

# 土壤磷组分的通径分析及其相对有效性

张 为 政

(东北师范大学草地研究所, 130024)

## 摘 要

本文在土壤无机磷和有机磷分组的基础上,通过土壤磷组分与植株吸磷量的相关分析及土壤有效磷含量的通径分析,研究比较了土壤各组磷的相对有效性。结果表明,除了土壤无机磷组分中的铝磷和铁磷的相对有效性较高外,某些活性较高的土壤有机磷组分与植株吸磷量也呈显著相关,对土壤有效磷含量的变化有着不可忽视的影响。在一定条件下,可能成为植物的有效磷源之一,从而为正确评价土壤有机磷在整个磷营养循环中的地位 and 作用提供新的方法和途径。

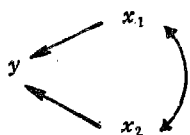
自1957年张守敬和Jackson提出土壤无机磷分组以来,人们一直用无机磷组分与植物吸磷量和土壤有效磷的相关分析来研究比较各组无机磷的相对有效性的高低。一般认为,土壤有效磷(或植物吸磷量)与某组无机磷的相关愈显著,该组无机磷对有效磷的水平影响就愈大,其相对有效性也就愈高。并据此推断土壤有效磷测定中浸出的主要无机磷组分<sup>[2]</sup>,如在酸性土壤上有效磷的主要形态为铝磷和铁磷;而在石灰性土壤上,根据各组无机磷和土壤有效磷(或植物吸磷量)的相关分析结果,则有人认为有效磷的主要形态为钙磷。

土壤有机磷的研究因为浸提和分离过程中容易引起有机磷化合物的降解,沉淀或络合而发生结构上或性质上的改变。直到1978年Bowman和Cole等人才提出了土壤有机磷分组方法<sup>[3,4]</sup>将其划分为活性有机磷(Labile Organic P)、中等活性有机磷(Moderate Labile Organic P)、中稳态有机磷(Moderate Resistant Organic P)和高稳态有机磷(High Resistant Organic P),为研究土壤有机磷的形态分布及其相对有效性提供了新的方法<sup>[5]</sup>。

土壤有机磷和无机磷组分的单相关系数是在不考虑有机磷组分影响的前提下求得的。在土壤有机磷含量较高、矿化速率较快的情况下,这样做显然是片面的。为了能够较全面地研究土壤磷的形态分布及其相对有效性,我们进行了土壤无机磷和有机磷分组。但由于磷组分增加,因子间影响较大;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(或偏回归)分析虽考虑了多因子的相互影响,却无法了解因子间影响的相对大小和具体途径。为此,本文在土壤有效磷和植株吸磷量呈显著相关的前提条件下,尝试用土壤磷组分对有效磷的通径分析,系统地研究比较了土壤无机磷和有机磷各组分对有效磷的影响大小及其相对有效性。为全面了解和正确评价土壤各组磷在整个磷素循环系统中的地位和作用提供了新的方法和途径。

## 一、通径分析的基本原理

通径系数和通径链系数是通径分析中两个重要的统计学概念。利用这两个概念可以对变量间的相关做进一步的分析。将一对变量的相关系数按其成因分解成为若干组成部分,以便更清楚地了解各变量对这一对变量相关发生的影响程度<sup>[1]</sup>。



→为通径线    ↷为相关线

图1 变量间的通径关系

Fig. 1 Path relationship among variables

设有3个相关的变量  $y, x_1, x_2$ , 其中  $y$  是结果变量,  $x_1, x_2$  是  $y$  的原因变量, 而  $x_1$  和  $x_2$  是平行关系。据此,可以给出这三个变量间的通径图(图1)。

通径图是通径分析的基础。由通径分析的数学原理可知,通径系数是标准化之后的变量  $y$  对  $x_1, x_2$  的偏回归系数。是反映  $x_1, x_2$  对  $y$  影响大小的一个重要度量。一般说来,当  $y$  有  $n$  个原因变量  $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$  时,原因变量  $x_i$  到  $y$  的通径系数  $p_{yi}$  的表达式为:

$$p_{yi} = b_i \frac{s_i}{s_y} \quad (1)$$

式(1)中  $b_i$  为  $y$  对  $x_i$  的偏回归系数;  $s_i, s_y$  分别为  $x_i, y$  的标准差。当  $i = j$  时,  $p_{y,i} = p_{y,ij}$ 。  $p_{y,ij}$  与相关系数  $r_{ij}$  有如下分解关系式:

$$r_{ij} = \sum_{i=1}^n p_{y,ij} \cdot r_{ji} \quad (2)$$

式(2)中  $r_{ij}$  为原因变量  $x_i$  与结果变量  $y$  的单相关系数。  $r_{ji}$  为原因变量  $x_i$  与  $x_j$  的单相关系数。当  $i = j$  时,  $r_{ij} = 1$ ;  $p_{y,ij} = p_{y,ij}$ , 这时即可用  $p_{y,i}$  直接比较各原因变量  $x_i$  对  $y$  影响的相对大小。而通径链上所有系数(包括通径系数和相关系数)的连乘积则称为这条通径链上的通径链系数。由通径链系数可清楚地了解到变量间相关发生的影响程度和途径。为此,若设土壤有效磷含量为结果变量,土壤无机磷和有机磷各组分作为原因变量,则可以根据式(1)和式(2)求出土壤磷组分对土壤有效磷的通径系数和通径链系数。比较通径系数即可了解土壤磷组分对有效磷的影响程度的相对大小,进而讨论它们的相对有效性。

## 二、材料与方 法

供试土壤采自吉林省农科院黑土定位试验区。质地为重壤土。土壤的基础肥力状况为表1。

定位试验采用裂区设计。主区处理为:不施有机肥( $M_0$ )、施有机肥2吨/亩( $M_1$ )。副区处理为:CK(不施化肥)、N( $N_1 50 \text{ kg/ha}$ )、P( $P_1 O_3 75 \text{ kg/ha}$ )、K( $K_1 O 75 \text{ kg/ha}$ )、NP、NK、PK、NPK 8个小区。肥料品种为硝酸、过磷酸钙、硫酸钾。轮作方式为玉米连作。时间为1980—1986年。

分析项目包括:土壤有机质(丘林法)、全氮和全磷( $H_2SO_4-HClO_4$  联测法)、全钾(火焰光度法)、水解氮(碱解扩散法)、有效磷(Olson法)、有效钾(醋酸铵法)、土壤无机磷分组(张守敬-Jackson法)、有

表 1 供试土壤的养分状况 (1980)

Table 1 The status of nutrients in the soil used (1986)

土壤类型 Soil type	地块 Plot	有机质 (%) Organic matter	全氮 (%) Total N	全磷 (%) Total P	全钾 (%) Total K	水解氮 (mg/100g) Hydrolyzable N	有效磷 (ppm) Available P	有效钾 (ppm) Available K	pH (H <sub>2</sub> O:soil = 1:1)
黑	M <sub>0</sub>	2.94	0.124	0.058	1.99	12.8	12.2	16.4	7.8
土	M <sub>1</sub>	2.81	0.117	0.061	1.99	12.7	10.6	15.2	8.0

注: M<sub>0</sub> 为不施有机肥区。M<sub>1</sub> 为施有机肥 2 吨/亩。

机磷分组 (Bowman-Cole 法)、pH (电极法)。

相关分析和通径分析见参考文献 [1]。

### 三、结果与讨论

#### (一) 土壤磷组分的形态分布及其相关分析

为了全面地研究土壤磷的分布状况,系统地了解土壤磷组分间的形态转化及其相关关系,我们分别采集了 1984 年和 1986 年试验区土样进行土壤无机磷和有机磷分组及有效磷和全磷的测定,结果列于表 2。

由表 2 可见,1984 年土壤各组磷的平均含量以 Ca-P 最高,为 21.6mgP/100g 土,占全 P 的 37.3%, H<sub>2</sub>O-P 最低,为 0.18mgP/100g 土,仅占全 P 的 0.3%。土壤各组磷平均含量的顺序是: Ca-P > MRO-P > MLO-P > O-P > Al-P > Fe-P > HRO-P > LO-P > H<sub>2</sub>O-P。

比较表 2 中 1984、1986 年各组磷的平均含量可知,虽然 1986 年土壤各组磷含量均有所提高(除中稳态有机磷和闭蓄态磷外),但由于土壤全磷增量在各组磷中的分布状况主要受土壤性质所制约,和土壤磷的原始形态分布大体一致。1986 年和 1984 年土壤各组磷的分布状况基本相同,其平均含量顺序是: Ca-P > MLO-P > MRO-P > O-P > Al-P > Fe-P > HRO-P > LO-P = H<sub>2</sub>O-P。

通常磷组分相对有效性的的大小不仅受其含量高低的影响,而且主要还受本身性质(如化合物的稳定常数、结构复杂程度等)的制约。为了探讨土壤磷组分和植株吸磷量及有效磷含量之间的关系,进而了解其相对有效性,我们进行了 1984 年土壤组分与植株吸磷量及有效磷含量间的相关分析(表 3)。

由表 3 可知,植株吸磷量与有效磷含量呈极显著正相关 ( $r = 0.873^{**}$ , 与 H<sub>2</sub>O-P ( $r = 0.671^{**}$ ), Al-P ( $r = 0.827^{**}$ ), Fe-P ( $r = 0.678^{**}$ ))。土壤有效磷和 H<sub>2</sub>O-P ( $r = 0.669^{**}$ ), Al-P ( $r = 0.782^{**}$ ), Fe-P ( $r = 0.724^{**}$ ) 的相关趋势与前者完全一致。而与活性有机磷 ( $r = -0.493^{**}$ ) 则呈显著负相关。这可能是因为活性有机磷的矿化分解导致了有效磷的增加。另外, Al-P 与 H<sub>2</sub>O-P ( $r = 0.848^{**}$ ), Fe-P ( $r = 0.756^{**}$ ), 中等活性有机磷 ( $r = 0.603^{**}$ ) 均呈极显著相关。它们之间相互影响的机理还有待进一步探讨。

表2 供试土壤各组磷含量及其分布 (1984年,1986年)

Table 2 The contents (Pmg/100g soil) and distribution of phosphorus fraction in soil used (1984,1986)

土壤编号 Sample No.	H <sub>2</sub> O-P	Al-P	Fe-P	Ca-P	O-P	LO-P	MLO-P*	MRO-P	HRO-P	Total P	Available P
1984 年											
1	0.19	3.32	1.44	21.60	8.61	0.20	6.68	6.14	1.33	57.2	1.06
2	0.11	2.24	1.78	22.57	6.35	0.15	6.19	7.03	1.50	53.3	0.79
3	0.21	3.67	1.89	23.54	5.76	0.14	7.79	7.64	3.30	60.3	1.65
4	0.08	2.10	1.50	21.67	5.56	0.27	6.00	7.22	0.92	56.6	0.84
5	0.14	2.78	1.72	21.94	6.08	0.17	4.69	7.62	0.82	61.0	1.21
6	0.15	1.71	1.11	21.60	5.22	0.31	6.40	5.68	1.20	53.8	0.73
7	0.25	3.35	1.67	23.06	5.76	0.41	5.70	7.37	1.93	59.7	1.27
8	0.13	2.24	1.67	20.83	6.37	0.29	6.13	6.70	3.40	55.5	0.87
9	0.14	2.87	2.28	20.14	6.11	0.26	5.31	8.36	1.57	57.2	1.10
10	0.22	4.32	2.83	20.69	7.19	0.19	5.33	9.04	1.05	57.5	1.98
11	0.40	6.19	3.78	22.43	7.74	0.09	8.86	9.48	1.78	62.8	3.19
12	0.14	3.58	2.33	21.39	5.78	0.23	7.21	7.46	1.70	60.1	1.32
13	0.14	3.86	2.44	20.42	10.54	0.29	10.00	7.05	1.33	60.9	1.47
14	0.13	2.87	1.56	21.81	4.65	0.26	8.69	5.63	1.97	60.6	1.54
15	0.17	3.81	2.67	20.63	6.92	0.19	9.79	8.37	0	50.9	1.10
16	0.21	4.77	3.56	21.25	4.40	0.15	9.54	4.86	2.20	58.3	2.10
$\bar{x}$	0.18	3.36	2.14	21.60	6.44	0.23	7.14	7.23	1.73	57.8	1.39
$\bar{x}\%$	0.3	5.8	3.7	37.3	11.1	0.4	02.3	12.5	3.0	—	2.4
1986 年											
1	0.13	3.21	0.99	23.33	8.61	0.23	7.36	6.38	2.05	49.9	1.07
2	0.10	3.06	2.22	22.75	6.35	0.56	5.02	6.69	2.42	47.5	0.75
3	0.29	5.31	1.75	23.05	5.76	0.48	6.56	6.68	2.45	58.0	2.41
4	0.09	2.92	0.70	23.48	5.57	0.32	7.40	6.21	1.66	50.1	0.91
5	0.15	4.08	1.69	23.92	6.07	0.24	7.68	6.64	2.18	54.7	1.40
6	0.10	2.95	0.64	22.75	5.23	0.17	6.75	5.45	2.12	48.2	0.86
7	0.47	6.18	1.23	25.60	5.75	0.58	6.24	5.97	1.75	64.3	3.28
8	0.57	5.25	2.92	24.79	6.35	0.54	7.60	7.46	1.29	56.4	2.16
9	0.15	5.35	2.33	23.12	6.13	0.23	8.84	7.47	2.21	61.3	1.83
10	0.23	5.80	2.39	21.03	7.17	0.35	10.70	7.72	1.49	60.7	2.51
11	0.56	12.69	5.73	28.51	7.73	0.93	11.60	8.32	2.45	78.5	14.00
12	0.13	5.07	2.39	21.33	5.79	0.02	7.60	6.39	2.59	62.0	1.87
13	0.61	11.00	5.01	25.21	10.53	0.09	7.82	7.31	3.05	68.2	5.02
14	0.16	5.45	1.73	26.25	4.66	0.40	8.98	7.06	1.82	63.5	2.20
15	1.08	11.84	5.49	24.76	5.95	0.25	8.12	7.71	2.42	69.7	6.15
16	0.73	11.20	4.24	25.95	4.46	0.22	9.42	8.66	1.63	76.3	4.76
$\bar{x}$	0.35	6.33	2.59	24.10	6.38	0.35	7.98	7.01	2.10	60.6	3.20
$\bar{x}\%$	0.6	10.4	4.3	39.8	10.5	0.6	13.2	11.6	3.5	—	5.3

注:  $\bar{x}$  为土壤各组磷、全磷、有效磷的平均含量;  $\bar{x}\%$  为土壤各组磷占全磷百分数。

1) O-P: Occluded P; LO-P: Labile Organic P; MLO-P: Moderate Labile Organic P; MRO\*-P: Moderate Resistant Organic P; HRO-P: High Resistant Organic P.

表 3 土壤磷组分与植株吸磷量及有效磷含量间的单相关系数(1984年)

Table 3 Correlation coefficients between phosphorus fractions on the one hand and P uptake and available P of soil on the other (1984)

组别 Phosphorus fractions	H <sub>2</sub> O-P	Al-P	Fe-P	Ca-P	O-P	LO-P	MLO-P	MRO-P	HRO-P	有效磷 Available P	植物吸磷量 P uptake
H <sub>2</sub> O-P	1	0.848**	0.434	0.219	0.233	-0.243	0.420	0.032	0.033	0.669**	0.671**
Al-P		1	0.765**	-0.069	0.362	-0.324	0.603**	0.108	-0.084	0.782**	0.827**
Fe-P			1	-0.345	0.235	-0.276	0.377	0.003	-0.110	0.724**	0.678**
Ca-P				1	-0.397	-0.337	-0.013	0.230	0.446	0.179	0.112
O-P					1	0.081	0.231	-0.183	-0.317	0.086	0.118
LO-P						1	-0.193	-0.183	-0.118	-0.493*	-0.373
MLO-P							1	-0.389	-0.064	0.324	0.434
MRO-P								1	-0.104	0.366	0.229
HRO-P									1	0.194	0.389
Available P										1	0.873**
Puptable											1

注: n = 16,  $r_{0.05} = 0.468$ ,  $r_{0.01} = 0.590$ .

表 4 土壤有效磷和各组磷间的单相关系数(1986)

Table 4 Correlation coefficients between available P and phosphorus fractions of soil (1986)

组别 Phosphorus fractions	H <sub>2</sub> O-P	Al-P	Fe-P	Ca-P	O-P	LO-P	MLO-P	MRO-P	HRO-P	Available P
H <sub>2</sub> O-P	1	0.856**	0.810*	0.546*	-0.033	0.131	0.271	0.615*	0.076	0.610*
Al-P		1	0.936**	0.656**	-0.199	0.180	0.574*	0.762**	0.293	0.851**
Fe-P			1	0.536*	-0.256	0.178	0.524*	0.802**	0.378	0.807**
Ca-P				1	0.045	0.542*	0.369	0.457	0.008	0.730**
O-P					1	0.232	-0.345	-0.293	-0.091	-0.090
LO-P						1	0.193	0.241	-0.202	0.577*
MLO-P							1	0.735**	-0.159	0.646**
MRO-P								1	-0.067	0.632**
HRO-P									1	0.274
Available P										1

注: n = 14,  $r_{0.05} = 0.497$ ,  $r_{0.01} = 0.623$ .

1986年土壤有效磷和各组磷间的相关分析(表4)表明,除了闭蓄态磷和高稳态有机磷外,其它各组磷均与有效磷呈显著或极显著相关。土壤各组磷间的相关程度也大大增加。这可能由于试验中施肥因素的影响,随着试验时间的延长,土壤各组磷始终处于一个动态平衡过程。也必然存在着一定程度的相互影响和制约。它们之间的转化方向和再分布也必然会影响到土壤有效磷水平的高低。这从另一侧面表明,在某些人为干扰特别是施肥量较大的地区,土壤养分的输入输出较频繁,土壤中不同组分的养分也在不断地相互转化和再分布。因此,土壤无机磷分组作为土壤有效磷测定方法的依据值得进一步商榷。

特别值得注意的是,土壤无机磷组分中的 Al-P、Fe-P 和有机磷组分中的中等活性有机磷、中稳态有机磷分别呈显著相关和极显著相关。而 Ca-P 则与活性有机磷相关显著。这可能由于在土壤有机磷分组过程中,活性有机磷组浸提的主要是有机酸钙盐类(如植酸钙等)。而中等活性有机磷和中稳态有机磷组浸提的主要是与 Fe<sup>3+</sup>、Al<sup>3+</sup> 结合的有机酸盐类(如植酸铁、植酸铝等)。这与国外某些学者的研究结果相近<sup>[4,5]</sup>。

(二) 土壤磷组分对有效磷的通径分析及其相对有效性

以上的相关分析表明,在土壤整个磷素循环系统中,没有任何一组磷与其他磷组分绝对无关。任何形态土壤磷的变化都会或多或少地引起有效磷含量的波动。但相关分析无法了解土壤各组磷是直接还是间接地影响着有效磷水平的变化,更不能比较其相对有效性的高低,因此,只能试图用通径分析来比较各组磷的相对有效性。

由表3可以看出,土壤有效磷和植株吸磷量呈极显著相关。二者与土壤各组磷的相关趋势亦完全一致。这里只作了土壤磷组分对有效磷的通径分析(图2)。

由于闭蓄态磷和高稳态有机磷与有效磷的相关不显著,所以在通径图中省略未画。但为了方便起见,仍将其通径系数和通径链系数全部求出,结果分别列于表5。

从表5可见,1984年的供试土壤各组磷对有效磷的通径系数依次为: Al-P( $P_{y,2} = 0.417$ ) > Fe-P( $P_{y,3} = 0.384$ ) > 中稳态有机磷( $P_{y,8} = 0.182$ ) > 高稳态有机磷( $P_{y,9} = 0.175$ ) > Ca-P( $P_{y,4} = 0.169$ ) > 活性有机磷( $P_{y,6} = -0.108$ ) > H<sub>2</sub>O-P( $P_{y,7} = 0.078$ ) > O-P( $P_{y,5} = -0.069$ ) > 中等活性有机磷( $P_{y,7} = -0.007$ )。与此类似,1986年供试土壤各组磷对有效磷的通径系数(表5)依次为: Al-P( $P_{y,2} = 0.544$ ) > 中稳态有机磷( $P_{y,8} = -0.434$ ) > Fe-P( $P_{y,3} = 0.443$ ) > 中等活性有机磷( $P_{y,7} = 0.408$ ) > 活性有机磷( $P_{y,6} = 0.381$ ) > H<sub>2</sub>O-P( $P_{y,1} = -0.128$ ) > 高稳态有机磷( $P_{y,9} = 0.073$ ) > O-P( $P_{y,5} = 0.055$ ) > Ca-P( $P_{y,4} = 0.054$ )。以上的通径分析结果均表明,在供试的温带黑土上,土壤无机磷组分中仍以 Al-P 和 Fe-P 的相对

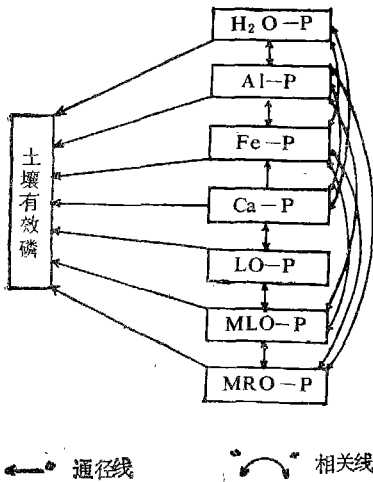


图2 土壤有效磷和磷组分间的通径关系  
Fig. 2 The path relationship between available P and phosphorus fractions of soil

表 5 土壤各组磷对有效磷的通径系数和通径链系数 (1984, 1986 年)

Table 5 The path coefficients of phosphorus fractions to available P of soil (1984, 1986)

$x_i - x_j$	$x_j - y$									$y$ $r_{iy}$
	H <sub>2</sub> O-P	Al-P	Fe-P	Ca-P	O-P	LO-P	MLO-P	MRO-P	HRO-P	
1984 年										
H <sub>2</sub> O-P	0.078 <sup>Δ</sup>	0.353	0.181	0.037	-0.015	0.026	-0.002	0.005	0.005	0.669**
Al-P	0.065	0.417	0.300	-0.011	-0.024	0.035	-0.004	0.019	-0.014	0.782**
Fe-P	0.036	0.325	0.384 <sup>Δ</sup>	-0.052	-0.016	0.032	-0.002	0.069	-0.017	0.724**
Ca-P	0.017	-0.028	-0.118	0.169 <sup>Δ</sup>	0.026	0.036	0	0	0.075	0.179
O-P	0.017	0.150	0.089	-0.065	-0.069 <sup>Δ</sup>	-0.010	-0.001	0.039	-0.055	0.089
LO-P	-0.018	-0.134	-0.114	-0.057	-0.006	-0.108 <sup>Δ</sup>	0.001	-0.033	-0.020	-0.493*
MLO-P	0.032	0.251	0.144	-0.019	-0.017	0.020	-0.007 <sup>Δ</sup>	-0.070	-0.011	0.324
MRO-P	0.002	0.044	0.147	0	-0.014	0.019	0.002	0.182 <sup>Δ</sup>	-0.018	0.366
HRO-P	0.002	-0.034	-0.037	0.073	0.021	0.012	0	-0.018	0.175 <sup>Δ</sup>	0.194
1986 年										
H <sub>2</sub> O-P	-0.128 <sup>Δ</sup>	0.465	0.358	0.029	-0.001	0.049	0.110	-0.279	0.005	0.610**
Al-P	-0.109	0.554 <sup>Δ</sup>	0.414	0.035	-0.011	0.068	0.234	-0.346	0.021	0.851**
Fe-P	-0.103	0.509	0.443 <sup>Δ</sup>	0.028	-0.014	0.067	0.213	-0.364	0.027	0.807**
Ca-P	-0.070	0.356	0.237	0.054 <sup>Δ</sup>	0.002	0.206	0.150	-0.207	0.001	0.730**
O-P	0.004	-0.108	-0.117	0.002	0.055 <sup>Δ</sup>	0.088	-0.140	0.133	-0.006	-0.090
LO-P	-0.016	0.097	0.079	0.029	0.012	0.381 <sup>Δ</sup>	0.078	-0.109	-0.014	0.537**
MLO-P	-0.034	0.311	0.232	0.232	-0.019	0.073	0.408 <sup>Δ</sup>	-0.333	-0.011	0.646**
MRO-P	-0.078	0.414	0.355	0.355	0.016	0.091	0.300	-0.454 <sup>Δ</sup>	-0.004	0.632**
HRO-P	-0.009	0.159	0.167	0.167	-0.005	-0.076	-0.065	0.030	0.073 <sup>Δ</sup>	0.274

注: 上角“<sup>Δ</sup>”示为径系数,其余的为通径链系数。

有效性较高。这与前人的研究结果相同<sup>[4-7]</sup>。不同的是尽管 H<sub>2</sub>O-P 和 Ca-P 与有效磷相关显著,但它们对土壤有效磷的直接影响却很小。它们通过 Al-P 和 Fe-P 都有一个较大的通径链系数,分别是  $P_{y,12} = 0.465$ 、 $P_{y,13} = 0.358$  和  $P_{y,42}$ 、 $P_{y,43} = 0.237$ 。并且 H<sub>2</sub>O-P、Ca-P 与 Al-P、Fe-P 的单相关系数也较大(表 3、4)。根据相关系数与通径系数的关系式可知:

$$r_{1y} = P_{y,1} + P_{y,12} \cdot r_{21} + P_{y,13} \cdot r_{31} + \dots + P_{y,19} \cdot r_{91}$$

$$r_{4y} = P_{y,4} + P_{y,42} \cdot r_{24} + P_{y,43} \cdot r_{34} + \dots + P_{y,49} \cdot r_{94}$$

所以当  $P_{y,12} \cdot r_{21}$ 、 $P_{y,13} \cdot r_{31}$  和  $P_{y,42} \cdot r_{24}$ 、 $P_{y,43} \cdot r_{34}$  较大时,  $r_{1y}$  和  $r_{4y}$  也就被放大。实际上 H<sub>2</sub>O-P 和 Ca-P 与有效磷的正相关中包括它们与 Al-P、Fe-P 的正相关。因此 Ca-P 的相对有效性要远远小于 Al-P 和 Fe-P。虽然 H<sub>2</sub>O-P 的有效性较高,但因其数量有限,对有效磷的相对影响也就很小。

需要指出的是,土壤有机磷组分对有效磷的通径分析表明,除了高稳态有机磷对有效磷的影响很小外,其它各组有机磷对有效磷的相对影响均较大。其中活性有机磷、中等活性有机磷的相对有效性仅次于 Fe-P。而中稳态有机磷虽然与有效磷有一个较大的正相

关系数 ( $r = 0.632^{**}$ ), 但其通径系数却为负值 ( $P_{y_{11}} = -0.454$ )。这说明它对有效磷的直接影响为负向, 而它与有效磷的正相关是因为通过 Al-P、Fe-P 有一个较大的通径链系数所致。

综上所述, 除了土壤无机磷组分中的 Al-P 和 Fe-P 的相对有效性较高外, 某些活性较高的土壤有机磷组分(如中等活性有机磷)的相对有效性亦较高。那种认为在温带温度较低, 有机质矿化速率较慢的情况下, 土壤有机磷在植物磷素营养中的作用远远小于无机磷的传统看法是值得认真商榷的。

本研究表明, 在温带土壤理化性状良好, 有机磷特别是活性较高的有机磷含量较高, 矿化速率较快的条件下, 土壤有机磷对有效磷有着不可忽视的影响。某些活性较高的有机磷组分可能成为植物的土壤有效磷源之一。

#### 四、小 结

1. 在供试温带黑土上, 土壤无机磷组分中仍以 Al-P 和 Fe-P 的相对有效性较高。它们对有效磷的影响程度要远远大于其他无机磷组分。

2. 在整个土壤磷素循环系统中, 没有任何磷组分与其他组分磷绝对不相关。土壤磷组分间始终处于一个动态平衡过程, 存在着一定程度的相互影响和制约。任何形态土壤磷组分的变化都会或多或少地引起有效磷水平的波动。

3. 土壤有机磷组分中, 除了高稳态有机磷外, 活性有机磷和中等活性有机磷的相对有效性仅次于 Fe-P。而中稳态有机磷则通过对 Al-P 和 Fe-P 的影响而间接制约着有效磷水平的高低。

4. 土壤磷组分的相关分析和通径分析表明, O-P 和高稳态有机磷的相关系数和通径系数均较小。其他磷组分的相对有效性依次为: Al-P > Fe-P > 中等活性有机磷 > 活性有机磷 > H<sub>2</sub>O-P > Ca-P。它们对有效磷含量影响的相对大小依次为: Al-P > 中稳态有机磷 > Fe-P > 中等活性有机磷 > 活性有机磷 > H<sub>2</sub>O-P > Ca-P。

#### 参 考 文 献

- [1] 刘来福等, 1984: 作物数量遗传。农业出版社。
- [2] 付绍清、宋金玉, 1982: 土壤有效磷的测定方法及其与磷素形态关系的研究。土壤学报, 第 19 卷 3 期, 305—310 页。
- [3] 邱凤琼等, 1983: 三种黑土中有机碳、氮、磷的形态分布与肥力的关系。土壤学报, 第 20 卷 1 期, 23—29 页。
- [4] Bowman, R. A. and Cole, C. V., 1978: An exploration method of for fractionation of organic phosphorus from grassland soils. Soil Sci., vol. 125 No. 2 95—102.
- [5] Sharpley, A. N., 1985: Phosphorus cycling in unfertilized and fertilized agricultural soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 49:905—911.
- [6] Martin, J. K., 1970: Organic phosphate compounds in water extracts of soils. Soil Sci., Vol. 109. No. 6. 362—375.
- [7] Sharpley, A. N. and Smith, S. J., 1985: Fractionation of inorganic and organic phosphorus in virgin and cultivated soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 49:127—130.



## PATH ANALYSIS AND RELATIVE AVAILABILITY OF INORGANIC AND ORGANIC PHOSPHORUS FRACTIONS IN SOILS

Zhang Weizheng

(*Institute of Grassland Sci., Northeast Normal University, Changchun, 130024*)

### Summary

In this paper various compounds of phosphorus(P) in soils were fractionized into  $H_2O-P$ ,  $Al-P$ ,  $Fe-P$ ,  $Ca-P$ , Occluded  $P(O-P)$ , labile organic  $P(LO-P)$ , moderate labile organic  $P(MLO-P)$ , moderate resistant organic  $P(MRO-P)$  and High Resistant organic  $P(HRO-P)$ . Available P in soils and up-taken P in plants were determined. The interaction effect among fractions of P and the relative availability of these P fraction were discussed in terms of path analysis. The results are showed as follows:

1. According to their contents in soils used, fractions of P were arranged in such order as  $Ca-P > MLO-P > MRO-P > O-P > Al-P > Fe-P > HRO-P > LO-P > H_2O-P$ . Correlative coefficients between available P and  $H_2O-P$  ( $r = 0.669^{**}$ ),  $Al-P$  ( $r = 0.782^{**}$ ),  $Fe-P$  ( $r = 0.724^{**}$ ) or  $LO-P$  ( $r = -0.493^{**}$ ) were significant. The correlative coefficient ( $r = 0.873^{**}$ ) between available P in soils and absorbed P in plants was significant.

2. The path analysis of P fractions showed that the path coefficient (PC) of  $HRO-P$  was smaller than that of the others. The coefficients of the other P fractions were in the sequence of  $Al-P > Fe-P > MLO-P > LO-P > H_2O-P > Ca-P$ . Therefore, the relative effect of P fractions on available P was in such order as  $Al-P > MRO-P > Fe-P > MLO-P > LO-P > H_2O-P > Ca-P$ .

3. From the path analysis it is showed that available P could be affected by changes of any P fraction in soils. There was no fraction that had no relation to other P fraction in soils. they always affect each other. Organic P in soils also could affect the level of available P and became one of P sources in plant nutrition when the condition of soil was suitable.

4. It is showed in this paper that the path analysis is a new and effective method to evaluate the role of organic P in soils. By path coefficients of P fractions we can more clearly know the way of interaction among P fractions and the relative availability of the P fraction.

5. From the results obtained in our study, it can be seen that the relative availability of  $Al-P$  and  $Fe-P$  was higher than that of the other P fractions in soils. But  $MRO-P$  was more important than  $Fe-P$  to available P because it affect available P by changing other characteristics of soil. For example, when  $MRO-P$  increase it not only increased in soils but also improved the amount of P the fertility of soil. The relative availability of  $MLO-P$  and  $LO-P$  was higher than that of other P fractions in organic P of soils.