

# 磷肥对中酸性土壤无机磷形态转化及其有效性的影响<sup>\*</sup>

成瑞喜 刘景福 徐芳森

(华中农业大学)

## 摘 要

用张守敬和 S. C. Jackson 提出的无机磷分级体系和蒋柏藩等新近改进的石灰性土壤无机磷的分级方法,对棕红壤和黄棕壤无机磷分级进行了比较研究,并用石灰性土壤无机磷分级方法,研究了棕红壤和黄棕壤施用过磷酸钙和磷矿粉肥前后无机磷形态的转化及其有效性。

选用适当的无机磷分级方法,研究土壤中无机磷形态、转化及其有效性,对揭示土壤供磷状况,合理施用磷肥具有重要意义。1957 年以来,张守敬等提出的无机磷分级体系<sup>[1]</sup>在国内较为普遍应用。近年来,蒋柏藩等对石灰性土壤无机磷分级方法<sup>[2]</sup>的建立,进一步推动了这一领域的研究。目前,用该方法对石灰性土壤无机磷形态、转化及其有效性的研究已有报道<sup>[3-5]</sup>,但对中、酸性土壤无机磷形态、转化及其有效性的研究报道甚少。本文引用该方法对棕红壤和黄棕壤进行无机磷分级,以探讨该方法对中、酸性土壤分级的可行性和各级无机磷在土壤中的转化及其有效性。

## 一、材料与方 法

供试土壤为鄂南棕红壤和鄂中黄棕壤,其农化性状见表 1。

试验设计:取供试土壤各 2 份,1 份 6.5kg,供盆栽试验,连续种植油菜—大豆—油菜三季作物;另 1 份 3.5kg,供室内土壤培养试验,即在不种植作物的条件下保持田间持水量,进行土壤培养试验。磷肥用量根据供试土壤磷的吸附特性<sup>[6]</sup>,黄棕壤施磷(P,以全磷量计算,下同)  $220\mu\text{g g}^{-1}$ ,棕红壤施磷  $125\mu\text{g g}^{-1}$ 。供试磷肥有黄麦岭生产的过磷酸钙(简称 SSP,全磷量 19.4%)和美国北卡罗来磷矿粉(简称 NCPR,全磷量 30.4%)。盆栽试验于每季作物收获后,室内土壤培养试验于 3、8、12、18 个月分别取样分析。土壤样品采用 ASI 法<sup>[7]</sup>测定有效磷,用石灰性土壤无机磷分级方法<sup>[2]</sup>测定无机磷各组分。

表 1 供试土壤的农化性状

土 壤	pH (水提)	有机质 ( $\text{g kg}^{-1}$ )	全 磷 ( $\text{g kg}^{-1}$ )	有效磷 ( $\mu\text{g g}^{-1}$ )	无机磷总量 ( $\text{P mg kg}^{-1}$ )
棕红壤	5.34	18.0	44	11.47	251.3
黄棕壤	6.54	17.4	45	4.77	186.5

## 二、结果与分析

### (一)土壤无机磷分级方法比较

\* 本研究由世界磷肥研究所美国磷肥基金会和加拿大磷肥研究所资助。

选择不同磷水平的中、酸性棕红壤和黄棕壤,用张守敬、S. C. Jaksan 无机磷分级体系<sup>1</sup> (简称 I 法,下同)和蒋柏藩建议的石灰性土壤无机磷分级体系<sup>2</sup> (简称 II 法,下同)进行无机磷分级比较。结果表明(表 2),两种分级体系均可浸提出土壤中的 Al—P、Fe—P、O—P 和 Ca—P,且两种方法浸提出的无机磷总量差异不大。

1. II 法浸提的 Ca—P 可以明显地分为 Ca<sub>2</sub>—P、Ca<sub>8</sub>—P 和 Ca<sub>10</sub>—P,且三种形态磷酸钙盐的含量差异显著。比较两种体系浸提的 Ca—P,发现:在未施磷的两种供试土壤中,I 法浸提的 Ca—P 和 II 法浸提的 Ca<sub>2</sub>—P、Ca<sub>8</sub>—P、Ca<sub>10</sub>—P 的总和却非常接近,黄棕壤和棕红壤分别为 31.6 $\mu\text{gg}^{-1}$ 和 31.4 $\mu\text{gg}^{-1}$ 、19.7 $\mu\text{gg}^{-1}$ 和 23.9 $\mu\text{gg}^{-1}$ ;当供试土壤施加过磷酸钙后,II 法浸提的 Ca<sub>2</sub>—P、Ca<sub>8</sub>—P 和 Ca<sub>10</sub>—P 的总和显著高于 I 法的 Ca—P。其中 Ca<sub>2</sub>—P、Ca<sub>8</sub>—P 的含量增加显著,Ca<sub>10</sub>—P 的变化甚微。说明 II 法用不同的提取剂可将溶解度不同的磷酸钙盐分成 Ca<sub>2</sub>—P、Ca<sub>8</sub>—P 和 Ca<sub>10</sub>—P 3 种形态,并有利于不同形态钙磷有效性的进一步研究,而 I 法无法实现这一点。同时,I 法用 1.0molL<sup>-1</sup>NH<sub>4</sub>Cl 浸提中、酸性土壤中的有效磷很困难,即使在含磷量较高的土壤中所提取的有效磷亦甚微,故很难正确反应土壤中有效磷的状况。

表 2 两种无机磷分级方法比较

土 壤	无机磷含量(I 法, $\mu\text{gg}^{-1}$ )					无机磷含量(II 法, $\mu\text{gg}^{-1}$ )							
	总量	Al—P	Fe—P	O—P	Ca—P	总量	Ca <sub>2</sub> —P	Ca <sub>8</sub> —P	Al—P	Fe—P	O—P	Ca <sub>10</sub> —P	
黄棕壤	对照	193.5	6.0	63.8	92.8	31.6	186.5	1.8	痕迹	3.0	66.8	85.0	29.6
	施磷	417.1	48.5	197.6	137.8	33.2	415.5	31.5	5.3	37.2	186.5	122.6	32.4
棕红壤	对照	254.2	24.3	99.1	115.0	19.7	251.3	11.1	痕迹	15.4	97.8	114.2	12.8
	施磷	401.7	72.2	171.6	132.7	24.0	407.4	39.3	9.7	47.3	178.9	114.1	18.0

注:供试土样为施加 SSP 磷肥室内培养 18 个月后取样。

2. 两种方法提取的 Al—P 相比,一致表现出 I 法提取量高于 II 法。其主要原因可能与提取剂有关,I 法提取 Al—P 的同时也可以浸提出易溶性 Ca—P,因而造成 Al—P 量增加的假象。而在 II 法中,先用 0.25molL<sup>-1</sup>NaHCO<sub>3</sub> 提取 Ca<sub>2</sub>—P 和 0.5molL<sup>-1</sup>NH<sub>4</sub>Ac 提取 Ca<sub>8</sub>—P 后,再用 NH<sub>4</sub>F 提取 Al—P,即表明 II 法中的 Al—P 量较能真实地反映中、酸性土壤中 Al—P 的含量及它的有效性。

3. 两种分级方法提取 Fe—P 和 O—P 的数量之和相差无几。如黄棕壤施磷前,I 法和 II 法提取两种形态的和为 156.6 $\mu\text{gg}^{-1}$ 和 151.8 $\mu\text{gg}^{-1}$ ,施磷后则为 335.4 $\mu\text{gg}^{-1}$ 和 309.0 $\mu\text{gg}^{-1}$ 。又如棕红壤在施磷前后,I 法和 II 法的提取量之和依次为:214.1 $\mu\text{gg}^{-1}$ 和 191.0 $\mu\text{gg}^{-1}$ ,304.2 $\mu\text{gg}^{-1}$ 和 293.0 $\mu\text{gg}^{-1}$ 。这表明在中、酸性土壤中用两种方法提出的 Fe—P 和 O—P 的总量非常接近。表 2 中,施磷前后这两种形态磷的变化趋势也非常相似,加磷前 O—P>Fe—P,加磷后则为 Fe—P>O—P,说明水溶性磷进入土壤后,对两种形态磷的变化在两种分级体系中也颇为一致。

通过试验,初步认为,蒋柏藩等新近提出的“石灰性土壤无机磷分级测定方法”,也适应于中、酸性土壤无机磷的分级,并且有利于中、酸性土壤在风化过程中各种 Ca—P 化合物的转化、有效性以及水溶性磷肥进入土壤后各级无机磷有效性的进一步研究。

## (二) 增施磷肥对中酸性土壤无机磷形态的影响

经室内培养后的黄棕壤和棕红壤,分期取样,用 II 法测定各级无机磷含量,结果表明由于两种磷肥供磷特性的差异,两种供试土壤理化性状的不同,各级无机磷转化途径也不尽相同。

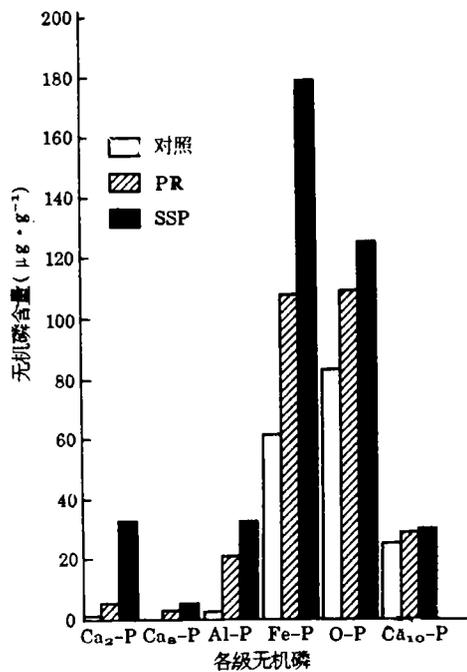


图1 黄棕壤施用磷肥对各级无机磷的影响

7 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。以上结果表明,在黄棕壤上两种磷肥以全磷量相等的施用条件下,过磷酸钙对无机磷总量贡献比磷矿粉大,尤以对 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Al-P}$ 和 $\text{Fe-P}$ 的转化速率较快,其余几种形态相对稳定。

2. 两种磷源在棕红壤中无机磷形态的转化 棕红壤与黄棕壤相比,棕红壤肥力水平较高,对磷的吸附容量较小<sup>[6]</sup>。未施磷肥的土壤无机磷总量为349.4 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ,施用磷矿粉和过磷酸钙后,分别达到447.0 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 和470.9 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ,无机磷总量依次提高27.9%和29.7%,且各级无机磷含量的顺序是: $\text{O-P} > \text{Fe-P} > \text{Al-P} > \text{Ca}_2\text{-P} > \text{Ca}_{10}\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ ,其中 $\text{O-P}$ 含量最高,在180—260 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ,占无机磷总量的48—60%,其次 $\text{Fe-P}$ 为100—180 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ,占30%左右,两者之和约占总量的75—90%, $\text{Al-P}$ 和 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 为15—50 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 和10—40 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ,分别占5—10%和3—7%, $\text{Ca}_3\text{-P}$ 最低,未施磷肥时为1—2 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ,施磷后可提高到8—11 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ , $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 在施磷前后变化不大,7—10 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ,它们仅占无机磷总量的1—3%。施用不同磷肥后,土壤各级无机磷含量与对照相比,其增值的大小顺序为 $\text{Ca}_8\text{-P} > \text{Al-P} > \text{Ca}_2\text{-P} > \text{Fe-P} > \text{O-P}$ 、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 。

以上研究结果表明,在供试的两种土壤上,两种磷源对各级无机磷含量的贡献表现为:在黄棕壤上水溶性过磷酸钙>难溶性磷矿粉;在棕红壤上则基本相近。各级无机磷在化学活性上表现出 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Al-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 的活性较大, $\text{Fe-P}$ 次之, $\text{O-P}$ 和 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 比较稳定。

### (三) 中酸性土壤中不同形态无机磷的有效性

1. 培育土壤各级无机磷与有效磷的关系 两种供试土壤经3、8、12、18个月培养后分期取样,分别测定土壤有效磷及各级无机磷含量(Ⅱ法),然后用线性回归分析计算它们之间的相关系数(r)(表3)。结

1. 两种磷源在黄棕壤中无机磷形态的转化 施用磷矿粉(PR)后各级无机磷总量达到250—300 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ,而施用过磷酸钙(SSP)后可达100 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 以上,与不施磷(对照)相比,依次提高60%和136%。且各级无机磷含量存在着显著差异,图1表明施过磷酸钙后其大小顺序为 $\text{Fe-P} > \text{O-P} > \text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Al-P}$ 、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_3\text{-P}$ 最低,其中, $\text{Fe-P}$ 和 $\text{O-P}$ 含量为160—190 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 和110—140 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间,约占无机磷总量的40—45%和28—33%, $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Al-P}$ 和 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ ,它们的含量分别为26—37 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 、28—35 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 和25—33 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ,依次占6—9%、8%和6—8%, $\text{Ca}_8\text{-P}$ 甚少,占2%以下。在增施磷矿粉肥后各级无机磷含量均比施过磷酸钙低,且表现出 $\text{Fe-P}$ 、 $\text{O-P} > \text{Ca}_{10}\text{-P} > \text{Al-P}$ ,其含量分别在90—125 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 、25—30 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 和16—23 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ , $\text{Ca}_2\text{-P}$ 和 $\text{Ca}_3\text{-P}$ 甚低,仅3—

表3 供试土壤有效磷与各级无机磷含量的相关比较

土壤	$\text{Ca}_2\text{-P}$	$\text{Ca}_8\text{-P}$	$\text{Al-P}$	$\text{Fe-P}$	$\text{O-P}$	$\text{Ca}_{10}\text{-P}$
棕红壤	0.732**	0.616*	0.832**	0.788**	0.454	0.609*
黄棕壤	0.991**	0.748**	0.859**	0.906**	0.818**	0.473

注: n=12, \*\* 1%显著水平; \* 5%显著水平,下同。

果表明,在棕红壤上  $Ca_2-P$ 、 $Al-P$  和  $Fe-P$  的相关系数分别为 0.732、0.832 和 0.788,达到极显著水准, $Ca_8-P$ 、 $Ca_{10}-P$  的  $r$  值为 0.616 和 0.609 达到显著水准,而  $O-P$  的  $r$  值为 0.454,相关性低于 0.05 水准。在黄棕壤上,除  $Ca_{10}-P$  的相关系数( $r=0.473$ )不显著外,其它形态的磷均达到极显著水准。由此,可以推测: $Ca_2-P$ 、 $Al-P$  和  $Fe-P$  是中、酸性土壤中有有效磷的重要来源, $O-P$  虽与土壤有效磷达到极显著水准,但从理论上讲并不能作为有效磷的给源<sup>[8]</sup>。

2. 种植作物对无机磷组分的影响 测定盆栽试验及培养试验土壤无机磷与有效磷的含量,并分析两者的相关性,结果表明(表 4):

(1)有效磷和  $Ca_2-P$  有效磷对于作物是一种最有效的无机磷,在液相中极不稳定,易转化成  $Ca_2-P$ ,研究表明  $Ca_2-P$  的供磷能力与有效磷成显著相关,也是作物最有效的磷源<sup>[3]</sup>,表 4 表明,有效磷和  $Ca_2-P$  的  $r$  值为 0.967,达极显著水准,同时在棕红壤上种植作物之后,其  $Ca_2-P$  含量相对减少,如施用过磷酸钙的处理减少  $25.43\mu g g^{-1}$ ,施用磷矿粉的也减少  $16.68\mu g g^{-1}$ ,在黄棕壤上也依次减少  $18.29\mu g g^{-1}$  和  $4.0\mu g g^{-1}$ ,说明这部分磷被作物吸收利用或部分向其它形态转化。但黄棕壤上施用磷矿粉在种植作物后,有效磷和  $Fe-P$  含量略有提高,其原因有待进一步研究。

表 4 作物对各级无机磷组分的影响 ( $\mu g g^{-1}$ )

土壤	处 理	有效磷	无机磷总量	$Ca_2-P$	$Ca_8-P$	$Al-P$	$Fe-P$	$O-P$	$Ca_{10}-P$	
棕红壤	SSP	土 培	59.0	488.4	39.3	9.7	47.3	178.9	204.2	8.9
		盆 栽	18.5	288.6	13.9	5.0	31.9	135.4	95.3	7.1
		变化值	31.5	199.9	25.4	4.7	15.4	43.5	108.9	1.8
	NCPR	土 培	31.2	378.2	25.7	10.4	41.8	140.2	149.5	10.5
		盆 栽	14.6	241.5	9.0	痕迹	15.8	114.4	91.6	9.7
		变化值	16.6	236.7	16.7	10.4	25.0	25.8	57.9	0.8
黄棕壤	SSP	土 培	35.0	405.6	31.2	4.3	28.8	186.4	122.6	32.4
		盆 栽	18.5	303.8	12.9	痕迹	19.2	161.2	95.3	15.2
		变化值	16.5	101.7	18.3	4.3	9.6	25.2	27.3	17.2
	NCPR	土 培	9.5	308.1	13.6	3.9	22.8	125.6	112.0	30.2
		盆 栽	12.6	281.2	9.6	痕迹	19.5	133.3	100.9	17.9
		变化值	-3.1	26.9	4.0	3.9	3.3	-7.7	11.1	12.2
各级磷与有效磷的相关值( $r$ ) (n=8)				0.967**	0.742*	0.844**	0.789**	0.866**	-0.164	

(2)  $Al-P$ 、 $Fe-P$  和  $O-P$  表 4 表明,在两种供试土壤上,这三种无机磷的变化不尽相同,总的趋势是在棕红壤上的变化量大于黄棕壤。如棕红壤上种植作物后, $Al-P$  减少  $15-25\mu g g^{-1}$ , $Fe-P$  和  $O-P$  分别减少  $25-43\mu g g^{-1}$  和  $57-108\mu g g^{-1}$ ,而黄棕壤上的  $Al-P$ 、 $O-P$  的变化值依次为  $3-9\mu g g^{-1}$  和  $11-27\mu g g^{-1}$ ,同时,在施磷矿粉种植作物后, $Fe-P$  还略有增加。 $Al-P$ 、 $Fe-P$  和  $O-P$  与有效磷的  $r$  值分别为 0.844、0.789 和 0.886,由此进一步证明: $Al-P$  和  $Fe-P$  是中、酸性土壤有效磷的重要来源, $O-P$  与有效磷并无直接联系<sup>[8]</sup>。

(3)  $Ca_8-P$  和  $Ca_{10}-P$  在供试土壤中, $Ca_8-P$  含量极少(图 1),但增施磷肥后,棕红壤上可达  $10\mu g g^{-1}$  左右,黄棕壤也可达  $3-4\mu g g^{-1}$ ,在种植作物后均有不同程度的减少,它与有效磷的相关系数  $r$  为 0.742,达到显著水准,表明它的有效性虽低于  $Ca_2-P$ ,也可能是有效磷的给源。 $Ca_{10}-P$  在两种供试土壤中的变化量都很低,且与有效磷成负相关( $r=-0.164$ ),说明  $Ca_{10}-P$  在中、酸性土壤中比较稳定,对作物基本无效。

(下转第 268 页)

表 10 钙质结核的元素富集率

结核类型	Si	Fe	Al	Ca	Mg	Ti	Mn	K	Na	P	Cu	Zn	Co	Ni	Cr	V	Sr	Ba	Pb
锥形结核	0.62	0.64	0.58	3.99	0.96	0.65	0.79	0.80	0.79	0.66	0.22	0.44	0.24	0.38	0.38	0.52	1.46	0.60	0.09
富集率序列:Ca>Sr>Mg>K>Mn~Na>P>Ti>Fe>Si>Ba>Al>V>Zn>Ni~Cr>Co>Cu>Pb																			
完形结核	0.43	0.45	0.41	7.66	0.85	0.39	1.05	0.74	0.65	0.46	0.54	0.21	0.49	0.36	0.09	0.34	1.46	0.60	0.43
富集率序列:Ca>Sr>Mn>Mg>K>Na>Ba>Cu>Co>P>Fe>Si~Pb>Al>Ti>Ni>V>Zn>Cr																			

参 考 文 献

[1] 耿国强、徐琪,苏北砂姜黑土与白浆土的形成同生态环境演变的关系,土壤学报,第24卷,第4期,1987。  
 [2] Sidhu, P. S. et al, Composition mineralogy and genesis of Fe—Mn concretions from same soils of New India. Geoderma, 18, 1977.  
 [3] 熊毅等编著,土壤胶体,科学出版社,1983。  
 [4] 安徽省水利局勘测设计院、中国科学院南京土壤研究所,安徽淮北平原土壤,上海人民出版社,1976。  
 [5] 刘良梧,砂姜黑土形成的历史过程——以淮北平原为例。淮北地区水土资源开发与治理研究,科学出版社,1992。

~~~~~  
 (上接第 228 页)

参 考 文 献

[1] 张守敬和 M. L., Soil. Sci., 84 : 133—134, 1957。  
 [2] 顾益初、蒋柏藩,石灰性土壤无机磷分级测定方法,土壤,22(2) : 101—122, 1990。  
 [3] 蒋柏藩,石灰性土壤无机磷有效性的研究,土壤,24(2) : 61—64, 1992。  
 [4] 张淑茗等,施肥对石灰性土壤磷素形态的影响,土壤,24(2) : 68—70, 1992。  
 [5] 李昌伟、李合生等,瘠土中无机磷的形态、转化及其植物有效性,土壤,24(2) : 65—67, 1992。  
 [6] 刘景福等,土壤对磷的吸附特性与磷肥用量,土壤,24(2) : 90—92, 1992。  
 [7] 成瑞喜等,用 ASI 法测定中酸性土壤有效磷结果比较,华中农业大学学报,12(4) : 343—346, 1993。  
 [8] 顾益初、蒋柏藩,风化对土壤粒级磷素形态转化及有效性的影响,土壤学报,21(2) : 134—143, 1984。

~~~~~  
 (上接第 251 页)

参 考 文 献

[1] Wilding L. P. et al, Pedogenesis and soil taxonomy, I soil orders, Elsevier pub. Co., Amsterdam, 1983.  
 [2] Murthy A. S. P., Advances in Soil Sci., Vol. 8, 1988.  
 [3] Wilding L. P. and Puentes R., Vertisols, Texas A&M University Printing Center, P. 2—58, 1988.  
 [4] 中国科学院南京土壤所土壤系统分类课题组,中国土壤系统分类课题研究协作组著,中国土壤系统分类(首次方案),科学出版社,1991。  
 [5] Harvey Oakes and James Thorp, Soil Sci. Soc. Proc., 15 : 347—354, 1950.  
 [6] Dasong G. S. and Hadimani A. S., J. of the Indian Soc. of Soil Sci., 28 : 49—58, 1980.  
 [7] Mermut A. R. and Dasog G. S., Soil Sci. Soc. Am. J., 50 : 382—391, 1986.