

长期施用不同肥料对栗褐土无机磷组分的影响

杨艳菊¹, 王改兰¹, 王振宙¹, 聂冰¹, 熊静¹, 黄学芳²

(1. 湖南农业大学 资源环境学院, 湖南 长沙 410128; 2. 山西省农业科学院 旱地农业研究中心, 山西 太原 030031)

摘要: 采用顾益初、蒋柏藩的无机磷分级方法, 研究了长期施肥条件下栗褐土无机磷组分含量变化及其与土壤有效磷的关系。结果表明: 长期施用磷肥和有机肥均能促进栗褐土中无机磷的积累, 有机肥与磷肥配施效果更加明显。Ca-P 是栗褐土无机磷的主体, 占无机磷总量的 80.0%, 其次是 O-P、Fe-P 和 Al-P。长期施肥处理的无机磷各组分含量与不施肥处理相比均有所增加, 而单施氮肥处理无机磷各组分略有下降。无机磷中 Ca₂-P、Ca₈-P、Ca₁₀-P、Al-P、Fe-P 与 Olsen-P 相关系数分别为 0.976 7、0.886 5、0.915 5、0.860 2、0.848 4, 均达极显著水平, O-P 与 Olsen-P 的相关性不显著。通径分析表明 Ca₂-P、Al-P、Fe-P、Ca₁₀-P 为 Olsen-P 的主要磷源。

关键词: 长期施肥; 栗褐土; 无机磷组分

中图分类号: S143.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-7091(2011)增刊-0099-05

Effects of Long-term Different Fertilization on Inorganic Phosphorus Forms in Cinnamon Soil

YANG Yan-ju¹, WANG Gai-lan¹, WANG Zhen-zhou¹, NIE Bing¹, XIONG Jing¹, HUANG Xue-fang²

(1. College of Resource and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China;

2. Institute of Dryland Farming, Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Taiyuan 030031, China)

Abstract: The effects of long-term fertilization on inorganic phosphorus fractions in lime concretion cinnamon soil were studied using the fraction classification developed by Gu Yi-chu and Jiang Bo-fan. The results show that Long-term application of chemical phosphorus and manure fertilizer may increase the inorganic phosphorus. The main of inorganic phosphorus in cinnamon soil is Ca-P which takes up 80.0%, in the next place are O-P, Fe-P and Al-P. Under the Long-term application of chemical phosphorus and manure fertilizer, the components pool of inorganic phosphorus have increased compared with non-fertilization, except of nitrogen fertilization. In inorganic phosphorus, the related coefficient between Ca₂-P, Ca₈-P, Ca₁₀-P, Al-P, Fe-P and Olsen-P are 0.976 7, 0.886 5, 0.915 5, 0.860 2, 0.848 4, which reach significant positive relationship, except O-P. Ca₂-P, Al-P, Fe-P and Ca₁₀-P are the main sources of Olsen-P can be found by path analysis.

Key words: Long-term fertilization; Cinnamon soil; Inorganic phosphorus forms

磷是作物生长发育所不可缺少的营养元素之一, 对作物高产及保持优良特性有明显作用^[1]。土壤是植物磷素营养的主要来源。土壤中磷素以有机态和无机态存在, 土壤中无机磷指原生的矿物态磷、次生磷酸盐和以不同方式吸附在有机质和矿质黏粒表面的磷, 大体上可分为矿物态、吸附态和水溶态 3 种形态, 以矿物态为主^[2]。植物吸收的磷素以无机磷为主, 土壤无机磷的存在形态和含量直接影响着

作物对磷的吸收利用状况。土壤无机磷分级的研究开始于 20 世纪 30 年代, 1935 年 Fisher^[3] 提出了一个分级方法。1957 年张守敬和 Jackson^[4] 提出了较为系统分级提取的方法, 该方法把土壤无机磷分为水溶性磷、Ca-P、Al-P、Fe-P 和 O-P, 并广泛适用于中性和酸性土壤。此后, 大量科研工作者针对石灰性土壤无机磷的分级方法进行研究。1989 年蒋柏藩、顾益初提出了一套适用于石灰性土壤的无机磷分级

收稿日期: 2011-11-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(49971040); 湖南农业大学人才引进资金项目资助

作者简介: 杨艳菊(1986-), 女, 河北唐山人, 硕士研究生, 主要从事植物营养与施肥研究。

通讯作者: 王改兰(1959-), 女, 山西太原人, 教授, 硕士生导师, 主要从事植物营养与施肥方面的研究。

体系。这套体系的特点在于将土壤中的磷酸钙盐分成 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 3 种类型。该方法是目前石灰性土壤无机磷分组最常用的方法^[5-6]。近年来,有关长期施肥对土壤无机磷组分的影响已有一些报道^[7-12],但有关栗褐土无机磷组分的相关研究还未见有报道。栗褐土是黄土丘陵地区典型地带性土壤,虽然全磷含量较高,但因属石灰性土壤,磷很容易被固定,有效磷并不高,磷肥的利用率也不高^[13]。因此,本研究以砖窑沟流域试验区 20 年的长期定位试验为依据,探讨栗褐土长期施用不同肥料对土壤无机磷组分的影响,旨在为合理利用土壤和磷肥提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 供试土壤

试验于 1988 年布置在山西省河曲县砖窑沟流域的沙坪村窑家嘴梁顶平地上,供试土壤按山西省第二次土壤普查分类为轻壤黄土质淡栗褐土(土种),以中国土壤系统分类为黄土正常新成土(土类),1988 年作物播种前测得试验地耕层(0~20 cm)土壤基本理化性状:有机质、全氮、全磷含量分别为 5.64 0.445 1.23 g/kg,碱解氮、速效磷含量分别为 13.95 2.85 mg/kg,pH 值为 8.06, CaCO_3 含量为 13.55%。

表 1 各处理的施肥量

Tab. 1 Fertilization of each treatment kg/hm²

处理 Treatment	有机肥 Organic fertilization	氮肥 N	磷肥 P_2O_5
CK	0	0	0
N	0	120	0
NP	0	120	75
M_1	22 500	0	0
M_1N	22 500	120	0
M_1NP	22 500	120	75
M_2N	45 000	120	0
M_2NP	45 000	120	75

1.2 试验设计

试验设 8 个处理:①不施肥(CK);②单施氮肥(N);③氮磷肥合施(NP);④单施低量有机肥(M_1);⑤低量有机肥与氮肥配合施用(M_1N);⑥低量有机肥与氮磷肥配合施用(M_1NP);⑦高量有机肥与氮肥配合施用(M_2N);⑧高量有机肥与氮磷肥配合施用(M_2NP)。各处理施肥量见表 1。试验设 3 次重复,随机区组排列,小区面积 4 m×6 m,每年试验小区的处理不变。氮肥用含 N46% 的尿素,磷肥用含 P_2O_5 14% 的过磷酸钙,有机肥使用当地圈肥, P_2O_5 含量平均为 0.22% (多年平均值)。耕作管理

措施与大田相同。

1.3 土壤样品的采集与测定

试验于 2009 年作物播种前采集耕层(0~20 cm)土壤样品,风干后过 20 目和 100 目筛子。土壤全磷含量采用 NaOH 熔融-钼锑抗比色法测定,土壤有效磷含量采用 0.5 mol/L NaHCO_3 法测定^[14]。无机磷形态的分级测定采用蒋柏藩和顾益初^[15]提出的石灰性土壤无机磷分级测定方法。

试验数据采用 Excel 2003 DPS7.05 软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 长期施肥对土壤无机磷含量的影响

由图 1 可以看出,连续 21 年的不同施肥处理对栗褐土无机磷含量产生了很大的影响。试验处理中,有施磷与不施磷之分,外源磷的加入有种类上的区别,数量上的差异和方式上的不同。因此,连续 21 年不同施肥处理,土壤无机磷含量处理间差异非常明显(图 1)。与对照相比,除 N 处理无机磷含量略有降低外,有外源磷加入的处理均极显著高于对照,其中施用无机磷肥的 3 个处理(NP 、 M_1NP 、 M_2NP),无论是否与有机肥配合施用,均显著或极显著高于施用有机肥而未施用磷肥的 3 个处理(M_1 、 M_1N 、 M_2N)。在施用无机磷肥的 3 个处理中,又以 M_2NP > M_1NP > NP ,依次较对照中增加 50.8%,41.0% 和 23.8%,处理间差异极显著。 M_2N 、 M_1N 、 M_1 3 个处理中以 M_2N 极显著高于 M_1N 和 M_1 ,依次较对照增加 19.2%,10.2% 和 10.8%。显然长期施用磷肥和有机肥都有利于栗褐土无机磷的积累,且随有机肥施用量的增加而增加,有机肥与磷肥配合施用效果更加明显。

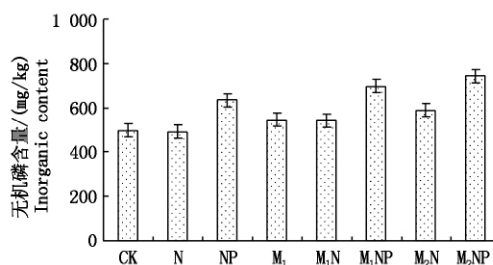


图 1 不同处理耕层土壤无机磷的变化

Fig. 1 Change of soil inorganic P in plough layer under different treatment

2.2 长期施肥对土壤无机磷组分的影响

表 1 显示,N 处理无机磷各组分含量除 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 略高于对照外,其他组分的含量均低于对照,尤其是 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 与 Al-P 下降幅度较大,分别较对照降低了 13.8% 和 16.6%,这是由于长期只施氮肥而不施磷肥

的条件下,作物对土壤磷吸收利用的结果。表明栗褐土中 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 与 Al-P 的有效性比较高,较易被作物吸收利用。其他有外源磷施入的 6 个处理,无机磷各组分含量均较对照中增加,但增加幅度不同。 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 增加的最为明显,较对照中增加 71.9% ~ 431.6%。其次为 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Al-P 、 Fe-P 、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 和 O-P 。分别较对照增加了 26.0% ~ 172.3%、6.9% ~ 109.1%、8.7% ~ 40.2%、2.4% ~ 10.6%、5.5% ~ 31.6%。值得注意的是,

虽然 O-P 与 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 比较稳定,但是经过 21 年连续施肥后,无机组的 O-P 含量较对照中增加了 30% 左右,极显著的高于其他处理,说明长期施用过磷酸钙容易产生 O-P 的固定。施用高量有机肥的处理有机无机配施处理(M_2N 、 M_1NP 、 M_2NP) $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 的含量较对照增加了 7.3% ~ 10.6%,极显著高于对照。生产中应考虑如何合理施用磷肥和有机肥来减少磷的固定。

表 2 不同处理土壤无机磷各组分含量变化
Tab.2 Change of soil inorganic P component under different treatment mg/kg

处理 Treatment	无机磷组分 Inorganic P component					
	$\text{Ca}_2\text{-P}$	$\text{Ca}_8\text{-P}$	Al-P	Fe-P	$\text{Ca}_{10}\text{-P}$	O-P
CK	13.60fE	63.00fF	19.20efDE	24.28 efDE	325.96dC	50.98bcB
N	11.72fE	62.81fF	16.02fE	22.07 fE	328.85dBC	49.64cB
NP	35.71cC	123.16cC	26.54cC	31.56abcABC	327.03abAB	67.11aA
M_1	28.05dD	79.41eE	21.63deD	27.69cdeBCDE	334.47bcdBC	53.79bcB
M_1N	23.38eE	81.41eE	20.53deDE	26.38defCDE	333.93cdBC	55.18bB
M_1NP	50.17bB	151.3bB	34.84bB	34.44aA	360.40aA	66.32aA
M_2N	36.47cC	95.14dD	22.78dCD	29.58bcdABCD	349.69abcAB	54.07bcB
M_2NP	72.30aA	171.56aA	40.15aA	34.05abAB	358.04aA	65.86aA

注:不同小写字母表是 LSD 0.05 水平差异显著性,不同大写字母表示 LSD 0.01 水平差异显著性。
Note: Different lowercase in the same row represents significant difference at $P\leq 5\%$ between treatments in the same layer; Different majuscule in the same column represents significant difference at $P\leq 1\%$ between treatments in the same layer.

从不同处理间比较可以看出,施用无机磷肥的 3 个处理(NP 、 M_1NP 、 M_2NP)无机磷各组分的含量与对照相比均极显著增加,且以有机无机配施增加的效果最为明显。施用有机肥而未施用磷肥的 3 个处理(M_1 、 M_1N 、 M_2N)与对照相比无机磷各组分有所增加,以施用高量有机肥的处理 M_2N 增加的效果明显。

2.3 长期施肥对无机磷组分比例的影响

由对照处理中无机磷各组分的比例可以看出, Ca-P 是栗褐土无机磷的主体,占无机磷总量的 80.0%,其次是 O-P 、 Fe-P 和 Al-P 。经过 21 年连续施用不同肥料后,无机磷各组分的比例发生了一定

的变化。 N 处理中 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 比例与对照相比有所增加,其余组分与对照相比均下降。这是因为其他 6 个有外源磷加入的处理中, $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 比例与对照相比均有所上升; Al-P 、 Fe-P 的比例因施用不同的肥料产生了不同变化; $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 比例下降; O-P 的比例除 NP 处理外其他处理比例下降。这说明:施用无机磷肥的 3 个处理(NP 、 M_1NP 、 M_2NP) $\text{Ca}_2\text{-P}$ 的比例明显高于对照,其中无机与有机配施效果更加明显。 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 比例以施用无机磷肥的 3 个处理高于未施用磷肥的 3 个处理(M_1 、 M_1N 、 M_2N),在施用无机磷肥的 3 个处理中比例增加顺序为 $\text{M}_2\text{NP} > \text{M}_1\text{NP} > \text{NP}$ 。

表 3 不同处理土壤无机磷组分比例
Tab.3 Percentage content of the inorganic P fractions under different treatment %

处理 Treatment	无机磷组分 Inorganic P fractions					
	$\text{Ca}_2\text{-P}$	$\text{Ca}_8\text{-P}$	Al-P	Fe-P	$\text{Ca}_{10}\text{-P}$	O-P
CK	2.7	12.7	3.9	4.9	65.6	10.3
N	2.4	12.8	3.3	4.5	67.0	10.1
NP	5.6	19.4	4.2	5.0	55.2	10.6
M_1	5.1	14.6	4.0	5.1	61.4	9.9
M_1N	4.3	15.1	3.8	4.9	61.7	10.2
M_1NP	7.2	21.7	5.0	4.9	51.7	9.5
M_2N	6.2	16.2	3.9	5.0	59.5	9.2
M_2NP	9.7	23.1	5.4	4.6	48.3	8.9

Al-P 占无机磷的比例与对照相比,以施用无机磷肥的 3 个处理的比例上升,未施用磷肥的 3 个处理中 M_1 比例上升, M_1N 处理 Al-P 比例略有下降,

M_2N 处理 Al-P 比例保持不变。 Fe-P 占无机磷的比例与对照相比,施用无机磷肥的 3 个处理中 NP 比例上升, M_1NP 不变, M_2NP 下降。

2.4 各形态无机磷与 Olsen-P 的相关性

用 Olsen 法所测得的土壤有效磷与植物吸收磷的相关性极显著,常用来衡量中性与石灰性土壤中

磷的有效性,探讨各形态无机磷与 Olsen-P 的相关性可以说明其有效性的太小。

表 4 土壤 Olsen-P 与各形态无机磷间的相关性

Tab. 4 Relationships between Olsen-P and different forms of inorganic P

组分 Fractions	Ca ₂ -P	Ca ₈ -P	Al-P	Fe-P	Ca ₁₀ -P	O-P
Ca ₈ -P	0.960 3 **					
Al-P	0.969 7 **	0.983 0 **				
Fe-P	0.914 8 **	0.943 9 **	0.921 1 **			
Ca ₁₀ -P	0.899 7 **	0.935 5 **	0.886 0 **	0.960 7 **		
O-P	0.807 1 *	0.922 3 **	0.865 8 **	0.915 0 **	0.872 1 **	
Olsen-P	0.976 7 **	0.886 5 **	0.915 5 **	0.860 2 **	0.848 4 **	0.678 8

注: * . $t_{0.05} = 0.707$; ** . $t_{0.01} = 0.834$ 。

从表 3 可以看出,除 O-P 与速效磷相关性不显著外,其余形态的无机磷与速效磷均呈极显著正相关关系,这说明栗褐土中速效磷的含量与 Ca₂-P、Al-P、Ca₈-P、Fe-P、Ca₁₀-P 的含量密切相关,Ca₂-P、Al-P、Ca₈-P、Fe-P、Ca₁₀-P 对速效磷的影响较大。各种无

机磷形态之间除 O-P 与 Ca₂-P 显著相关外,其余各形态无机磷之间均极显著相关。这说明栗褐土中各形态无机磷之间保持着相对稳定的比例,各形态无机磷均具有一定的活性,彼此之间在一定的条件下可以相互转化。

表 5 土壤 Olsen-P 与各形态无机磷间的通径系数

Tab. 5 Path coefficient between Olsen-P and the inorganic P fractions

组分 Fractions	Ca ₂ -P	Ca ₈ -P	Al-P	Fe-P	Ca ₁₀ -P	O-P
Ca ₂ -P	1.206 2 ⁺	-0.529 7	0.135 7	0.116 9	0.110 4	-0.062 8
Ca ₈ -P	1.158 3	-0.551 6 ⁺	0.126 4	0.118 5	0.106 6	-0.071 8
Ca ₁₀ -P	1.011 2	-0.430 7	0.161 9 ⁺	0.097 5	0.089 2	-0.041 8
Al-P	1.169 7	-0.542 2	0.130 9	0.120 6 ⁺	0.10 4	-0.067 4
Fe-P	1.094 0	-0.483 3	0.118 6	0.103 0	0.121 7 ⁺	-0.064 3
O-P	0.973 6	-0.508 8	0.086 8	0.104 4	0.100 5	-0.077 9 ⁺

注: + 表示直接通径系数,其余为间接通径系数。

Note: Denotes direct path coefficient, the others are indirect path coefficient.

运用 DPS 分析软件对土壤无机磷各组分含量与 Olsen-P 之间进行回归分析,可得方程为:

$$Y = -70.229 7 + 1.228 4X_1 - 0.274 31X_2 + 0.233 7X_3 + 0.296 8X_4 + 0.418 4X_5 - 0.216 8X_6$$

其中 Y 表示土壤有效磷的含量; X₁、X₂、X₃、X₄、X₅、X₆ 分别表示 Ca₂-P、Ca₈-P、Ca₁₀-P、Al-P、Fe-P、O-P 的含量; $P < 0.01$, $R^2 = 0.998 6$ 。

由方程可以看出,Ca₂-P 的系数最大,其次为 Fe-P、Al-P、Ca₁₀-P,表明它们对有效磷起着直接而又主要的作用,而 Ca₈-P 与 O-P 的系数为负值,说明它们对有效磷的作用较小,主要是通过影响无机磷其他组分来间接影响有效磷的含量。此方程进一步明确了栗褐土无机磷各组分与有效磷之间的关系。

3 结论与讨论

在栗褐土上长期施用化学磷肥和有机肥都有利于土壤中磷的积累,磷肥主要是增加无机磷的含量,

升高土壤中无机磷含量的比例,有机肥对土壤无机磷和全磷的比例影响不大。

本研究结果显示,除单施 N 肥处理,其他处理均可在一定程度上增加栗褐土土壤无机磷的总量及各组分含量。其中,M₁NP、M₂NP 对无机磷总量的增加上效果最为明显。从无机磷各组分相对含量上而言,M₁NP、M₂NP 与 CK 相比 Ca₁₀-P、O-P 的百分含量较少,Ca₂-P、Ca₈-P、Al-P 和 Fe-P 百分含量增加显著,这说明有机肥与化肥配施可以增加总无机磷的量,其中大部分转化成了活性较高的 Ca₂-P、Ca₈-P、Al-P 和 Fe-P,可见施用有机肥过程中带入土壤的磷素可以增加土壤磷素含量,有机肥对提高土壤活性较高无机磷组份也有明显的促进作用。这是因为有机物在腐解过程中产生的有机酸,可以掩蔽土壤胶体或铁铝氧化物的吸附位点,从而减少土壤对磷的吸附固定^[21-22]。也有研究表明,在氮、磷化肥与有机肥配和施用,土壤有机质增加而土壤 pH 下降

使土壤向环境中释放有效磷的能力增加^[23 24]。

从无机磷各组分比例看, Ca-P 是栗褐土无机磷的主体, 占无机磷总量的 79.2% ~ 82.1%; 各形态无机磷与 Olsen-P 的相关性可知, $\text{Ca}_2\text{-P}$ 是土壤最为有效磷源, $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Fe-P 、 Al-P 在土壤中的有效性居中为缓效磷源, $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 、 O-P 是土壤潜在磷源。林治安等^[25] 在山东做的长期定位试验也得出相似的结果, 而且认为缓效磷源基本不存在向无效态的进一步转化, 石灰性土壤中基本不存在磷的实质性固定问题。

参考文献:

- [1] 史瑞和, 赵芳杰, 沈其荣. 植物营养原理 [M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1989: 269 - 301.
- [2] 谢林花. 长期不同施肥对石灰性土壤磷素转化及剖面分布的影响 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2001.
- [3] Fisher R, Thomes. The determination of forms of inorganic phosphorus in soil [J]. Amer Soc Agro, 1935: 27 - 863.
- [4] Chang S C, M L Jackson. Soil phosphorus fractions in some representative soil [J]. Soil Sci, 1958, 9: 109 - 119.
- [5] 蒋柏藩, 顾益初. 石灰性土壤无机磷分级体系的研究 [M]. 北京: 科学出版社, 1983: 110 - 163.
- [6] 慕韩锋. 黄土旱塬长期定位施肥对土壤磷素分级、空间分布及有效性的影响 [D]. 西安: 西北大学, 2008.
- [7] 莱璐, 郝明德, 彭令发. 长期施肥对黄土高原旱地土壤无机磷空间分布的影响 [J]. 水土保持学报, 2003, 1(10): 76 - 77.
- [8] 丁怀香, 宇万太. 长期施肥对潮棕壤无机磷形态的影响 [J]. 中国农业生态学报, 2008, 16(4): 824 - 829.
- [9] 陈军平, 汪金舫. 长期施肥条件下潮土耕层有机磷含量与组分的变化研究 [J]. 中国农业生态学报, 2008, 16(2): 331 - 334.
- [10] 黄庆海, 赖涛, 吴强, 等. 长期施肥对红壤性水稻土壤磷素形态转化的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(1): 63 - 66.
- [11] 杨丽娟, 李天来, 曲慧, 等. 长期施肥条件下设施栽培土壤无机磷组分及其剖面分布特点 [J]. 土壤通报, 2008, 8(29): 4, 797 - 800.
- [12] Pil Jookim, Ddug Young Chunc, Doug Lasm Alo. Characteristics of Phosphorus Accumulation in soils under Organic and conventional farming in plastic film houses in Korea [J]. Soil Sci Plant Nutr, 2001, 47(2): 281 - 289.
- [13] 张亮, 王改兰, 段建南, 等. 长期是非对栗褐土腐殖质组分的影响 [J]. 山西农业大学学报, 2010, 30(1): 5 - 8.
- [14] 鲍士旦主编. 土壤农化分析 [M]. 第3版. 北京: 中国农业出版社, 2007: 40 - 440.
- [15] 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 - 102.
- [16] 刘兴兰, 高宗, 刘存寿, 等. 有机-无机配施的增产效果及对土壤肥力的影响的定位研究 [J]. 土壤学报, 1996, 33(2): 139 - 147.
- [17] 周宝库, 张喜林, 李世龙, 等. 长期施肥对黑土磷素及累积有效性的影响 [J]. 黑龙江农业科学, 2004(4): 5 - 8.
- [18] 谢林花, 吕家珑, 张一平, 等. 长期施肥对石灰性土壤磷素肥力的影响 I 有机质、全磷和速效磷 [J]. 应用生态学报, 2004, 15(5): 787 - 789.
- [19] 梁国庆, 林葆, 林继雄, 等. 长期施肥对石灰性潮土无机磷形态的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2001, 7(3): 241 - 248.
- [20] Lindsay W L, Frazier A W, Stephenson H F. Identification of reaction products from phosphate fertilizers in soils [J]. Soil Sci Am P, 1962, 2(3): 446 - 452.
- [21] 赵晓弃, 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.
- [22] 江晶, 张仁陟, 索东让. 长期对河西灌漠土无机磷形态的影响 [J]. 土壤通报, 2010, 41(4): 783 - 787.
- [23] 苏冰莹, 颜丽, 关连珠. 长期不同施肥对黑土无机磷组分的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2010(3): 4 - 7.
- [24] Guo S L, Dang T H, Hao M D. Phosphorus changes and sorption characteristics in a calcareous soil under long-term fertilization [J]. Pedosphere, 2008, 18(2): 248 - 256.
- [25] 林治安, 谢承陶, 张振山, 等. 旱作农田石灰性土壤磷素形态、转化及有效性 [J]. 土壤肥料, 1996, 6: 26 - 28.