

石灰性土壤 Ca-P 分布及转化特征的研究

于淑芳 杨 力

(山东省农科院土壤肥料研究所, 济南 250100)

STUDY OF Ca-P DISTRIBUTION AND TRANSFORMATION FEATURE IN CALCAREOUS SOIL

Yu Shu-fang Yang Li

(The Soil and Fertilizer Institute of Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan 250100)

关键词 石灰性土壤, Ca-P , 分布, 转化

中图分类号 S151.9

在石灰性土壤无机磷中约有 70%~80% 是以 Ca-P 形态存在^[1~3]。水溶性磷肥施入土壤后短期内以磷酸二钙形式存在, 随着时间的推移逐步向磷酸八钙转化^[4]。研究表明正常施磷情况下, 一个生长季节在水溶性磷肥转化的各级无机磷中 Ca-P 约占 80%^[5]。因此 Ca-P 在石灰性土壤中起着举足轻重的作用。蒋柏藩、顾益初按照 Ca-P 特点和有效性将其分成三级并提出了分级体系^[6,7], 为研究石灰性土壤 Ca-P 提供了理论依据和手段。本文研究了占山东省土地面积三分之二的石灰性土壤中 Ca-P 分布、转化特征及长期施肥对 Ca-P 的影响, 以期为这类土壤的磷肥施用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

取山东省代表性石灰性砂姜黑土、褐土、潮土 0~20 cm 土样 11 个和 4 个土壤剖面不同深度土样(表 1) 分析各级 Ca-P 。

1.2 微区(1m²) 定位试验

小麦—夏玉米一年两作, 年限为 7 年, 研究长期施肥对 Ca-P 的影响, 棕壤土作为对照。供试土壤性质见表 2。试验处理为: (1) N, (2) NP, (3) CK(不施肥), (4) M(单施有机肥), (5) NP+M。三次重复, 随机排列。供试肥料种类、用量及施肥方法为: 氮肥用尿素, 磷肥用过磷酸钙, 以每 hm^2 每季施用 150 kg 纯氮、150 kg P_2O_5 为标准。氮肥一半作基肥, 一半作追肥。磷肥全部作基肥施用。有机肥用纯马粪, 每 hm^2 用量 25 000 kg(鲜), 其中含水分 40%、有机质 56%、全氮 1.68%、全磷 1.0%、全钾 0.60%。有机肥在每年秋种时施用一次, 化肥每季作物都施。

表 1 供试土壤基本性质

研究内容	样品编号	取样地点	土类	有机质	全 P	Olsen-P	CaCO ₃	pH	粘粒	
				(g kg ⁻¹)	(%)	(P, mg kg ⁻¹)	(%)		< 0.005mm(%)	
Ca-P 水平分布	1	临淄	砂姜黑土	18.0	0.18	7.86	—	7.7	40.2	
	2	临淄	褐土	11.4	0.13	6.16	5.70	7.0	32.2	
	3	青州	褐土	8.2	0.14	6.50	2.05	7.4	35.1	
	4	郭店	褐土	8.8	0.14	12.00	6.10	7.6		
	5	农科院	褐土	16.9	0.14	39.12	4.78	7.6	45.4	
	18 条地									
	6	牛旺	褐土	12.5	0.11	4.62	—	7.0	21.2	
	7	饮马泉	褐土	16.8	0.14	14.75	6.20	7.2	37.2	
	8	聊城	潮土	16.3	0.15	45.27	6.98	7.4	33.4	
	9	聊城	潮土	9.7	0.15	16.51	6.71	7.8	32.5	
	10	济阳	潮土	10.3	0.17	5.80	7.41	7.8	21.2	
Ca-P 垂直分布	11	定陶	潮土	7.8	0.15	3.59	7.80	8.2	17.2	
	农科院		褐土	13.1		29.61	4.40	7.2		
	9 条地									
		临淄	褐土	10.5		4.26	5.78	7.4		
		临淄	砂姜黑土	8.3		1.56	7.45	7.6		
	定陶	潮土	7.6		1.78	7.56	8.0			

表 2 微区定位试验土壤的主要农化性状

土类	有机质 (g kg ⁻¹)	碱解氮 (N, mg kg ⁻¹)	Olsen-P (P, mg kg ⁻¹)	速效钾 (K, mg kg ⁻¹)	CaCO ₃ (%)	粘粒 (< 0.005mm)(%)
棕壤	6.83	17.54	5.4	96.6	0.40	26.8
潮土	5.71	15.19	5.9	62.5	7.45	14.2
褐土	9.67	31.25	18.2	95.0	5.19	40.2

1.3 培养试验

采用表 1 中 5 号土和取自寿光大棚内土壤(有机质 13.87g kg⁻¹, 碱解氮 92mg kg⁻¹, 速效磷 125.03mg kg⁻¹, 速效钾 185mg kg⁻¹, CaCO₃ 3.76%, pH7.3)风干过 1mm 筛, 每种土称取 100g 11 份, 分别加入 0、200、400、600、800、1000、2000、4000、6000、8000、10000mg/L 磷(纯 P)溶液 50ml, 60%~70% 田间持水量室温下培养 100 天, 分析 Ca-P 和 Olsen-P。

1.4 分析方法

有机质、全氮、全磷、碱解氮、速效钾、pH 均用常规方法, CaCO₃ 气量法, 粘粒比重计法, Ca-P 分级顾益初、蒋柏藩提供的方法^[6,7]。

2 结果与讨论

2.1 石灰性土壤 Ca-P 分布特征

供试土壤 Ca-P 水平分布见表 3。石灰性潮土、砂姜黑土 Ca-P 总量大于褐土。三类土壤在 Ca-P 组成中 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 占绝大多数, $\text{Ca}_8\text{-P}$ 次之, $\text{Ca}_2\text{-P}$ 最少, 它们平均占 Ca-P 的 76.45%、20.68% 和 2.87%。不同土类间有一定差异, 表现为 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 含量潮土 > 砂姜黑土 > 褐土, 这主要是成土母质所致; $\text{Ca}_8\text{-P}$ 和 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 受耕种及原生含磷矿物风化双重影响, 供试土壤耕种历史悠久, 这两级 Ca-P 土类之间已无明显差异。石灰性土壤各级 Ca-P 的有效性前人曾做过研究, 作者也曾利用生物试验进行过研究^[2,4,5], 均证明 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 是第一有效磷源, $\text{Ca}_8\text{-P}$ 可作为缓效磷源, 而 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 只能是一种潜在磷源。统计 Olsen-P 与各级 Ca-P 的相关性也证实了上述结论。Olsen-P 与 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 的回归方程 $Y_{\text{Olsen-P}} = 1.5918 + 1.0433X_{\text{Ca}_2\text{-P}}$, 相关系数为 0.9867^{**}; 与 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 的回归方程 $Y_{\text{Olsen-P}} = 0.6812 + 0.1549X_{\text{Ca}_8\text{-P}}$, 相关系数为 0.6533^{*}; 而与 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 的相关系数只有 0.1179, 相关不显著。

表 3 石灰性土壤 Ca-P 分布 (P , mg kg^{-1})

样品编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$\text{Ca}_2\text{-P}$	7.70	5.85	5.27	5.73	38.10	2.04	12.23	40.26	11.39	3.38	6.71
$\text{Ca}_8\text{-P}$	190.96	61.64	18.83	42.61	191.94	51.78	66.71	154.94	85.83	59.17	74.01
$\text{Ca}_{10}\text{-P}$	333.98	275.88	313.58	227.67	253.63	204.09	214.16	465.64	464.41	463.17	474.30
总 Ca-P	532.64	343.37	337.68	276.01	483.67	257.91	293.10	660.84	561.63	525.74	555.02
Olsen-P	7.86	6.16	6.50	12.00	39.12	4.62	14.75	45.27	16.51	3.59	5.80

分析结果表明(表 4), 褐土、砂姜黑土剖面 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 都随剖面深度增加而减少。在 0~100cm 土层内, 农科院 9 条地褐土由 244.3544 mg kg^{-1} 减少到 160.9075 mg kg^{-1} , 临淄褐

表 4 不同土层深度 Ca-P 分布 (P , mg kg^{-1})

土壤	土层 (cm)	$\text{Ca}_2\text{-P}$	$\text{Ca}_8\text{-P}$	$\text{Ca}_{10}\text{-P}$
农科院 9 条地 褐土	0~ 22	28.2060	164.252	244.3544
	23~ 44	24.3118	170.9278	239.4094
	45~ 67	1.6266	34.4458	196.7588
	68~ 95	1.0085	3.045	160.9075
临淄褐土	0~ 20	3.6664	36.1375	184.3963
	20~ 60	1.7503	33.2941	165.2344
	60~ 100	1.5030	0.6571	85.4963
临淄砂姜黑土	0~ 20	0.514	63.5823	335.8369
	20~ 40	0.3286	37.7446	267.8431
	40~ 80	痕	18.8300	257.3350
	80~ 100	痕	8.4455	242.5000
定陶潮土	0~ 20	0.7613	38.8573	239.4094
	20~ 65	0.514	37.9916	380.9600
	65~ 100	0.3904	11.4125	286.3869

土由 $165.2344\text{mg kg}^{-1}$ 减少到 85.4963mg kg^{-1} , 临淄砂姜黑土由 $335.8369\text{mg kg}^{-1}$ 减少到 $242.5000\text{mg kg}^{-1}$ 。Ca₁₀P 属于原生磷灰石矿物, 它在土壤形成过程中的溶解是很慢的^[8], 因此它主要集中在砂粒部分^[9]。山东褐土在成土过程中有残积粘化发生, 其粘化率随土层深度增加而提高^[10], 因此 Ca₁₀-P 逐渐减少。砂姜黑土主要分布在褐土区, Ca₁₀-P 的变化规律与褐土相近。定陶潮土剖面中 Ca₁₀-P 变化没有规律, 潮土成土时间短, 剖面发育不完全, Ca₁₀-P 的数量主要受冲积母质本身影响。

磷酸八钙、磷酸二钙是两类次生磷酸盐, 一是通过磷灰石的溶解转化而来, 二是由水溶性磷肥水解而成, 四个土壤剖面中, 两种 Ca-P 都随剖面深度增加而减少, 但 Ca₈-P 在 60cm 左右, Ca₂-P 在 40cm 左右有一个急剧减少现象, 再往下两者的含量已很少。分析其原因, 一方面随着深度加深, 原生磷灰石的风化溶解减弱, 另一方面由于磷的移动性小, 施肥的影响不可能影响到很深。

2.2 长期施肥对土壤 Ca-P 的影响

经过 7 年的连续施肥, 除作物吸收外, 磷素化肥对土壤 Ca-P 的影响列于表 5 中。从表中看出: 与非石灰性棕壤比较, 潮土和褐土年均积累的 Ca₂-P 较少, 约是棕壤的 1/4, 而 Ca₈-P 则是棕壤的 2~3 倍。施肥对 Ca₁₀-P 影响不大, 三种土壤间也无明显差别。这也表

表 5 长期施用磷素化肥对土壤 Ca-P (P, mg kg⁻¹) 的影响

土壤	处理	Ca ₂ -P		Ca ₈ -P		Ca ₁₀ -P	
		含量	年均增加	含量	年均增加	含量	年均增加
棕壤	N	4.4082		3.4501		350.9810	
	NP	82.260	11.1025	88.4309	12.1401	354.0716	0.4415
潮土	N	1.5030		14.0705		452.9716	
	NP	20.0045	2.6431	187.2463	24.7394	452.0444	-0.1325
褐土	N	3.9137		137.6612		213.7572	
	NP	24.9495	3.0051	361.8145	32.0219	216.8478	0.4415

表 6 有机肥对土壤 Ca-P (P, mg kg⁻¹) 的影响

土壤	处理	Ca ₂ -P		Ca ₈ -P		Ca ₁₀ -P	
		含量	年均增加	含量	年均增加	含量	年均增加
棕壤	CK	4.3773		6.0462		353.1444	
	M	21.1789	2.4002	13.3905	1.0492	347.5813	-0.7947
	NP	82.1260		88.4309		354.0716	
潮土	NP+M	82.0642	-0.1082	89.8526	0.2031	342.6362	-1.6336
	CK	2.5229		15.9248		446.1722	
	M	13.2668	1.5348	24.1385	1.1734	431.4272	-2.1064
	NP	20.0045		187.2463		452.0444	
褐土	NP+M	48.6855	4.0973	218.1636	4.4168	438.1366	-1.9868
	CK	4.0682		149.2304		213.7572	
	M	20.0010	2.2761	153.8099	0.6542	207.5760	-0.8830
	NP	24.9495		361.8145		216.8478	
	NP+M	46.3984	3.0641	366.1029	0.6126	219.9385	0.4415

明水溶性磷肥施入土壤后至少在几年内不会转化成磷灰石。从表中也看出: 在积累的 Ca-P 中, 潮土 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 占 90.7868%, $\text{Ca}_7\text{-P}$ 占 9.6994%; 褐土 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 占 90.2826%, $\text{Ca}_7\text{-P}$ 占 8.4726%; 施入的水溶性磷肥绝大部分变成了作物当季不能利用的磷。

有机肥对土壤 Ca-P 的影响见表 6。两种石灰性土壤(潮土、褐土)连续 7 年的试验结果: 单施有机肥平均每年增加 $\text{Ca}_7\text{-P}$ $1\sim 2\text{mg kg}^{-1}$, $\text{Ca}_8\text{-P}$ $0.6\sim 1.1\text{mg kg}^{-1}$ 。有机肥配施磷素化肥比单施化肥 $\text{Ca}_7\text{-P}$ 增加 $3\sim 4\text{mg kg}^{-1}$, $\text{Ca}_8\text{-P}$ 增加 $0.6\sim 4.4\text{mg kg}^{-1}$ 。与单施化肥时转化的 Ca-P 中 90% 是 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 相比, 有机肥磷对土壤 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 的贡献要小得多, 它的数量小于 $\text{Ca}_7\text{-P}$ 。有机肥处理两种土壤的 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 也有所减少。表明有机肥既减少了土壤对磷的固定又可使土壤中原有的无效磷活化, 其作用机理是有机肥中的酸性物质起作用。

2.3 石灰性土壤 Ca-P 的转化特征

由于短期内施入石灰性土壤的水溶性磷不会转化成 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$, 本文只分析了 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 及 Olsen-P 。石灰性土壤 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 及 Olsen-P 随加入水溶性磷的变化如图 1 所示。

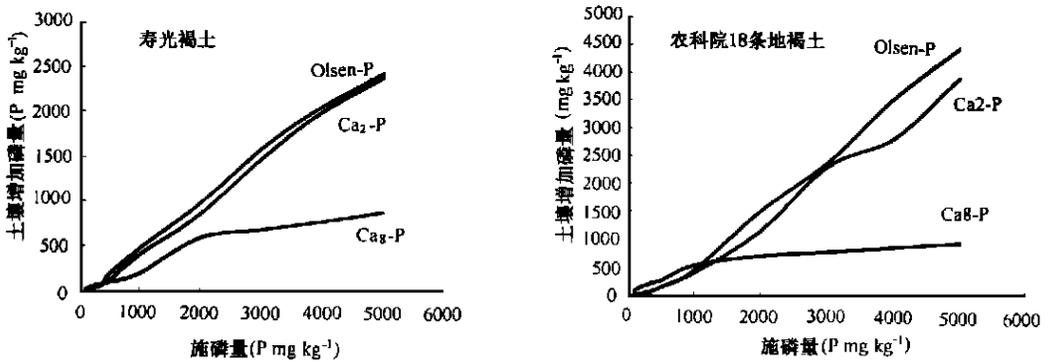


图 1 土壤 Ca-P 和 Olsen-P 增加与施磷量的关系

两种土壤 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 Olsen-P 的增加量与加入的水溶性磷的关系以拟合直线方程相关性最好, 方程分别为: 寿光褐土 $Y_{\text{Ca}_2\text{-P}} = -96.5549 + 0.5093(X)_{\text{加入磷}}$ ($R = 0.9985$)

$$Y_{\text{Olsen-P}} = -62.9975 + 0.5203(X)_{\text{加入磷}} \quad (R = 0.9984)$$

$$\text{农科院 18 条地褐土 } Y_{\text{Ca}_2\text{-P}} = -223.5466 + 0.8026(X)_{\text{加入磷}} \quad (R = 0.9953)$$

$$Y_{\text{Olsen-P}} = -258.2813 + 0.9298(X)_{\text{加入磷}} \quad (R = 0.9973)$$

$\text{Ca}_8\text{-P}$ 的增加量与加入的水溶性磷的关系寿光褐土拟合直线方程时相关性最好, 方程为 $Y_{\text{Ca}_8\text{-P}} = 38.3480 + 0.1889(X)_{\text{加入磷}}$ ($R = 0.9761$), 农科院 18 条地褐土则拟合对数方程相关系数最大, $Y_{\text{Ca}_8\text{-P}} = -1137.2 + 241.39\text{Ln}(X)_{\text{加入磷}}$ ($R = 0.9843$)。在低磷时两种土壤 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 的数量超过 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 和 Olsen-P , 随着加入磷的增加变的小于 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 和 Olsen-P , 且这种差距越拉越大。这就表明随着 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 数量的增加, 它固磷的能力越来越小。

土壤 Ca-P 与加入磷的比值列于表 7。表中结果说明: 水溶性磷施入土壤后生成的 Ca-P 占加入磷的百分比表现为: 农科院土壤 > 寿光土壤。且随加入磷量的增加, 农科院 18 条地土壤 Ca-P 增加量占加入磷量的比值不变, 而寿光土壤则增加。从 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 和 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 两种形态看, 尽管数量不同, 但都有变化的趋势。随着加入磷量的增加, 土壤 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 增加

量占加入磷量的比值增加,且增加的幅度较大。寿光土壤由 9.31% 增加到 47.99%,农科院 18 条地土壤则有 10.15% 增加到 78.59%。而 Ca_8-P 与 Ca_2-P 的变化正好相反, Ca_8-P 增加量占加入磷量的百分比随加入磷量的增加而减少。

表 7 $Ca-P$ 转化与施磷量的关系

土壤	加磷量 (P, mg kg ⁻¹)	$\frac{Ca_2-P + Ca_8-P}{\text{加磷量}} \times 100$	$\frac{Ca_2-P}{\text{加磷量}} \times 100$	$\frac{Ca_8-P}{\text{加磷量}} \times 100$
寿光	100	35.44	9.31	26.13
褐土	200	47.05	17.62	29.43
	300	41.41	15.83	25.57
	400	42.35	20.50	21.85
	500	45.68	24.49	21.19
	1000	60.10	40.11	20.00
	2000	71.97	42.41	29.56
	3000	72.35	49.46	22.89
	4000	69.67	50.23	19.45
	5000	65.77	47.99	17.78
	农科院	100	97.64	10.15
18 条地	200	88.31	11.42	76.89
褐土	300	78.96	15.59	63.37
	400	84.48	23.77	60.71
	500	83.95	30.25	53.70
	1000	95.17	40.88	54.28
	2000	93.91	58.01	35.91
	3000	104.34	77.80	26.54
	4000	93.12	71.16	21.96
5000	97.71	78.59	19.12	

参 考 文 献

1. 安卫红, 张淑民. 石灰性土壤无机磷的分级及其有效性的研究. 土壤通报, 1991, 22(1): 35~ 37
2. 蒋柏藩. 石灰性土壤无机磷有效性的研究. 土壤, 1992, 24(1): 61~ 65
3. 林治安, 谢承陶等. 石灰性土壤无机磷形态、转化及其有效性研究. 土壤通报, 1997, 28(6): 274~ 276
4. 蒋柏藩. 磷肥在土壤中的形态、转化及其有效性. 土壤学进展, 1981, 9(4): 1~ 11
5. 于淑芳, 张淑茗等. 山东主要土壤无机磷的转化和有效性. 山东农业科学, 1994(6): 23~ 25
6. 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
7. 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
8. 鲁如坤. 土壤磷素化学研究进展. 土壤学进展, 1990, 18(6): 1~ 5
9. 顾益初, 蒋柏藩等. 风化对土壤粒级中磷素形态转化及其有效性的影响. 土壤学报, 1984, 2(2): 134~ 143
10. 闫鹏等. 山东土壤. 北京: 中国农业出版社, 1993