植物营养与肥料学报 2001,7(3):241～248
Plant Nutrition and Fertilizer Science

长期施肥对石灰性潮土无机磷形态的影响

梁国庆，林　葆，林继雄，荣向农
（中国农业科学院土壤肥料研究所，北京　100081）

摘要：在河北省辛集市马兰农场的肥料长期定位试验点上，进行了石灰性土壤在无机磷耗竭和积累状况下，无机磷形态的转化及其在土壤剖面中的分布规律和施肥的影响。结果表明，在土壤磷处于耗竭的情况下，植物主要吸收利用了土壤的 Ca_8-P、Al-P、Fe-P 和 Ca_2-P，只有在极度缺磷的情况下，植物才利用土壤中的 Ca_{10}-P，而 O-P 是土壤中极稳定的无机磷形态，植物一般不能利用。长期单施无机磷肥，土壤无机磷含量有所提高，积累的无机磷约 60％转化成 Ca_{10}-P 和 O-P。有机肥与化肥配合施用，积累的无机磷约有占积累无机磷的 2/3 转化成 Ca_2-P 和 Ca_8-P，而且各形态无机磷的含量在土壤表层和下层均有所提高，一般随有机肥用量的增加，下层土壤无机磷的增加幅度也大，且影响的深度也较深。但在本试验条件下，施肥深度的影响不会超过 50cm。

关键词：石灰性潮土；无机磷形态；长期施肥
中图分类号：S153.6；S155　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1008-505X(2001)03-0241-08

对于土壤无机磷形态的研究，以往大都采用张守敬-Jackson 提出的土壤无机磷分级系统[1]，后来不少学者也提出过一些改良的分级方法[2～3]，但由于石灰性土壤的无机磷大部分以钙结合形态存在，且 Al-P 和 Fe-P 的含量都很低，采用这些方法研究石灰性土壤无机磷存在着一定的局限性。1989 年，蒋柏藩-顾益初针对石灰性土壤的特点，在张守敬-Jackson 土壤无机磷分级系统的基础上，对 Ca-P 作了进一步的划分，并对石灰性土壤 Fe-P 的浸提作了重要改进，提出了一套新的土壤无机磷分级方法[4～5]，为进一步深入研究石灰性土壤无机磷的转化规律提供了重要的手段。之后，人们对石灰性土壤各形态无机磷的植物有效性、施用磷肥在土壤中的形态转化等作了较为深入的研究[6～10]。这些研究充分肯定了石灰性土壤 Ca-P，特别是 Ca_2-P 和 Ca_8-P 在作物营养和磷素形态转化的作用。石灰性潮土是我国华北地区主要的土壤类型，为进一步探讨长期施肥对石灰性潮土各形态无机磷与作物磷素营养的关系及土壤无机磷的转化规律，我们利用设在河北省辛集市的肥料长期定位试验开展了本项研究，为磷肥合理施用提供依据。

1　材料与方法

供试土样取自河北省辛集市马兰农场的长期定位试验点所设的 12 个处理上，其处理分别为：CK、N、NP、P、M_1P、M_1NP、M_2P、M_2NP、M_3P、M_3NP、M_4P、M_4NP。该试验始于 1979 年，到 1994 年取样时，试验已

收稿日期：1999-05-11
基金项目：国家 973 项目资助(G1999011811)。
作者简介：梁国庆(1963—)，男，博士，副研究员，从事土壤及植物营养研究。
本研究在农业部植物营养学重点开放实验室完成。

进行了16年。试验每小区面积为133.3m²,不设重复,顺序排列。作物轮作方式为小麦-玉米轮作,一年两熟。每季小麦施氮肥(N)180kg/hm²,2/3作基肥,1/3作追肥在小麦返青期时施用;磷肥(P_2O_5)150kg/hm²(隔年)和有机肥(每年)均作基肥施用。有机肥为牛马粪、麦秸与家禽粪混合堆沤而成,含水量约为50%,风干后有机质含量为120g/kg,全氮(N)为5.0g/kg,全磷(P_2O_5)为2.2g/kg。其用量:M_1、M_2、M_3、M_4分别是37.5、75、112.5和150 t/hm²。小麦10月上旬播种,次年6月上旬收获。小麦收获后种植玉米(6月中旬)时,各处理施氮肥(N) 120kg/hm²,分别在小苗期和大喇叭期追施,不再施用任何肥料。小麦生育期内一般灌水5次,玉米灌水3次。

供试土壤为轻壤质潮土,且土壤剖面几乎都有粘土层分布。供试土壤的基本农化性状及剖面中粘土层的分布情况见表1。

由于磷在土壤中的移动性较小,故重点考察了15~30cm土层磷素形态的变化情况,具体的取样层次分为0~15、15~20、20~25、25~30、30~50、50~70和70~100cm。

土壤无机磷形态的分级采用蒋柏藩-顾益初(1990)提出的方法。其它项目的测定均按常规方法进行。

表1 供试土壤0~15cm的基本农化性状(1994)

Table 1 Some agro-chemical properties in 0~15cm soil layer

处理 Treat.	有机质 OM (g/kg)	全氮 Tot.N (g/kg)	全磷 Tot.P (g/kg)	碱解氮 Avai.N (mg/kg)	速效磷 Olsen P (mg/kg)	pH	粘土层分布 Clay layer (cm)
CK	12.27	0.808	0.549	65.4	2.1	8.2	40~58
N	12.37	0.800	0.499	57.4	1.9	8.4	56~86
P	12.65	0.816	0.663	57.4	15.5	8.5	40~60
NP	12.60	0.822	0.599	60.4	6.8	8.3	-
M_1P	18.16	1.117	0.690	84.6	27.1	8.1	30~40,50~65,90~100
M_1NP	18.52	1.126	0.702	96.7	32.5	8.0	30~40,56~70,90~100
M_2P	23.26	1.518	0.718	101.5	54.5	8.2	50~60,76~80
M_2NP	25.45	1.537	0.792	143.2	58.0	8.3	58~64,78~86
M_3P	28.48	1.860	0.878	136.5	78.5	8.1	50~55
M_3NP	30.96	2.114	0.915	150.4	84.2	8.5	58~64
M_4P	36.67	2.338	0.975	176.4	115.5	8.2	70~80
M_4NP	35.43	2.353	1.017	179.4	123.7	8.3	78~86

2 结果与分析

2.1 长期施肥对耕层土壤无机磷形态含量的影响

从表2可以看出,经过16年的不同的施肥处理,土壤中各形态无机磷的含量都发生了很大的变化。长期不施肥的CK和长期单施N处理以及低量磷肥与氮肥配施的NP处理,土壤无机磷含量都有所减少。单施N处理减少幅度最大。这主要是单施N处理,植物生长主要的养分限制因子是磷,土壤氮素供应充足,促进作物对磷的吸收利用,使土壤磷素严重耗竭。CK处理,由于土壤氮素供应不足,作物的生长受阻,影响了植物对土壤磷素的利用。NP处理由于养分供应较为协调,作物生长良好,对土壤磷的利用能力较强,但由于施磷量较低(隔年施$P_2O_5$150kg /hm²),土壤磷素仍不能维持平衡。

表2还看出,经过16年种植作物,CK和N处理中,作物较易利用的Ca_2-P几乎消耗怠

尽，Ca_8-P、Al-P 和 Fe-P 也有明显的减少；而 Ca_{10}-P 只有在无机磷处在严重耗竭的 N 处理中较明显的减少。O-P 的含量 16 年来则没有明显的变化，它们一般很难被作物所利用。

表 2　施肥 16 年后不同处理 0～15cm 土层各形态无机磷的含量（P mg/kg）

Table 2　Contents of inorganic phosphorus forms in different treatments after 16-year fertilizer application

处理 Treat.	Ca_2-P	Ca_8-P	Al-P	Fe-P	O-P	Ca_{10}-P
试验前土壤	9.5	65.0	32.0	32.5	75.0	320.0
CK	2.0	45.0	22.0	23.0	75.0	317.8
N	0.5	29.0	15.2	23.5	75.0	301.0
NP	5.5	61.0	31.2	32.0	75.0	320.0
P	14.0	75.0	33.0	34.8	83.0	337.5
M_1P	25.0	88.0	35.0	37.5	82.0	328.8
M_1NP	30.5	93.0	37.0	39.0	82.0	328.8
M_2P	49.5	118.0	43.0	44.0	91.0	330.0
M_2NP	54.0	124.0	45.5	46.5	91.0	331.3
M_3P	72.5	148.5	50.0	51.5	99.0	335.0
M_3NP	83.5	162.5	55.5	52.5	104.0	337.5
M_4P	98.5	181.0	59.0	54.5	110.0	340.0
M_4NP	110.0	197.5	62.5	58.5	115.0	342.5

单施化学磷肥，Ca_2-P、Ca_8-P、O-P 和 Ca_{10}-P 的增加较为明显，Al-P 和 Fe-P 的含量则变化不大。有机肥和磷肥或氮磷肥配合施用，Ca_2-P 和 Ca_8-P 的增加显著，其他 4 种形态的无机磷含量也有提高，且随着有机肥用量的增加，各形态无机磷的增加幅度也有提高。

2.2　长期施肥对耕层土壤磷组成的影响

表 3 表明，土壤无机磷处于耗竭状态的 CK、N 和 NP 处理，活性较强的 Ca_2-P、Ca_8-P、Al-P 和 Fe-P 的相对含量都有所降低，而较稳定形态的 Ca_{10}-P 和 O-P 的相对含量则有较明显的提高。而在磷处于积累状态下的单施磷处理以及有机肥和化肥配施的各个处理中，Ca_2-P 和 Ca_8-P 的相对含量有明显的提高，且随着施肥量的增加，其相对含量的增加幅度也有提高。相反，Ca_{10}-P 则随着施肥量的增大，其相对含量降低；Al-P、Fe-P 和 O-P 的相对含量无明显变化。

2.3　耕层土壤各形态磷对植物磷营养的贡献

在长期不施磷的 CK 和 N 处理，植物吸收的磷几乎全部依赖于土壤本身的供给。此时植物利用的无机磷主要来自 Ca_8-P，约占土壤无机磷减少总量的 40%。Ca_2-P 的植物有效性虽然最高，但其含量相对较低，对植物磷营养的贡献远不如 Ca_8-P。16 年来 Ca_2-P 的贡献率只有 10%～15%（表 4）。石灰性土壤的 Al-P 和 Fe-P 含量虽然较低，但其活性相对较高，其植物磷营养中的贡献约占无机磷总量的 10%～20%。CK 处理，Ca_{10}-P 减少量只占无机磷减少总量的 4.5%；而长期单施氮肥处理，由于土壤处于严重的缺磷状态，植物吸收利用的磷中来自 Ca_{10}-P 约占 20%。土壤中最稳定的 O-P，16 年来其含量基本无变化。NP 处理缺磷状况并不严重，植物只是利用土壤中 Ca_2-P 和 Ca_8-P，其减少量约占该处理无机磷总量的 86%；Al-P 和 Fe-P 减少量分别仅为 8.6%和 5.4%，而 Ca_{10}-P 和 O-P 基本不被利用。

表3 施肥16年后各处理0～15cm土层无机磷相对含量(%)

Table 3 Percentage content of inorganic phosphorus forms in 0～15cm soil layer with different treatments after 16 years fertilizer application

处理 Treat.	Ca_2-P	Ca_8-P	Al-P	Fe-P	O-P	Ca_{10}-P
试验前土壤	1.8	12.2	6.0	6.1	14.0	59.9
CK(无肥)	0.4	9.3	4.5	4.7	15.5	65.6
N	0.1	6.5	3.4	5.3	16.9	67.8
NP	1.1	11.6	5.9	6.1	14.3	61.0
P	2.4	13.0	5.7	6.0	14.4	58.5
M_1P	4.2	14.8	5.9	6.3	13.8	55.1
M_1NP	5.0	15.2	6.1	6.4	13.4	53.9
M_2P	7.3	17.5	6.4	6.5	13.5	48.9
M_2NP	7.8	17.9	6.6	6.7	13.1	47.9
M_3P	9.6	19.6	6.6	6.8	13.1	44.3
M_3NP	10.5	20.4	7.0	6.6	13.1	42.4
M_4P	11.7	21.5	7.0	6.5	13.0	40.3
M_4NP	12.4	22.3	7.1	6.6	13.0	38.7

注:相对含量为各形态无机磷占无机磷总量的百分数

Note: Relative content means each inorganic P% of total Inorganic P

表4 耗竭状况下各形态无机磷对植物磷营养的贡献率(%)

Table 4 Contribution rates of different forms of inorganic phosphorus to plant P nutrition

处理 Treat.	Ca_2-P	Ca_8-P	Al-P	Fe-P	O-P	Ca_{10}-P
CK	15.2	40.7	20.3	19.3	0.0	4.5
N	10.0	40.1	18.1	10.0	0.0	21.2
NP	43.0	43.0	8.6	5.4	0.0	0.0

注:贡献率% = 16年某形态无机磷的减少量/无机磷总减少量×100%

Note: contribution rate(%) = Amount of any one inorganic P decrease after 16 years/amount of total inorganic P decrease ×100%

2.4 耕层土壤积累无机磷在土壤中的转化

在单施化学磷肥的情况下,积累的无机磷大部分转化成Ca_{10}-P和O-P,约占无机磷积累总量的60%,而转化成Ca_2-P、Ca_8-P、Al-P和Fe-P分别只占无机磷积累总量的10.4%、23.1%、2.3%和5.3%。说明单施磷肥土壤对磷的固定较为严重。有机肥与化肥配合施用,积累的无机磷主要转化成Ca_2-P和Ca_8-P,分别占积累无机磷总量的24.9%～28.8%和36.7%～37.7%;转化成Ca_{10}-P和O-P,分别占积累无机磷总量的6.4%～14.1%和9.2%～11.4%(表5)。上述结果表明,石灰性土壤的Ca^{2+}能和磷酸根形成难溶的磷酸盐。同时,由于磷酸一钙进行异成份溶解,使肥料颗粒附近的土壤溶液具有很强的酸性,溶解出铁和铝离子与扩散出来的饱和磷溶液形成磷酸铁、磷酸铝沉淀,这些铁铝磷酸盐随着时间的延长逐渐结晶老化,或被氧化铁铝包蔽,降低其有效性[11]。在施用有机肥的情况下,有机物质与土壤无机颗粒通过铁、铝和钙桥键复合,相应地降低了土壤中铁、铝和钙离子的浓度,减少了这些离子对磷的固定[12]。另外,有机物腐解产生的有机酸,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[13]。从表 5 还可以看出，在有机肥与化肥配合施用的情况下，各形态无机磷的转化率基本保持稳定，不会因为有机肥施用量或与化肥配合施用方式的改变而改变。

表 5　施肥 16 年后积累的无机磷在土壤中的转化(%)

Table 5　Transformation of accumulated inorganic phosphorus after 16 year fertilizer application

处理 Treat.	Ca_2-P	Ca_8-P	Al-P	Fe-P	O-P	Ca_{10}-P
P	10.4	23.1	2.3	5.3	18.5	40.4
M_1P	24.9	36.9	4.8	8.0	11.2	14.1
M_1NP	27.5	36.7	6.6	8.5	9.2	11.5
M_2P	28.3	37.5	7.8	8.1	11.3	7.1
M_2NP	28.1	37.3	8.5	8.8	10.1	7.1
M_3P	28.3	37.5	8.1	8.5	10.8	6.7
M_3NP	28.3	37.3	9.0	7.6	11.1	6.7
M_4P	28.8	37.5	8.7	7.1	11.3	6.5
M_4NP	28.6	37.7	8.7	7.4	11.4	6.4

注：转化率% = 某形态无机磷的增加量/无机磷总增加量×100%

Note: Transformation rate(%) = Amount of any one inorganic P increase /Amount of total inorganic P increase×100%

2.5　长期施肥对土壤剖面无机磷形态含量分布的影响

表 6 为施肥 16 年后各形态无机磷在土壤剖面中的含量分布。从表中可以看出，Ca_2-P、Ca_8-P、Al-P 和 Fe-P 都以耕层土壤含量最高，随着土层深度的增加其含量逐渐减少的特点；Ca_{10}-P 和 O-P 的含量则无明显一致的剖面分布规律。而且，O-P 和 Fe-P 都有在粘粒中富集的现象，相反，Ca_{10}-P 在粘粒中的含量则明显较低。

施肥对土壤剖面无机磷的含量也有很大的影响。N 和 NP 和 CK 处理相比，作物可以利用深达 30～50cm 土层的 Ca_2-P、Ca_8-P、Al-P、Fe-P 和 Ca_{10}-P。值得注意的是，NP 处理表层土壤的磷的亏缺程度远比 N 处理低，而且 NP 处理下层土壤这 5 种形态无机磷的减少幅度最为严重。这主要是因为 NP 处理土壤养分供应较为协调，作物生长旺盛，扎根较深，从而对下层土壤磷的利用能力较强。

有机肥和化肥配合施用，耕层以下的 Ca_2-P、Ca_8-P、Al-P 和 Fe-P 的含量都有一定程度的提高，随着有机肥施用量的增加，这 4 种形态无机磷含量的增加幅度也大，且影响的深度也深。在本试验条件下，中低量有机肥(37.5～75 t/hm^2)和化肥配施，Ca_2-P、Ca_8-P、Al-P 和 Fe-P 含量只有 20cm 以上土层有所提高；中高量有机肥(112.5～150 t/hm^2)与化肥配合施用，影响的深度可以达到 30～50cm。O-P 和 Ca_{10}-P 受施肥的影响很小。

3　讨论

施肥对土壤磷素状况及形态转化的影响方面的研究，一直受到人们广泛的重视。自从蒋柏藩-顾益初提出石灰性土壤无机磷分级方法以来，国内许多报道[10,14～16]认为，施肥对土壤各形态无机磷的含量影响很大，长期施肥而积累于土壤的无机磷主要以 Ca_2-P 和 Ca_8-P

表 6 施肥 16 年后各处理无机磷含量在土壤剖面的分布(mg/kg)

Table 6 Profile distribution of inorganic P in different treatments after 16 years fertilizer application

深度 Depth	CK	N	NP	P	M_1P	M_1NP	M_2P	M_2NP	M_3P	M_3NP	M_4P	M_4NP
						Ca_2-P						
0～15	2.0	0.5	5.5	14.0	25.0	30.5	49.5	54.0	72.5	82.3	98.5	110.0
15～20	1.6	0.5	0.5	1.9	5.0	6.8	8.4	10.3	24.9	29.4	35.8	40.5
20～25	1.4	0.5	0.5	0.8	1.4	2.0	2.0	2.3	12.0	16.9	24.5	26.0
25～30	1.1	0.5	0.4	0.8	1.3	1.6	1.9	2.1	7.9	8.6	9.3	17.4
30～50	1.1	0.5	0.5	0.5	1.6	1.5	1.9	2.1	1.8	1.9	1.9	2.0
50～70	1.5	0.6	0.5	0.4	1.4	1.6	1.9	1.9	1.8	1.8	1.8	1.9
70～100	1.9	0.6	1.0	1.1	1.5	1.6	1.9	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8
						Ca_8-P						
0～15	45.0	29.0	61.0	75.0	88.0	93.0	118.0	124.0	148.5	162.5	181.0	197.5
15～20	44.5	26.0	23.5	54.5	54.0	69.0	68.0	68.0	93.0	103.5	113.0	138.5
20～25	43.5	32.9	20.5	45.5	43.5	45.0	59.5	61.5	73.0	75.0	95.0	102.5
25～30	33.0	33.5	14.5	33.5	34.0	35.0	54.0	51.5	60.5	65.0	8.5	85.0
30～50	12.0	12.0	11.5	11.5	11.5	12.0	33.5	32.5	33.0	34.0	33.5	34.0
50～70	10.5	10.5	11.0	11.0	11.5	11.0	12.0	11.5	12.0	12.5	11.5	12.0
70～100	12.0	11.0	11.5	11.5	12.0	11.5	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0
						Al-P						
0～15	22.0	15.2	31.2	33.0	35.0	37.0	43.0	45.5	50.0	55.5	59.0	62.5
15～20	20.8	17.0	19.0	27.5	26.8	26.0	27.3	28.3	39.3	42.8	49.0	55.0
20～25	19.8	14.0	16.2	21.0	19.0	19.5	20.5	21.5	29.0	36.5	42.3	47.5
25～30	18.0	14.5	12.7	18.0	18.5	18.8	19.0	19.0	27.8	30.8	35.5	38.3
30～50	17.5	13.2	12.8	18.4	18.0	17.3	17.5	17.0	17.3	18.0	18.0	18.3
50～70	13.5	14.0	14.2	14.5	14.0	14.5	14.5	14.1	13.5	14.0	14.5	14.5
70～100	8.3	8.5	8.5	7.8	8.0	8.5	7.5	7.3	7.8	7.5	8.0	7.8
						Fe-P						
0～15	23.0	23.5	32.0	34.8	37.5	39.0	44.0	46.5	51.5	52.5	54.5	58.5
15～20	22.8	22.2	24.5	33.0	33.8	33.8	34.0	34.0	47.5	50.0	53.8	53.5
20～25	24.0	20.0	23.2	23.7	24.0	24.0	24.5	24.5	36.5	48.8	50.5	47.5
25～30	22.8	18.3	20.5	25.3	31.5	31.5	24.0	24.0	32.8	33.8	32.5	42.5
30～50	33.0	17.5	18.8	35.1	31.3	31.3	24.8	24.8	22.8	23.5	22.5	27.5
50～70	25.7	22.5	26.5	32.3	34.5	34.5	33.8	33.8	23.3	20.0	18.3	17.8
70～100	15.3	26.5	26.0	16.0	21.5	21.5	23.8	23.8	14.30	18.3	16.5	15.0
						O-P						
0～15	75.0	75.0	75.0	83.0	82.0	82.0	91.0	91.0	99.0	104.0	110.0	115.0
15～20	72.5	69.8	76.7	74.7	76.7	68.3	66.2	74.2	73.0	81.7	83.2	85.8
20～25	61.7	74.2	73.3	72.2	80.8	66.7	60.2	80.0	75.8	80.0	83.2	88.8
25～30	67.5	64.2	65.8	76.3	85.8	85.8	59.3	71.7	80.5	80.8	84.5	74.5
30～50	79.2	70.0	75.0	88.3	80.0	84.2	66.2	76.7	67.5	74.2	74.5	75.0
50～70	76.7	77.5	80.8	84.2	83.3	82.5	76.5	82.5	74.5	75.0	75.0	80.8
70～100	69.2	81.5	76.7	68.8	85.5	74.5	74.5	80.0	64.2	74.5	74.5	65.2
						Ca_{10}-P						
0～15	317.8	301.0	320.0	337.5	328.8	328.8	330.0	331.3	335.0	337.5	340.0	342.5
15～20	317.8	309.7	305.0	325.0	321.3	325.5	325.8	328.8	325.0	335.0	338.8	336.3
20～25	303.8	326.7	284.7	323.8	239.8	320.3	323.8	325.0	333.5	328.8	330.0	332.5
25～30	293.8	331.3	283.2	323.5	216.3	283.8	315.0	323.5	312.8	312.8	328.8	328.8
30～50	211.3	332.2	276.3	216.1	211.3	253.8	300.0	291.3	293.8	293.8	325.0	328.3
50～70	248.8	298.5	267.2	212.5	200.0	187.5	223.8	268.8	268.8	268.8	323.8	320.0
70～100	325.0	272.2	287.9	312.8	296.3	276.0	296.3	313.8	328.8	328.8	326.9	320.0

形态存在；施肥对 Ca_{10}-P 和 O-P 的影响很小或没有明显的规律，这些结果和本试验的研究结果基本一致。但本试验结果还进一步明确了有机无机配合施用的情况下积累的无机磷以相对稳定的比例转化成不同形态的无机磷，并且大部分积累的无机磷都以活性较大的 Ca_2-P 和 Ca_8-P 的形态存在。而在单施化肥的情况下，土壤对磷的固定情况严重，积累的无机磷大部分转化成作物很难利用的 Ca_{10}-P 和 O-P。

土壤无机磷形态的剖面分布及施肥对深层土壤无机磷形态的影响方面的研究报道很少。周广业等[9]研究施肥对 0～20 和 20～50cm 土层无机磷形态的影响表明，施肥特别是有机肥与化肥配合施用，下层 20～50cm 土层的 Ca_2-P、Ca_8-P、Al-P 和 Fe-P 有不同程度的积累。考虑到磷在土壤中的移动性很小，本试验把耕层以下 15～30cm 土层按每 5cm 划分为一层，以更深入地研究施肥对下层土壤无机磷形态含量的影响以及各形态无机磷在土壤中的移动情况。结果表明，施肥可以提高下层土壤 Ca_2-P、Ca_8-P、Al-P 和 Fe-P 的含量，但不会改变这些形态无机磷在土壤剖面中自上而下逐渐减少的分布规律，即这些无机磷形态并不会在剖面中某一层（如犁底层）中淀积；施肥对下层土壤上述 4 种形态无机磷的影响程度及深度因施肥量不同而不同，一般随着有机肥施肥量的增加，下层土壤无机磷含量增加幅度也随之提高，影响的深度也较深。在本试验条件下，施肥的影响深度不会超过 50cm。

近期一些研究发现，随着磷肥的施用在我国越来越普遍，耕层土壤的速效磷（Olsen-P）含量大有改善，但耕层以下土壤速效磷含量仍很低，并据此提出需深施磷肥，以满足作物中后期对磷素营养的需要[17～19]。但我们的研究结果看出，作物对下层土壤的 Ca_8-P、Al-P 和 Fe-P 甚至 Ca_{10}-P 都有较强的利用能力，只要耕层土壤速效磷保持一定的水平，就能满足作物早期生长的需要，中后期生长则可通过利用缓效态磷来满足作物对磷营养的需要。

应用张守敬-Jackson 无机磷分级方法对土壤不同粒级无机磷形态分布的研究[3,20]指出，风化程度较高的土壤如砖红壤、红壤等，其酸钙盐、磷酸铁盐和闭蓄态磷酸盐明显在粘粒（<0.005mm）中富集，而磷酸铝盐则相对集中在砂粒（0.02～0.1mm）；风化程度弱的土壤如黄淮冲积物发育的潮土和黄土母质发育的黑垆土，其磷酸铁盐和闭蓄态磷酸盐仍在粘粒中富集，但磷酸钙盐则主要集中在砂粒。我们采用蒋柏藩-顾益初的方法研究发现，在风化程度弱的潮土中也存在着磷酸铁盐以及闭蓄态磷酸盐在粘粒中富集，Ca_{10}-P 明显在砂粒中富集的规律，但 Ca_2-P 和 Ca_8-P 则没有在砂粒中富集的现象。

参 考 文 献：

[1] Chang S C and Jackson M L. Fractionation of soil phosphorus [J]. Soil Sci,,1957,84:133-144.

[2] Hietjes A H M *et al*. Fractionation of inorganic phosphorus in calcareous sediments[J]. J. of Envir. Qual.,1980,9:405-407.

[3] Syers J K, Shah R and Walker TW. Fractionation of phosphorus in alluvial soils and particle-size seperates[J]. Soil Sci., 1969, 74:141-148.

[4] 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)：48-56.

[5] 蒋柏藩，顾益初．灰性土壤无机磷分级的测定方法[J]．土壤，1990，22(2)：101-102.

[6] 蒋柏藩．石灰性土壤无机磷有效性的研究[J]．土壤，1992，24(2)：61-64.

[7] 李昌纬，华天茂，赵伯善，等．垆土中无机磷的形态、转化及其植物有效性[J]．土壤，1992，24(2)：65-67.

[8] 张漱茗，于淑芳，刘毅志．施肥对石灰性土壤磷磷素形态的影响[J]．土壤，1992，24(2)：68-70.

[9] 周广业，等．长期施肥不同肥料对土壤磷与形态转化的影响[J]．土壤学报，1993，30(47)：443-446.

[10] 陈欣,等．磷肥低量施用制度下土壤磷库的发展变化．II．土壤有效磷及土壤无机磷组成[J]．土壤学报,1997, 34(1):81-87.
[11] 鲁如坤．土壤磷素(一)[J]．土壤通报,1980,(1):43-47.
[12] 熊毅．土壤胶体的组成及复合[J]．土壤通报,(5):1-8.
[13] 赵晓齐,鲁如坤．有机肥对土壤磷素吸附的影响[J]．土壤通报,28(1):7-13.
[14] 顾益初,欣绳武．长期施用磷肥条件下潮土磷素的积累、形态转化和有效性[J]．土壤,1997, (1):13-17.
[15] 郭智芬,等．石灰性土壤不同形态无机磷对作物磷营养的贡献[J]．中国农业科学, 1997,30(1):26-32.
[16] 林治安,谢承陶,等．旱作农田石灰性土壤磷素形态、转化与施肥[J]．土壤肥料,1996, (6):26-28.
[17] 周建斌,李昌纬,赵伯善,等．长期施肥对缕土底土养分含量的影响[J]．土壤通报,1993,24(1):21-23.
[18] 玉宝洪,李桂山,蒙宝球．深耕和增施有机肥对土壤肥力及水稻产量的影响[J]．土壤肥料,1997,(6):32-34.
[19] 张喜成,韩润娥,袁小良．局部施磷对小麦根系生长和分布的影响[J]．土壤肥料,1993,(5):38.
[20] 顾益初,蒋柏藩,鲁如坤．风化对土壤粒级中磷素形态转化及其有效性的影响[J]．土壤学报,1984, 21(2):134-143.

Effect of long-term fertilization on the forms of inorganic phosphorus in calcareous fluvo-aquic soil

LIANG Guo-qing, LIN Bao, LIN Ji-xiong, RONG Xiang-nong
(*Soil and Fertilizer Institute, CAAS, Beijing 100081, China*)

Abstract: A new soil inorganic phosphorus fractionation method proposed by Jiang Bofan-Gu Yichu(1989) was adopted to study the effect of long-term fertilization on transformation of inorganic phosphorus in surface soil, distribution of inorganic phosphorus in soil profile. The result indicated that plant mainly used inorganic phosphorus in forms of Ca_8-P、Al-P、Fe-P and Ca_2-P in surface soil and subsoil within 30～50cm when soil phosphorus was depleted. Only in excessive P depletion could plant use Ca_{10}-P. O-P was the most stable form of inorganic phosphorus that plant could not use. When soil phosphorus accumulated by application of phosphorus fertilizer, the accumulated phosphorus mainly transformed into the forms of Ca_{10}-P and O-P that plant can hardly use. While combine use of chemical fertilizer and organic manure, the accumulated phosphorus mainly transformed into readily available forms of Ca_2-P and Ca_8-P. Not only the inorganic phosphorus pool of Ca_8-P、Al-P、Fe-P and Ca_2-P were enlarged by combine use of chemical fertilizer and organic manure, but also the contents of these forms of inorganic phosphorus increased in the soil below surface, and as the application of organic manure increased, the deeper depth of soil profile was affected. In our study condition, the effect of fertilization on the contents of inorganic phosphorus forms wouldn't exceed 50cm below the surface soil. The contents of O-P and Ca_{10}-P in the subsoil were little affected by fertilization, their contents were mainly affected by soil texture. O-P (and Fe-P also) generally accumulated in clay layer in the soil profile, on the contrary, Ca_{10}-P accumulated in sandy soil. But the other two forms of Ca-P were not found accumulating in Sandy soil in the soil profile.

Key words: calcareous fluvo-aquic soil; forms of inorganic phosphorus; long-term fertilization