

不同肥力壤土、棕壤磷酸酶活性对土壤培养温度和含水量的响应

于星辰¹ 刘倩¹ 温智辉¹ 杨学云² 韩晓日³ 李海港^{1*}

(1. 中国农业大学 资源与环境学院/植物-土壤相互作用教育部重点实验室,北京 100193;

2. 西北农林科技大学 资源环境学院,陕西 杨凌 712199;

3. 沈阳农业大学 土地与环境学院,沈阳 110866)

摘要 为研究土壤培养温度,含水量和肥力差异对土壤磷酸酶活性的影响,采用室内培养,以不同肥力(CK、NPKM)长期定位试验土壤(壤土、棕壤)为供试土壤,分别设定3个培养温度(-20、4和25℃)和3个水分处理(10%、25%和40%),避光培养2个月,测定土壤磷酸酶活性变化。结果表明:1)土壤磷酸酶活性变化对培养温度响应不敏感;2)培养土壤含水量显著影响土壤磷酸酶活性变化,且与土壤肥力关系密切。对于含水量25%处理,低肥力CK在土壤含水量为40%时,磷酸酶显著增加50%以上;3)土壤有机磷浓度与土壤磷酸酶活性呈正相关,相同土壤有机磷浓度时,棕壤的磷酸酶活性始终大于壤土。因此,土壤水分是影响低肥力土壤有机磷积累-矿化动态平衡的重要因素,而有机磷浓度是决定土壤磷酸酶活性主要因素之一。

关键词 土壤;磷酸酶活性;有机磷浓度;土壤培养温度;土壤含水量

中图分类号 S158.3

文章编号 1007-4333(2018)01-0037-07

文献标志码 A

Soil phosphatase activity of loessial soil and brown earth with different fertility in response to culture temperature and soil moisture

YU Xingchen¹, LIU Qian¹, WEN Zhihui¹, YANG Xueyun², HAN Xiaori³, LI Haigang^{1*}

(1. College of Resources and Environment Sciences/Key Laboratory of Plant-Soil Interactions, MOE, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. College of Resources and Environment, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712199, China;

3. College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

Abstract In order to study the response of soil phosphatase activity to cultural temperature, soil moisture and soil fertility, a laboratory culture experiment was conducted with two different fertility soils from two long-term fertilizer experiments (soil types: loessial soil and brown earth; fertilizer treatments: CK and NPKM), and soil cultured in an incubator under three culture temperature (-20, 4, 25 °C) and three soil moisture levels (10%, 25%, 40%). Soil phosphatase activity of soils was determined after two months cultivating. The results showed that: 1) Soil culture temperature has less effect on soil phosphatase activity; 2) Soil moisture significantly changed soil phosphatase activity, but it was closely related to soil fertility. For low fertility soil (CK), soil phosphatase activity with 40% soil moisture increased more than 50% in contrast to treatment at 25%; 3) There was a positive correlation between soil organic phosphorus concentration and soil phosphatase activity. Soil phosphatase activity of brown earth treatments was always higher than loessial soil treatments at the same soil organic phosphorus level. In conclusion, soil moisture significantly affected the balance between accumulation and mineralization of soil organic phosphorus in low fertility soil, and soil organic phosphorus concentration was one of determining factors of soil phosphatase activity.

Keywords soil; phosphatase activity; soil organic phosphorus; soil culture temperature; soil moisture

收稿日期: 2017-02-17

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFD0200200, 2017YFD0200202)

第一作者: 于星辰, 本科生, E-mail: 18811780869@163.com

通讯作者: 李海港, 副教授, 主要从事根际研究, E-mail: haigangli@cau.edu.cn

土壤有机磷矿化是全球磷循环的重要组成部分,其矿化速率与土壤磷酸酶的活性密切相关^[1-2]。我国耕作土壤有机磷占土壤总磷的25%~56%,东北黑土可达70%以上^[3]。植物根系不能直接吸收利用有机磷^[4],土壤有机磷需要经过土壤磷酸酶的水解作用转化为无机磷酸根离子以后才能被根系吸收^[5]。根据酶活性对环境pH的响应特点,土壤磷酸酶可以大致分为三类:酸性、中性和碱性磷酸酶^[6]。随环境pH从2.0增加到13.0,酸性、中性和碱性磷酸酶活性都呈现先升高后降低的趋势,酸性磷酸酶活性在pH 5.0~6.0时达到最大,中性磷酸酶活性在pH 7.0左右时达到最大,而碱性磷酸酶活性最大时pH为10.0~13.0^[7]。研究表明土壤中的酸性磷酸酶来自于微生物和植物,而碱性磷酸酶大部分来自于微生物^[8]。对硝基苯磷酸二钠(*p*-Nitrophenyl Phosphate Disodium, pNPP)比色法^[9]是评价土壤磷酸单酯酶活性的常用方法,选择不同pH缓冲液分别测定土壤酸性(pH=5.2)、中性(pH=7.0)和碱性磷酸酶(pH=10.0)活性的潜力。以往大多数研究在评估植物活化土壤有机磷潜力时,往往选择测定土壤酸性磷酸酶活性^[1-2]。如果缓冲液pH与土壤原始pH存在差异,那么土壤酸性磷酸酶活性就不能反映土壤磷酸酶的真实活性和土壤有机磷的活化能力。因此,在土壤原始pH条件下测定的土壤磷酸酶活性更接近于土壤磷酸酶的真实活性。

土壤有机磷的矿化作用受土壤磷酸酶活性的影

响,但土壤磷酸酶活性亦受很多因素影响,如土壤温度、pH、含水量及有机磷含量等。当温度升高时,土壤有机磷的矿化速率增加,当温度高于30℃时明显增加^[10]。当pH从酸性升高至中性的过程中,有机磷矿化速率逐渐增大,不过当pH为碱性时,pH上升则引起有机磷溶解性的降低,导致有机磷矿化速率随之下降^[2]。土壤含水量对土壤有机磷矿化速率的作用效果存在争议,有学者发现土壤有机磷的矿化速率随土壤含水量的增加而上升^[11],也有研究者得出相反的结论^[12]。基于以上研究背景,虽然土壤有机磷的矿化需依托土壤磷酸酶进行,但有关土壤磷酸酶活性的影响因素研究还缺乏系统性;土壤有机磷作为底物也能改变土壤磷酸酶活性^[13]。但对其土壤特异性的研究也较少。

壤土和棕壤是我国重要的耕作土壤,本研究依托长期定位试验,拟研究土壤类型、肥力水平、温度和土壤含水量对土壤磷酸酶活性的影响。

1 试验材料与方法

1.1 土壤采集

试验所用土壤壤土和棕壤均取自长期定位试验,壤土试验基地位于黄土高原南部的陕西省杨凌示范区五泉镇(N34°17'51",E108°00'48"),试验始于1990年,种植体系为小麦-玉米轮作,一年两季;棕壤试验样地为沈阳农业大学后山(N40°48',E123°3'),试验始于1979年,种植方式为玉米-玉米-大豆轮作,一年一季。原始土壤养分含量见表1。

表1 原始试验土壤的养分含量

Table 1 Nutrients concentration of original soils

土壤 Soil	pH	有机质/(g/kg) Organic matter	全氮/ (g/kg) Total N	全磷/ (g/kg) Total P	碱解氮/(mg/kg) Alkali-hydrolyzale nitrogen	速效磷/ (mg/kg) Olsen P	速效钾/ (mg/kg) NH ₄ OAc-K
壤土 Loessial soil	8.0	10.7	0.83	0.61	62.4	9.6	191.0
棕壤 Brown earth	6.5	15.9	0.80	0.38	105.5	6.5	97.9

1.2 试验设计

试验在中国农业大学资源与环境学院植物营养实验室进行。2009年从每个试验点采集不施肥处理(CK,低肥力土)和有机无机配施处理(NPKM,高肥力土)的土壤样品,试验土壤NPKM处理的施肥管理见表2。

将土样风干,研磨,过2 mm筛。设3个培养温度处理:−20、4和25℃;3个水分处理:10%、25%

和40%(土壤质量含水量),在电热恒温隔水式培养箱(SGSP-02)中避光密封培养2个月。每个处理4个重复,共计96个培养皿(图1)。

温度处理:称取40 g风干土装入培养皿中,保持土壤含水量在25%(土壤最大持水量的75%),在−20、4和25℃条件下恒温遮光培养,2个月后取鲜土测定磷酸酶活性,风干后测定有机磷含量。

表 2 试验土壤 NPKM 处理的施肥管理

Table 2 Fertilizer application of NPKM treated soil

土壤处理(施肥量) Soil treatment (Fertilizer amount)	壤土 NPKM 处理 NPKM treated loessial soil		棕壤 NPKM 处理 ^b NPKM treated brown earth	
	冬小麦 Winter wheat	夏玉米 Summer maize	玉米 Maize	大豆 Soybean
	氮肥/(kg/(hm ² ·年))(N)	165.0 a	187.5 a	120.0
磷肥/(kg/(hm ² ·年))(P ₂ O ₅)	132.00	56.25	60.00	90.00
钾肥/(kg/(hm ² ·年))(K ₂ O)	82.50	93.75	30.00~60.00	60.00~90.00

注:a 为有机肥氮(牛粪): 无机肥氮=7:3; b 为棕壤 NPKM 的施肥量为猪厩肥 37.5 t/(hm²·年)。

Note: a manure N (dairy): chemical fertilizer N = 7:3; b for NPKM treatment of brown earth 37.5 t/(hm²·a) swine manure.

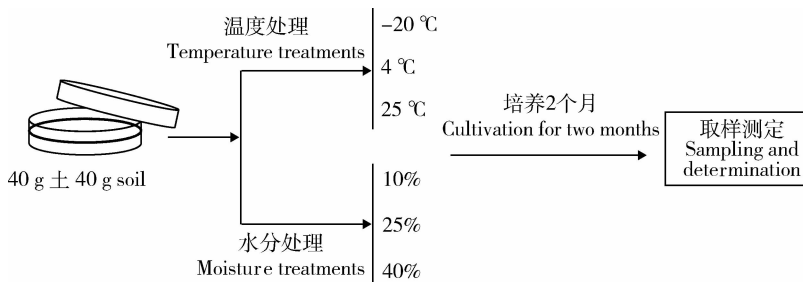


图 1 试验处理图示

Fig. 1 Diagram of experimental treatments

水分处理: 称取 40 g 风干土装入培养皿中, 设 10%、25% 和 40% (土壤最大持水量的 30%、75% 和 120%) 3 个土壤含水量梯度, 保持温度在 25 °C 遮光培养 2 个月后, 取样测定, 测定方法同上温度处理。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 有机磷浓度测定

称取通过 60 目的风干土壤样品 1.000 g 置于 15 mL 瓷坩埚中, 在 550 °C 马福炉中灼烧土壤样品 1 h, 取出冷却, 再称取 1.000 g 未经灼烧的同一土壤样品, 用 0.2 mol/L (1/2 H₂SO₄) 溶液 100 mL 将土样分别洗入 2 个 200 mL 容量瓶中, 摇匀后, 在 40 °C 烘箱内保温 1 h。取出, 冷却至室温, 加水定容, 过滤。吸取适量滤液, 利用钼锑抗比色法测定。灼烧的土壤样品有机磷浓度减去未灼烧土壤样品的差值即为有机磷浓度^[14]。

1.3.2 磷酸酶活性测定

测定酶活性组: 取大约 1 g 鲜土放入适量 0.2 mmol/L CaCl₂ 中, 摇匀后, 取 0.5 mL 土壤悬浊液到 2 mL 带盖的微型离心管中, 将醋酸钠 (NaOAc)

的 pH 调至土壤溶液的 pH (±0.5), 其中壤土所用的缓冲液 pH 为 8.00, 棕壤为 6.50。加入 0.4 mL 1 200 mmol/L 醋酸-醋酸钠 (AC-NaOAc) 缓冲溶液和 0.1 mL 150 mmol/L 对硝基苯酚磷酸盐 (NPP) 溶液做反应底物, 混匀, 放入 25~30 °C 培养箱中培养 30~60 min, 然后用 0.5 mL 的 0.5 mol/L NaOH 终止反应。空白对照组 (修正土壤本身颜色, 胡敏酸等造成的误差): 0.5 mL 土壤悬浊液加 0.4 mL 200 mmol/L AC-NaOAc 缓冲溶液, 在 25~30 °C 培养箱中培养 30~60 min, 加 0.5 mL 0.5 mol/L NaOH 和 0.1 mL 150 mmol/L 对硝基苯酚磷酸盐 (NPP) 溶液。在 8 000 r/min 高速离心 1 min 后, 取上清液稀释相应倍数后, 在 405 nm 波长下比色测定。土壤重量烘干后作为参照。酶活性以单位时间内每克干土生成对硝基苯酚 (PNP) 的量来表示 (μmol/(h·g)) (PNP, 干土)^[15]。

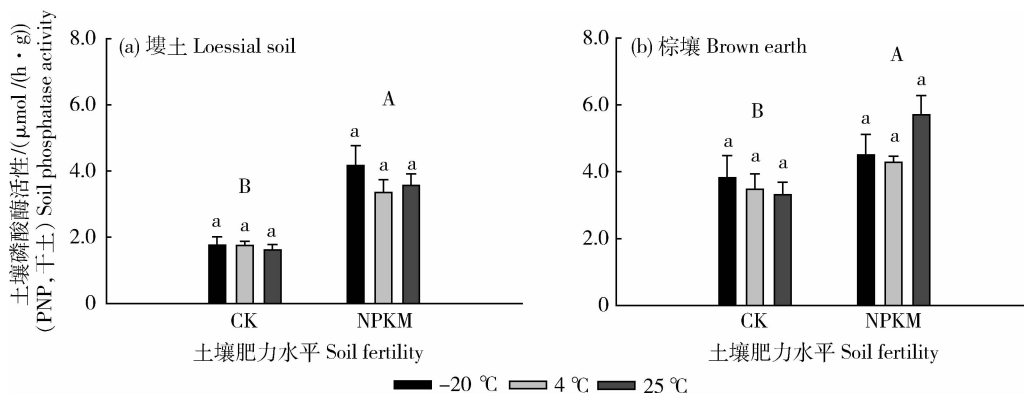
1.4 统计分析

用 SAS 统计软件 (SAS, 2001) 分析试验数据。LSD 值的显著水平为 0.05。

2 结果与分析

2.1 土壤培养温度对土壤磷酸酶活性的影响

壤土 CK 和 NPKM 处理的土壤磷酸酶活性分别在 1.62~1.76 和 3.35~4.16 $\mu\text{mol}/(\text{h}\cdot\text{g})$ (PNP)(图 2)。对比于壤土 CK 处理, NPKM 处理土壤的磷酸酶活性在 -20、4 和 25 $^{\circ}\text{C}$ 条件下分别增加 136%、92%和 120%。对于同一处理,不同培养



不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平(大写字母表示不同肥力水平间的差异;小写字母表示同一肥力水平内的差异)。下同。

Different letters above the bars denote significant differences among the treatments based on one-ways analysis of variance (Capitals denote difference between CK and NPKM; lowercases denote difference among treatments in the same soil fertility level). ($P \leq 0.05$). The same below.

图 2 土壤培养温度对土壤磷酸酶活性的影响

Fig. 2 Soil phosphatase activity in response to culture temperature

2.2 土壤含水量对土壤磷酸酶活性的影响

土壤培养时土壤含水量变化对土壤磷酸酶活性影响如图 3 所示,在壤土 CK 处理,土壤水分含量为 25% 时,土壤磷酸酶活性为 1.62 $\mu\text{mol}/(\text{h}\cdot\text{g})$ (PNP),明显低于土壤含水量为 10% 处理 (2.33 $\mu\text{mol}/(\text{h}\cdot\text{g})$ PNP) 和 40% 的处理 (2.72

$\mu\text{mol}/(\text{h}\cdot\text{g})$ PNP)。壤土 NPKM 处理的土壤磷酸酶活性为 3.57~4.88 $\mu\text{mol}/(\text{h}\cdot\text{g})$ (PNP),比 CK 处理高 79%~120%,在土壤含水量为 40% 时,土壤磷酸酶活性达到最大。在棕壤 CK 处理,土壤含水量为 10% 和 25% 时,土壤磷酸酶活性分别为 2.95 和 3.31 $\mu\text{mol}/(\text{h}\cdot\text{g})$ (PNP),无显著差异,当土壤

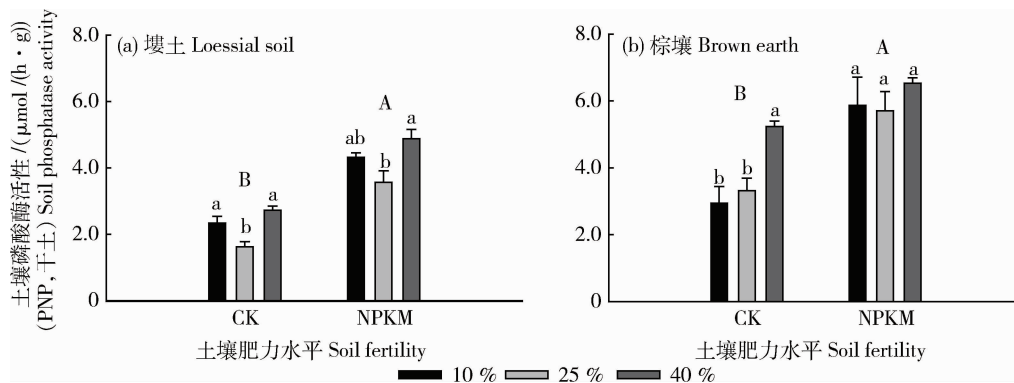


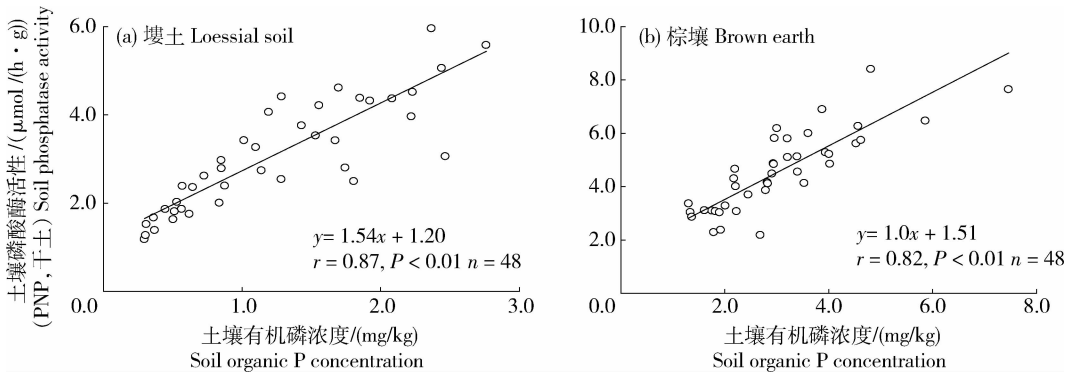
图 3 土壤含水量对土壤磷酸酶活性的影响

Fig. 3 The soil phosphatase activity in response to soil moisture

含水量达到 40% 时,土壤磷酸酶活性为 5.23 $\mu\text{mol}/(\text{h}\cdot\text{g})$ (PNP),明显高于土壤含水量为 10% 和 25% 的 2 个处理 50% 以上。对于棕壤 NPKM 处理的土壤磷酸酶活性为 5.70~6.52 $\mu\text{mol}/(\text{h}\cdot\text{g})$ (PNP),各含水量处理间无显著性差异。说明土壤培养时,土壤含水量显著影响土壤磷酸酶活性,且这种作用明显受土壤肥力和土壤类型的影响。

2.3 土壤有机磷浓度对土壤磷酸酶活性的影响

土壤有机磷浓度与土壤磷酸酶活性呈正相关(壤土: $r=0.39, P<0.01$;棕壤: $r=0.46, P<0.01$) (图 4)。土壤有机磷浓度每增加 1 mg/kg ,壤土土壤磷酸酶活性增加 0.006 $\mu\text{mol}/(\text{h}\cdot\text{g})$ (PNP),而棕壤磷酸酶活性增加 0.01 $\mu\text{mol}/(\text{h}\cdot\text{g})$ (PNP)。相同土壤有机磷浓度时,棕壤的磷酸酶活性始终大于壤土。



每个数据点代表单次重复。

Data point represents individual replicate.

图 4 土壤有机磷浓度与土壤磷酸酶活性的相关关系

Fig. 4 Correlation between soil organic P concentration and soil phosphatase activity

2.4 土壤肥力水平和培养温度对土壤有机磷和磷酸酶活性的交互作用

土壤肥力和培养温度显著影响壤土有机磷浓度(土壤肥力: $P<0.001$;培养温度: $P=0.005$) (表 3),且两者之间存在明显的交互作用($P=0.019$)。土壤肥力显著影响了壤土磷酸酶活性($P<0.001$),但培养温度对壤土磷酸酶活性的影响

未达到显著水平($P=0.45$),且两者对壤土磷酸酶活性影响不存在交互作用($P=0.53$)。与壤土相同,土壤肥力和培养温度显著改变了棕壤有机磷浓度(土壤肥力: $P<0.001$;培养温度: $P=0.014$),土壤肥力和培养温度的交互作用达到显著水平($P=0.008$)。土壤肥力显著影响棕壤土壤磷酸酶活性($P=0.006$),但培养温度的影响不显著($P=0.48$),

表 3 土壤肥力水平和培养温度对土壤有机磷和土壤磷酸酶活性的交互作用

Table 3 The interaction effects of soil fertility and incubation temperature on soil organic P concentration and soil phosphatase activity

土壤类型 Soil type	因素 Source	土壤有机磷浓度 Soil organic P concentration		土壤磷酸酶活性 Soil phosphatase activity	
		F 值 F-value	P 值 P-value	F 值 F-value	P 值 P-value
		壤土 Loessial soil	土壤肥力 Soil fertility	55.07	<0.001
	培养温度 Temperature	7.15	0.005	0.85	0.450
	土壤肥力×培养温度 Fertility×Temperature	4.99	0.019	0.65	0.530
棕壤 Brown earth	土壤肥力 Soil fertility	45.22	<0.001	9.76	0.006
	培养温度 Temperature	5.49	0.014	0.76	0.480
	土壤肥力×培养温度 Fertility×Temperature	6.32	0.008	1.76	0.200

同时土壤肥力和培养温度对棕壤磷酸酶活性的影响不存在交互作用($P=0.20$)。

2.5 土壤肥力水平和土壤含水量对土壤有机磷和磷酸酶活性的交互作用

土壤肥力和土壤含水量显著改变了壤土有机磷浓度(土壤肥力: $P<0.001$;土壤含水量: $P=0.03$)(表4),且两者之间存在明显的交互作用($P=0.03$)。同时,土壤肥力和土壤含水量显著影响壤土土壤磷酸酶活性(土壤肥力: $P<0.001$;土壤含水

量: $P<0.001$),但两者不存在交互作用($P=0.88$)。与壤土不同,土壤肥力显著改变了棕壤有机磷浓度($P<0.001$),但土壤含水量对棕壤有机磷浓度的影响未达显著水平($P=0.49$),土壤肥力和土壤含水量对棕壤有机磷浓度的影响不存在交互作用($P=0.30$)。土壤肥力显著改变了棕壤土壤磷酸酶活性($P=0.03$),土壤含水量对棕壤土壤磷酸酶活性的影响不显著($P=0.55$),同时两者间存在明显的交互作用($P<0.001$)。

表4 土壤肥力水平与土壤含水量对土壤有机磷和土壤磷酸酶活性的交互作用。

Table 4 The interaction effects of soil fertility and moisture on soil organic P concentration and soil phosphatase activity

土壤类型 Soil types	因素 Source	土壤有机磷浓度 Soil organic P concentration		土壤磷酸酶活性 Soil phosphatase activity	
		F 值 F value	P 值 P value	F 值 F value	P 值 P value
壤土	土壤肥力	68.25	<0.001	125.6	<0.001
	土壤含水量	4.26	0.03	15.07	<0.001
	土壤肥力×土壤含水量	4.47	0.03	0.13	0.88
棕壤	土壤肥力	21.04	<0.001	5.31	0.03
	培养水分	0.75	0.49	0.62	0.55
	土壤肥力×土壤含水量	1.31	0.30	18.06	<0.001

3 讨论

由于没有植物参与,本试验中土壤磷酸酶来自土壤微生物的分泌,包括处理前储存在土壤内被土壤颗粒固定的胞外酶和培养过程中微生物新分泌的游离态与固定态酶。微生物的多样性和丰富度明显受土壤类型,尤其是土壤 pH 的影响^[16],pH 不同的壤土和棕壤尤其在低磷水平上磷酸酶活性存在差异。土壤低磷诱导微生物分泌磷酸酶活化土壤磷,放大了土壤磷酸酶活性在不同土壤中的差异。不同生态区的气候条件、成土因素会造成土壤中微生物区系区域特异性,最终导致了壤土和棕壤磷酸酶活性的不同特征^[17]。

环境温度对土壤微生物多样性的影响没有呈现明显的规律性^[16]。培养温度没有影响壤土和棕壤的土壤磷酸酶活性。这可能是因为在低温($-20\text{ }^{\circ}\text{C}$)培养时,土壤存在固定态酶进而使磷酸酶活性得以维持,故温度对酶活性测定结果影响不明显,这与以前的研究相似^[18]。因此土壤培养温度不

是影响土壤磷酸酶活性的主要因子。水分效应具有明显的区域特异性^[16]。棕壤土壤磷酸酶活性对土壤含水量的响应比壤土更加敏感。

有机肥料往往具有很高酸性磷酸酶活性,有机肥的施用明显提高土壤酸性酶活性^[19]。另外施加的有机肥中含有丰富的碳源和矿物质供给微生物,促进了土壤微生物活性和群落结构的变化,从而提高了土壤磷酸酶活性^[13]。本试验中,CK 处理的土壤磷酸酶活性均低于同一土壤类型的 NPKM 处理,可能因为 CK 处理土壤微生物受碳源和养分的限制而导致数量少活性低,分泌的磷酸酶量也随之降低。而 NPKM 处理土壤中碳源和养分相对丰富,故土壤磷酸酶活性明显高于 CK 处理。

土壤肥力、培养温度、土壤含水量及其交互作用都会影响土壤磷酸酶活性。土壤磷酸酶活性与土壤有机磷浓度存在着正相关,磷酸酶活性随着有机磷浓度增加而增高,表明有机磷能诱导土壤磷酸酶活性,因此增加土壤有机磷含量,提高土壤磷酸酶活性,可在一定程度上提高土壤有效磷的含量^[20]。因

为土壤有机质可以为土壤微生物提供碳源,所以土壤磷酸酶活性与土壤有机质含量存在明显的正相关关系^[21]。在相同土壤有机磷浓度时,有机质含量高的棕壤土壤磷酸酶活性始终大于壤土。

4 结 论

土壤磷酸酶活性对土壤培养温度不敏感,但土壤水分和有机磷含量都会显著改变土壤磷酸酶活性。因此,土壤水分是影响低肥力土壤有机磷积累-矿化动态平衡的重要因素,而有机磷浓度是决定土壤磷酸酶活性主要因素之一。

参考文献 References

- [1] Chen C R, Condron L M, Davis M R, Sherlock R R. Phosphorus dynamics in the rhizosphere of perennial ryegrass (*Lolium perenne* L) and radiata pine (*Pinus radiata* D Don) [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34(4): 487-499
- [2] Turner B L, Frossard E, Baldwin D S. Organic phosphorus in the Environment [J]. *CABI Publishing*, 2005: 269-294
- [3] 熊顺贵. 基础土壤学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2001
- Xiong S G. *Basic Soil Science* [M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2001 (in Chinese)
- [4] 张雨瑶, 李世友. 土壤磷与植物关系研究进展 [J]. *世界林业研究*, 2013, 26(5): 19-24
- Zhang Y Y, Li S Y. Research progress on relationship between soil phosphorus and plant [J]. *World Forestry Research*, 2013, 26(5): 19-24 (in Chinese)
- [5] 宋勇春, 李晓林, 冯固. 菌根真菌磷酸酶活性对红三叶草土壤中有机磷的影响 [J]. *生态学报*, 2001, 21(7): 1130-1135
- Song Y C, Li X L, Feng G. Effect of phosphatase activity of mycorrhizal fungi on soil organic phosphorus loss in the environment of red clover [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(7): 1130-1135 (in Chinese)
- [6] Dick W A, Cheng L, Wang P. Soil acid and alkaline phosphatase activity as pH adjustment indicators [J]. *Soil Biological and Biochemistry*, 2000, 32(13): 1915-1919
- [7] Tazisong I A, Senwo Z N, He Z. Phosphatase hydrolysis of organic phosphorus compounds [J]. *Advances in Enzyme Research*, 2015, 3(2): 39-51
- [8] Kothari S K, Marschner H, Römheld V. Contribution of the VA mycorrhizal hyphae in acquisition of phosphorus and zinc by maize grown in a calcareous Soil [J]. *Plant and Soil*, 1991, 131(2): 177-185
- [9] Dick R P. *Methods of Soil Enzymology* [M]. Madison: Soil Science Society of America, 2011
- [10] 赵少华, 宇万太, 张璐, 沈善敏, 马强. 土壤有机磷研究进展 [J]. *应用生态学报*, 2004, 15(11): 2189-2194
- Zhao S H, Yu W T, Zhang L, Shen S M, Ma Q. Research progress of soil organic phosphorus [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(11): 2189-2194 (in Chinese)
- [11] Campbell L B, Racz G J. Organic and inorganic P content, movement and mineralization of P in soil beneath a feedlot [J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1975, 55(4): 457-466
- [12] Augusto L, Bakker M R, Morel C, Meredieu C, Trichet P, Badeau V, Arrouays D, Plassard C, Achat D L, Gallet-Budynek A, Merzeau D, Canteloup D, Najjar M, Ranger J. Is 'grey literature' a reliable source of data to characterize soils at the scale of a region? A case study in a maritime pine forest in southwestern France [J]. *European Journal of Soil Science*, 2010, 61(6): 807-822
- [13] 孟娜. 磷肥, 有机肥在白菜上的产量效应及对土壤有机磷的影响 [D]. 保定: 河北农业大学, 2005
- Meng N. Effects of phosphate fertilizer and organic fertilizer on the yield of Chinese cabbage and soil organic phosphorus [D]. Baoding, Hebei Agricultural University, 2005 (in Chinese)
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2007
- Bao S D. *Soil and Agricultural Chemistry Analysis* [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2007 (in Chinese)
- [15] Bagayoko M, Buerkert A, Lung G, Bationo A, Römheld V. Cereal/legume rotation effects on cereal growth in Sudano-Sahelian West Africa: soil mineral nitrogen, mycorrhizae and nematodes [J]. *Plant and Soil*, 2000, 218(1): 103-116
- [16] Fierer N, Jackson R B. The diversity and biogeography of soil bacterial communities [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2006, 103(3): 626-631
- [17] 和文祥, 蒋新, 余贵芬, 郎印海. 生态环境条件对土壤磷酸酶的影响 [J]. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2003, 31(2): 81-88
- He W X, Jiang X, Yu G F, Lang Y H. Effects of ecological environment on soil phosphatase [J]. *Journal of Northwest Agriculture and Forestry University: Natural Science Edition*, 2003, 31(2): 81-88 (in Chinese)
- [18] 赵静, 韩甜甜, 谢兴斌, 董彦, 吴曼, 梁爱新, 沈向. 酸化梨园土壤酶活性与土壤理化性质之间的关系 [J]. *水土保持学报*, 2011, 4: 115-120
- Zhao J, Han T T, Xie X B, Dong Z, Wu M, Liang A X, Shen X. Relationships between soil physical and chemical properties and soil enzyme activity in pear orchard [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 4: 115-120 (in Chinese)
- [19] 赵兰坡, 姜岩. 施用有机肥料对土壤磷酸酶活性的影响 [J]. *吉林农业大学学报*, 1987, 9(4): 43-45
- Zhao L P, Jiang Y. Effects of organic fertilizer application on soil phosphatase activity [J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 1987, 9(4): 43-45 (in Chinese)
- [20] 耿玉清, 白翠霞, 赵广亮, 余新晓, 姚永刚, 秦永胜. 土壤磷酸酶活性及其与有机磷组分的相关性 [J]. *北京林业大学学报*, 2008, 139-143
- Geng Y Q, Bai C X, Zhao G L, Yu X X, Yao Y G, Qin Y S. Soil phosphatase activity and its correlation with composition of organic phosphorus [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2008, 139-143 (in Chinese)
- [21] 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 Y Q. Study on soil phosphatase activity and their influenced factors [J]. *Journal of Anhui Technical Teachers College*, 2001, 15(4): 5-8