植物营养与肥料学报 2012,18(4):893-899
Plant Nutrition and Fertilizer Science

低温条件下黄腐酸和有机肥活化黑土磷素机制

唐晓乐[1,2], 李兆君[2], 马 岩[2], 梁永超[1,2*]
(1 南京农业大学资源与环境学院,江苏南京 210095; 2 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所/
农业部植物营养与肥料重点实验室,北京 100081)

摘要: 采用恒温控湿培养法,研究了低温(培养温度 10℃)条件下,黄腐酸(FA)和有机肥(OM)对黑土磷素有效性、酸性磷酸酶活性等的影响。结果表明,黄腐酸(FA)和有机肥(OM)均能提高土壤磷素的有效性,与对照相比,土壤有效磷(Olsen-P)分别提高 54.5% 和 111.5%,FA 和 OM 对黑土磷素活化系数分别为 40.6% 和 70.9%。在整个培养过程中,FA 和 OM 处理土壤有机磷含量均随培养时间逐渐降低。但是,与对照相比,FA 和 OM 处理的有机磷含量分别增加了 20.8% 和 42.3%。FA 和 OM 能够提高土壤酸性磷酸酶活性,增加土壤有机质和溶解性有机碳的含量。与对照相比,FA 和 OM 处理土壤酸性磷酸酶活性增加 35.8% 和 50.9%,有机碳(SOC)增加 42.0% 和 35.0%,溶解性有机碳(DOC)增加 70.2% 和 63.7%。相关性分析表明,土壤有效磷与酸性磷酸酶、DOC 呈极显著的正相关,相关系数分别为 0.925 和 0.765($P<0.01$)。黄腐酸和有机肥对黑土磷素的活化机制可能是由于黄腐酸和有机肥处理增加了黑土 DOC 含量,提高了土壤酸性磷酸酶的活性,促进了黑土磷素的转化,进而增加了黑土磷素的有效性。

关键词: 黑土; 磷素活化; 黄腐酸; 有机肥; 酸性磷酸酶
中图分类号: S153.6+2; S155.2+7　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1008-505X(2012)04-0893-07

Mechanism of fulvic acid- and organic manure-mediated phosphorus mobilization in black soil at low temperature

TANG Xiao-le[1,2], LI Zhao-jun[2], MA Yan[2], LIANG Yong-chao[1,2*]
(*1 College of Resources and Environment, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China;*
2 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences/
Key Laboratory of Plant Nutrition and Fertilizer, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China)

Abstract: Microcosm experiments were conducted to study the effects of fulvic acid (FA) and organic manure (OM) on soil phosphorus availability and acidic phosphatase activity in black soil at 10℃. The results showed that both FA and OM could enhance the availability of the soil P. Compared with the control, addition of FA and OM increased Olsen-P content by 54.5% and 111.5%, respectively. The phosphorus activation coefficients of FA and OM were 40.6% and 70.9%, respectively. During the period of incubation, soil organic phosphorus content reduced progressively in both FA and OM treatments. However, compared with the control (CK), soil organic phosphorus content in FA and OM treatments was increased by 20.8% and 42.3%, respectively. Moreover, treatment with both FA and OF was found to enhance acidic phosphatase activity, and soil organic carbon and dissolved organic carbon contents. Compared with CK, acidic phosphatase activity in FA and OM treatments was increased by 35.8%, 50.9%, and soil organic carbon content was increased by 42% and 35%, and dissolved organic carbon by 70.2% and 63.7%, respectively. The positive correlation was found either between acidic phosphatase activity and soil available phosphorus ($r=0.925$, $P<0.01$) or between DOC and soil available phosphorus ($r=0.765$, $P<0.01$) Fulvic acid- and organic manure-mediated phosphorus mobilization in the black

收稿日期: 2011-11-17　　**接受日期:** 2012-03-09
基金项目: 国家"973"项目(2007CB109305)资助。
作者简介: 唐晓乐(1986—),女,河南平顶山人,硕士研究生,主要从事农田养分循环与环境方面的研究工作。E-mail: tangxiaole78@126.com
* 通讯作者 Tel: 010-82108657, E-mail: ycliang@caas.ac.cn

soil tested may be attributed mainly to the enhancement of DOC content and acidic phosphatase activity caused by FA and OM.

Key words: black soil; phosphorus activation; fulvic acid; organic manure; acidic phosphatase

磷是作物生长最为重要的必需营养元素之一，在维持农业的可持续发展和生态系统的平衡中起着重要的作用。磷肥施入土壤后，经过一系列的化学、物理化学和生物化学过程形成难溶性的磷酸盐并迅速为土壤矿物吸附固定或为微生物固持，其在当季作物的利用率仅为10%～25%[1]。黑土是我国东北地区典型的肥沃土壤，有机质和磷素含量非常丰富。但是由于东北地区早春气温较低，土壤微生物活性较弱，土壤磷素转化缓慢，土壤有效磷含量偏低，玉米等作物容易出现缺磷症状，这严重影响了玉米的正常生长发育[2]，因此提高低温条件下土壤磷素的有效性对于维持玉米等作物的生长发育、高产、稳产具有重要的意义[3]，为此国内外学者对土壤磷素的活化进行了大量的探索。杨佳佳[4]研究了温度和水分对黑土磷素转化的影响，结果表明，提高土壤温度和保持合适的土壤湿度可以提高土壤磷酸酶活性，能够增加土壤磷的有效性，进而促进土壤磷素的释放。李兆君等[5]人在大田条件下研究了不同施肥条件下覆膜对玉米干物质积累及吸磷量的影响，在田间条件下证明了提高土壤温度可以促进黑土磷素的活化。黄腐酸是一种天然的高分子有机酸，是有机肥中的活性成份，施入土壤后在一定程度上可以刺激土壤中微生物的活性，能在一定程度上对黑土磷素起到活化作用。安志装[6]的研究表明，在土壤中添加腐殖酸类物质不仅能够阻碍施入的水溶性磷的固定，同时能够活化土壤中原有的磷素。章永松[8]的研究表明，施用奶牛粪和猪粪到两种土壤（老成土和新成土）后，均能增加土壤各种形态有机磷含量。尹金来等[9]人的研究表明施用猪粪能显著提高石灰性土壤无机磷组分的含量，从而增加黑麦草对磷的吸收。章永松等[10]人研究表明猪粪在分解过程中产生的有机酸对不同磷酸盐均有较好的溶解效果。然而，这些研究大部分在室温下进行的，鲜见关于低温条件下黄腐酸和有机肥对黑土磷素有效性影响等的报道。鉴此，本研究以东北黑土为材料，研究了低温条件下，黄腐酸（FA）和有机肥（由鸡粪发酵而成，OM）对黑土磷素转化及其有效性的影响及差异，旨在为探明黄腐酸和有机肥对黑土磷素的活化效应及其机理提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤为黑土，取自吉林省农业科学院公主岭实验基地，磷素活化材料为黄腐酸（FA）和有机肥（由鸡粪发酵制成，OM），均购自北京市土肥工作站，其中黄腐酸为棕褐色粉末，易溶于水，其中含有机质含量50%、黄腐酸≥95%。土壤和活化材料取回后均过2 mm筛，分成两部分，一部分储存于4℃冰箱，供室内培养试验用。另一部分风干后进行基本理化性状测定。土壤及两种供试磷素活化材料的基本理化性状见表1。

表1 供试土壤和材料的基本理化性状

Table 1 Some selected basic properties of soil and materials tested

土壤/供试材料 Soil/Tested material	全磷 Total P (g/kg)	全氮 Total N (g/kg)	速效磷 Olsen-P (mg/kg)	有机碳 SOC (g/kg)	溶解性有机碳 DOC (mg/kg)	有机磷 Organic P (mg/kg)	酸性磷酸酶活性 Acidic phosphatase activity [mg/(kg·h)]
黑土 Black soil	0.65	2.43	45.15	9.63	30.05	238	62
黄腐酸 FA	9.8	7.83	291.24	263.92	3899	580	439
有机肥 OM	13.1	21.93	362.79	201.86	2379	640	608

注(Note): FA—Fulvic acid; OM—Organic manure; SOC—Organic carbon; DOC—Dissolved organic carbon.

1.2　试验设计及实施

试验设置 3 个处理：CK（土壤中不添加任何物质）、FA（土壤中加入黄腐酸，添加量为 DOC 50.0 mg/kg 土）、OM（土壤中加入有机肥，添加量为 DOC 50.0 mg/kg 土），每个处理设置 3 个重复。称取 300.0 g 土于 500 mL 的广口玻璃瓶中，按照试验设计分别加入一定量的黄腐酸和有机肥，用去离子水调节土壤含水量至土壤最大持水量的 50%（相当于田间最大持水量的 60%），充分混合均匀。用透明胶布封闭瓶口，中央留 1 个小孔并插一吸管供通气，于 10℃恒温培养箱中培养，连续培养两个月。培养期间，通过称重法，以去离子水来补充因蒸发而损失的水分。分别于培养的第 1、7、15、30、60 d 对土壤进行取样，测定土壤有效磷、有机磷、酸性磷酸酶活性、有机碳（SOC）、溶解性有机碳（DOC）。

1.3　测定项目与方法

土壤有效磷含量采用碳酸氢钠浸提法测定[11]；土壤有机磷含量采用灼烧法[12]；土壤酸性磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法测定[13-14]；SOC 用重铬酸钾容量法－外加热法测定[15]；DOC 经蒸馏水提取后，采用重铬酸钾氧化－外加热法测定[15]。试验数据采用 Excel 2003，SPSS 软件分析。其中黄腐酸和有机肥处理的土壤有效磷及磷素活化系数分别按照如下公式计算：

土壤有效磷＝活化剂处理土壤有效磷含量－活化剂中的有效磷含量

磷素活化系数（%）＝［（活化剂处理土壤有效磷含量－活化剂磷含量－对照处理土壤有效磷含量）/对照处理土壤有效磷含量］×100

2　结果分析

2.1　两种添加物对黑土 Olsen-P 的影响

FA 和 OM 处理对黑土 Olsen-P 的影响见图 1，由图 1 可知，在培养时期内，FA 和 OM 处理均能显著提高黑土中 Olsen-P 的含量。CK 处理土壤 Olsen-P含量在 1～30 d 随培养时间的延长逐渐降低，而 60 d 时略有升高。FA 和 OM 处理土壤 Olsen-P 含量在 1～30 d 内随时间延长逐渐升高，而 60 d 时略有降低。在培养的第 30 d，FA 和 OM 对黑土磷素的有效性影响最大，OM 处理和 FA 处理中的黑土 Olsen-P 含量均达最大值。如在 30 d，FA 处理黑土 Olsen-P 含量为 59.92 mg/kg，较对照增加 113.6%，而 FA 处理土壤 Olsen-P 含量为 82.22 mg/kg，较对照增加 193.12%。

2.2　两种添加物对黑土有机磷的影响

由图 1 还可以看出，在培养期间，FA 和 OM 处理土壤有机磷含量均高于 CK 处理，且 OM 处理土壤有机磷含量显著高于 FA 处理。在培养的第 1d，FA 和 OM 处理土壤有机磷含量分别为 357.41 mg/kg和 392.73 mg/kg，与 CK 处理相比，土壤有机磷含量分别提高了 41.5% 和 55.5%，随后有机磷含量逐渐降低。在 7、15、30 和 60 d，与 CK 处理相比，FA 处理土壤有机磷含量分别提高了 18.3%、17.7%、13% 和 12%，OM 处理土壤有机磷含量分别提高了 48.2%、43.6%、27.5% 和 36.4%。

2.3　两种添加物对黑土酸性磷酸酶活性的影响

图 2 显示，在整个培养期间，FA 和 OM 处理土壤酸性磷酸酶活性均高于 CK 处理。在培养的 1～

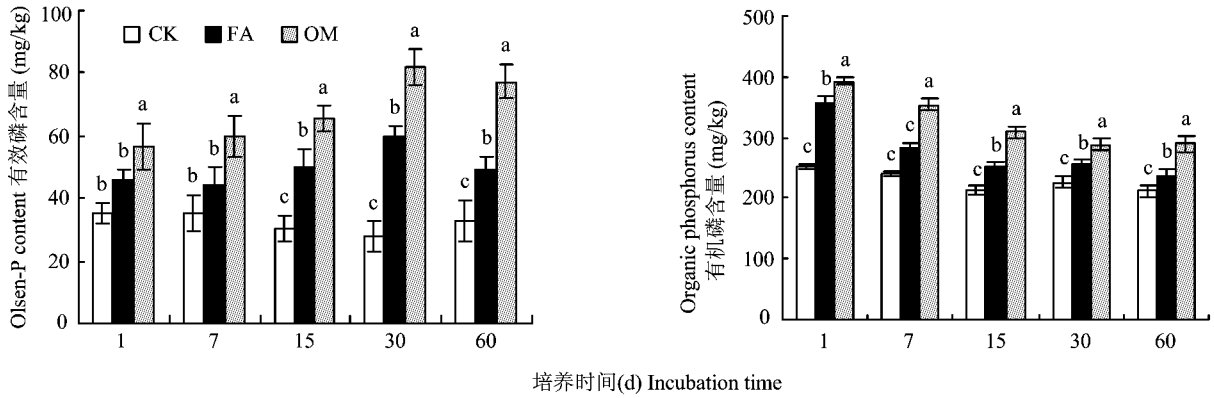

图 1　不同处理对土壤 Olsen-P 和有机磷含量的影响

Fig.1　Effect of different treatments on Olsen-P and organic phosphorus content in soil

［注（Note）：FA—黄腐酸 Fulvic acid；OM—有机肥 Organic manure. 柱子上方不同小写字母表示处理之间差异在 $P<0.05$ 水平上显著 Different small letters above the bars indicate significantly different among different treatments at $P<0.05$ level］

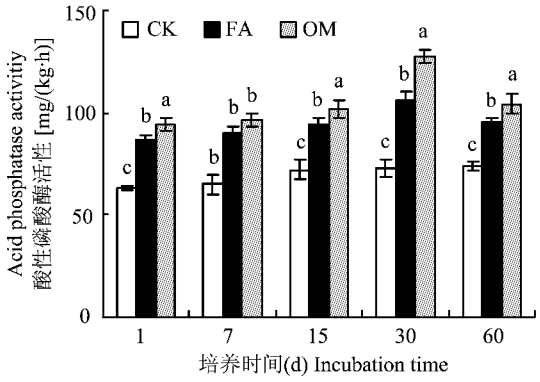

图2 不同处理对土壤酸性磷酸酶活性的影响

Fig.2 Effect of different treatments on acid phosphatase activity in soil

[注(Note): FA—黄腐酸 Fulvic acid; OM—有机肥 Organic manure. 柱子上方不同小写字母表示处理之间差异在 $P<0.05$ 水平上显著 Different small letters above the bars indicate significantly different among different treatments at $P<0.05$ level.]

30 d,FA 和 OM 处理土壤酸性磷酸酶活性随培养时间的延长逐渐增加。其中 FA 处理土壤酸性磷酸酶活性与 CK 处理相比,分别增加了 31.8%、37.7%、30.8%、44.9%,OM 处理土壤酸性磷酸酶活性与 CK 处理相比,分别增加了 49.2%、48.7%、41.8%、73.7%。FA 和 OM 处理,在培养的第 30 d 土壤酸性磷酸酶活性达最大,分别为 255.86 mg/(kg·h)和 288.55 mg/(kg·h),在培养的第60 d 二者酸性磷酸酶活性均降低。

2.4 两种添加物对黑土有机碳(SOC)和溶解性有机碳(DOC)的影响

FA 和 OM 处理对土壤 SOC 含量的影响见图 3,由图 3 可以看出,CK 处理在培养时间内 SOC 含量无明显变化,FA 和 OM 处理在 1 ~60 d SOC 含量随时间延长逐渐降低。在培养的第60 d,CK 处理土壤的 SOC 含量为 13.30 g/kg,FA 和 OM 处理,SOC 含量均达最低值,分别为 23.01 g/kg 和 21.15 g/kg 。

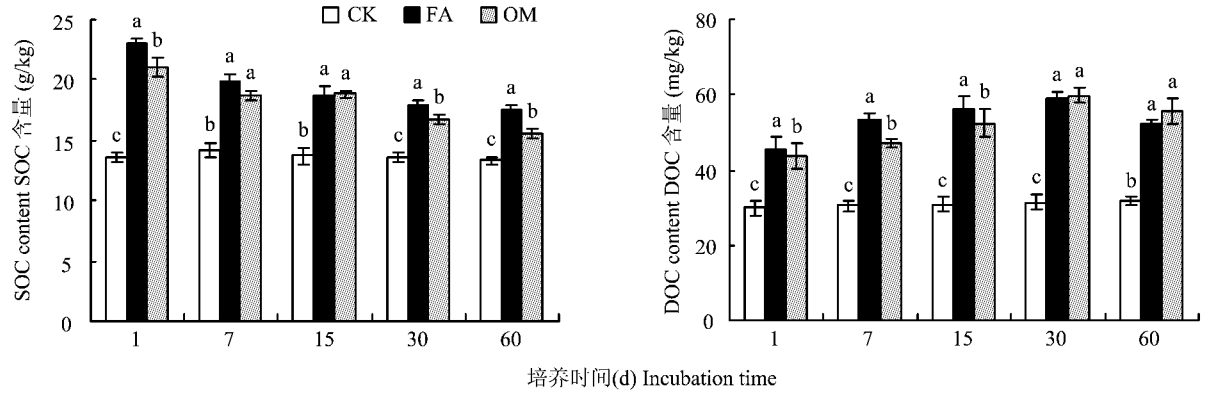

图3 不同处理对土壤有机碳(SOC)和溶解性有机碳(DOC)含量的影响

Fig.3 Effect of different treatments on soil organic carbon (SOC) and dissolved organic carbon(DOC) content in soil

[注(Note): FA—黄腐酸 Fulvic acid; OM—有机肥 Organic manure. 柱子上方不同小写字母表示处理之间差异在 $P<0.05$ 水平上显著 Different small letters above the bars indicate significantly different among different treatments at $P<0.05$ level.]

在整个培养期间,FA 和 OM 处理,DOC 含量均显著高于 CK 处理(图 3)。在培养的 1 ~ 30 d 内 FA 和 OM 处理的土壤 DOC 含量逐渐升高。与 CK 处理相比,在培养的第 1、7、15、30 d,FA 处理土壤 DOC 含量分别提高了 52%、75%、83%、89%,OM 处理土壤 DOC 含量分别提高了 46%、55%、70%、92%。

3 讨论

CK 处理在 30 d 土壤 Olsen-P 含量与培养初期相比,土壤 Olsen-P 的有效性略有降低,可能是因为土壤中供微生物利用的能源如“C 和 N”随着培养时间的延长逐渐减少,活化土壤磷的微生物数量可能随之减少,活性降低,进而磷酸酶活性也随之降低,影响了磷素的释放,此外土壤对磷素有化学沉淀机制、闭蓄机制和生物吸收机制等很多固定机制,这些可能都是导致土壤 Olsen-P 含量降低的原因。FA 和 OM 处理在第 30 d 土壤 Olsen-P 含量均达最高值,与 CK 处理相比,FA 和 OM 对土壤磷素的活化系数分别达到了 81.0% 和 122.3%(表 2),FA 在培

表 2　FA 和 OM 处理在培养时期内的土壤磷的活化系数

Table 2　P activation coefficients of FA and OM treatments during the incubation period

培养时间 Incubation time (d)	活化系数（%）Activation coefficient	
	FA	OM
1	21.1	29.6
7	17.2	38.3
15	46.2	69.1
30	81.0	122.3
60	37.4	95.0

注（Note）：FA—黄腐酸 Fulvic acid；OM—有机肥 Organic manure.

养时期内平均活化系数为 40.6%，OM 为 70.9%。土壤有机质分解、微生物的呼吸代谢产生的有机酸能够在一定程度上对土壤中磷素的释放起着重要作用[16]。在整个培养时期，FA 和 OM 处理的土壤 Olsen-P 含量均高于对照处理，可能是由于活化材料 FA 和 OM 中有机物质分解产生了有机酸，有机酸具有较强的络合能力，能与阴离子竞争吸附点位，可以溶解部分难溶性无机磷，减少磷的固定、促进磷的释放[17]。王林权等[18]的研究表明，鸡粪在腐熟过程中产生大量有机酸，这些有机酸在活化土壤磷素方面起重要作用。Staunton 等人研究表明，二元有机酸和三元有机酸可减少土壤中铁铝胶体对磷的吸附，提高土壤中磷的有效性[19-20]。此外，施肥制度会影响微生物的变化，添加有机肥有利于提高土壤微生物生物量，有利于保持土壤的生物化学环境及促进土壤的生物学活性[21]，王芳[22]等人的研究表明土壤中添加有机物料后，土壤微生物量碳、氮与速效磷含量均显著增加，且土壤微生物量碳、氮与速效磷呈显著正相关。可能是由于有机肥的施用提高了土壤中有机质的含量，而有机质具有改善土壤理化性状、提高土壤肥力的作用，为微生物生长提供了良好的环境，进而促进了土壤磷素的释放[23]。

酸性磷酸酶是驱动土壤磷素转化的重要驱动者[24]，是影响土壤有机磷的分解转化及其生物有效性的重要因素[25]，可以有效地活化土壤中的有机磷。添加 FA 和 OM 的土壤，酸性磷酸酶活性均呈先增后减的趋势，可能是由于 FA 和 OM 的加入为土壤微生物提供了一定的能源，土壤微生物活性增强，数量增多，进而提高了酸性磷酸酶活性。随着培养时间的延长，土壤中可利用能源减少，从而抑制了土壤微生物的生长，酸性磷酸酶活性在后期降低。George 等[26]在其研究中指出，酸性磷酸酶与速效磷直接相关。邱现奎等[27]在研究中得出，土壤 Olsen-P 与酸性磷酸酶活性呈显著的正相关。这与本研究得出的结论相似，即土壤酸性磷酸酶活性与土壤 Olsen-P 含量呈显著正相关关系，相关系数为 0.925（表 3）。土壤 pH 与土壤酶活性之间的关系较为密切[28]，王涵等[29]的研究表明，添加酸对土壤酶活性主要起抑制作用，添加碱主要起激活作用，pH 变化对微生物活性的影响是造成土壤酶活性变化的主要因素。

表 3　土壤养分含量和酸性磷酸酶活性之间的相关性

Table 3　Correlations among soil nutrient contents and acid phosphatase activities

参数 Parameter	速效磷 Olsen-P	有机磷 Organic P	酸性磷酸酶 Acid phosphatase	溶解性有机碳 DOC	有机碳 SOC
速效磷 Olsen-P	1				
有机磷 Organic P	0.301	1			
酸性磷酸酶 Acid phosphatase	0.925**	0.486	1		
溶解性有机碳 DOC	0.765**	0.293	0.797**	1	
有机碳 SOC	0.376	0.799**	0.217	0.658*	1

注（Note）：SOC—Organic carbon；DOC—Dissolved organic carbon.　*，** 分别表示相关系数在 5% 和 1% 水平显著 Indicate correlation coefficient is significant at the 5% and 1% levels, respectively.

溶解性有机碳（DOC）是土壤有机碳中最活跃的部分，是微生物可以直接利用的有机碳源[30]，并且它还会影响土壤中有机和无机物质的转化、迁移和降解，如在本研究中 DOC 与速效磷之间呈极显著正相关，相关系数为 0.765（表 3），这可能是由于 DOC 是疏水性中性化合物，从而抑制了土壤中磷的

固定。Donald 等[31]通过对森林土壤的研究,得出土壤中磷素分配可能和 P 与 DOC 的结合有关的结论。Ohno 和 Crannell[32]在研究中指出,从绿肥中提取的 DOC 可以抑制土壤磷吸附,从而增加了磷的稳定性。本研究中 1 ~ 30 d FA 和 OM 处理的土壤 SOC 随培养时间延长递减而 DOC 递增(图 3),表明 SOC 向 DOC 进行了转化,而对照处理的 SOC 和 DOC 无明显变化,这可能是 FA 和 OM 的施入促进了土壤微生物的生长,从而加快了土壤有机碳的矿化,有机碳逐渐转化为可溶性碳,再被微生物吸收利用[29]。已有资料表明,土壤有机磷占土壤全磷的 10% ~ 25%,有机磷通过土壤磷酸酶的作用,转化为无机磷被植物吸收利用[33]。本研究中 FA 和 OM 处理,土壤有机磷、有机碳含量随培养时间逐渐降低(图 1、图 3),在低温培养的一个月内土壤 Olsen-P 含量、土壤酸性磷酸酶活性随培养时间延长逐渐升高(图 1、图 2),随后逐渐降低,这可能是由于土壤中施入 FA 和 OM 后增加了土壤有机磷库和土壤有机碳含量,微生物活性增强,酸性磷酸酶活性得到了提高,在酸性磷酸酶的作用下有机磷向无机磷进行转化,土壤 Olsen-P 含量得到了提高[34-35]。近些年,尽管土壤磷素活化相关作用机理的研究已相继展开,然而由于受活化材料种类、土壤类型和试验条件等多方面因素的影响,此方面的研究仍需深入。

参考文献:

[1] 沈仁芳,蒋柏藩. 石灰性土壤无机磷的形态分布及其有效性[J]. 土壤学报, 1992, 29(1): 80-86.
Shen R F, Jiang B F. Dietribution and availability of various forms of inorganic-P in calcareous soils[J]. Acta Pedol. Sin., 1992, 29(1): 80-86.

[2] 韩秉进,张旭东,隋跃宇,等. 东北黑土农田养分时空演变分析[J]. 土壤通报, 2007, 38(2): 238-241.
Han B J, Zhang X D, Sui Y Y *et al*. Analysis for temporal and spatial changes of black soil cropland in the northeast area of China [J]. Chin. J. Soil Sci., 2007, 38(2): 238-241.

[3] Sharma P K, Kaha A K. Factors influencing diffusion of phosphate in some soils of Himalayan region[J]. J. Indian Soc. Soil Sci., 1985, 33: 378-383.

[4] 杨佳佳,李兆君,梁永超,等. 温度和水分对不同肥料条件下黑土磷形态转化的影响及机制[J]. 植物营养与肥料学报, 2009,15(6): 1295-1302.
Yang J J, Li Z J,Liang Y C *et al*. Effects and their mechanisms of temperature and moisture on phosphorous transformation in black soil manured with different fertilizers[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2009, 15(6): 1295-1302.

[5] 李兆君,杨佳佳,侯云鹏,等. 不同施肥条件下覆膜对玉米干物质积累及吸磷量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(3): 571-577.
Li Z J, Yang J J, Hou Y P *et al*. Effect of plastic film mulching on drymass accumulation and phosphorus uptake of corn receiving different fertilizers[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2011, 17(3): 571-577.

[6] 安志装,介晓磊,李有田,等. 不同水分和添加物料对石灰性土壤无机磷形态转化的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(1): 58-64.
An Z Z, Jie X L, Li Y T *et al*. Effect of different water and material on inorganic phosphorus transformation in calcareous soil [J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2002, 8(1): 58-64.

[7] 李丽,武丽萍,成绍鑫. 腐植酸对磷肥增效作用的研究概括[J]. 腐植酸, 1998,(4): 1-6.
Li L, Wu L P, Cheng S X. Humic acid on phosphate fertilizer efficiency in vitro summary[J]. Humic Acid, 1998, (4): 1-6.

[8] Zhang Y S, Ni W Z, Sun X. Influence of organic manure on organic phosphorus fraction in soils[J]. Pedosphere, 1993, 3 (4): 361-369.

[9] 尹金来,沈其荣,周春霖,等. 猪粪和磷肥对石灰性土壤无机磷组分及有效性的影响[J]. 中国农业科学, 2001, 38(3): 295-300.
Yi J L, Shen Q R, Zhou C L *et al*. Effects of pig slurry and P fertilizer on inorganic-P fractions of soils and their availabilities [J]. Sci. Agric. Sin., 2001, 38(3): 295-300.

[10] 章永松,林咸永,罗安程,等. 有机肥(物)分解产生的有机酸其对不同形态磷的活化作用[J]. 植物营养与肥料学报, 1998, 4(2): 145-155.
Zhang Y S, Lin X Y, Luo A C *et al*. Studies on activation of phosphorus by organic manure in soils and its mechanisms[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 1998, 4(2): 145-150.

[11] 史瑞和. 土壤农化分析[M]. 北京: 农业出版社, 1996. 200-320.
Shi R H. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: Agriculture Press, 1996. 200-320.

[12] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 农业科技出版社, 2000. 169-170.
Lu R K. Agriculture chemical analysis methods of soil [M]. Beijing: Agricultural Science and Technology Press, 2000. 169-170.

[13] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
Guan S Y. Soil enzyme and research method [M]. Beijing: Agriculture Press, 1986.

[14] 赵兰坡,姜岩. 土壤磷酸酶活性测定方法探讨[J]. 土壤通报, 1986, 17(3): 138-141.
Zhao L P, Jiang Y. Studies on the method of measuring soil phosphatase activity[J]. Chin. J. Soil Sci., 1986, 17(3): 138-141.

[15] 鲍士旦. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2005. 30-34.
Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: Agriculture Press, 2005. 30-34.

[16] 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.

[17] 胡红青, 廖丽霞, 王兴林. 低分子量有机酸对红壤无机态磷转化及酸度的影响[J]. 应用生态学报, 2002, 13(7): 867-870.
Hu H Q, Liao L X, Wang X L. Effect of low molecular weight organic acids on inorganic phosphorus transformation in red soil and its acidity[J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2002, 13(7): 867-870.

[18] 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.

[19] Stauton S, Leprince F. Effect of pH and some organic anions on the solubility of soil phosphate : Implication for P bioavailability [J]. Eur. J. Soil Sci., 1994, 47: 231-239.

[20] Kpomblokou K. Effect of organic acids on release of phosphorus from phosphate rocks[J]. Soil Sci., 1994, 158(6): 443-453.

[21] 陈吉, 赵炳梓, 张佳宝, 等. 长期施肥处理对玉米生长期潮土微生物生物量和活度的影响[J]. 土壤学报, 2010, 47(3): 122-129.
Chen J, Zhao B Z, Zhang J B *et al*. Effect of long-time fertilization on microbial biomass and activity in fluvo-aquic soil during maize growth period[J]. Acta Pedol. Sin., 2010, 47(3): 122-129.

[22] 王芳, 张金水, 高鹏程, 等. 不同有机物料培肥对渭北旱塬土壤微生物学特性及土壤肥力的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(3): 702-709.
Wang F, Zhou J S, Gao P C *et al*. Effects of application of different organic materials on soil microbiological properties and soil fertility in Weibei rainfed high land[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2011, 17(3): 702-709.

[23] 张焕军, 郁红艳, 丁维新. 放线菌含量长期施用有机无机肥对潮土微生物群落的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(12): 3308-3314.
Zhang H J, Yu H Y, Ding W X. The influence of the long-term application of organic manure and mineral fertilizer on microbial community in calcareous fluvo-aquic soil[J]. Acta Ecol. Sin., 2011, 31(2): 3308-3314.

[24] Liang Y C, Yang Y F, Yang C G. Soil enzymatic activity and growth of rice and barley as influenced by organic manure in an anthropogentic soil[J]. Geoderma, 2003, 115: 149-160.

[25] 于群英. 土壤磷酸酶活性及其影响因素研究[J]. 安徽技术师范学院学报, 2001, 15(4): 5-8.
Yu Q Y. Research of soil phosphatase activities and influence factors[J]. J. Anhui Technol. Teachers Coll., 2001, 15(4): 5-8.

[26] George T S, Gregory P J, Wood M *et al*. Phosphatase activity and organic acids in the rhizosphere of potential agroforestry species and maize[J]. Soil Biol. Biochem., 2002, 34: 1487-1494.

[27] 邱现奎, 董元杰, 万勇善, 等. 不同施肥处理对土壤养分含量及土壤酶活性的影响[J]. 土壤, 2010, 42(2): 249-255.
Qiu X K, Dong Y J, Wan Y S *et al*. Effects of different fertilizing treatments on contents of soil nutrients and soil enzyme activity [J]. Soils, 2010, 42(2): 249-255.

[28] Turner B L, Haygarth P M. Phosphatase activity in temperate pasture soils: Potential regulation of labile organic phosphorus turnover by phosphodiesterase activity[J]. Sci. Tot. Environ., 2005, 34(3): 27-36.

[29] 王涵, 王果, 黄颖颖, 等. pH 变化对酸性土壤酶活性的影响[J]. 生态环境, 2008, 17(6): 2401-2406.
Wang H, Wang G, Hang Y Y *et al*. The effects of pH change on the activities of enzymes in an acid soil[J]. Ecol. Environ., 2008, 17(6): 2401-2406.

[30] Kouno K, Wu J, Brookes P C. Turnover of biomass C and P in soil following incorporation of glucose or ryegrass[J]. Soil Biol. Biochem., 2002, 34: 617-622.

[31] Donald R G, Anderson D W, Stewart J W B. Potential role of dissolved organic carbon in phosphorus transport in forested soils [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1993, 61: 920-927.

[32] Ohno T, Crannell B S. Green and animal manure-derived dissolved organic matter effects on phosphorus sorption[J]. J. Environ. Qual., 1996, 25: 1137-1143.

[33] 王伯仁, 徐明岗, 文石林. 长期施肥对红壤旱地磷组分及磷有效性的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2002, 28(4): 293-296.
Wang B R, Xu M G, Wen S L. The effects of long term fertilization on chemical fractions and availability of inorganic phosphate in red soil upland[J]. J. Hunan Agric. Univ. (Nat. Sci.) 2000, 28(4): 294-299.

[34] Guo B, Liang Y C, Li Z J, Han F X. Phosphorus adsorption and bioavailability in a paddy soil amended with pig manure compost and decaying rice straw[J]. Comm. Soil Sci. Plant Anal., 2009, 40: 2185-2199.

[35] 孟娜, 廖文华, 贾可, 等. 磷肥、有机肥对土壤有机磷及磷酸酶活性的影响[J]. 河北农业大学学报, 2006, (7): 57-59.
Meng N, Liao W H, Jia K *et al*. Effect of phosphorus fertilizer and organic manure on organic phosphorus content and the activity of phosphatase in soils[J]. J. Agric. Univ. Hebei, 2006, (7): 57-59.