

红壤的不同物理条件对磷素扩散的影响*

许绣云 姚贤良

(中国科学院南京土壤研究所)

溶质在土壤中的移动涉及土壤中物理、化学和生物学过程。就物理学而论主要与孔隙几何特征及容积含水量密切相关。因此,这一问题是土壤物理学中重要的研究课题之一^[1,3]。

溶质在土壤中移动过程是极其复杂的,因浓度差引起溶质移动为扩散移动。扩散过程达稳恒状态,服从于菲克第一定律:

$$J = -D \frac{dc}{dx}$$

J ——单位时间内通过单位截面积扩散物的量;

$\frac{dc}{dx}$ ——扩散物浓度梯度;

D ——扩散系数(单位浓度梯度下,单位时间内通过单位截面积的扩散量。表示扩散过程快慢的一个尺度)。

菲克第二定律是表示非稳恒状态下的扩散过程:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$$

$\frac{\partial c}{\partial t}$ ——单位时间扩散物质浓度变化率; $\frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$ ——浓度梯度变化率; D ——扩散系数。

由上式可见 D 值在整个溶质移动中是个重要参数。在土壤农化领域中,六十年代对磷钾的扩散及其影响因素已有不少报道^[4,7-9,11]。但由于土壤类型不同,起始和边界条件也不一样,似乎难于得出某些较为肯定的结论。

以往我国一些研究者总是将红壤开垦后“熟化”与土壤容重的降低联系在一起。但事实上,有些土壤(如赣中丘陵地区红壤)却相反。这就使我们联想到,是否因不同土壤的物理条件不同,对养分运行等的影响并不相同有关。为此,我们选择了我国南方三个代表性红壤,以红壤中极易被固定又十分缺乏的磷酸盐作为溶质,研究这些土壤上不同物理状态对其扩散的影响。

一、供试土壤和研究方法

供试土壤采自广东徐闻玄武岩发育的非耕地(23—50厘米)和旱地中肥(0—15厘米)砖红壤;广州

* 本工作得到凌云霄、徐永福、李均强等同志指导和协助,特此致谢。

五山花岗岩发育的非耕地(底层)和旱地低肥(0--11厘米)赤红壤;江西进贤第四纪红色粘土发育的非耕地(20--30厘米)和旱地低肥(0--13厘米)红壤等三个土类的六个土壤,其一般理化性质如表1,其他基本物理性状可参见姚贤良等^[2]对红壤物理性质的研究。

试验方法:称取两份供试土壤,一份加含有³²P的KH₂PO₄溶液,一份仅加等量的非放射性KH₂PO₄溶液,使土壤水分达饱和以上,不时搅拌并置于恒温箱中(25±1℃),风干后磨碎,通过1毫米筛子,按四

表1 供试土壤理化性质

Table 1 Some physical and chemical properties of the investigated soil samples

土 样 Soil sample		pH ¹⁾ (H ₂ O)	有机质(%) Organic matter	游离铁 ²⁾ (Fe ₂ O ₃ ,%) Free iron oxide	<0.001毫米 ³⁾ (%) Clay
砖红壤 Latosol	非耕地 Uncultivated land	5.0	1.69	13.27	57.41
	旱地(中肥) Dry farming land with middle fertility	4.6	1.90	14.70	59.19
赤红壤 Lateritic red soil	非耕地 Uncultivated land	4.7	0.42	4.77	17.89
	旱地(低肥) Dry farming land with low fertility	5.3	1.42	5.03	21.84
红壤 Red soil	非耕地 Uncultivated land	4.9	0.72	4.60	43.52
	旱地(低肥) Dry farming land with low fertility	5.8	1.71	3.42	30.65

1) 凌云霄同志测定; 2) 用连二亚硫酸钠-柠檬酸钠提取; 3) 于德芬同志提供。

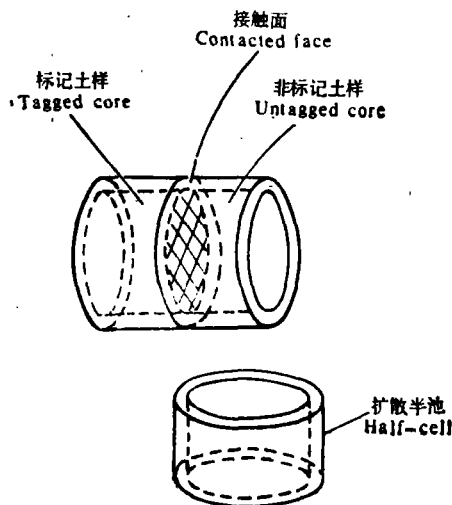


图1 测定自扩散系数扩散半池

Fig. 1 Half-cells used to measure self-diffusion coefficient

个容重处理,每个处理重复四次,把标记和非标记土壤各自装到扩散半池(见图1)中,加水达三个水分含量,置扩散半池于底部有水的密闭容器中,在恒温($25\pm 1^\circ\text{C}$)条件下放置七天,水分基本上平衡,经水分校正后合拢扩散半池,接缝处用胶带纸密封,放在与水分平衡时相同的条件下扩散,七天后分离扩散半池,测定土壤含水量和放射性强度。试验在非稳恒状态下进行,因此按菲克第二定律推导式计算D值^[14]。

二、结果与讨论

(一) 红壤磷素自扩散系数

由表2可见通常情况下(容重1.2,水分含量24.5—27.8%),红壤磷素自扩散系数

表2 供试土壤不同水分、容重条件下磷素自扩散系数(厘米²/秒)

Table 2 Self-diffusion coefficient of P in soils under different condition of soil moisture and bulk density (cm²/sec.)

土 样 Soil sample		水分(%) Moisture	土壤容重 (g/cm ³) Soil bulk density			
			1.20	1.35	1.50	1.65
砖 红 壤 Latosol	非 耕 地 Uncultivated land	17.3	D×10 ⁻¹⁵			
		21.9	244.7	48.7	8.1	7.1
		27.3	354.3	53.4	12.7	11.4
	旱地(中肥) Dry farming land with middle fertility	17.0	3351.2	1554.7	119.5	89.2
		21.7	187.5	57.6	5.7	6.4
		27.8	277.0	108.3	6.4	6.9
赤 红 壤 Lateritic red soil	非 耕 地 Uncultivated land	14.5	D×10 ⁻¹²			
		20.8	3.5	11.9	20.3	13.1
		25.0	13.6	55.6	53.1	51.2
	旱地(低肥) Dry farming land with low fertility	14.5	83.6	751.0	309.3	245.3
		19.8	2.0	2.2	3.8	10.5
		24.5	214.0	234.3	745.7	725.8
红 壤 Red soil	旱地(低肥) Dry farming land with low fertility	15.1	D×10 ⁻¹²			
		19.8	14.6	53.8	68.8	56.7
		24.9	164.3	408.0	532.6	510.5
		15.1	826.0	1902.5	853.7	814.0
		19.8				
		24.9				
土 样 Soil sample		水分(%) Moisture	土壤容重 (g/cm ³) Soil bulk density			
			1.13	1.29	1.43	1.60
红 壤 Red soil	非 耕 地 Uncultivated land	23.3	D×10 ⁻¹²			
		27.3	7.5	12.6	8.8	4.3
		30.1	16.2	30.2	24.6	50.9
			36.4	63.9	50.9	24.5

(D) 是砖红壤 < 红壤 < 赤红壤, 前者比后者要小 1—4 数量级。旱地, 分别为 4.6×10^{-13} , 8.3×10^{-10} 和 1.8×10^{-9} 厘米²/秒。非耕地分别为 3.4×10^{-12} , 3.6×10^{-11} 和 8.4×10^{-11} 厘米²/秒。由于离子在土壤中扩散受孔隙形状、扩散离子与土壤相互作用程度等因子影响, 因而扩散系数实际上是土壤各种参数如土壤含水量、土壤容重、曲折系数等的函数。据 Hira 等^[3]研究, 容重相同时, 砂壤的曲折系数 f 大于粉粘壤 [$f = \left(\frac{L}{L_c}\right)^2$, L 为扩散途径的直线距离, L_c 为扩散途径实际距离]。另外, 据 Porter 等^[40]研究, 在同一含水量时, 壤土的传导系数 $\gamma \left(\frac{L}{L_c}\right)^2$ 大于粘土 (γ 为扩散离子与土壤相互作用系数)。砖红壤不仅质地粘重, 而且游离氧化铁含量很高, 磷被固定更强烈, 使传导系数更受影响从而数值小。磷酸铁的形成, 降低磷的扩散系数, 已有报道^[12]。

由表 2 可见赤红壤和红壤的磷素自扩散系数, 旱地显著地大于非耕地, 其中有机质含量不同, 可能是主要的影响因子。有机质增加了磷素的扩散系数^[1]。

(二) 不同土壤含水量对磷素自扩散的影响

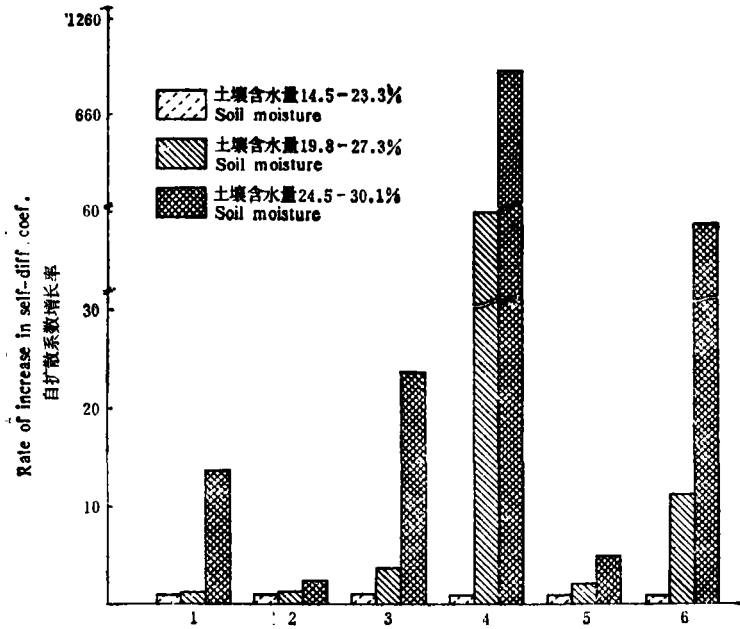
土壤水分含量影响养分离子的有效截面积、扩散通道的曲折程度以及土壤中所发生的物理、化学过程。所以土壤含水量变化, 也同样影响磷素扩散。Olsen 等^[9]报告, 粉粘壤的容积含水量从 0.22 增至 0.55 (或水分吸力从 6 巴减至 < 0.1 巴) 时, 磷素扩散系数从 0.4×10^{-7} 增至 1.55×10^{-7} 厘米²/秒。Mahtab 等^[6]用四个土壤(从壤土到粘土), 当土壤含水量从含有效水 35% 增至 100% 左右时(土壤吸力在 15 巴和 1/3 巴之间), 则磷素扩散系数从 2.3×10^{-10} 、 8.2×10^{-10} 、 15.6×10^{-10} 和 16.0×10^{-10} 厘米²/秒分别增至 9.5×10^{-10} 、 36.4×10^{-10} 、 26.6×10^{-10} 和 38.6×10^{-10} 厘米²/秒。

表 2 表明供试土壤 D 值都随土壤水分的增加而增加, 在所有容重条件下都如此。但容重不同, 其影响程度不一样。赤红壤在容重 1.35 克/厘米³ 左右, 旱地红壤在容重 1.20 克/厘米³ 左右, 水分的影响最大, 而非耕地红壤的水分对 D 的影响在容重上没有什么反映, 这可能是因为其试验的起始含水量高, 水分增加对水膜连续性的增加没有什么意义, 掩盖了容重变化可能产生的影响。容重大约 1.50 和 1.65 时, 其 D 值受水分的影响较小。

水分对不同土壤的 D 值影响也是不一样的。 D 值随水分增加而增加的速率是砖红壤 < 红壤 < 赤红壤(图 2)。传导系数是容积含水量的直线或双曲线函数^[10]。由于砖红壤游离氧化铁含量高, 水分增加时, 传导系数的变化可能与红壤不同, 即可能其 γ 的增加比红壤慢, 使整个传导系数增加没有红壤快, D 值增长率小于红壤。

尽管砖红壤磷素自扩散系数比红壤和赤红壤小得多, 但当土壤含水量由田间持水量的 38% 左右提高到 59% 左右时(容重 1.2 克/厘米³ 左右), 磷素自扩散系数提高了 10 多倍, 由 2.5×10^{-13} 增至 3.4×10^{-12} 厘米²/秒, 与同一容重而含水量为田间持水量 44—46% 左右的红壤和赤红壤同属 10^{-12} 数量级。可以预料, 如果砖红壤含水量提高到田间持水量的 70% 左右, 磷素自扩散系数仍将有大的增加。因此对于土壤中磷素扩散, 水分含量是个非常重要的因子, Mahtab^[6] 用回归方程式表示土壤(从壤土到粘土共四个土壤)磷素扩散系数与土壤含水量的关系, 并用试验数据得到验证。

$$D = 49.68 - 0.169P - 0.0001P^2 - 8.685W + 0.371W^2 + 0.023PW$$



1. 非耕地砖红壤
2. 旱地砖红壤
3. 非耕地赤红壤

4. 旱地赤红壤
5. 非耕地红壤
6. 旱地红壤

1. Latosol, uncultivated land
2. Latosol, dry farming land
3. Lateritic red soil, uncultivated land

4. Lateritic red soil, dry farming land
5. Red soil, uncultivated land
6. Red soil, dry farming land

图2 不同含水量时供试土壤磷素自扩散系数的增长率
(容重约1.2, 含水量是14.5—23.3%时的自扩散系数为1)

Fig. 2 Effect of soil moisture on rate of increase in P self-diff. coef. under 1.2g/cm³ bulk density (the self-diff. coef. at the moisture level of 14.5—23.3% looks as one unit)

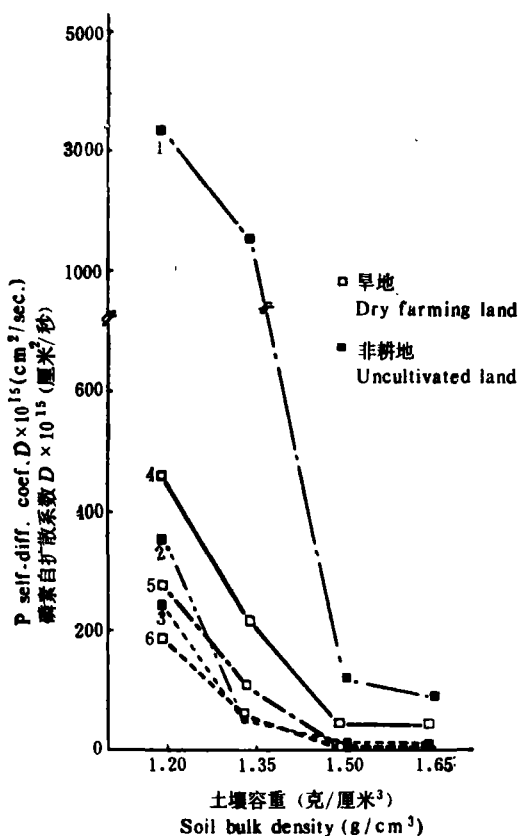
P ——加入土壤的磷的 ppm 数; W ——土壤含水量; D ——扩散系数

上式表明,当土壤水分减少时,为维持相同 D 值,必须增加施磷量,也就是土壤含水量增加,可提高磷肥的利用率。

(三) 土壤容重对磷素自扩散的影响

Hira 等^[1]资料表明,粉壤与粉粘壤容重从 1.25 增至 1.6 克/厘米³时,磷素扩散系数增加,容重再增加至 1.75 克/厘米³时,扩散系数下降。同水分一样,容重也显著地影响扩散通道的曲折状况和扩散离子与固相相互作用程度。上述两种土壤的 f (曲折系数)随容重的增加而增加,直至容重 1.75 克/厘米³; τ 在容重 1.6 克/厘米³为最大,容重 1.75 克/厘米³ τ 又减小。Warncke 等^[2]资料表明:容重变化范围在 1.1—1.6 克/厘米³,五个粉壤的三种水分处理, f 先是随容重的增加而增大,在容重 1.3 克/厘米³时 f 最大,容重再增加则 f 降低;容重 1.5 克/厘米³时 τ 是最大,容重增至 1.6 克/厘米³, τ 急剧下降。

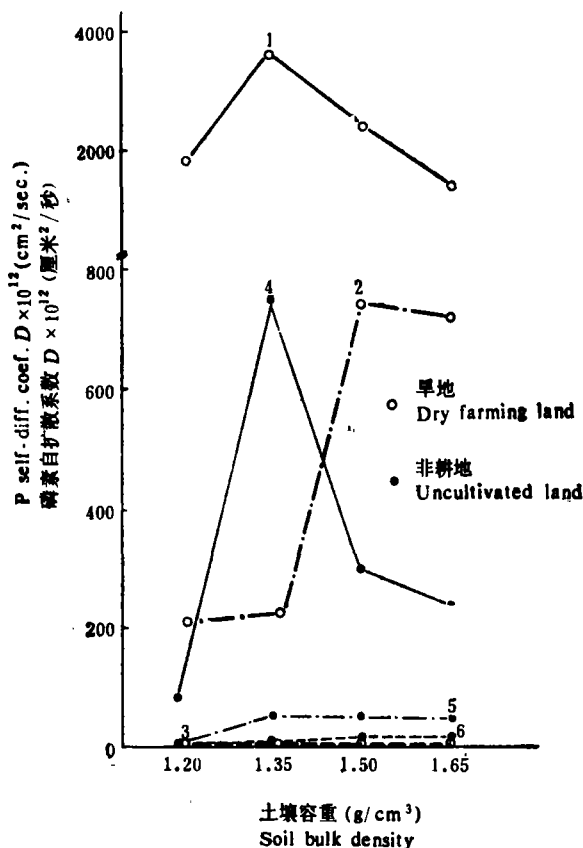
我们供试土壤的不同容重对 D 值的影响,不完全与前人的研究结果相同,如砖红壤磷素自扩散系数在所有水分条件下均随容重的增加而减小(图 3),其原因可能因砖红壤的



- | | |
|----------------|---------------------|
| 1. 土壤含水量 27.3% | Soil moisture 27.3% |
| 2. 土壤含水量 21.9% | Soil moisture 21.9% |
| 3. 土壤含水量 17.3% | Soil moisture 17.3% |
| 4. 土壤含水量 27.8% | Soil moisture 27.8% |
| 5. 土壤含水量 21.7% | soil moisture 21.7% |
| 6. 土壤含水量 17.0% | Soil moisture 17.0% |

图3 土壤容重对砖红壤磷素自扩散的影响

Fig. 3 Effect of soil bulk density on P self-diff. in latosol



- | | |
|----------------|---------------------|
| 1. 土壤含水量 24.5% | Soil moisture 24.5% |
| 2. 土壤含水量 19.8% | Soil moisture 19.8% |
| 3. 土壤含水量 14.5% | Soil moisture 14.5% |
| 4. 土壤含水量 25.0% | Soil moisture 25.0% |
| 5. 土壤含水量 20.8% | Soil moisture 20.8% |
| 6. 土壤含水量 14.5% | Soil moisture 14.5% |

图4 土壤容重对赤红壤磷素自扩散的影响

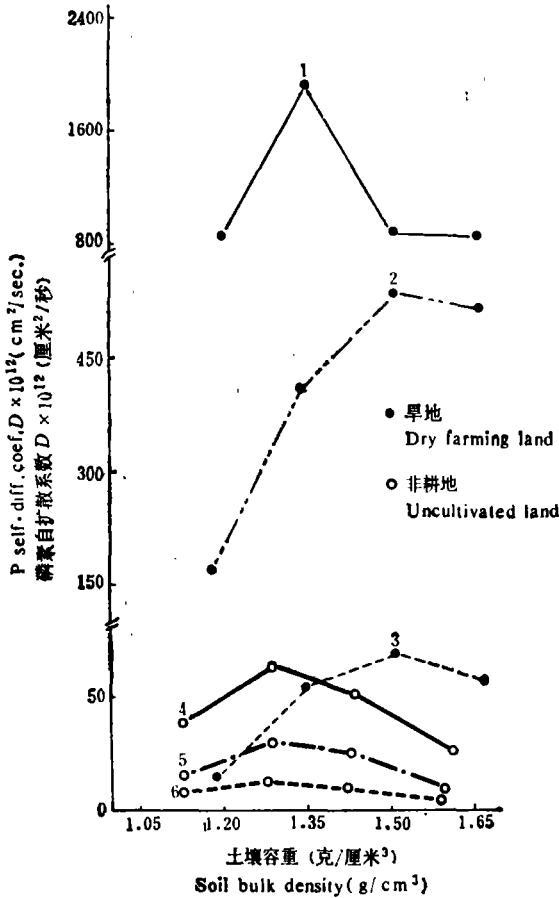
Fig. 4 Effect of soil bulk density on P self-diff. in lateritic red soil

粘粒和氧化铁含量都很高,随着容重的增加, f 和 r 都减小或 f 和 r 的乘积减小(传导系数减小),因此三种水分处理的最大的 D 值都在容重最小时出现。

图4、5表明,红壤和赤红壤磷素自扩散系数在所有水分处理中都是随容重的增加而增加,达最大值后,再增加容重,自扩散系数则减小。土壤含水量高(25%左右), D 值随容重的增加而上升或下降都很快,含水量低(15%左右), D 的升降都较缓慢,但对低含水量的旱地赤红壤,不同容重的影响不明显,可能由于水分含量已成主要障碍因子。

临界容重¹⁾受土壤水分含量、质地和土壤化学性质的影响。由图6可见在本试验容重

1) 本文指 D 值随容重增加而增加达最大 D 值时的容重



- 1. 土壤含水量 24.9% 2. 土壤含水量 19.8%
- 3. 土壤含水量 15.1% 4. 土壤含水量 30.1%
- 5. 土壤含水量 27.3% 6. 土壤含水量 23.2%
- 1. Soil moisture 24.9% 2. Soil moisture 19.8%
- 3. Soil moisture 15.1% 4. Soil moisture 30.1%
- 5. Soil moisture 27.3% 6. Soil moisture 23.2%

图 5 土壤容重对红壤磷素自扩散系数的影响

Fig. 5 Effect of soil bulk density on P self-diff. in red soil

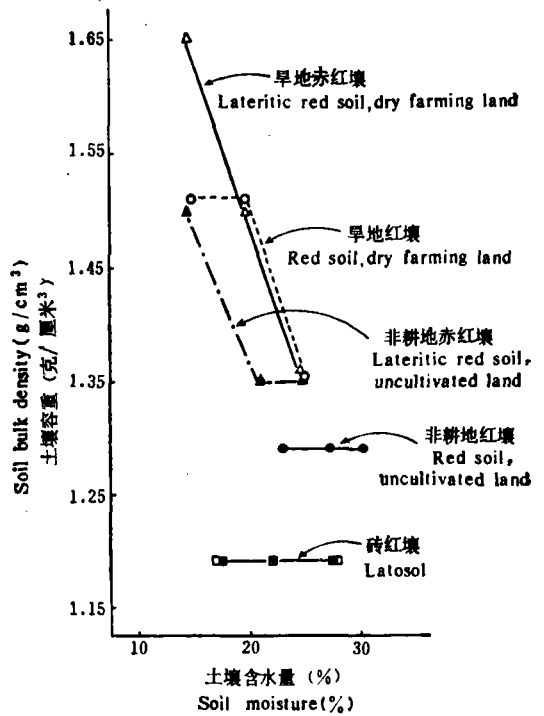


图 6 供试土壤临界容重变化

Fig. 6 Changes of the critical value of soil bulk density

范围内,高、中、低三种水分处理,赤红壤临界容重值分别为 1.35, 1.50 和 1.65 克/厘米³;旱地红壤临界容重分别为 1.35, 1.51 和 1.51 克/厘米³。含水量低时,明显地表现出质地的影响,即粗质地的旱地赤红壤的临界容重(1.65 克/厘米³)大于旱地红壤(1.51 克/厘米³);非耕地红壤临界容重都是 1.29 克/厘米³,不受水分影响,可能是试验的起始含水量高(23.3%)且质地粘重,再增加水分,对扩散通道的影响不大;砖红壤没有发现临界容重,可能是随着容重的增加,单位容积氧化铁增加,使自扩散系数减小。

赣中丘陵地区红壤开垦后,往往随着“熟化度”的提高,容重增加(一般由 1.15 增至 1.35 克/厘米³)。从有利于磷素移动来看,试验结果与生产实践是相一致的。而对于砖红壤,随着容重的增大,似对磷素移动不利。

三、小 结

1. 影响不同红壤磷素自扩散系数除了化学因素外,土壤物理条件有不可忽视的影响。合适的物理条件,可显著提高磷素的 D 值,既能提高磷肥的施用效果,又能提高土壤的供磷能力。如砖红壤在合适的容重、水分条件下, D 值与红壤、赤红壤属同一数量级。

2. 土壤水分是红壤磷素扩散的重要条件,尤其对粗质地红壤,它可以几个数量级的提高红壤磷素 D 值,特别是土壤容重恰当时,水分的影响更大。如赤红壤容重为1.35克/厘米³,水分由14.5增至24.5—25.0%时,所产生的磷的扩散效益是容重1.65克/厘米³时的6—12倍左右。

3. 临界容重值因土壤类型和含水量不同而异。砖红壤 D 值随容重的增加而减小,没有发现临界容重。看来粘质、氧化铁含量高的热带砖红壤性土壤,如何防止压实和保护土壤中水稳性微团聚体的存在,不论对保水还是供肥都有重要意义。赤红壤临界容重深受水分影响,含水量高(25%左右),临界容重约1.35克/厘米³,含水量低(14.5%左右),临界容重约1.50和1.65克/厘米³。当然,临界容重的 D 值,前者比后者大1—2数量级。旱地红壤的情况类似于赤红壤,而非耕地粘质红壤的临界容重似不受水分影响,临界容重都在1.29克/厘米³左右。

参 考 文 献

- [1] 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。
- [2] 姚贤良, 于德芬, 1982: 红壤的物理性质及其生产意义。土壤学报, 第19卷3期, 224—236页。
- [3] Hira, G. S. and Singh, N. T., 1977: Observed and predicted rates of phosphorus diffusion in soils of varying bulk density and water content. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 41: 537—540.
- [4] Lewis, D. G. and Quirk, J. P., 1967: Phosphate diffusion in soil and uptake by plants 1. Self-diffusion of phosphate in soils. *Plant and Soil* 26: 99—119.
- [5] Mehra, O. P. and Jackson, M. L., 1960: Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. *Clays and Clay Minerals*, 7, 317—327.
- [6] Mahtab, S. K., Godfrey, C. L., Swoboda, A. R. and Thomas, G. W., 1971: Phosphorus diffusion in soils: 1. The effect of applied P, clay content, and water content. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 35: 393—397.
- [7] Olsen, S. R., Kemper, W. D. and Jackson, R. D., 1962: Phosphate diffusion to plant roots. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 26: 222—227.
- [8] Olsen, S. R. and Watanabe, F. S., 1963: Diffusion of phosphorus as related to soil texture and plant uptake. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 27: 648—653.
- [9] 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.
- [10] Porter, L. K., Kemper, W. D., Jackson, R. D. and Stewart, B. A., 1960: Chloride diffusion in soils as influenced by moisture content. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 24: 460—463.
- [11] Phillips, R. E. and Brown, D. A., 1965: Ion diffusion: III. The effect of soil compaction on self-diffusion of Rubidium⁻⁸⁶ and Strontium⁻⁹⁰. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 29: 657—661.
- [12] Place, G. A., Phillips, R. E. and Brown, D. A., 1968: Self-diffusion of phosphorus in clays and soils: II. The effect of pH. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 32: 657—660.
- [13] Prihar, S. S. and Misra, C., 1982: Solute movement. *Review of Soil Research in India, Part 1, Trans. 12th Intern. Congr. Soil Sci.*, pp. 36—47.

- [14] Schofield, R. K. and Graham-Bryce, I. J., 1960: Diffusion of ions in soils. *Nature*, 188: 1048—1049.
- [15] Warncke, D. D. and Barber, S. A., 1972: Diffusion of Zinc in soil: II. The influence of soil bulk density and its interaction with soil moisture. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 36: 42—46.

THE EFFECT OF DIFFERENT PHYSICAL CONDITIONS OF RED EARTHS ON THE PHOSPHORUS DIFFUSION

Xu Xiuyun and Yao Xianliang

(*Institute of Soil Science, Academia Sinica, Nanjing*)

Summary

The present paper deals with the influence of different physical conditions of three typical red earths in China on the phosphorus self-diffusion. Experiment was made under three moisture levels including about 17,22 and 28% for the latosol; 15,20 and 25% for the lateritic red earth; 15,20 and 25% for the red earth with low fertility; 23,27 and 30% for the uncultivated red earth and four grades of soil bulk densities being 1.20, 1.35, 1.50 and 1.65 g/cm³ except those of uncultivated red soil. The phosphorus self-diffusion rate was determined by the method of diffusion halfcell using ³²P labelled KH₂PO₄ solution. The preliminary results showed that both the soil moisture and bulk density had significant influence on P-diffusion (*D*) of all the investigated red earths. The greatest was the influence of soil moisture condition on the P-diffusion under appropriate condition of bulk density (1.35 g/cm³ for the lateritic red soil), but it decreased remarkably with the increase in bulk density up to 1.65 g/cm³.

The critical value of bulk density to P-diffusion means that the P-diffusion is sharp changed from increase to decrease under that value. It was shown by the experiment that the critical value of bulk density to P-diffusion was dependent upon soil types and moisture conditions. For the latosol, no critical value of bulk density had been found, the rate of P-diffusion declined gradually along with the increase of bulk density from 1.2 to 1.65 g/cm³ being not influenced by the soil moisture. For the lateritic red earth, the critical value of bulk density was affected by soil moisture; it was about 1.35 g/cm³ under higher soil water content (25%) and 1.5 g/cm³ under lower soil water content (14.5%). The critical value of bulk density of red earth was similar to lateritic red earth; and it amounted to 1.29 g/cm³ for the uncultivated red earth and with less influence of soil moisture.

From results mentioned above, it seems that the protection of water stable aggregate in latosol with clayey texture from deterioration and compacting surface soil of lateritic red earth with coarse texture and red earth are favorable for the increase of the phosphorus movement in soil, and consequently for promotion of the efficiency of phosphorus fertilizer in tropic and subtropic red earths. From viewpoint of management, in order to increase the productivity of tropic soils, the more attention must be paid not only to the chemical, but also to the physical measures.