

# 陕北不同土地利用类型下土壤无机磷形态分布及有效性研究

张倩<sup>1</sup>,张素霞<sup>2</sup>,刘克<sup>2</sup>,吕家珑<sup>2</sup>

(1.甘肃农业职业技术学院,甘肃兰州730020;2.西北农林科技大学资源环境学院,陕西杨凌712100)

**摘要:**采用蒋柏藩—顾益初无机磷分级方法,对黄土高原两种农田土壤剖面(0~100 cm)中无机磷形态分布特征进行了研究。结果表明:两种农田土壤剖面(0~100 cm)中无机磷形态占全磷的90.95%;无机磷又以Ca-P为主,所占比例在87.86%~92.55%之间;糜子地土壤剖面中无机磷总量、Ca<sub>2</sub>-P、Ca<sub>8</sub>-P、Al-P和Fe-P含量高于马铃薯地土壤,O-P和Ca<sub>10</sub>-P含量低于马铃薯地土壤;各无机磷形态含量顺序为Ca<sub>10</sub>-P>O-P>Ca<sub>8</sub>-P>Fe-P>Al-P>Ca<sub>2</sub>-P。相关分析和通径分析表明,黄土高原两种农田土壤中Ca<sub>2</sub>-P是速效磷的主体。

**关键词:**黄土高原;无机磷形态;糜子;马铃薯

**中图分类号:** S153.6<sup>+</sup>1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2011)04-0133-04

近20年来,土壤无机磷的研究进展显著<sup>[1,2]</sup>。继张守敬和杰克逊经典的无机磷分级研究后,20世纪80年代末南京土壤研究所蒋柏藩、顾益初提出了对石灰性土壤无机磷分级的体系,为土壤无机磷形态有效性研究提供了很好的方法与手段<sup>[3]</sup>。目前,针对土壤施用磷肥对土壤全磷及有效磷的影响,各土壤无机磷形态的变化,以及大量施用磷肥对土壤磷素、磷的有效性、无机磷形态分级都做了大量的研究<sup>[1,2,4]</sup>。

对于无机磷有效性的研究近年来相关文献也较多,国内学者多基于无机磷分级通过相关分析和通径分析来研究土壤中无机磷各组分的有效性<sup>[5]</sup>。对于酸性土壤而言,Fe-P和Al-P为土壤有效磷主要来源已成为定论<sup>[1]</sup>。对石灰性土壤无机磷素的有效性,国内研究较多。沈任芳和蒋柏藩的研究表明,对于石灰性土壤而言,Ca<sub>2</sub>-P是最有效的,是作物磷素营养的主要来源;Ca<sub>8</sub>-P、Al-P和Fe-P可以作为缓效磷源;Ca<sub>10</sub>-P和O-P只是一种潜在磷源<sup>[1]</sup>。本论文试图研究陕北黄土高原坡地两种土地利用类型下的土壤剖面磷素形态分布状况及其有效性问题,为土壤无机磷的合理利用提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 土壤样品采集

2005年11月,在陕西省米脂县选取2种当地典

型的作物地块(糜子、马铃薯)为研究区域,选点、分层采0~100 cm土样(多点混合);土壤为黄绵土(表1)。

### 1.2 分析测定

无机磷分级采用蒋柏藩—顾益初法<sup>[3]</sup>,体系的主要特点是:(1)将土壤无机磷部分的磷酸钙盐分成三级,即Ca<sub>2</sub>-P、Ca<sub>8</sub>-P和Ca<sub>10</sub>-P型;(2)用混合型提取剂提取磷酸铁盐。该体系分级适用于石灰性土壤、中性土壤及无机磷酸盐中磷酸钙占有较大比例的土壤或其他沉积物。其他项目均采用常规分析法<sup>[6]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 两种土壤剖面无机磷形态分布的比较

由表2可知,糜子地土壤剖面中无机磷总量、Ca<sub>2</sub>-P、Ca<sub>8</sub>-P、Al-P和Fe-P含量高于马铃薯地土壤,O-P和Ca<sub>10</sub>-P含量低于马铃薯地。糜子地土壤剖面无机磷形态中除了Ca<sub>2</sub>-P含量随着土壤层次的加深而降低外,其它形态的无机磷剖面分布规律不明显。马铃薯地无论无机磷总量还是各形态的无机磷都是表层(0~20 cm)含量大于其它层,且随着土壤层次(0~60 cm)的加深含量逐渐减少。这是因为农田进行耕作,土壤矿化程度较大且表层土壤有植物残体聚集。马铃薯地土壤剖面中除O-P外,其它无机磷形态60~100 cm含量均比40~60 cm有所回升,这可能与其本层次根系分泌物的性质有关。

收稿日期:2010-08-31

基金项目:“973”项目(2005CB121102);黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室基金(10501-138)

作者简介:张倩(1962—),女,山东威海人,副教授,研究方向为植物营养。E-mail: qian1962@163.com。

通讯作者:吕家珑(1962—),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为土壤化学。E-mail: jll@nwsuaf.edu.cn。

表 1 土壤剖面基本肥力

Table 1 Basic fertility characters of soil profiles

作物 Crops	土层 (cm) Depth	速效磷 AP (mg/kg)	全磷 TP (mg/kg)	有机质 OM (g/kg)	碱解氮 Hydrolysable N (mg/kg)
糜子 <i>Panicum miliaceum</i> L.	0~20	3.99	626.67	4.04	19.43
	20~40	2.83	606.14	2.65	12.67
	40~60	2.31	617.02	2.26	11.55
	60~100	2.49	619.98	2.18	10.85
	均值 Mean	2.90	617.45	2.78	13.62
马铃薯 <i>Solanum tuberosum</i> L.	0~20	4.51	639.30	3.73	29.75
	20~40	2.39	599.98	3.59	16.80
	40~60	2.27	586.46	3.15	14.00
	60~100	1.85	594.52	4.50	19.25
	均值 Mean	2.76	605.07	3.74	19.95
均值 Mean		2.83	611.26	3.26	16.79

表 2 土壤剖面无机磷形态、含量及比例

Table 2 Content and proportion of inorganic P forms in soil profiles

作物 Crops	土层深度 Depth (cm)	Ca <sub>2</sub> -P		Ca <sub>8</sub> -P		Al-P		Fe-P		O-P		Ca <sub>10</sub> -P		无机磷 iP	
		含量 Content (mg/kg)	比例 Proportion (%)												
糜子 <i>Panicum miliaceum</i> L.	0~20	4.69	0.81	21.57	3.72	11.21	1.93	14.49	2.50	36.63	6.32	490.91	84.71	579.50	92.47
	20~40	4.57	0.82	21.57	3.88	11.21	2.01	15.81	2.84	33.82	6.08	469.33	84.36	556.32	91.78
	40~60	3.33	0.60	20.80	3.74	10.51	1.89	16.55	2.98	14.36	2.58	490.58	88.21	556.12	90.13
	60~100	3.40	0.60	20.32	3.60	11.67	2.07	14.30	2.53	23.94	4.24	490.74	86.95	564.37	91.03
	均值 Mean	4.00	0.71	21.06	3.74	11.15	1.98	15.29	2.71	27.19	4.81	485.39	86.06	564.08	91.35
马铃薯 <i>Solanum tuberosum</i> L.	0~20	5.04	0.89	19.08	3.36	10.74	1.89	12.61	2.22	34.21	6.02	486.19	85.61	567.89	88.83
	20~40	2.93	0.53	17.23	3.13	8.88	1.61	16.18	2.94	28.04	5.10	476.36	86.67	549.62	91.61
	40~60	2.93	0.55	15.20	2.83	10.04	1.87	18.09	3.37	36.98	6.90	453.06	84.48	536.31	91.45
	60~100	3.17	0.59	15.23	2.84	10.52	1.96	13.16	2.45	21.19	3.95	473.60	88.22	536.86	90.30
	均值 Mean	3.52	0.64	16.69	3.04	10.04	1.83	15.01	2.75	30.11	5.49	472.30	86.25	547.67	90.55
均值 Mean		3.76	0.67	18.87	3.39	10.60	1.90	15.15	2.73	28.65	5.15	478.85	86.15	555.87	90.95

注: % 表示各无机磷形态占无机磷总量的百分含量; \*% 表示无机磷总量占全磷的百分含量。

Note: % means percentage content of each inorganic P in iP, while \*% means percentage content of iP in TP.

两种土样的无机磷形态、含量测定结果表明,陕北黄土高原土壤中无机磷含量以 Ca<sub>10</sub>-P 为主,约占 80% 以上,其次为 O-P, Ca<sub>2</sub>-P 含量最低。各无机磷形态含量基本顺序为 Ca<sub>10</sub>-P > O-P > Ca<sub>8</sub>-P > Fe-P > Al-P > Ca<sub>2</sub>-P。李孝良、于群英<sup>[5]</sup>等认为安徽土壤中的无机磷形态分布在土壤中有较大的差异,其中以 Ca<sub>10</sub>-P 为主,约占土壤无机磷总量的 36.6% ± 18.8%,其次为 O-P,约占土壤无机磷总量的 32.1% ± 9.6%,而以 Ca<sub>2</sub>-P 最低,仅占无机磷总量的 4.2% ± 2.2%。这与黄土高原情况类似。

江晶、张仁陟等<sup>[7]</sup>研究表明,黄绵土中的无机磷是植物所需营养元素主要来源,约占全磷的 78%,而这

两种土壤剖面无机磷占全磷的 90.95%,说明陕北黄土高原无机磷在全磷中的含量很高。这与黄绵土为矿质土壤有关。无机磷以 Ca-P 为主,比例在 87.86% ~ 92.55% 之间,其中 Ca<sub>10</sub>-P 又占 Ca-P 的绝大部分比例,为 95.50%。因为土壤中无机磷的存在形态受 pH 的影响很大,黄绵土为石灰性土壤,土壤中游离的碳酸钙与磷素结合形成不同形式的磷酸钙盐,由于黄绵土中钙与磷比例相对较大,更易形成 Ca<sub>10</sub>-P。O-P 次之,占无机磷总量的 5.15%,其次是 Ca<sub>8</sub>-P、Al-P 和 Fe-P, Ca<sub>2</sub>-P 的比例最小,为 0.67%。

表3 土壤剖面各无机磷形态与基本性状的相关关系

Table 3 The correlation coefficients of inorganic P forms and basic characters of soil profiles

	Ca <sub>2</sub> -P	Ca <sub>8</sub> -P	Al-P	Fe-P	O-P	Ca <sub>10</sub> -P	速效磷 AP	全磷 TP	有机质 OM	碱解氮 Hydrolysable N
Ca <sub>2</sub> -P	1	0.632**	0.545*	-0.518*	0.495	0.371	0.890**	0.754**	0.145	0.561*
Ca <sub>8</sub> -P		1	0.613*	-0.125	-0.001	0.661*	0.479	0.691**	-0.478	-0.162
Al-P			1	-0.419	0.041	0.411	0.315	0.504*	-0.294	-0.097
Fe-P				1	0.064	-0.546*	-0.471	-0.595*	-0.463	-0.662**
O-P					1	-0.400	0.573	0.053	0.301	0.373
Ca <sub>10</sub> -P						1	0.421	0.822**	-0.129	0.160
速效磷 AP							1	0.822**	0.235	0.716**
全磷 TP								1	-0.082	0.485
有机质 OM									1	0.699**
碱解氮 Hydrolysable N										1

注: \*\*表示在0.01水平下显著; \*表示在0.05水平下显著。

Note: \*\* means correlation is significant at 0.01 level (2-tailed); \* means correlation is significant at 0.05 level (2-tailed).

## 2.2 不同土地利用类型各无机磷形态有效性分析

讨论各形态磷与速效磷的相关性可说明其有效性。表3的相关分析表明,农田土壤剖面中除Ca<sub>2</sub>-P与速效磷呈极显著的正相关关系外,其它形态的相关性都不显著或呈负相关关系,说明各无机磷形态中Ca<sub>2</sub>-P的有效性最高,为最直接的转换磷源;各基本性状相互之间,除O-P外,各无机磷形态都与全磷呈显著或极显著的正相关关系。速效磷也与全磷呈极显著的正相关,相关系数达0.822;所有形态的无机磷与有机质的相关性都不显著,其中Ca<sub>2</sub>-P和O-P与之成正相关,Ca<sub>8</sub>-P、Al-P、Fe-P和Ca<sub>10</sub>-P与之呈负相关;Ca<sub>2</sub>-P、O-P和Ca<sub>10</sub>-P与碱解氮呈正相关关系,其中Ca<sub>2</sub>-P与其相关性为显著,Ca<sub>8</sub>-P、Al-P、Fe-P与碱解氮呈负相关关系,其中Fe-P与其相关性为极显著;速效磷和有机质均与碱解氮呈极显著的正相关关系,这与有机质作为土壤中氮和磷的重要来源有关。

Ca<sub>2</sub>-P与Ca<sub>8</sub>-P和Al-P分别呈极显著和显著的正相关,与O-P和Ca<sub>10</sub>-P呈正相关,但不显著,与Fe-P呈显著的负相关,说明Ca<sub>8</sub>-P和Al-P在一定条件下可以向Ca<sub>2</sub>-P转化,有效性高;而稳定性高的O-P和Ca<sub>10</sub>-P所需转化条件要求更高,故为有效性低或无效无机磷形态。

以上分析说明在土壤磷素的整个循环过程中,不同无机磷组分之间处于一个动态平衡,它们之间存在一定的相互影响和制约,土壤中速效磷含量高低取决于各形态之间的比例和转化方向。任何形态的土壤磷素发生变化,都或多或少引起速效磷含量的波动,而速效磷含量主要取决于土壤中有效性高的磷素形

态比例。

两因子间的简单相关系数是不再考虑其它因子影响的前提下求得的。在因子较多,因子间影响较大的情况下,简单相关系数已无法说明多因子间的复杂关系。多因子偏相关(偏回归)分析虽然考虑了其它因子间的相互影响,却无法说明因子间相互影响的大小和途径。为此,在土壤无机磷和有机磷分组的基础上,结合相关分析,本文尝试用土壤无机磷形态对速效磷的通径分析,系统地研究比较土壤无机磷各组分对速效磷影响大小及其相对有效性。通径分析可将某一因子对速效磷的影响分为直接效应(通径系数)和该因子通过其它因子对速效磷的间接效应(通径链系数)两部分,这两部分的代数和就代表了该因子对速效磷的总效应,并以相关系数的形式表示。这个相关系数的大小就代表该因子和其它因子对速效磷的综合贡献大小(表4)。

由表4可知,两种农田土壤剖面各无机磷形态对速效磷的通径系数依次为:O-P(1.380)>Ca<sub>10</sub>-P(1.380)>Ca<sub>2</sub>-P(-1.006)>Fe-P(0.763)>Al-P(0.606)>Ca<sub>8</sub>-P(0.208),O-P和Ca<sub>10</sub>-P的通径系数大于Ca<sub>2</sub>-P的通径系数,是因为它们在无机磷形态中的比例远远大于Ca<sub>2</sub>-P,Ca<sub>2</sub>-P对速效磷的总影响和间接影响都最大,其它各无机磷形态通过Ca<sub>2</sub>-P影响速效磷,通径链系数较大,比较稳定。

可见,农田土壤剖面无机磷形态中,Ca<sub>2</sub>-P是速效磷的主要磷源。

为进一步分析无机磷形态对速效磷的贡献的显著性,证明相关分析和通径分析的结果,对无机磷各形态与速效磷进行逐步回归分析,方程如下:

$$Y = -32.801 + 1.192 X_1 - 0.273 X_2 + 0.252 X_3 + 0.0417 X_4 + 0.0653 X_5$$

式中,  $Y$  代表速效磷,  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 、 $X_4$  和  $X_5$  分别代表  $Ca_2-P$ 、 $Ca_8-P$ 、 $Fe-P$ 、 $O-P$  和  $Ca_{10}-P$ 。

由相关分析、通径分析和逐步回归分析可知,  $Ca_2-P$  是速效磷的主要磷源, 它与速效磷的相关系数和通径系数是其它各种形态无机磷与速效磷相关系数和通径系数中最高的, 分别是  $0.890^{**}$  和  $1.896$ 。

表 4 土壤剖面各无机磷形态对速效磷的通径分析

Table 4 Path analysis between available P and inorganic P forms in soil profiles

	间接影响 Indirect influence						总影响 Total influence	直接影响 Direct influence
	$Ca_2-P$	$Ca_8-P$	$Al-P$	$Fe-P$	$O-P$	$Ca_{10}-P$		
$Ca_2-P$	-0.64	0.13	0.33	0.40	0.68	0.36	1.90	0.89
$Ca_8-P$	-0.55		0.37	-0.10	0.00	0.63	0.27	0.48
$Al-P$	-0.52	0.13		-0.32	0.06	0.39	-0.29	0.32
$Fe-P$	-0.50	-0.03	-0.25		0.09	-0.52	-1.23	-0.47
$O-P$	-0.37	0.00	0.03	0.05		-0.38	-0.81	0.57
$Ca_{10}-P$	-0.64	0.14	0.25	-0.42	-0.55		-0.96	0.42

### 3 小结

两种农田土壤全磷含量较高, 在  $586.46 \sim 639.30 \text{ mg/kg}$ , 耕层显著高于其它层; 土壤速效磷含量为低水平, 在  $1.85 \sim 3.99 \text{ mg/kg}$ ; 禾本科类植被下土壤速效磷和全磷含量小于非禾本科类, 有根瘤菌植物覆盖下土壤有机质和碱解氮大于无根瘤菌植物; 马铃薯地土壤速效磷、有机质和碱解氮含量均是  $0 \sim 60 \text{ cm}$  随土层增加而降低,  $60 \sim 100 \text{ cm}$  有所回升。

两种农田土壤剖面中无机磷占全磷的比例最大, 为  $90.95\%$ ; 无机磷以  $Ca-P$  为主, 比例在  $87.86\% \sim 92.55\%$  之间, 各无机磷形态含量顺序为  $Ca_{10}-P > O-P > Ca_8-P > Fe-P > Al-P > Ca_2-P$ ;  $Ca_2-P$  是速效磷的主要磷源。

### 参考文献:

- [1] 沈任芳, 蒋柏藩. 石灰性土壤无机磷的形态分布及其有效性[J]. 土壤学报, 1992, 29(1): 80-84.
- [2] 吕家珑, 张一平, 陶国树, 等. 23 年肥料定位试验  $0 \sim 100 \text{ cm}$  土壤剖面中各形态磷之间的关系研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(3): 48-50.
- [3] 顾益初, 蒋柏藩. 石灰性土壤无机磷分级方法研究[J]. 土壤, 1990, 22(2): 101-102.
- [4] 李孝良, 于群英, 陈世勇, 等. 土壤无机磷形态生物有效性研究[J]. 安徽农业技术师范学院学报, 2001, 15(2): 17-19.
- [5] 张为政. 土壤磷组分对有效磷影响的通径分析及其相对重要性[J]. 吉林农业科学, 1988, (3): 51-55.
- [6] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [7] 江晶, 张仁陟, 海龙. 耕作方式对黄绵土无机磷形态的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(2): 387-391.

## Inorganic phosphorus fractionation and availability on different kinds of planting conditions of soil in Northern Shaanxi

ZHANG Qian<sup>1</sup>, ZHANG Su-xia<sup>2</sup>, LIU Ke<sup>2</sup>, LV Jia-long<sup>2</sup>

(1. Gansu Vocational College of Agricultural Technology, Lanzhou, Gansu 730020, China;

2. College of Resources & Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shanxi 712100, China)

**Abstract:** By using the Jiang-Gu inorganic phosphorus fractionation method, a study was conducted on the forms and compositions of inorganic phosphorus in  $0 \sim 100 \text{ cm}$  layers of calcareous soil profile on sloping land of two kinds of farmland soil on the Loess Plateau. The results showed that inorganic P was  $90.95\%$  of total P.  $Ca-P$  was in a dominant position in inorganic P, its proportion was  $87.86\% \sim 92.55\%$ . The contents of inorganic P,  $Ca_2-P$ ,  $Ca_8-P$ ,  $Al-P$  and  $Fe-P$  in soils of *Panicum miliaceum* L were higher than that in soils of *Solanum tuberosum* L. The contents of  $O-P$  and  $Ca_{10}-P$  were opposite results. The order of contents of inorganic P were  $Ca_{10}-P > O-P > Ca_8-P > Fe-P > Al-P > Ca_2-P$ . It was showed by correlation analysis and path analysis that  $Ca_2-P$  was the main resource of rapid available phosphorus in the soils.

**Keywords:** Loess Plateau; inorganic phosphorus fractionation; *Panicum miliaceum* L.; *Solanum tuberosum* L.