

土壤气态水扩散特征初探*

闵安成** 张一平

(西北农业大学农化系, 陕西杨陵·712100)

摘 要 在室内模拟试验的基础上,对旱地不同土层土壤气态水扩散特征进行了探讨,初步推断:①在小于最大吸湿量时,土壤中也存在非气态的水分运移,但气态的水分扩散一般是主要机制;②粘粒含量较高、比表面积较大的土壤中非气态水分扩散所占比例较大;③温度升高,扩散系数增大;④扩散也明显存在滞后现象;⑤对供试土样,在相对水气压约40%的含水量下,气态水分扩散系数达最大值。

关键词 气态水,扩散系数,滞后现象

中图分类号 S152.7

在干旱半干旱地区,因降雨稀少、蒸发强烈而造成的土壤水分匮乏,是限制作物产量的一个重要因素。在土壤比较干燥时,水分的蒸发与土壤中气态水的扩散密切相关。Hanks的测算表明,扩散是水气移动中涉及的主要机制^[1]。关于土壤气态水扩散方面的研究,国内鲜有报道,国外这方面的文章虽然较多,并且许多还涉及到用不可逆热力学的有关理论来论述温度梯度下的水分运动^[2],但真正结合具体试验来进行讨论的,还为数较少。Jackson曾对几种土壤在特定相对水气压下的水气扩散进行了研究^[3,4]。本文在前人工作的基础上,运用模拟稳态扩散试验,探求旱地不同土层的土壤在不同温度下的水气扩散系数,以揭示旱地土壤气态水运动的某些规律特征。

1 材料与方法

1.1 供试土样

土样采自陕西澄城县杨家院村东的试验地,为黄壤土,基本性质见表1。

表1 供试土壤样品的基本性质

土 层	有机质 (g/kg)	容 重 (Mg/m ³)	比表面积 (m ² /kg)	各粒级的百分含量		
				0.25~0.01 mm	0.01~0.001 mm	<0.001 mm
耕 层(A)	9.15	1.29	253 120	60.22	18.03	21.63
紧实层(B)	6.96	1.40	264 340	57.36	19.75	22.76
母质层(C)	4.76	1.30	215 110	66.74	14.68	18.54

1.2 试验方法

1.2.1 稳态扩散试验 将内径2.5 cm,长1 cm的硬塑管用胶带缠结后,按与原土壤相同的容重,装入过2 mm筛的土样,两端用尼龙纱包扎,接入两个扩散室,如图1所示。扩散室底部有圆孔,以便塞入和烧杯底粘连的橡皮塞。两个烧杯中盛入不同浓度的硫酸,以造成水气压梯度(硫酸液浓度分别为10%和70%,所形成的相对水气压在20℃下为

收稿日期:1992-08-25。

* 高等学校博士点基金资助项目; ** 现在西北农业大学干旱半干旱研究中心工作。

94.67%和4.72%,在30℃下为94.90%和5.19%)。将各接合处用软胶密封,放入恒温箱,定期称量烧杯,直到同一时段(3 d)内一个烧杯的增重与另一个烧杯的失重接近相等(差值不大于0.01 g)时即认为达到稳态扩散。烘干法测定各节短管中的土壤含水量,绘制含水量分布曲线($\theta-\chi$ 曲线)。试验在20℃及30℃下进行。

1.2.2 吸附与解吸等温线的测定 称取5 g 105℃烘干样品和与饱和蒸汽平衡的样品于铝盒中铺平,置于底部盛有一定浓度硫酸溶液的干燥器内,放入恒温箱中直到平衡

(相隔3~5 d后铝盒重量变化不大于0.005 g),称重,记录平衡重量,更换硫酸液的浓度,进行下一个相对水气压下的平衡。每个样品3个重复。最末一次平衡称重后,105℃烘24 h,计算各次平衡时的含水量,取其平均值,绘制吸附与解吸等温线($w\%-p/p_0$ 曲线)。温度条件同扩散试验。

1.3 结果计算

(1)总扩散系数 D_{θ} 由下式求出^(3,4):

$$\frac{Q}{A \cdot \Delta t} = -D_{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial x}$$

其中 Q ——时间 Δt (s)内穿过土柱截面 A (cm²)的水分总量(g);

θ ——容积含水量(g/cm³);

x ——距离(cm,以相对水气压高的一端为始端);

$\partial \theta / \partial x$ —— $\theta-x$ 曲线的斜率,用 $\Delta \theta / \Delta x$ 作近似值。

(2)气态水分扩散系数 $D_{w,p}$ 根据以下两式⁽⁴⁾计算:

$$D_{w,p} = D_v \frac{\partial \rho}{\partial \theta}$$

$$D_v = D_a \alpha (\epsilon - \theta / \rho_w)$$

式中 D_v ——以土壤中的充气孔隙为参照系的水气扩散系数(cm²/s)($D_{w,p}$ 以土壤介质为参照系);

D_a ——静空气中的水气扩散系数(cm²/s);

α ——弯曲度(无量纲,取彭曼值0.66^(1,4));

ϵ ——总孔度(% ,可由土壤密度及容重值确定);

θ ——容积含水量(g/cm³);

ρ 和 ρ_w ——分别为气态和液态水的密度(g/cm³)。

D_a 和 ρ_w 可从有关手册中查出, $\partial \rho / \partial \theta$ 可由从吸附等温线上查出的 $\partial(p/p_0) / \partial w$ 换算。

(3)非气态水分扩散系数 D_θ 由下式⁽⁴⁾求出:

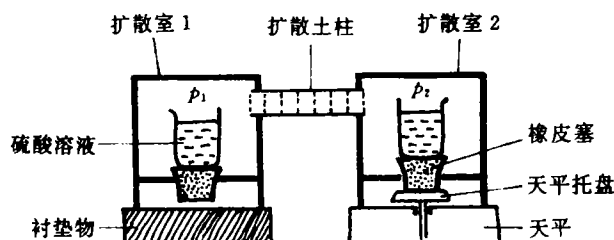


图1 稳态扩散试验装置

$$D_{\theta} = D_{\theta} + D_{vap}$$

2 结果与讨论

2.1 稳态总扩散系数(D_{θ})

由图 2 结果可见, $D_{\theta}-\theta$ 曲线基本上呈峰状(因实验条件所限, 个别的只显示峰的一部分), 即总扩散系数 D_{θ} 先随含水量 θ 增大而增大, 达到某个极大值后又随 θ 增大而减小。这与 Jackson 的结果^[4]相似。 D_{θ} 的值, 大体上在 $2 \times 10^{-5} \sim 16 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$ 之间(个别达 $20 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$), 因样品、扩散类型(吸附或解吸)、温度的不同, 其数值范围有所差异。就各样品 D_{θ} 可能达到的最大值来看, 呈现 $B > A, C$ 的趋势。除 20°C 下的 A 样品外, 吸附 D_{θ} 基本上大于解吸 D_{θ} 。高温下的扩散系数比低温下的更大。

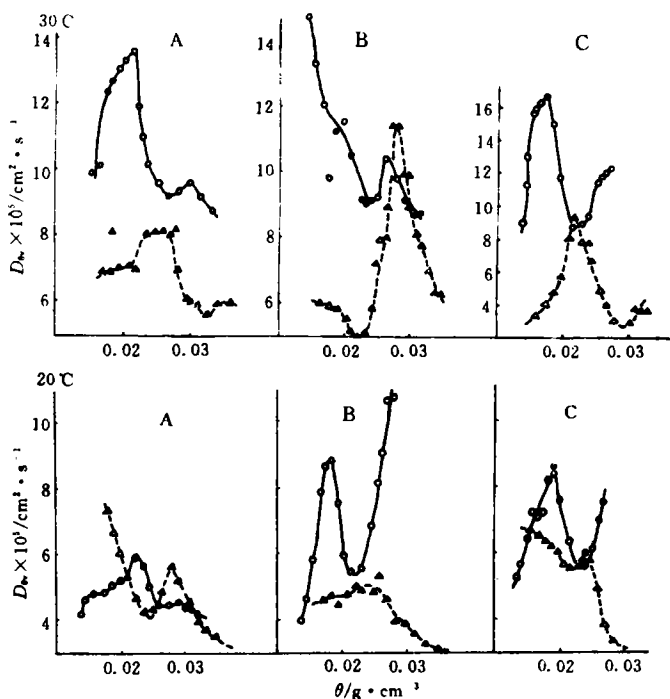


图 2 稳态总扩散系数

○—○—○ 吸附; △—△—△ 解吸

(下图同)

A. 0~14 cm; B. 14~30 cm; C. >30 cm

2.2 气态水分扩散系数(D_{vap})

气态水分扩散系数结果见图 3。明显地, 各曲线呈完整的峰状, 具有最大 D_{vap} 值。 D_{vap} 的变化范围, 大体在 $1 \times 10^{-5} \sim 12 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$ 之间。在温度、含水量相同时, B 层样品的 D_{vap} 比 A, C 层样品的小, 与 D_{θ} 之 $B > A, C$ 的趋势相反。当含水量 θ 小于 $0.02 \text{ g}/\text{cm}^3$ 时, 吸附 D_{vap} 大于解吸 D_{vap} , 而当 θ 超过 $0.02 \text{ g}/\text{cm}^3$ 时, 吸附 D_{vap} 则小于解吸 D_{vap} 。高温下的 D_{vap} 比低温下的大。与图 4 对照可知, 各 D_{vap} 最大值对应的相对水气压, 20°C 下为 20%~

50%, 30℃下约40%.

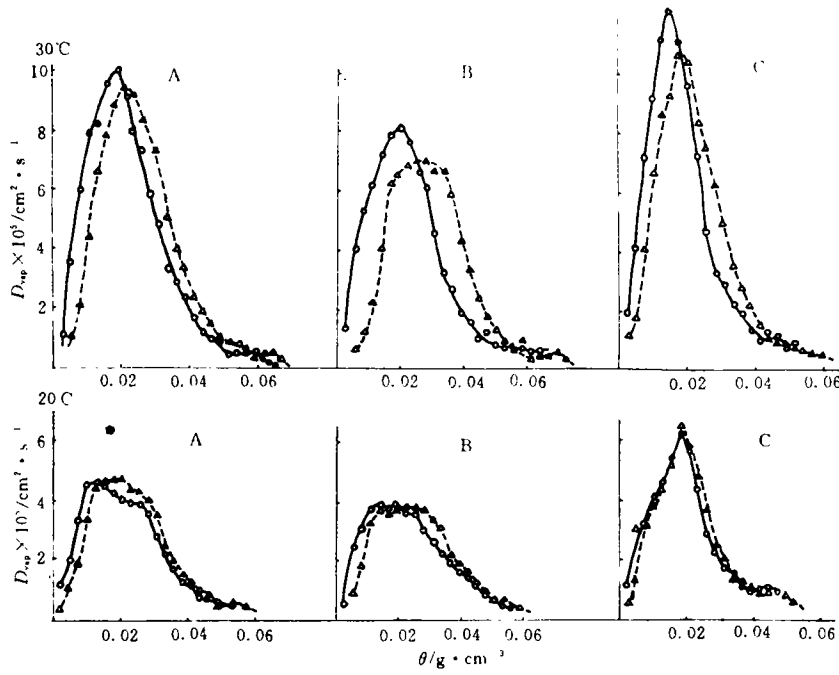


图3 气态水分扩散系数

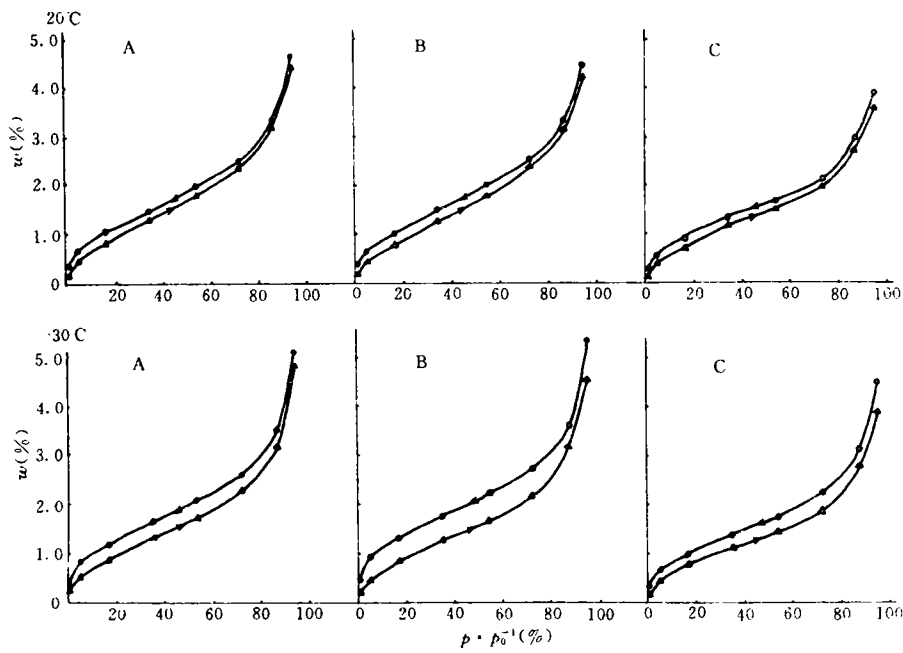


图4 不同土层土样的吸附(箭头向上)及解吸等温线(箭头向下)
 p/p_0 相对水气压; w 平衡含水量(烘干基)

观察两种扩散系数最大值对应的含水量,基本上呈现出 $C < A, B$ (吸附) 或 $C < A < B$ (解吸) 的顺序,尤其是 30°C 下较明显。吸附扩散系数最大值对应的含水量比解吸扩散系数最大值对应的含水量小。

2.3 D_{θ} 与 D_{vap} 的差异及液态扩散系数 (D_{θ})

上述分析表明, D_{θ} 与 D_{vap} 有以下几个相同的特点: ① 温度升高, 扩散系数增大, 由 20°C 升至 30°C 时扩散系数可增加约 1 倍; ② 粘粒含量低、比表面积小的 C 层样品, 其扩散系数可在较低含水量下达到最大值, 相反 B 层样品的扩散系数达到最大值时的含水量则较高; ③ 吸附扩散系数最大值对应的含水量比解吸扩散系数最大值对应的含水量小, 即由于干土吸附开始的扩散在含水量还较低时就达到最大强度, 由湿土解吸开始的扩散在含水量还较高时达最大强度, 吸附扩散与解吸扩散之间也存在滞后现象。

D_{θ} 与 D_{vap} 之间的差异, 主要表现在 B 层样品的 D_{θ} 比 A, C 层样品的略大, 而其 D_{vap} 则明显地比 A, C 的小。这可能是由于粘粒含量、比表面积等方面的差异所致。将所有非气态水分的扩散统称为液态扩散, 由于 B 层样品粘粒多、孔隙细小, 在一定含水量时水分连续程度可能好些^[5], 有利于液态扩散, 而细小的孔隙和长的路径显然不利于气态水分扩散。所以, B 层的 D_{vap} 比 A, C 层的小, 但因 B 层的总扩散中包含较大的液态成分, 故而其总扩散系数 D_{θ} 有时显示出比 A, C 层的 D_{θ} 大的趋势。

以 20°C 下 A, B 两层土样为例, 用 $D_{\theta}-\theta$ 曲线与 $D_{vap}-\theta$ 曲线相比较, 可得出 $D_{\theta}-\theta$ 曲线 (图 5)。显然, B 层的 D_{θ} 比 A 层的大。由吸附 $D_{\theta}-\theta$ 曲线可看出, A 样品在 θ 约为 0.015 g/cm^3 (对应的相对水气压 p/p_0 为 30%)、B 样品在 θ 约 0.013 g/cm^3 (对应 p/p_0 为 28%) 时, 就显示出液态扩散, 其 p/p_0 值比 Rose 估计的液态流开始发生的相对水气压 60%^[4] 小得多。A. Ф. 列别捷夫曾证明在最大吸湿量以下水分只能以蒸汽形式运动^[6], 而本试验则表明在最大吸湿量以下水分的运移也包括非气态水分的扩散, 只不过气态形式的水分扩散占据相当大的比例。

将上述 $D_{\theta}-\theta$ 曲线延长, 可看出当含水量增加至一定数值后, 液态水分扩散会超过气态水分扩散, 即 $D_{\theta} > D_{vap}$ 。

2.4 温度对扩散系数的影响

如前所述, D_{θ} 和 D_{vap} 都随温度升高而增大, 表明温度对扩散系数有显著影响。下面主要分析温度影响总扩散系数 D_{θ} 中气态部分 D_{vap} 的原因, 至于液态部分 D_{θ} 对温度的依赖性, 是由于升温使液态水的粘滞度与表面张力降低, 导致水分子运动速度增大。

先看 D_{vap} 的决定因数。在公式 $D_{vap} = D_a \alpha \left(\epsilon - \frac{\theta}{\rho_w} \right) \frac{\partial p}{\partial \theta}$ 中, 如果忽略温度对弯曲度 α 、总

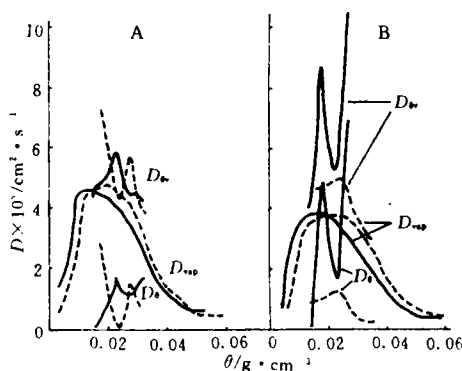


图 5 20°C 下 A, B 两层土样的三种扩散系数
—— 吸附; --- 解吸

孔度 ϵ 、液体密度 ρ_w 的影响,那么在一定含水量下随温度改变的因子只有 D_a 和 $\partial\rho/\partial\theta$. D_a 是静空气中的水气扩散系数,1大气压下由 20℃时的 0.258 cm²/s 升到 30℃时的 0.265 cm²/s,增加率仅为 3.1%. 所以,温度对 D_{vap} 的影响应主要表现在改变 $\partial\rho/\partial\theta$ 上. 以 A 样品为例,从吸附等温线上读取 6 组 θ 和 p/p_0 值,并将 p/p_0 值换算为 ρ ,用来反映扩散土样中顺次的 6 个位置上的含水量和水气密度,求出相邻两点间的 $\Delta\rho/\Delta\theta$ 值(当两点距离很近时, $\Delta\rho/\Delta\theta \approx \partial\rho/\partial\theta$) (表 2),由表 2 可见,温度对 $\Delta\rho/\Delta\theta$ 的影响是很大的,在由 20℃升到 30℃时,表中 5 个 $\Delta\rho/\Delta\theta$ 值的增加率分别为 70%,96%,64%,45%和 25%,增加率最大时的含水量为 0.0129~0.0258 g/cm³,恰是 D_{vap} 最大值所对应的含水量范围. 这说明,在扩散系数最大值对应的含水量范围内,温度对扩散系数的影响更为显著.

表 2 不同含水量下温度对土壤水气密度的影响

k	$\theta(\text{g/cm}^3)$	$p/p_0(\%)$		$\rho(\mu\text{g/cm}^3)$		$\frac{\partial\rho}{\partial\theta}(\times 10^{-4})$	
		20℃	30℃	20℃	30℃	20℃	30℃
1	0.0077	8.30	7.20	1.432	2.180	4.88	8.30
2	0.0129	23.00	21.45	3.968	6.495	5.02	9.86
3	0.0258	60.55	63.45	10.445	19.213	3.17	5.19
4	0.0387	84.25	85.55	14.533	25.905	1.08	1.57
5	0.0516	92.30	92.25	15.922	27.933	0.56	0.70
6	0.0568	94.00	93.45	16.215	28.297		

注: $\frac{\partial\rho}{\partial\theta} = \frac{\rho_k - \rho_{(k-1)}}{\theta_k - \theta_{(k-1)}}$.

3 小 结

1) 在小于最大吸湿量时,土壤中也存在非气态的水分扩散,但气态水分的扩散一般为主要机制;对供试土样,非气态水分扩散显示时的相对水气压约为 30%.

2) 粘粒含量较高、比表面积较大的土壤中非气态水扩散所占比例较大,并且其总扩散系数、气态水分扩散系数达最大值时的含水量也较高.

3) 温度升高,扩散系数增大,尤其当扩散系数处在最大值时,温度的影响更加显著.

4) 吸附扩散系数最大值对应的含水量比解吸扩散系数最大值对应的含水量小,扩散也存在明显的滞后作用.

5) 对供试土样,气态水分扩散系数达最大值时的相对水气压约为 40%.

参 考 文 献

- 1 Hanks R J. Water vapor transfer in dry soil. Soil Sci Soc Am Proc, 1958, 22: 372~374
- 2 Nakano M, Miyazaki T. The diffusion and nonequilibrium thermodynamic equations of water vapor in soil under temperature gradients. Soil Science, 1979, 128(3): 184~188
- 3 Jackson R D. Water vapor diffusion in relatively dry soil: I. theoretical considerations and sorption experiments. Soil Sci Soc Am Proc, 1964, 28: 172~176
- 4 Jackson R D. Water vapor diffusion in relatively dry soil: II. steady-state experiments. Soil Sci Soc Am Proc, 1964, 28: 467~470
- 5 朱祖祥(主编). 土壤学(上册). 北京: 农业出版社, 1983. 121

6 罗戴 A. A. 著;巴逢辰译.土壤水.北京:科学出版社,1964.88

The Characteristics of Vaporous Water Diffusion in Soil

Min Ancheng Zhang Yiping

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

Abstract Based on the in-lab simulation experiments, the characteristics of vaporous water diffusion in soil samples from different layers in rainfed farmland were discussed with some deductions obtained in the following: (1) there exists a water movement of non-vaporous phase in soil in the case of less than the maximum adsorptive capacity, but the vapor diffusion is the main mechanism in general; (2) the non-vaporous water diffusion consists of greater proportion in soil of high clay content and large specific surface area; (3) when the temperature goes up, diffusion coefficient increases; (4) the noticeable hysteresis effect exists in water vapor diffusion; and (5) vapor diffusion coefficients in the testing soil samples reach the maximum value in the case of water content of about 40% of relative vapor pressure.

Key words vaporous water, diffusion coefficient, hysteresis

《食用菌学报》征订启事

《食用菌学报》系由国家科委批准、全国公开发行的学术类刊物。主要为食用菌专业教学和科研人员、生产单位的技术人员及供销外贸系统和领导机关的专业干部提供食用菌遗传育种、驯化栽培、菇房管理、栽培材料、病虫害防治、生理生化及产后加工等方面的最新研究成果。

《食用菌学报》为季刊, 16 开本, 64 页。1994 年出版二期, 全年 10.00 元(含平寄邮资)。欢迎读者踊跃订阅。

汇款地址: 上海市北翟路 2901 号 上海市农业科学院情报所

邮政编码: 201106

开户银行: 农行上海市漕河泾支行北新泾营业所

帐号: 32-043100993

《食用菌学报》编辑部

一九九四年二月