

# 磷在土壤中有有效性的衰减\*

鲁如坤 时正元 钱承梁

(中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

**摘要** 培育试验表明,磷在红壤中有有效性的衰减可分为快反应(3小时)阶段和慢反应阶段,前者有效磷以直线关系下降,后者则为一渐减性曲线。快反应阶段磷有效性的衰减量和土壤活性铝含量呈显著相关,但与活性铁和交换铝相关不显著。用红壤、潮土、板浆白土三种性质不同的土壤进行的生物试验表明,产量也随着土-磷作用时间延长而下降,而且有一个终止时间。中性水稻土在8个月培育后产量即不再下降,石灰性潮土为16个月,而酸性红壤在28个月以上。影响产量衰减的可能和磷在土壤中的双核化(转化为环状双核结构)和吸收作用有关,它们在程度上和延续时间上不同土壤不同,在水稻土上最弱,延长最短,而在红壤上作用最强,延长最长,潮土处于两者之间。

**关键词** 红壤,养分退化,磷有效性衰减。

**中图分类号** S143.2

磷在土壤中有有效性的衰减(固定)被认为是土壤养分退化的一个重要过程<sup>[1](1)</sup>。由于其在理论和实践上的重要意义历来受到不少人们的重视<sup>[2~3]</sup>。不过也存在对于土壤磷的固定作用在实践上的意义有不同的认识,一种意见认为磷的固定导致绝大部分施入的磷无效;另一种意见认为固定并不重要,绝大部分的磷肥最终都能被作物利用。前一种看法可能把磷的固定和磷的无效化等同起来,后一种看法有可能导致对磷固定作用的忽视。本文的目的在于企图证明磷肥在土壤中确实存在有效性的衰减,这种衰减可能导致产量的下降,即肥效的降低。但是,磷的积累利用率仍可以较高。

## 1 材料和方法

为上述目的,我们用我国南方12种土壤(主要是红壤)进行了磷素有效性衰减研究。同时,选择了华北平原的潮土和江苏的水稻土和红壤一起进行了盆栽试验,主要了解磷素衰减的产量效应。供试土壤的基本性质如表1。

### 1.1 培育试验

培育试验所用土壤分两个处理:(1)不加磷,(2)加磷。

第一组培育试验用12种土壤,加P 36.6mg/kg,以 $KH_2PO_4$ 的溶液加入,土壤湿润培育,分3小时,1,5,15,60天五个时段采样测定有效磷含量(Olsen-P)。第二组培育试验用三种土壤(红壤、潮土和水稻土)

\* 国家重点基金49631010项目资助。本文为养分退化系列报告之四。

(1)鲁如坤等. 土壤养分退化总结. 1995

收稿日期:1999-03-29;收到修改稿日期:1999-12-07

表1 第一组培育试验供试土壤的基本性质<sup>1)</sup>

Table 1 Chemical properties of soils used in the first incubation experiment

试验号 No.	考察 编号 No.in field	土壤 类型 Soil type	pH	阳离子 交换量 (CEC) (cmol/kg)	有机质 O.M g/kg	有效 磷 Available P (mg/kg)	交换 性钾 Exchangeable K (mg/kg)	碱解氮 Hydro. N (mg/kg)	缓效钾 Slow Available K (mg/kg)
1	21	红壤	4.7	6.4	19	8.2	39.1	118.8	122
2	23	红壤	5.1	3.3	9	4.7	53.7	51	108
3	26	水稻土	4.7	11.0	8	2.0	58.2	33.3	105
5	31	赤红壤	—	13.3	27	16.4	92.0	120	138
7	47	水稻土	5.3	5.9	10	4.3	16.0	55.1	53.9
8	50	水稻土	4.7	5.9	17	7.0	83.8	78.2	60.8
9	55	赤红壤	5.6	8.3	22	2.0	27.7	36.2	36.2
10	93	砖红壤	4.5	5.1	18	5.7	57.2	34.8	67
11	121	水稻土	7.5	17.6	27	3.8	86.6	178.2	216
12	122	紫色土	6.1	15.2	21	6.2	91.1	82.6	141
13	123	红壤	—	15.6	3	15.6	104.2	17.4	275
14	146	水稻土	6.4	6.9	8	3.0	68	45	125

1) 标本及分析结果由孙波博士提供

分 0, 8, 11, 16, 21, 28 个月, 培育后的土壤用于盆栽试验。

## 1.2 盆栽试验

用三种土壤, 每盆 800g 土, 供试作物第一季为小麦, 第二、三季为黑麦草, 抽穗前收获。重复三次。三种土壤的基本性质见表 2。

表2 生物试验三种土壤的基本性质

Table 2 Properties of soils in pot experiment

性质 Property	红壤 Red earth	潮土 Fluvo-aquic soil	板浆白土 Paddy soil
pH	4.7	8.5	5.8
有效磷(P) (mg/kg)	Tr	3.0	5
有效钾(K) (mg/kg)	41.6	106.3	—
缓效钾(K) (mg/kg)	166.4	821.7	—
粘粒% <0.002mm	48.2	12.3	26.2

## 1.3 分析方法

本文所用化学分析方法除活性 Fe、Al 采用熊毅等<sup>[4]</sup>方法外, 其余用常规分析方法<sup>[5]</sup>。

# 2 结果与讨论

## 2.1 12 种土壤的培育试验

试验结果表明, 磷加入红壤后, 有效磷迅速下降, 但明显分为两个阶段, 第一阶段从加磷开始(0 时)到 3 小时, 有效磷迅速下降, 这一阶段可用直线方程表示 ( $y = a + bx$ )。而从

3 小时后一直到 60 天, 衰减速度渐减, 呈曲线下降, 这一阶段的衰减可以用曲线方程:  $y = a + b \times 5 \log x$  描述, 图 1 是红壤 (试验号 2) 的一个典型衰减曲线, 但所有其他供试验土壤的衰减均有类似规律。

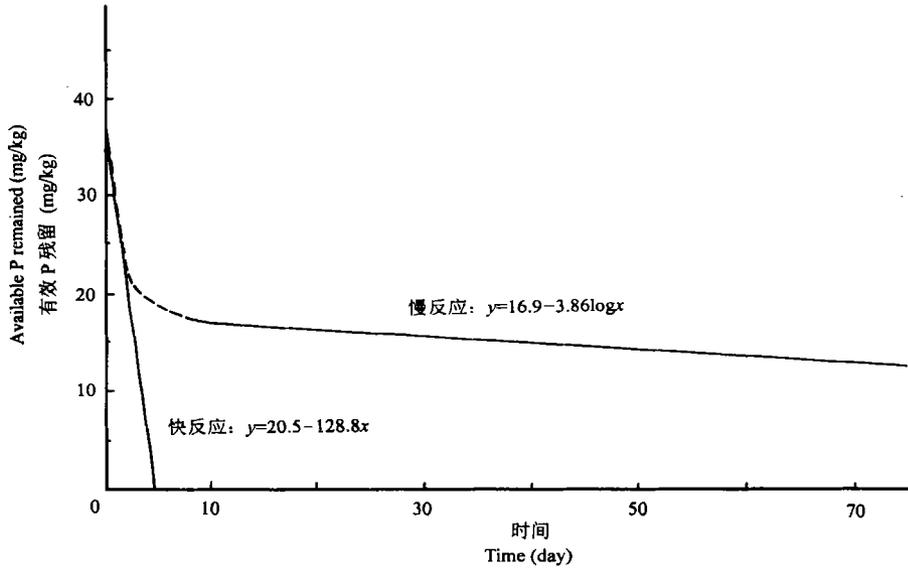


图1 磷衰减曲线(红壤)

Fig.1 Decline of P availability with time in red earth

2.1.1 有效磷衰减的快反应阶段 表 3 中列出了土壤加磷后有效磷的衰减情况, 其有效磷残留量是培育 3 小时后测得的土壤有效磷量, 衰减量是原施加磷量 (36.6mg/kg) 减去残留量的差数, 而固定 % (假定减少量均称作被固定的磷) 是衰减量占原初加入量的 %。

表3 红壤磷有效性衰减的快反应(3小时)阶段特征

Table 3 Fast stage of P availability decline

试验号 No.	3小时有效磷残留 (mg/kg) (Available P remained)	固定率 (%) (P fix %)	衰减量 Available P declined (P mg/kg)
1	25.4	31	11.2
2	20.5	44	16.1
3	24.7	33	11.9
5	10.3	72	26.3
7	15.8	57	20.8
8	18.0	51	18.6
9	21.9	40	14.7
10	6.4	83	30.2
11	18.2	50	18.4
12	19.0	48	17.6
13	9.3	75	27.3
14	22.8	38	13.8
总平均	17.7	51.6	18.9

从表 3 可知, 12 种代表性土壤磷的平均固定率(占原施磷%)达到 51.6%, 即一半以上在 3 小时内被固定, 而平均磷的衰减量为 18.9mg/kg。但土壤之间差别甚大: 在所有土壤中砖红壤(试验号 10, 玄武岩发育)衰减量最大, 固定率达到 83%, 其次是第四纪粘土发育的红壤和花岗岩发育的赤红壤, 衰减量最小的是红砂岩母质的红壤(试验号 1), 水稻土固磷率大体在 50% 左右。

磷衰减量快反应阶段的决定因素可能不止一个, 我们只研究了土壤交换性铝、土壤活性铝(草酸铵提取)和活性铁(草酸铵提取)三个因素, 它们的直线回归方程如下:

磷衰减量( $y$ )和土壤交换性铝( $x$ ):  $y = 14.2 + 0.487x$   $n = 14$ ,  $r = 0.205$ , 相关不显著。

磷衰减量( $y$ )和土壤活性铝( $x$ ):  $y = 12.1 + 0.065x$   $n = 14$ ,  $r = 0.627^*$ , 5% 水平显著。

磷衰减量( $y$ )和土壤活性铁( $x$ ):  $y = 19.4 + 0.048x$   $n = 14$ ,  $r = 0.158$ , 相关不显著。

从上面的回归分析可以看到, 在上述三种土壤成分中, 磷衰减量主要和土壤活性铝有关, 即土壤磷衰减快反应(3 小时)阶段的衰减量主要和土壤活性铝有关, 活性铝愈高, 衰减量愈大。但是, 也应看到, 尽管衰减量和活性铝量有显著相关, 但相关系数只有 0.627, ( $R^2 = 0.393$ ), 也就是说, 土壤活性铝含量只能解释衰减量的 40%, 所以影响土壤磷衰减量的应当还有其他因素。

2.1.2 有效磷衰减的慢反应阶段 从 3 小时开始到 60 天中, 为磷衰减的慢反应阶段, 这一阶段的特征是大体可以用下式描述:  $y[t \text{ 时的残留磷(P)mg/kg}] = a - b \times \log(x)$  ( $x$  为时间, 天,  $a, b$  为常数)。

表 4 中列出了 12 种土壤的衰减曲线参数。从表 4 可知, 在 12 个土壤中, 总的看这些土

表 4 磷衰减慢反应阶段回归线参数

Table 4 Parameters of regression equation of slow stage of available P decline

土壤 Soil type	母质 Parent material	试验号 No.	$r$	$a$	$b$
红壤	红砂岩	1	-0.971	20.1	-4.80
红壤	紫砂岩	2	-0.995	16.9	-3.86
水稻土	红砂岩	3	-0.982	19.4	-4.94
赤红壤	花岗岩	5	-0.959	8.53	-1.59
水稻土	河流冲积	7	-0.966	11.74	-3.67
水稻土	河流冲积	8	-0.983	12.41	-5.55
赤红壤	花岗岩	9	-0.894	20.2	-4.85
砖红壤	玄武岩	10	-0.866	5.26	-0.59
水稻土	紫页岩	11	-0.987	13.6	-5.19
紫页岩	紫页岩	12	-0.959	16.9	-2.28
红壤	第四纪	13	-0.873	6.74	-1.65
水稻土	花岗岩	14	-0.887	20.3	-6.27

注: 当  $n=5$  时, 5% 显著的  $r$  值为 0.878

壤的磷素衰减(慢反应阶段)都可用  $y = a + b \times \log x$  来描述,但是这一方程对于固磷量大的土壤,如砖红壤(试验号 10)和第四纪粘土发育的红壤(试验号 13)的  $r$  值略低于显著值(0.878),似乎都未能达到 5% 显著,尽管数值基本接近,这可能是由快速反应阶段磷衰减特别大的原因。

## 2.2 三种土壤上磷素有效性衰减的产量反映

盆栽试验:前述磷素有效性衰减主要指土壤有效磷水平的衰减,但是这一衰减必须能反映到生物生长和产量上来,才能真正说明磷有效性的衰减。为此,我们进行了生物盆栽试验,试验目的主要是为了研究不同土壤之间磷素衰减性能的差异,及磷肥和土壤相互作用的时间不同是否可以表现在生物量的改变上,以及生物量衰减的可能原因。

表 5 为三种土壤的生物试验结果(三次收获的生物量)。

表5 土-磷反应不同时间后的生物量衰减(克/盆)  
Table 5 Yield of rye grass after different incubation period (g/pot)

土-磷反应时间(月) Months	红壤 Red soil	潮土 Fluvo-aquic soil	板浆白土 Paddy soil
0	15.5 a	17.3 a	23.1 a
8	10.8 b	10.1 b	15.5 b
11	11.2 b	9.7 b	14.5 b
16	7.4 c	6.9 c	15.6 b
21	9.9 b	6.6 c	14.9 b
28	6.3 d	6.7 c	15.6 b

从表 5 可以明显看出三种土壤生物产量都随着土壤和磷反应时间的加长而显著下降,特别值得注意的是在三种土壤上产量的下降都有一个停止时间,板浆白土为 8 个月,潮土为 16 个月,红壤为 28 个月,这种“停止”情况似乎也反映到土壤有效磷的下降上(表 6)。从表 6 中可以看出红壤在 20 个月时有效磷衰减已基本停止下降,其它两种土壤在 20 个月时下降速度已很小,这和盆栽试验的基本趋向是一致的虽然停止的时间两者并不一致。这可能是因为 Olsen-P 提取的只是真正有效磷的一部分<sup>[6]</sup>。

表6 盆栽土壤有效磷的衰减  
Table 6 Decline of available P in soil used in pot experiment

土壤 Soil type	残 留 量 Available P remained after different incubation period (mg/kg)					
	月 Month					
	0	0.1	3	8	13	20
潮土	100	82.2	67.8	34	17.4	16
红壤	100	24	21.3	20	17.4	17.3
水稻土(板浆白土)	100	59.4	47.2	42.0	40.5	38.6

将培育试验和生物试验结合起来看,使我们对土壤有效磷衰减的实质有如下印象即:磷在土壤中因进行吸附作用,而迅速衰减,但被吸附的磷对作物仍有较高的有效性,但是

随着时间的延续,被吸附的磷由于:形成环状双核桥接结构和吸收作用,即通过扩散进入吸附体(氧化物或  $\text{CaCO}_3$ ) 表面层以下<sup>[7]</sup>两种作用才真正使有效性(表现在产量上)下降。试验结果表明,在中性水稻土(板浆白土)上,上述两种作用可能最弱,所以土壤一直保持着较高的有效磷水平,而且延续时间较短,所以产量最先停止下降,而酸性的红壤以及石灰性的潮土,其双核化和吸收作用进行的比较强烈,而且延续时间较长,这就造成了这两种土壤培育后土壤有效磷水平较低(表 6),产量的下降也比水稻土长,特别是红壤由于上述两种作用更为强烈,因此产量持续下降,甚至比潮土还长(表 5)。因此,我们认为磷在土壤中被固定导致有效性下降的实质是在吸附作用之后进行了双核化和吸收作用,它们导致磷肥有效性下降并影响产量,使当季磷肥利用率低。

### 参 考 文 献

1. Lal R. Soil degradation and sustainability. *In* Red and lateritic soils. Vol. I. J Sehgal *et al.* ed. Co. New Delhi: Oxford d IBH Pub. 1998. 237~252
2. Esilaba A O *et al.* Soil test P availability as affected by time after P fertilization. *SSSAJ.* 1992, 56(6): 1967~1973
3. Habib L *et al.* Phosphorus solubility changes with time in organically amended soils in a Mediterranean environment. *Comm. Soil Sci. Pl ant Anal.* 1994, 25:3281~3290
4. 熊毅等编著. 土壤胶体研究法. 北京:科学出版社,1985. 241~282
5. 中国土壤学会农业化学专业委员会编. 土壤农业化学常规分析法. 北京:科学出版社,1983
6. 陈国孟等. 关于测定土壤有效磷总量的研究. *土壤学报*,1993,30(4):380~389
7. 鲁如坤等著. 土壤—植物营养学原理和施肥. 北京:化学工业出版社,1998. 199~201

## DECLINE OF PHOSPHORUS AVAILABILITY WITH TIME IN SOILS

Lu Ru-kun Shi Zheng-yuan Qian Cheng-liang

(*Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008*)

### Summary

Decline of available P (Olsen-P) in red earth with time may be divided into two stages: fast and slow stages. The former stage can be described with a straight line equation,  $y = a + bx$ , the second stage with a curve equation,  $y = a + b \log x$ , where  $y$  = available P still remained, and  $x$  = incubation periods (month). Available P decline has a significant correlation with the amount of active Al content in soils but not with the amounts of active Fe and exchangeable Al. Pot experiment with three different types of soils: acidic red earth, neutral paddy soil, and calcareous fluvo-aquic soil, using wheat and rye grass as test plant, showed that the yield decline with soil and P reaction periods and ceased at different time with different soils. For the neutral paddy soil, the decline in yield ceased after 8 months' incubation, for fluvo-aquic soil, after 16 months, but for red earth the decline ceased after more than 28 months. This may be due to different in extent of the formation reactions of P chelate ring structure and diffusing into the deeper layer under the surface of  $R_2O_3$  and calcite in the soils. In neutral paddy soil this two reactions were weaker and led to higher available P remained after incubation period, while in acidic red soil and calcareous fulvo-aquic soil they were much more stronger especially in red soil, and lasting longer time.

**Key words** Phosphorus, Decline of phosphorus availability, Red earth