

土壤磷扩散规律及其能量特征的研究

II. 施磷量及水肥温相互作用对磷扩散的影响*

徐明岗 孙本华** 张一平

(西北农业大学土化系, 陕西杨陵 712100)

摘 要

非饱和土壤在施磷量 0—400mg / kg 下的磷自扩散系数 (D_a) 随施磷量近线性增加, 但增加的幅度以缓冲性能小的轻质土壤最高。不同土壤磷扩散受土壤水分、施磷量和温度等因素相互作用的影响程度不同, 为表征这种差异利用其多元非线性拟合方程的偏微分, 本文提出了磷扩散率的水分系数、肥料系数和温度系数等概念。在相同条件下, 这些系数均呈现为黄绵土 > 黑垆土 > 塿土 > 黄褐土, 说明水肥温对磷扩散的影响程度与质地密切相关。

关键词 磷, 扩散系数, 施磷量, 水肥温相互作用

国外研究表明, 土壤磷扩散系数一般随施磷量的增加而增大。在施磷量较低时, 因磷与土壤吸附牢固, 解吸能力低, 平衡溶液磷浓度也低, 故此时扩散系数较小^[2], 但由于此时吸附等温线近线性, 因而扩散系数常随施磷量呈线性增加^[5]; 在高浓度时, 磷酸离子与土壤吸附得较松弛, 易解吸, 平衡溶液浓度高, 故扩散系数较大, 且扩散系数随施磷量增加的幅度不同^[7]。Harrell^[5]给矿区土壤施入含磷矿渣, 结果在施磷量 50—300mg / kg 范围内, 磷扩散系数 (D) 随施入量线性增大, 模拟式为 $D = a + bP$ (P —施入磷量, a, b 为拟合常数)。不同施磷量下, 磷扩散系数增加的幅度也受水分含量的影响, 即水肥时常有相互作用^[6]。Mahtab^[6]提出壤土到粘土不同质地土壤磷扩散系数 (D) 与磷肥用量 (P) 和土壤含水量 (W) 之间的关系式为: $D = 49.68 - 0.169P - 0.0001P^2 - 8.685W + 0.371W^2 + 0.023PW$ 。磷肥用量及水肥、水肥温相互作用对磷扩散影响的定量研究, 国内尚未见报道。本文对这一方面加以研究。

1 材料和方法

采用陕西省的 4 种不同质地土壤—黄绵土、黑垆土、塿土和黄褐土为供试样本; 采用扩散池法, 测定

* 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。

** 现在陕西省农科院土肥所工作。

收稿日期: 1995-04-05; 收到修改稿日期: 1995-07-11

不同施磷量下土壤中磷的扩散系数。并借助多元回归分析讨论水肥、水肥温与磷扩散系数的关系及水肥温相互作用对磷扩散的影响。供试土壤基本性质及测定方法见前文^[1]。

2 结果与讨论

2.1 磷施用量对其扩散系数的影响

供试 4 种土壤施入磷 0—400mg / kg, 其自扩散系数 (Da) 随施磷量 (P) 增加而增加 (表 1), 其关系近乎线性 (表 2)。这显然与土壤平衡溶液磷浓度随施磷量增加而增大有关。拟合方程 $Da = a + bP$, 常数 a 为施磷量为 0 (不施磷土壤) 的磷扩散系数, 表 2 中 0—100mg / kg 的拟合 a 值和表 1 实测不施磷的 Da 值在多数情况下较接近, 表明在 0—100mg / kg 施磷范围拟合效果较好。虽施磷 0—100mg / kg 的直线回归方程相关系数通常较 0—400mg / kg 稍低, 但总体看差异不大, 2 个方程均达极显著水平。同时, 实际中施磷量一般不会超过 100mg / kg, 加之实验点在该范围很密集, 拟合的 Da 值准确性相应较高, 因而认为, 实际估测中以应用 0—100mg / kg 的相关方程较好。表 2 中 b 为施磷量增加

表 1 不同温度不同施磷量下磷自扩散系数 $Da(\times 10^{10} \text{cm}^2/\text{s})$

Table 1 Self-diffusion coefficients of phosphate in soils at varying phosphorus rates applied under different temperature

土壤 Soil	含水量 (%) Moisture	温度 (°C) Temperature	施磷量 (mg P/kg) Phosphorus applied					
			0	10	30	50	100	400
黄绵土	15	5	0.216	0.272	0.535	1.47	1.68	6.84
		25	0.366	0.831	2.05	2.46	4.81	14.5
		45	0.870	1.43	2.51	4.72	5.27	19.3
	20	5	0.310	0.455	1.65	1.75	2.37	8.0
		25	1.01	1.14	3.78	4.61	8.69	17.0
		45	1.48	2.17	4.43	6.82	9.25	23.8
黑垆土	16	5	0.113	0.181	0.347	0.64	0.88	1.98
		25	0.855	0.513	1.21	1.60	4.39	8.96
		45	1.44	1.66	3.67	4.30	6.50	13.4
	20	5	0.32	0.438	1.287	1.71	2.54	5.26
		25	0.931	1.36	2.71	3.48	7.82	9.16
		45	1.71	3.42	4.22	7.83	16.4	22.9
瘠土	20	5	0.276	0.542	0.798	0.98	2.32	4.48
		25	0.65	0.696	1.635	2.47	4.42	7.96
		45	1.554	3.95	5.57	6.65	10.6	15.2
	23	25	2.44	2.40	3.52	4.31	9.30	16.4
	黄褐土	20	5	0.085	0.168	0.183	0.21	0.35
25			0.297	0.315	0.509	0.61	1.46	6.28
45			1.50	1.53	1.955	2.38	2.96	11.70
30		25	0.702	0.671	0.911	1.38	2.48	6.86

注: 装土容重 $1.4 \text{g}/\text{cm}^3$ 。

1 个单位时,磷自扩散系数的增加值。由表 2 可知,0—400mg / kg 范围内供试土壤每增加 10mgP / kg, Da 值增加量为 $(0.10—0.54) \times 10^{-10} \text{cm}^2 / \text{s}$, 常温下平均增加量为 $0.3 \times 10^{-10} \text{cm}^2 / \text{s}$ 左右, 低浓度范围 (0—100mg P / kg 土), Da 值增加较快, 常温下平均增加量为 $0.5 \times 10^{-10} \text{cm}^2 / \text{s}$ 左右。

相同施 P 量下, 不同土壤 Da 值增加快慢不同, 在 20% 含水量不同温度下, 各施磷量时黄褐土 Da 值均明显低于其它三种土壤。其它三种土壤除施磷量 10mg / kg 土外, 其顺序基本上是黄绵土 > 黑垆土 > 垆土 (表 2)。这主要是因为质地较粘重土壤磷的吸附能力强, 施磷量相同时, 其吸附磷量较多^[4], 溶液中磷增加相对较少, 因而扩散系数提高较小。

表 2 施磷 0—400mg/kg 下磷扩散系数 Da ($\times 10^{10} \text{cm}^2 / \text{s}$) 与施磷量 (P, mg/kg) 的直线回归方程*

Table 2 Linear regression equations for diffusion coefficient of phosphate, Da ($\times 10^{10} \text{cm}^2 / \text{s}$) vs. phosphorus application rates from 0—400mg/kg soil.

土壤 Soil	含水量 (%) Moisture	温度 (°C) Temperature	0—400mg P/kg			0—100mg P/kg			10—400mg P/kg			
			a	$b \times 10^2$	r	a	$b \times 10^2$	r	a	$b \times 10^2$	r	
黄绵土	15	5	0.206	1.66	0.996	0.219	1.62	0.929	0.203	1.66	0.996	
		25	0.752	3.48	0.998	0.445	4.37	0.995	0.881	3.43	0.998	
		45	1.239	4.52	0.996	1.204	4.62	0.935	1.362	4.58	0.996	
	20	5	0.117	3.18	0.995	0.482	2.12	0.918	0.053	3.20	0.994	
		25	2.24	3.86	0.969	0.860	7.86	0.992	2.650	3.72	0.970	
		45	2.69	5.39	0.991	1.787	8.01	0.980	3.095	5.25	0.993	
黑垆土	16	5	0.249	0.45	0.980	0.130	0.79	0.980	0.295	0.43	0.982	
		25	0.860	2.10	0.975	0.293	3.74	0.956	0.862	2.10	0.973	
		45	2.554	2.81	0.969	1.681	5.35	0.956	2.926	2.70	0.973	
	20	5	0.774	1.17	0.971	0.389	2.28	0.981	0.956	1.12	0.975	
		25	2.361	1.92	0.846	0.649	6.87	0.991	2.838	1.75	0.833	
		45	4.48	5.02	0.905	1.172	14.6	0.987	5.40	4.71	0.899	
垆土	20	5	0.563	1.02	0.973	0.237	1.97	0.984	0.659	0.99	0.973	
		25	1.325	1.74	0.963	0.655	3.68	0.984	1.416	1.71	0.959	
		45	4.353	2.94	0.911	2.508	8.29	0.981	5.288	2.63	0.936	
	23	25	2.936	3.52	0.967	1.730	7.01	0.973	3.102	3.46	0.964	
		20	5	0.138	0.21	0.993	0.121	0.26	0.936	0.154	0.21	0.996
			25	0.115	1.52	0.995	0.278	1.05	0.926	0.012	1.56	0.998
30	45	1.129	2.60	0.995	1.480	1.54	0.990	0.984	2.65	0.996		
	25	0.621	1.57	0.998	0.517	1.87	0.983	0.594	1.58	0.998		

* 全范围 $n = 6$, $r_{0.01} = 0.917$, $r_{0.05} = 0.811$; 分段 $n = 5$, $r_{0.01} = 0.959$, $r_{0.05} = 0.878$ 。

2.2 水肥相互作用对磷扩散的影响

采用非线性回归方程:

$$Da = A + a_1 P + a_2 P^2 + b_1 W + b_2 W^2 + cPW \quad (1)$$

对非饱和土壤同一温度不同含水量 (W, %) 和不同施磷量 (P, mg / kg) 下的磷扩散系数进行拟合, 采用逐步回归法删除不显著项, 所得各土壤多元回归方程拟合参数见表 3。回归关系的三维曲线如图 2 所示。

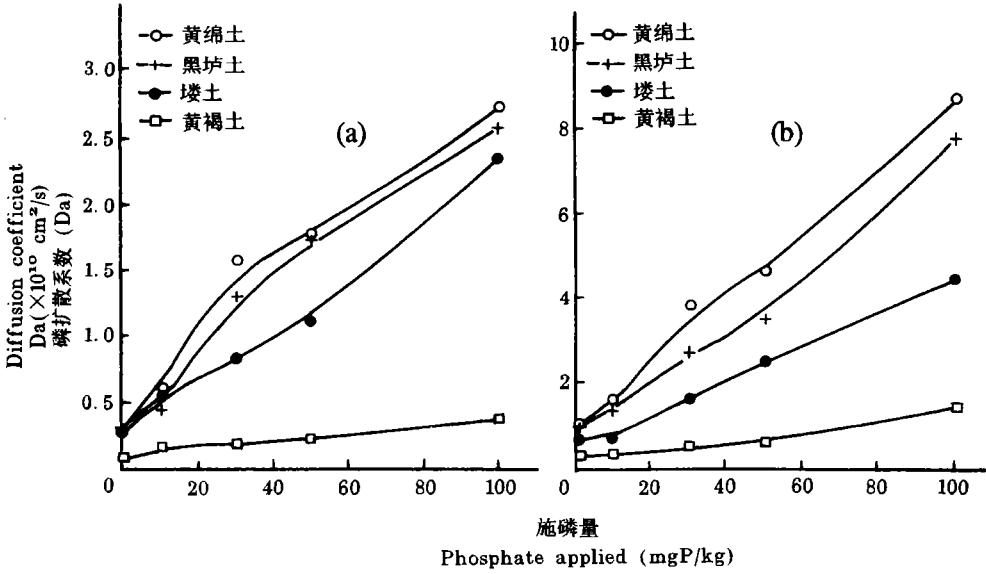


图 1 20% 含水量 5°C (a) 和 25°C (b) 下施磷量与磷扩散系数关系曲线

Fig. 1 Relation curves between the self-diffusion coefficients of phosphate in soils and the phosphorus rates applied under 20% water content at 5°C (a) or 25°C (b)

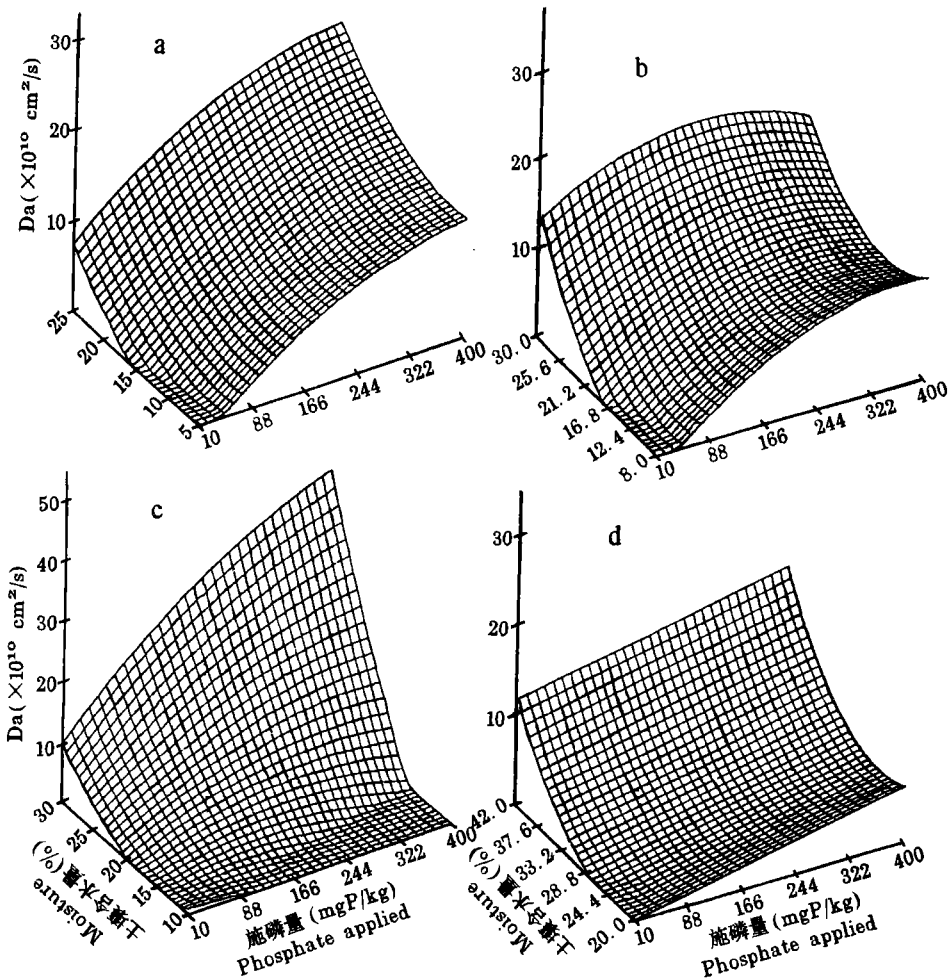
表 3 土壤磷扩散系数 Da ($\times 10^{10}$ cm²/s) 与水 (W, %) 肥 (P, mgP/kg 土) 关系回归方程参数*

Table 3 The parameters of regression equation for the diffusion coefficient, Da ($\times 10^{10}$ cm²/s), vs. soil water content (W, %) and phosphorus applied (P, mg/kg)

土壤 Soil	温度 (°C) Temperature	参数与复相关系数 (R) Parameters and multi-correlation coefficient (R)						
		A	$a_1 \times 100$	$a_2 \times 10^4$	b_1	$b_2 \times 10^2$	$c \times 10^3$	R
黄绵土	5	1.785	2.635	0	-0.234	0.834	2.87	0.991***
	25	-1.584	7.190	-0.8	-0.413	2.994	0	0.986***
	45	-1.279	6.854	-0.5	-0.459	3.576	0	0.984***
黑垆土	5	1.955	-1.06	-0.3	-0.380	1.589	1.63	0.980***
	25	-0.189	8.982	-0.11	-0.672	3.663	-1.22	0.981***
	45	-13.36	12.58	-2.1	0.8027	0	0	0.952***
瘠土	5	3.156	0.934	0	-0.616	2.515	0	0.938***
	25	12.159	-5.49	10	-1.647	5.133	5.83	0.995***
	45	-16.83	8.71	-1.4	0.9806	0	0	0.978***
黄褐土	5	21.573	0.183	0	-1.767	3.506	0	0.980***
	25	23.103	1.578	0	-1.948	3.978	0	0.989***
	45	42.910	2.616	0	-3.478	6.937	0	0.960***

* $n = 17$, $df = 11$, $R_{0.01} = 0.684$, *** 达 1% 显著水平。

各供试土壤多元非线性回归方程的相关系数均达极显著水平 (表 3), 表明采用拟合方



a. 黄绵土 b. 黑垆土 c. 垆土 d. 黄褐土

图2 磷扩散系数(Da)与含水量及施磷量关系曲线(25℃)

Fig.2 Relation curves of the phosphate diffusion coefficient with soil moisture and phosphorus application level at 25℃

程(1)定量表示水分、施磷量与土壤磷扩散系数的关系是可行的。这一方程 Mahtab 等人^[6]曾采用。由所得方程及三维曲线图可知,水肥间存在着相互作用。在水分较少时,需加大施磷量,才能达到同等的扩散量,而土壤含水量增加, D_a 值即养分供应量增加,从而提高了磷肥利用率。从三维图还可得知, D_a 值随施磷量增加的幅度既与磷施用量有关,也因土壤含水量而异; D_a 值随水分变化的快慢,则既与水分含量有关,也与施磷量有关。为说明速率上的这种关系,引入磷扩散水分系数和肥料系数两个概念。

水肥交互作用下磷扩散水分系数 $(\partial D_a / \partial W)_p$ (简称肥交水分系数): 在施磷量一定时,磷扩散系数随水分含量的变化率;水肥交互作用下磷扩散肥料系数 $(\partial D_a / \partial P)_w$ (简称

表4 水肥作用下磷扩散水分系数与肥料系数表达式

Table 4 The formulas of the fertilizer coefficient and the water coefficient of phosphorus diffusion under soil moisture interaction with phosphorus fertilizer

土壤	温度(°C)	水交肥料系数 ($\partial Da/\partial P$) _w	肥交水分系数 ($\partial Da/\partial W$) _p
Soil	Temperature	Fertilizer coefficient	Water coefficient
黄绵土	5	$-0.02635+0.00287W$	$-0.234+0.01668W+0.00287P$
	25	$0.0719-0.00016P$	$-0.413+0.05988W$
	45	$0.06854-0.0001P$	$-0.4592+0.07152W$
黑垆土	5	$-0.01059-0.00006P+0.00163W$	$-0.380+0.0318W+0.00163P$
	25	$0.08982-0.00022P-0.00122W$	$-0.6715+0.07326W-0.00122P$
	45	$0.1258-0.00042P$	0.8027
瘠土	5	0.00934	$-0.6165+0.0503P$
	25	$-0.05487-0.0002P+0.00583W$	$-1.6468+0.1027W+0.00583P$
	45	$0.0871-0.00028P$	0.9806
黄褐土	5	0.00183	$-1.7670+0.07012W$
	25	0.01578	$-1.9475+0.07956W$
	45	0.02616	$-3.4776+0.1387W$

水交肥料系数):在一定含水量下,磷扩散系数随磷肥(P)施用量的变化率。这两个系数粗略地可用差分法求得。其定量关系为方程(1)的偏微分。所得结果(表4)表明,不同温度下不同土壤,这两个系数的变化规律不同。以25°C为例,说明如下。

25°C时,黄绵土、黑垆土、瘠土的水交肥料系数随施磷量增大而减小,而黄褐土的肥料系数为一常数,这说明在0—400mg/kg土施磷量范围内,前三种土壤随施磷量增加磷扩散系数增加速率有所降低,而黄褐土磷扩散系数增加率为线性。这可能是因为前三种土壤为石灰性土壤,施磷量较高时,其与Ca²⁺相互作用,使磷吸附等温线不符合线性所致^[1]。

在相同含水量(20%)和施磷量下,4种土壤的水交肥料系数是黄绵土>黑垆土>瘠土>黄褐土,这主要是因为轻质土壤磷吸附力弱,磷缓冲容量小,施磷量相同时,土壤溶液磷浓度增加较快所致^[4]。

4种土壤的肥交水分系数除45°C两个常数外,均与土壤湿度有关(表4)。土壤水分增加磷扩散系数相应增加,但增加幅度(25°C为例)以黄绵土(0.0599)<黑垆土(0.0733)<瘠土和黄褐土(0.103和0.080)。说明粘重土壤的肥交水分系数受土壤含水量的影响比轻质土壤大。在相同含水量(20%)和较低施磷量下的水分系数以黄绵土>黑垆土和瘠土>黄褐土,这主要是因为(20%)的含水量下,4种土壤水分的有效性依次降低(水吸力依次增大)。

2.3 肥温相互作用对磷扩散的影响

采用非线性回归方程

$$Da = A + a_1P + a_2P^2 + b_1T + b_2T^2 + cPT \quad (2)$$

拟合磷肥施用量、温度与磷扩散系数的定量关系,经逐步回归删除不显著项,所得结果(表5)表明,方程均达极显著水平,说明采用上述方程拟合是可行的。方程的交互作用项系数c均为正值,说明肥料与温度存在着正的交互效应,即施磷量和温度相互作用使磷的扩散系数增加。

表 5 磷扩散系数 (Da , $\times 10^{10} \text{cm}^2 / \text{s}$) 与施磷量 (P , mg / kg 土) 和温度 (T , $^{\circ}\text{C}$) 间的拟合方程参数Table 5 The parameters of multiple regression equation for the diffusion coefficient, Da ($\times 10^{10} \text{cm}^2 / \text{s}$), of phosphate in soil vs. phosphorus applied (P , mg / kg) and temperature (T , $^{\circ}\text{C}$)

土壤 Soil	含水量 (%) Moisture	参数与复相关系数 (R) Parameters and multi-correlation coefficient (R)						$R(n=15)$
		A	$a_1 \times 100$	$a_2 \times 10^4$	b_1	$b_2 \times 10^3$	$c \times 10^4$	
黄绵土	15	-0.3817	1.43	0	0.0949	-1.32	7.0	0.998***
	20	-0.9302	5.35	-0.6	0.0761	0	5.1	0.990***
黑垆土	16	-1.141	2.623	-0.5	0.0658	0	5.7	0.988***
	20	-2.5618	7.845	-1.8	0.1118	0	9.0	0.958***
垆土	20	-0.2944	4.37	-0.8	-0.0929	4.17	4.1	0.993***
黄褐土	20	0.4600	-0.66	1.4	-0.0316	1.05	6.1	0.998***

由表 5 回归方程可知,磷扩散系数既取决于施磷量,也取决于温度。例如,在 20% 含水量下,黄绵土、黑垆土、垆土的磷扩散系数随施 P 量增加而增加,但增加的幅度随施磷量增加而下降,而黄褐土磷扩散系数随施磷量增加在一直缓慢的增加。为定量地说明施磷量和温度对磷扩散的这种影响,仍采用偏微分方法引入磷扩散温度系数 ($\partial Da / \partial T$) _{P} (简称肥交温度系数) 和温肥交互作用下磷扩散肥料系数 ($\partial Da / \partial P$) _{T} (简称温交肥料系数) 两个概念。结果(表 6)表明,在相同含水量(20%),磷扩散温交肥料系数 ($\partial Da / \partial P$) _{T} 既取决于施磷量 (P),也取决于温度 (T),它是 P 和 T 的函数。黄绵土、黑垆土、垆土的温交肥料系数随施磷量增大而减小,而黄褐土的温交肥料系数随施 P 量增加而缓慢增加。这和前述水肥相互作用的结果(表 4)基本一致。供试土壤的温交肥料系数均随温度升高而增加,温度升高 10°C ,该系数增加量为 $0.0041-0.0090 \text{cm}^2 / \text{s} \cdot (\text{mg P} / \text{kg})^{-1}$; 4 种土壤之间差异不大。

表 6 肥温作用下磷扩散肥料系数与温度系数表达式

Table 6 The formulas of the temperature coefficient and the fertilizer coefficient under application phosphorus fertilizer interaction with temperature

土壤 Soil	含水量 (%) Moisture	温交肥料系数 ($\partial Da / \partial P$) _{T} Fertilizer coefficient	肥交温度系数 ($\partial Da / \partial T$) _{P} Temperature coefficient
黄绵土	15	$0.0143+0.0007T$	$0.0949-0.00264T+0.0007P$
	20	$0.0535-0.00012P+0.00051T$	$0.0761+0.00051P$
黑垆土	16	$0.02623-0.0001P+0.00057T$	$0.0658+0.00057P$
	20	$0.07845-0.00036P+0.0009T$	$0.1118+0.0009P$
垆土	20	$0.0437-0.00016P+0.00041T$	$-0.0929+0.00834T+0.00041P$
黄褐土	20	$-0.0066+0.000028P+0.000611T$	$-0.0316+0.00210T+0.00061P$

4 种土壤的肥交温度系数均随施磷量增加而增加(表 6)。在 20% 含水量下,施磷量增加 $100 \text{mg} / \text{kg}$ 土,温度系数增加量为 $0.041-0.090 \text{cm}^2 / \text{s} \cdot ^{\circ}\text{C}$,平均为 $0.061 \text{cm}^2 / \text{s} \cdot ^{\circ}\text{C}$ 。由此算出施磷量 $0-400 \text{mg} / \text{kg}$ 土引起温度系数最大平均变幅为 $0.243 \text{cm}^2 / \text{s} \cdot ^{\circ}\text{C}$ 。黄绵土和黑垆土的温度系数与温度无关,而垆土和黄褐土的温度系数随温度升高略有增加,且

其正效应是瘠土(0.00834)稍大于黄褐土(0.00210);在5—45℃范围内,温度引起温度系数变化的最大值为0.0204cm²/s·℃左右,是施磷量引起温度系数平均变幅值最大值的1/10。故总体来看,肥交温度系数受温度的影响较小。

在一定的温度和施磷量下,温交肥料系数以黄绵土最大,黄褐土最小,黑垆土和瘠土居中,这显然与轻质土壤磷吸附能力弱,土壤磷缓冲容量较小有关^[4],这与上节水肥相互作用所得结论相一致。

水温相互作用对磷扩散的影响分析见前文^[3]。

2.4 水肥温相互作用对磷扩散的影响

当土壤水分(W , %)、温度(T , °C)和施磷量(P , mg/kg)都发生变化时,磷扩散系数(Da , $\times 10^{10}$ cm²/s)则是这三者的函数。采用多项式回归方程,进行逐步回归只保留显著项,得出它们之间的拟合方程为:

$$\text{黄绵土 } Da = 4.4952 - 0.6923W - 0.1406T - 0.01972P + 0.02434W^2 + 0.00233PW + 0.0013PT + 0.01146WT - 0.00004TWP \quad (n = 57, R = 0.977^{**}) \quad (3)$$

$$\text{黑垆土 } Da = 2.5627 - 0.6175W - 0.1532T + 0.04611P + 0.02351W^2 + 0.00183T^2 - 0.00010P^2 - 0.00079PT + 0.00796WT + 0.00009TWP \quad (n = 57, R = 0.970^{**}) \quad (4)$$

$$\text{瘠土 } Da = 4.782 - 0.9969W + 0.08963T + 0.04400P + 0.03422W^2 - 0.00009P^2 - 0.00413PT + 0.00023TWP \quad (n = 44, R = 0.980^{**}) \quad (5)$$

$$\text{黄褐土 } Da = 30.6264 - 2.4943W - 0.1396T + 0.01502P + 0.04697W^2 + 0.00125T^2 + 0.006574WT \quad (n = 46, R = 0.939^{**}) \quad (6)$$

上述方程均达极显著水平,它表征了扩散系数受水分、温度和施磷量综合影响的定量关系。方程(3)–(6)表明土壤磷扩散系数随水分、温度和施磷量的增加而增加,但由于因素之间相互作用的影响,其增加是非线性的。磷扩散系数随水分、温度和施磷量增加的快慢程度即增长率,可用下列偏微分方程来表达。

在水、温、肥交互作用下,磷扩散肥料系数($\partial Da / \partial P$)_{T,W}(简称水温交肥料系数),表征了水分和温度一定时,磷扩散系数随施磷量增加的速率。

$$\left. \begin{aligned} \text{黄绵土 } (\partial Da / \partial P)_{T,W} &= -0.01972 + 0.00233W + 0.0013T - 0.00004WT \\ \text{黑垆土 } (\partial Da / \partial P)_{T,W} &= 0.0461 - 0.0002P - 0.00079T + 0.00009WT \\ \text{瘠土 } (\partial Da / \partial P)_{T,W} &= 0.044 - 0.00018P - 0.00413T + 0.00023WT \\ \text{黄褐土 } (\partial Da / \partial P)_{T,W} &= 0.01502 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

在水、温、肥交互作用下,磷扩散水分系数($\partial Da / \partial W$)_{P,T}(简称肥温交水分系数),为温度和施磷量一定时,磷扩散系数随水分含量变化的速率。

$$\left. \begin{aligned} \text{黄绵土 } (\partial Da / \partial W)_{P,T} &= -0.6923 + 0.04868W + 0.00233P + 0.01146T - 0.00004TP \\ \text{黑垆土 } (\partial Da / \partial W)_{P,T} &= -0.6175 + 0.04701W + 0.00796T + 0.00009P \\ \text{瘠土 } (\partial Da / \partial W)_{P,T} &= -0.9969 + 0.06844W + 0.00023TP \\ \text{黄褐土 } (\partial Da / \partial W)_{P,T} &= -2.4943 + 0.09394W + 0.006574T \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

在水、温、肥交互作用下,磷扩散温度系数($\partial Da / \partial T$)_{P,W}(简称水肥交温度系数),为水分

和施磷量一定时,土壤磷扩散系数随温度增减的速率。

$$\text{黄绵土 } (\partial Da / \partial T)_{P,W} = -0.1406 + 0.0013P + 0.01146W - 0.00004PW$$

$$\text{黑垆土 } (\partial Da / \partial T)_{P,W} = -0.1532 + 0.00366T - 0.00079P + 0.00796W$$

$$+ 0.00009PW \quad (9)$$

$$\text{瘠土 } (\partial Da / \partial T)_{P,W} = 0.08963 - 0.00413P + 0.00023PW$$

$$\text{黄褐土 } (\partial Da / \partial T)_{P,W} = 0.1396 + 0.00251T + 0.006574W$$

方程(7)、(8)、(9)表明,磷扩散率的肥温交水分系数、水温交肥料系数和水肥交温度系数,是水分、温度、施磷量三因素的函数,随这三因素的变化而变化。显然,对三个因素共同影响磷扩散的分析要复杂得多。但是,其所得结论与上述因素两两组合的结果基本一致。同时,在两因素作用对磷扩散影响的分析表明,表征磷扩散的各系数表达式不尽相同,显示出各系数的特异性。因此,这些系数的提出有助于在交互作用下,加深对磷扩散系数变异的理解。但各系数在反映不同质地土壤磷扩散特征上,却有共性,即在各系数相应条件下,各系数基本上呈现黄绵土 > 黑垆土 > 瘠土 > 黄褐土的趋势。表明各系数在表征土壤性状上的一致性。因此,在探讨不同质地土壤磷扩散特征时,可将双因素交互作用派生的6个系数,归类为磷扩散肥料系数、磷扩散水分系数和磷扩散温度系数3类,以便分析讨论。关于各系数表达式特异性的意义有待进一步探讨。

参 考 文 献

1. 叶柄,王虹,1984:应用Langmuir等温式解释我国东北某些土壤对磷酸离子的吸附作用. 土壤学报,第21卷1期,21—27页.
2. 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.
3. 徐明岗,张一平,王锐群,1996: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. 土壤学报,第33卷2期.
4. 徐明岗,张一平,张君常,1994:陕西主要农业土壤磷吸附特性及其热力学性质的研究. 见:中国土壤学会第5届青年土壤科学工作者学生讨论会论文编委会编:现代土壤科学研究. 202—206页,中国科学技术出版社.
5. Harrell, J. W. Jr. and Saced, M., 1977: Effect of leonardite on diffusion of phosphorus in coal mine spoils. Soil Sci., 124(5): 285—290.
6. Mahtab, S. K., Godfrey, C. L., Swoboda, A. R., et al, 1971: Phosphorus diffusion in soils: I.The effect of applied P, clay content and water content. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 35: 393—397.
7. Ranendu Ghosh and Deb, D. L., 1989: Effect of fertilizer phosphorus and temperature on self-diffusion coefficient of phosphorus in four alluvial soils. J. Indian Soc. Soil Sci., 37: 9—14.

**DIFFUSION OF PHOSPHATE AND ITS ENERGETIC
CHARACTERISTICS IN SOILS:
II. INFLUENCE OF PHOSPHORUS APPLICATION RATE AND ITS
INTERACTION WITH SOIL MOISTURE OR / AND TEMPERATURE**

Xu Ming-gang Sun Ben-hua and Zhang Yi-ping

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

Summary

The effect of phosphorus application rate and its interaction with soil moisture or / and temperature on the self-diffusion coefficient (D_a) of phosphate in four textural unsaturated soils was studied. Although a linear increase in the D_a value with increasing phosphorus application rate from 0 to 400 mg per kilogram soil was observed in all the soils, the increase extent was greater in the lighter textural soil or the lower buffer capacity soil at the same phosphate rate applied. The D_a values influenced by the interactions of factors such as soil moisture, temperature and phosphorus fertilizer rate applied in different soils were different. In order to express the difference in quantity, according to the nonlinear multiple regression equations between D_a value and the factors, the "water coefficient", "temperature coefficient" and "fertilizer coefficient" of phosphate diffusion rate were proposed in this paper using the partial differentials of the equations. It was found under the same conditions, these coefficients in the four soils decreased in order as loessal soil > black lu soil > lou soil > yellow cinnamon soil, which indicated that the effects of the interactions between the factors on the D_a value were closely related to soil texture.

Key words Phosphate, Diffusion coefficient, Phosphorus application rate, Interaction of moisture with fertilizer