

土壤磷扩散规律及其能量特征的研究

I. 水分、质地、温度及其相互作用对磷扩散的影响*

徐明岗 张一平 王锐群**

(西北农业大学土化系, 陕西杨陵 712100)

摘 要

用³²P示踪扩散池和扩散管法测定了4种不同质地土壤在不同含水量和温度下的磷自扩散系数。结果表明,非饱和土壤磷扩散系数(D_a)随土壤水分含量(W)增加或土壤水吸力(S)减小而增大,符合幂函数 $D_a = aW^b$ 或 $D_a = aS^{-b}$ 关系;质地对磷扩散的影响与土壤水分条件密切相关,在同一含水量下,轻质土壤 D_a 值大于粘质土, D_a 与粘粒含量呈显著负相关,而同吸力下与此恰好相反。饱和土壤磷扩散系数(D_p)比 D_a 值通常大2-3个数量级,但不同土壤之间差异不大。5—45℃范围内,每升温10℃磷扩散系数增加量为10%—50%,平均为30%左右。多元回归分析表明,水温相互作用对磷扩散有显著影响,其影响程度可用本文提出的磷扩散率水分系数和温度系数来表征。

关键词 磷, 扩散系数, 土壤水分, 土壤质地

大量研究表明,磷主要靠扩散作用在土壤中移动^[8, 11]。因此,土壤磷扩散的快慢,直接影响到作物的磷吸收量及其生物有效性^[9, 13]。磷又是植物生长所必需的大量元素之一,其土壤化学特征比较复杂。所以,土壤磷扩散研究具有重要意义,一直受到国内外学者的广泛关注^[3, 11]。扩散是磷酸离子在带电的、组成复杂的、通路曲折的土壤多孔体中的运移过程。该过程受到土壤水分、质地、容重、施磷量、温度等多种因素的影响^[1, 7, 9, 14, 16]。目前,有关磷扩散影响因素方面的研究较多^[9, 11, 13, 16],但对土壤理化性质等因素对土壤磷扩散影响的定量关系方面研究不够,尤其缺少因素之间相互作用对磷扩散影响的资料。本文研究了水分、质地、温度及其相互作用与土壤磷扩散系数之间的定量关系。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

* 本文为第一作者(现在中国科学院南京土壤所作博士后)在张君常教授和张一平教授指导下完成的博士论文之一部分。

** 本系93届毕业生,现在福建省农科院土肥所工作。

收到修改稿日期:1994-12-05

供试土壤为陕西省代表性的农业土壤——黄绵土、黑垆土、塿土和黄褐土,分别采自米脂、洛川、杨陵和汉中,其质地为轻壤到轻粘土(表 1)。

表 1 供试土壤的基本性质*

Table 1 Basic properties of the soils used

样号 Sample No.	土壤 Soil	pH (水/土 1:1) (Water: soil = 1:1)	有机质 Organic matter (g/kg)	代换量 CEC (cmol(+)/kg)	有效磷 Available phosphorus (mg/kg)	颗粒组成(g/kg) Mechanical composition <0.001 <0.01mm		质地 Texture
I	黄绵土	8.2	2.9	4.48	4.9	85	141	轻壤土
II	黑垆土	7.8	9.1	10.17	6.8	137	348	中壤土
III	塿土	8.0	11.4	17.28	10.7	221	488	重壤土
IV	黄褐土	6.8	5.8	21.35	9.3	386	607	轻粘土

* 速效磷用 Olsen 法,颗粒组成用吸管法测定。

1.2 测定方法

采用扩散池和扩散管两套装置分别测定非饱和土壤和饱和土壤磷的扩散系数。

扩散池装置(图 1A):称取两份供试土壤,加入等量的 KH_2PO_4 溶液,其中一份加入 ^{32}P 标记液(标记剂量为 $2\mu\text{Ci/g}$ 土),使土壤水分达饱和以上,不时搅拌并置于恒温箱中于 60°C 下烘干,研磨过 1mm 筛作为供试土样。按要求的容重称取供试土样置于培养皿中,加入要求的水量后平衡一天,再用玻璃棒充分搅拌均匀。把标记和未标记土壤各自装到扩散半池中,合拢扩散半池,接缝处用胶带纸密封,置于底部有水的密闭容器中,在恒温(5°C 、 25°C 或 45°C)下扩散,7 天后分离扩散半池,测定土壤含水量和放射性强度(FH-408 自动定标器定标,G-M 管测定)。试验在非稳恒状态下进行,故此法按 Fick 第二定律推导式^[12]计算磷自扩散系数(D_a):

$$Q_t / Q_0 = h^{-1} \cdot (D_a t / \pi)^{1/2}$$

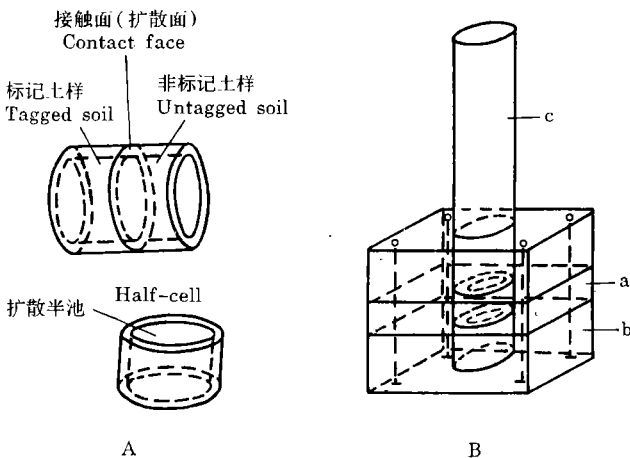


图 1 测定自扩散系数扩散池(A)和扩散管(B)

Fig.1 Diffusion half-cells(A) and diffusion tube(B) used to measure self-diffusion coefficient

式中, Q_t 为 t 时间的扩散量(放射性强度, cpm/g), Q_0 为原标记土的放射性强度(cpm/g), h 为扩散半池厚度(cm), t 为时间(s), π 为常数 3.142。

扩散管装置(图 1B): 称取供试土壤加入待测磷浓度的 KH_2PO_4 溶液, 平衡后将其按要求的容重装入 a 板装土部件的小圆孔中, 其上下面压平后加盖细孔滤纸及中部开孔的软橡皮圈, 盖上 c 筒, 四周用螺丝固定。c 筒装入相应浓度的待测液, b 板注入相同溶液, 平衡 24h 以上, 使土样与待测液充分平衡, 土样水分达饱和; 然后将 c 筒待测液倒掉, 装入 15mL 含 ^{32}P 的相同浓度待测液, b 板注入 2mL 待测液, 置于恒温水浴。开始每隔 3h 摇动一次, 并用针管吸出 b 板内全部溶液, 再加入原始待测液, 如此反复 3-5 次; 以后每隔 2h 吸换一次, 大约吸换 15 次以后, 扩散达到稳恒。收集吸出液, 用 KJ-2101G 双道液体闪烁计数器测定放射性强度。扩散在稳恒状态下进行, 故此法土壤孔隙自扩散系数 D_p 可按 Fick 第一定律求得^[10]:

$$J_i = D_p A t (C_{ic} - C_{ib}) / d$$

式中, J_i 为 t 时间的扩散量(cpm), C_{ic} 、 C_{ib} 为标记磷在 c、b 两端的浓度(cpm/ml), d 为扩散土柱厚度(cm), A 为扩散土壤截面积(cm^2)。

2 结果与讨论

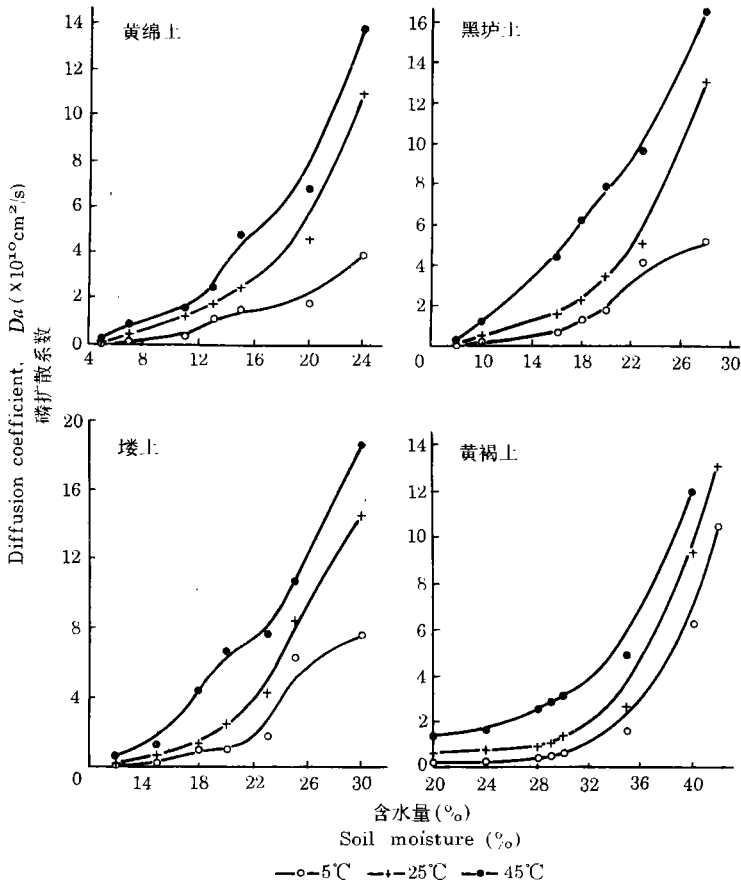
2.1 土壤水分含量对磷扩散的影响

土壤水分含量影响养分离子扩散的曲折程度, 扩散的有效截面积, 以及土壤中所发生的物理、化学过程, 所以水分含量的变化, 对磷扩散系数有较大的影响^[9, 12]。表 2 的结果表明, 供试 4 种土壤的 D_a 值都随水分含量增加水吸力减少而增加。这主要是因为水分含量多时, 土壤表面水膜变厚, 离子扩散的途径变短^[3, 15]。 D_a 值随水分含量增加的幅度也因水分含量不同而异(图 2), 一般是水分含量低时增加的慢, 水分含量高时增加的快, 这可能是由于水分含量较高时, 水膜增厚程度较高从而增加了有效扩散截面积, 加之水分含量较高时, 溶液中的磷被土壤吸附的作用力减弱, 因而扩散加快。

为定量描述土壤水分含量与 D_a 的关系, 根据其相关曲线(图 2), 采用指数函数、幂函数等多种模式拟合, 结果表明(表 3), 以幂函数 $D_a = aW^b$ 相关性最高, 因而其为拟合的最佳模型。这和 Harrell^[7]提出的水分含量(θ)与 D_a 关系拟合式: $D = K(\theta - E)^P + B(K, E, P, B$ 为拟合常数)很相似。

用土壤水吸力($S, 10^5\text{Pa}$)对 D_a 作图, 结果表明, 随土壤水吸力增大(土壤含水量相应减少), 磷扩散系数急聚下降, 其关系曲线形状和水分特征曲线很相似。多种拟合结果, 以幂函数式 $D_a = aS^{-b}$ 最优(表 4), 和水分特征曲线模式^[2]相一致。由此可见, 磷扩散的快慢及其有效性, 与土壤水分的有效性密切相关。

拟合式 $D_a = aS^{-b}$ 中的常数 a 的含义是土壤水吸力为 1 巴(10^5Pa)时的磷扩散系数。4 种土壤 10^5Pa 吸力下的磷扩散系数除黄褐土外, 其余 3 种土壤呈现为黄绵土 < 黑垆土 < 垆土, 随质地变重磷扩散系数增大。其原因是粘粒含量高时, 持水量高, 以及粘粒中的扩散途径较砂粒为短^[13]。与这三种石灰性土壤不同, 黄褐土属中性土壤, 含游离氧化物较多^[5], 所以其质地虽最粘重, 但 10^5Pa 吸力下的磷扩散系数较小, 可能与其粘粒表面特征有关, 尚待进一步研究。

图2 土壤含水量与磷扩散系数(D_a)关系曲线Fig.2 Relation curves between soil moisture and phosphate diffusion coefficient(D_a)

当 a 值固定时, b 值越大 ($0 < b < 1$), 则扩散系数随水吸力变化的曲线越陡, 所以 b 值反映了土壤水吸力变化时, 磷扩散系数变化的快慢程度。由此据表 4 可知, 在 $(0.05-15) \times 10^5 \text{Pa}$ 吸力范围内 4 种土壤磷扩散系数随吸力变化的快慢顺序大致是: 黄绵土和黑垆土 $>$ 壤土 $>$ 黄褐土, 这与质地较轻土壤比水容量 (dW/dS) 较大^[2], 即增加单位水吸力土壤含水量降低较多有关。因此, 黄绵土、黑垆土磷扩散系数随水吸力降低较多。同一土壤不同温度的 b 值, $45^\circ\text{C} < 25^\circ\text{C} < 5^\circ\text{C}$, 说明低温时扩散受水分影响更大。

饱和土壤磷的扩散系数为 $1.03 \times 10^{-8} - 1.96 \times 10^{-6} \text{cm}^2/\text{s}$ (表 5), 比非饱和土壤提高了 2-3 个数量级。当土壤水分达饱和时, 其孔隙通道充满了溶液, 这时磷扩散的有效截面积最大, 扩散路径最短, 因而其扩散速度显著加快。饱和土壤磷扩散系数, 是土壤磷扩散系数的最大值。在土壤溶液中的磷与土壤吸附达到平衡时, 其扩散系数主要取决于土壤孔隙容积及孔隙的曲折程度^[11]。在相同容重下, 总孔隙度基本相同, 质地不同主要影响小孔隙的分布, 而饱和土壤中小孔隙对磷扩散的影响较小, 因而在相同处理下, 4 种土壤饱和磷扩散系数总体上看差异不大。如在 25°C 时磷浓度为 0, 扩散系数为 $(2.8-5.3) \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{s}$; 磷浓度为 0.026mol/L , 扩散系数为 $(5.6-9.1) \times 10^{-7} \text{cm}^2/\text{s}$ 。

表2 不同水吸力及不同温度下磷自扩散系数 $D_a (\times 10^{10} \text{cm}^2/\text{s})$ Table 2 Self-diffusion coefficients of phosphate (D_a) in soils at varying water suction and temperature

样号 Sample No.	温度(°C) Temperature	土壤水吸力(10^5Pa) Soil water suction						
		15	6	1	0.5	0.3	0.1	0.05
I	5	0.025	0.101	0.320	1.043	1.470	1.744	3.872
	25	0.056	0.427	1.152	1.745	2.464	4.608	10.96
	45	0.272	0.846	1.540	2.448	4.740	6.816	13.82
II	5	0.023	0.121	0.648	1.278	1.71	4.005	5.13
	25	0.066	0.486	1.60	2.265	3.425	5.05	13.03
	45	0.237	1.15	4.30	6.125	7.83	9.63	16.54
III	5	0.071	0.189	0.93	0.99	1.74	6.25	7.13
	25	0.207	0.66	1.34	2.48	4.31	8.40	14.50
	45	0.638	1.24	4.38	6.65	7.59	10.65	18.60
IV	5	0.161	0.207	0.412	0.496	0.598	1.564	6.18
	25	0.606	0.752	0.910	1.064	1.380	2.670	9.32
	45	1.376	1.622	2.540	2.854	3.096	4.860	11.96

注:施磷 50mg/kg 土,装土容重 1.4g/cm³。

表3 土壤含水量($W, \%$)与磷扩散系数($D_a, \times 10^{10} \text{cm}^2/\text{s}$)的回归方程*Table 3 Regression equations of phosphate diffusion coefficient (D_a) varying with soil water content ($W, \%$)

土壤 Soil	温度(°C) Temperature	模型 Model $D_a = ae^{bn}$			模型 Model $D = aW^b$		
		a	$b \times 10$	r	a	b	r
黄绵土	5	0.0180	2.46	0.933	1.98×10^{-4}	3.16	0.984
	25	0.0378	2.53	0.952	3.94×10^{-4}	3.22	0.994
	45	0.105	2.15	0.975	2.73×10^{-3}	2.64	0.983
黑垆土	5	0.0034	2.95	0.950	9.25×10^{-7}	4.81	0.988
	25	0.0187	2.49	0.970	2.19×10^{-5}	3.99	0.994
	45	0.165	1.82	0.901	9.28×10^{-4}	3.01	0.951
娄土	5	0.0013	3.15	0.947	4.69×10^{-9}	6.37	0.973
	25	0.0170	2.37	0.984	1.76×10^{-6}	4.71	0.997
	45	0.087	1.93	0.951	4.53×10^{-5}	3.85	0.976
黄褐土	5	0.0025	1.87	0.983	1.32×10^{-8}	5.26	0.975
	25	0.0280	1.35	0.950	3.74×10^{-6}	4.74	0.981
	45	0.133	1.07	0.981	1.22×10^{-4}	3.02	0.955

* r 为相关系数; $n=7, r_{0.01}=0.798$ 。

2.2 土壤质地对磷扩散的影响

质地是土壤的重要物理性质之一,它之所以影响磷扩散,主要是因为不同质地土壤颗粒的比表面及表面吸附力不同,以及颗粒不同排列所引起的孔隙大小和连续性不同^[3-4]。粘土中扩散系数较大还是砂土中扩散系数较大,不同研究者的结果有所不同^[4, 13, 16]。

本试验的结果表明(图 2),供试 4 种土壤,从轻壤到轻粘土,在 20%含水量下,土壤水势依次减小,相应磷扩散系数亦依次降低。如 25℃时的水势分别为 -0.1×10^5 、 -0.3×10^5 、 -0.5×10^5 和 -15×10^5 Pa,扩散系数分别为 4.61×10^{-10} 、 3.24×10^{-10} 、 2.48×10^{-10} 和 0.61×10^{-10} cm²/s。显示在相同含水量时,随土壤粘粒含量增加,水势减小,磷扩散系数减低的趋势。相关分析表明,相同含水量下磷扩散系数与土壤粘粒含量一般呈显著负相关(表 6)。但相同吸力下的磷扩散系数与此不同,除黄褐土外,其余 3 种土壤基本都是轻壤土<中壤土<重壤土(表 2)。这和前述模型分析结果一致。相关分析表明,这 3 种土壤磷扩散系数与粘粒含量大部分情况下达显著正相关,低水吸力下尤其如此。这与 Olsen^[13]的结论基本一致。因此,质地对磷扩散的影响与水分状况密切相关,粘土中还是砂土中磷扩散系数较大,取决于比较的水分条件,是同水吸力还是同含水量。

表 4 土壤水吸力($S, 10^5$ Pa)与磷扩散系数($Da, \times 10^{10}$ cm²/s)幂函数方程($Da = aS^{-b}$)

Table 4 Power function equation ($Da = aS^{-b}$) of measured phosphate diffusion coefficient (Da) varying with soil water suction (S)

土壤 Soil	5℃			25℃			45℃		
	a	$-b$	r	a	$-b$	r	a	$-b$	r
黄绵土	0.364	0.851	-0.980	0.841	0.881	-0.990	1.473	0.733	-0.988
黑垆土	0.488	0.929	-0.978	1.054	0.885	-0.983	3.045	0.737	-0.936
栗土	0.726	0.814	-0.990	1.656	0.720	-0.992	3.441	0.603	-0.988
黄褐土	0.499	0.568	-0.943	1.205	0.524	-0.870	2.705	0.377	-0.930

注: S 为 $(0.05-15) \times 10^5$ Pa; $n=7$, $r_{0.01}=0.798$ 。

表 5 不同温度和浓度下饱和土壤磷自扩散系数 $Dp(\times 10^8$ cm²/s)*

Table 5 Porous self-diffusion coefficients of phosphate (Dp) in the water saturated soils of varying phosphate concentration and temperature

样号 Sample No.	温度(℃) Temperature	磷浓度(mol/L) Phosphate concentration			样号 Sample No.	温度(℃) Temperature	磷浓度(mol/L) Phosphate concentration		
		0	0.01	0.026			0	0.01	0.026
I	5	1.69	8.29	34.8	III	5	1.38	7.34	63.6
	25	5.22	34.3	56.3		25	5.28	33.8	80.6
	45	23.1	54.2	196		45	25.0	120	184
II	5	1.03	15.2	32.5	IV	5	1.44	29.5	68.4
	25	2.84	62.1	91.4		25	3.70	53.8	87.8
	45	7.23	151	181		45	28.9	76.9	107

* 装土容重 1.5g/cm³。

2.3 温度对磷扩散的影响

非饱和土壤及饱和土壤,磷扩散系数均随温度升高而增大(表2、表5),这主要是因为温度升高时,磷酸离子运动的平均动能增加,扩散的动力增大;以及温度升高时,水的粘度系数减小,磷酸离子扩散所受的阻力减小,因而磷扩散速度加快^[1,6]。这种温度对磷扩散的影响关系,可称为磷扩散温度效应。

在5–45℃范围内,温度每升高10℃,非饱和土壤不同含水量下的磷扩散系数增加量为 $(0.06-2.99) \times 10^{-10} \text{cm}^2/\text{s}$,增加幅度约为10–50%。同一土壤随含水量增加,温度升高引起的磷扩散系数增加越大, $15 \times 10^5 \text{Pa}$ 水吸力对应的含水量与 $0.1 \times 10^5 \text{Pa}$ 对应的含水量比较,升温10℃ D_a 值增加,后者为前者的3–25倍,说明磷扩散的温度数应受含水量的影响很大。饱和土壤磷扩散系数随温度增加较大,10℃温差引起磷扩散系数增加量为 $(1.6-40.3) \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{s}$,但增加幅度平均仍为30%左右。

表6 20%含水量下磷扩散系数与粘粒含量的相关系数(r) *

Table 6 Correlation coefficients (r) between phosphate diffusion coefficient in soil at 20% water content and clay content

5℃			25℃			45℃		
<0.001mm	<0.01mm	<0.002mm	<0.001mm	<0.01mm	<0.002mm	<0.001mm	<0.01mm	<0.002mm
-0.987	-0.888	-0.978	-0.990	-0.969	-0.973	-0.910	-0.693	-0.850

* $n=4, r_{0.05}=0.950, r_{0.1}=0.900$.

2.4 水温相互作用对磷扩散的影响

由上述分析可知,土壤水分和温度对磷扩散影响不是独立的,而是存在着相互作用。它们之间的相互关系如何,下面借助多元回归分析加以讨论。

采用非线性回归方程:

$$D_a = A + a_1 W + a_2 W^2 + b_1 T + b_2 T^2 + c WT \quad (1)$$

对非饱和土壤在不同水分含量($W, \%$)和不同温度($T, \text{℃}$)下与磷扩散系数 D_a ($\times 10^{10} \text{cm}^2/\text{s}$)关系进行拟合,采用逐步回归删除不显著项,所得各土壤多元回归方程为:

$$\text{黄绵土 } D_a = 3.624 - 0.6475W - 0.0937T + 0.0276W^2 + 0.0123WT (n=21, R=0.973^{**})$$

$$\text{黑垆土 } D_a = 4.155 - 0.710W - 0.090T + 0.0216W^2 + 0.0121WT (n=21, R=0.983^{**})$$

$$\text{楼土 } D_a = 8.553 - 1.134W - 0.165T + 0.0365W^2 + 0.0137WT (n=21, R=0.984^{**})$$

$$\text{黄褐土 } D_a = 22.34 - 1.756W - 0.0857T + 0.0334W^2 + 0.00529WT (n=21, R=0.980^{**})$$

上述方程各回归项不仅达显著水平,而且回归方程也达极显著水平,说明可以用其定量地描述水温条件与磷扩散系数的关系。这些方程的三维曲线见图3。

由方程和三维图可知:①水温对磷扩散系数显示正交互效应,其效应以三种石灰性土壤较大,黄褐土较小。②磷扩散系数随土壤水分增加或温度升高而增加。因此,要达到同等的磷素供应量,温度较低时,则需增加土壤水分;土壤温度较高或土壤水分较多,都可提高磷素的供应量和磷肥的利用率。③磷扩散系数随水分或温度增加的幅度既与温度有关,也因土壤水分而异。

为说明不同土壤磷扩散系数随水温增加的快慢程度,对各土壤上述拟合方程在一定温度下求其对水分的偏微分,得到在水温交互作用下土壤磷扩散系数随水分的变化率,称

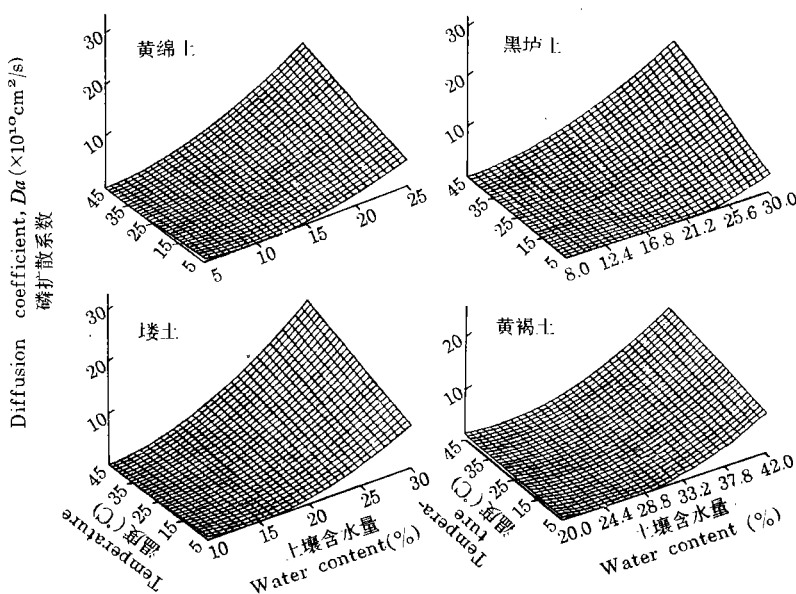


图 3 土壤磷扩散系数(D_a)与含水量、温度关系三维曲线

Fig.3 The three dimensional curves of phosphate diffusion coefficient (D_a) in soil vs.water content and temperature

为磷扩散率的温交水分系数($\partial D_a / \partial W$)_T(简称温交水分系数)规律,表达式为:

$$\begin{aligned}
 \text{黄绵土} \quad (\partial D_a / \partial W)_T &= -0.6475 + 0.0552W + 0.0123T \\
 \text{黑垆土} \quad (\partial D_a / \partial W)_T &= -0.710 + 0.0432W + 0.0138T \\
 \text{瘠土} \quad (\partial D_a / \partial W)_T &= -1.134 + 0.0730W + 0.0137T \\
 \text{黄褐土} \quad (\partial D_a / \partial W)_T &= -1.756 + 0.0668W + 0.00529T
 \end{aligned} \tag{2}$$

由(2)式可得出如下结论:①供试土壤磷扩散水温相互作用的温交水分系数均是水分含量和温度的函数,它随水分含量增加和温度升高而增加。②粘重土壤瘠土和黄褐土的温交水分系数受水分的影响较大(0.067-0.073),而质地较轻的黑垆土和黄绵土的温交水分系数受水分影响较小(0.043-0.055)。③在 20%含水量和 25℃下,温交水分系数以黄绵土最大,黄褐土最小,黑垆土和瘠土居中。这主要是因为水分含量相同时,轻质土壤的水吸力小,水分有效性较高。

各土壤在一定含水量下对温度求微分,得到不同土壤磷扩散系数随温度的变化率,称之为磷扩散率的水交温度系数($\partial D_a / \partial T$)_W(简称为水交温度系数),其表达式为:

$$\begin{aligned}
 \text{黄绵土} \quad (\partial D_a / \partial T)_W &= -0.0937 + 0.0123W \\
 \text{黑垆土} \quad (\partial D_a / \partial T)_W &= -0.090 + 0.0121W \\
 \text{瘠土} \quad (\partial D_a / \partial T)_W &= -0.165 + 0.0137W \\
 \text{黄褐土} \quad (\partial D_a / \partial T)_W &= -0.0857 + 0.00529W
 \end{aligned} \tag{3}$$

方程(3)表明,供试土壤水温相互作用的水交温度系数与温度无关,仅是含水量的函

数。水交温度系数随水分的变化率以黄绵土、黑垆土、塋土较大,黄褐土较小。在 20%含水量下,水交温度系数大小为黄绵土(0.153)和黑垆土(0.152) > 塋土(0.109) > 黄褐土(0.0201),即轻质土壤磷扩散系数随温度增加的快,粘重土壤随温度增加的慢。这主要是由于相同含水量下,粘重土壤水分有效性较低。

参 考 文 献

1. 于天仁等,1976:土壤电化学性质及其研究法。302—321页,科学出版社。
2. 张航、徐明岗、张富仓等,1994:陕西农业土壤持水性能及其与土壤性质的关系。干旱地区农业研究,第12卷2期,32—37页。
3. 凌云霄,1980:土壤中磷酸离子扩散的研究。土壤学进展,第4期,1—8页。
4. 凌云霄,1981:影响水稻土磷素扩散的某些因素。土壤学报,第18卷2期,194—198页。
5. 郭兆元主编,1992:陕西土壤。47—298页,科学出版社。
6. 蒋以超、张一平,1993:土壤化学过程的物理化学。388—456页,中国科学技术出版社。
7. Harrell, J.W.Jr. and Saeed, M., 1980: The effect of moisture on phosphorus diffusion in coal mine spoils. *Soil Sci.*, 129(5): 261—265.
8. Lewis, D.G. and Quirk, J.P., 1967: Phosphate diffusion in soil and uptake by plants. *Plant and Soil*, 26: 445—453.
9. Mahtab, S.K., Godfrey, C.L., Swoboda, A.R., et al, 1971: Phosphorus diffusion in soils: 1. The effect of applied P, clay content and water content. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 35: 393—397.
10. Mokady, R.S. and Low, P.F., 1968: Simultaneous transport of water and salt through clays. *Soil Sci.*, 105(2): 112—130.
11. Nye, P.H. and Tinker, P.B., 1977: Solute movement in the soil-root system. Blackwell Scientific Publications, Oxford, pp. 33—91.
12. Olsen, S.R., Kemper, W.D. and Van Schaik, J.C., 1965: Self-diffusion coefficients of phosphorus in soil measured by transient and steady-state methods. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 29: 154—158.
13. Olsen, S.R. and Watanabe, F.S., 1963: Diffusion of phosphorus in relation to soil texture and plant uptake. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 27: 648—653.
14. Sadeghi, A.M., Kissel, D.E. and Cabrera, M.L., 1988: Temperature effects on urea diffusion coefficients and urea movement in soil. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, 52: 46—49.
15. Sharma, K.N. and Deb, D.L., 1986: Prediction of ^{65}Zn diffusion through ^{35}Cl diffusion in soils of varying water content. *J. Nuclear Agr. Biol.*, 15(3): 145—149.
16. Sharma, P.K. and Kalia, A.K., 1985: Factors influencing diffusion of phosphate in some soils of Himalayan region. *J. Indian Soc. Soil Sci.*, 33: 378—383.

DIFFUSION OF PHOSPHATE IN SOILS

I. THE INFLUENCE OF SOIL MOISTURE, TEXTURE AND TEMPERATURE AS WELL AS THEIR INTERACTIONS

Xu Minggang Zhang Yiping and Wang Ruiqun

(Department of Soil Science and Agrochemistry, Northwestern Agricultural University, Yangling Shaanxi 712100)

Summary

Self-diffusion coefficients of phosphate in four soils of different texture at varying water content and temperature were measured by the methods of diffusion half-cells and diffusion tube using ^{32}P -labelled KH_2PO_4 solution. The results showed that the apparent self-diffusion coefficient (D_a) in the water unsaturated soils increased with increasing soil water content (W) or decreasing soil water suction (S). The relationship between D_a and W or S could be described by the power equation of $D_a = aW^b$ or $D_a = aS^{-b}$. The effect of soil texture on D_a value was closely related with moisture condition. Under the same water content, the lighter the soil texture the higher the D_a value, and a significant positive correlation of D_a value with clay content was observed. On the contrary, at equal water suction, a negative correlation between D_a value and clay content was found normally. The porous self-diffusion coefficient (D_p) in water saturated soil was higher 10^2 – 10^3 fold than the D_a value of the soil, but there were no differences between the soils. The D_a or D_p value increased with the temperature, and every increase of temperature 10°C within 5°C to 45°C caused the D_a or D_p value to increase by about 10–50%, with an average of 30% or so. Moreover, nonlinear multiple regression analyses were used to investigate the relation between the interaction of soil moisture with temperature and the self-diffusion coefficient of phosphate in soil. The analytical results indicated that the interaction influenced the diffusion of phosphate clearly, and the influencing extent could be defined by the concepts of “water coefficient” and “temperature coefficient” advanced in this paper.

Key words Phosphate, Diffusion coefficient, Soil moisture, Soil texture