

水分和容重对土壤 Cl⁻ 扩散的影响

徐明岗* 张一平 孙本华

(西北农业大学土化系, 陕西杨陵 712100)

摘要 用³⁶Cl 标记扩散池法测定了不同含水量及不同容重下4种质地土壤 Cl⁻ 的扩散系数。结果表明, Cl⁻ 扩散系数随土壤水分增加和容重增大而近乎线性增大, 在有效水范围内, 4种土壤增大的幅度为: 黄绵土 > 黑垆土 > 垆土 > 黄褐土; 在容重 1.1~1.6 g/cm³ 范围内, 以 1.3~1.4 g/cm³ 为界, 质地较轻的黄绵土和黑垆土, 在此之前 Cl⁻ 扩散系数随容重增加较慢, 在此之后增加较快; 而质地粘重的垆土和黄褐土则相反。对 Cl⁻ 扩散而言, 水分与容重、容重与温度之间没有交互作用。

关键词 氯离子, 扩散系数, 土壤含水量, 土壤容重

中图分类号 S153.5

研究土壤 Cl⁻ 的扩散系数, 对揭示这些离子在土壤中的运移规律有重要价值。Cl⁻ 扩散受到多种因素的影响, 但其中主要的是土壤水分和容重^[3~6]。国外这方面的报道较多, 而我国目前这方面的研究还极少。本文对不同质地土壤在不同水分和容重下的 Cl⁻ 扩散系数进行研究, 旨在揭示它们之间的相互关系。

1 材料和方法

供试土壤黄绵土、黑垆土、垆土和黄褐土, 分别采自陕西省的米脂、洛川、杨陵和汉中, 其基本性质见表1。

表1 供试土壤基本性质

样号	土壤	pH (水/土 1:1)	有机质 (g·kg ⁻¹)	速效磷 (mg·kg ⁻¹)	颗粒组成(g·kg ⁻¹)		质地
					<0.001 mm	<0.01 mm	
I	黄绵土	8.2	2.9	4.9	85	141	轻壤土
II	黑垆土	7.8	9.1	6.8	137	348	中壤土
III	垆土	8.0	11.4	10.7	221	488	重壤土
IV	黄褐土	6.8	5.8	9.3	386	607	轻粘土

注: 速效磷用 Olsen 法、颗粒组成用吸管法测定。

土壤 Cl⁻ 扩散系数(D)采用³⁶Cl 标记扩散池法测定^[2]。其操作如下: 称取土样2份, 加入 0.005 mol·L⁻¹ CaCl₂ 溶液使土壤 Cl⁻ 达 0.18 g·kg⁻¹, 其中1份再加入³⁶Cl 0.2 μCi·g⁻¹土, 干湿交替3次后, 磨细, 过1 mm 筛。分别称取标记和未标记土壤于培养皿中, 按要求含水量加水平衡后分装入两个扩散半池, 合池密封后恒温扩散1 d, 分池, 将非标记半池土壤烘干磨细, 测定其放射性强度, 由下式计算 Cl⁻ 扩散系数^[5]:

$$D = \pi L^2 (Q_i / Q_\infty)^2 / 4t$$

收稿日期: 1994-10-13

* 现在中科院南京土壤所电化室作博士后, 江苏南京 210008

式中: Q_t/Q_∞ 为扩散 Cl^- 量占总量的分数; L 是扩散池厚度(m); t 是扩散时间(s); π 是常数 3.14.

2 结果与讨论

2.1 土壤水分含量对 Cl^- 扩散的影响

根据土壤水分特征曲线^[7],确定出供试土壤有效水范围为 0.01~1.5 MPa 水吸力下的水分含量区间进行试验.结果(表 2)表明,土壤 Cl^- 扩散系数随水分含量的增加而增大,但增大的幅度因土而异.黄绵土和黑垆土随含水量增加,开始 Cl^- 扩散系数增加较快,随后增加减慢;垆土随含水量增加, Cl^- 扩散系数平稳地增加;黄褐土 Cl^- 扩散系数开始增加非常缓慢,当含水量达 $280 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 左右时,扩散系数随含水量增加较快.这主要是因为黄绵土和黑垆土质地较轻,粘粒含量较少,土壤中较大孔隙较多^[7],随着水分增加,较少的小孔隙较快充满水后,大孔隙充水,有效扩散截面积迅速增加,同时 Cl^- 扩散的实际途径很快缩短即扩散曲折率很快增大,故 Cl^- 扩散系数较快增加;水分含量较高时,可存水的较大孔隙已近于全部充水,有效扩散面积增幅减慢,因而扩散系数增加减慢.质地粘重的黄褐土,小孔隙较多,随水分增加较多的水分进入小孔,水膜厚度增加较慢,加上粘土中扩散途径较砂土中短^[8],故扩散的实际途径随水分增加缩短较小即扩散曲折率增加较小,因而 Cl^- 扩散系数增加较慢;水分含量较高时,大孔充水,扩散截面积较快增加,促进 Cl^- 扩散系数较快增大.

表 2 不同含水量下 Cl^- 的扩散系数*

I		II		III		IV	
含水量 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	$D \times 10^{10}$ ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	含水量 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	$D \times 10^{10}$ ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	含水量 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	$D \times 10^{10}$ ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	含水量 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	$D \times 10^{10}$ ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
50	0.95	80	1.34	120	3.10	200	4.15
70	1.90	100	1.89	150	3.78	240	4.20
110	3.00	160	3.40	180	4.15	280	4.22
130	3.36	180	3.63	200	4.34	290	4.32
150	3.71	210	3.85	230	4.63	300	4.63
200	4.53	—	—	250	4.73	350	4.79

注:温度 25°C ,装土干容重 $1.4 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$.

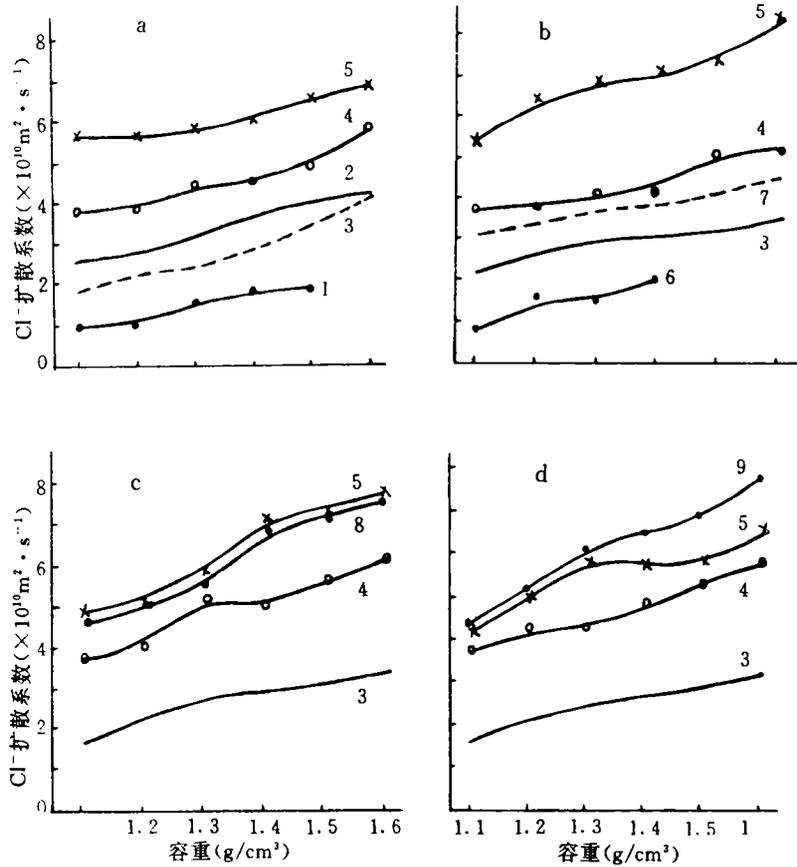
统计表明,在有效水范围(0.01~1.5 MPa)内水吸力下, Cl^- 扩散系数与水分之间的关系可用线性方程较好地模拟(表 3).这和 Barraclough 等^[3]所得结果一致.除黄褐土外,其余土壤半对数方程和幂方程也达极显著水平(表 3),因而这两种方程拟合也是可行的.但其相关系数总体上看并无显著提高,因而认为就 4 个土壤而论并不优于线性模型.由线性回归方程 $D=a+bW$ (表 3)可知, D 随水分含量增加的幅度(b)呈现黄绵土>黑垆土>垆土>黄褐土的趋势,即轻质地土壤随水分增加扩散系数增加得快,粘重土壤增加得慢.这主要是因为粘土的扩散途径较砂土为短^[8].因此,水分增加时,轻壤土实际扩散途径缩短相对较大,因而扩散系数增加较快.

2.2 容重对 Cl^- 扩散系数的影响

容重是土壤肥力的指标之一,是土壤的重要物理性质.容重不同,土壤容积含水量及土壤曲折率随之改变,所以容重对 Cl^- 扩散有直接的影响.Hira^[1]的资料表明,粉壤土和

粉粘壤土容重从 1.25 g · cm⁻³增至 1.6 g · cm⁻³,Cl⁻扩散系数增加,容重再增加到 1.75 g · cm⁻³时,曲折系数及 Cl⁻扩散系数下降。Barraclough^[3]的结果,轻质地土壤容重在 1.4 ~1.8 g · cm⁻³范围内,随容重增加 Cl⁻扩散系数线性下降。通常对粘土,容重达 1.3 g · cm⁻³时,扩散系数就开始下降^[6]。不同研究者所得结果不同,主要是因为临界容重(D值随容重增加而达到最大值时的容重)受土壤质地、土壤化学性质及土壤水分含量影响^[9]。

4种供试土壤在容重 1.1~1.6 g · cm⁻³范围内,Cl⁻扩散系数均随容重增加而增大,但增加的幅度随容重而变化且因土而异(附图)。



附图 不同含水量(W,g · kg⁻¹)下 Cl⁻扩散系数与容重之关系曲线

a. 黄绵土;b. 黑垆土;c. 垆土;d. 黄褐土

- 1. W 70 g · kg⁻¹, 25℃; 2. W 110 g · kg⁻¹, 25℃; 3. W 200 g · kg⁻¹, 25℃;
- 4. W 200 g · kg⁻¹, 25℃; 5. W 200 g · kg⁻¹, 45℃; 6. W 100 g · kg⁻¹, 25℃;
- 7. W 160 g · kg⁻¹, 25℃; 8. W 240 g · kg⁻¹, 25℃; 9. W 300 g · kg⁻¹, 25℃

质地较轻的黄绵土和黑垆土,基本上是在容重 1.1~1.3 或 1.4 g · cm⁻³范围内,随容重增加 Cl⁻扩散系数增加得慢,在此之后增加较快;质地粘重的垆土和黄褐土与此相反,在容重 1.1~1.3 或 1.4 g · cm⁻³范围内增加得快,在 1.3 或 1.4~1.6 g · cm⁻³范围增加较慢。这种规律在容重与 Cl⁻扩散系数分段回归方程参数 b(表 4)中明确显示。表 4

中,除 $200 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 水分含量下黑垆土 5°C 及黄褐土 25°C 外,其余各处理均符合上述规律。试验范围内,随容重增加, Cl^- 扩散系数增大,主要是因为在一定含水量条件下,容重增加,容积含水量增大,水膜连续性增强,扩散的有效截面积增大;另一方面,容重不同颗粒之间的排列不同,造成不同的曲折通路,对 Cl^- 扩散系数有直接的影响^[9]。对于前一种作用,随容重增加一般呈现为稳定的正效应;而对于后一种作用,则依土壤质地不同,其作用的性质(正或负)及大小也异。轻质土壤,随容重增加颗粒之间的排列紧密,缩短了扩散的实际距离,曲折率增大,开始这种作用较小,当容重增加到一定程度时,这种效应增大,因之 Cl^- 扩散系数随容重增加是先慢后快;粘质土壤,其小孔隙较多,容重较小时,颗粒之间的紧密排列缩短扩散途径的作用大,容重较大时,作用小(甚至成为负作用),因而其 Cl^- 扩散系数增加是先快后慢。本试验未观察到 Cl^- 扩散系数的显著降低,可能与容重最大值 ($1.6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$) 设计仍较小有关。

表 4 Cl^- 扩散系数与容重线性回归方程参数

样号	含水量 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	温度 ($^\circ\text{C}$)	容重($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)								
			1.1~1.6			1.1~1.3 或 1.4			1.3 或 1.4~1.6		
			a	b	r	a	b	r	a	b	r'
I	110	25	-1.41	3.54	0.985**	-0.38	2.65	0.993	-1.46	3.58	0.957B
		200	5	-3.47	4.64	0.964**	-0.82	2.50	0.923	-5.54	6.00
		25	-1.10	4.17	0.946**	0.82	2.65	0.870	-1.79	4.60	0.930B
		45	2.09	2.94	0.940**	4.22	1.22	0.886	-0.07	4.35	0.989A
II	160	25	0.18	2.71	0.980**	0.76	2.23	0.944	-1.88	4.05	0.999A
		200	5	-0.51	2.62	0.963**	-1.20	3.21	0.973	0.51	1.90
		25	-0.74	3.79	0.938**	2.01	1.56	0.950	-3.62	5.65	0.921A
III	200	45	-0.73	5.67	0.961**	-0.23	5.32	0.942	-3.35	7.30	0.958A
		5	-2.17	3.54	0.964**	-3.25	4.47	0.978	-0.29	2.25	0.972A
		25	-2.45	5.48	0.962**	-4.91	7.65	0.930	0.24	3.62	0.892B
IV	240	45	-1.77	5.89	0.982**	-2.65	6.61	0.961	1.68	3.65	0.995A
		25	-3.20	6.93	0.972**	-3.42	7.15	0.936	2.10	3.45	0.998A
	200	5	-1.71	3.10	0.981**	-3.41	4.55	0.997	-0.58	2.32	0.978B
	200	25	-0.82	4.07	0.975**	-0.84	4.20	0.974	-2.30	5.04	0.999B
		45	-1.03	4.86	0.918**	-5.06	8.40	0.999	2.78	2.23	0.805B
	300	25	-2.93	6.67	0.980**	-5.46	8.85	0.999	-0.80	5.21	0.941B

注: * 全范围 $n=6$, A、B 分别为分段 $n=3$ 和 $n=4$; $n=3$, $r_{0.05}=0.997$, $r_{0.1}=0.988$; $n=4$, $r_{0.01}=0.990$, $r_{0.1}=0.900$ 。

在容重 $1.1 \sim 1.6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 范围内,不同含水量下 Cl^- 扩散系数随容重增加的幅度(b 值)一般是高含水量 > 低含水量(表 4),说明含水量较高时,容重对增强 Cl^- 扩散系数的作用较大。这和 Sharma 等^[2,9]的研究结果相一致。

2.3 容重和温度相互作用对 Cl^- 扩散系数的影响

在同一容重下, $200 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 含水量、 $5 \sim 25^\circ\text{C}$ 范围内,随温度升高, Cl^- 扩散系数增大(附图)。温度每升高 10°C , Cl^- 扩散系数增加量为 $(0.7 \sim 1.2) \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, 平均为 $1.0 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

容重和温度同时变化时, Cl^- 扩散系数的变化规律可借助多元回归分析,采用模型:

$$D = A + a_1d + a_2d^2 + b_1T + b_2T^2 + cTd \quad (1)$$

对它们之间的关系进行拟合,逐步回归删除不显著项,得到 200 g · kg⁻¹含水量下的回归方程为:

$$\left. \begin{aligned} \text{黄绵土} \quad D &= -2.369 + 3.550d + 0.0815T \quad (n=18, R=0.987^{**}) \\ \text{黑垆土} \quad D &= -2.61 + 3.664d + 0.0974T \quad (n=18, R=0.974^{**}) \\ \text{垆土} \quad D &= -4.48 + 5.019d + 0.0941T \quad (n=18, R=0.973^{**}) \\ \text{黄褐土} \quad D &= -2.619 + 3.652d + 0.0766T \quad (n=18, R=0.964^{**}) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: d 为土壤容重($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$), T 为温度($^{\circ}\text{C}$), D 为 Cl⁻ 扩散系数($\times 10^{10} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)。

上述方程均达极显著水平,表明用其描述容重、温度和 Cl⁻ 扩散系数间定量关系是可行的。方程(2)表明,土壤 Cl⁻ 扩散系数随容重和温度的增加呈线性增大,容重与温度之间没有交互作用。

2.4 容重和水分相互作用对 Cl⁻ 扩散系数的影响

采用非线性多项式模型,对 Cl⁻ 扩散系数($D, \times 10^{10} \text{m}^2/\text{s}$)与容重($d, \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)、含水量($W, \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)的关系进行逐步回归,结果表明它们之间也是简单的线性关系,25 $^{\circ}\text{C}$ 时的回归方程为:

$$\left. \begin{aligned} \text{黄绵土} \quad D &= -0.374 + 0.310d + 0.00305W \quad (n=18, R=0.914^{**}) \\ \text{黑垆土} \quad D &= -0.518 + 0.308d + 0.00285W \quad (n=18, R=0.951^{**}) \\ \text{垆土} \quad D &= -0.887 + 0.580d + 0.00296W \quad (n=12, R=0.976^{**}) \\ \text{黄褐土} \quad D &= -0.603 + 0.591d + 0.00134W \quad (n=18, R=0.958^{**}) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

方程(3)表明,Cl⁻ 扩散系数随土壤容重及含水量的增加大致呈线性增大。对 Cl⁻ 扩散而言,容重与水分之间没有交互作用。

由方程(2)、(3)可知,对于与土壤没有反应的溶质,其在土壤中的扩散主要受到水分、容重、温度等条件本身的影响,水分与容重、温度与容重间的交互作用对扩散系数作用不大。关于水分与温度交互作用的影响,将在另文中讨论。

参 考 文 献

- Hira G S, Singh N T. Observed and predicted rates of phosphorus diffusion in soils of varying bulk density and water content. *Soil Sci Soc Amer J*, 1977, 41(3): 537~540
- Sharma K N, Deb D L. Prediction of ⁶⁵Zn diffusion through ³⁶Cl diffusion in soils of varying water content. *J Nuclear Agr Biol*, 1986, 15(3): 145~149
- Barracough P B, Tinker P B. The determination of ionic diffusion coefficients in field soils. I. Diffusion coefficients in sieved soils in relation to water content and bulk density. *J Soil Sci*, 1981, 32: 225~236
- Bhadoria P B S, Datta B. Effect of moisture tension and bulk density on the self-diffusion coefficient of chloride in kharagpur sandy loam soil. *J Nuclear Agr Biol*, 1979, 8: 114~115
- Meisheri M B, Deb D L. Observed and predicted rates of zinc diffusion in alluvial soils at varying moisture content. *J Indian Soc Soil Sci*, 1986, 34: 451~457
- Warncke D P, Barber S A. Diffusion of zinc in soil. *Soil Sci Soc Amer Proc*, 1972, 36: 39~46
- 张航, 徐明岗, 张富仓等. 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, 1994, 12(2): 32~37
- 凌云霄. 土壤中磷酸离子扩散的研究. 土壤学进展, 1980, (4): 1~8
- 许诱云, 姚贤良. 红壤的不同物理条件对磷素扩散的影响. 土壤学报, 1984, 21(1): 1~9

Effect of Water Content and Bulk Density on the Diffusion of Chloride Ions in Soils

Xu Minggang Zhang Yiping Sun Benhua

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

Abstract The diffusion coefficients of chloride ions in four different textural soils with effective water content and varying bulk density from 1.1 to 1.6 g/cm³ were measured by the method of diffusion-cell using ³⁶Cl labelled CaCl₂ solution. Although a near linear increase in the diffusion coefficient with increasing soil moisture or with increasing bulk density in all the soils was observed, the increase characteristic of different soils was not the same. The increase extent of the diffusion coefficient with increasing soil moisture in the four soils decreased in the order as follows; loessial soil > black Lou soil > Lou soil > yellow cinnamon soil, which showed that the lighter the soil texture, the greater the increase extent. In lighter texture soils or loessial soil and black Lou soil, the increase scope of the diffusion coefficient with increasing bulk density ranging from 1.1 to 1.3 or 1.4 g/cm³ was lower, and from 1.3 or 1.4 to 1.6 g/cm³ was higher. But in heavier texture soils, Lou soil and yellow cinnamon soil, the increase range of the diffusion coefficient with increasing bulk density in the former was higher, and in the latter was lower. Moreover, according to the multiple regression analyses, no interactions of moisture with bulk density and bulk density with temperature were noted.

Key words Chloride ion, diffusion coefficient, soil water content, soil bulk density