

# 合成磷源在石灰性潮土中的有效性及氮肥形态对其的影响\*

安志装<sup>1</sup> 介晓磊<sup>2</sup> 李有田<sup>2</sup> 刘世亮<sup>1</sup> 魏义长<sup>2</sup> 白由路<sup>2</sup>

(1 中国科学院南京土壤研究所物质循环开放实验室, 南京 210008; 2 河南农业大学, 郑州 450002)

肖 卫强

(汝阳县种子公司, 汝阳 472000)

**摘 要** 采用盆栽试验的方法研究了几种人工合成磷源在两种质地土壤中的有效性及不同氮肥形态对它们有效性影响的机理。研究表明: 几种合成磷酸盐在轻壤质和轻粘质潮土中的生物有效性的顺序分别为: 磷酸二钙(DCP) > 磷酸八钙(OCP) > 磷酸铝(ATP) > 磷酸铁(FeP) > 氟磷灰石(FA) 和 DCP > ATP > OCP > FeP > FA。几种人工合成磷源在两种质地土壤中的有效性与土壤中相应形态无机磷的有效性相一致。它们在轻粘质潮土中的生物有效性明显受氮肥形态的影响。配施  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$  时, ATP 和 FA 的有效性比配施  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  明显提高。配施  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  可以明显提高 FeP 的有效性。它们在配施不同氮肥形态下的生物有效性与不同氮肥形态处理下的根际 pH 变化密切相关。

**关键词** 合成磷源, 质地, 氮肥形态, 有效性

**中图分类号** S315

我国北方地区分布着大面积的石灰性土壤, 其中潮土是主要类型之一。石灰性土壤富含石灰质<sup>[1]</sup>, 有效磷缺乏, 施用磷肥的当季利用率低, 限制着作物生产的提高。因此, 国内外许多土壤学家、植物营养学家都曾对石灰性土壤中的磷以及肥料磷施入土壤后的动态变化及其有效性做了大量研究。八十年代以来, 国内外学者多采用 Chang-Jackson 的方法对石灰性土壤中磷进行形态分析, 蒋柏藩和顾益初等提出石灰性土壤无机磷分级体系<sup>[2,3]</sup>, 以后, 不少学者针对石灰性土壤中磷的形态转化及有效性做了许多研究。然而这些研究都着重于非根际土壤, 即本体土壤(bulk soil), 而对于近根的根际土壤(rhizosphere soil)中磷素行为的研究却鲜见报道。本研究采用人工合成土壤中存在的几种磷源, 研究它们的有效性以及不同氮肥形态对其有效性的影响, 以期探讨根际效应对它们有效性影响的机理, 为石灰性土壤中的磷肥施用及磷素管理提供一定依据。

\* 河南省自然科学基金(96020311)

- 现工作单位中国科学院地理科学与资源研究所

收稿日期: 2000-10-09; 收到修改稿日期: 2001-03-20

# 1 材料与方法

## 1.1 试验材料

1.1.1 供试土壤 为采自河南农业大学试验农场的潮土耕层土壤(0~ 20 cm)和采自偃师超高产麦田的土壤(20~ 50 cm)。两种土壤的质地分别为轻壤质和轻粘质,其基本理化性状见表1。

表1 供试土壤的理化性状

Table 1 Physicochemical properties of soils tested

土壤类型	采样地点	有机质 O. M.	全氮 Total-N	碱解氮 Alkal-N	全磷 Total-P	速效磷 Avail-P	速效钾 Avail-K	pH <sup>1)</sup>	物理性粘粒 Clay	CaCO <sub>3</sub>
Soil type	Site	(g kg <sup>-1</sup> )	(g kg <sup>-1</sup> )	(mg kg <sup>-1</sup> )	(g kg <sup>-1</sup> )	(mg kg <sup>-1</sup> )	(mg kg <sup>-1</sup> )		(mg kg <sup>-1</sup> )	(mg kg <sup>-1</sup> )
砂质潮土	河南	15.9	0.991	83.28	1.65	28.84	105	8.50	22.86	45.0
粘质潮土	河南	7.94	0.525	35.0	1.43	10.14	88.92	8.05	53.18	32.80

1) 水土比 1:1

1.1.2 供试肥料 供试氮肥(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>、Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>为分析纯试剂;尿素CO(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>含氮量46.06%;钾肥K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>、KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>为分析纯试剂。供试磷肥磷酸二氢钾及在实验室人工合成石灰性土壤中几种常见的磷酸盐<sup>[4]</sup>,经化学分析鉴定(见表2)和X-射线衍射分析(XRD)表明,Fe-P、Al-P均为无定形态(Amorphous),磷酸八钙(OCP)和氟磷灰石(FA)为结晶质矿物(crystalline mineral)。

表2 供试磷肥的养分含量

Table 2 Nutrient contents in phosphates tested

磷源 P	分子式 Molecular formula	代号 Symbol	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (g kg <sup>-1</sup> )
磷酸二氢钾	KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	-	521.6
磷酸二钙	CaHPO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	DCP	412
磷酸八钙	Ca <sub>8</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>6</sub>	OCP	444
氟磷灰石	Ca <sub>10</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>6</sub> F <sub>2</sub>	FA	449
磷酸铝	AlPO <sub>4</sub> ·nH <sub>2</sub> O	Al-P	382
磷酸铁	FePO <sub>4</sub> ·nH <sub>2</sub> O	Fe-P	329

## 1.2 试验方法

在两种质地潮土中各进行一次盆栽试验,第一次用轻壤质潮土,第二次用轻粘质潮土。第一次盆栽试验共设置7个处理,包括KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>、DCP、OCP、Al-P、Fe-P、FA等6种不同的磷源及一个对照(CK),重复3次,每盆装土5 kg,施入2.22 g (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>和1.74 g K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>处理中钾含量扣除,磷(以P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>计)0.94 g。肥料与土壤混合均匀后,装盆,盆底铺细砂及300目的尼龙网(见图1),用300目尼龙网缝制根袋,装混好的土壤0.5 kg,埋入装有同样土壤4.5 kg的盆中央。每袋种植玉米(掖单13)7株,三叶期定苗3株。生长期,定期称重灌水,保持土壤含水量在田间持水量的70%左右,玉米生长45d后收获,采取植株样、根袋内(作为根际)、外(非根际)土样进行分析测定。第二次盆栽为N、P交互试验。即三种不同形态的氮肥((NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>、Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>、CO(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>)和六种不同形

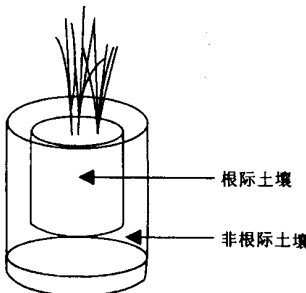


图1 盆栽试验示意图

Fig.1 Sketch map of the pot experiment

态的磷源处理(DCP、A+P、OCP、Fe-P、FA、CK)的交互处理,共18个处理,重复2次。每1 kg土壤施入N 250 mg、P( $P_2O_5$ ) 167 mg、K( $K_2O$ ) 250 mg,与土壤混合均匀,过20目筛。根袋装土200 g,埋入装有相同土壤的2.8 kg白瓷盆中央(如图1)。尼龙网袋中播种玉米(90-1),定苗3株,30d后采样分析。

### 1.3 分析方法

1.3.1 植株样全磷 采用( $H_2SO_4+H_2O_2$  消煮)钼锑抗比色法,土样有机质( $K_2Cr_2O_7$ -浓 $H_2SO_4$  消化)油浴加热- $K_2Cr_2O_7$  容量法,全氮凯氏法、全磷( $HClO_4$ - $H_2SO_4$  消煮)钼锑抗比色法,速效磷Olsen法<sup>[5]</sup>、pH值用pHS-3型酸度计测定<sup>[6]</sup>。

1.3.2 无机磷分级 采用蒋柏藩和顾益初石灰性土壤无机磷分级方法<sup>[3]</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 几种磷源在轻壤质潮土中的有效性

由表3可以看出,几种磷源对盆栽玉米的生物有效性大小顺序为:  $KH_2PO_4 > DCP > OCP > A+P > Fe-P > FA$ 。 $KH_2PO_4$ 的有效性最高,但与DCP没有明显的差异; $KH_2PO_4$ 、DCP与其他磷源处理相比,表现出明显的肥效,它们的有效性显著高于其他磷源,差异达极显著水平。A+P与Fe-P的生物有效性也没有显著差异,它们的有效性虽低于 $KH_2PO_4$ 和DCP的肥效;但显著高于FA的肥效,差异显著。FA与CK无明显差异,在供试当季几乎表现不出肥效。

表3 不同磷源处理的玉米干物重及利用率

Table 3 Dry weight (DW) and absorption coefficient of maize treated with phosphates

处理 Treatment	干物重 DW( $g\ pot^{-1}$ )	吸磷量 Absorbed P ( $mg\ pot^{-1}$ )	利用率 <sup>1)</sup> Coefficient of uptake (%)	吸磷量差异显著性 <sup>2)</sup> Significance	
$KH_2PO_4$	8.30±0.21	18.55±0.38	1.6	a	A
DCP	8.16±0.09	17.77±0.17	1.4	a	A
OCP	6.89±0.11	15.59±0.07	0.88	b	B
A+P	6.85±0.31	15.02±0.24	0.74	b	B
Fe-P	6.73±0.14	14.20±0.31	0.54	b	B
FA	5.90±0.20	12.26±0.14	0.068	c	B
CK	5.98±0.09	11.98±0.13		c	B

1) 利用率% = (处理吸磷量 - 对照吸磷量) / 每盆施磷量; 2) 大、小写字母分别为 $LSD_{0.01}$ 、 $LSD_{0.05}$ 的水平差异显著性

从盆栽玉米对几种磷源磷素的利用率来看,其大小顺序与干物重高低顺序相一致。在盆栽试验较短的时间内,玉米苗期对几种磷源的利用率是极其低的,有效性最大的 $KH_2PO_4$ 处理也只有1.6%,而一般大田作物的磷肥利用率则可达10%以上<sup>[7]</sup>。在本试验中限定玉米根系生长范围条件下,玉米根系并不能完全伸展于整个盆体,而只能生长于限定的根袋范围土壤,如果仅从根袋范围土壤来考虑各磷源利用率,则分别是: $KH_2PO_4$ 为16%,DCP为14%,OCP为8.8%,A+P为7.4%,Fe-P为5.4%,FA为0.68%。

从玉米苗期对根际磷素利用率来看, $KH_2PO_4$ 、DCP甚至OCP、A+P、Fe-P的利用率还是相当高的。一方面由于施用 $(NH_4)_2SO_4$ ,作物吸收 $NH_4^+$ 的相反效应<sup>[8]</sup>促进对磷素的吸收;另一方面,也与近根土壤的pH下降有关(见表7),pH的下降,促进了磷源溶解度的提高,

提高了各磷源的有效性,增加了玉米吸磷量。

## 2.2 几种磷源在轻粘质潮土中的有效性

在轻粘质潮土中,从干物重来看,几种磷源的生物有效性大小顺序为 DCP > A+P > OCP > Fe-P > FA。DCP、A+P 的有效性没有显著差异,而 OCP 的有效性低于 DCP、A+P,差异达 5% 的显著水平; Fe-P 与 DCP、A+P、OCP 相比,有效性较差,与 FA 相比,差异只达 5% 的显著水平。从吸磷量及其利用率来看,A+P 的有效性大于 DCP,其他磷源的有效性大小与干物重相一致。DCP、OCP 的有效性差异呈显著水平,A+P、OCP 的有效性差异呈极显著水平。

表 4 轻粘质潮土中施用几种磷源的玉米植株干物重及利用率

Table 4 Dry weight (DW) and absorption coefficient of corn treated with phosphates in light-clayed soil

处理 Treatment	干物重 DW(g pot <sup>-1</sup> )	吸磷量 Absorbed P (mg pot <sup>-1</sup> )	利用率 <sup>2</sup> Coefficient of uptake (%)
DCP	3.495 ± 0.11 Aa <sup>1)</sup>	9.017 ± 0.25 Aa	1.87
A+P	3.403 ± 0.14 Aa	9.407 ± 0.23 Aa	2.05
OCP	3.238 ± 0.11 Ab	8.416 ± 0.17 Ab	1.59
Fe-P	2.652 ± 0.25 Bb	6.237 ± 0.12 Bc	0.60
FA	2.252 ± 0.12 BCbc	5.139 ± 0.11 BCd	0.092
CK	2.220 ± 0.12 Cc	4.936 ± 0.21 Cd	—

1) 大、小写字母分别为 LSD<sub>0.01</sub>、LSD<sub>0.05</sub> 的水平差异显著性; 2) 利用率% = (处理吸磷量 - 对照吸磷量) / 每盆施磷量

## 2.3 不同氮肥形态对几种磷源生物有效性的影响

不同氮肥形态处理下几种磷源有效性以玉米苗期植株干重为指标(见表 6) 进行分析(表 5), F 检验结果表明,氮处理达显著水平,不同磷源处理和氮、磷的交互作用均达极显著水平。以上分析结果说明,几种磷源施入土壤后的有效性大小不仅与其自身的性质有关,而且还受到氮形态的影响。

表 5 不同氮肥形态处理下几种磷源有效性的方差分析

Table 5 Variance analysis of availability of phosphates coupled with different forms of nitrogen

变异来源 Variant sources	自由度 Degree of freedom	平方和 Sum of square	均方 Mean square	F	F <sub>0.05</sub>	F <sub>0.01</sub>
重复(r)	1	0.113	0.113	1.14	18.51	98.49
氮处理(N)	2	5.84	2.920	29.645 <sup>1)</sup>	19.00	99.00
误差(e <sub>1</sub> )	2	0.197	0.0985			
磷处理(P)	5	10.110	2.055	18.348 <sup>2)</sup>	2.90	4.56
氮 × 磷(N × P)	10	5.180	0.518	4.625 <sup>1)</sup>	2.55	3.80
误差(e <sub>2</sub> )	15	1.684	0.112			
总变异	35	23.124				

1) P < 0.05 的显著水平; 2) P < 0.01 的显著水平

从表 6 可以看出,几种磷源配施不同氮肥形态下的有效性表现出显著的差异。比较配施三种氮肥形态下几种磷源的有效性差异,从总体来看,大致是以配施 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、CO(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub> 时玉米干物重较高,而配施 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 的则较低。即配施 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 CO(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub> 处

理下的有效性显著大于  $\text{NO}_3^-$ -N 处理下的有效性。不同的磷源受氮肥形态的影响不同, A+P、Fe-P、OCP 及 FA, 明显受到氮形态的影响而表现出生物有效性的显著差异(表 6)。尤其是 A+P, 配施  $\text{NH}_4^+$ -N 时的生物有效性与配施  $\text{NO}_3^-$ -N 和  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$  下的有效性达极显著差异; 配施  $\text{NO}_3^-$ -N 和  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$  下的有效性差异也达 5% 的显著水平。Fe-P、OCP 及 FA 配施不同氮肥形态的有效性差异相一致。FA 配施  $\text{NH}_4^+$ -N 处理的玉米干物重高于配施  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$  处理, 二处理又都显著高于配施  $\text{NO}_3^-$ -N 处理的干物重; 而 OCP 和 Fe-P 配施  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$  处理的玉米干物重高于配施  $\text{NH}_4^+$ -N 处理。

表 6 磷源配施不同氮肥形态时玉米植株干重

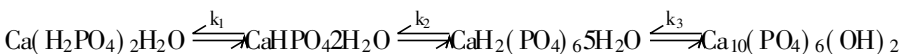
Table 6 Dry weight and uptake coefficient of maize treated with phosphates coupled with different forms of nitrogen

磷源 P	氮形态 N	干物重 DW(g pot <sup>-1</sup> )	吸磷量 Absorbed P (mg pot <sup>-1</sup> )	吸磷量差异显著性 <sup>1)</sup> Significance	
DCP	$\text{NH}_4^+$ -N	3.635 ± 0.26	9.026 ± 0.32	b	A
	$\text{NO}_3^-$ -N	3.275 ± 0.18	7.944 ± 0.22	a	A
	$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$	3.730 ± 0.27	10.080 ± 0.41	b	A
A+P	$\text{NH}_4^+$ -N	4.672 ± 0.26	13.183 ± 0.21	c	B
	$\text{NO}_3^-$ -N	1.980 ± 0.17	5.460 ± 0.14	a	A
	$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$	3.558 ± 0.20	9.577 ± 0.25	b	A
OCP	$\text{NH}_4^+$ -N	3.461 ± 0.11	8.901 ± 0.31	ab	A
	$\text{NO}_3^-$ -N	2.696 ± 0.14	7.544 ± 0.12	b	A
	$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$	3.556 ± 0.12	8.804 ± 0.16	a	A
Fe-P	$\text{NH}_4^+$ -N	2.478 ± 0.28	6.179 ± 0.17	ab	A
	$\text{NO}_3^-$ -N	2.079 ± 0.16	5.988 ± 0.34	b	A
	$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$	3.254 ± 0.17	6.543 ± 0.21	a	A
FA	$\text{NH}_4^+$ -N	2.705 ± 0.09	5.318 ± 0.14	a	A
	$\text{NO}_3^-$ -N	1.880 ± 0.09	4.628 ± 0.13	b	A
	$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$	2.171 ± 0.12	5.470 ± 0.22	ab	A
CK	$\text{NH}_4^+$ -N	2.161 ± 0.12	5.088 ± 0.15		
	$\text{NO}_3^-$ -N	2.880 ± 0.09	4.250 ± 0.11		
	$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$	2.171 ± 0.09	2.171 ± 0.12		

1) 大、小写字母分别为  $\text{LSD}_{0.01}$ 、 $\text{LSD}_{0.05}$  的水平差异显著性

## 2.4 OCP、A+P 在两种质地土壤上的有效性差异比较

以上试验结果表明, 几种供试磷源在两种质地土壤上的有效性相一致, 这与顾益初等<sup>[4]</sup>人的研究结果相一致, 反映了它们有效性的不同。同时, 也可以看出, 几种合成磷源在两种质地上表现出的有效性又不完全一致。轻壤质潮土中, OCP 的有效性大于 A+P, 而在轻粘质潮土中, A+P 的有效性大于 OCP。它们在两种质地上表现出的有效性与两种质地土壤中相应形态的无机磷含量相一致。轻壤质潮土中磷酸八钙占无机磷含量的百分比远大于在轻粘质潮土中所占的百分比(如图 2), 前一种土壤中磷酸八钙的含量为后一种土壤的四倍; 而 A+P 在轻粘质潮土中的含量比在轻壤质潮土中的含量高。OCP 和 A+P 是两种有效性相差不多的有效性磷源。石灰性土壤中无机磷形态之间一个动态平衡的变化过程<sup>[9]</sup>:



( $k_1 > k_2 \gg k_3$ ); 但同时也应该考虑到 Fe-P、A+P 在土壤磷形态转化中的重要地位。当土壤

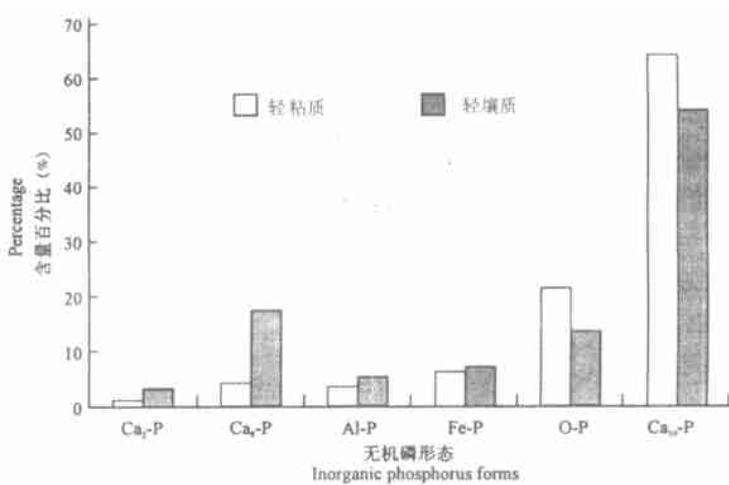


图 2 两种质地土壤中各无机磷形态占的百分比 (%)

Fig. 2 Percentage of inorganic phosphorus forms in two soils (%)

中建立起一个强大的无机磷库时,当速效磷消耗时,这个动态变化平衡就向有效性较高的方向移动。当两种磷源施入两种土壤时,由于轻壤质潮土中有丰富的  $Ca_8-P$  库,磷酸八钙和  $Al-P$  作为一种有效储备磷库<sup>[4]</sup>,施入的  $OCP$  的有效性就表现出来,其有效性大于  $Al-P$ ;而在轻粘质潮土中,由于磷酸八钙的含量较低,  $Al-P$  含量大于  $Ca_8-P$ ,施入  $Al-P$  的有效性大于  $OCP$ 。土壤是一个复杂的体系,两种磷源在两种质地土壤上的有效性差异也可能是由于其他因素的影响,另外,据研究,  $OCP$ 、 $Al-P$  与  $Ca_2-P$  之间存在着相关性较高的通径系数<sup>(1)</sup>,说明  $Ca_8-P$ 、 $Al-P$  的有效性可能主要通过转化为  $Ca_2-P$  而表现出来,同时也证明了  $Ca_2-P$  是一种十分有效的磷源,这些都有待于进一步的研究确认。

## 2.5 不同氮肥处理下的近根际效应对不同磷源有效性的影响

几种人工合成磷源的有效性在不同氮肥形态配施下的有效性不同(如表 6),  $Al-P$  配施  $NH_4^+-N$  的有效性甚至大于  $DCP$ ,冯固等<sup>[10]</sup>也曾经报道过相似的研究结果。说明不同磷源的有效性受氮肥形态的影响而表现出较大的差异。氮肥形态对不同磷源有效性的影响可能与它们引起的近根际  $pH$  变化有关<sup>[11]</sup>。

从表 7 可以看出,不同氮肥形态处理下,近根际  $pH$  表现出不同的变化数量和方向。同一氮肥形态配施下不同磷源处理的近根际  $pH$  变化也不同,配施  $NO_3^- -N$  时近根际  $pH$  表现出不同的升高趋势;  $NH_4^+ -N$ 、 $CO(NH_2)_2$  配施条件下不同磷源处理的近根际以及本体土壤  $pH$  值都呈现不同程度的下降趋势,从总体趋势来看,  $NH_4^+ -N$  配施条件下的下降幅度大于配施  $CO(NH_2)_2$  处理,但两者处理间的变化没有显著差异。由于石灰性土壤中无机磷多以磷酸钙盐形态存在,近根际酸化促进了石灰性土壤中磷源的活化,提高了近根际土壤磷溶液浓度,增加了  $H_2PO_3^-$  的比例;  $H_2PO_4^-$  较  $HPO_4^{2-}$  易为植物吸收,因此,近根际酸化

(1) 安志装. 几种磷源在石灰性土壤中的有效性及形态转化的研究. 河南农业大学硕士论文, 1998

提高了不同磷源的有效性, 促进了玉米对磷的吸收。从表 6 可以看出, 配施  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$  条件下, 不同磷源处理的玉米吸磷量大于配施  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  的处理, 吸磷量与两种氮肥形态条件下不同磷源处理的近根际 pH 变化量间存在极显著的负相关关系, 这种关系分别可用以下两个直线回归方程描述:  $Y_{\text{NH}_4^+\text{-N吸磷量}} = 14.214 - 22.643x$  ( $x$  代表  $\Delta\text{pH} = \text{pH}_{\text{BS}} - \text{pH}_{\text{R}}$ ),  $R^2 = 0.7259^{**}$ ;  $Y_{\text{CO}(\text{NH}_2)_2\text{吸磷量}} = 12.745 - 19.341x$ ,  $R^2 = 0.9181^{**}$ ; 而配施  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  条件下的近根际 pH 变化量与吸磷量之间的关系则较复杂。不同氮肥形态引起近根际 pH 的变化不同是磷肥在不同氮肥形态处理下表现出有效性差异的一个主要原因; 但同时也应该注意到其他近根际效应在磷源有效性差异中可能也起作用。由于根系吸收阴阳离子的相反效应, 玉米吸收  $\text{NH}_4^+$  促进了对磷酸根的吸收, 伴随的  $\text{SO}_4^{2-}$  阴离子也可能发生与  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  在土壤表面上的竞争吸附, 提高了不同磷源的有效性, 而对  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  离子的吸收不利于磷酸根的吸收。  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  条件下 A+P、Fe-P 有效性增加, 还可能与根际的专性分泌物络合磷酸铁、磷酸铝中的铁、铝同时释放出  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  离子有关<sup>[12]</sup>。A+P、Fe-P 二者间有效性的差异可能与磷酸铁的溶度积常数 ( $\text{pK}_{\text{sp}} = 30.0 \sim 36.0$ ) 大于磷酸铝 ( $\text{pK}_{\text{sp}} = 27.7 \sim 30.5$ ) 有关。

表 7 几种磷源配施不同氮肥形态处理下的近根际 pH 变化

Table 7 Change of pH under treatments with different phosphates coupled with different forms of nitrogen

土壤 样品 <sup>1)</sup>	不同氮肥和磷源处理的 pH																基础土样 Basal soil		
	pH value under treatment of different nitrogen fertilizer and phosphates																		
	$\text{NH}_4^+\text{-N}$				$\text{NO}_3^-\text{-N}$				$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$				CK						
Sample	DCP	OCP	FA	A+P	Fe-P	CK	DCP	OCP	FA	A+P	Fe-P	CK	DCP	OCP	FA	A+P	Fe-P	CK	
R	7.85	7.88	7.65	7.88	7.76	7.62	8.05	8.07	8.03	8.10	8.01	8.00	7.86	7.87	7.70	7.90	7.74	7.65	
B	7.96	7.99	7.80	8.00	7.84	7.79	8.03	8.04	8.00	8.05	7.99	7.97	7.98	7.99	7.85	7.94	7.82	7.77	8.05

1) R(Rhizosphere) 代表近根际土壤, B(Bulk soil) 代表本体土壤

不同氮肥形态引起的近根际变化是不同磷源产生有效性差异的主要原因。其中近根际 pH 变化是主要原因之一, 但同时其他根际效应的影响也是一个重要的方面。

### 3 结 论

1. 石灰性潮土中, 几种人工合成磷源的有效性受到不同质地的影响。轻壤质土壤中, 几种磷源有效性大小顺序为  $\text{KH}_2\text{PO}_4 > \text{DCP} > \text{OCP} > \text{A+P} > \text{Fe-P} > \text{FA}$ ; 在轻粘质土壤中为  $\text{DCP} > \text{A+P} > \text{OCP} > \text{Fe-P} > \text{FA}$ 。几种磷源的有效性与土壤中相应形态无机磷的有效性相一致, 即 DCP 为直接有效的磷源, OCP 和 A+P 为有效磷的储备, 有效性较高; Fe-P 在作物营养中也有一定的意义, FA 在当季几乎不表现出肥效。

2. OCP、A+P 在两种质地土壤中的有效性与其中相应形态的有效性相一致, 土壤中磷酸八钙、磷酸铝的有效性可能主要通过转化为  $\text{Ca}_2\text{P}$  而表现出来。

3. 各种磷源的有效性受氮肥形态的影响。粘质潮土施用  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$  后, A+P、FA 的有效性比施用  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  有明显提高。施用  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  可以较明显地提高 Fe-P 的有效性。总的看来, 磷的有效性在配施  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$  时较高。配施不同形态氮肥下, 几种磷源的有效性变化与根际 pH 变化以及其他根际效应相关。

## 参 考 文 献

1. 朱祖祥主编. 土壤学. 北京: 农业出版社, 1983
2. 蒋柏藩, 顾益初. 石灰性土壤无机磷分级体系的研究. 中国农业科学, 1989, 22(3): 58~66
3. 顾益初, 蒋柏藩. 石灰性土壤无机磷分级的测定方法. 土壤, 1990, 22(2): 101~102
4. 顾益初, 李阿荣, 蒋柏藩. 不同磷源在石灰性土壤中的供磷能力. 土壤, 1991, 23(6): 296~301
5. 土壤化学专业委员会编. 土壤农业化学常规分析方法. 北京: 科学出版社, 1981
6. 中国科学院南京土壤研究所编. 土壤理化分析. 上海: 上海科学出版社, 1978
7. 熊毅, 李庆远主编. 中国土壤(第二版). 北京: 科学出版社, 1990
8. 史瑞和, 沈其荣编著. 植物营养原理. 南京: 江苏科学技术出版社, 1989
9. Leher J R. Brown W E. Calcium phosphate fertilizers: A petrographic study of their alteration in soils. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 1958, 22(1): 29~32
10. 冯固, 杨茂秋, 白登莎. 用 $^{32}\text{P}$ 示踪法研究石灰性土壤中磷素的形态及有效性变化. 土壤学报, 1996, 33(3): 301~307
11. 周文龙, 张福锁, 曹一平. 植物根际pH值动态及其效应. 张福锁主编. 土壤与植物营养研究新动态(第一卷). 北京: 北京农业大学出版社, 1992. 23~30
12. 张福锁, 李晓林. 石灰性土壤磷的生物活化途径. 张福锁主编. 土壤与植物营养研究新动态(第一卷). 北京: 北京农业大学出版社, 1992. 23~30

## AVAILABILITY OF PHOSPHATES AND EFFECT OF DIFFERENT FORMS OF NITROGENOUS FERTILIZER

An Zhi-zhuang<sup>1</sup> Jie Xiao-lei<sup>2</sup> Li You-tian<sup>2</sup> Liu Shi-liang<sup>1</sup> Wei Yi-chang<sup>2</sup> Bai You-lu<sup>2</sup>

(1 Lab of Material Cycling in Pedosphere, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008)

2 Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002)

Xiao Wei-qiang

(Ruyang county seeds company, Ruyang 472000)

### Summary

Pot trials were conducted to study on availability of several forms of artificial mineral phosphate in light loam and light clay calcareous Chao soils, and mechanisms of effects of  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ,  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ , and  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  on their availability. The results showed that the order of the five phosphates in availability in light-loam and light-clayed calcareous Chao soils was as follows respectively:  $\text{DCP} > \text{OCP} > \text{A+P} > \text{Fe-P} > \text{FA}$  and  $\text{DCP} > \text{A+P} > \text{OCP} > \text{Fe-P} > \text{FA}$ , consistent with those of the corresponding forms of inorganic in soils. Their availability was markedly affected by forms of nitrogen applied. The availability of  $\text{A+P}$  and  $\text{FA}$  coupled with  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  and  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$  in light-clayed soil was obviously higher than that with  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ , while application of  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  could significantly raised the availability of  $\text{Fe-P}$ . Their availability varies with nitrogenous form and pH in rhizosphere.

**Key words** Artificial mineral phosphates, Soil texture, Nitrogenous forms, Availability