重要的土壤酸化过程。土壤pH与土壤硝化速率具有显著相关,氮添加增强了硝化作用强度,同时随着施氮量的增加土壤pH下降^[10]。DONG等^[11]通过原位¹⁵N标记试验发现,土壤中的 NO_3^- 大部分来自尿素的硝化作用,并且过量的 NO_3^- 随着降雨迅速淋溶,这一过程导致土壤pH显著下降。

控释尿素的养分释放速率与作物需肥规律曲线类似,可以有效减少重复劳动,提高肥料利用率,减少不合理、过量施用肥料导致的环境污染^[12]。控释尿素能够控制氮素的释放,减缓尿素溶解和分解的速率,进而对硝化作用产生影响,这一特征可能减缓土壤酸化的过程^[13]。然而,对于长期施用控释尿素缓解土壤酸化的研究鲜有报道,前人研究集中在非包膜肥料、有机肥料或是矿物肥料等对土壤酸化的影响。本研究基于自2008年开始的长期定位试验,探究长

期施用控释尿素对土壤酸度、土壤酸碱缓冲能力与土壤肥力的影响,为控释尿素的使用推广与减缓农田土壤酸化合理施肥提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

本试验依托于2008年6月开始的不同施肥下潮土肥力演变与施肥效应长期定位试验,位于山东省桓台县华北集约化农业生态系统试验站(117°59'21"E, 36°57'00"N)。试验采用冬小麦—夏玉米轮作体系。于2022年玉米季采集土壤样品进行分析。试验地属温带大陆性季风型气候,区域年平均气温为13.2℃,年平均降水量为615.1 mm。试验地土壤类型为潮土,中国土壤系统分类命名为石灰淡色潮湿雏形土(Calcaric Ochr—Aquic Cambosols),土壤质地为粉壤土(黏粒14.03%,砂粒12.49%,粉粒73.48%)。试验前表层(0—20 cm)土壤pH为8.8(水土比5:1),全氮含量为0.81 g/kg,有机质含量为18.3 g/kg,硝态氮含量为5.0 mg/kg,铵态氮含量为4.1 mg/kg,速效磷含量为9.2 mg/kg,速效钾含量为113 mg/kg,土壤碳酸钙含量为26.95 g/kg。

供试肥料包括由土肥高效利用国家工程研究中心研制生产的树脂包膜控释尿素(PCU, 43% N, 释放期90天)、硫加树脂包膜控释尿素(PSCU, 35% N, 释放期90天)。其他肥料为尿素(46% N)、过磷酸钙(16% P_2O_5)、硫酸钾(50% K_2O)。供试小麦品种为“济麦22”,生育期约239天,玉米品种为“郑单958”,生育期约103天。

1.2 试验设计

试验共5个处理:(1)CK,不施氮肥;(2)CRF1,掺混控释尿素,常规施氮量;(3)CRF2,掺混控释尿素,常规施氮量的150%;(4)BBF1,普通尿素,常规施氮量;(5)BBF2,普通尿素,常规施氮量的150%。每种处理在试验区域内随机布置,并进行3次重复。

CRF1 和 CRF2 中掺混尿素为硫加树脂包膜尿素(PSCU,35% N)、树脂包膜尿素(PCU,43% N)和普通尿素(46% N)按照 5:2:3 纯氮比掺混而成,具体施氮方案见表 1,冬小麦磷肥(P₂O₅)施用量为 120 kg/hm²,钾肥(K₂O)施用量为 90 kg/hm²,夏玉米磷肥(P₂O₅)施用量为 75 kg/hm²,钾肥(K₂O)施用量为 300 kg/hm²。控释尿素作为一次性基肥施用,而普通尿素则采用 60%的基肥配合 40%的追肥。其他田间管理措施与当地农民习惯相同。试验小区面积为 26.0 m²(10.0 m×2.6 m),随机排列。

表 1 施肥处理与施肥量

Table 1 Experimental design and fertilizer application rate

处理	kg/hm ²		
	冬小麦氮肥 施用量	夏玉米氮肥 施用量	年施氮量
CK	0	0	0
CRF1	240	300	540
CRF2	360	450	810
BBF1	240	300	540
BBF2	360	450	810

1.3 样品采集与测定

采用五点采样法采集各小区 0—20, 20—40, 40—60, 60—80 cm 土层土壤。利用四分法取约 500 g 土壤样品带回实验室进行分析。土壤样品在阴凉处风干后研磨,分别过 10, 100 目筛。

使用 pH 计测定土壤 pH(液土比 5:1);采用浓硫酸消煮一半微量凯氏定氮法测定土壤全氮;采用重铬酸钾—硫酸氧化法测定土壤有机质;采用 2 mol/L KCl 浸提(液土比 5:1),紫外分光光度计(岛津 UV2600,日本)测定土壤硝态氮与铵态氮;采用乙酸铵交换法测定土壤阳离子交换量;采用 ICP—OES 测定土壤交换性阳离子;采用中和滴定法测定土壤碳酸钙;采用 KMnO₄ 滴定法测定土壤活性碳酸钙^[14];采用 HCl、NaOH 酸碱滴定法测定土壤缓冲容量^[15]。

土壤缓冲性的计算方法^[16]:

$$\text{pHBC} = 1/|a|$$

式中: a 为酸碱滴定法得到的 pH 与酸碱加入量的曲线中线性突跃部分线性方程 $y = ax + b$ 中的斜率。

1.4 数据处理

数据处理通过 Excel 2019 和 SPSS 26 软件完成,并进行单因素方差分析(ANOVA)与 Duncan's 显著性检验($p < 0.05$),使用 GraphPad Prism 10.0.2 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 不同施肥对土壤酸碱缓冲特征与土壤酸度的影响

由图 1 可知,长期不同施肥处理的 0—20 cm 土

层土壤缓冲曲线整体呈现“S”形,突跃部分在 pH 7.5~9.0。突跃部分的 pH 变化与酸碱添加量呈现线性相关,相关系数为 0.963~1.000。根据公式(1)得出,不同施肥处理的土壤酸碱缓冲容量范围为 16.19~18.33 cmol/kg(表 2)。土壤缓冲容量受肥料种类和施氮量的影响。其中,以 CK 和 CRF1 处理缓冲容量最高。CRF1 和 CRF2 处理缓冲容量相较于 BBF1 和 BBF2 处理分别升高 5.22% 和 11.17%;CRF1 和 BBF1 处理缓冲容量相较于 CRF2 和 BBF2 处理分别升高 1.83% 和 7.60%。同时,长期不同施肥处理后的土壤 pH 不同,与 CK 处理相比,CRF1、CRF2、BBF1、BBF2 处理分别下降 0.28, 0.43, 0.45, 0.52 个单位。

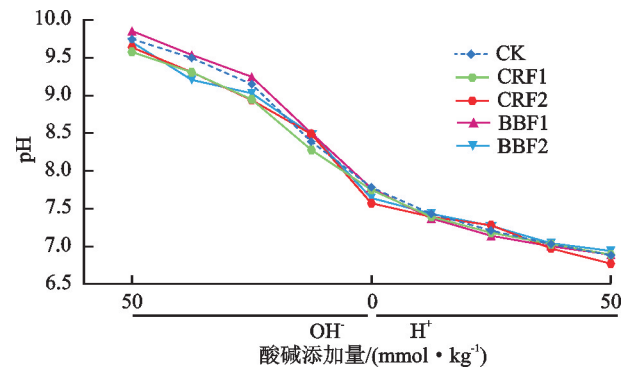


图 1 不同施肥处理的土壤酸碱滴定曲线

Fig. 1 Acid titration curve of different fertilization treatments

表 2 不同施肥处理的土壤酸碱缓冲容量与 pH

Table 2 Soil acid—base buffering capacity and pH under different fertilization treatments

处理	$y = ax + b$		R^2	酸碱缓冲容量/ (cmol·kg ⁻¹)	土壤 pH
	a	b			
CK	-0.055	7.755	0.996	18.25a	8.74a
CRF1	-0.055	7.648	0.982	18.33a	8.46b
CRF2	-0.056	7.692	0.963	18.00ab	8.31c
BBF1	-0.057	7.776	1.000	17.42b	8.29c
BBF2	-0.062	7.737	0.984	16.19c	8.23c

注:同列不同小写字母表示不同处理间差异显著($p < 0.05$)。下同。

2.2 不同施肥处理对土壤阳离子交换量与交换性阳离子的影响

不同施肥处理对 0—20 cm 土层土壤阳离子交换量与交换性阳离子含量具有显著影响,控释尿素处理和普通尿素处理阳离子交换量显著高于不施氮处理(表 3)。相同施肥量条件下,CRF1 和 CRF2 处理阳离子交换量较 BBF1 和 BBF2 处理分别升高 6.68% 和 7.01%;CRF1 和 BBF1 处理较 CRF2 和 BBF2 处理分别升高 3.30% 和 3.65%。CRF1、CRF2 处理的交换性 Ca²⁺ 较 BBF1、BBF2 处理分别升高 12.13% 和 9.50%;交换性 Mg²⁺ 分别升高 18.56% 和 10.46%。不施氮处理中,土壤交换性 K⁺ 离子含量最高,分别

较 CRF1、CRF2、BBF1、BBF2 升高 32.29%, 27.00%, 16.51%, 7.63%。

表 3 不同施肥处理土壤阳离子交换量与交换性阳离子含量

Table 3 Soil cation exchange and exchangeable cation content in different fertilization treatments cmol/kg				
处理	阳离子交换量	交换性 Ca^{2+}	交换性 Mg^{2+}	交换性 K^{+}
CK	24.88d	17.89abc	3.48bc	1.27a
CRF1	30.24a	19.23a	3.96a	0.96c
CRF2	29.24ab	18.78ab	3.59b	1.00c
BBF1	28.22bc	17.15bc	3.34bc	1.09bc
BBF2	27.19c	16.86c	3.25c	1.18ab

2.3 不同施肥处理对土壤碳酸钙和活性碳酸钙含量的影响

土壤碳酸钙与活性碳酸钙含量受肥料种类、施氮量与土壤层深影响。各处理土壤碳酸钙与活性碳酸钙含量均在 20—40 cm 土层达到最高。不同施肥处理土壤碳酸钙含量范围在 0.62~15.14 g/kg, 在 20—40 cm 土层差异最为显著(图 2)。0—20 cm 土层, CK 处理最高, BBF1 处理次之, 控释尿素处理之间差异不显著; 20—40 cm 土层, 普通尿素处理碳酸钙含量高于控释尿素处理, BBF1 和 BBF2 处理分别较 CRF1 和 CRF2 处理升高 24.43% 和 45.16%; 在 40—80 cm 土层, 各处理差异较小, 但控释尿素处理碳酸钙含量高于普通尿素处理。

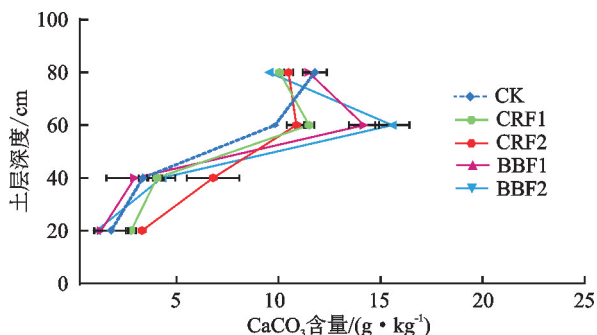


图 2 不同施肥处理土壤碳酸含量

Fig. 2 Soil carbonic acid content of different fertilization treatments

不同施肥处理土壤活性碳酸钙含量范围在 6.40~18.98 mg/kg, 0—20 cm 土层差异最为显著(图 3)。CRF1 和 CRF2 处理活性碳酸钙含量较 BBF1 和 BBF2 处理升高 52.08% 和 45.31%; 20—40 cm 土层活性碳酸钙含量高于其他层深, 但各处理间差异性小于 0—20 cm 土层, 普通尿素活性碳酸钙含量高于控释尿素。40 cm 后, 随着土层深度的增加, 土壤活性碳酸钙含量下降, 但处理间存在差异。40—60 cm 土层, CRF1 处理土壤活性碳酸钙含量显著高于 BBF1 处理, 升高 35.56%。在 60—80 cm 土层, CRF2 处理土壤活性碳酸钙含量较 BBF2 处理升高 8.13%。

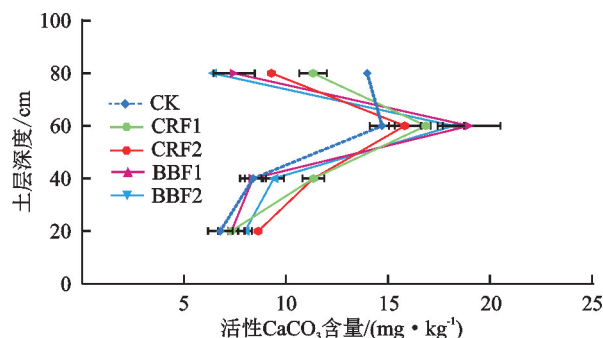


图 3 不同施肥处理土壤活性碳酸钙含量

Fig. 3 Soil active calcium carbonate content in different fertilization treatments

2.4 不同施肥处理对土壤肥力的影响

各施肥处理耕层土壤全氮和有机质含量相较于不施氮处理显著提升(表 4)。同一施氮水平下, 控释尿素处理的全氮和有机质含量显著高于普通尿素处理。CRF1 和 CRF2 处理的全氮含量分别较 BBF1 和 BBF2 处理升高 21.99% 和 42.86%; 有机质分别升高 7.01% 和 11.49%。同种氮肥类型处理的土壤全氮和有机质含量随着施氮量的上升而下降, CRF1 处理全氮含量较 CRF2 升高 14.67%; BBF1 处理全氮含量较 BBF2 处理升高 34.29%; CRF1 处理有机质含量较 CRF2 升高 2.22%; BBF1 处理有机质含量较 BBF2 处理升高 6.42%。

提高施氮量与施用控释尿素可以提升耕层土壤硝态氮和铵态氮含量, 硝态氮含量为 $\text{CRF2} > \text{CRF1} > \text{BBF2} > \text{BBF1} > \text{CK}$; 而铵态氮为 $\text{CRF2} > \text{CRF1} > \text{BBF2} > \text{CK} > \text{BBF1}$ 。CRF1 和 CRF2 处理的硝态氮含量较 BBF1 和 BBF2 处理分别升高 51.18% 和 73.03%; 铵态氮分别升高 36.91% 和 48.15%; CRF2 处理硝态氮、铵态氮含量较 CRF1 处理分别升高 26.24% 和 27.73%; BBF2 处理态氮、铵态氮含量较 BBF1 处理分别升高 10.30% 和 18.04%。

表 4 不同施肥处理的耕层土壤养分含量

Table 4 Nutrient content of tilled soil in different fertilization treatments

处理	全氮/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	有机质/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	硝态氮/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	铵态氮/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
CK	0.99c	17.87d	14.48d	9.87c
CRF1	1.72a	21.12a	36.24b	11.60b
CRF2	1.50b	20.66ab	45.75a	14.83a
BBF1	1.41b	19.72bc	23.97c	8.48d
BBF2	1.05a	18.53cd	26.44c	10.00c

2.5 不同施肥处理对土壤理化性质与土壤缓冲性的相关性分析

通过 Pearson 相关性分析(表 5)可知, 土壤 pH 与土壤缓冲容量、碳酸钙含量和活性碳酸钙含量呈

现显著正相关, 相关系数分别达到 0.643, 0.548, 0.920; 土壤缓冲容量与土壤碳酸钙含量、活性碳酸钙含量呈显著正相关, 相关系数分别达到 0.525, 0.756, 同时, 土壤全氮含量与土壤有机质含量、硝态氮含量、铵态氮含量呈现显著正相关, 相关系数为 0.708~0.862; 土壤阳离子交换量与全氮含量、有机质含量、硝态氮含量呈现显著正相关, 相关系数为

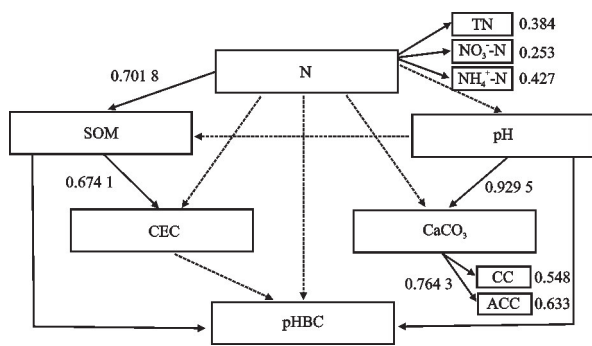
0.482~0.792。偏最小二乘路径模型(PLS-PM)分析显示了土壤性质与土壤缓冲性能的关系(图 4)。土壤氮(全氮、速效氮)通过影响土壤有机质含量提升了土壤阳离子交换量, 但不直接影响土壤 pH; 土壤 pH 通过影响土壤碳酸钙体系进而影响土壤缓冲性; 土壤阳离子、有机质和土壤氮对土壤缓冲性无显著影响。

表 5 不同施肥土壤理化性质与土壤缓冲性之间的 Pearson 相关性

Table 5 Pearson's correlation between soil physicochemical properties and soil bufferability with different fertilizer applications

指标	全氮	铵态氮	硝态氮	pH	有机质	酸碱缓冲容量	碳酸钙	活性碳酸钙
铵态氮	0.708 **							
硝态氮	0.862 **	0.854 **						
pH	-0.293	-0.059	-0.406					
有机质	0.814 **	0.508	0.754 **	-0.417				
酸碱缓冲容量	0.399	0.348	0.128	0.643 **	0.337			
碳酸钙	-0.107	-0.311	-0.508	0.548 *	-0.308	0.525 *		
活性碳酸钙	-0.162	0.146	-0.240	0.920 **	-0.178	0.756 **	0.431	
阳离子交换量	0.569 *	0.482	0.769 **	-0.493	0.792 **	-0.030	-0.761 **	-0.299

注: * 和 ** 分别表示不同指标间差异显著 ($p < 0.05$) 和极显著 ($p < 0.01$) 相关。



注: 实线表示具有显著正效应 ($p < 0.05$), 虚线表示相关不显著 ($p > 0.05$)

图 4 偏最小二乘路径模型(PLS-PM)分析

Fig. 4 Partial least squares path modeling (PLS-PM) analysis

3 讨论

3.1 长期施用控释尿素对土壤酸化的影响

长期使用氮肥已经被证明是农田土壤酸化的重要来源。土壤酸化不仅是土壤 pH 降低, 更是土壤酸碱缓冲能力下降的结果^[17]。本研究显示, 长期在中国北方石灰性潮土上施用氮肥会导致土壤 pH 和土壤酸碱缓冲容量的下降, 但在相同施氮量下, 控释尿素可以缓解这一下降趋势。其中, CRF1 和 CRF2 处理土壤 pH 较 BBF1 和 BBF2 处理分别升高 0.17 和 0.08 个单位, 缓冲容量分别升高 5.22% 和 11.17%。张可等^[18]研究表明, 在棕壤长期连续施用普通尿素会导致土壤 pH 下降, 但树脂包膜控释尿素提升土壤 pH; YANG 等^[19]通过在水稻土中施用不同类型的氮肥发现, 尿素的施用降低土壤 pH, 但相较于普通尿素, 控释尿素能够减缓土壤 pH 的下降。以上表明施

用不同氮肥类型的土壤酸化速率并不一致。

本研究中, 相较于长期定位试验开始前, 各处理土壤碳酸钙含量显著下降, 土壤碳酸盐含量与土壤缓冲容量之间存在显著的正相关关系, 这表明在中国北方石灰性潮土耕地中, 长期施用氮肥导致的土壤酸化存在缓冲过程, 土壤的缓冲性主要由碳酸盐体系主导。有机质含量和阳离子交换量与土壤缓冲容量之间的相关性并不显著, 这表明阳离子及有机质在中国北方石灰性潮土耕地中缓冲作用较弱。王擎运等^[20]通过研究潮土土壤钙、镁累积特征, 发现潮土以碳酸盐缓冲体系为主, 这也与本研究结果一致。

3.2 长期使用控释尿素对土壤碳酸钙的影响

土壤酸化过程中产生的 H^+ 被土壤中的碳酸盐中和, 产生不可逆的 CO_2 排放, 导致土壤碳酸盐的流失^[21]。本研究中, 各施肥处理的 0—20 cm 土层土壤碳酸钙含量相较于不施氮处理有不同程度的下降, 其中, BBF2 处理下降最多。然而在 20—40 cm 土层土壤, 普通尿素处理土壤碳酸钙含量高于控释尿素处理, BBF1 和 BBF2 处理分别较 CRF1 和 CRF2 处理升高 24.43% 和 45.16%。PLAN^[22]研究发现, 土壤碳酸钙的溶解不仅取决于 H^+ 的输入量, 还取决于土壤碳酸钙与 H^+ 的接触面积; PERASSI 等^[23]研究发现, 土壤中磷酸盐沉积在碳酸钙表面可以减少碳酸钙的溶解。施用控释尿素提高土壤有机质含量, 有机质分解产生的有机酸减少磷酸盐在碳酸钙表面的沉积, 同时还与磷酸盐竞争碳酸钙的表面位点, 从而加速碳酸钙溶解^[24], 这可能是控释尿素处理 20—40 cm 土

层土壤碳酸钙含量较低的原因。

土壤活性碳酸钙是指土壤中未与土壤黏粒部分紧密结合、易发生化学反应的碳酸盐,土壤活性碳酸钙对土壤耕作与农业管理的响应更为敏感^[25]。本研究中,CRF1 和 CRF2 处理 0—20 cm 土层土壤活性碳酸钙含量较 BBF1 和 BBF2 处理升高 52.08% 和 45.31%,同时相较于土壤碳酸钙含量,活性碳酸钙含量与土壤缓冲容量有着更高的相关性,说明在碳酸盐缓冲体系中,更易利用的活性碳酸钙可以更快地与土壤中的 H^+ 结合,起到缓冲作用。

3.3 长期使用控释尿素对土壤肥力的影响

LI 等^[26]研究认为,农田施用控释尿素可以提升土壤全氮和有机质含量。在相同施氮水平下,控释尿素处理土壤全氮含量较普通尿素升高 21.99%~42.86%,有机质含量升高 7.01%~11.49%。控释尿素的这一优势可能与其在作物关键生长期调节氮素释放的能力有关。通过优化氮素的释放时间和数量,控释尿素能够促进植物对于氮的吸收,提高作物产量,增加土壤中的地上地下生物量,从而增强土壤有机碳的固存和全氮含量^[27]。

本研究中,控释尿素处理的耕层土壤硝态氮含量较普通尿素处理升高 51.18%~73.03%。ZHENG 等^[28]通过在中国北方石灰性潮土小麦玉米轮作系统进行长期定位试验,发现在 0—40 cm 土层,当施氮量相同时,控释尿素处理土壤硝态氮含量高于普通尿素处理,而在 60—200 cm 土层则呈现相反的趋势。QI 等^[29]研究显示,在稻田土壤控释尿素可以减少氮的淋溶。以上结果表明,与普通尿素相比,控释尿素因其包膜物理阻碍作用,能更有效地控制氮素的释放,减少硝态氮的淋溶损失,从而提升土壤耕层硝态氮含量^[30]。控释尿素更少的硝态氮淋溶和更高的氮肥利用率可以降低氮循环过程中的 H^+ 产生量,从而在一定程度上可以减缓土壤酸化,这也与本研究结果一致。

土壤阳离子在调节土壤酸碱缓冲和有机质稳定性方面发挥着重要作用。与 BBF1 和 BBF2 处理相比,CRF1 和 CRF2 处理的土壤阳离子交换量分别升高 6.68% 和 7.01%,交换性 Ca^{2+} 含量分别升高 12.13% 和 9.50%,交换性 Mg^{2+} 含量分别升高 18.56% 和 10.46%,土壤阳离子交换量与土壤全氮、有机质和硝态氮含量呈显著相关。这可能是控释尿素通过多种机制综合作用于土壤的结果。首先,控释尿素的缓释特性可以降低土壤胶体吸附的阳离子被土壤溶液中过量铵离子置换而随水淋失的风险^[31]。其次,控释尿素的使用减少硝态氮的淋失,从而降低

伴随硝酸根淋洗而流失的盐基离子量^[32]。最后,控释尿素的施用提高土壤有机质含量,增强土壤对阳离子的吸附能力^[33]。这些因素共同促进土壤阳离子交换量和交换性阳离子含量的提高。

4 结论

长期定位施肥试验表明,CRF1 和 CRF2 处理分别较 BBF1 和 BBF2 处理,缓冲容量升高 5.22% 和 11.17%,pH 升高 0.17 和 0.08 个单位,阳离子交换量升高 6.68% 和 7.01%,交换性 Ca^{2+} 升高 12.13% 和 9.50%,交换性 Mg^{2+} 升高 18.56% 和 10.46%,活性碳酸钙含量升高 52.08% 和 45.31%,全氮含量升高 21.99% 和 42.86%,有机质含量分别升高 7.01% 和 11.49%,硝态氮含量升高 51.18% 和 73.03%,铵态氮升高 36.91% 和 48.15%。综上,通过合理的肥料管理,特别是合理使用控释尿素,可以降低因施氮导致的土壤缓冲容量下降,减缓土壤酸化的速度,减少土壤碳酸盐库的消耗,提高土壤肥力。结果可为控释尿素的使用推广与缓解农田土壤酸化合理施肥提供科学依据。

参考文献:

- [1] 徐仁扣.土壤酸化及其调控研究进展[J].土壤,2015,47(2):238-244.
XU R K. Research progresses in soil acidification and its control[J].Soils,2015,47(2):238-244.
- [2] 于天一,孙秀山,石程仁,等.土壤酸化危害及防治技术研究进展[J].生态学杂志,2014,33(11):3137-3143.
YU T Y, SUN X S, SHI C R, et al. Advances in soil acidification hazards and control techniques[J].Chinese Journal of Ecology,2014,33(11):3137-3143.
- [3] MENG C, TIAN D S, ZENG H, et al. Global soil acidification impacts on belowground processes[J].Environmental Research Letters,2019,14(7):e074003.
- [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 Chinese Academy of Sciences,2018,33(2):160-167.
- [5] YU C Q, HUANG X, CHEN H, et al. Managing nitrogen to restore water quality in China[J].Nature,2019,567:516-520.
- [6] WANG F, HARINDINTWALI J D, YUAN Z Z, et al. Technologies and perspectives for achieving carbon neutrality[J].The Innovation,2021,2(4):e100180.
- [7] 李娟,张立成,章明清,等.长期施用尿素降低赤红壤旱地耕层 pH 的特征与预测[J].植物营养与肥料学报,

- 2022,28(12):2161-2171.
- LI J, ZHANG L C, ZHANG M Q, et al. Characteristics and prediction of topsoil acidification of latosolic red soil caused by long-term urea application[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2022, 28(12): 2161-2171.
- [8] 艾绍英, 孙自航, 姚建武, 等. 氮肥种类及用量对赤红壤 pH 和可溶性盐的影响[J]. *生态环境*, 2008, 17(4): 1614-1618.
- AI S Y, SUN Z H, YAO J W, et al. Effects of different kinds and amount of nitrogen fertilizer on pH and soluble salt of latosolic red soil[J]. *Ecology and Environment*, 2008, 17(4): 1614-1618.
- [9] LI Z L, ZENG Z Q, TIAN D S, et al. Global patterns and controlling factors of soil nitrification rate[J]. *Global Change Biology*, 2020, 26(7): 4147-4157.
- [10] WANG J, TU X S, ZHANG H M, et al. Effects of ammonium-based nitrogen addition on soil nitrification and nitrogen gas emissions depend on fertilizer-induced changes in pH in a tea plantation soil[J]. *The Science of the Total Environment*, 2020, 747: e141340.
- [11] DONG Y, YANG J L, ZHAO X R, et al. Seasonal dynamics of soil pH and N transformation as affected by N fertilization in subtropical China: An in situ ¹⁵N labeling study[J]. *The Science of the Total Environment*, 2022, 816: e151596.
- [12] ZHENG W K, ZHANG M, LIU Z G, et al. Combining controlled-release urea and normal urea to improve the nitrogen use efficiency and yield under wheat-maize double cropping system[J]. *Field Crops Research*, 2016, 197: 52-62.
- [13] 郑文魁, 卢永健, 邓晓阳, 等. 控释氮肥对玉米秸秆腐解及潮土有机碳组分的影响[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(5): 292-298.
- ZHENG W K, LU Y J, DENG X Y, et al. Effects of controlled-release nitrogen fertilizer on decomposition of maize straw and organic carbon fractions in fluvo-aquic soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(5): 292-298.
- [14] MORENO F, MURILLO J M, PEIEGRÍN F, et al. Long-term impact of conservation tillage on stratification ratio of soil organic carbon and loss of total and active CaCO₃[J]. *Soil and Tillage Research*, 2006, 85(1): 86-93.
- [15] 黄清扬, 徐仁扣, 俞元春. 不同产地油菜秸秆制备的生物质炭对红壤酸度和土壤 pH 缓冲容量的影响[J]. *土壤通报*, 2022, 53(4): 821-827.
- HUANG Q Y, XU R K, YU Y C. Effects of biochars of canola straws from different soils on red soil acidity and pH buffering capacity[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2022, 53(4): 821-827.
- [16] 邓小华, 李源环, 周米良, 等. 武陵山地植烟土壤酸度特征及影响因素: 以湖南省湘西自治州为例[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(4): 304-309.
- DENG X H, LI Y H, ZHOU M L, et al. Acidity characteristics and influencing factors of tobacco-planting soils in Wuling Mountains: A case study in Xiangxi autonomous prefecture, Hunan Province [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(4): 304-309.
- [17] LU H L, LI K W, NKO H J N, et al. Effects of the increases in soil pH and pH buffering capacity induced by crop residue biochars on available Cd contents in acidic paddy soils[J]. *Chemosphere*, 2022, 301: e134674.
- [18] 张可, 李东坡, 杜艳娣, 等. 包膜与稳定性氮肥改善棕壤理化和生物学肥力并延缓酸化的效应[J]. *植物营养与肥料学报*, 2023, 29(3): 472-482.
- ZHANG K, LI D P, DU Y D, et al. Coated and stable nitrogen fertilizers improve physico-chemical and biological quality and delay acidification in brown soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2023, 29(3): 472-482.
- [19] YANG X Y, GENG J B, LIU Q J, et al. Controlled-release urea improved rice yields by providing nitrogen in synchrony with the nitrogen requirements of plants[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2021, 101(10): 4183-4192.
- [20] 王擎运, 张佳宝, 赵炳梓, 等. 长期施肥对典型潮土钙、镁形态转化及其环境行为的影响[J]. *土壤*, 2020, 52(3): 476-481.
- WANG Q Y, ZHANG J B, ZHAO B Z, et al. Effects of long-term fertilization on calcium and magnesium morphological transformation and environmental behavior in typical fluvo-aquic soil[J]. *Soils*, 2020, 52(3): 476-481.
- [21] TAO J J, FAN L C, ZHOU J B, et al. Nitrification-induced acidity controls CO₂ emission from soil carbonates [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2024, 192: e109398.
- [22] PLAN L. Factors controlling carbonate dissolution rates quantified in a field test in the Austrian Alps[J]. *Geomorphology*, 2005, 68(3/4): 201-212.
- [23] PERASSI I, BORGNINO L. Adsorption and surface precipitation of phosphate onto CaCO₃-montmorillonite: Effect of pH, ionic strength and competition with humic acid[J]. *Geoderma*, 2014, 232/234: 600-608.
- [24] RAZA S, ZAMANIAN K, ULLAH S, et al. Inorganic carbon losses by soil acidification jeopardize global efforts on carbon sequestration and climate change mitigation [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 315: e128036.
- [25] 汪吉东, 戚冰洁, 张永春, 等. 长期施肥对砂壤质石灰性潮土土壤酸碱缓冲体系的影响[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(4): 1031-1036.

- WANG J D, QI B J, ZHANG Y C, et al. Effects of long-term fertilization on pH buffer system of sandy loam calcareous fluvior-aquic soil[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(4): 1031-1036.
- [26] LI R C, GAO Y X, CHEN Q, et al. Blended controlled-release nitrogen fertilizer with straw returning improved soil nitrogen availability, soil microbial community, and root morphology of wheat[J]. Soil and Tillage Research, 2021, 212: e105045.
- [27] GAO Y X, SONG X, ZHENG W K, et al. The controlled-release nitrogen fertilizer driving the symbiosis of microbial communities to improve wheat productivity and soil fertility[J]. Field Crops Research, 2022, 289: e108712.
- [28] ZHENG W K, LIU Z G, ZHANG M, et al. Improving crop yields, nitrogen use efficiencies, and profits by using mixtures of coated controlled-released and uncoated urea in a wheat-maize system[J]. Field Crops Research, 2017, 205: 106-115.
- [29] QI D L, ZHU J Q, WANG X G. Nitrogen loss via runoff and leaching from paddy fields with the proportion of controlled-release urea and conventional urea rates under alternate wetting and drying irrigation[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30(22): 61741-61752.
- [30] ZHAO C H, TIAN H Y, ZHANG Q, et al. Preparation of urea-containing starch-castor oil superabsorbent polyurethane coated urea and investigation of controlled nitrogen release[J]. Carbohydrate Polymers, 2021, 253: e117240.
- [31] 高永祥, 李若尘, 张民, 等. 秸秆还田配施控释掺混尿素对玉米产量和土壤肥力的影响[J]. 土壤学报, 2021, 58(6): 1507-1519.
- GAO Y X, LI R C, ZHANG M, et al. Effects of straw returning combined with application of mixture of controlled-release urea and common urea on maize yield and soil fertility[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(6): 1507-1519.
- [32] RAZA S, MIAO N, WANG P Z, et al. Dramatic loss of inorganic carbon by nitrogen-induced soil acidification in Chinese croplands[J]. Global Change Biology, 2020, 26(6): 3738-3751.
- [33] GAO F, LI Z L, GAO Y X, et al. The effect of long-term controlled-release urea application on the relative abundances of plant growth-promoting microorganisms[J]. European Journal of Agronomy, 2023, 151: e126971.
- (上接第 353 页)
- [29] 王志强, 刘宝元, 王旭艳, 等. 东北黑土区土壤侵蚀对土地生产力影响试验研究[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2009, 39(10): 1397-1412.
- WANG Z Q, LIU B Y, WANG X Y, et al. Erosion effect on the productivity of black soil in Northeast China[J]. Science in China (Series D: Earth Sciences), 2009, 39(10): 1397-1412.
- [30] 刘慧, 魏永霞. 黑土区土壤侵蚀厚度对土地生产力的影响及其评价[J]. 农业工程学报, 2014, 30(20): 288-296.
- LIU H, WEI Y X. Influence of soil erosion thickness on soil productivity of black soil and its evaluation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(20): 288-296.
- [31] 冯志珍. 东北薄层黑土区土壤侵蚀—沉积对土壤性质和玉米产量的影响研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- FENG Z Z. Impacts of soil erosion and deposition on soil properties and corn yield in the thin layer black soil region[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2018.