

南方水稻土中的磷酸铁对水稻 磷素营养的意义*

蔣柏藩 魯如坤 顧益初 李阿榮

(中国科学院土壤研究所)

作物对磷素的吸收与土壤磷素的供应水平有关,而土壤磷素的供应水平又与土壤磷素的形态及其有效性有关。但是,由于土壤磷素形态的系统分离在技术上的困难,所以长期以来这方面所累积的資料,始终是停留在定性的范畴^[1-7]。张守敬和 Jackson^[8]提出的土壤无机磷系统分离方法,为这方面的研究提供了有利途径。此后, Fife 等^[9,10,11]虽然对这方法提出了一些修正意见,但就目前来看,它仍然是一个比较完善的无机磷的系统分级方法。近年来,根据这一方法在研究土壤磷和肥料磷的形态转化方面,已经提供了很多資料^[12-15],但是到现在为止,对于土壤中各级形态磷酸盐与作物营养的关系,所进行的研究还是不多的。而这一问题,对了解土壤磷素供应水平及磷肥的合理施用具有重要意义。

一般认为,我国南方的酸性旱地土壤对磷肥具有比较明显的反应,但在南方的酸性水稻土上反应并不一致。为了能够从本质上认识这些问题,本文应用张守敬和 Jackson 的无机磷系统分级方法,对我国南方水稻土中存在的磷素形态及其在水稻磷素营养上的意义,进行了研究。

一、南方水稻土中磷的形态

供试土壤包括南方不同类型的水稻土 18 个标本,分别采自江苏、江西、广东和广西等地。其中江苏下蜀系黄土母质发育的水稻土(土号: 37, 38, 39。下同),江西新建和进贤第四纪红色粘土发育的水稻土(48, 50, 36, 35)和广东玄武岩发育的水稻土(55, 53),都是同一地区不同肥力水平的系列标本。各项测定,照常法进行。各级形态的无机磷系根据张守敬和 Jackson^[8]的分级系统。但原法中 NH_4Cl 一级测得的磷量极微,未予列入;最后二级为还原溶性磷酸铁和闭蓄态的磷酸铁、铝,考虑到这些磷酸盐同样都为氧化铁胶膜所包蔽,活性情况相似,所以合并成一级;称为闭蓄态磷部分。不能为各级提取剂提出的残余磷,没有测定。所有标本的测定结果、成土母质和肥力水平都列于表 1。

从表 1 中可以看出,在这些水稻土中,闭蓄态磷部分(其中主要是还原溶性磷酸铁)的磷量在无机磷中占有相当重要的地位,一般占四级总量的 40—70%。大致可以分为三种类型:(1)闭蓄态磷占四级无机磷总量的 20—50%,有江苏地区长江新冲积的鳊血黄泥田、太湖沉积的紫泥田以及下蜀黄土母质发育的马肝土,但后两者已经属于这范围的上限。(2)闭蓄态磷占四级总量的 50—80%,有江西第四纪红色粘土、广东花岗岩、玄武岩、珠江

* 本文在标本收集过程中,蒙石华等同志大力协助;有关 X 衍射线谱和差热曲线承许冀泉等同志帮助分析,谨致谢意。

表 1 南方水稻土耕层中各级形态磷酸盐的含量 (P-ppm)

土号	采集地点	土壤名称(母质)		肥力水平	pH		无机磷						全磷
					1:5 (水提)	1:5 (KCl 提)	非闭蓄磷部分				闭蓄磷 部分	四级 总量	
							Al-P	Fe-P	Ca-P	总量			
37	江苏	黄褐土性水稻土	黑馬肝土	高	6.9	5.8	48.2	229	125	402	335	737	856
38	南京	(下蜀系)	黄馬肝土	中	7.0	5.8	48.7	176	76.6	301	242	543	633
39			小粉土	低	6.2	4.8	16.8	136	46.3	199	105	304	481
48	江西		紅壤性水稻土 (第四紀紅色粘土)	烏泥田	高	7.2	6.4	18.1	146	35.1	199	219	418
50	新建	黄泥田		中	5.8	5.0	18.6	117	18.4	154	346	500	562
36	江西	火格田		高	6.9	5.5	25.7	147	27.5	200	298	498	521
35	进賢	火格田		中	6.8	5.3	23.4	95.8	14.7	134	354	488	500
71		紅土田		低	5.7	4.7	11.2	51.2	23.6	86.0	168	254	336
116	广东	砖紅壤性水稻土		黄泥砂田	高	—	4.9	33.9	249	72.3	355	316	671
31	广州	(花崗岩)	黑泥格田	低	5.4	4.4	51.2	43.5	21.0	116	249	365	391
52	广东	砖紅壤性水稻土	彩土	高	6.1	5.5	19.4	272	67.8	359	303	662	—
55	徐聞	(玄武岩)	半彩土	中	6.6	6.1	6.40	292	50.2	349	404	753	—
53			赤土	低	6.1	5.5	14.7	384	100	499	764	1263	—
96	江苏 溧阳		黄褐土性水稻土 (下蜀系)	板浆白土	低	5.8	4.5	痕迹	23.9	11.6	35.5	212	248
40	江苏 常熟	草甸型水稻土 (长江冲积物)	鱗血黄泥	高	7.9	—	10.8	50.9	414	476	111	587	926
32	广东 南海	草甸型水稻土 (珠江冲积物)	泥肉田	高	8.0	7.3	41.1	19.1	101	161	297	458	568
45	江苏 无锡	草甸型水稻土 (太湖沉积物)	紫泥田	高	7.0	5.7	61.4	312	135	508	357	865	—
33	广西 桂林	石灰化水稻土 (石灰岩)	黑泥田	高	7.5	6.4	49.8	158	67.8	276	455	731	—

冲积物以及广西桂林石灰岩发育的水稻土。(3) 闭蓄态磷占四级总量 80% 以上, 这是具有特殊土壤形成过程^[16] 的江苏溧阳的板浆白土。从闭蓄态磷量总的变化来看, 除板浆白土外, 由长江以南經华中至华南似有相应增加的趋势。这与张守敬和 Jackson^[12] 关于土壤化学风化与磷酸盐形态轉化次序的論点頗为吻合。

非闭蓄态磷部分, 包括磷酸鋁、磷酸鉄和磷酸鈣三种形态, 由表 1 可知, 一般共占无机磷总量的 30—60%。在不同类型的水稻土中, 其总量的变化非常悬殊; 而在系列的标本中, 其含量高低与肥力水平似相吻合。在三种形态中, 值得注意的是磷酸鉄的一级。除 pH 較高的江湖冲积性水稻土中磷酸鈣較多外, 其余水稻土中; 磷酸鉄的含量都占三级总量的 50—80% (表 1), 甚至广西桂林石灰岩母质发育的高肥水平的水稻土(33) 也不例外。至于磷酸鋁的含量, 除个别水稻土外, 并不占主要地位。

过去由于技术上的限制, 对于酸性土壤中的磷素形态, 一般只能大体上知道是以磷酸鉄、鋁为主。由上述結果可进一步明确, 在我国南方的酸性和中性水稻土中, 不仅有大量闭蓄态的, 而且还有大量非闭蓄态的磷酸鉄化合物。

二、水稻土中不同形态磷酸盐在水稻磷素营养上的意义

为了了解水稻土中不同形态磷酸盐在水稻磷素营养上的意义，选择了七种具有代表性的南方水稻土，应用同位素 P^{32} 示踪法进行水稻盆栽试验。七种水稻土是表 1 中的 31、32、33、35、36、37、38 号土。每盆土重 5.5 公斤， P^{32} 用量为 150 微居里，示踪磷载体量为 2.48 毫克 P，处理为 NKP³² (N1 克— $(NH_4)_2SO_4$; K_2O 0.5 克— K_2SO_4)，重复 3—7 盆。1960 年 4 月 23 日播种，每盆 30 粒，8 月 2 日收获。在分蘖初期采样每盆间插 15 株，分蘖盛期间苗 7 株，孕穗期和灌浆期各收获 2 盆，成熟期收获 3 盆，分别测定地上部分的全磷及放射性磷量(其中 33、35、38 号土在孕穗期和灌浆期未曾采样)。现将各项结果列于表 2。根据 Fried^[17] 公式， $A = B \cdot \frac{1-y}{y}$ ，将表 2 数据求出“A”值。式中 B 是示踪磷量，y 是植株中 P^{32} 的比强，“A”值即土壤有效性磷含量。各生育期“A”值的结果列于表 3。将不同生育期测得的“A”值与这些水稻土中的各级无机磷量(表 1)进行统计处理，分别求出相关系数 r 和回归方程并绘出回归曲线，见表 4、图 1 和图 2。

表 2 水稻在不同生育期吸收的土壤磷和示踪磷量(盆栽)

土 号	吸 收 磷 量 (P 毫 克 / 盆)										成 熟 期 产 量	
	分 蘖 初 期		分 蘖 盛 期		孕 穗 期		灌 浆 期		成 熟 期		籽 粒 克/盆	茎 秆 克/盆
	p^{32}	p^{32}	p^{32}	p^{32}	p^{32}	p^{32}	p^{32}	p^{32}	p^{32}	p^{32}		
31	0.449	0.0164	8.41	0.178	13.1	0.330	27.6	0.390	35.1	0.541	8.98	32.2
32	0.118	0.00312	7.28	0.0606	14.2	0.121	31.6	0.235	75.4	0.563	14.7	40.3
33	3.25	0.0127	56.2	0.178	—	—	—	—	137	0.327	12.3	54.3
35	0.161	0.00484	8.25	0.0701	—	—	—	—	52.3	0.310	9.64	32.0
36	0.654	0.00484	18.3	0.0798	38.3	0.170	59.3	0.191	78.9	0.227	12.4	35.3
37	8.55	0.0172	82.0	0.154	101	0.207	147	0.213	199	0.266	22.5	62.4
38	2.30	0.0126	34.9	0.134	—	—	—	—	135	0.286	18.7	38.8

表 3 水稻不同生育期“A”值*的变化(盆栽)

土 号	分 蘖 初 期	分 蘖 盛 期	孕 穗 期	灌 浆 期	成 熟 期
31	156	268	232	401	373
32	218	766	669	766	766
33	1459	1787	—	—	2410
35	190	667	—	—	967
36	770	1308	1281	2104	1967
37	2844	3575	2788	3954	4248
38	1044	1482	—	—	2595

* “A”值的单位为 P_2O_5 毫克/5.5 公斤土。

表 4 的相关系数表明，闭蓄态磷酸盐与“A”值没有相关，即它们在水稻磷素营养上作用不大。这与一般认为闭蓄态磷是以作物难于利用的状态存在的概念相符。

水稻土中非闭蓄态的三级磷总量与“A”值有很高的相关性，其中又以磷酸鉄一级的相关性最高。由于应用示踪法测定土壤有效磷量“A”值，已被认为是土壤磷素供应水平

表 4 水稻土中各形态的磷酸盐与水稻不同生育期的“A”值的相关系数

磷酸盐形态	A ₁ (分蘖初期)	A ₂ (分蘖盛期)	A ₃ (成熟期)
y _包 (闭蓄态磷酸盐)	0.31	0.31	0.23
y _非 (非闭蓄态磷酸盐)	0.96*	0.95*	0.98*
y _{Fe} (磷酸铁)	0.87*	0.86*	0.95*
y _{Al} (磷酸铝)	0.39	0.29	0.28
y _{Ca} (磷酸钙)	0.69	0.71	0.65

* 1%机率。

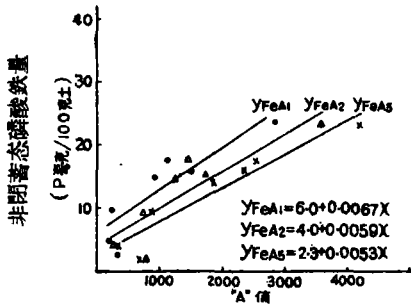


图 1 水稻在不同生育期的“A”值与土壤中非闭蓄态磷三級总量的迴归曲綫(图例见表 4)

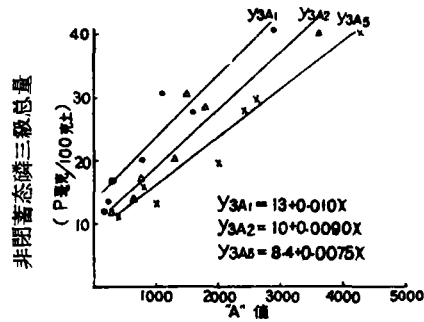


图 2 水稻在不同生育期的“A”值与土壤中非闭蓄态磷酸鉄量的迴归曲綫(图例见表 4)

的良好指标。所以上述結果可以表明，这些水稻土中的非閉蓄态磷是水稻磷素营养的重要給源。其中的磷酸鉄無論从它与“A”值的显著相关性或从它在三級总量中所占的比重来看，都表明它在水稻磷素营养的給源中占有更重要的地位。

应该說明，这并不意味着非閉蓄态磷酸铝和磷酸钙的有效性低于磷酸鉄，恰恰相反，只有当它們与非閉蓄态磷酸鉄同样或更为有效时，才有可能使三級总量与“A”值的相关系数大于磷酸鉄与“A”值的相关系数(参看表 4)。但是，因为在这三級中，磷酸铝和磷酸钙所占比重不大，以致它們数量上的变动，不致显著影响土壤磷素的总供应水平，加上它們的形态又有不断轉化的可能^[12,14,15]，所以其与“A”值沒有良好的相关性也就可以理解了。

图 1 和图 2 迴归曲綫的斜率 (b 值) 表明，随着水稻生育期的进展，非閉蓄态磷三級总量和非閉蓄态磷酸鉄对“A”值的影响，都有不断递增的趋势，而且每单位磷酸鉄量对“A”值的影响都大于三級总量。这不仅表明，水稻土中非閉蓄态的磷酸鉄是水稻磷素营养的主要給源，而且指出，在水稻生育过程中“A”值的递增，可能主要是由于这部分磷酸鉄的不断活化所致。

三、不同晶形的磷酸鉄对水稻磷素营养的意义

土壤中的磷酸鉄化合物是很复杂的，对于作物的有效性來說，除了与其基性的程度、結合的离子有关外，更重要的是与它的晶形有密切的关系。为了了解不同晶形的磷酸鉄对水稻磷素营养的供应能力，应用同位素 P³² 人工合成了晶形的粉紅磷鉄矿和无定形的磷酸鉄，并进行盆栽試驗。前者按照张守敬^[18]的方法制备。表 5 是成品化学組成的分析

結果。圖 3 是 X 衍射綫譜。圖 4 是差熱曲綫。這一系列的鑑定結果表明，前者是具有 $\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 分子組成的粉紅磷鐵礦，其 X 衍射綫數據與 A、S、T、M、file card No. II 515 晶形粉紅磷鐵礦的結果相符^[19]。后者是大致具有 $\text{FePO}_4 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ 組成的無定形磷酸鐵。

供試土壤為 71 號土（見表 1）。水稻直播後一個月採樣，50 天收穫。植株的產量和吸收的磷量等分析結果列於表 6。

表 6 的結果表明，在水稻土中，粉紅磷鐵礦與無定形的磷酸鐵對水稻生長的影响以及吸收磷的總量，幾乎完全一致。而且，與磷酸二氫鉀對照比較，還有明顯超過的趨勢。這不僅說明無定形的磷酸鐵可以作為水稻的有效磷源，而更重要的是表明了粉紅磷鐵礦對水稻磷素營養具有良好的供應能力。

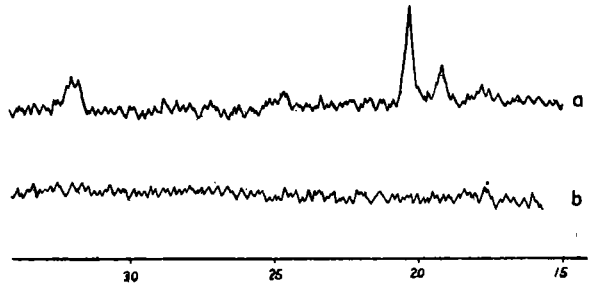


圖 3 粉紅磷鐵礦 (a) 和無定形磷酸鐵 (b) 的 x 衍射綫譜

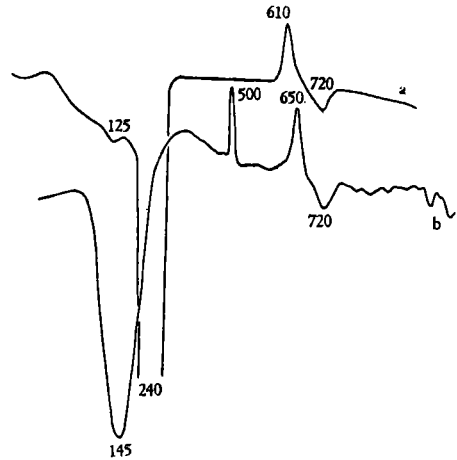


圖 4 粉紅磷鐵礦 (a) 和無定形磷酸鐵 (b) 的差熱曲綫

表 5 粉紅磷鐵礦和無定形磷酸鐵的化學組成

磷酸鹽形態	測定值 (%)				理論值 (%)			
	PO ₄	Fe	H ₂ O*	PO ₄ :Fe	PO ₄	Fe	H ₂ O	PO ₄ :Fe
粉紅磷鐵礦	51.5	30.2	18.9	1:1	50.8	29.9	19.3	1:1
無定形磷酸鐵	48.7	26.2	25.1	1:0.92	—	—	—	—

* 300°C 灼燒 2 小時。

表 6 粉紅磷鐵礦和無定形磷酸鐵對水稻磷素的供應能力 (盆栽)

處理	測定項目		干重 (克/盆)		全磷 (P%)		吸收總量 (毫克 P/盆)		P ³² (%)		吸收 P ³² 總量 (毫克 P ³² /盆)	
	日期	日期	7月30日	8月21日	7月30日	8月21日	7月30日	8月21日	7月30日	8月21日	7月30日	8月21日
NK	1.80	5.15	0.181	0.179	3.26	9.01	—	—	—	—	—	—
NK-KH ₂ PO ₄	2.28	7.11	0.204	0.251	4.65	17.8	—	—	—	—	—	—
NK-FePO ₄ ·xH ₂ O	3.88	7.32	0.289	0.281	11.2	20.6	0.085	0.084	3.30	6.15	—	—
NK-FePO ₄ ·2H ₂ O	2.88	7.30	0.262	0.283	7.54	20.7	0.123	0.176	3.55	12.9	—	—

我們选择这两种不同晶形的磷酸鉄的用意在于,以晶形的粉紅磷酸鉄矿作为土壤中非閉蓄态的、活性較低的、磷素供应能力較弱的这一类型的磷酸鉄化合物的典型代表,而以无定形的磷酸鉄作为活性較高的、磷素供应能力較強的这一类型的磷酸鉄化合物的典型代表。这是根据,一般认为粉紅磷酸鉄矿具有稳定的磷位^[20],而其同晶系列的这一类型的化合物可能是酸性土壤中磷酸盐轉化形成的最終稳定产物^[21-24];而无定形磷酸鉄具有較大的活性,可以作为水稻的有效磷源已为很多試驗所肯定^[25,26,27]。因此,假如这种选择是有实际意义的話,則根据这一盆栽試驗的結果可以进一步推断,水稻土中的非閉蓄态的磷酸鉄化合物,即使是以比較稳定的結晶状态存在,但是却能作为水稻磷素营养的重要給源。

四、討 論

我們的試驗中,粉紅磷酸鉄矿在酸性水稻土上 ($\text{pH} = 5.7$) 对水稻具有良好的供应能力,而 Lindsay^[28] 对于旱作玉米的試驗指出,粉紅磷酸鉄矿不能作为玉米的有效磷源。即使施用石灰使土壤由 $\text{pH} 4.9$ 提高到 7.6 时,其磷素供应能力亦未有所改善。粉紅磷酸鉄矿对于水稻和玉米这种不同的反应,值得进一步研究。为此,进行了下列的室内試驗。

称取前述人工制备的两种不同晶形的磷酸鉄各 30 毫克,加入 50 毫升不同 pH 的溶液(以 HCl 和 NaOH 配成),振蕩 1 小时,測定滤液的 pH 及溶解出的磷量,結果繪成 pH 溶解曲綫(图 5)。另称取一定量(按照土壤磷的浓度約为 500 ppm P)的上述两种不同晶形的

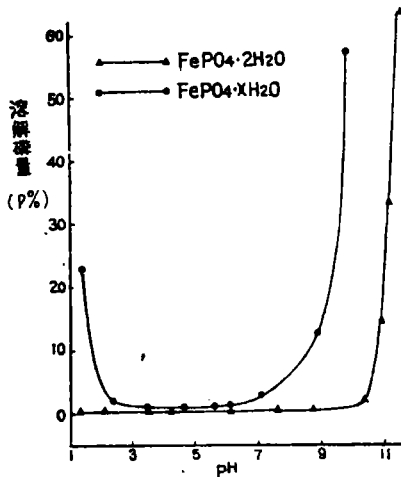


图 5 粉紅磷酸鉄矿和无定形磷酸鉄的 pH 溶解曲綫

磷酸鉄,分别与土壤(71号土)充分混勻。分两种处理,一是保持湿润(水分为最大持水量的 60%);另一是加入 1% 稻草混勻后保持淹水条件。前者在室温(平均温度約 17°C),后者在 30°C 保温,两者均不加磷酸鉄的土壤作对照。放置一个月后,測定土壤的氧化还原电位,并以 1:10 的土液比加入不同 pH 的溶液(同上),振蕩 1 小时,測定滤液的 pH 与溶解出的磷量,繪成 pH 溶解曲綫图 6 和图 7(图中数据已經減去对照处理中提出的磷量)。

从图 5 可以看出,无定形的磷酸鉄与粉紅磷酸鉄矿的 pH 溶解曲綫相差很大。前者在 $\text{pH} 3-6$ 的范围以外,随着 pH 的变化,磷的溶解百分数迅速增大,而后者在 $\text{pH} 1-10$ 間,几乎不受 pH 变化的影响。图 6 表明,在湿润条件下(E_h 为 510—560 毫伏),这二种不同晶形的磷酸鉄的溶解度其变化并不显著。在酸

性范围内,与图 5 沒有經過培育处理的 pH 溶解曲綫完全重合。在碱性范围,溶解度的轉折点有相对靠近的趋势,但是两者仍有明显差别。图 7 表明,在淹水还原条件下(E_h 为 0—20 毫伏)溶解度的变化非常显著。无定形磷酸鉄的溶解曲綫与图 6 比較,在酸性范围的轉折点 pH 由 3 提高至 4,酸溶性磷量的百分数大大增加;在碱性范围,溶解度亦有一定变化。最令人注意的是,粉紅磷酸鉄矿的溶解曲綫,無論在酸性或碱性范围,由原先不受 pH 的影响一跃而为与无定形磷酸鉄的溶解曲綫几乎完全重合。

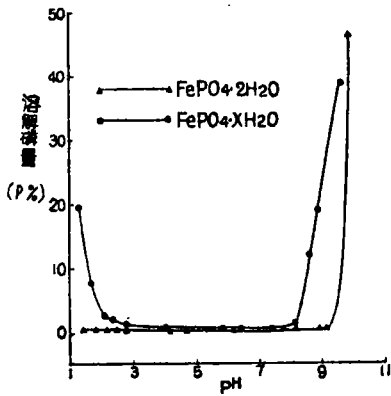


图 6 粉紅磷酸鐵礦和无定形磷酸鐵的 pH 溶解曲線
(與土壤混勻後濕潤培育一個月)

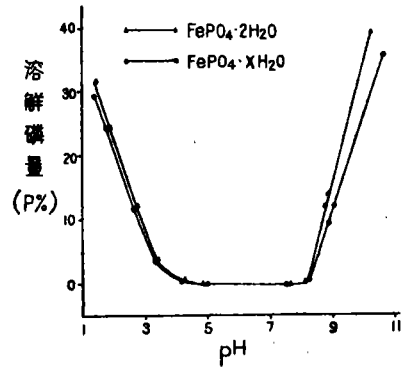


图 7 粉紅磷酸鐵礦和无定形磷酸鐵的 pH 溶解曲線
(與土壤及稻草混勻後淹水培育一個月)

根据这一試驗結果，我們認為，對於我國南方的酸性和中性水稻土來說，澆水後導致土壤磷有效性的提高，至少有两种因素的影響。一是澆水後引起土壤 pH 升高，促使磷酸鹽的水解作用加強，從而提高其有效性；另一是澆水後由於土壤微生物和有机質的作用，土壤氧化還原電位降低，使磷酸高鐵被還原，從而提高磷酸鐵的有效性。因為，對於無定形的磷酸鐵化合物，從圖 5 可以說明，由於土壤澆水後 pH 升高至 pH 6 以上，就有可能導致其有效性的增加；但是，對於晶形的磷酸鐵化合物，就很難因 pH 的影響而增加有效性。Lindsay 的試驗亦證明這一點。圖 6 和圖 7 中的無定形磷酸鐵的 pH 溶解曲線存在一定的差異，這表明在淹水還原條件下，無定形磷酸鐵的性狀亦有所變化。圖 7 的結果意味着，無論是晶形的磷酸鐵或者是無定形的磷酸鐵，由於淹水還原條件的影響，使其存在的性狀極趨一致。但是這種性狀既不相同於晶形的磷酸鐵，亦不一定相同於無定形的磷酸鐵（比較圖 6 和圖 7），而可能是，這兩種不同晶形的磷酸鐵中的高鐵受到還原作用的影響而還原成亞鐵，由於土壤體系里同時存在一定量的高鐵化合物，因此，由於還原而活化的磷酸離子將與亞鐵離子和高鐵離子之間建立一個新的平衡體系。在這體系里，根據溶度積的原理，將會有無定形的磷酸亞鐵和磷酸高鐵化合物共同存在；不僅如此，一部分被活化的磷酸鹽與土壤顆粒表面接觸，又將被具有較大比面的土壤固相所吸附。不言而喻，由於澆水還原而形成的這種磷酸鹽的活性比晶形的磷酸鐵將有極顯著的提高。

上述試驗可以闡明，結晶的粉紅磷酸鐵礦所以與無定形磷酸鐵一樣對水稻磷素營養具有良好供應能力的機制。同理，也闡明了對於以磷酸鐵為主的酸性和中性水稻土，非閉蓄態的磷酸鐵化合物所以能作為水稻磷素營養的重要給源的原因。至於旱地，晶形的磷酸鐵既不受 pH 溶解作用的影響（參考圖 6），更不存在澆水還原的活化作用，因此，不能作為旱地的有效磷源。

五、摘 要

研究了我國南方 18 個不同類型水稻土標本的無機磷的形態。結果表明，非閉蓄態的磷酸鹽，包括磷酸鋁、磷酸鐵和磷酸鈣三種形態，一般占土壤無機磷總量的 30—60%，其中磷酸鐵一級占非閉蓄態總量的 50—80%。土壤無機磷中另外的 40—70% 主要是被氧

化鉄胶膜包蔽的磷酸鉄和磷酸鋁。

应用同位素 P^{32} 示踪法进行的水稻盆栽試驗表明:在水稻不同生育期,土壤有效磷量“ A ”值与水稻土中非閉蓄态的磷酸鉄化合物具有极显著的相关性(成熟期的 $r = 0.95^{**}$)。用 P^{32} 人工合成的两种不同晶形的磷酸鉄进行了水稻盆栽試驗;进一步指出:在水稻土的条件下,晶形的粉紅磷鉄矿对水稻具有良好的磷素供应能力。这些結果說明,水稻土中非閉蓄态的磷酸鉄化合物,即使是以比較稳定的結晶状态存在,但却有可能作为水稻磷素营养的重要給源。

室内試驗表明,粉紅磷鉄矿所以对水稻磷素营养具有良好供应能力,以及酸性和中性水稻土中的非閉蓄态磷酸鉄化合物,所以能作为水稻磷素营养的重要給源,主要是受漬水还原过程的影响,这一过程,使原来晶形的磷酸鉄化合物轉化为无定形的状态。

参 考 文 献

- [1] Fisher, R. and Thomes, R. P.: 1935. The determination of forms of inorganic phosphorus in soils. *J. Amer. Soc. Agron.*, 27:863—873.
- [2] Dean, L. A.: 1937. Distribution of the forms of soil phosphorus. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 2: 223—228.
- [3] Dean, L. A.: 1938. An attempted fractionation of soil phosphorus. *J. Agric. Sci.*, 28:234—246.
- [4] Чириков, Ф. В. и Волкова, В. В.: 1941. Усвоение растениями фосфорной кислоты разных форм фосфатов почвы. «Вестник с.-х. Науки. Удобрение, агротехника и агропочвоведение», вып. 3, М., 115—133.
- [5] Ghani, M. O.: 1943. Fractionation of soil phosphorus. I. *India. J. Agric. Sci.*, 13:29—45.
- [6] Williams, C. H.: 1950. Studies on soil phosphorus. I. *J. Agric. Sci.*, 40:257—262.
- [7] Bhargoo, M. S.: 1957. Fractionation of phosphorus in Kansas soils and its significance in response of wheat to phosphate fertilizers. *Agron. J.*, 49:354—358.
- [8] 张守敬 and Jackson, M. L.: 1957. Fractionation of soil phosphorus. *Soil Sci.*, 84:133—144.
- [9] Fife, C. V.: 1959. An evaluation of NH_4F as selective extractant for Al-bond soil phosphorus. I. *Soil Sci.*, 87:13—21; II. *Soil Sci.*, 87:83—88.
- [10] Khin, A. and Leeper, G. W.: 1960. Modifications in Chang and Jackson's procedure for fractionating soil phosphorus. *Agrochimica*, 4:246—254.
- [11] 张守敬: 1962. Separation of aluminum phosphate from iron phosphate in soils. *Science*, 136:386.
- [12] 张守敬 and Jackson, M. L.: 1958. Soil phosphorus fraction in some representative soils. *J. Soil Sci.*, 9:109—119.
- [13] Hsu, P. H. and Jackson, M. L.: 1960. Inorganic phosphate transformations by chemical weathering in soils as influenced by pH. *Soil Sci.*, 90:16—24.
- [14] Yuan, T. L.: 1960. Forms of newly fixed phosphorus in three acid sandy soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 24:447—450.
- [15] 张守敬等: 1961. The fate of soluble phosphate applied to soils. *J. Soil Sci.*, 12:286—293.
- [16] 徐 琪: 1962. 长江中下游白土的地理分布規律及其形成过程的特点. *土壤学报*, 10:44—54.
- [17] Fried, M. et al.: 1952. A concept concerning the measurement of available soil nutrients. *Soil Sci.*, 73:263—271.
- [18] 张守敬 and Jackson, M. L.: 1957. Solubility product of iron phosphate. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 21:265—269.
- [19] Cole, C. V. and Jackson, M. L.: 1950. Colloidal dihydroxy dihydrogen phosphate of Al and Fe with crystalline character established by electron and X-ray diffraction. *J. Phy. and Colloid Chem.*, 54:128—142.
- [20] Huffman, E. O. et al.: 1960. Rates and mechanisms of dissolution of some ferric phosphate. *Soil Sci.*, 90:8—15.
- [21] Chakravarti, S. C. and Talibudeen, O.: 1962. Phosphate Equilibria in acid soils. *J. Soil Sci.*, 13: 231—240.
- [22] Wright, B. C. et al.: 1960. Characterization of phosphate reaction products in acid soils by the

- application of solubility criteria. *Soil Sci.*, **90**:32—43.
- [23] Lindsay, W. L. et al.: 1962. Identification of reaction products from phosphate fertilizers in soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **26**:446—452.
- [24] Haseman, I. F. et al.: 1950. Some reactions of phosphate with clays and hydrous oxides of iron and aluminum. *Soil Sci.*, **70**:257—271.
- [25] Неунылов, Б. А.: 1959. 对远东地区的水稻施用磷肥的特点的研究。(引自放射性同位素在农业和生物学上的应用。苏联专家报告资料汇编之三。111—112 页) 上海科技出版社。
- [26] Nagaoka, M.: 1904. On the action of various phosphates upon rice plants. *Bul. Col. Agri. Tokyo Imp. Univ.*, V. 6, No. 3, p. 215—261. (引自 *Soil Sci.*, **13**:355, 1922).
- [27] Fujiwara, A.: 1950. Chemical constitution and availability of iron and aluminum phosphate. I. II. III. *Tohoku J. Agric. Research* **1**:129—228. (引自 *Plant and Soil*, **14**:118—126, 1961)
- [28] Lindsay, W. L.: 1961. Effectiveness of some iron phosphate as sources of phosphorus for plants. *Plant and Soil*, **14**:118—126.

THE CONTENT OF IRON PHOSPHATES IN THE PADDY SOILS OF SOUTHERN CHINA AND THEIR SIGNIFICANCE TO THE PHOSPHORUS NUTRITION OF RICE PLANT

P. F. CHIANG, R. K. LU, I. C. KU AND A. Y. LI

(*Institute of Soil Science, Academia Sinica*)

(ABSTRACT)

Eighteen samples of paddy soils developed on red earth, alluvial and lacustrine deposits and Hsiasu loam (a heavily leached loess deposit) were collected from Kwantung, Kwansi, Kiangsi and Kiangsu provinces. They possess pH value from 5.4 to 8.0 and are of different fertility. Fractionations of soil mineral phosphate were conducted according to Chang and Jackson's scheme. Analytical results revealed that iron phosphate, most of which are coated with ferric oxide, predominate in paddy soils of acid and neutral reaction.

Seven acid and neutral paddy soils were subjected to pot culture experiment. The "A" values for available phosphorus according to Fried were determined at different growing stage of rice. Significant correlations between the content of iron phosphates to the "A" values were found at all stages of growth of rice after the beginning of tillering, showing r values 0.95 with 1% level at maturity. Correlations between the contents of aluminium phosphate and calcium phosphate to the "A" values are rather insignificant, but it does not imply the inavailability of soil phosphorus in this form.

A series of supplementary pot experiment were conducted with synthetic strengite ($\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), prepared from labelled phosphate. The effective uptake of labelled phosphate by rice plant verified the availability of phosphate ions originated from strengite. Solubility curve of strengite, after being transformed under anaerobic conditions, shows close coincidence with that of from amorphous ferric phosphate ($\text{FePO}_4 \cdot x\text{H}_2\text{O}$). It is believed that strengite is firstly changed to more soluble ferrous phosphate under water-logged condition, and the phosphate ions is then reprecipitated by active sesquioxide (predominantly iron oxide) to form amorphous ferric phosphate, which has been proved a proper source of available phosphorus to rice plant. Little changes in solubility curve even occur when strengite was incubated with soils in an aerobic condition. This gives further evidence of the present conclusion.