

不同施肥处理对碱性设施土壤酸化的影响^①王媛华^{1,2}, 段增强^{1*}, 汤英^{1,2}, 薛鹤^{1,2}, 闫秋艳^{1,2}, 李汛¹

(1 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为深入了解设施栽培中几种常见的施肥处理对碱性土壤酸化的影响, 开展了长期定点试验。三茬试验结束后, 各处理 pHw(去二氧化碳水浸提测定)、pHCa(0.01 mol/L CaCl₂ 浸提测定)均显著降低, 土壤发生酸化。U(底肥为尿素、过磷酸钙和硫酸钾, 追肥为尿素)与 CF(底肥为硝基复合肥(15-15-15)、尿素和硫酸钾, 追肥为尿素)处理(两处理施入氮磷钾量相等)氮吸收量与超量阳离子吸收量总体无差异, 使得 U 与 CF 处理两者间的 pH(pHw 与 pHCa)总体无差异。有机肥添加可促进作物氮与超量阳离子吸收, 使得 10~20 cm 土壤 pH 下降幅度显著增大, 加强土壤酸化。由于土壤为碱性, 酸化有助于改良土壤, 目前无需采取措施抑制土壤酸化。

关键词: 施肥; 设施土壤; 酸化; pH; 超量阳离子

中图分类号: S-3; S153; S156

设施栽培极大地增加了农民的收入, 现已成为我国许多地区的支柱产业。不同地区的菜农因为土地所有权不同、种植经验差别, 也为了追求短期或长久的最大经济效益, 养成了不同的施肥习惯^[1-3], 但均存在过量施肥的现象, 使土壤出现不同程度的酸化与次生盐渍化现象^[1,3-6], 不仅制约了设施农业的可持续发展, 也对农产品安全和生态环境造成了不利的影响^[7]。为深入了解设施栽培中几种常见的施肥方式对碱性土壤酸化的影响, 在江苏省苏州市太仓陆渡镇现代农业示范园一试验基地开展了长期定点试验, 监测土壤的 pH 变化, 观测作物的生长以及对各种元素的吸收状况, 为制定合理的肥料管理措施、准确进行酸化预测和有效治理提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

2012 年 9 月, 于苏州太仓市陆渡镇现代农业示范园区内选取一闲置的八连栋大型塑料大棚作为试验基地, 开展长期定点试验, 监测土壤的酸化发展过程。棚内土壤为渗育型水稻土, 基本理化性质见表 1。该大棚建造于 2007 年, 先后用于花卉和蔬菜种植, 大棚坐北朝南, 南北总长 40 m, 东西总长 64 m, 单栋棚宽 8 m, 高 5 m, 常年覆膜, 棚顶两侧可卷起透气通风。棚内可覆二层膜, 膜高 4.5 m。地面上有钢管搭建的小拱棚, 宽 4 m, 高约 1.8 m, 可在严冬加盖三层膜保温。

表 1 耕层土壤基本理化性质
Table 1 Basic properties of the surface soil

pH	EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	有机质 (g/kg)	全氮 (g/kg)	水解性氮 (g/kg)	速效磷 (g/kg)	速效钾 (g/kg)
7.94	472.67	22.99	1.44	0.06	0.04	0.10

1.2 试验设置

棚内开展不同施肥处理对土壤酸化过程的影响试验, 小区宽 1.5 m, 长 16 m, 处理设置见表 2, 每处理 3 个重复, 随机排列。过磷酸钙、硫酸钾、硝基复合肥(15-15-15)、商品有机肥作基肥一次性施入, U

处理(底肥为尿素、过磷酸钙和硫酸钾, 追肥为尿素)与 U+OF 处理(OF 为有机肥)中尿素 40% 基施, 剩余 60% 分 3 次追施, 每次 20%。CF 处理(底肥为硝基复合肥(15-15-15)、尿素和硫酸钾, 追肥为尿素)与 CF+OF 处理中尿素追施量及次数均与 U 和 U+OF 处

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2014BAD14B04)资助。

* 通讯作者(zqduan@issas.ac.cn)

作者简介: 王媛华(1986—), 女, 湖北荆州人, 博士研究生, 主要从事温室土壤的酸化与次生盐渍化研究。E-mail: ahwang@issas.ac.cn

表 2 各处理的施肥设置(kg/(hm²·a))
Table 2 Application rate of all kinds of fertilizers in each treatment

处理	尿素	过磷酸钙	硫酸钾	复合肥	有机肥	
					2012	2013
CK	—	1 025	660	—	—	—
U	900	1 025	660	—	—	—
CF	634	—	413	821	—	—
CK+OF	—	1 025	660	—	33 345	16 680
U+OF	900	1 025	660	—	33 345	16 680
CF+OF	634	—	413	821	33 345	16 680

理相同, 剩余尿素基施, 4 个处理施入总化肥氮磷钾量相等。作物进行常规管理, 滴灌带进行灌溉, 灌溉水为河水, 轮茬顺序为青椒(2012 年 9 月—2013 年 5 月)—玉米(2013 年 6 月—2013 年 8 月)—青椒(2013 年 8 月—2014 年 5 月), 其中玉米为填闲作物, 免耕且不施肥。

1.3 样品采集

记录整个生长期的辣椒产量, 在盛果期, 每区随

机采摘 10 个相同生长部位的辣椒作为果实代表样; 在辣椒收获结束与玉米生长结束时, 每区随机挑选 3 株植株, 采集辣椒植株样、玉米果实与玉米秸秆样品; 植株与果实样品采回后, 洗净, 105℃下杀青 30 min, 60℃下烘干后粉碎保存。

采集植株样品的同时, 在每个小区取 3 钻土, 分 3 层(0~5、5~10、10~20 cm)保存, 土壤经除杂、风干, 过 1 mm 筛保存。

表 3 各处理中引入的可溶性盐元素含量(kg/(hm²·a))及铵态氮和酰胺态氮硝化对质子的最大贡献量
Table 3 Element contents of soluble salts and the utmost content of protons derived from ammonium and amide N nitrification in each treatment

元素	CK	U	CF	OF	
				2012	2013
酰胺态氮	0	414	291.4	0	0
NO ₃ -N	0	0	51.2	47.7	23.8
NH ₄ ⁺ -N	0	0	72	27.3	13.6
P	42.6	42.6	39.4	5.7	2.7
K	278.7	278.7	261.7	112.6	56.4
S	174.4	174.45	261.8	14.1	7.0
Ca	118.2	118.2	3.4	20.8	10.3
Na	1.8	1.8	1.5	18.3	9.1
Mg	7.4	7.4	5.1	28.5	14.2
H ⁺ _{max} (N) (kmol/hm ²)	0	29.6	31.0	3.9	2.0

注: H⁺_{max}(N): 铵态氮和酰胺态氮硝化对质子的最大贡献量。

1.4 样品的分析项目

植物样品用硫酸消煮后^[8]上 ICP 测定 N、P、K、Na、Ca、Mg 的元素含量, 用硝酸消煮后上 ICP 测定 S 元素含量。超量阳离子量^[9](kmol) = (K⁺ + Ca⁺_{0.5} + Mg⁺_{0.5} + Na⁺) - (H₂PO₄⁻ + SO_{4(0.5)}⁻ + Cl⁻), 每公顷的超量阳离子量为单株植株与果实体内的超量阳离子量总和与每公顷的株数乘积, 辣椒按每公顷 45 000 株计算, 玉米按每公顷 60 000 株计算。

pH 用 pHs-3C 型酸度计测定, 液土质量比为 5:1, 当浸提剂为去二氧化碳去离子水且振荡时间为 5 min 时, 测定值记为 pHw; 浸提剂为 0.01 mol/l CaCl₂ 且振荡时间为 1 h 时, 测定值记为 pHCa; Δ pH = pH0 -

pH, 即 Δ pH 为试验开始前的土壤 pH(pH0)与第三茬结束后的土壤 pH(pH)之差。

1.5 数据分析

数据采用 SPSS 19.0、Excel 2003 进行统计分析作图, 单因素多重比较用 Duncan 法(P<0.05), 双因素多重比较用 S-N-K 法(P<0.05)。

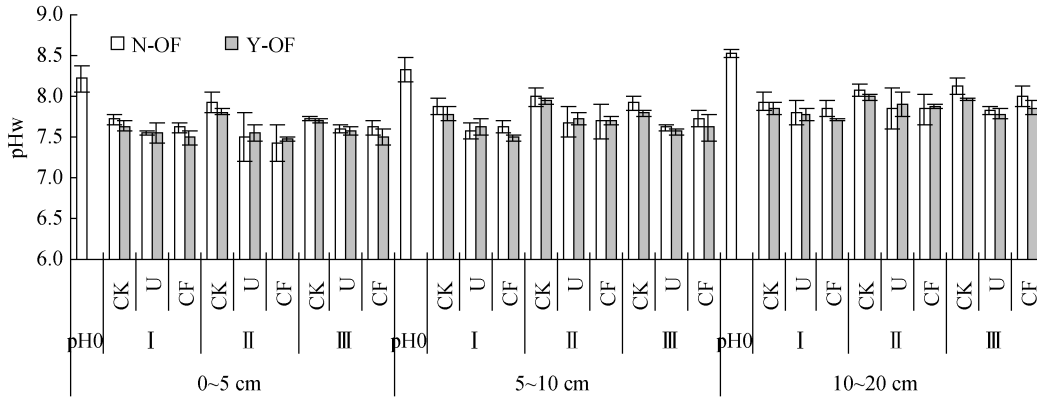
2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对土壤 pH 的影响

在 0~20 cm 土层范围内, 三茬作物 CK 处理的 pHw 最高; U 与 CF 处理对 pHw 的影响仅在第三茬 10~20 cm 土层范围内显著, 且 U 处理低于 CF 处理;

有机肥添加对 pHw 无影响(图 1);有机肥与氮肥形态间没有交互作用。三茬试验结束后,各处理各层次 pHw 均显著降低。0~20 cm,CK 处理的 pHw 最小;

0~10 cm, U 与 CF 处理间无差异,有机肥添加无影响;10~20 cm, U 处理 pHw 显著大于 CF 处理,有机肥添加使 pHw 下降幅度显著增大(表 4)。



(N-OF, 未添加有机肥; Y-OF, 添加有机肥; pH0, 第一茬试验开始前的土壤 pH; I, 第一茬(青椒); II, 第二茬(玉米); III, 第三茬(青椒); 图中误差线为标准差, 下图同)

图 1 不同施肥处理对土壤 pHw 的影响

Fig. 1 The effect of different fertilizer treatments on the pHw of the soil

表 4 试验前后 pH 的变化幅度

Table 4 The changes of soil pH for different treatments before and after the field testing

土层 (cm)	处理	ΔpHw		pHCa	
		N-OF	Y-OF	N-OF	Y-OF
0~5	CK	0.65(0.17)	0.67(0.15)	0.06(0.11)	0.13(0.01)
	U	0.78(0.21)	0.80(0.21)	0.17(0.14)	0.23(0.14)
	CF	0.76(0.25)	0.87(0.24)	0.18(0.10)	0.25(0.09)
5~10	CK	0.55(0.09)	0.67(0.13)	0.07(0.16)	0.18(0.03)
	U	0.85(0.12)	0.90(0.13)	0.13(0.05)	0.27(0.07)
	CF	0.74(0.03)	0.85(0.12)	0.22(0.07)	0.32(0.10)
10~20	CK	0.40(0.09)	0.56(0.05)	0.08(0.18)	0.26(0.07)
	U	0.70(0.10)	0.74(0.11)	0.12(0.06)	0.30(0.09)
	CF	0.52(0.08)	0.67(0.05)	0.18(0.04)	0.30(0.06)

注: N-OF, 未添加有机肥; Y-OF, 添加有机肥; 表中括号内数据为标准差。

0~20 cm 土层范围内,CK 处理的 pHCa 值仅在第二茬 (0~5 cm)、第一和第三茬 (5~10 cm)时显著高于 U 与 CF 处理, U 与 CF 处理无差异,有机肥添加可使第一和第三茬的 pHCa 值显著降低 (图 2),有

机肥与氮肥形态间没有交互作用。三茬试验结束后,各处理各层次土壤的 pHCa 值均有下降。U 与 CF 处理的 pHCa 无差异,有机肥添加可使 5~20 cm 层 pHCa 下降幅度增大(表 4)。

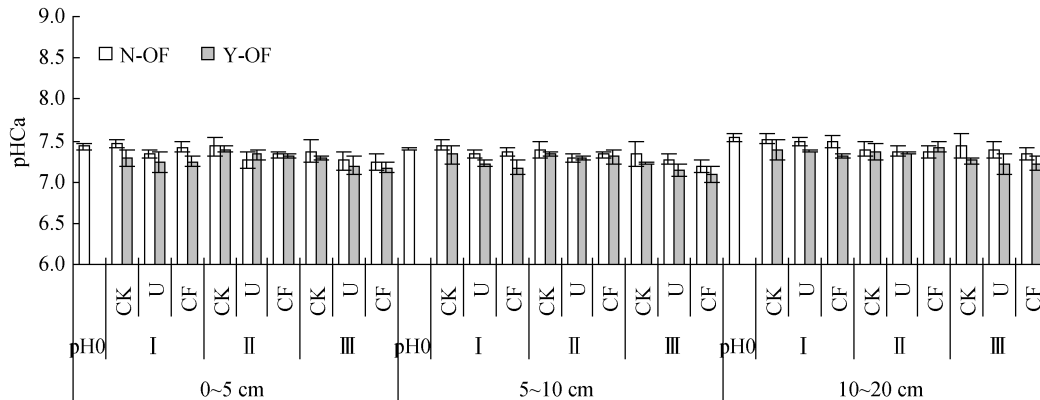


图 2 不同施肥处理对土壤 pHCa 的影响

Fig. 2 The effect of different fertilizer treatments on the pHCa of the soil

2.2 不同施肥处理对作物吸氮量的影响

不同施肥处理对作物吸氮量的影响见图 3, 第一茬, CK 处理氮吸收量最低, U 与 CF 处理间无差异, 有机肥添加无影响; 第二茬, 处理间无差异; 第三茬, CK 处理

氮吸收量最低, U 处理的氮吸收量显著高于 CF 处理, 有机肥添加使氮吸收量显著增加; 三茬试验中氮的总吸收量, CK 处理最低, U 与 CF 之间无差异, 有机肥添加使氮吸收量显著增加, 有机肥与氮肥形态间没有交互作用。

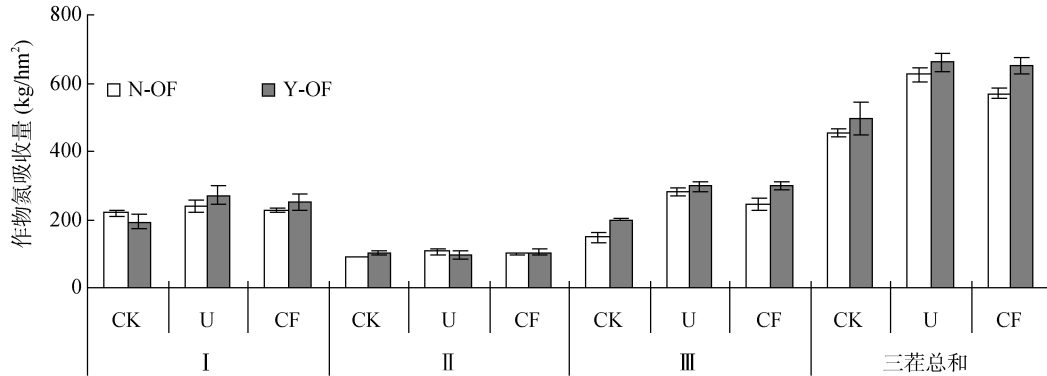


图 3 不同施肥处理对作物吸氮量的影响

Fig. 3 The effect of different fertilizer treatments on the amount of nitrogen absorbed by crops

2.3 不同施肥处理对作物超量阳离子吸收量的影响

图 4 为不同施肥处理对作物超量阳离子吸收量的影响, 从图中可知, 第一茬, U 与 CF 处理间无差异, 有机肥添加使超量阳离子吸收量显著增加; 第二茬, CK 处理超量阳离子吸收量最低, U 处理超量阳

离子吸收量显著高于 CF 处理, 有机肥添加使超量阳离子吸收量显著降低; 第三茬, CK 处理超量阳离子吸收量最低, 但 U 与 CF 处理间无差异, 有机肥添加使超量阳离子吸收量显著增多, 有机肥与氮肥形态间没有交互作用。三茬总和结果与第三茬结果相同。

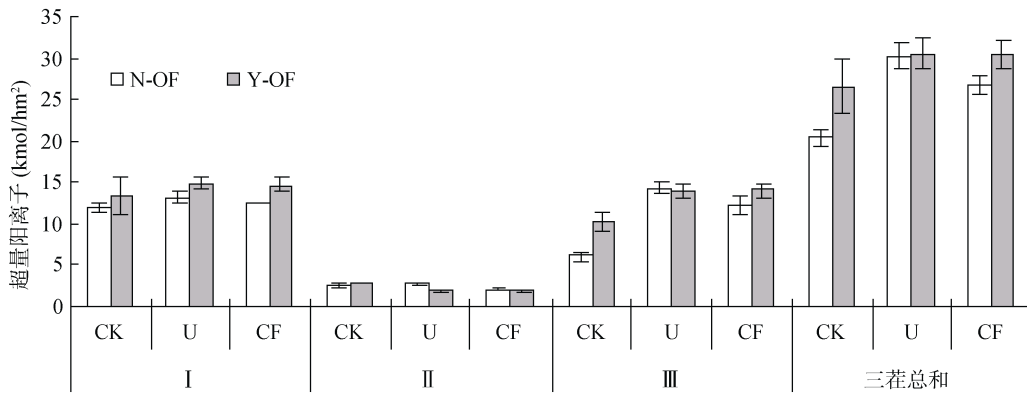


图 4 不同施肥处理对超量阳离子吸收量的影响

Fig. 4 The effect of different fertilizer treatments on the amount of excess cations absorbed by crops

3 讨论

在设施蔬菜的生产过程中, 菜农的施肥管理总体分为两类: 一是只施化肥。这一类多见于租用他人或政府的土地进行蔬菜生产, 为尽快获得最大效益, 减少人工投入, 只施用化学肥料(信息来源于实地考察); 二是化肥与有机肥结合施用。这一类多见于用自家分配的土地进行蔬菜生产, 为了长远利益, 不惜加大投入, 施用大量的有机肥, 同时也为了获得当前的最大收益, 不减少化肥施用量^[1-3]。不同施肥处理对土壤的酸化影响应有不同, 其主要通过以下几个方

面影响土壤酸化: 肥料本身的致酸效果不同^[9]。酰胺态氮和铵态氮肥, 在硝化的过程中会生成大量的质子, 而硝态氮肥则不会引入质子。尿素在初始水解的过程中, 还会释放大量的 OH^- , 从而使土壤暂时碱化^[9]。本研究中 U 与 CF 处理因为引入的氮形态存在差异, 其可引入的最大质子量表现为 CF 处理略高于 U 处理。过磷酸钙肥料为混合物, 含有少量的游离酸, 其酸化效果要强于复合肥中的磷, 本研究中第三茬(10~20 cm)U 处理的 pH 低于 CF 处理可能与此有关。有机物为酸碱缓冲物质, 可使土壤趋于中性, 本研究中土壤为碱性, 所以有机肥的添加可使土壤

pH 下降幅度增大(图 1、图 2、表 4),这与张永春等^[10]的研究结论一致。也有研究表明,施用有机肥可提高碱性土壤的 pH,抑制酸化^[11],这应与不同有机肥的制备工艺及添加物质有关。不同的肥料处理向土壤引入的盐分数量不同(表 3)^[10-12],引入的可溶性盐越多,EC 越高,pHw 越低^[13-14]。对作物氮吸收量影响不同。氮吸收对酸化的影响取决于氮肥的形态^[9]。尿素分子中的氮不论其以何种形态的氮被吸收,植物吸收一个尿素分子中的氮,土壤中质子净增长量为零,氮吸收量越大,致酸效应越弱;植物吸收一个硝态氮,土壤中质子净增长量为 -1,因此硝态氮肥吸收量越大,碱化效应越强;铵根离子中的氮不论其以何种形态被吸收,植物每吸收一个氮土壤中质子净增长量为 1,则铵态氮肥吸收量越大,酸化效应越强。有机肥中的有机氮不论其以何种形态被吸收,土壤中质子净增长量也为零,氮吸收量越大,致酸效应越弱。一个处理中通常含有几种类型的氮,如本研究中的 CF 处理就添加有 3 种形态的氮(表 3:酰胺态、铵态、硝态),氮吸收对酸化的贡献取决于作物体内两种来源氮(即铵态氮与硝态氮)含量之差,因此本研究中无法单独根据氮吸收量的大小来判断不同施肥处理对土壤酸化的影响。对作物超量阳离子吸收量影响不同。由于作物主动吸收阳离子时分泌质子^[9,15],吸收阴离子时分泌 OH⁻,而植物总是吸收阳离子更多,阴阳离子吸收量差值越大,则对酸化贡献越大。超量阳离子为非氮无机阴阳离子之差,其值越大,对土壤酸化贡献越大^[5,9]。增加肥料中的硝态氮含量可以促进阳离子的吸收,抑制非氮阴离子的吸收,从而使超量阳离子吸收量增大^[16]。但在本研究中,尽管 CF 处理相比 U 处理含有更多的硝态氮,两者超量阳离子吸收量没有差异。而 U 与 CF 处理引入的元素在硫和钙上也存在较大差异(表 3),但作物吸收硫很少,土壤本底含有大量的活性钙也削弱了钙添加量差异带来的影响,使得两处理的超量阳离子吸收量无差异。有机肥的添加可使超量阳离子吸收量增加,这可能与有机肥引入了大量的阳离子尤其是钾有关,并且阳离子与有机物结合,其有效性更高。本研究中有机肥添加可使 pH 显著降低(图 1、图 2、表 4)应与超量阳离子吸收量显著增大有关(图 4)。

不同肥料处理对土壤酸化的影响还应与酸化评价指标和采样时间有关。以 pHCa 为酸化评价指标观测到的酸化强度要比 pHw 弱,这是因为 pHCa 在测定的过程中受土壤可溶性盐含量影响较小^[13-14],而在肥料施到土壤中后,土壤的可溶性盐含量会因灌溉、作物吸收、蒸发等原因发生波动,影响 pHw 的

测定,从而对酸化评价产生影响。肥料施到土壤中后,在不同的时间采样观测到的 pH 变化也应不同。如尿素施到土壤中后初期水解会使土壤 pH 升高,此后氮的硝化过程和作物吸收过程会使 pH 下降,而每一次追施尿素又会使土壤 pH 暂时升高。在作物物生长期间,土壤温度、湿度的变化会对氮挥发、硝化、作物养分吸收等过程产生影响,从而影响土壤的 pH。因此,不同肥料处理对土壤 pH 的影响是一个复杂的综合反应,本研究的结论仅基于每茬作物结束后的数据而来。

由于本研究中的研究对象为碱性土壤,pH 下降有助于改良土壤,可使土壤中养分活性增强,促进作物生长,因此不论各种施肥处理对土壤酸化影响如何,均无需采取措施抑制酸化。

4 结论

1) 三茬试验结束后,各处理 pHw、pHCa 均显著降低。pHw 的变化幅度显著高于 pHCa,不同施肥处理对 pHw 的影响大于对 pHCa 的影响。共同表现为 U 与 CF 处理总体无差异,有机肥添加可使 10~20 cm 土壤 pH 下降幅度增大。

2) 三茬试验中 CK 处理的氮与超量阳离子的总吸收量均为最低,U 与 CF 之间无差异,有机肥添加使氮与超量阳离子吸收总量显著增加。

3) 尽管 U 与 CF 处理引入的氮形态与盐分含量有所差异,但二者对土壤酸化的影响差异不显著。有机肥的添加可使 10~20 cm 土壤的酸化加强,但这种酸化对碱性土壤而言是一个有益的过程,无需采取措施抑制。

参考文献:

- [1] 范庆锋,张玉龙,陈重.保护地蔬菜栽培对土壤盐分积累及 pH 值的影响[J].水土保持学报,2009,23(1):103-106
- [2] 吴春蕾,马友华,于红梅,等.不同施肥处理对巢湖流域番茄产量和蔬菜地硝态氮含量的影响[J].中国农学通报,2010,26(23):208-213
- [3] 李廷轩,张锡洲.设施栽培条件下土壤质量演变及调控[M].北京:科学出版社,2011:38-91
- [4] Shi W M, Yao J, Yan F. Vegetable cultivation under greenhouse conditions leads to rapid accumulation of nutrients, acidification and salinity of soils and groundwater contamination in South-Eastern China[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2009, 83: 73-84
- [5] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands [J]. Science, 2010, 327: 1 008-1 010

- [6] 黄绍文, 王玉军, 金继运, 等. 我国主要菜区土壤盐分、酸碱性和肥力状况[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(4): 906–918
- [7] Shen W S, Lin X G, Shi W M, et al. Higher rates of nitrogen fertilization decrease soil enzyme activities, microbial functional diversity and nitrification capacity in a Chinese polytunnel greenhouse vegetable land[J]. Plant and Soil, 2010, 337: 137–150
- [8] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978: 375–376
- [9] Rengel Z. Hand book of soil acidity[M]. New York: Marcel Dekker, Inc, 2003: 42–94
- [10] 张永春, 汪吉东, 沈明星, 等. 长期不同施肥对太湖地区典型土壤酸化的影响[J]. 土壤学报, 2010, 47(3): 465–472
- [11] 肖辉, 潘洁, 程文娟, 等. 不同有机肥对设施土壤全盐累积与 pH 值变化的影响[J]. 中国农学通报, 2014, 30(2): 248–252
- [12] 张锡洲, 王永东, 余海英, 等. 不同形态氮肥对设施土壤盐分含量和离子组成的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(5): 16–20
- [13] 王媛华, 段增强, 董金龙, 等. 可溶性盐对土壤 pH 测定的影响及消除初探[J]. 土壤学报, 2014, 51(6): 1 298–1 308
- [14] 王媛华, 段增强, 董金龙, 等. 温室土壤酸化评估的不同 pH 测定方法比较研究[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(11): 2 164–2 170
- [15] 王兴祥, 李清曼, 曹慧, 等. 关于植物对红壤的酸化作用及其致酸机理[J]. 土壤通报, 2004, 35(1): 73–77
- [16] Kirkby E A, Knight A H. Influence of the level of nitrate nutrition on ion uptake and assimilation, organic acid accumulation, and cation-anion balance in whole tomato plants[J]. Plant Physiology, 1977, 60: 349–353

Effects of Different Fertilizations on Acidification of A Greenhouse Alkaline Soil

WANG Aihua^{1,2}, DUAN Zengqiang^{1*}, TANG Ying^{1,2}, XUE He^{1,2}, YAN Qiuyan^{1,2}, LI Xun¹

(1 *Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;*

2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

Abstract: To get insights into the effects of some common fertilization treatments on acidification of an alkaline soil in greenhouse system, long-term fixed-plot experiments were conducted. The pH_w (determining in suspension of soil in water without CO₂) and pH_{Ca} (determining in 0.01 mol/l CaCl₂) of all the treatments decreased significantly after three consecutive crops, indicating that fertilizations caused soil acidification. There were no differences in the amounts of nitrogen and excess cations absorbed by crops between the U (urea, single superphosphate and potassium sulfate were used as base fertilizer, and urea was also used as topdressing) and CF (nitro-compound fertilizer, urea and potassium sulfate were used as base fertilizer, and urea was also used as topdressing) treatments. The same amount of nitrogen was applied for the two treatments. Therefore, there are no differences in soil pH values between U and CF treatments. Application of organic fertilizer increased the total amounts of nitrogen and excess cations absorbed by crops, leading to the significant decrease in soil pH of 10–20 cm layer. Hence, the organic fertilizer promoted the acidification of the alkaline soil. However, the acidification of alkaline soils is beneficial to crop growth and its negative effects can be ignored.

Key words: Fertilization; Greenhouse soil; Acidification; pH; Excess cation