

柠檬酸对温室土壤磷有效性的影响

房福力¹, 姚志鹏¹, 林伟¹, 李玉中^{1,2*}, 徐春英¹, 李巧珍¹

(1.中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所 农业部旱地节水农业重点实验室, 北京 100081; 2.中国农业科学院环境稳定同位素实验室, 北京 100081)

摘要:温室菜地土壤面临磷肥大量投入, 磷肥有效性低下等问题, 为提高土壤中磷素的有效性, 减少磷肥施用, 亟待开展相关研究。以番茄为供试对象, 研究温室番茄地施用柠檬酸对土壤有效磷时空变化及番茄产量的影响, 试验设置磷肥和柠檬酸 2 个因素 4 个水平, 采用完全随机设计, 分别为: 0(CA0)、0.42(CA1)、0.84(CA2)、1.26(CA3) kg·hm⁻² 和 0(P0)、96(P1)、168(P2)、240(P3) kg·hm⁻²。结果表明: 与对照相比, 施加柠檬酸后土壤 pH 极显著降低 ($P < 0.01$), CA3P0 处理使土壤 pH 降低了 0.62; 不施加磷肥时, 柠檬酸促进土壤磷素的释放, 提高了土壤有效磷的含量; 施加磷肥后, 柠檬酸和磷肥交互作用可以显著提高表层 0~20 cm 土壤有效磷含量, 但是过多施用柠檬酸和磷肥 CA3P3 处理使表层 0~20 cm 土壤有效磷含量降低, 使 20~40 cm 土壤有效磷含量增加, 并提高有效磷向下运移的可能性。合适的柠檬酸和磷肥配比 CA2P2 既可以获得较高番茄产量 6.02 t·hm⁻², 又可以减少 30% 的磷肥施用量, 同时降低磷素向深层运移的风险。

关键词: 温室; 番茄; 有效磷; 柠檬酸; 磷肥

中图分类号: S153.6 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2015)06-1166-08 doi:10.11654/jaes.2015.06.021

Effects of Citric Acid on Phosphorus Availability for Soil in Greenhouse Field

FANG Fu-li¹, YAO Zhi-peng¹, LIN Wei¹, LI Yu-zhong^{1,2*}, XU Chun-ying¹, LI Qiao-zhen¹

(1. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, CAAS, Beijing 100081, China; 2. Environmental Stable Isotope Lab, CAAS, Beijing 100081, China)

Abstract: The utilization efficiency of phosphorus fertilizers in vegetable production under greenhouse condition is low in spite of its excessive use. Thus, it need to improve the availability of phosphorus and consequently reduce its application rate. In this study, a greenhouse trial was conducted to reveal the effects of citric acid on soil available phosphorus and tomato yield. Four phosphate fertilizer application rates (0, 96, 168, 240 kg·hm⁻², denoted as P0, P1, P2, P3, respectively) and four citric acid levels (0, 0.42, 0.84, 1.26 kg·hm⁻², denoted as CA0, CA1, CA2, CA3, respectively) were arranged with the method of completely random design. The results showed that soil pH decreased significantly ($P < 0.01$) with the increment of citric acid addition level, and it decreased by 0.62 units for CA3P0 compared with CA0P0. Without the phosphate fertilization phosphorus release from the soil pool was enhanced in the top 0~20 cm soil after citric acid addition. However, as shown by treatment CA3P3, overuse of citric acid decreased the available phosphorus content in this soil layer, but increased the content in the 20~40 cm soil, which tend to leach to deep soil. The recommended application rates of citric acid and phosphate were 0.84 kg·hm⁻² (CA2) and 168 kg·hm⁻² (P2), respectively. This dosage not only produced a maximum tomato yield of 6.02 t·hm⁻², but also reduced phosphate application by 30% compared with P3, implying a lower environmental risk of phosphorus leaching to the deep soil.

Keywords: greenhouse; tomato; available phosphorus; citric acid; phosphate fertilizer

收稿日期: 2015-03-19

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2011BAD32B03); 国家自然科学基金项目(41301553); 中央级公益性科研院所基本业务费项目(BSRF201304)

作者简介: 房福力(1985—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为土壤养分循环。E-mail: fulifangfu@163.com

* 通信作者: 李玉中 E-mail: liyuzhong@caas.cn

磷是植物生长发育不可或缺的营养元素之一^[1],但是由于土壤胶体的吸附作用及磷本身迁移性弱和易被固定等特点,磷在土壤中的有效性比较低。植物可以分泌柠檬酸等低分子量有机酸促进土壤磷的释放^[2],但这种过程为耗能过程,且有机酸的产生量有限,因此外源添加柠檬酸则具有明显的研究价值。

在作物生产,尤其是温室蔬菜生产中,由于肥料投入量大和复种指数高,导致大量投入的磷肥超过植物生长需求,造成磷在土壤中累积^[3-4]。在华北平原,大部分土壤属于石灰性土壤,施入磷肥后,随着磷肥的溶解扩散,磷极易与阳离子发生络合反应,生成难溶性磷而被固定,导致磷肥有效性下降,当季利用率仅为 10%~25%^[5-7]。如何充分利用这些累积的土壤磷素,使其转换成可以供作物吸收利用的磷,减少磷肥的施用量已经引起了植物营养学家的关注。有研究表明,通过使用硫酸、磷酸等可降低土壤 pH 以提高磷的有效性^[8],但是这种方法耗材使用量巨大,成本昂贵,且功能单一,很难推广应用。柠檬酸对活化土壤磷素的研究已有一些报道,柠檬酸能够促进菜地土壤磷的释放^[9-10],提高土壤磷素的有效性^[11-22]和磷肥利用率,但以室内培养居多,应用在实际生产尤其是温室蔬菜生产中的研究很少。

本文以温室番茄土壤为研究对象,通过外源添加柠檬酸,对番茄生长期中土壤有效磷时空变化动态进行研究,目的是明确柠檬酸对土壤磷和磷肥的活化效用,为减少磷肥使用和提高番茄产量提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况与试验设计

试验于 2011 年 2 月 22 日至 7 月 3 日在北京市顺义区农科所综合实验基地进行。该地区属于温带半湿润大陆季风性气候,年均降雨和光照分别为 625 mm 和 2750 h。供试土壤为砂壤质冲积物潮褐土,土

壤的基础肥力状况如表 1 所示。

参照之前提供蔬菜施肥基准^[23],设置磷肥用量分别为 0(P0)、96(P1)、168(P2)、240(P3)kg·hm⁻² 4 个水平,采用完全随机试验设计。供试磷肥为磷酸二铵(Diammonium phosphate 简称为 P,含 P₂O₅ 46%,含 N18%,pH 为 8.0)。在不影响番茄生长的前提下,参照已测土壤柠檬酸含量(表 1),适当增加柠檬酸浓度。供试柠檬酸(Citric acid,简写 CA),用量分别为 0(CA0)、0.42(CA1)、0.84(CA2)、1.26(CA3)kg·hm⁻² 4 个水平,柠檬酸为工业级,易溶于水。共 16 个处理,每个处理重复 3 次。

番茄对磷肥需求量大,且生长和收获同时进行。根据这一特性,结合磷肥可移动性低的特点,为满足番茄生长的需要,以及降低磷肥与土壤接触面积的原则,磷肥采用少量多次方式,分为基肥和追肥,两者比例为 1:1,施用地点为番茄根际,基肥在种植时施入,追肥分四次施入,分别为 2011 年 4 月 25 日(始穗果)、5 月 12 日(二穗果)、5 月 29 日(三穗果)、6 月 12 日(四至五穗果)。每次施用肥料后立即灌溉,持续 2 d,灌溉方式为滴灌,每次灌溉量相同且为 10 t·hm⁻²(农户推荐量),并将柠檬酸按平均分为 4 次溶于水中。其他肥料和相应施肥量分别为:尿素,300 kg·hm⁻²,硫酸钾,150 kg·hm⁻²,有机肥(干基的全 N 含量 1.5%,P₂O₅ 含量为 25.3%,商业名称为“美施美”)。在 2011 年 2 月 22 日定植,7 月 3 日拉秧。每小区面积 20.7 m²(长 5.4 m,宽 3.8 m),番茄栽种的株距和行距分别为 40 cm 和 60 cm。其他管理措施按照农户传统方法进行。

1.2 样品的采集和处理

土样采样时间分别为追肥前一天及施肥后两天。采用土钻法 S 形采样,5 次重复。风干土壤研磨过 20 目筛,充分混匀后备用。

土壤 pH 测定采用梅特勒托利多 pH 计测定。

分批次摘取番茄果实,称重后累加计算总产量。

表 1 土壤背景值

Table 1 Basic conditions of soil fertility

土层深度 Soil depth/ cm	有机质 Organic matter/ g·kg ⁻¹	全氮 Total nitrogen/ g·kg ⁻¹	总磷 Total phosphorus/ g·kg ⁻¹	有效磷 Available phosphorus/ mg·kg ⁻¹	有效钾 Available potassium/mg·kg ⁻¹	pH 值 pH value	容重 Soil density/ kg·m ⁻³	粘粒 <2 μm Clay/%	柠檬酸含量 Concentration of citric acid/mg·kg ⁻¹
0~20	12.6	0.8	1.1	137.6	120.5	7.8	1.7	11.3	0.5
20~40	3.6	0.2	0.9	77.2	52.3	8.1	1.7	9.7	0.2
40~60	3.4	0.2	0.3	37.1	43.7	8.1	1.7	8.1	0.1
60~80	4.2	0.3	0.2	15.3	52.1	7.9	1.4	14.1	0.1
80~100	6.8	0.5	0.3	2.5	98.7	8.3	1.6	4.9	0.1

1.3 样品测定与分析

土壤有效磷测定采用 Olson 法, 用 Smartchem (Smartchem 200, USA) 间断性化学分析仪测定有效磷含量。

数据采用 SAS V8 进行方差分析, 用 LSD 法进行多重比较, 用 Microsoft Excel 2007 整理作图。

2 结果与分析

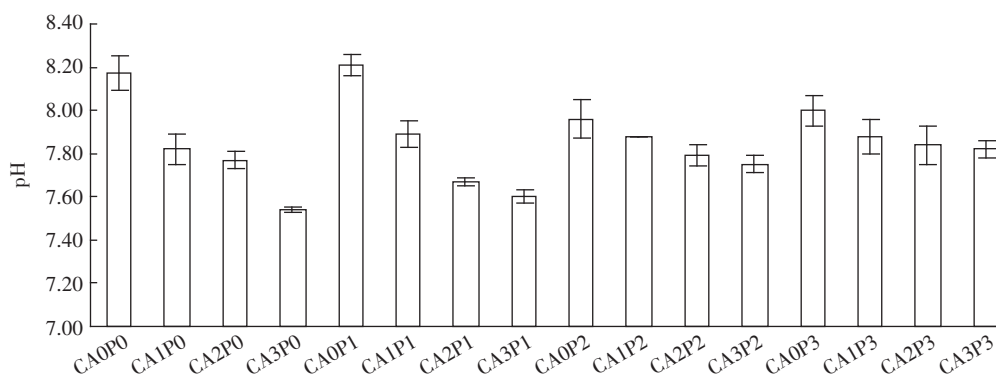
2.1 柠檬酸和磷肥对土壤 pH 的影响

收获后对温室 0~20 cm 土壤 pH 值分析结果见图 1, 柠檬酸显著降低了土壤 pH ($P<0.05$)。对比各处理发现, 对于同一施磷处理, 施加柠檬酸后温室番茄地土壤 0~20 cm 土层 pH 呈下降趋势, 且随着柠檬酸施用量的增加 pH 下降, 柠檬酸施用量与 pH 成反比, 最大下降 0.62 个单位; 对于同一柠檬酸处理, 施加磷肥(磷酸氢二铵, 水溶液呈微碱性, pH=8.0)后, 土壤 pH 变化不一致: CA0 和 CA1 处理, pH 随施肥量增加

先升高后下降, P2 和 P3 处理变化不大; CA2 处理, pH 随施肥量增加先降低后升高; CA3 处理, pH 随施肥量增加逐渐上升。但总体规律是磷肥施用量越大, pH 随柠檬酸施用量的增加下降的越少, pH 越趋近于 8.0。采用多因子方差分析可知, 磷肥和柠檬酸及其互作对 pH 都具有极显著影响 ($P<0.01$)。进一步进行磷肥各水平、柠檬酸各水平、磷肥与柠檬酸水平组合处理下 pH 平均数 LSD 多重比较发现, CA3P0 组合处理 pH 极显著低于其他组合 ($P<0.01$), 使土壤 pH 由 8.16 降低到 7.54, 降低了 0.62。

2.2 柠檬酸对土壤有效磷时间动态影响

从 2011 年 4 月 27 日施加柠檬酸处理开始, 研究不同柠檬酸施用量对番茄土壤 0~20 cm 土层中有效磷的影响, 结果如图 2 所示。不施磷时, 不施加柠檬酸 (CA0P0) 土壤有效磷含量随着时间延长而逐渐下降, 番茄生长消耗土壤中的磷, 土壤中有效磷含量呈逐渐下降趋势, 其间有不同程度的波动, 可能与温度和灌



CA0、CA1、CA2、CA3 分别为柠檬酸用量 0、0.42、0.84、1.26 kg·hm⁻²; P0、P1、P2、P3 分别为磷肥用量 0、96、168、240 kg·hm⁻²。下同

图 1 不同试验处理对的土壤 pH 的影响

Figure 1 Effects of different treatments on soil pH

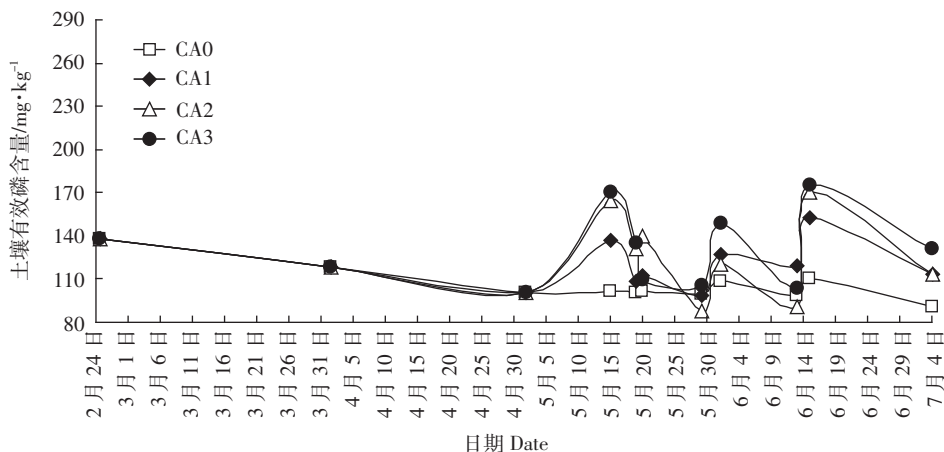


图 2 不同柠檬酸水平对不施磷处理土壤有效磷含量的影响

Figure 2 Effects of different levels of citric acid on available phosphorus content in soil without phosphate fertilizer during the whole season

溉有关;施加柠檬酸后,土壤有效磷含量较对照 CA0 处理显著增加($P<0.05$),CA1、CA2、CA3 处理与对照 CA0 相比,土壤有效磷含量分别增加了 6.58、11.49、13.88 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。不施磷时,土壤有效磷随着番茄生长被逐渐吸收利用或被固定,其含量逐渐下降,柠檬酸的施入抑制了土壤有效磷下降的趋势,增加了土壤有效磷的含量,说明柠檬酸能够活化土壤库中固定的磷,且活化程度与柠檬酸施用量成正比。这与梁玉英等^[9]和陆文龙等^[23]的研究结果相一致。

柠檬酸对番茄施肥后土壤有效磷的时间变化影响如图 3 所示。施加磷肥 P1 后,在不同柠檬酸处理下,0~20 cm 土层中有效磷含量随着时间的变化基本不大,变化幅度在 85~132 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,各个时期土壤有效磷含量差异不显著($P<0.05$),6 月 1 日和 6 月 14 日 CA3P1、CA2P1 和 CA1P1 处理土壤有效磷含量较 CA0P1 高,说明在这一时期柠檬酸提高了土壤有效磷含量;P2 水平下各土壤有效磷动态变化与 P1 基本相似,但是 CA3P2 处理在坐果后期(6 月 14 日)有效磷含量突然增加至 215 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;P3 处理土壤有效磷呈波浪状变化,前期(5 月 14 日)有效磷含量较 P1 和 P2 处理同期有效磷含量增加,可能与施肥量大有关,而后期(6 月 14 日)各柠檬酸水平下有效磷都有所增加,可能与磷肥施用量和番茄需求量之间的平衡及磷与土壤之间动态平衡有关,P3 处理超过了番茄生长后期对磷的需求,造成有效磷的累积。

综合以上结果发现,土壤有效磷含量随柠檬酸施用量的不同而呈现不同的变化规律,但总体上(除 CA3P3 外)是 CA3 对土壤有效磷含量的提高效果最明显,CA2 次之,CA1 和 CA0 最小。CA3P3 处理下有效磷大部分时间(除 7 月 1 日外)低于 CA2P3 和 CA1P3,但高于 CA0P3 处理,造成这种现象的原因有可能是过量的磷肥被柠檬酸溶解破坏了磷素的供需平衡和吸附解吸平衡,导致大量的磷素随灌溉向下层运移。温室菜地中由于大量施肥导致磷素累积,继续过量施用磷肥既造成资源的浪费,还有可能造成环境污染;施用柠檬酸既减少了磷肥的施用量,又可以活化土壤固定的磷,但是对下层土壤磷素的影响还需要进行有效磷剖面分布分析。

2.3 柠檬酸对土壤有效磷剖面分布的影响

图 4 显示不同磷肥和柠檬酸处理,番茄地土壤中的有效磷含量在收获后土壤中的剖面分布。结果表明,土壤有效磷含量随土壤深度增加依次递减,其含量在 0~20 cm 和 20~40 cm 之间差异达到了极显著水

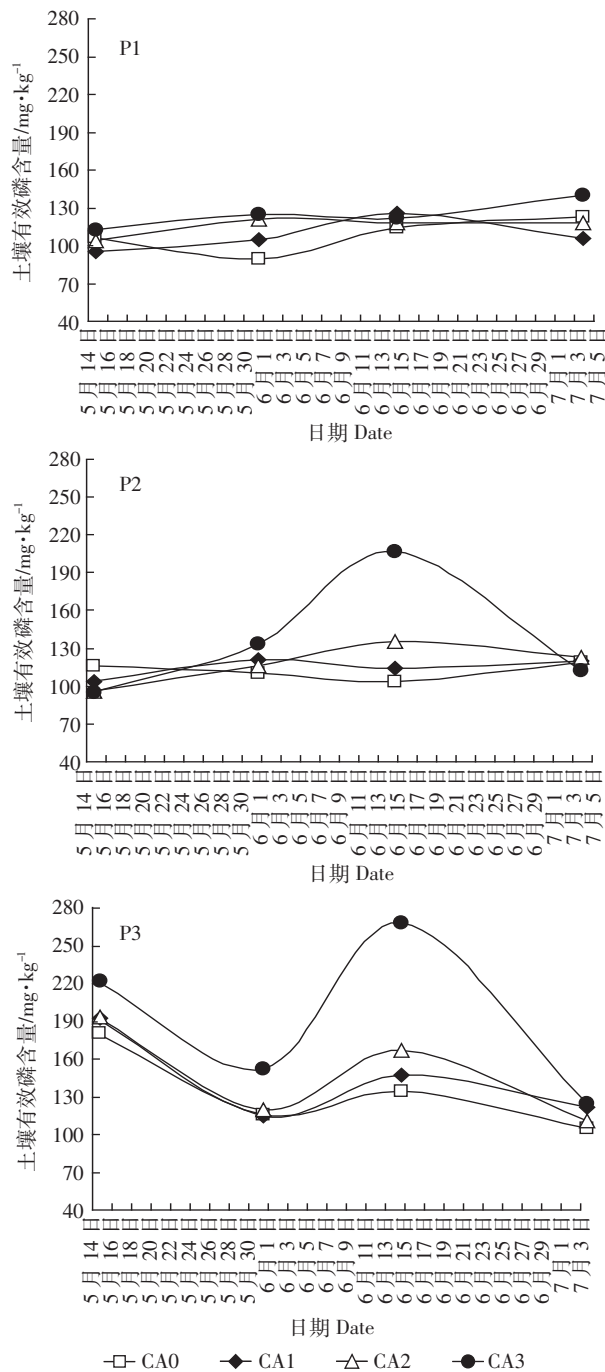


图 3 不同磷肥水平下柠檬酸对土壤有效磷
随时间变化的影响

Figure 3 Effects of different levels of citric acid on available phosphorus content in soil with different levels of phosphate fertilizer

平($P<0.01$)。土壤有效磷在表层富集,0~20 cm 土层有效磷含量占其在 0~100 cm 土层中的比例为 51%~60%;而 0~40 cm 土层有效磷占其在 0~100 cm 土层中的比例高达 91%~95%;40~100 cm 土壤有效磷含量很少,仅占 5%~9.03%。土壤有效磷在表层和亚表

层富集的现象有利于植物根系的吸收与利用。CA3P3 处理有效磷 40~60 cm 和 60~80 cm 土层无显著性差异,说明过量施肥和柠檬酸使土壤磷素有向下运移的趋势。过量施用磷肥(P3),柠檬酸溶解了磷肥并提高土壤中有效磷的含量,提高了磷的可移动性,柠檬酸施用量越大产生的效果越明显。

通过多因子方差分析可知,在收获后土壤表层 0~20 cm,单施磷肥或柠檬酸对土壤有效磷含量均无显著性影响,但其交互作用对土壤有效磷含量有显著

性影响($P<0.01$),其中 CA3P3 处理极显著($P<0.01$)低于其他处理(除 CA0P0 外),CA3P0、CA2P1、CA3P2 组合之间差异不显著但都显著($P<0.05$)高于其他组合,说明柠檬酸和磷肥配施可以极显著地增加土壤中有效磷的含量,但过多施用磷肥和柠檬酸反而降低土壤表层有效磷含量。

2.4 柠檬酸对番茄产量的影响

柠檬酸和磷肥配施增加了番茄产量(表 2)。不施加磷肥时,番茄产量与柠檬酸施用量成正比,CA3P0,

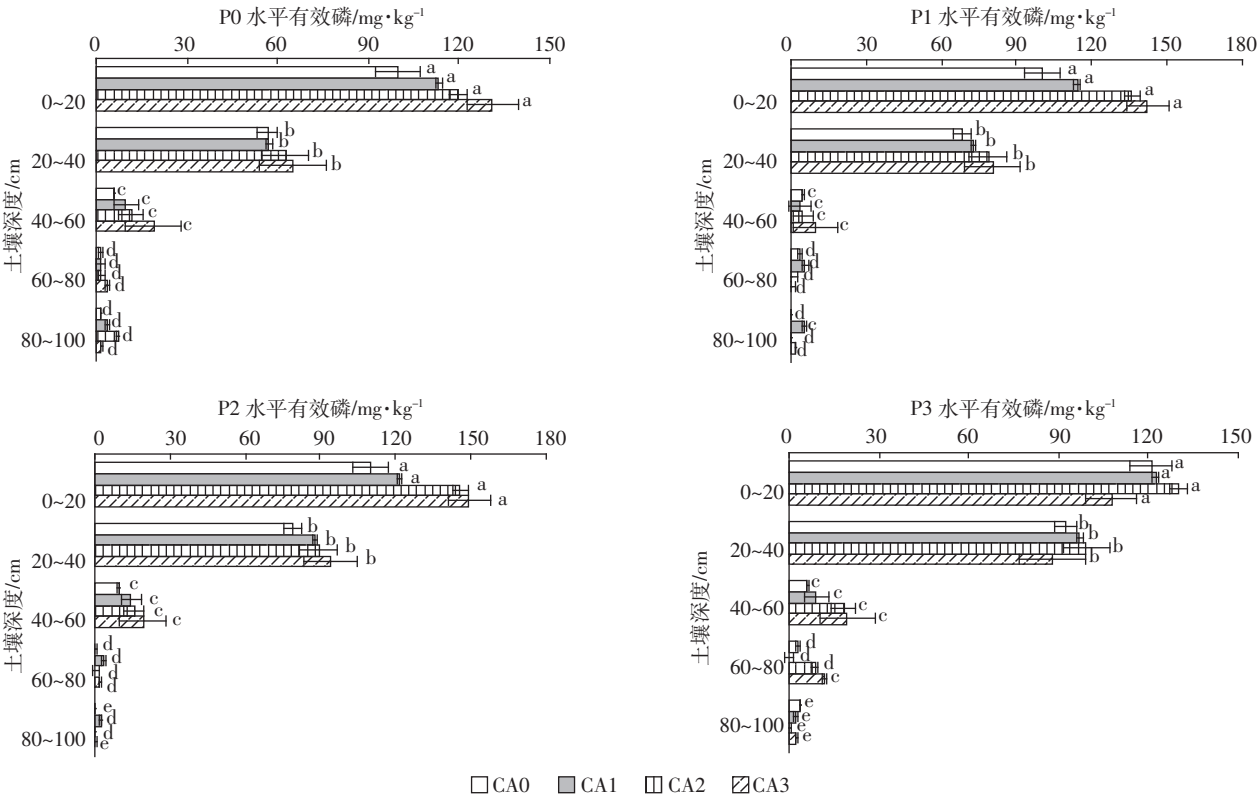


图 4 不同柠檬酸施用量对土壤有效磷空间动态影响
Figure 4 Spatial dynamics of available phosphorus on different levels of citric acid

表 2 磷肥和柠檬酸在番茄上的产量效应

Table 2 Yields response of tomato to phosphate fertilizer and citric acid

处理 Treatments	P0		P1		P2		P3	
	产量/t·hm ⁻² Yields	增产 %/ % Increased	产量/t·hm ⁻² Yields	增产 %/ % Increased	产量/t·hm ⁻² Yields	增产 %/ % Increased	产量/t·hm ⁻² Yields	增产 %/ % Increased
CA0	5.1cB	—	5.2cB	1	5.6bA	14	5.5bA	14
CA1	5.2cC	2	5.2cC	4	5.8abB	15	6.0aA	20
CA2	5.3bB	5	5.3bB	7	6.1aA	21	6.0aA	20
CA3	5.6aA	11	5.7aA	15	5.8abA	16	5.8aA	16

注: CA0、CA1、CA2、CA3 分别为柠檬酸用量 0、0.42、0.84、1.26 kg·hm⁻²; P0、P1、P2、P3 分别为磷肥用量 0、96、168、240 kg·hm⁻²。* 与 CA0P0 比较, LSD_{0.05}=1.08, n=48, 数字后字母表示差异达 0.05 水平; 小写字母表示列的差异显著性检验; 大写字母表示行的差异性显著性检验。
Note: *Indicates significant differences among treatments based on LSD test ($\alpha=0.05, n=48$) ($P<0.05$) compared with CA0P0; Values followed by the same lowercase letter in the columns do not significantly differ; Values followed by the same uppercase letter in the row do not significantly differ.

CA2P0 和 CA1P0 处理与 CA0P0 处理相比番茄产量增加分别为 2%、5%、11%;施加磷肥后,不同柠檬酸处理与 CA0P0 处理相比番茄产量增幅随磷肥施用量的增加逐渐增加,当产量增加到一定程度后(CA2P2 和 CA1P3),继续增加柠檬酸施用量,番茄产量不再上升。CA2P2 处理番茄产量最高,达到 $6.1 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,相比于 P3 处理,CA2P2 处理在增产的同时减少 30% 的磷肥施用量。

3 讨论

过量投入磷肥及高复种指数导致温室土壤磷素累积^[3-4],施加柠檬酸可以作为一种有效的措施,在没有施加磷肥的时候,提高了温室番茄生长过程中土壤有效磷的含量,提高了番茄的产量。柠檬酸和磷肥配施后,一方面活化了磷肥,提高了土壤有效磷的含量,另一方面降低了磷肥的施用量,减少了资源的浪费并增加了番茄的产量。

有机酸活化土壤磷的主要机理:①酸化土壤^[15,17,21],通过改变土壤 pH 提高土壤有效磷含量;②与土壤中钙、铁等金属离子发生络合作用,改变土壤胶体表面性质,减少磷酸根的吸附位点^[25];③与磷酸根相互竞争专性吸附^[25];④影响土壤磷的解吸,促进难溶性磷肥的溶解^[21,26]。

本试验结果表明,磷肥和柠檬酸及其互作对 pH 都具有极显著影响($P < 0.01$)。柠檬酸显著降低了土壤 0~20 cm 的 pH,证明了根系分泌有机酸降低土壤 pH 以活化土壤磷的观点,与杨绍琼等^[18]研究结果一致。柠檬酸对 pH 的影响程度随着磷肥的增加而减弱,有可能归于呈微碱性的磷酸氢二铵。pH 值的改变有可能会影响土壤的微生物活性^[27]。一般认为,pH 为 6.0~7.5 时适合番茄生长且对肥料的吸收利用最有效。从本实验中可以得出,施加柠檬酸后显著降低了土壤的 pH,尤其是 CA3 处理后降低 0.62 个 pH,使土壤 pH 接近 7.5,因此可以证明上述柠檬酸能够活化土壤磷的机理①是正确的。

研究表明,施加柠檬酸和磷肥处理与对照相比,有效磷含量明显提高,说明柠檬酸促进了磷肥的溶解,提高了有效磷含量^[28-29]。本实验中,对收获后不同处理下土壤有效磷含量进行方差分析得出,单施柠檬酸或磷肥都没有显著提高有效磷的含量,只有在柠檬酸和磷肥一起混施时才显著提高了土壤有效磷含量。磷肥施加到土壤中后会被土壤吸附,土壤中有效磷的含量会随着作物吸收和土壤吸附而降低,添加柠檬酸

后有可能与磷发生竞争专性吸附,导致土壤有效磷含量增加。柠檬酸有可能通过上述机理②③④的综合作用,提高土壤有效磷含量。本试验在华北平原的温室菜地中进行,土壤大多属于石灰性土壤,石灰性土壤中以碳酸钙盐为主,能够吸收磷,没有施加磷肥处理时,土壤有效磷随着柠檬酸的施加而增加,说明柠檬酸可以活化原先土壤库中所吸附或固定的磷,进一步证明机理④的合理性。

庞荣丽^[26]的研究表明,表层中阳离子含量比较多,柠檬酸含有阴离子,两者在表层中迅速结合,导致柠檬酸在土壤表层存留时间比较短,在亚表层中保存时间相对较长,从而对亚表层中吸附的磷素具有较强的释放能力。本试验中 20~40 cm 土壤有效磷在 P0、P1 和 P2 处理下都随着有机酸的增加而增加(图 4),证明了柠檬酸可以在亚表层中存留较长,但是在亚表层中活化的磷素如果不能被番茄及时吸收利用,则有可能逐渐累积甚至随水向下运移。

番茄产量随着柠檬酸使用量的增加而增加。庞荣丽^[26]研究表明,等量磷肥处理,施加外源柠檬酸能有效提高小麦株高,增加根重和生物总量。王庆仁等^[29]通过试验证明,施加柠檬酸与否对小麦产量有显著影响,合理配施磷肥和柠檬酸可以减少磷肥的土壤固定,提高磷肥有效性和利用率。本试验研究表明,当磷肥使用量增加至 $168 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (P2) 时,继续增加磷肥番茄产量不增反降,与贾可等^[30]、鲁剑巍等^[31]、姜宗庆等^[32]研究发现过量施磷会导致作物产量下降一致。本试验中磷肥施用量为 P2 和 P3 时,产量增加比率先增后减,在 CA2P2 处取得最大产量,且与 CA1P3 处理产量相差不大,但是比 CA1P3 处理减少了 30% 的磷肥施用量,说明柠檬酸既可以加强磷肥的产量效益,又可以降低磷肥的施用量,节约资源。

在使用柠檬酸时应该注意柠檬酸的施用量,一方面,柠檬酸对土壤磷活化的同时有可能导致土壤磷向深层土壤运移流失,另一方面也会增加不必要的成本。本试验在 CA3P3 处理中发现土壤 60~80 cm 有效磷含量有增加的趋势。综合以上结果,在同时施用柠檬酸 $0.84 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和磷肥 $168 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时可以增加土壤有效磷的含量,提高番茄产量。

4 结论

(1) 磷肥和柠檬酸及其互作对 pH 都具有极显著影响($P < 0.01$)。柠檬酸显著降低了土壤 0~20 cm 的 pH,CA3P0 处理降低了 0.62 个单位 pH。

(2)未施加磷肥时,促进磷的解吸,提高了土壤有效磷的含量。施加磷肥时,柠檬酸可以溶解磷肥,提高土壤有效磷含量。

(3)柠檬酸可以在亚表层(20~40 cm)中存留,提高亚表层中有效磷含量。

(4)柠檬酸和磷肥施用量分别为0.84、168 kg·hm⁻²时,既可以提高土壤有效磷含量,增加番茄产量,又可以减少30%的磷肥施用量,节约成本,合理施用磷肥和柠檬酸可以降低磷素向深层运移的风险。

参考文献:

- [1] 陆景陵. 植物营养学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2003.
LU Jing-ling. Plant nutrition[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2003.
- [2] 洪常青, 聂艳丽. 根系分泌物及其在植物营养中的作用[J]. 生态环境, 2003, 12(4): 508-511.
HONG Chang-qing, NIE Yan-li. Effects of root exudates on plant nutrition[J]. *Ecology and Environment*, 2003, 12(4): 508-511.
- [3] 刘建玲, 杜连凤, 廖文华, 等. 日光温室土壤次生盐渍化状况及有机肥腐熟度的影响[J]. 河北农业大学学报, 2005, 28(5): 16-19.
LIU Jian-ling, DU Lian-feng, LIAO Wen-hua, et al. The status of soil salt and effects of manure maturity on it in greenhouse secondary saline soil[J]. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 2005, 28(5): 16-19.
- [4] 刘建玲, 张福锁, 杨奋翮. 北方耕地和蔬菜保护地土壤磷素状况研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2000, 2(2): 179-186.
LIU Jian-ling, ZHANG Fu-suo, YANG Fen-he. Fractions of phosphorus in cultivated and vegetable soils in Northern China[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2000, 2(2): 179-186.
- [5] 鲁如坤, 时正元, 顾益初. 土壤积累态磷研究 II. 磷肥的表观积累利用率[J]. 土壤, 1995, 2(6): 286-289.
LU Ru-kun, SHI Zheng-yuan, GU Yi-chu. Research of soil phosphorus accumulation state II. Phosphorus apparent utilization rate of accumulation[J]. *Soil*, 1995, 2(6): 286-289.
- [6] 秦胜金, 刘景双, 王国平. 影响土壤磷有效性变化的作用机理[J]. 土壤通报, 2006, 37(5): 1012-1016.
QIN Sheng-jin, LIU Jing-shuang, WANG Guo-ping. Mechanism of phosphorous availability changing in soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37(5): 1012-1016.
- [7] 沈仁芳. 潮土无机磷的形态及其分布特点[J]. 河南农业科学, 1992(12): 24-25.
SHEN Ren-fang. Forms and distribution of inorganic phosphorus in fluvo-aquic soil[J]. *Agriculture Science of Henan*, 1992(12): 24-25.
- [8] 李学柱, 罗泽民, 何绍兰, 等. 石灰性紫色土改良措施对枳砧锦橙吸铁及生长的效果[J]. 中国农业科学, 1990, 23(4): 35-42.
LI Xue-zhu, LUO Ze-min, HE Shao-lan, et al. The effect of improving calcareous purple soil on growth and iron absorption of Jincheng orange[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 1990, 23(4): 35-42.
- [9] 梁玉英, 黄益宗, 孟凡乔, 等. 有机酸对菜地土壤磷素活化的影响[J]. 生态学报, 2005, 25(5): 1171-1178.
LIANG Yu-ying, HUANG Yi-zong, MENG Fan-Qiao, et al. Effect of organic acid on the activation of phosphorous in vegetable garden soil[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(5): 1171-1178.
- [10] 刘丽, 梁成华, 王琦, 等. 低分子量有机酸对土壤磷活化影响的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(3): 593-600.
LIU Li, LIANG Cheng-hua, WANG Qi, et al. Effects of low-molecular-weight organic acids on soil phosphorus release[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(3): 593-600.
- [11] 左继超, 苏小娟, 胡红青, 等. 磷-铅-柠檬酸在红壤胶体上相互作用机理初探[J]. 土壤学报, 2014, 51(1): 126-132.
ZUO Ji-chao, SU Xiao-juan, HU Hong-qing, et al. Preliminary research on mechanism of phosphorus, lead and citric acid interaction in red soil colloid[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(1): 126-132.
- [12] 胡红青, 李妍, 贺纪正. 土壤有机酸与磷素相互作用的研究[J]. 土壤通报, 2004, 35(2): 222-229.
HU Hong-qing, LI Yan, HE Ji-zheng. Interaction of organic acids and phosphorus in soils[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2004, 35(2): 222-229.
- [13] 左继超, 高婷婷, 苏晓娟, 等. 外源添加磷和有机酸模拟铅污染土壤钝化效果及产物的稳定性研究[J]. 环境科学, 2014, 35(10): 3874-3881.
ZUO Ji-chao, GAO Ting-ting, SU Xiao-juan, et al. Effect of phosphate and organic acid addition on passivation of simulated Pb contaminated soil and the stability of the product[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(10): 3874-3881.
- [14] Cunningham J E, Kuyack C. Production of citric and oxalic acids and solubilization of calcium phosphate by *Penicillium bilaii*[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1992, 58(5): 1451-1458.
- [15] Jones D L. Organic acids in the rhizosphere: A critical review[J]. *Plant and Soil*, 1988, 205(1): 25-44.
- [16] Strom L, Owen A G, Godbold D L, et al. Organic acid mediated P mobilization in the rhizosphere and uptake by maize roots[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34(5): 703-710.
- [17] Liu W, He Y, Zhang K, et al. Isolation, identification and characterization of a strain of phosphate-solubilizing bacteria from red soil[J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2012, 52(3): 326-333.
- [18] 杨绍琼, 党廷辉, 戚瑞生, 等. 低分子量有机酸对不同肥力土壤磷素的活化作用[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(4): 60-64.
YANG Shao-qiong, DANG Ting-hui, QI Rui-sheng, et al. Activation of organic acids on phosphorus of soil with different fertility[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2012, 30(4): 60-64.
- [19] 江长胜, 杨剑虹, 魏朝富, 等. 低分子量有机酸对紫色母岩中钾释放的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(4): 441-446.
JIANG Chang-sheng, YANG Jian-hong, WEI Chao-fu, et al. Effect of low-molecular-weight organic acids on potassium release from purple rocks[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, 8(4): 441-446.
- [20] 胡红青, 李学垣, 贺纪正. 有机酸对铝氧化物吸附磷的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2000, 6(1): 35-41.
HU Hong-qing, LI Xue-yuan, HE Ji-zheng. Effects of organic acids on phosphate adsorption by synthetic Al oxides[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2000, 6(1): 35-41.

- [21] 庞荣丽, 介晓磊, 谭金芳. 有机酸对合成磷源施入石灰性潮土后速效磷动态变化的影响[J]. 土壤肥料与科学, 2006(6):33-35.
PANG Rong-li, JIE Xiao-lei, TAN Jin-fang. Effect of organic acids on the dynamic of rapidly available phosphorus after phosphate was applied to calcareous alluvial soil[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2006(6):33-35.
- [22] 庞荣丽, 介晓磊, 方金豹, 等. 有机酸对石灰性潮土有机磷组分的影响[J]. 土壤, 2008, 40(4):566-570.
PANG Rong-li, JIE Xiao-lei, FANG Jin-bao, et al. Effects of organic acids on organic phosphorus fractions in calcareous soil[J]. *Soils*, 2008, 40(4):566-570.
- [23] 陆文龙, 张福锁, 曹一平, 等. 低分子量有机酸对石灰性土壤磷吸附动力学的影响[J]. 土壤学报, 1999, 36(2):189-197.
LU Wen-long, ZHANG Fu-suo, CAO Yi-ping, et al. Influence of low-molecular-weight organic acids on kinetics of phosphorus adsorption by soils[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1999, 36(2):189-197.
- [24] 王 恒. 设施蔬菜地富磷土壤磷淋溶特征及磷肥调控研究[D]. 青岛农业大学, 2009.
WANG Heng. Studies on characteristics of phosphorus leaching and phosphorus control in greenhouse vegetable soils with enriched phosphorus[D]. Qingdao Agriculture University, 2009.
- [25] Kirk G, Santos E E, Santos M B. Phosphate solubilization by organic anion excretion from rice growing in aerobic soil; Rates of excretion and decomposition, effects on rhizosphere pH and effects on phosphate solubility and uptake[J]. *New Phytologist*, 1999, 142(2):185-200.
- [26] 庞荣丽. 低分子量有机酸对石灰性潮土磷有效化影响的研究[D]. 河南农业大学, 2002.
PANG Rong-li. Studies on effect of low-molecular-weight organic acids on phosphorus availability in Calcareous Chao Soil[D]. Henan Agriculture University, 2002.
- [27] Zeng F R, Chen S, Wu F B, et al. Changes of organic acid exudation and rhizosphere pH in rice plants under chromium stress [J]. *Environmental Pollution*, 2007, 11(19):1-6.
- [28] 介晓磊, 李有田, 庞荣丽, 等. 低分子量有机酸对石灰性土壤磷素形态转化及有效性的影响[J]. 土壤通报, 2005, 36(6):42-46.
JIE Xiao-lei, LI You-tian, PANG Rong-li, et al. Effect of low-molecular-weight organic acids on transformation and availability of phosphates in calcareous soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2005, 36(6):42-46.
- [29] 王庆仁, 李继云, 李振声. 磷高效小麦基因型对不同磷肥效应的研究[J]. 环境科学, 1999(5):9-13.
WANG Qing-ren, LI Ji-yun, LI Zhen-sheng. Studies on effects of various soluble phosphatic fertilizers for wheat genotypes with phosphorus efficiencies[J]. *Environmental Science*, 1999(5):9-13.
- [30] 贾 可, 刘建玲, 廖文华, 等. 磷肥在油菜和大白菜上的产量效应及土壤磷素的化学行为研究[J]. 河北农业大学学报. 2005, 28(4):10-13.
JIA Ke, LIU Jian-ling, LIAO Wen-hua, et al. The yield response of rape and cabbage to phosphorus fertilizer and transformation of phosphorus in soils[J]. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 2005, 28(4):10-13.
- [31] 鲁剑巍, 陈 防, 张竹青, 等. 磷肥用量对油菜产量、养分吸收及经济效益的影响[J]. 中国油料作物学报, 2005, 27(1):73-76.
LU Jian-wei, CHEN Fang, ZHANG Zhu-qing, et al. Effect of phosphorus application rate on rape seed yield, nutrient absorption and profit[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2005, 27(1):73-76.
- [32] 姜宗庆, 封超年, 黄联联, 等. 施磷量对小麦物质生产及吸磷特性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(5):628-634.
JIANG Zong-qing, FENG Chao-nian, HUANG Lian-lian, et al. Effects of phosphorus application on dry matter production and phosphorus uptake in wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(5):628-634.