

磷素在土壤中的扩散规律

张 钟 先

提 要

本文应用放射性同位素示踪法,研究了黄土区几种土壤中磷素的扩散过程、影响因素以及其对作物有效性的关系。结果表明: 1. 磷素在土壤中一般仅能扩散3—4 cm。10—15天乃基本达到平衡。各种类型土壤的磷素扩散有明显的差别,这与土壤的粘粒含量有关。磷素的扩散系数为 $7 \times 10^{-8} - 6 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$; 2. 土壤水分和厩肥均能明显地增进磷素在土壤中的扩散作用,而无机盐的作用则相反; 3. 小麦和玉米幼苗从黄绵土中吸收的示踪磷比从红油土中吸收的高1.5倍。

植物根系在土壤中仅能吸收与其相邻接的有效养分。由于根系在土体中所占体积较小(一般仅占1%左右),仅靠这种直接接触吸收其量甚微,远不能满足植物需要。因此,必须靠远根处土壤养分通过各种途径不断给予补充。这种养分补给的速度是决定土壤供养能力的重要因素。近20多年来国内外普遍注视到这个问题,并提出了土壤养分有效性的能量概念。

一般认为,土壤养分的移动主要有两种途径:一是养分通过质流往根面移动,其速度取决于植物吸收水的速度与土壤溶液中养分浓度的乘积;二是养分在浓度差的作用下不断往根面扩散,以补充其亏缺。

在土壤溶液中磷酸浓度极低(约0.05ppm)的情况下,借助于水分质流供应的磷素极为有限(约1%左右)。因此,不少学者认为沿着浓度梯度产生的扩散作用是多数旱地土壤中供应磷素的主要机制。

本工作的目的是在室内模拟条件下,应用同位素示踪法了解磷素在黄土区几种土壤中的单向扩散过程、影响因素及其与有效性的关系,为提高磷肥肥效提供依据。

实 验 方 法

供试的风干土样过0.5mm筛孔后装入塑料管内,其容重保持在 1.2 g/cm^3 。除土壤含水量试验外,土柱的含水量均控制在田间持水量范围。

扩散前将标记的 $\text{Na}_2\text{H}^*\text{PO}_4$ 、 $2 \text{ H}_2\text{O}$ 粉末均匀平铺在土柱的顶面上,施用率为 $20 \text{ mg P}_2\text{O}_5/\text{cm}^2$ 。密封后在 $25 \pm 1^\circ \text{C}$ 下扩散一定时间,然后纵向剖开土柱进行射线自显影,或将土柱分段截切,测定标记磷在土柱中的分布情况。为了探测磷素在土壤中的扩

散过程,还用自制的放射性层析器进行土柱放射性的连续测量。

结 果 与 讨 论

(一) 磷素在不同类型土壤中的扩散移动

我们选用了黄土地区几种主要的土壤——红油土(武功)、黄绵土(延安)、黄绵土(米脂)、黑垆土(西峰)、和黄泥巴(安康)进行了室内试验。试验重复三次,结果如图1所示。

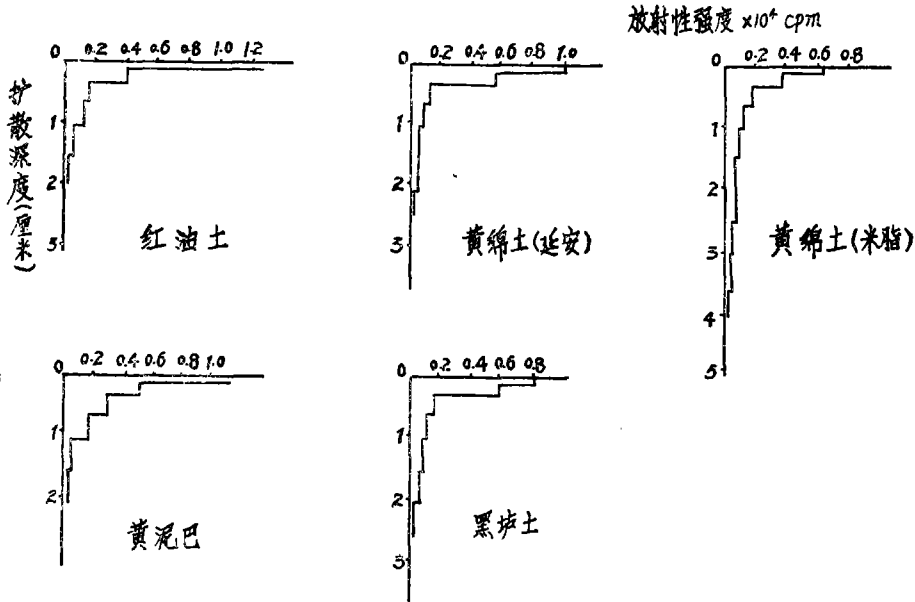


图1 几种土壤中磷素的扩散情况

从试验结果看出,磷酸盐在黄土区土壤中扩散移动的范围很小,即使在田间持水量下,一般只能扩散到距磷源2—3 cm处,只有质地疏松的米脂黄绵土可扩散到4 cm。且其中80%左右截留在0.3 cm范围内。

在不同类型土壤中磷素的扩散移动情况也存在着明显的差异。以米脂黄绵土的扩散范围最大,延安黄绵土和西峰黑垆土次之;武功红油土和安康黄泥巴较小。形成了其扩散移动能力在地理分布上从北到南逐渐减弱的趋势。这与土壤中的粘粒含量(表1)有关。因为土壤中离子的扩散过程是受其与土壤胶体间的相互静电作用制约的,同时包被在粘粒表面的三氧化二物与磷素的反应也会抑制扩散作用。因而,土壤胶体粘粒的组份与含量都对磷素的扩散移动有较大的影响。此外,游离碳酸钙和有机质含量也从不同方向影响其扩散。故延安黄绵土即使粘粒含量不高,但其扩散作用却受到明显的抑制。

本试验所测的是动态扩散过程,其浓度梯度不是恒值。因此我们采用 Fick 第二定律所推导出的公式: $\log C = k - \frac{0.1086}{D_t} x^2$ 求出磷素在不同土壤中的扩散系数 (D_p)。结果在浓度较小的区段得到 $\log C$ 与 x^2 的直线关系,并求得 D_p 值如表2。

表 1

供试土壤的基本特性

项 目		红 油 土	黄 绵 土 (延安)	黄 绵 土 (米脂)	黑 垆 土	黄 泥 巴
粘 粒 含 量 (%)	<0.01	54.1	20.5	13.5	29.8	62.8
	<0.005	42.0	14.3	10.5	21.8	55.7
pH		7.8	7.8		8.5	7.2
CaCO ₃ (%)		8.1	12.4		7.4	0.32
有机质 (%)		1.42	0.37		1.21	0.48
代换性盐基 (毫克当量/100克)		8.83	6.77		9.45	
胶 体 部 分	Fe ₂ O ₃	11.46	9.55		10.12	
	Al ₂ O ₃	20.50	22.56		22.51	
对磷素的吸附量 (毫克P ₂ O ₅ /克土)		4.10	3.00			4.95

表 2

不同土壤类型下的Dp值

土壤类型	红 油 土	黄 绵 土 (延安)	黄 绵 土 (米脂)	黑 垆 土	黄泥巴
D _p (cm ² /s)	1.28 × 10 ⁻⁷	2.21 × 10 ⁻⁷	6.00 × 10 ⁻⁷	3.46 × 10 ⁻⁷	7.53 × 10 ⁻⁸

由此可见,黄土区土壤中磷素的扩散系数均在 $n \times 10^{-8} - 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$ 间,与有关资料中的D_p值相比尚属偏高。且其D_p值与粘粒含量间存在着双曲线函数关系(图2),只有CaCO₃含量高而有机质含量少的延安黄绵土例外。

(二) 磷素在土壤中的扩散过程

磷素在土壤中的扩散移动是个动态过程。所以我们不仅要了解其扩散范围,更要探明其扩散的全过程。我们采用专制的探测设备,在不同时间连续测定磷素在土柱内的分布情况,并将试验结果绘成动态分布图(图3)。

磷素在扩散过程中的浓度变化可分为三个区段来叙述:

1. 递减区 在土柱表层(米脂黄绵土可延伸到0.5cm)由于浓度梯度大,磷酸离子

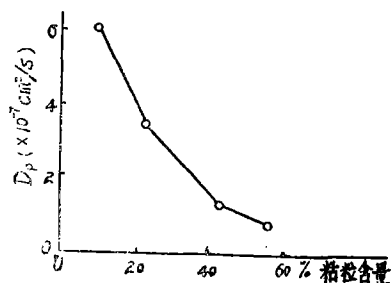


图 2 土壤中粘粒含量与 D_p 值的关系

迅速往下扩散。至3—6天后渐趋和缓，形成了浓度因时间变化的对数关系曲线。在该层内磷素扩散速度亦因土壤类型而异。若以磷素相对浓度减半所需时间计，红油土、黄泥巴约为15天；延安黄绵土和黑垆土为4天；而米脂黄绵土只需1.5天。

2. 先增后减区 大多数土壤位于0.5cm处，米脂黄绵土下伸至1.0cm，而黄泥巴则处于0—0.5cm之间。该区先是接纳上层扩散磷素占优势。随着上层扩散趋于稳定，逐渐被下移优势所取代，表现出磷素浓度先增后减。这种增减的转折点对黄绵土来说约在

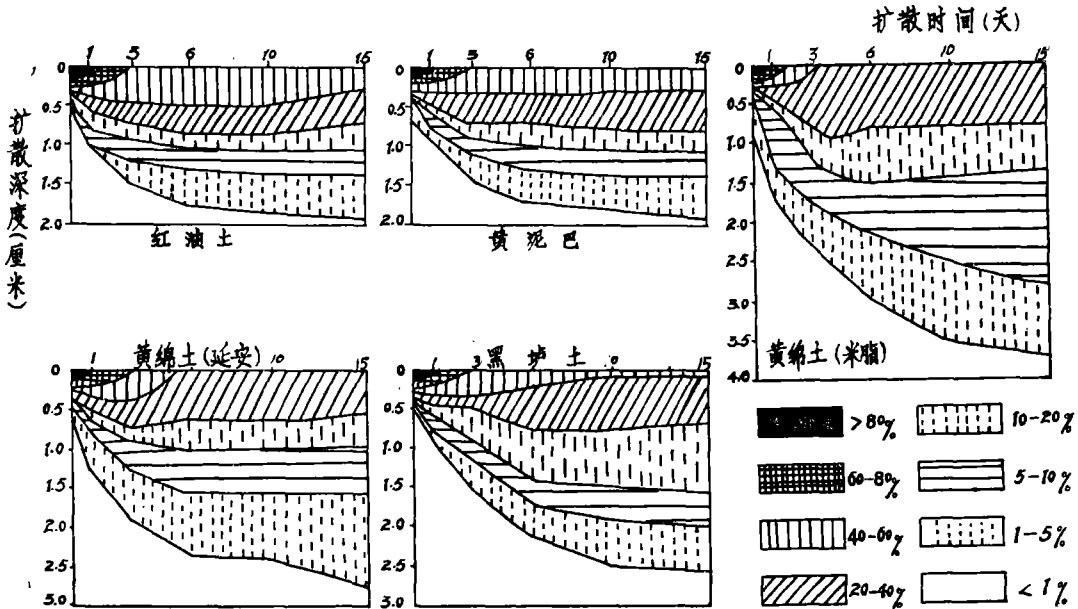


图3 磷素在几种土壤中的动态扩散过程

第3天，而红油土和黑垆土则在第6天前。

3. 递增区 除黄泥巴外，大多数土壤均在1—1.5cm以下。该区中磷素浓度在3—6天后渐趋平衡，但靠近扩散前沿的浓度仍有上升趋势。这在轻质的米脂黄绵土中尤为明显。

由上述结果看出，磷素施入土壤后的3—6天内，其扩散移动作用较为强烈，10—15天后因浓度梯度减小而渐趋稳定。在同样的扩散条件下，磷素在质地轻松土壤中的扩散速度较快，即使在浓度梯度很小的扩散前沿15天后仍有明显的继续扩散现象，没有达到平衡；反之，在较粘重的土壤中其扩散速度慢，当浓度梯度降到一定程度时扩散即处于停滞，基本达到平衡。因此，磷素在土壤中的扩散移动能力不仅表现在移动范围上，而且在扩散进展过程中也有明显的反映。

(三) 土壤含水量对磷素扩散的影响

磷素在土壤中扩散，不论是通过土粒表面水膜或是土壤溶液，都要以水分为扩散媒介。因而土壤水分的多寡势必影响磷素扩散的速度和范围。黄土区土壤常年处于水分饱和状态，且耕层土壤含水量的年变化较大。为了了解土壤含水量对磷素扩散的影响，我们测定了红油土和黄绵土在7种含水量下磷素扩散情况，结果如图4所示。

参照两种土壤的水分特性资料（表3）可以看出，当土壤含水量低于最大吸湿水时，土壤中缺乏扩散的水分条件，因而施用的磷酸盐不能往下扩散移动，几乎全部积聚

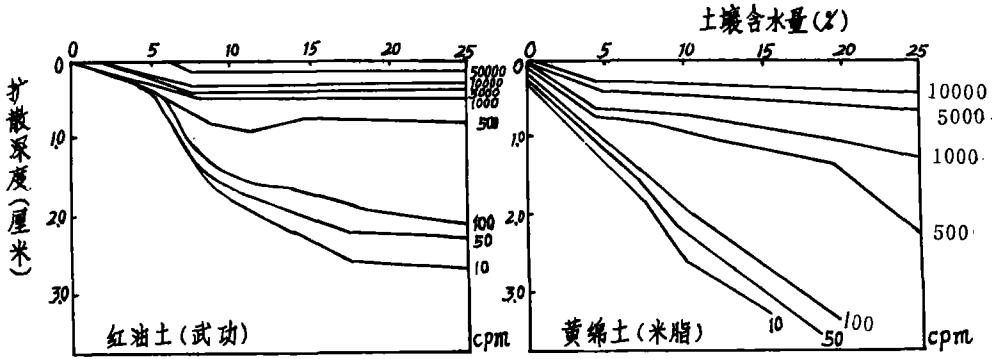


图4 在不同土壤含水量下红油土与黄绵中磷素扩散分布图

表3 红油土和黄绵土的水分特性

项 目	红 油 土	黄 绵 土 (米脂)
最大吸湿水 (%)	7.1	3.8
凋萎湿度 (%)	8.4	5.6
田间稳定湿度 (%)	15.5	—
田间持水量 (%)	20.8	19.0

进磷素的扩散。

黄土区土壤根系活动层的含水量多处在12—16%间。因此在通常情况下，磷素在红油土和黄绵土中的扩散范围分别为2和3cm左右。

（四）无机盐对土壤中磷素扩散的影响

自然土壤本身就是个多离子体系，尤其在人为施加肥料的情况下，各种离子必将产生相互效应，影响磷素的扩散移动。在这方面国外学者取得的结果不很一致，多数认为铵盐和钾盐都不同程度地抑制磷素的扩散作用。我们布置了三种常用的无机盐 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 、 NaNO_3 和 KCl 对红油土中磷素扩散影响的试验，结果列在表4中。

结果表明，在红油土中施用上述三种无机盐后均限制了磷素的扩散能力，其中以 NaNO_3 的限制作用更大些。这可能是由于所施入的大量 Na^+ 、 K^+ 和 NH_4^+ 离子置换土壤中的钙，而游离钙离子同磷酸离子化合成难溶性的磷酸钙盐。同时，磷酸盐因受其他无机盐的同离子效应影响而降低了溶解度，这些都限制了磷在土壤中的扩散移动能力。

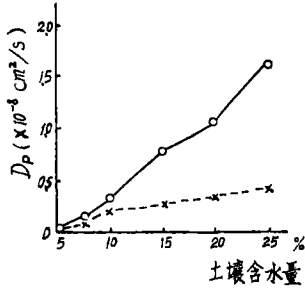


图5 土壤含水量与 D_p 值的关系

表 4

几种无机盐对红油土中磷素扩散的影响

层 次 (cm)	(NH ₄) ₂ SO ₄		NaNO ₃		H ₂ O(对照)		层 次 (cm)	KCl		H ₂ O(对照)	
	cpm	%	cpm	%	cpm	%		cpm	%	cpm	%
0.0—0.1	38750	69.6	33816	84.8	32456	61.5	0.0—0.5	9822	94.5	8598	87.6
0.1—0.3	15952	28.7	5566	14.0	18331	34.7	0.5—1.0	482	4.6	836	8.6
0.3—0.6	683	1.2	267	0.7	952	1.8	1.0—1.5	67	0.6	189	1.9
0.6—1.0	260	0.5	178	0.4	662	1.3	1.5—2.0	32	0.3	124	1.3
1.0—1.5	21	—	44	0.1	378	0.7	2.0—2.5			43	0.5
1.5—2.0	3	—			28	—	2.5—3.0			10	0.1
2.0—2.5					4	—					
总 计	55669	100.0	39871	100.0	52811	100.0	总 计	10403	100.0	9800	100.0

由此可见,施用硫酸铵、硝酸钠和氯化钾等矿质肥料并不能增进磷素在土壤中的扩散移动。它们所以能提高磷肥肥效,首先应归因于氮、钾等营养元素的间接生物作用。

(五) 厩肥等有机螯合物对土壤中磷素扩散的影响

据有关资料报导,有机肥的分解产物能减弱土壤对磷素的固定作用。我们曾用厩肥浸出液和EDTA-Na盐在红油土上进行试验,取得肯定的结果。印度 N. P. Datta 等人曾用三种不同土样,在施用大量有机肥浸出液后进行磷素渗滤试验,结果证实有机螯合物能显著地促进三种土壤中磷素的移动。

本试验采用红油土,在施加定量的厩肥浸出液(20mg干物质/g土)和EDTA-Na盐(186mg/g土)后与加水的对照相比,其磷素扩散移动情况如表5所示。

试验结果表明,施用厩肥浸出液能明显增进红油土中磷素的扩散移动,其扩散过0.3cm的相对示踪磷量为对照的2.2倍。这主要是由于厩肥分解所形成的大分子有机化合物占据了土粒表面一定位置,使得土壤对磷酸离子的吸收量减少。同时这些有机螯合物与土壤中多价金属离子起络合作用,也相应地减弱磷酸离子的化学沉淀作用。而红油土经EDTA-Na盐溶液处理后也有一定的增强扩散作用,但不及前者明显。因此,生产实践中施用厩肥能改善土壤的供磷状况,其中就包含有加速磷素扩散移动的问题。

(六) 土壤中磷素扩散与对作物有效性的关系

如上所述,土壤中养分的扩散移动是决定土壤供养能力的主要因素,它直接影响作物的营养条件。尤其磷素在土壤中扩散移动的能力很小,就更有必要通过实验寻找出适宜的施用方法,以提高其肥效。试验在400ml的培养杯中进行,各按1.36容重和30%含

表 5 厩肥等有机螯合剂对红油土中磷素扩散的影响

层 次 (cm)	厩肥浸出液		EDTA—Na盐		水(对照)	
	cpm	%	cpm	%	cpm	%
0.0—0.1	28509	49.3	30855	53.2	32456	61.5
0.1—0.3	24457	42.3	24757	42.7	18311	34.7
0.3—0.6	3441	6.0	1497	2.6	952	1.8
0.6—1.0	662	1.1	541	0.9	662	1.3
1.0—1.5	450	0.8	319	0.6	378	0.7
1.5—2.0	229	0.4	21	—	28	—
2.0—2.5	32	0.1	4	—	4	—
2.5—3.0	1	—				
总 计	57781	100.0	57994	100.0	52811	100.0

水量装土0.5kg。每公斤土壤施硫酸500mg,示踪磷肥的施用方法有浅施(播层下1cm)、深施(播层下5 cm)和全层混施三种,用量约按 $\text{Na}_2\text{H}^*\text{PO}_4$ 100mg/cm²土面计。分

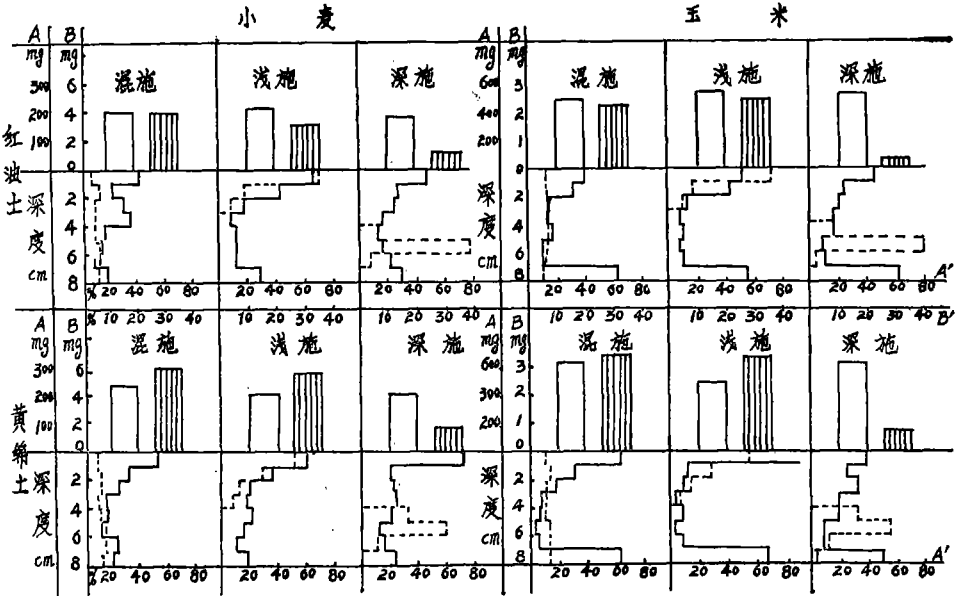


图 6 在不同施磷位置下, 扩散磷分布与磷素吸收的关系

纵坐标: A—植株干重(毫克), 用方框表示, B—示踪磷吸收量(毫克), 用阴影方框表示。
横坐标: A'—示踪磷分布(%), 用虚线表示; B'—根系分布(%), 用实线表示。

别播种小麦和玉米,每杯12株。室内培养20天后收获,测定植株干重和示踪磷量、根系和示踪磷在土层中的分布结果如图6所示。

从图6看出,小麦和玉米幼苗从黄绵土中吸收的示踪磷量均明显地高于红油土,其增高幅度包括全层混施的在内均在50%左右。这说明两种土壤间磷素吸收量的差别除了是由于磷素在土层中宏观分布不同所致外,更主要的是因为根系吸磷过程中,邻近磷素往根面扩散移动的速度不同、亦即土壤供磷能力不同所造成的。

小麦须根能够均匀地分布在整个耕层。当磷肥全层混施时,其根系同磷肥普遍接触,故麦株吸收的示踪磷量较高。浅施磷肥,则大量示踪磷(52—71%)集中在表层1 cm内,而该层内的根量仅占总根量的33%,故所吸收的磷量略低于前者,为全层混施的80—90%。但在深施的情况下,由于磷肥扩散分布区(距播层4—6 cm)内根量不及总量的15%,故其吸收的示踪磷仅有全层施用的1/3。

玉米幼苗的根系较集中在土壤表层(0—2 cm内约占总根量的70—80%),故浅施磷肥的效果较好,与混施的效果相等。但深施的效果较差,其吸收量仅为全层混施的10—20%。

由此可见,土壤对作物的供磷能力不仅取决于土壤中磷素的贮量及其可给态量,而且还要考虑它在土体中的空间分布和供给强度,即所谓空间有效性。这在实践中可通过选择适宜的施磷位置和方法来调节。磷素在黄土区土壤中的扩散移动范围一般在2—3 cm之内。所以根据小麦和玉米幼苗根系的发育分布来看,作为种肥的磷肥似应在播层下1—2 cm处。这样可相应提高作物幼苗对磷肥的利用效率。

The Diffusion Movement of Phosphate in Soils

Zhang Zhongxian

Summary The diffusion of phosphate in some soils, affecting factors and in relation to availability to plants were studied by the radio-isotopetracer.

The phosphate in soils only diffused generally 3-4 cm from source. After 10-15 days, diffusion basically reached equilibrium. There were considerable differences in diffusion of phosphate in the soils of different type, that related to clay content of soil. Diffusive coefficients of phosphate (D_p) were 7×10^{-8} — 6×10^{-7} cm^2/s .

Soil water and manure already obviously enhanced diffusion of phosphorus in soils. However, effect of the mineral salts was contrary.

Trace phosphorus absorbed by the wheat and corn seedling were 1.5 time higher from Huanmian soil than from Hongyou soil.