

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

杨佳佳^{1,2}, 李兆君^{2*}, 梁永超^{2,3}, 张林静¹, 李万峰^{1,2}

(1 山西师范大学生命科学学院, 山西临汾 041000;

2 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;

3 石河子大学农学院/新疆生产建设兵团绿洲生态农业重点实验室, 新疆石河子 832003)

摘要: 采用室内微宇宙试验法, 研究了温度(25℃和10℃)、土壤湿度(湿度分别为最大持水量的50%和25%, 即50% WHC和25% WHC)对不同肥料条件下黑土磷形态转化及土壤磷酸酶活性的影响。结果表明, 土壤温度和水分及其交互作用对不同肥料条件下土壤磷形态转化以及土壤酶活性有显著影响。土壤温度(25℃)和土壤湿度(50% WHC)显著增加了土壤有效磷、Ca₂-P、Ca₈-P的含量, 而土壤有机磷含量显著降低; 在土壤中添加氮、磷、钾肥料后, 这种作用变得尤为明显。高的土壤温度(25℃)和合适的土壤湿度(25% WHC)能够显著提高土壤磷酸酶的活性, 土壤磷酸酶活性与土壤有效磷含量呈显著正相关, 表明可以通过提高土壤温度和保持土壤合适的湿度来提高土壤磷酸酶, 活化和提高土壤磷的有效性, 进而促进土壤磷释放。

关键词: 温度; 水分; 黑土; 磷形态转化; 土壤酶活性

中图分类号: S158

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2009)06-1295-08

Effects and their mechanisms of temperature and moisture on phosphorous transformation in black soil manured with different fertilizers

YANG Jia-jia^{1,2}, LI Zhao-jun^{2*}, LIANG Yong-chao^{2,3}, ZHANG Lin-jing¹, LI Wan-feng^{1,2}

(1 College of Life Sciences, Shanxi Normal University, Linfen 041000, China; 2 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Ministry of Agriculture Key Laboratory of Crop Nutrition and Fertilization, Beijing 100081, China; 3 College of Agricultural Sciences, Shihezi University/The Key Oasis Eco-Agriculture Laboratory of Xinjiang Production and Construction Group, Shihezi 832003, China)

Abstract: Microcosm experiments were conducted to study the effects of temperature such as 25 °C & 10 °C and soil moisture such as 50%, and 25% of the largest water holding capacity of soil (WHC) on transformation of phosphorus, and the activities of acid phosphatase in the black soil receiving nitrogen & potassium fertilizers (NK), and nitrogen, phosphate, and potassium fertilizers (NPK). The statistic significant effects of temperature and moisture on phosphate transformation, and acid phosphatase activities were found in the present paper. High temperature such as 25 °C and moisture such as (50% WHC) can significantly increase contents of available phosphorus, Ca₂-P, and Ca₈-P, however, significantly decrease the content of organic phosphorus in soils especially in the soils manured with NPK. High temperature such as 25 °C and appropriate moisture such as 25% WHC can enhance acid phosphatase activities. The significantly positive correlation between the activity of acid phosphatase and the content of available phosphorus was also found in the present paper. It indicates that we can increase acid phosphatase activity to activate and enhance the availability of phosphorus in soil and to promote phosphorus to be released from black soil through adjusting soil temperature and moisture.

Key words: temperature; moisture; black soil; phosphorus transformation; soil enzyme activity

收稿日期: 2008-10-30 接受日期: 2009-03-14

基金项目: 国家“973”项目(2007CB109305); 国家科技支撑计划(2006BAD05B05); 云南省科技创新强省计划(2007AD003)资助。

作者简介: 杨佳佳(1983-), 女, 山西长治人, 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。

Tel: 010-82106727, E-mail: yangjiajiayanjiu0516@126.com. * 通讯作者 Tel: 010-82108657, E-mail: zjli@caas.ac.cn

磷是植物生长发育所必需的营养元素之一,磷参与组成植物体内许多重要化合物,是植物体生长代谢过程中不可缺少的大量元素之一^[1]。土壤是农业生态系统中磷最大的储存库,土壤中全磷含量在0.02%~0.2%,易被植物利用的磷(有效磷)只占很小的一部分。据估算,我国约有1/3~1/2的土壤缺磷。通过施用磷肥给作物补充磷是实现农业高产和稳产的关键措施之一,然而,磷肥的当年利用率一般只有10%~25%^[2],这主要是由于磷在土壤中移动性差,易被土壤固定。因此,有关土壤中磷素活化的措施及其影响因素一直是国内外土壤和植物营养学科研究的热点问题^[3-11]。东北黑土有机质含量高、土壤粒状结构良好、养分含量丰富、自然肥力高、磷素含量充足^[12],但是早春低温干旱条件下,土壤有效磷含量偏低,作物容易出现缺磷症状,这严重制约了东北地区农业的可持续发展。鉴此,本研究以东北玉米主产区的黑土为材料,研究了不同温度、水分和肥料条件下黑土磷素形态转化及其有效性的变化情况,并从酶学角度分析了其可能的机制,旨在为阐明温度和水分对土壤磷素转化的调控及其机理提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

室内培养试验在农业部作物营养与施肥重点实验室完成。供试黑土采自吉林省农业科学院公主岭试验基地,土壤取回后过2 mm筛,储存于4℃冰箱备用。供试土壤基本理化性状为:有机质24.20 g/kg,全氮1.54 g/kg,全磷767.21 mg/kg,速效氮130.08 mg/kg,速效磷60.51 mg/kg,全钙(CaO)149.80 g/kg, Ca^{2+} 1.29 g/kg,速效钾150.94 mg/kg, pH 5.85。试验用氮、钾、磷肥分别为尿素(N 46.62%)、硫酸钾(K_2O 54.02%)、过磷酸钙(P_2O_5 36.58%),所用试剂的纯度均为分析纯。

试验设三个因素,分别为1)温度:25℃(T1)、10℃(T2);2)水分:土壤含水量为土壤最大持水量的50%,即50% WHC(W1)、土壤含水量为土壤最大持水量的25%,即25% WHC(W2);3)肥料:不施任何肥料(CK)、施氮肥和钾肥(NK)、施氮肥、磷肥和钾肥(NPK),各肥料的用量分别为N 0.15、P 0.1、K 0.1 g/kg,共组合成12个处理,每个处理重复3次。

将试验用土壤从冰箱取出后置于25℃培养箱中活化预培养一周。然后称取相当于200.0 g风干土的土样于500 mL的广口玻璃瓶中,按照试验设计

分别于试验用土壤中加入一定量的相应肥料的水溶液。用去离子水调节土壤含水量分别为最大持水量的50%和25%,充分混合均匀。然后用塑料布将广口瓶封好,并用针头在塑料布上扎5个小孔,以利于通气,之后将封好口的广口瓶分别置于25℃、10℃恒温生化培养箱中暗培养。培养期间,为了保持土壤湿度不变,用称重差减法,每周用去离子水补充因蒸发而损失的水分,并充分通气1次。分别于培养的第0、7、14、28 d取样,进行有效磷、有机磷、 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 及土壤酸性磷酸酶活性的测定,其中第0 d采样是在样品经充分混合均匀并分别置于25℃、10℃恒温生化培养箱中暗培养6 h后进行。

1.2 测定项目与方法

土壤有效磷含量采用碳酸氢钠法测定^[13];土壤 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 含量采用鲁如坤的方法测定^[14];土壤有机磷含量采用灼烧法(浸提液为浓度1.0 mol/L的 H_2SO_4 溶液)^[14-16]。土壤磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法测定^[17]。

试验数据采用Sigma Stat 3.02软件进行Three Way ANOVA分析,差异显著性采用LSD法进行检验。

2 结果分析

2.1 温度与水分对黑土有效磷含量的影响

温度和水分对黑土有效磷含量的影响见表1,由表1可以看出,不同处理随着培养时间的延长,土壤中有效磷含量在培养第7或14 d达到最大值,之后逐渐降低。三因素统计分析表明,不同培养时间,温度、水分和施肥对黑土有效磷的影响是不同的。培养第0 d,温度和水分对土壤有效磷含量影响不显著,土壤有效磷含量主要受施肥影响;培养第7 d,温度、水分和施肥对黑土有效磷含量影响显著($P_{\text{温度}} = 0.007$, $P_{\text{水分}} < 0.001$, $P_{\text{施肥}} < 0.001$),温度升高和土壤水分含量的增加有利于增加黑土有效磷的含量,而且温度、水分和施肥交互作用对黑土有效磷含量的影响也达显著水平($P_{\text{温度} \times \text{水分}} = 0.001$, $P_{\text{温度} \times \text{施肥}} = 0.049$, $P_{\text{水分} \times \text{施肥}} < 0.001$, $P_{\text{温度} \times \text{水分} \times \text{施肥}} = 0.026$)。培养第14 d,温度和水分对黑土有效磷含量的影响未达显著水平,但是水分和施肥的交互作用达显著水平($P_{\text{水分} \times \text{施肥}} = 0.004$),表明水分对黑土有效磷含量的影响与施入土壤中的外源肥料的种类有关。培养第28 d,水分和施肥处理对黑土有效磷含量的影响显著($P_{\text{水分}} = 0.009$, $P_{\text{施肥}} < 0.001$),并且温度、水分和施肥三因素之间的交互作用均达显著

表 1 温度和水分对黑土有效磷含量的影响(mg/kg)

Table 1 Effects of temperature and moisture on the content of available P in black soil

处理 Treatments			培养时间 Incubation days (d)							
温度(°C) Temperature	水分(% WHC) Moisture	施肥 Fertilization	0	7	14	28				
25	50	CK	59.99	66.27	68.59	69.27				
		NK	59.74	65.23	67.47	67.21				
		NPK	80.70	102.53	89.72	88.35				
	25	CK	60.08	62.23	67.81	65.66				
		NK	62.57	61.63	68.93	66.52				
		NPK	79.07	81.73	84.23	78.38				
10	50	CK	61.11	62.83	68.16	63.86				
		NK	63.26	63.43	69.02	65.75				
		NPK	81.82	89.21	91.10	83.62				
	25	CK	60.85	62.40	72.71	65.32				
		NK	62.57	62.49	70.82	67.13				
		NPK	74.60	82.94	82.42	85.51				
变异来源 Variation resources			df	LSD _{0.05}	df	LSD _{0.05}	df	LSD _{0.05}	df	LSD _{0.05}
温度 Temperature (T)			1	0.71	1	5.62	1	2.57	1	1.45
水分 Moisture (M)			1	2.36	1	12.42	1	2.45	1	3.28
施肥 Fertilization (F)			2	30.04	2	43.46	2	29.80	2	29.72
温度×水分 T×M			1	4.60	1	10.12	1	1.21	1	9.24
温度×施肥 M×F			2	3.71	2	6.08	2	2.66	2	4.24
水分×施肥 M×F			2	5.98	2	13.44	2	10.55	2	4.62
温度×水分×施肥 T×M×F			2	3.85	2	9.62	2	6.24	2	7.32

水平 ($P_{\text{温度} \times \text{水分}} < 0.001$, $P_{\text{温度} \times \text{施肥}} = 0.021$, $P_{\text{水分} \times \text{施肥}} = 0.012$, $P_{\text{温度} \times \text{水分} \times \text{施肥}} = 0.005$)。

2.2 温度和水分对黑土有机磷含量的影响

由表 2 可知,在整个培养期间,除 25℃ + 50% WHC + CK 处理外,所有处理土壤有机磷含量均呈先升高后降低的趋势,温度和水分对不同施肥处理土壤有机磷含量的影响与培养时间有关。培养当天,温度、水分对不同施肥处理黑土有机磷含量的影响不显著;培养第 7 d,温度和水分对土壤有机磷含量有极显著的影响 ($P_{\text{温度}} < 0.01$, $P_{\text{水分}} < 0.01$),50% WHC 土壤水分含量且温度和水分的交互作用也达极显著水平 ($P_{\text{温度} \times \text{水分}} = 0.01$)。温度对土壤有机磷含量的影响与土壤水分含量有关,如当土壤水分含量为 50% WHC 时,温度对土壤有机磷含量的影响不显著;而当土壤水分含量为 25% WHC 时,温度对土壤有机磷的影响显著,低温有利于提高土壤有机磷的含量。培养第 14 d,温度和施肥交互作用对土壤有机磷含量的影响显著 ($P_{\text{温度} \times \text{施肥}} < 0.05$)。在不施

肥情况下,温度对土壤有机磷含量影响显著,10℃ 处理土壤有机磷显著高于 25℃ 处理土壤;土壤施用氮、钾肥或者氮、磷、钾肥后,温度对土壤有机磷含量无显著影响。培养第 28 d,水分和施肥交互作用对土壤有机磷含量的影响显著 ($P_{\text{水分} \times \text{施肥}} < 0.05$)。不施肥和施用氮、磷、钾肥的条件下,水分对有机磷的影响不显著;施用氮、钾肥的条件下,水分对土壤有机磷含量影响显著,50% WHC 处理土壤有机磷含量显著高于 25% WHC 处理。

2.3 温度和水分对黑土 Ca₂-P、Ca₈-P 含量的影响

温度和水分对不同施肥处理土壤 Ca₂-P 含量的影响同样与培养时间有关(表 3)。培养当天,水分和施肥的主效应对土壤 Ca₂-P 含量影响是显著的 ($P_{\text{水分}} = 0.001$, $P_{\text{施肥}} < 0.001$),但交互作用不显著。就水分处理而言,50% WHC 处理土壤 Ca₂-P 的含量显著高于 25% WHC 处理。培养第 7 d,除温度对土壤 Ca₂-P 含量的影响不显著外,其余处理都达显著水平,且温度、水分和施肥三者之间的交互作用对土

表 2 温度和水分对黑土有机磷含量的影响 (mg/kg)

Table 2 Effects of temperature and moisture on the content of organic phosphorus in black soil

处理 Treatments			培养时间 Incubation days(d)							
温度 (°C)	水分 (% WHC)	施肥	0	7	14	28				
Temperature	Moisture	Fertilization								
25	50	CK	339.14	334.18	282.84	309.86				
		NK	308.96	351.75	294.55	305.36				
		NPK	314.82	344.09	289.15	306.71				
	25	CK	308.96	336.44	293.20	308.96				
		NK	308.51	336.44	285.09	300.86				
		NPK	316.17	331.03	307.61	312.57				
10	50	CK	312.57	340.04	297.25	303.56				
		NK	308.06	311.21	297.70	317.52				
		NPK	323.83	383.28	290.05	301.31				
	25	CK	317.97	385.08	343.19	309.86				
		NK	309.86	426.06	293.65	285.99				
		NPK	311.21	422.01	283.74	301.76				
变异来源 Variation resources			df	LSD _{0.05}	df	LSD _{0.05}	df	LSD _{0.05}	df	LSD _{0.05}
温度 Temperature (T)			1	3.41	1	80.41	1	13.63	1	8.37
水分 Moisture (M)			1	13.01	1	59.34	1	14.25	1	8.37
施肥 Fertilization (F)			2	16.24	2	31.35	2	13.57	2	8.24
温度 × 水分 T × M			1	13.15	1	109.33	1	1.31	1	12.27
温度 × 施肥 M × F			2	11.20	2	46.78	2	38.14	2	7.38
水分 × 施肥 M × F			2	13.76	2	39.19	2	29.09	2	24.96
温度 × 水分 × 施肥 T × M × F			2	38.08	2	70.14	2	34.65	2	25.26

壤 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 含量的影响均显著 ($P_{\text{温度} \times \text{水分}} = 0.004$, $P_{\text{温度} \times \text{施肥}} = 0.042$, $P_{\text{水分} \times \text{施肥}} < 0.001$, $P_{\text{温度} \times \text{水分} \times \text{施肥}} = 0.045$)。在施用磷肥的情况下,水分对土壤中 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 含量产生显著影响,50% WHC 处理土壤中 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 的含量显著高于 25% WHC 处理的土壤。培养第 14 d,温度和施肥对土壤 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 含量的影响显著,且温度与施肥处理之间的交互作用显著 ($P_{\text{温度}} < 0.001$, $P_{\text{施肥}} < 0.001$, $P_{\text{温度} \times \text{施肥}} = 0.034$)。低温处理有利于显著提高土壤中 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 的含量。10°C + 50% WHC + NPK 处理 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 含量比其它处理要高,除了与 10°C + 25% WHC + NPK 处理没有差异外,均显著高于其它各处理,是 25°C + 50% WHC + CK 处理的 1.65 倍。培养第 28 d,水分和施肥处理对土壤 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 含量影响显著 ($P_{\text{水分}} = 0.004$, $P_{\text{施肥}} < 0.001$),且温度和水分、温度和施肥以及温度、水分和施肥三者之间的交互作用对土壤 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 含量的影响也显著 ($P_{\text{温度} \times \text{水分}} = 0.028$, $P_{\text{温度} \times \text{施肥}} = 0.017$, $P_{\text{温度} \times \text{水分} \times \text{施肥}} = 0.025$)。不施肥和施氮、磷、钾情况下,温度对土壤 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 含量影响不显著,而在施氮、钾肥的情况下,25°C 处理较 10°C 处理能够显著提高土壤 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 的含量。

温度和水分对土壤 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 含量的影响见表 4,由表 4 可知, $\text{Ca}_8\text{-P}$ 含量在 28 d 的培养时间中呈现出先增加后降低的趋势,在同一培养时间内各处理的差异与 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 的变化趋势基本一致。统计分析结果表明,不同培养时间,温度和水分对土壤中 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 含量的影响是不同的。培养当天,水分和施肥及其交互作用对土壤 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 含量的影响显著 ($P_{\text{水分}} = 0.007$, $P_{\text{施肥}} < 0.001$, $P_{\text{水分} \times \text{施肥}} = 0.006$),土壤中施用氮、钾肥和 25% WHC 土壤水分含量能显著增加土壤中 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 的含量。培养第 7 d,除水分对土壤 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 含量影响不显著外,其余处理均达显著水平 ($P_{\text{温度}} = 0.019$, $P_{\text{施肥}} < 0.001$, $P_{\text{温度} \times \text{水分}} < 0.001$, $P_{\text{温度} \times \text{施肥}} < 0.001$, $P_{\text{水分} \times \text{施肥}} = 0.032$, $P_{\text{温度} \times \text{水分} \times \text{施肥}} = 0.018$)。温度对土壤中 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 含量的影响与肥料的施用情况有关,如在施用氮、磷、钾肥料的基础上,25°C 处理较 10°C 处理能够显著减少土壤中 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 的含量;而不施肥或只施氮和钾肥料时,温度对土壤 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 含量的影响作用则是不显著的。培养第 14 d,除温度处理及温度、水分和施肥三者交互作用对土壤中 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 含量的影响不显著外,其余处理及其交互作用均达显著水平 ($P_{\text{水分}} < 0.001$, $P_{\text{施肥}} < 0.001$, $P_{\text{温度} \times \text{水分}} = 0.007$,

表 3 温度和水分对黑土 Ca₂-P 的影响 (mg/kg)Table 3 Effects of temperature and moisture on Ca₂-P in black soil

处理 Treatments			培养时间 Incubation days(d)							
温度(℃) Temperature	水分(% WHC) Moisture	施肥 Fertilization	0	7	14	28				
25	50	CK	38.0	38.4	35.9	45.8				
		NK	39.6	37.1	40.8	43.7				
		NPK	49.5	67.2	47.4	58.5				
	25	CK	38.0	36.3	40.0	44.5				
		NK	34.3	40.4	36.3	52.4				
		NPK	46.6	56.1	47.0	54.0				
	10	50	CK	40.8	40.8	46.2	39.6			
			NK	40.0	45.8	45.8	40.0			
			NPK	51.5	68.0	59.4	54.8			
25		CK	40.0	39.2	43.3	43.7				
		NK	36.7	37.6	40.8	45.8				
		NPK	47.0	50.3	57.3	63.9				
变异来源 Variation resources			df	LSD _{0.05}	df	LSD _{0.05}	df	LSD _{0.05}		
温度 Temperature (T)			1	3.54	1	2.12	1	15.58	1	3.82
水分 Moisture (M)			1	5.81	1	12.89	1	3.68	1	7.50
施肥 Fertilization (F)			2	17.40	2	35.36	2	19.61	2	22.74
温度 × 水分 T × M			1	0.20	1	8.61	1	4.41	1	7.81
温度 × 施肥 M × F			2	1.37	2	6.26	2	6.72	2	8.99
水分 × 施肥 M × F			2	4.34	2	14.61	2	5.61	2	6.43
温度 × 水分 × 施肥 T × M × F			2	2.84	2	8.75	2	5.11	2	12.02

表 4 温度和水分对黑土 Ca₉-P 含量的影响 (mg/kg)Table 4 Effects of temperature and moisture on the content of Ca₉-P in black soil

处理 Treatments			培养天数 Incubation days(d)							
温度(℃) Temperature	水分(% WHC) Moisture	施肥 Fertilization	0	7	14	28				
25	50	CK	17.0	15.7	30.1	20.3				
		NK	13.3	16.6	25.6	22.7				
		NPK	19.9	29.7	38.8	24.8				
	25	CK	17.0	15.3	29.7	19.9				
		NK	18.2	17.0	29.7	20.7				
		NPK	19.0	23.6	32.2	25.6				
	10	50	CK	17.4	14.5	29.3	17.0			
			NK	14.5	15.7	28.9	21.1			
			NPK	19.4	20.3	38.4	26.8			
25		CK	17.4	19.0	23.1	20.3				
		NK	17.4	17.0	28.5	17.8				
		NPK	21.1	23.1	29.7	22.3				
变异来源 Variation resources			df	LSD _{0.05}	df	LSD _{0.05}	df	LSD _{0.05}		
温度 Temperature (T)			1	0.99	1	2.83	1	2.83	1	2.97
水分 Moisture (M)			1	2.97	1	0.85	1	6.23	1	2.12
施肥 Fertilization (F)			2	5.96	2	13.19	2	11.19	2	8.52
温度 × 水分 T × M			1	0.20	1	7.21	1	6.01	1	1.40
温度 × 施肥 M × F			2	0.65	2	6.60	2	4.89	2	1.70
水分 × 施肥 M × F			2	4.44	2	3.89	2	9.78	2	4.50
温度 × 水分 × 施肥 T × M × F			2	3.31	2	6.01	2	2.75	2	6.62

$P_{\text{温度} \times \text{施肥}} = 0.034, P_{\text{水分} \times \text{施肥}} < 0.001$)。25℃和 50% WHC 处理较 10℃和 25% WHC 处理能够显著增加土壤中 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 的含量。培养第 28 d, 温度、施肥及水分和施肥交互作用、温度、水分和施肥三者交互作用对土壤 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 含量的影响达显著水平 ($P_{\text{温度}} = 0.010, P_{\text{施肥}} < 0.001, P_{\text{水分} \times \text{施肥}} = 0.008, P_{\text{温度} \times \text{水分} \times \text{施肥}} = 0.006$)。施用氮、钾肥料情况下, 25℃和 50% WHC 处理较 10℃和 25% WHC 处理能够显著增加土壤中 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 的含量; 施用氮、磷、钾肥料情况下, 50% WHC 处理较 25% WHC 处理能够显著增加土壤中 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 的含量。

2.4 温度和水分对黑土磷酸酶活性的影响

温度和水分对黑土酸性磷酸酶活性的影响如表 5 所示。由表 5 可知, 温度和水分对不同施肥处理黑土土壤酸性磷酸酶活性的影响随着培养时间变化而变化。培养当天, 水分和施肥对黑土土壤磷酸酶活性的影响不显著, 但是温度、水分和施肥之间的交互作用对酸性磷酸酶活性的影响是显著的 ($P_{\text{温度}} < 0.001, P_{\text{温度} \times \text{水分}} < 0.001, P_{\text{温度} \times \text{施肥}} < 0.001,$

$P_{\text{水分} \times \text{施肥}} < 0.001, P_{\text{温度} \times \text{水分} \times \text{施肥}} < 0.001$)。培养第 7 d, 温度、水分和施肥对土壤酸性磷酸酶活性的影响均达显著水平, 且温度和水分之间的交互作用对土壤酸性磷酸酶活性的影响显著 ($P_{\text{温度}} < 0.001, P_{\text{水分}} < 0.001, P_{\text{施肥}} < 0.001, P_{\text{温度} \times \text{水分}} < 0.001$)。25% WHC 处理下, 高温能够显著增加黑土酸性磷酸酶活性, 但是 50% WHC 处理下, 温度对黑土酸性磷酸酶活性的影响则不显著。培养第 14 d, 温度、水分和施肥以及温度与水分、温度与施肥、水分和施肥之间的交互作用对黑土酸性磷酸酶活性影响显著 ($P_{\text{温度}} < 0.001, P_{\text{水分}} < 0.001, P_{\text{施肥}} < 0.001, P_{\text{温度} \times \text{水分}} < 0.001, P_{\text{温度} \times \text{施肥}} = 0.037, P_{\text{水分} \times \text{施肥}} = 0.010$), 温度、水分和施肥三者之间交互作用对黑土酸性磷酸酶活性影响不显著。培养第 28 d, 虽然温度和施肥对黑土酸性磷酸酶活性没有显著影响, 但是水分以及温度、水分和施肥之间的交互作用对黑土酸性磷酸酶活性的影响是显著的 ($P_{\text{水分}} < 0.001, P_{\text{温度} \times \text{水分}} < 0.001, P_{\text{温度} \times \text{施肥}} < 0.001, P_{\text{水分} \times \text{施肥}} = 0.008, P_{\text{温度} \times \text{水分} \times \text{施肥}} = 0.021$)。培养第 14 d 后, 不

表 5 温度和水分对土壤酸性磷酸酶活性的影响 [mg/(g·h), 37℃]

Table 5 Effects of temperature and moisture on the activities of acid phosphatase in black soil

处理 Treatments			培养时间 Incubation days (d)							
温度 (°C) Temperature	水分 (% WHC) Moisture	施肥 Fertilization	0	7	14	28				
25	50	CK	49.04	57.36	60.73	53.68				
		NK	44.57	61.91	63.35	56.70				
		NPK	42.73	61.12	63.57	54.03				
	25	CK	44.61	67.12	73.91	76.01				
		NK	40.32	70.18	76.53	69.83				
		NPK	45.62	70.45	73.82	70.58				
10	50	CK	43.96	55.25	59.98	59.19				
		NK	49.96	60.16	66.59	64.14				
		NPK	47.07	61.60	64.40	61.38				
	25	CK	46.85	57.01	64.67	62.87				
		NK	49.74	59.19	69.75	66.94				
		NPK	48.38	60.07	64.23	66.07				
变异来源 Variation resources			df	LSD _{0.05}	df	LSD _{0.05}	df	LSD _{0.05}	df	LSD _{0.05}
温度 Temperature (T)			1	6.55	1	11.99	1	7.67	1	0.08
水分 Moisture (M)			1	0.62	1	9.16	1	15.23	1	21.73
施肥 Fertilization (F)			2	0.31	2	6.61	2	6.23	2	2.41
温度 × 水分 T × M			1	4.75	1	13.67	1	14.08	1	19.87
温度 × 施肥 M × F			2	9.13	2	1.56	2	3.53	2	6.80
水分 × 施肥 M × F			2	4.55	2	2.37	2	4.26	2	5.20
温度 × 水分 × 施肥 T × M × F			2	6.56	2	2.08	2	1.49	2	6.46

管施肥与否,25℃和25%WHC均分别较10℃和50%WHC显著提高其活性。

3 讨论

磷素不仅是植物体内多种重要化合物的组分,同时还参与植物体内多种代谢过程,是植物生长必需的大量营养元素之一。土壤是植物所需磷素的主要来源,磷素在土壤中的形态转化及其有效性主要受温度和水分等环境因子、土壤理化性质以及种植方式等因素的影响,其中土壤温度和湿度是影响土壤中磷的有效性的重要因子^[18]。Rodriguez等^[19]研究认为,土壤水分含量既影响土壤溶液中磷素的数量也影响磷素的迁移速率,土壤水分充足,土壤磷的有效性高;早先的研究表明,早春低温及天气潮湿时,水稻、玉米、小麦等作物通常会表现出缺磷症状,但在天气变暖时缺磷症状消失^[20]。张奇春和王光火^[21]的研究指出,提高温度可以显著促进土壤磷的释放。本研究结果也表明,温度和水分及其交互作用对黑土中磷形态转化和有效性有显著影响,温度升高和土壤水分含量的增加能够显著增加黑土有效磷以及Ca₂-P的含量;温度升高能够显著降低土壤有机磷以及Ca₈-P的含量,这与蔡景波等^[22]关于环境因子对底泥磷释放影响的研究结果是一致的。表明温度升高能够促进黑土中土壤有机磷向有效磷转化^[23],这与李和生和李昌纬^[24]以及甘海华等^[25]的结果相似。温度和水分对黑土磷素形态转化的影响可能是由于温度和水分影响了土壤微生物的活性^[26]。在本研究中,25℃和25%WHC处理均分别较10℃和50%WHC处理能够显著提高土壤酸性磷酸酶活性。相关分析表明,土壤酸性磷酸酶活性与土壤有效磷、Ca₂-P、Ca₈-P含量均呈显著或极显著正相关(r 分别为0.297**、0.193*、0.487**, $n=144$),这可能是由于土壤酸性磷酸酶活性提高促进了土壤有机磷向有效磷转化的缘故。此外,孟庆华和李根英^[27]对山东棕壤、潮土和褐土三大类42个土壤有机磷及其与磷酸酶等相关性的研究结果表明,土壤有机磷含量与磷酸酶、解有机磷细菌数量等具有极显著的相关关系。这表明通过提高土壤温度和保持土壤合适的湿度提高土壤磷酸酶活性来活化土壤磷,进而提高土壤磷的释放是可能的。

参考文献:

- [1] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001. 199-202.
Huang C Y. Pedology [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2001. 199-202.
- [2] 张宝贵,李贵桐. 土壤生物在土壤磷有效化中的作用[J]. 土壤学报, 1998, 36(1): 104-111.
Zhang B G, Li G T. Roles of soil organisms on the enhancement of plant availability of soil phosphorus [J]. Acta Pedol. Sin., 1998, 36(1): 104-111.
- [3] 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. Distribution and availability of various forms of inorganic-P in calcareous [J]. Acta Pedol. Sin., 1992, 29(1): 80-86.
- [4] 郭晓冬,杨玲,张雪琴. 甘肃省主要耕地土壤磷素形态及其有效性研究[J]. 土壤通报, 1998, 29(3): 119-122.
Guo X D, Yang L, Zhang X Q. Distribution and availability of phosphorus in main cultivated land in Gansu province [J]. Chin. J. Soil Sci., 1998, 29(3): 119-122.
- [5] 林葆,林继雄,李家康. 关于合理施用磷肥的几个问题[J]. 土壤学报, 1992, 24(2): 57-60.
Lin B, Lin J X, Li J K. A few questions about rational phosphorus fertilization [J]. Acta Pedol. Sin., 1992, 24(2): 57-60.
- [6] 王兴仁,李洁茹,苏德纯,等. 北京石灰性潮土长期轮作的磷肥合理运筹[J]. 中国农业大学学报, 1999, 4(5): 43-49.
Wang X R, Li J R, Su D C et al. Management of phosphorus fertilizer in long-term rotation cropping in calcareous meadow soil in Beijing [J]. J. China Agric. Univ., 1999, 4(5): 43-49.
- [7] 沈善敏,康鸿志,张璐,等. 磷肥残效及农业系统养分循环再利用中长期试验[J]. 植物营养与肥料学报, 1998, 4(4): 339-344.
Shen S M, Lian H Z, Zhang L et al. A long-term field trial on residual effect of phosphorus and on the use of recycled nutrients in a farming system [J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 1998, 4(4): 339-344.
- [8] 顾益初,钦绳武. 长期施用磷肥条件下潮土中磷素的积累、形态转化和有效性[J]. 土壤, 1997, (1): 13-17.
Gu Y C, Xin S W. The accumulation, transformation and availability of phosphorus under long-term phosphorus fertilization in meadow soil [J]. Soils, 1997 (1): 13-17.
- [9] 蒋柏藩,顾益初. 石灰性土壤无机磷分级体系的研究[J]. 中国农业科学, 1989, 22(3): 58-66.
Jiang B F, Gu Y C. A suggested fractionation scheme of inorganic phosphorus in calcareous soils [J]. Sci. Agric. Sin., 1989, 22(3): 58-66.
- [10] 蒋柏藩,沈仁芳. 土壤无机磷分级的研究[J]. 土壤学进展, 1990, 18(1): 1-8.
Jiang B F, Shen R F. Fractionation of soil inorganic phosphorus [J]. Progr. Soil Sci., 1990, 18(1): 1-8.
- [11] 顾益初,蒋柏藩. 石灰性土壤无机磷分级的测定方法[J]. 土壤, 1990, 22(2): 101-110.
Gu Y C, Jiang B F. A analysis method for fractionation scheme of inorganic phosphorus in calcareous soils [J]. Soils, 1990, 22(2): 101-110.
- [12] 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.
- [13] 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: Agricultural Press, 1996. 200-320.
- [14] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000. 169-170.
- Lu R K. *Agriculture chemical analysis methods of soil* [M]. Beijing: China Agricultural Sciencetech Press, 2000. 169-170.
- [15] 邱莉萍, 刘军, 王益权, 等. 土壤酶活性与土壤肥力的关系研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2004, 10(3): 277-280.
- Qiu L P, Liu J, Wang Y Q *et al.* Research on relationship between soil enzyme activities and soil fertility [J]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 2004, 10(3): 277-280.
- [16] 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: Agricultural Press, 1986.
- [17] 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.
- [18] 向万胜, 黄敏, 李学垣. 土壤磷素的化学组分及其植物有效性[J]. *植物营养与肥料学报*, 2004, 10(6): 663-670.
- Xiang W S, Huang M, Li X H. Progress on fractioning of soil phosphorus and availability of various phosphorus fractions to crops in soil [J]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 2004, 10(6): 663-670.
- [19] Rodriguez D, Goudriaan J, Qyarzabal M. Phosphorus nutrition and water stress tolerance in wheat plant [J]. *J. Plant Nutr.*, 1996, 19(1): 29-39.
- [20] Batra M L, Chaudhry M L. Transformation of native and applied phosphorous in soil as affected by moisture regimes under black gram [J]. *J. Ind. Soc. Soil Sci.*, 1988, 36: 714-718.
- [21] 张奇春, 王光火. 应用离子交换树脂球研究温度对水稻土养分释放动态的影响[J]. *中国水稻科学*, 2003, 17(4): 365-368.
- Zhang Q C, Wang G H. Research on effect of temperature on nutrient release of paddy soil by using Ion-Exchange Resin Capsules [J]. *Chin. J. Rice Sci.*, 2003, 17(4): 365-368.
- [22] 蔡景波, 丁学锋, 彭红云, 等. 环境因子及沉水植物对底泥磷释放的影响研究[J]. *水土保持学报*, 2007, 21(2): 151-154.
- Cai J B, Ding X F, Beng H Y *et al.* Impact of environmental factors and submerged plant on phosphate release from sediment [J]. *J. Soil Water Conserv.*, 2007, 21(2): 151-154.
- [23] 刘瑞堂, 黄玉兰, 赵松义. 湘南烟稻轮作田土壤磷素肥力状况[J]. *湖南农学院学报*, 1992, 18: 407-417.
- Liu R T, Huang Y L, Zhao S Y. Phosphate statues of tobacco rice rotation soils in south Hunan [J]. *J. Hunan Agric. Coll.*, 1992, 18: 407-417.
- [24] 李和生, 李昌伟. 有机磷在壤土中的组分分布及其生物有效性[J]. *西北农业大学学报*, 1993, 21(S1): 85-89.
- Li H S, Li C W. The distribution of organic phosphorous fraction in loe soil and biological availability of organic phosphorus [J]. *Acta Univ. Agric. Bor. - Occid.*, 1993, 21(S1): 85-89.
- [25] 甘海华, 卢瑛, 戴军. 红壤复合体不同活性有机磷的分布特征及其与磷酸酶的关系[J]. *华南农业大学学报*, 1999, 20(2): 75-79.
- Gan H H, Lu Y, Dai J. Distribution of the organic phosphorus in red soil complexes and their correlation with soil phosphatase [J]. *J. South China Agric. Univ.*, 1999, 20(2): 75-79.
- [26] Jawson M D, Franzluebbers A J, Galusha D K. Soil fumigation within monoculture and rotation: response of corn and mycorrhizae [J]. *Agron. J.*, 1993, 85: 1174-1180.
- [27] 孟庆华, 李根英. 山东省主要土类的有机磷及其与磷酸化酶和解磷微生物的相关性研究[J]. *土壤通报*, 2006, 37(1): 84-87.
- Meng Q H, Li G Y. Study on organic phosphorus and its correlation with soil phosphatase and phosphorus-solubilizing microbe in the main soils of Shandong Province [J]. *Chin. J. Soil Sci.*, 2006, 37(1): 84-87.