植物营养与肥料学报 2010,16(6):1426 - 1432
Plant Nutrition and Fertilizer Science

低分子量有机酸类物质对红壤和黑土磷有效性的影响

孙桂芳[1], 金继运[1], 王玲莉[2], 石元亮[2*]
(1 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所,农业部作物营养与施肥重点实验室,北京 100081;
2 中国科学院沈阳应用生态研究所,辽宁沈阳 110016)

摘要:在20℃恒温培养条件下,研究低分子量有机酸类的钠钙盐(LA)和低分子量有机酸类与混合氨基酸的钠钙盐(LAA)不同用量水平对红壤和黑土磷有效性的影响。研究表明,两种低分子量有机酸类混合物在各不同水平下均能显著提高红壤和黑土磷有效性;随着培养的进行,添加有 LA、LAA 的各处理对红壤和黑土中磷有效性均有明显提高。无论是 LA 或 LAA,红壤中以半量处理对提高磷有效性作用效果更为明显,而黑土中则以 LAA 作用效果更好,且以常量 LAA 处理的效果最好,常量 LA 和 LAA 处理间差异显著。在添加磷肥的基础上,与不加有机酸物质处理(CKp)相比,添加常量 LA、LAA 和半量 LA(0.5 LA)、LAA(0.5 LAA)处理,在红壤中磷固定率平均值分别降低 10.5%、22.3% 和 11.3%、19.4%;在黑土中分别降低 8.6%、10.6% 和 14.1%、11.8%。LA 和 LAA 对降低红壤和黑土磷固定率效果显著,红壤以半量处理的效果较好,黑土则以常量 LAA 处理效果最好。

关键词:低分子量有机酸;氨基酸;有效磷;磷固定率;红壤;黑土
中图分类号:S153.6+1　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1008-505X(2010)06-1426-07

Effect of low-molecular-weight organic acids on Olsen-P in red soil and black soil

SUN Gui-fang[1], JIN Ji-yun[1], WANG Ling-li[2], SHI Yuan-liang[2*]
(*1 Institute of Agricultural Resource and Regional Planning, CAAS/Key Laboratory of Crop Nutrition and Fertilization, MOA, Beijing 100081, China;*
2 Institute of Applied Ecology, CAS, Shenyang 110016, China)

Abstract: An incubation experiment was conducted to study the effect of two different mixtures of organic acids on availability of P in a red soil (RS) from Jiangxi and a black soil (BS) from Jilin. One mixture was low-molecular-weight organic acids (LA), the other was low-molecular-weight organic acids which was mixed with selected amino acids (LAA) under different levels. The results showed that different levels of LA and LAA improved Olsen-P level significantly in Jiangxi red soil and Jilin black soils compared to their corresponding control treatment (CKp). Treatments of half rate of LA (0.5 LA) and LAA (0.5 LAA) were more effective than treatments with normal rate of LA and LAA in Jiangxi red soil. Treatments with normal rate of LAA were more effective than treatments with normal rate of LA in red soil, while the treatments with normal rate of LAA was the most effective in Jilin black soil. On average, compared to the treatment of CKp, LA, 0.5LA, LAA, and 0.5LAA decreased P fixation rates by 10.5%, 22.3%, 11.3% and 19.4%, respectively in Jiangxi red soil, and by 8.6%, 10.6%, 14.1% and 11.8%, respectively in Jilin black soil. In a word, LA and LAA could reduce P fixation rates significantly in red soil and Jilin black soil. Treatments with half rate of LA or LAA (0.5LA and 0.5LAA) were more effective than that with normal rate in the red soil, while normal rate treatment of LAA showed better than other treatments in Jilin

收稿日期:2010-03-04　　**接受日期**:2010-05-07
基金项目:科技部科技支撑计划重大项目"东北平原中部(吉林)春玉米丰产高效技术集成研究与示范(2006BAD02A10)"资助。
作者简介:孙桂芳(1973—),女,湖北广水人,博士,助研,主要从事土壤磷素活化方面的研究。E-mail: kawafasun@yahoo.com.cn
* 通讯作者 Tel: 024-83970420, E-mail: shiyl@iae.ac.cn

black soil.

Key words: low-molecular-weight organic acids; amino acids; Olsen-P; P fixation rates; red soil; black soil

在土壤中的吸附及固定、解吸及活化是磷在土壤固相和液相之间转换的重要过程,对土壤中磷的有效性有至关重要的影响[1]。因此,此方面的研究对磷肥在农业生产中的安全调控有关键性的指导意义。

土壤是含有多种有机配位体与无机离子的混合体系,其中,土壤中的低分子量有机酸是对土壤中磷酸盐的吸附和解吸有很大影响的重要成分之一。土壤中低分子量有机酸主要来自动植物残体的分解、微生物代谢、植物根系的分泌和施入土壤有机物的转化[2]。对不同类型土壤的研究结果表明,甲酸、乙酸、草酸、琥珀酸和柠檬酸 5 种优势有机酸约占总酸量的 90% 左右[3];土壤中提取的低分子脂肪有机酸优势有机酸为甲酸、乙酸、丙酸和乙醛酸[4]。农业生产中施用有机肥降低土壤对磷的吸附可能是由于有机质分解产生的碳水化合物掩蔽了吸附位点所造成的结果[5-8]。总之,由于根系分泌物、环境胁迫、施肥等原因,均可能造成土壤中的有机酸在类型、浓度以及时空分布上具有多变性。据报道,有机酸可以通过与磷酸根吸附位点的竞争,并掩盖某些表面磷吸附位点,减少磷吸附或促进磷解吸而参与磷营养循环[9-10]。有机酸对铝氧化物吸附磷的解吸机理包括配位交换和溶解,有机酸促进磷的解吸,提高磷的有效性[11];有机酸和 Fe、Al 络合,使其失去一部分固磷能力,并释放磷素,但这一作用受土壤 pH 的影响较大,酸性和碱性土壤中有机阴离子对磷的影响不尽相同[12]。

国外关于有机酸对磷的吸附与解吸的研究起步较早[13-14],国内相关研究主要始于上世纪 90 年代末[15-18]。尽管低分子量有机酸对磷的影响研究已有很多报道,但涉及研究的低分子量有机酸主要集中在草酸、苹果酸、柠檬酸和酒石酸等[14-20];除王庆仁等[21]有关氨基酸对土壤磷素有一定的活化作用的报道外,以模拟土壤环境,涉及甲酸、乙酸等短链有机酸、氨基酸混合物对磷有效性影响的研究尚没见报道。因此,开展本项试验,以推动土壤中磷有效性的相关机理和技术的深入研究。

1　材料与方法

1.1　供试材料

试验所用材料为自行研制的,模拟根系分泌物组分的低分子有机酸的钠钙盐和混合氨基酸的低分子有机酸的钠钙盐,具体理化性状如下。

低分子有机酸的钠钙盐(简称 LA):固体形态,主要成分为甲酸、乙酸、丙酸、丁酸、己酸以及内含短链有机酸钠钙(甲酸、乙酸、丙酸为 1∶1∶1 的比例占有机酸总量 85%,丁酸占 10%,乙酸占 5%),pH =8。

混合有氨基酸的低分子有机酸的钠钙盐(简称 LAA):液体形态,内含混合氨基酸(含量 3.2%)、有机酸 135 g、NaOH 12 g、$Ca(OH)_2$ 5 g(有机酸比例同 LA),pH = 13,用时调至 pH = 8。

供试肥料:磷酸二铵,分析纯(含 N 21%,P_2O_5 54%)。

供试土壤:红壤(Red soil,RS),取自江西鹰潭中国科学院南京土壤研究所红壤试验站,为发育于 Q3 红土沉积物上的壤质粘土,Al_2O_3 含量 251.5 g/kg,Fe_2O_3 含量 138.8 g/kg;黑土(Black soil,BS),取自吉林省公主岭农科院试验地,为发育于黄土上的粘壤土。二者均为耕层(0—20 cm)土,经风干,过 0.85 mm 筛,备用。其养分含量见表 1。

表 1　供试土壤基本性状

Table 1　The basic characteristics in tested soil

土壤类型 Soil type	有机质 OM (g/kg)	碱解氮 Alk-hydr. N (mg/kg)	速效磷 Olsen-P (mg/kg)	速效钾 Avail. K (mg/kg)	pH
红壤 RS	22.6	63.3	35.1	139.7	5.1
黑土 BS	26.7	90.2	16.1	110.1	7.6

1.2　试验设计

试验设 6 个处理:1)对照,土壤不加任何物料,(CK0);2)土壤 + 磷酸二铵(CKp);3)土壤 + 磷酸二铵 + 常量 LA(LA);4)土壤 + 磷酸二铵 + 半量 LA(0.5LA);5)土壤 + 磷酸二铵 + 常量 LAA(LAA);6)土壤 + 磷酸二铵 + 半量 LAA(0.5LAA),3 次重复。

试验时,每培养盒装土 200 g,磷酸二铵 0.20 g,LA 0.20 g(常规用量),LAA 0.25 g(常规用量)。将土壤、肥料和供试材料充分混匀后,将培养盒置于恒温培养箱内在 20℃ 的条件下培养,定期浇水,保持土壤含水量为 25% 左右。分别于培养的第 5、10、20、35、50 d 取土样测定速效磷含量。

1.3 测定项目与方法

土壤 pH 采用 Thermo 410A 型酸度计测定(土水比为 1:2.5); 土壤碱解氮(AN)采用碱解扩散法测定; 土壤速效钾采用火焰光度计法测定; 土壤有效磷采用钼锑抗比色法测定[22]。

试验数据用 DPS7.05 和 Excel 软件分析。

2 结果与分析

2.1 培养试验中黑土和红壤磷有效性的变化

随着培养的进行,红壤对照处理 CK0 有效磷含量在前 30 d 基本呈逐渐递增的变化趋势,之后稍有下降后随即保持不变; 黑土对照处理 CK0 处理有效磷变化趋势则一直呈上升趋势,且有效磷含量均高于土壤磷本底值(表 1、表 2)。培养试验中土壤水分的变化可能改变了土壤的氧化还原条件,造成土壤中铁氧化物的形态变化,因而破坏了土壤中磷素原来的吸附与释放平衡[23-25],使磷的有效性发生改变; 而且土壤水分的增减改变土壤还原条件,改变 Fe 和 Mn 离子的价态,加强磷的释放[26]。这可能是黑土和红壤在培养过程中有效磷含量均增加的原因之一。

表 2 CK0 处理不同培养时间有效磷含量的变化(%)

Table 2 Change of Olsen-P in CK0 treatment with different incubation days

土壤类型 Soil type	培养天数 Incubation days(d)						
	5	10	20	30	40	50	平均 Mean
红壤 RS	-8.55	-2.06	6.80	26.13	7.04	6.84	6.03
黑土 BS	8.28	13.04	20.91	25.67	26.92	31.88	21.12

2 种土壤中 CK0 处理有效磷的释放存在较大的差异。与各自的土壤磷本底值相比,红壤有效磷含量最高增幅达到 26.13%,平均 6.03%,前期(5 ~ 10 d)甚至表现出被吸附固定的现象; 而黑土有效磷释放的增幅在 50 d 时达到最高,为 31.88%,平均 21.12%。这一方面与红壤和黑土有效磷本底值的高低有关, 另一方面,红壤中高含量的铁铝氢氧化物、粘粒矿物等成分不利于有效磷的释放。此外,由于测试磷本底值的土壤是风干土样,培养试验引起土壤水分条件的变化,会导致土壤中高含量铁锰等具氧化还原性各元素化合价的变化,土壤的氧化还原势由此发生变化,磷有效性也会受到影响[23-24]。与红壤相比,黑土较高的有机质含量使其具有更好的缓冲性,因此,黑土在培养过程中,对照处理 CK0 有效磷含量增幅更大。

2.2 LA 和 LAA 对黑土和红壤磷有效性的影响

LA 和 LAA 对黑土和红壤磷有效性的影响(图 1)看出,两种土壤各施磷处理速效磷含量的起始值均很高,之后均是呈逐渐递减的趋势,其中 CKp 处理在 5 ~ 10 d 内下降很快,说明在未加入 LA 或 LAA 的处理中,磷肥进入土壤后,其速效态磷迅速向缓效态转化或被固定,有效性下降。而添加 LA 或 LAA 的各处理,即 LA、0.5LA、LAA 和 0.5LAA 处理,不仅在培养初期速效磷含量显著高于处理 CKp,而且随着培养的进行,各处理的速效磷含量也越来越高于处理 CKp。说明供试材料 LA 和 LAA 对减缓吉林黑土和江西红壤培养土壤中速效态磷的固定均有明显的作用效果。

LA 和 LAA 在黑土和红壤上对磷素有效性的作用效果因用量水平不同而有差异。当为常量水平时,LA 处理在黑土和红壤上的作用效果差异不显著; 但 LAA 处理在黑土上的作用效果较好,与红壤上的 LAA 处理间达到显著性差异(图 1a)。当为半量水平时,0.5LA 处理和 0.5LAA 处理对红壤上磷的有效性影响较大,与黑土相比达到显著性差异(图 1b)。

LA 和 LAA 对土壤中磷素有效性变化趋势的影响,可以从一个侧面反映供试材料在不同的供试土壤上不同的作用特点。本试验中,供试材料 LA 对土壤磷有效性的变化的影响与 LA 的用量水平以及供试土壤类型关系不大; 而对 LAA 而言,不同用量水平以及供试土壤,其对土壤中磷有效性的变化影响则不相同,这说明供试材料 LAA 的用量水平以及土壤类型对培养土壤中磷素有效性的变化有较大影响。

图 1 还看出,培养 20 d 时,添加 LA、LAA 各处理有效磷含量均有上升,而后又呈下降的变化趋势,只是各处理上升的幅度不同。添加 LA、LAA 各处理有效磷含量的这一变化趋势与顾永明等[27]关于有机肥与磷肥配施研究中有效磷含量的变化趋势基本一致,应该不属于规律性差的异常数据。此外,在对照 CKp 处理中,除红壤外,黑土表现出同样的上升变化趋势。添加有 LA、LAA 各处理的黑土中,有效磷含量上升幅度均较大,这可能是黑土与磷肥间存在正向的协同作用,加入 LA 和 LAA 后,正向协同作用加大。LA、LAA 与土壤及土壤中磷肥的协同作用,在培养 20 d 时达到正向反应的最大速率,而 0.5LA 和 0.5LAA 则更有利于正向反应最大反应速率的发生。在黑土中,这种协同作用的大小可能与

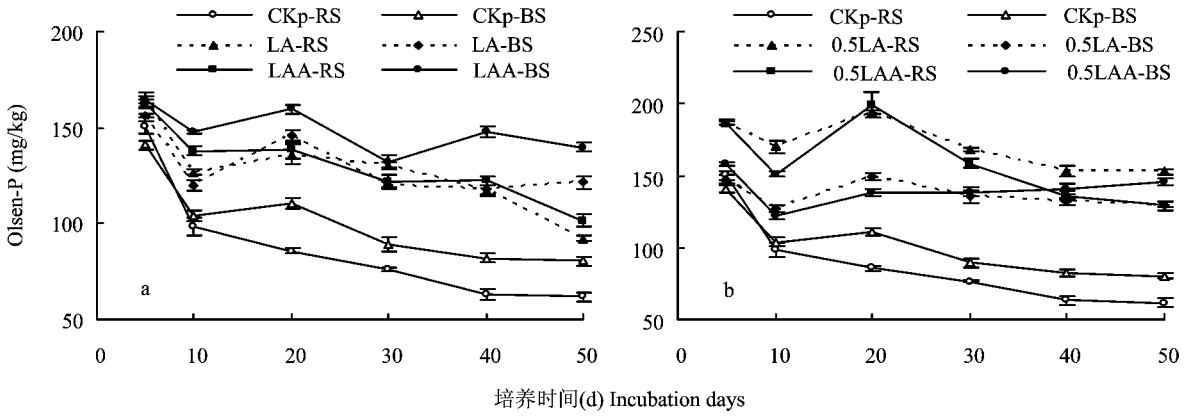

图 1　红壤和黑土中 LA、LAA(a)和 0.5LA、0.5LAA(b)处理土壤有效磷的含量变化

Fig. 1　Changes of Olsen-P in treatments LA, LAA(a) and 0.5LA、0.5LAA(b) in black soil and red soil

LA、LAA 的种类(即与供试材料组分)有关；红壤中则与 LA、LAA 的用量水平有关。

2.3　LA 和 LAA 对土壤磷固定率影响的比较

为比较相同用量的磷肥(0.20 g 磷酸二铵/200 g 土)施入土壤后的固定效果,在不考虑其他因素对有效磷含量影响的前提下,将培养土壤中有效磷含量的本底值与加入磷肥的有效磷含量进行加和,吉林黑土和江西红壤培养土壤有效磷含量在起始培养时分别达到 436.1 和 455.1 mg/kg。

磷的固定率按下式计算：

磷的固定率 =(起始土壤有效磷总量 - 取样时该处理土壤有效磷量)/DAP 有效磷量 ×100%

式中,起始土壤有效磷总量 = DAP 有效磷量 + 土壤有效磷本底值,DAP 为磷酸二铵。

表 3 看出,未使用 LA 和 LAA 的 CKp 处理,红壤中磷固定率较高,在 50d 时达到 93.7%,整个培养期均值为 87.1%,这是由于红壤因富含铁铝氧化物[28],对磷的吸附固定能力较大的缘故。黑土中磷固定率在 50 d 为 84.7%,培养期平均值 79.7%。相比而言,黑土磷固定率偏低,这与黑土自身良好的土壤理化性状有关。

使用 LA、LAA 后,红壤磷固定率均大大降低,50 d 时和整个培养期均值的最大降幅分别达到了 23.2% 和 22.3%；LA 与 LAA 处理间、0.5LA 与 0.5LAA 处理间速效磷含量差异不大。与 CKp 相比,

表 3　红壤和黑土中各处理磷固定率的比较

Table 3　Comparisons of P fixation rates in Jiangxi red soil and Jilin black soil

项目 Item	有效磷 Olsen-P(mg/kg)		磷固定率 P fixation rates(%)		与 CKp 比较 Compare to CKp(%)	
	50 d	均值 Mean	50 d	均值 Mean	50 d	均值 Mean
红壤 Red soil						
CKp	61.7 e	89.3 c	93.7 a	87.1 a		
LA	92.1 d	127.8 b	86.4 b	77.9 b	-7.7 a	-10.5 a
0.5LA	152.8 a	170.8 a	72.0 e	67.7 c	-23.2 d	-22.3 b
LAA	101.6 c	130.8 b	84.2 c	77.2 b	-10.2 b	-11.3 a
0.5LAA	130.0 b	160.2 a	77.4 d	70.2 c	-17.4 c	-19.4 b
黑土 Black soil						
CKp	80.4 d	101.2 c	84.7 a	79.7 a		
LA	121.4 c	130.0 b	74.9 b	72.9 b	-11.5 a	-8.6 a
0.5LA	129.2 b	136.7 ab	73.1 c	71.3 bc	-13.7 b	-10.6 ab
LAA	139.7 a	148.6 a	70.6 d	68.5 c	-16.7 c	-14.1 b
0.5LAA	145.8 a	140.7 ab	69.1 d	70.3 bc	-18.4 c	-11.8 ab

注(Note)：同列数据后不同字母同一土壤不同处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significant at 5% level for the same type of soil.

0.5LA 和 0.5LAA 处理整个培养期磷固定率均值分别降低 22.3% 和 19.4%，远高于 LA 和 LAA 处理的降低幅度 10.5% 和 11.3%；50 d 时，0.5LA 和 0.5LAA 处理磷固定率的降幅也分别达到 23.2% 和 17.4%。黑土磷固定率虽有一定程度的降低，LAA、0.5LAA、0.5LA 和 LA 处理磷固定率平均值分别降低了 14.1%、11.8%、10.6% 和 8.6%，50 d 时分别降低了 16.7%、18.4%、13.7% 和 11.5%；但与红壤相比，LA 和 LAA 在黑土上的作用效果较小。这可能一方面是由于黑土本身有良好的理化性状，养分供给能力好，而红壤不仅富含铁铝氢氧化物、粘粒矿物等对磷有直接强吸附作用的组分，而且其高含量的铁、锰等对土壤氧化还原势有重要影响，也间接影响磷有效性；另一方面，土壤 pH 也是影响供试材料作用效果的原因之一。体系 pH 通过影响溶液中磷酸根离子类型来影响针铁矿表面吸附磷的配位形式[29-30]。在 pH 值为 6.5～8.3 时，可溶性磷含量与 pH 值呈负相关[31-32]，在 pH 值为 4.0～6.5 范围内，可溶性磷含量与 pH 值呈正相关[32]。本研究中，黑土 pH 值为 7.6，LA 和 LAA 偏弱碱性（pH = 8），经 LA 和 LAA 处理后的土壤酸碱性可能不利于磷酸盐的溶解释放；江西红壤的 pH 值为 5.1，使用 LA 和 LAA 后，pH 的变化可能有利于减缓磷素向缓效或固定老化的方向转化。

3 讨论

本试验中，黑土 pH 值为 7.6，其有效磷含量的本底值为 16.1 mg/kg，属一般水平，CKp 处理有效磷含量和磷固定率平均值分别为 101.2 mg/kg 和 79.7%；红壤 pH 值为 5.1，其有效磷含量本底值稍高，为 35.1 mg/kg，CKp 处理有效磷含量和磷固定率均值分别为 89.3 mg/kg 和 87.1%。可以看出，红壤磷固定率较大，而黑土由于土壤呈中性，磷肥的溶解度较大[33]。培养试验中，CK0 处理有效磷平均含量与土壤本底值相比，黑土增加 21.12%，红壤增加 6.03%，红壤在培养前期甚至出现速效磷被吸附的现象，说明黑土比红壤具有更好的供磷能力。

LA 和 LAA 在两种土壤上作用效果不同，在红壤上的效果好于黑土。这种差异不仅源自土壤的理化性质（如 pH、风化程度、成土母质等）、LA 与 LAA 间的异同，而且还与 LA、LAA 与土壤、磷肥间的相互作用有关。

土壤 pH 值是控制土壤中磷化学形态和含量的重要因子。但是，pH 值对磷的实际影响取决于土壤基质中现有的离子和矿物含量（即土壤成土母质和风化程度），包括与磷酸根离子竞争络合、吸附位点的阴离子以及可以与磷酸根结合的铁、铝、锰等金属离子[34]。在低 pH 值的酸性土壤中，磷酸盐易于被土壤中大量的铁、铝、锰氧化物表面吸附，或者为土壤中游离的铝离子所沉淀；在中性土壤中，土壤溶液中的磷酸盐易于被铁、铝、锰的水化氧化物吸附。磷酸盐在 pH 在 6.5 附近有效性最大[31]。不同类型土壤中可溶性磷与 pH 变化的关系不同。在 pH 6.5～8.3 时，土壤中可溶性磷含量与 pH 值呈负相关[31-32]。低 pH 时有利于形成磷的单基配位，高 pH 时有利于形成磷的双基配位，体系 pH 通过影响溶液中磷酸根离子类型来影响针铁矿表面吸附磷的配位形式[29-30]。有研究表明，红壤在 pH5.0 左右吸附磷量最高，吸附的磷最难解吸，能维持土壤溶液的磷浓度最低[35]。本研究中，因供试材料 LA 和 LAA 的加入而引起的土壤酸碱性的变化，对黑土和红壤中各自磷有效性的影响也不同；此外，黑土和红壤自身酸碱性也影响 LA 和 LAA 的作用效果。本试验供试红壤 pH 值为 5.1，在此酸碱性范围内，可溶性磷含量与 pH 值正相关[32]，磷固定率平均为 87.1%，磷肥溶解度较低[31]，土壤对磷的吸附量也很高[35]；使用 LA 和 LAA 后，pH 的升高有利于减缓磷素向缓效、固定老化的方向转化。而供试黑土，pH 值为 7.6，经 LA 和 LAA 处理后培养土壤 pH 升高，土壤中的磷酸盐，更易于被固定吸附[32]；或由于 LA 中的低分子量有机酸根离子受 pH 的影响，与铁、铝、锰等阳离子形成的络合物稳定性相对太低，或可能导致磷酸盐溶解度下降，影响 LA 或 LAA 的作用效果。

由于土壤自身理化性状的差异，对磷的固定吸附作用也有差异。LA 和 LAA 在黑土与红壤中的效果也会受到影响。磷主要与土壤中矿物表面的 M－OH_2、M－OH 基团进行专性吸附。LA、LAA 中低分子量有机酸根离子、氨基酸根离子与黑土中铁、铝、锰的水化氧化物[32]形成的络合物稳定性可能相对较低，作用效果也因此受到影响。在低 pH 的酸性红壤上，磷酸盐易于被土壤溶液中大量的铁、铝、锰氧化物表面吸附或为土壤中游离的铝离子所沉淀[31]。有机酸对磷的活化主要与土壤中铝、铁的释放量有关；有机酸影响土壤磷吸附的程度与土壤的活性铝氧化物含量及状态有关[35]，因此，LA 和 LAA 加入到黑土和红壤后，其低分子量有机酸类和混合氨基酸在各土壤中的作用机理不同，作用效果有

差异。

LA、LAA 中的有机酸阴离子是影响磷有效性的重要因素之一。LA、LAA 有机酸阴离子组分的差异可能是 LA 和 LAA 在黑土和红壤上作用效果和机理有差别的重要原因之一。胡红青等[11]研究发现,加有机酸时比无有机酸时吸附的磷具有更高的解吸率; 高浓度有机酸可解吸低浓度有机酸难解吸的磷。有机阴离子降低磷酸根吸附的机制主要是竞争专性吸附,即有机阴离子的竞争吸附导致了磷酸根离子解吸,从而降低了磷酸根离子的吸附量,导致了土壤对磷素吸收的减少[15]。本研究中,LA 中以甲酸、乙酸等低分子量有机酸居多,而 LAA 中除含有低分子量有机酸外,还含有混合氨基酸。有机酸影响土壤吸附磷的作用效果首先取决于有机酸的类型,即羧基和酚羟基的数量、位置,以及取决于铁、铝有机复合物和磷酸复合物的相对稳定性[36]; 同时有机阴离子可能与磷酸根离子竞争相同的吸附位点从而导致磷酸根吸附位点的减少[36-37]。LAA 中特有的混合氨基酸组分的羧基以及酚羟基结构可能与黑土中有机质、有机磷中的某些原子团结构发生反应,生成有利于磷酸根离子解吸、溶解的产物。

有机肥能够减少土壤对无机磷的固定,提高土壤中磷的有效性[36,38],这除了有机质分解释放出植物有效磷外,其中间产物和所形成的腐殖酸、有机酸等也可影响土壤中磷素的平衡[36,39]。土壤有机质分解、微生物和植物根系呼吸代谢产生的有机酸包括甲酸、乙酸、酒石酸、草酸和柠檬酸等对土壤中磷酸根的释放起着重要作用[36,38]。近些年,相关作用机理的研究尽管已相继展开[40],然而由于受有机酸种类、土壤类型和试验条件等多方面因素的影响,此方面研究仍有许多工作尚需深入。

4　结论

1) 黑土比红壤具有更好的供磷能力; 添加 LA 和 LAA 均明显减缓红壤和黑土培养土壤中有效态磷向缓效态、固定态方向转化。

2) 黑土中,以 LAA 和 0.5LAA 处理作用效果较好; 红壤中,LA 和 LAA 间作用效果的差异与它们各自的用量水平有密切的关系,分别以 0.5LA、LAA 处理的作用效果较好。

3) 添加有 LA 和 LAA 的各处理在黑土上的效果依次为: LAA > 0.5LAA > 0.5LA > LA; 在红壤上的效果依次为: 0.5LA > 0.5LAA > LAA > LA。

参 考 文 献:

[1] Burkitt L L, Moody P W, Gourley C J P *et al*. A simple phosphorus buffering index for Australian soils[J]. Aust. J. Soil Res., 2002, 40: 497-513.

[2] Rovira A D. Plant root exudate[J]. Bot. Rev., 1969, 35: 55-57.

[3] Tani M, Higashi T, Nageztsuka S. Low-molecular-weight aliphatic acids in some Andisols of Japan[A]. Huang P M, Berthelin J, Bollag J M *et al*(eds.). Environmental impact of soil component interaction[C]. Lewis: Chelsea, ML, 1995. 235-243.

[4] Shen A, Li X Y, Kanamori T *et al*. Low-molecular-weight organic acids in two Japanese soils incubated with plant residues under different moisture conditions: I. Aliphatic acids[J]. Pedoshere, 1997, 7(1): 79-86.

[5] 赵晓齐,鲁如坤. 有机肥对土壤磷素吸附的影响[J]. 土壤学报,1991, 28(1): 7-13.
Zhao X Q, Lu R K. Effects of organic manures on soil phosphorus adsorption[J]. Acta Predol. Sin.,1991, 28 (1): 7-13.

[6] 王新民,侯彦林. 有机物料对石灰性土壤磷素形态转化及吸附特性的影响[J]. 环境科学学报,2004,24(3): 440-443.
Wang X M, Hou Y L. Effects of organic matter addition on the characteristics of phosphate adsorption and forms of phosphorus in a calcareous soil[J]. Acta Sci. Circum., 2004, 24(3): 440-443.

[7] Daly K, Jeffrey D, Tunney H. The effect of soil type on phosphorus sorption capacity and desorption dynamics in Irish grassland soils[J]. Soil Use Manag., 2001, 17: 12-20.

[8] Johnson S E, Loeppert R H. Role of organic acids in phosphate mobilization from iron oxide[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 2006, 70: 222-234.

[9] Kafkafi U, Bar-yosef B, Roseaberg R *et al*. Phosphorus adorption by kaolinite and montmorillonite II. Organic anion competition[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1988, 52: 1585-1589.

[10] 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 H Q, Li Y, He J Z. Research of organic acid interact with soil phosphorus[J]. Chin. J. Soil Sci., 2004, 35 (2): 222-229.

[11] 胡红青,李学垣,贺纪正. 有机酸根与铝氧化物表面吸附磷的解吸[J]. 植物营养与肥料学报,1998,4(3): 249-256.
Hu H Q, Li X Y, He J Z. Effect of organic acids on desorption of phosphate from aluminum oxides surface[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 1998, 4(3): 249-256.

[12] Lopez-Hernandez D, Flores D, Siegert G *et al*. The effect of some organic anion on phosphate removal from acid and calcareous soils[J]. Soil Sci., 1979, 128(6): 321-326.

[13] Deb D L, Datta N P. Effect of association anion on phosphorus retention in soil: I. Under variable phosphate concentration[J]. Plant Soil, 1967, 26: 303-316.

[14] Earl K D, Syers J K, McLaughlin J R. Origin of the effects of citrate, tartrate, and acetate on phosphate sorption by soils and synthetic gels[J]. Soil Sci. Soc. Am., 1979, 43: 674-678.

[15] 胡红青,贺纪正,李学垣,等. 有机酸对酸性土壤吸附磷的影响[J]. 华中农业大学学报,1997,16(1):37-42.
Hu H Q, He J Z, Li X Y *et al*. Effect of organic acids on phosphate adsorption by acid soil[J]. J. Huazhong Agric Univ., 1997, 16(1): 37-42.

[16] 张福锁. 环境胁迫和植物根际营养[M]. 北京:中国农业出版社,1997.
Zhang F S. Environment intimidation and nutrition of plant rhizosphere[M]. Beijing: Chinese Agricultural Press, 1997.

[17] 陆文龙,张福锁,曹一平. 低分子量有机酸对土壤磷的活化作用[J]. 中国农业大学学报,1998,3(增刊):49-53.
Lu W L, Zhang F S, Cao Y P. Mobilization of soil phosphorus by low-molecular-weight organic acids[J]. J. China Agric. Univ., 1998, 3(Suppl.): 49-53.

[18] 陆文龙. 低分子量有机酸活化土壤磷的机理[D]. 北京:中国农业大学博士论文,1998.
Lu W L. Mechanism of soil phosphorus mobilization by low-molecular-weight organic acids[D]. Beijing: PhD dissertation, China Agricultural University, 1998.

[19] Palomo L, Claassen N, Jones D L. Differential mobilization of P in the maize rhizosphere by citric acid and potassium citrate[J]. Soil Biol. Biochem., 2006, 38: 683-692.

[20] Gerke J. Kinetics of soil phosphate desorption as affected by citric acid[J]. Z. Pflanzenernahr. Bodenk, 1994, 157: 17-22.

[21] 王庆仁,李继云,李振声. 高效利用土壤磷素的植物营养学研究[J]. 生态学报,1999,19(3):417-421.
Wang Q R, Li J Y, Li Z S. Studies on plant nutrition of efficient utility for soil phosphorus[J]. Acta Ecol. Sin., 1999, 19(3): 417-421.

[22] 中国土壤学会. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社,1999.
China Soil Science Society. Analytical methods of soil and agricultural chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Scientech Press, 1999.

[23] Davenport J R, Pitts M T, Provance W, DeMoranville C. Influence of soil iron and aerobic status on phosphorua availability in cranberry(*Vaccinium macrocarponait*) soils[J]. Acta Hortic. 1997, 446: 369-379.

[24] Miller A J, Schuur E A G, Chadwick OA. Redox control of phosphorus pools in Hawaiian montane forest soils[J]. Geoderma, 2001, 102(3-4): 219-237.

[25] 肖辉林,郑习健. 土壤温度上升对某些土壤化学性质的影响[J]. 土壤与环境,2000,9(4):316-321.
Xiao H L, Zheng X J. Effects of soil warming on some soil chemical properties[J]. Soil Environ. Sci., 2000, 9(4): 316-321.

[26] Scalenghe R, Edwards A C, Ajmone Marsan F *et al*. The effect of reducing conditions on the solubility of phosphorus in a diverse range of European agricultural soils[J]. Eur. J. Soil Sci., 2002, 53: 439-447.

[27] 顾永明,汪寅虎. 磷肥在土壤中的转化及其与土壤有效磷的关系[J]. 土壤,1986,(3):120-125.
Gu Y M, Wang Y H. Transformation of fertilizer phosphates and their relationship with Olsen-P in soil[J]. Soils, 1986, (3): 120-125.

[28] 李淑仪,蓝佩玲,廖新荣,等. 砖红壤磷的有效性研究[J]. 生态环境,2003,12(2):170-171.
Li S Y, Lan P L, Liao X R *et al*. Study on phosphorus availability in Latosols[J]. Ecol. Environ., 2003, 12(2): 170-171.

[29] 刘凡,介晓磊,贺纪正,等. 不同 pH 条件下针铁矿表面磷的配位形式与转化特点[J]. 土壤学报,1997,34:367-373.
Liu F, Jie X L, He J Z *et al*. Characteristic of transform and ligand form on the goethite surface under different pH[J]. Acta Pedol. Sin., 1997, 34: 367-373.

[30] 刘凡,贺纪正,李学垣,等. 磷溶液浓度与针铁矿表面吸附磷的化学状态[J]. 科学通报,1994,39(21):1996-1999.
Liu F, He J Z, Li X Y *et al*. Chemical state of concentration of phosphorus solution and adsorbed phosphorus by the surface of goethite[J]. Chin. Sci. Bull., 1994, 39(21): 1996-1999.

[31] 周启星. 健康土壤学—土壤健康质量与农产品安全[M]. 北京:科学出版社,2005.
Zhou Q X. Health soil science-soil health quality and quality of agricultural products[M]. Beijing: Science Press, 2005.

[32] Parfitt R L. Phosphate adsorption on an oxisol[J]. Soil Sci. Soc Am. J., 1977, 41: 1064-1067.

[33] Sanyal S K, De Datta S K. Chemistry of phosphorus transformations in soil[J]. Adv. Soil Sci., 1991, 16: 1-12.

[34] Hinsinger P. Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root induced chemical changes: A review[J]. Plant Soil, 2001, 237: 173-195.

[35] 王光火. 红壤在不同 pH 下对磷的吸附和解吸作用[J]. 土壤通报,1989,20(2):70-72.
Wang G H. Adsorption and desorption of phosphate under different pH on red soil[J]. Chin. J. Soil Sci., 1989, 20(2): 70-72.

[36] Reddy K R, Connor G A O, Gale P M, Phosphorus sorption capacities of wetland soil and stream sediments impacted by dairy effluent[J]. J. Environ. Qual., 1998, 27: 438-447.

[37] 何振立,袁可能,朱祖祥. 有机阴离子对磷酸根吸附的影响[J]. 土壤学报,1990,27(4):377-384.
He Z L, Yuan K N, Zhu Z X. Effect of organic ligands on phosphate adsorption by hydrous iron and aluminum oxides, kaolinite and red earth[J]. Acta Pedol. Sin., 1990, 27(4): 377-384.

[38] Appelt H. Effect of organic compounds on the adsorption of phosphate[J]. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 1975, 39(4): 628-630.

[39] 王林权,周春菊,王俊儒,等. 鸡粪中的有机酸及其对土壤速效养分的影响[J]. 土壤学报,2002,39(2):268-275.
Wang L Q, Zhou C J, Wang J R *et al*. Organic acids in chicken feces and their effects on availability of nutrients in loess soil[J]. Acta Pedol. Sin., 2002, 39(2): 268-275.

[40] 王艳玲,何园球,李成亮. 柠檬酸对红壤磷素的持续活化效应及其机理探讨[J]. 土壤学报,2007,44(1):130-136.
Wang Y L, He YQ, Li C L. Persistent activating effect of citric acid on phosphorus in red soil and its mechanism[J]. Acta Pedol. Sin., 2007, 44(1): 130-136.