

不同浓度螯合剂和浸提时间对土壤磷素提取效果研究

王祺¹, 樊秉乾¹, 张帅¹, 张强^{2,3}, 崔建宇¹, 陈清^{1,3}

(1. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193; 2. 金正大生态工程集团股份有限公司, 山东 临沂 276700; 3. 养分资源开发与综合利用国家重点实验室, 山东 临沂 276700)

摘要: 为确定螯合剂活化土壤磷素的最佳浓度和最优浸提时间, 参考水肥一体化技术, 在室内浸提条件下, 研究了不同浓度(0, 0.05, 0.1, 0.25, 0.5, 1.0 g/L)乙二胺四乙酸(EDTA)和柠檬酸螯合剂(pH=4)在不同浸提时间(1, 12, 24, 48, 72 h)下对粮田、菜田土壤和有效磷被钝化后菜田土壤中磷素提取效果。结果表明: EDTA 和柠檬酸在粮田土壤上对磷素提取中最佳条件为螯合剂浓度 0.05 g/L, 浸提时间 12 h。EDTA 和柠檬酸在菜田土壤、明矾钝化和混合钝化(明矾:白云石为 1:1)菜田土壤上提取磷素的最佳条件为螯合剂浓度 0.5 g/L, 浸提时间 12 h; 而在白云石钝化土壤中则为螯合剂浓度 0.5 g/L, 浸提时间 1 h。总体来看, 柠檬酸的活化提取磷素效果优于 EDTA, 尤其是在采用明矾和白云石钝化的土壤上。

关键词: 螯合剂; 钝化土壤; 磷素活化; 浸提时间; 浸提浓度

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2018)06-0302-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.06.043

Effect of Different Concentration and Extraction Time of Chelating Agents for the Soil Phosphorus Extraction in P-stabilized Soils

WANG Qi¹, FAN Bingqian¹, ZHANG Shuai¹, ZHANG Qiang^{2,3}, CUI Jianyu¹, CHEN Qing^{1,3}

(1. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193; 2. Kingenta Ecological Engineering Group Co., Ltd., Linyi, Shandong 276700; 3. National Key Laboratory of Nutrient Integrated Management, Linyi, Shandong 276700)

Abstract: In this study, the extracting experiment was conducted to investigate the effect of EDTA and citric acid (pH=4) on P mobilization in the grain field soil, greenhouse soil and P-stabilized greenhouse soils under different concentrations (0, 0.05, 0.1, 0.25, 0.5, 1.0 g/L) and different extraction times (1, 12, 24, 48, 72 h), to make sure the optimal concentration and extraction time of chelating agent to extracts P from soils. The results indicated that the optimal concentration and extraction time were 0.05 g/L and 12 h for EDTA and citric acid in grain field soil. The optimal concentration and extraction time were 0.5 g/L and 12 h for EDTA and citric acid in green house soil, alum-stabilized soil and mixed-stabilized (alum : dolomite was 1 : 1) soil. The optimal concentration and extraction time were 0.5 g/L and 1 h for EDTA and citric acid in dolomite-stabilized soil. Generally, the effect of citric acid was better than that of EDTA, especially in alum and dolomite stabilized soil.

Keywords: chelating agents; P-stabilized soil; phosphorus mobilization; extraction time; concentration

长期大量施用粪肥和化肥导致设施土壤磷素累积问题突出^[1-3]。越来越多的研究^[4-6]表明, 土壤对磷素的固持能力随着土壤磷素的累积而下降。在我国常见的大水漫灌条件下, 设施土壤面临着严重的磷素损失以及由其所引发的水体富营养化问题。Zhang 等^[7]研究表明, 在滇池、太湖和巢湖存在的水体富营养问题中, 占耕地面积 15%~35% 的菜田和果园的磷素流失量和占耕地面积 70% 的粮田几乎相同。施

入土壤中的磷素容易与土壤中存在的铁铝钙镁类物质发生吸附或者固定作用, 因此欧美国家早在 20 世纪 90 年代开始向粪肥或者土壤中添加磷素钝化材料来增加土壤磷素的蓄存能力, 减少磷素流失造成的水体富营养化问题^[8-10]; Huang 等^[11]的田间试验结果表明, 相比于单施粪肥, 施用粪肥和明矾的混合物 20 年后, 0—10 cm 的 M₃ 浸提磷含量较底层提高了约 200 mg/kg; Es-lamian 等^[12]、文星等^[13]的研究结果表明, 白云石能够有

收稿日期: 2018-05-21

资助项目: 国家重点研发计划项目“京津冀设施农业面源和重金属污染防控技术示范”(2016YFD0801006)

第一作者: 王祺(1994—), 男, 硕士研究生, 主要从事农业面源污染研究。E-mail: 13263381020@163.com

通信作者: 崔建宇(1969—), 女, 副教授, 主要从事草坪与环境管理研究。E-mail: cuijy@cau.edu.cn

效减少土壤磷素损失,从而增加磷素的潜在利用能力。但是磷素潜在利用性能增加后,如何在植物生长需磷的关键期对根区土壤磷素的再活化对实现作物稳产和高产十分重要。

水肥一体化技术可以进行精准的土壤根区施肥,提高养分利用率。施用酸性水溶性肥料可以溶解土壤中的含磷矿物,促进磷酸根的释放^[14],而螯合剂可以螯合金属离子,与磷酸盐竞争土壤吸附位点,释放磷素^[15-16]。因此在这种条件下:(1)施用含有螯合剂的酸性溶液可否有效地活化被明矾和白云石钝化的土壤磷素;(2)在何种浸提浓度和浸提时间下可以达到最大活化量成为本研究的焦点。本研究模拟设施生产中的水肥一体化施肥方式,参考含氨基酸水溶肥料登记标准(NY 1429—2010),采用室内浸提方法,以粮田土壤和菜田土壤为对照,通过施用酸性螯合剂

溶液,探究不同浓度和浸提时间对钝化土壤磷素提取效果的影响,并确定出现最大磷素提取量的条件。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2018 年 1 月在中国农业大学土壤面源污染实验室进行。供试所用 2 种土壤均采自北京市房山区面源污染防控示范基地,粮田土壤采自基地旁荒种 3 年以上 0—30 cm 粮田土壤;菜田土壤采自基地内日光温室 0—30 cm 菜田土壤。所有土壤经采集后自然风干,挑去植物残根和碎石,研磨后过 2 mm 筛备用。

分别向菜田土壤添加 2% 钾明矾、2% 白云石、1% 钾明矾和 1% 白云石混合物,充分混匀,保持最大田间持水量的 70% 左右,避光培养 15 天后获得 3 种钝化土壤。土壤理化性状见表 1。

表 1 供试土壤基本理化性状

供试土壤	pH	EC/ ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Olsen-P/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	CaCl ₂ -P/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	TP/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	TN/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)
粮田土壤	8.03	153	7.39	0.1	0.95	0.87
菜田土壤	7.83	245	160.00	15.1	1.90	0.75
明矾钝化土	7.60	2050	97.60	1.6	1.85	0.86
白云石钝化土	8.84	289	152.00	4.0	1.91	0.77
混合钝化土	7.79	1284	98.80	3.0	2.06	0.79

1.2 试验处理与方法

水肥一体化中所用氨基酸肥料经稀释后(200~250 倍)的溶液 pH 为 4~5,氨基酸浓度为 0.4~0.5 g/L(NY 1429—2010)。参照此标准,本研究的浸提试验共设计 2 种螯合剂(EDTA、柠檬酸,采用分析纯)对 5 种土壤(粮田土壤、菜田土壤、明矾钝化土壤、白云石钝化土壤、混合钝化土壤),按 6 种不同浸提浓度(0,0.05,0.1,0.25,0.5,1.0 g/L)和 5 种浸提时间(1,12,24,48,72 h)设计正交试验,共计 300 个处理,每个处理设置 3 个重复。

具体操作步骤为:称取 3.00 g 风干土壤,置于 50 mL 按盖圆底塑料离心管中,按试验设计配制不同浓度螯合剂处理溶液(所有对照和处理溶液均调节 pH 为 4),取 30 mL 螯合剂处理溶液置于含土壤圆底离心管中,滴加 2~3 滴氯仿抑制微生物活性。25 ℃、180 r/min 往复振荡后取样。样品经 4 000 r/min 离心 5 min 取上清液,以 0.45 μm 滤膜过滤得浸提液,用于检测各项指标^[17]。

1.3 测定项目与方法

浸提液中钼酸盐反应磷(MRP)含量采用钼锑抗比色法测定;全磷(TP)含量采用过硫酸钾氧化—钼锑抗比色法^[18-20]测定。

浸提液磷浓度以 $C(\text{mg/L})$ 表示,浸提液磷提取

量以 $P(\text{mg/kg})$ 表示,计算式为:

$$C = m/v \quad (1)$$

$$P = CV/M \quad (2)$$

式中: m 为试样测得含磷量(μg); v 为测定用试样体积(mL); V 为浸提液体积(30 mL); M 为土壤质量(3 g)。

钼酸盐非反应磷(MUP) = 全磷(TP) - 钼酸盐反应磷(MRP) (3)

1.4 统计分析

数据统计、作图采用 Microsoft Excel 2013 软件,方差分析采用 IBM SPSS Statistics 17 软件,所有数据结果均以 3 次重复的平均值表示,显著性差异分析采用 LSD 法,显著性水平设定为 $\alpha = 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 螯合剂对粮田和菜田土壤中磷素浸提量的差异性分析

采用 EDTA 和柠檬酸 2 种螯合剂浸提粮田土壤和菜田土壤后,其浸提液中钼酸盐反应磷和全磷浸提量见图 1 和图 2。从图 1 可知,在粮田土壤上,螯合剂对钼酸盐反应磷的浸提效果不显著,对全磷的浸提效果可分为螯合剂浓度 ≤ 0.05 g/L 的促进作用和浓度 > 0.05 g/L 的抑制作用。螯合剂浓度为 0.05 g/L 时,全磷浸提量随浸提时间的延长呈波动性变化。在

浸提 12 h 和浸提 48 h 时全磷浸提量均达到最大值,且数值相近,但浸提 12 h 时钼酸盐反应磷浸提量却显著低于浸提 48 h 时钼酸盐反应磷浸提量。浸提 24, 72 h 时,钼酸盐反应磷和全磷的浸提量相较浸提 12, 72 h 时均显著下降,但浸提 72 h 时下降的量低于 24 h 时下降的量。可以看出,在 1~72 h 这段时间中,磷素首先被大量浸提,并在 12 h 时达最大浸提量,而在浸提 24 h 时,浸提的磷酸根又迅速被土

壤吸附,导致全磷再次下降。浸提 48 h 时,磷素再次被大量浸提释放。浸提 72 h 时,磷酸根再次被土壤吸附,但是由于螯合剂在浸提过程中逐渐占据了磷酸根的吸附位点,所以被吸附的量较 24 h 时少。当螯合剂的浓度 >0.05 g/L 时,其在粮田土壤上对磷素的作用由浸提逐渐转为钝化,说明在粮田土壤上,当螯合剂浓度 >0.05 g/L 时,螯合剂的存在不利于磷素的释放。

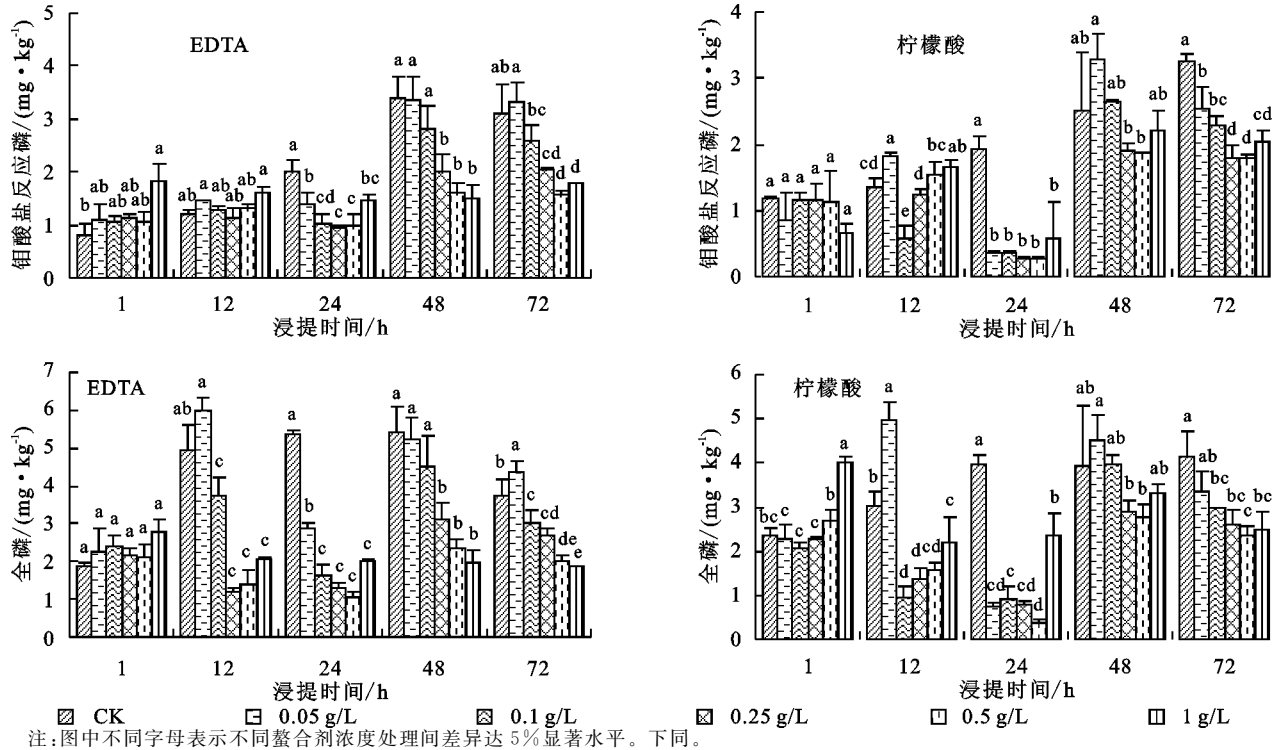


图 1 不同浸提时间和浓度的 EDTA 和柠檬酸对粮田土壤中磷素的浸提量

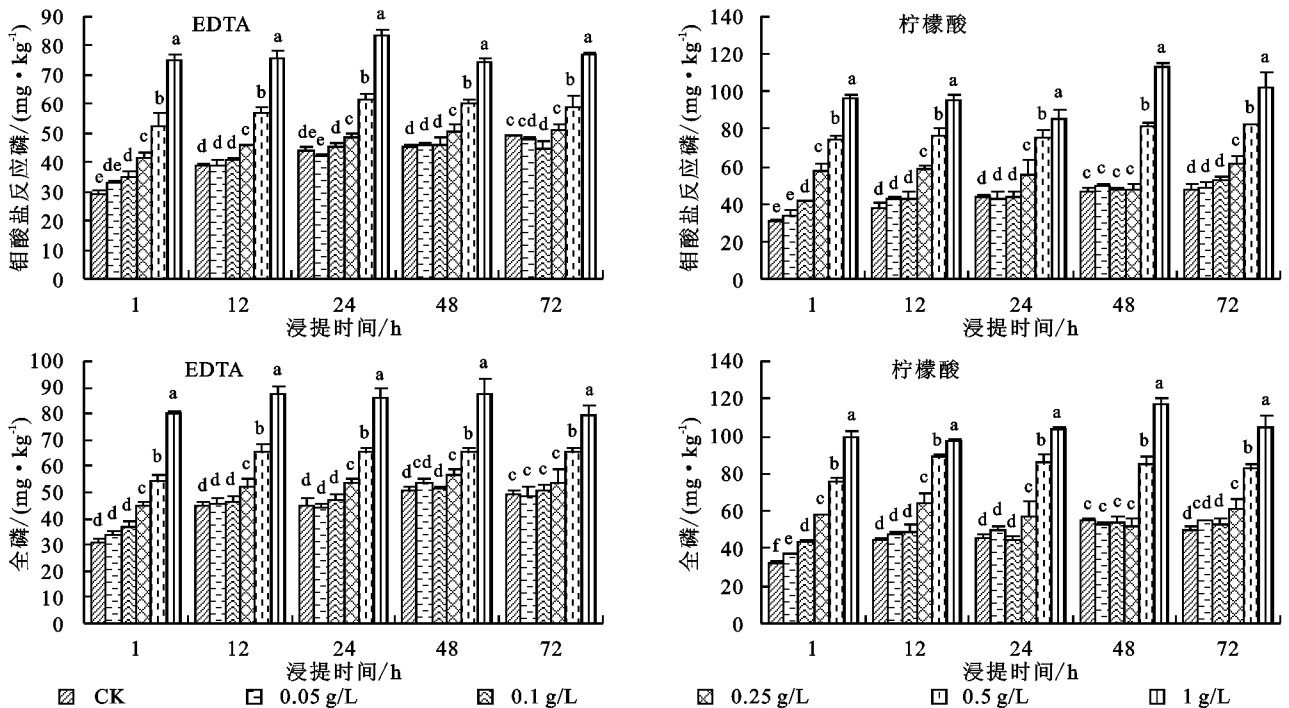


图 2 不同浸提时间和浓度 EDTA 和柠檬酸对菜田土壤中磷素的浸提量

在菜田土壤上,螯合剂对磷素的浸提量随浓度的增加而增加,但随着浸提时间的延长,浓度 ≤ 0.25 g/L 螯合剂处理的磷素浸提效果逐渐与对照相同。这可能与螯合剂、金属离子和磷酸根之间的沉淀溶解平衡有关。当螯合剂浓度 ≤ 0.1 g/L,螯合剂的量不足以使沉淀溶解平衡反应向溶解的方向进行,导致随着浸提时间的延长,螯合物中的金属离子再次与磷酸根结合形成磷酸盐沉淀,使螯合剂的作用效果仅在浸提初始阶段发挥浸提磷素的作用,而在后期作用效果逐渐减弱。当螯合剂浓度 > 0.1 g/L 时,沉淀溶解平衡的反应向溶解方向进行,浸提磷素。对比粮田和菜田土壤可以看出,在土壤磷素饱和度较低的情况下,施用螯合剂虽然可以释放一定磷素,但被释放的磷素易被再次吸附。同时,由于静电排斥作用,高浓度的螯合剂也会抑制土壤磷素的释放。在土壤磷素饱和度高的情况下,磷素被释放后不易被再次吸附,但是低浓度的螯合剂浸提磷素效果不显著。

2.2 螯合剂对添加不同钝化剂的钝化土壤中磷素浸提量的差异性分析

采用 EDTA 和柠檬酸 2 种螯合剂浸提明矾钝化土、白云石钝化土和混合钝化土后,其浸提液中钼酸盐反应磷和全磷浸提量见图 3、图 4 和图 5。由图 3 可知,螯合剂对明矾钝化土壤中的磷素同样具有显著的浸提作用,且浸提效果随螯合剂浓度增加而提升,但与图 2 相比,相同条件下螯合剂在明矾钝化土壤上的钼酸盐反应磷和全磷浸提量均低于其在菜

田土壤上的磷素浸提量,EDTA 处理平均下降 92%,柠檬酸处理平均下降 79%。由图 4 可知,EDTA 和柠檬酸均可浸提白云石钝化土中的磷素,虽然浸提量低于其在菜田土壤上的浸提量,却显著高于其在明矾钝化土上的浸提量。与图 2 所示的磷素浸提量相比,相同浓度和浸提时间条件,EDTA 处理平均降低 35%,柠檬酸处理平均降低 51%,但与图 3 相比,EDTA 处理平均增加 668%,柠檬酸处理平均增加 127%。各浓度螯合剂浸提量均出现随浸提时间延长逐渐降低的现象。浸提 72 h 时,任何浓度柠檬酸处理的磷素浸提量均与对照无显著性差异。由图 5 可知,螯合剂在混合钝化土上的磷素浸提量更接近其在明矾钝化土上的浸提量,但与图 3 所示的磷素浸提量相比,相同浓度和浸提时间条件下,EDTA 处理平均增加 166%,柠檬酸处理平均增加 55%。由螯合剂对 3 种钝化土壤中磷素的不同浸提量可以看出,EDTA 难以有效释放被明矾钝化的磷素,虽然提升浓度有一定作用,但效果仍不显著。柠檬酸对被明矾钝化磷素的释放作用较为显著,且浓度的提升可显著提升释放量,但仍难以完全释放被钝化的磷素。EDTA 和柠檬酸可以释放被白云石钝化的磷素,但随着浸提时间的延长浸提效果逐渐减弱。混合投加明矾和白云石钝化磷素则是一种较为有效的方法,一方面混合后明矾和白云石均可发挥钝化磷素的作用;另一方面螯合剂对被混合钝化剂钝化的磷素的释放效果也较好。

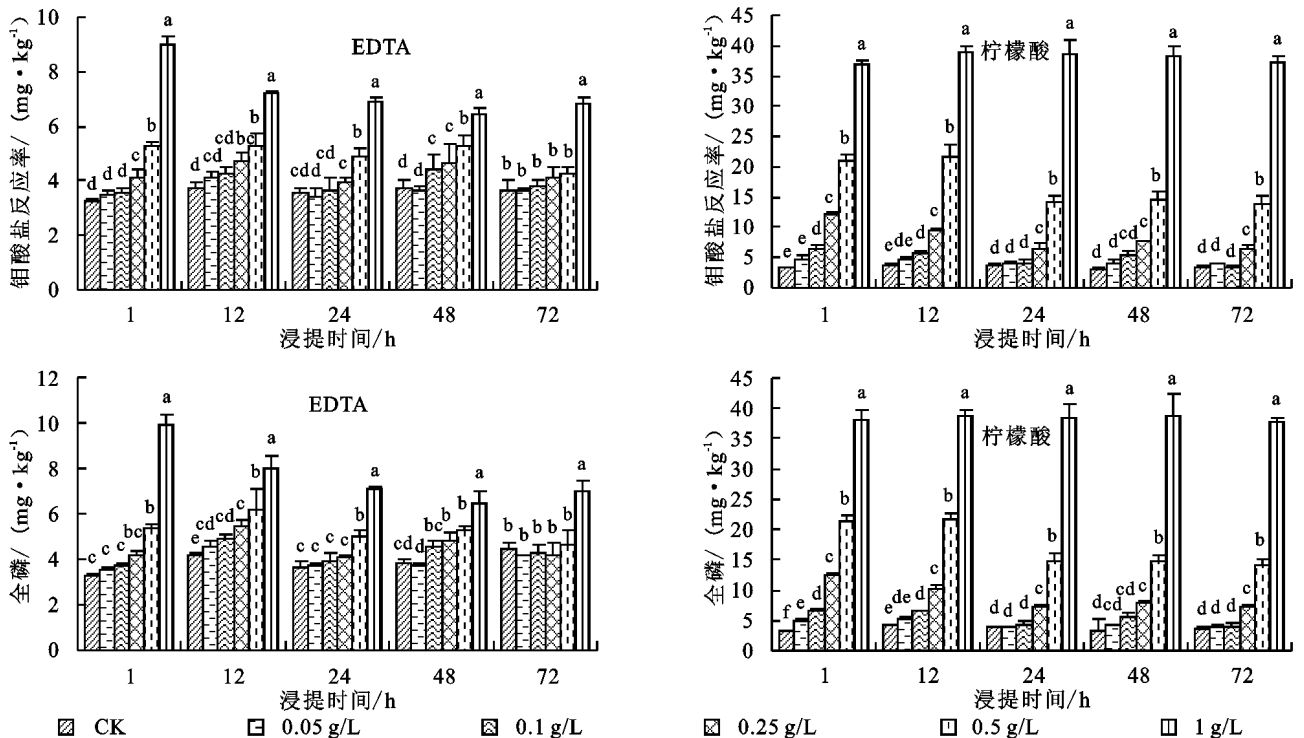


图 3 采用不同浸提时间和浓度 EDTA 和柠檬酸溶液对明矾钝化土中磷素浸提量的影响

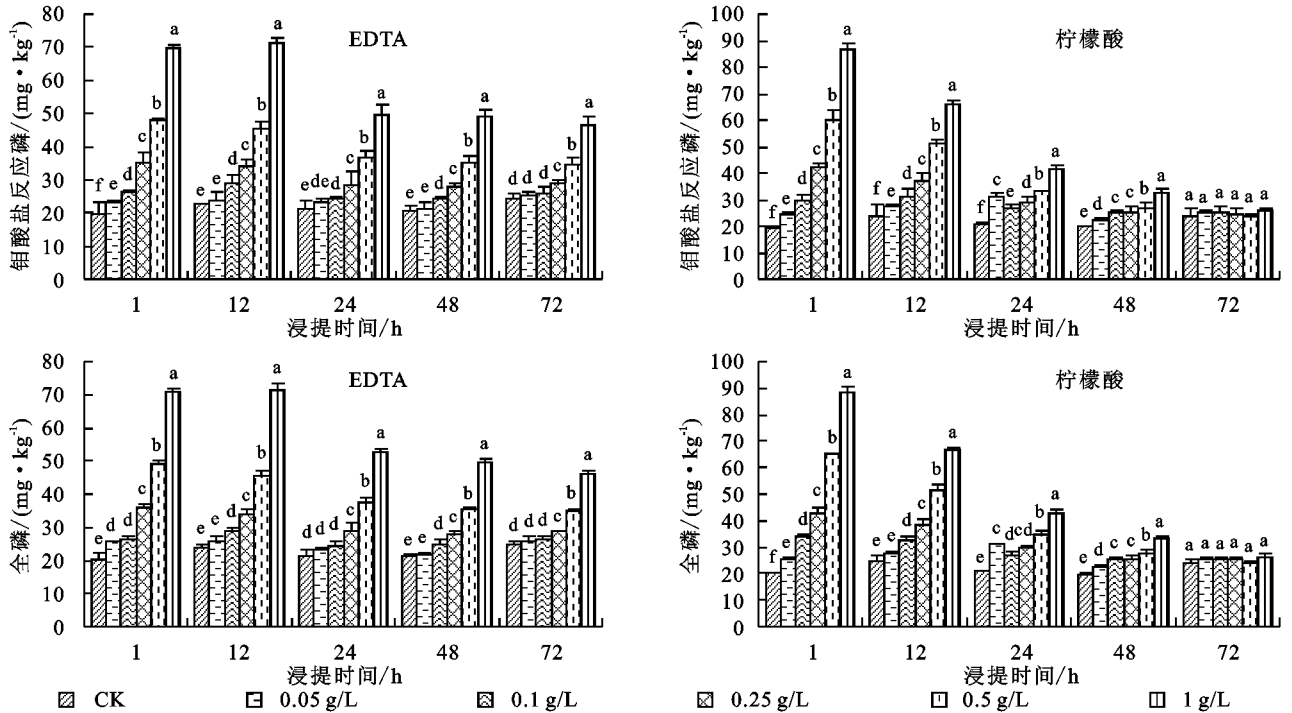


图 4 采用不同浸提时间和浓度 EDTA 和柠檬酸溶液对白云石钝化土中磷素浸提量的影响

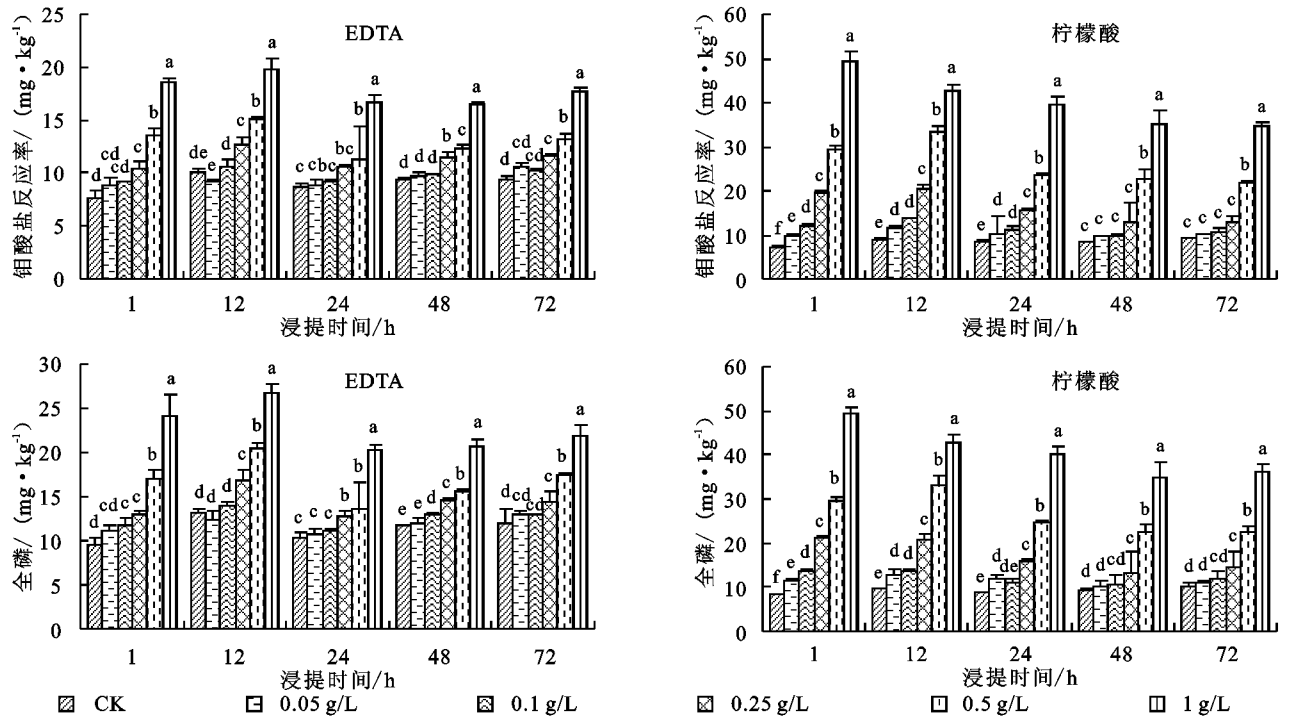


图 5 采用不同浸提时间和浓度 EDTA 和柠檬酸溶液对混合钝化土中磷素提取量的影响

2.3 螯合剂对土壤磷素最佳浸提条件的确定

由图 1 可知,在粮田土壤上,EDTA 和柠檬酸的最佳磷素浸提浓度为 0.05 g/L,浸提时间为 12 h。由图 2~图 5 可知,在菜田土壤、明矾钝化土壤、白云石钝化土壤和混合钝化土壤上,EDTA 和柠檬酸的磷素浸提量随浓度提升而增加,但 1.0 g/L 的螯合剂浓度远高于施肥中螯合剂的施用浓度,因此选择 0.5 g/L 作为 EDTA 和柠檬酸的最佳磷素浸提浓度。将 0.5 g/L EDTA 和柠檬酸处理在菜田土壤、明矾钝化

土壤、白云石钝化土壤和混合钝化土壤上各浸提时间的全磷浸提量整合得表 3。由表 3 可知,EDTA 和柠檬酸在菜田土壤、明矾钝化土壤和混合钝化土壤上浸提磷素的最佳浸提时间为 12 h,而在白云石钝化土壤上的最佳浸提时间为 1 h。

3 讨论

3.1 螯合剂对土壤中磷素浸提量的影响

粮田土壤中磷素饱和度一般较低,仍有大量可与磷素吸附结合的位点^[21-23],被螯合剂释放的磷酸根易

迅速被土壤中的碳酸钙和铁铝氧化物吸附,或与游离的钙离子、铁离子和铝离子再度结合,形成磷酸盐复合物再次进入土壤^[22-23]。这种新形成的结构并不稳定,易再次被分解,释放磷酸根^[24]。同时,粮田土壤上可被浸提的主要是钼酸盐非反应磷^[25]。随着螯合剂浓度的提高,钼酸盐非反应的浸提量显著减少。这是由于螯合剂在解离后本身带负电,而有机磷和胶体态磷表面带有负电荷,螯合剂的存在会抑制有机磷和胶体态磷的溶出,且这种抑制作用随螯合剂浓度的增加而增加^[26-27]。在菜田土壤上,螯合剂浸提磷素的作用随螯合剂浓度的升高而提升。这是由于螯合剂、金属离子和磷酸根之间存在着沉淀溶解平衡^[28]。EDTA螯合钙、柠檬酸螯合钙等金属螯合物的溶解度高于磷酸盐矿物^[29],所以磷酸根会通过沉淀溶解平衡作用抢夺螯合物中的金属离子,进而再次结合金属离子,形成沉淀。而随着螯合剂浓度的增加,反应平衡向螯合物生成的方向进行,因此浸提出的磷素含量随着螯合剂浓度的增加而增加。

表3 不同浸提时间条件下螯合剂对土壤的全磷浸提量
单位:mg/kg

土壤类型	处理	1 h	12 h	24 h	48 h	72 h
菜田土壤	EDTA	54.4b	65.5a	65.2a	65.2a	65.3a
	柠檬酸	75.3c	89.3a	86.0ab	85.5ab	82.5b
明矾钝化土	EDTA	5.4b	6.2a	5.0bc	5.2bc	4.7c
	柠檬酸	21.3a	21.7a	14.9b	14.8b	14.2b
白云石钝化土	EDTA	48.9a	45.8b	37.6c	35.4c	34.8c
	柠檬酸	65.0a	51.7b	35.0c	27.4d	24.0e
混合钝化土	EDTA	14.3b	17.0a	11.4d	13.0c	14.5b
	柠檬酸	29.6b	33.2a	24.9c	22.6c	22.6c

注:表中数字后不同字母表示不同浸提时间处理间差异达5%显著水平。

3.2 添加钝化剂对螯合剂浸提磷素浸提量的影响

在明矾钝化土壤上,同等浓度下螯合剂的浸提量显著低于其在菜田土壤上的量,其原因在于,明矾将部分Ca—P转化为Al—P^[30]。Ca—P是北方设施土壤含量占比较高且活性较高的磷组分^[31],而Al—P的活性相对Ca—P低一些。因此,在螯合剂浸提磷素的过程中,在菜田土壤上浸提的主要是Ca—P,而在明矾钝化土上浸提的主要为Al—P,活性高的Ca—P更易被浸提,磷素浸提量更高^[24]。由图4可知,在白云石钝化土壤上,同浓度螯合剂的磷素浸提量随时间的延长逐渐下降,其原因来自白云石^[30]。白云石的主要成分为碳酸钙镁,溶解度低,其中的钙镁离子无法充分接触土壤中游离的磷酸根。因此在碱性土壤上添加白云石后,虽然吸附了一部分CaCl₂—P,但对速效磷并无显著影响^[30]。随着含有螯合剂的酸性溶液的添加,白云石逐渐溶解,其中的钙镁离子逐渐进入土壤溶液体系,与其中的磷酸根结合,形成磷素钙、磷酸镁或磷酸镁铵等沉淀,钝化了磷

素^[30]。因此,在白云石钝化土壤上,螯合剂对磷素的浸提作用在浸提1h时十分显著,但是随着浸提时间的延长,浸提效果逐渐减弱。由图5可知,在混合钝化土壤上,螯合剂的磷素浸提量变化趋势与其在明矾钝化土壤上相似,这是由于明矾本身为酸性且溶解性好,在培养条件下同时添加明矾和白云石,明矾会先溶解进而降低pH,溶解了一部分白云石^[31],进而钝化磷素。故在混合钝化土壤上,虽然明矾的添加量仅为明矾钝化土上添加量的1/2,但是钝化后速效磷含量却相似,同时由于使用钙和铝进行钝化,混合钝化土中Ca—P和Al—P的含量同时增加^[32]。Ca—P相对于Al—P更易被浸提,因此在浸提量的结果上螯合剂对混合钝化土中磷素的浸提量高于其对明矾钝化土中磷素的浸提量。

本研究是在浸提条件下模拟螯合剂对土壤磷素的活化作用,但在实际条件下难以达到浸提条件的机械强度,因此试验所得结果较实际田间结果偏大。同时,本研所得螯合剂的推荐浓度仍高于目前市场上肥料中螯合剂的添加浓度。因此本研所得结果宜作为磷素活化的上限参考值。

4 结论

(1) EDTA和柠檬酸可显著活化土壤中的磷素。在粮田土壤上,EDTA和柠檬酸活化磷素的最适条件为浓度0.05g/L,浸提12h,其活化效果随浓度及浸提时间的增加而降低。在菜田土壤、明矾钝化土壤和混合钝化土壤上,EDTA和柠檬酸活化磷素的最适条件为浓度0.5g/L,浸提12h。在白云石钝化土壤上,EDTA和柠檬酸活化磷素的最适条件为浓度0.5g/L,浸提1h。

(2) EDTA和柠檬酸对粮田土壤中磷素的浸提作用较差,高浓度条件下表现为抑制土壤磷素的释放,而对菜田土壤和3种钝化土壤中磷素的释放效果较好,且释放效果随浓度的增加而提升。

(3) 明矾对磷素的钝化效果优于白云石,且螯合剂对被明矾钝化磷素的再释放能力较差,而对白云石钝化磷素的再释放能力较强。

(4) 柠檬酸浸提磷素的作用效果整体优于EDTA,且在3种钝化土壤上,柠檬酸在添加明矾和白云石钝化土壤上均有显著活化磷素的作用,但EDTA仅在添加白云石钝化的土壤上活化效果显著。

参考文献:

- [1] 高杰云,康凌云,严正娟,等.沼肥替代化肥对设施蔬菜产量和土壤养分及重金属累积的影响[J].农业工程学报,2017,33(17):200-207.
- [2] 严正娟.施用粪肥对设施菜田土壤磷素形态与移动性的影响[D].北京:中国农业大学,2015.
- [3] 李超,严正娟,张经纬,等.粪肥施用对设施番茄产量和土壤氮磷累积的影响[J].农业环境科学学报,2014,33

- (8):1560-1568.
- [4] 郑杰. 日光温室土壤磷素累积及迁移特性研究[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学, 2011.
- [5] 刘建玲, 张风华. 土壤磷素化学行为及影响因素研究进展[J]. 河北农业大学学报, 2000, 23(3):36-45.
- [6] Dou Z X, Ramberg C F, Toth J D, et al. Phosphorus speciation and sorption-desorption characteristics in heavily manured soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2009, 73(1):93-101.
- [7] Zhang W L, Shu-Xia W U, Hong-Jie J I, et al. Estimation of agricultural non-point source pollution in China and the alleviating strategies I. Estimation of agricultural non-point source pollution in China in early 21 century [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37:1008-1017.
- [8] Murnane J G, Brennan R B, Healy M G, et al. Use of zeolite with alum and polyaluminum chloride amendments to mitigate runoff losses of phosphorus, nitrogen, and suspended solids from agricultural wastes applied to grassed soils [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2015, 44(5):1674-1683.
- [9] Chen G C, He Z L, Stoffella P J, et al. Use of dolomite phosphate rock (DPR) fertilizers to reduce phosphorus leaching from sandy soil [J]. *Environmental Pollution*, 2006, 139(1):176-182.
- [10] Novak J M, Watts D W. An alum-based water treatment residual can reduce extractable phosphorus concentrations in three phosphorus-enriched coastal plain soils [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2005, 34(5):1820-1827.
- [11] Huang L, Moore P A, Kleinman P J, et al. Reducing phosphorus runoff and leaching from poultry litter with alum: Twenty-year small plot and paired-watershed studies [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2016, 45(4):1413-1420.
- [12] Eslamian F, Qi Z, Tate M J, et al. Phosphorus loss mitigation in leachate and surface runoff from clay loam soil using four lime-based materials [J]. *Water Air and Soil Pollution*, 2018, 229(3):97.
- [13] 文星, 李明德, 吴海勇, 等. 土壤改良剂对酸性水稻土 pH、交换性钙镁及有效磷的影响 [J]. *农业现代化研究*, 2014, 35(5):618-623.
- [14] Liang X Q, Tian G M, Hua L I, et al. Study on characteristic of nitrogen and phosphorus loss from rice field by natural rainfall runoff [J]. *Journal of Soil Water Conservation*, 2005, 19(1):59-63.
- [15] Taghipour M, Jalali M. Effect of low-molecular-weight organic acids on kinetics release and fractionation of phosphorus in some calcareous soils of western Iran [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2013, 185(7):5471-5482.
- [16] Badr M A, Taalab A S. Release of phosphorus from rock phosphate through composting using organic materials and its effect on corn growth [J]. *Bulletin of the National Research Centre*, 2005(6):629-638.
- [17] Wang Y Z, Joann K W, Chen X, et al. Mechanisms for altering phosphorus sorption characteristics induced by low-molecular-weight organic acids [J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2016, 96(3):289-298.
- [18] Hedley M J, Stewart J W B, Chauhan B S. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations [J]. *Soil Science Society of American Journal*, 1982, 46(5):970-976.
- [19] Condron L M, Newman S. Revisiting the fundamentals of phosphorus fractionation of sediments and soils [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2011, 11(5):830-840.
- [20] Negassa W, Leinweber P. How does the Hedley sequential phosphorus fractionation reflect impacts of land use and management on soil phosphorus: A review [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2009, 172(3):305-325.
- [21] 郭胜利, 党廷辉, 刘守赞, 等. 磷素吸附特性演变及其与土壤磷素形态、土壤有机碳含量的关系 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2005, 11(1):33-39.
- [22] 章明奎, 周翠, 方利平. 蔬菜地土壤磷饱和度及其对磷释放和水质的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12(4):544-548.
- [23] Chen Y, Li F. Effect of organic acids on soil phosphate absorbing capacities [J]. *Journal of Hubei Agricultural College*, 1998, 18(2):121-124.
- [24] 何振立. 土壤中磷酸根释放的物理化学机理 [D]. 杭州: 浙江农业大学, 1988.
- [25] 项大力. 关中农田土壤磷素淋失研究 [D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2009.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 杨绍琼, 党廷辉, 戚瑞生, 等. 低分子量有机酸对石灰性土壤有机磷组成及有效性的影响 [J]. *水土保持学报*, 2012, 26(4):167-171.
- [29] Dean E. *Lange's handbook of chemistry* [M]. New York: McGraw-Hill Book Co., 1985.
- [30] 朱睿, 樊秉乾, 郜斌斌, 等. 添加氧化镁和铵明矾对菜田高磷土壤活性磷的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(5):948-955.
- [31] 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):856-860.
- [32] 路超. 设施土壤磷素形态、转化及其生物有效性的研究 [D]. 山东 泰安: 山东农业大学, 2006.