

非饱和土壤水分运动与热力学 函数关系初探*

刘思春 吕家珑 张一平 曾彪**

(西北农业大学资源与环境科学系, 陕西杨凌 712100)

摘 要 在不同的温度条件下,研究了土壤水势对水分运动的影响。结果表明,在同一温度条件下,提高土壤水势可增加土壤非饱和导水率,呈现黄绵土 > 塬土。在相同的土壤含水量条件下,增加温度可提高土壤非饱和导水率,其导水率温度效应值 $\left(\frac{dk}{dT}\right)$ 塬土 > 黄绵土。土壤含水量一定时,随着相对偏摩尔自由能变 $[\Delta(\Delta\bar{G})]$ 和相对偏摩尔焓变 $[\Delta(\Delta\bar{H})]$ 增大,土壤非饱和导水率也增大,并且呈现出黄绵土 > 塬土,拟合得出的相对偏摩尔自由能变 $[\Delta(\Delta\bar{G})]$ 和相对偏摩尔焓变 $[\Delta(\Delta\bar{H})]$ 与土壤非饱和导水率方程,具有较好的适应性。

关键词 热力学函数, 导水率, 土壤水势

中图分类号 S152

近代对土壤水分研究,逐渐进入以“能量概念”为基础领域,热力学是研究能量的学科,热力学方法是一种宏观方法,它能反映土壤组分及力场的变化对土壤水分能量的影响。土壤水分动力学是一种微观方法,从动力学角度出发,研究土壤水分的运移特性,它无法考虑温度及一些其它力场对土壤水分能量及运移特性的影响。如果将土壤水分热力学与土壤水分动力学相结合,研究土壤水分运移特性,将具有更广泛的适用性。

在土壤水分运动研究中,土壤水分运动参数与土壤水势(含水量)关系研究有较多报道。但土壤水分运动与热力学函数关系,国内外报道较少,目前仅有王全九等人关于土壤水分运动与热力学关系的理论性探讨^[1],尚未见试验研究报道。本文试图利用稳定流法测定土壤非饱和导水率,对塬土、黄绵土在不同温度、水势(含水量)条件下,侧重进行非饱和土壤水分运动参数与热力学函数关系的初步研究。

1 供试材料和方法

选择陕西省杨凌塬土和延安黄绵土两种土壤作为供试土样,其基本性质见表 1。
采用稳态流法测定土壤非饱和导水率装置^[2],在直径 80mm,长 138mm 的塑料筒中,

* 国家自然科学基金资助项目(项目编号:48970035)

** 现在贵州省兴义市烟草公司工作

收稿日期:1999-02-24;收到修改稿日期:1999-10-05

表 1 供试土样的基本性质

Table 1 The basic properties of experimental soil

土壤 Soil	深度 Depth (cm)	有机质 Organic matter (g/kg)	比表面 Specific surface (m ² /g)	各级颗粒含量 Particle composition (g/kg)					
				Size:mm					
				1.0~0.025	0.25~0.05	0.05~0.01	0.01~0.005	0.005~0.001	<0.001
瘠土	0~20	11.4	278	9.6	74.0	403.0	136.0	176.0	202.0
黄绵土	0~20	9.15	246	27.0	182.0	525.0	64.0	87.0	116.0

注:有机质—重铬酸钾容量法;比表面—乙二醇醚吸附法;颗粒含量—吸管法

装入通过 2mm 筛孔的土样,做成长 130mm 的人工土柱,土柱容重为 1.35g/cm³,每个土样的土柱配成起始含水量 24%。在塑料筒上的两小圆孔中插入水银张力计(南京土壤研究所物理室 U 型管式),筒两端加盖密封,放入恒温箱内,使张力计的上部露于箱外,同时在箱内放置一温度计,在定温下平衡。平衡后,示差张力计一端的密封盖换为有孔盖,用以控制蒸发速率,使蒸发速率保持相对稳定^[2],土柱中的水即会由于蒸发而向蒸发面流动。用称重法确定土柱内水分含量变化,分别记录同一温度下,含水量为 24% 变为 23.5%、23%、22%、21%、20%、19%、18%、17.5% 时的张力计读数以及各含水量变化阶段所需时间及土壤水分重量减小量。恒温箱用 WMNK-402 型温度指示控制仪控温。

土壤非饱和水的运动规律与饱和水的运动规律一样也符合达西定律。即土壤水流量与作用的水势梯度成正比。在一短水平土柱中,土柱的一端保持相对稳定的蒸发条件,水流便通过一定长度的土柱以稳定流速向蒸发面传去。土壤非饱和导水率公式为^[2]:

$$k = \frac{\Delta W \cdot 24 \cdot L}{\Delta t \cdot S \cdot 2\Delta h}$$

式中: k ——导水率 (cm/d), ΔW ——两次称重差 (g), L ——张力计两陶土头之间距离 (cm), Δt ——两次称重时间间隔 (h), S ——蒸发面积 (cm²), Δh ——两陶瓷头间吸力差 (Pa)

土壤水分热力学函数依据下列各关系式求得^[3]:

$$\Delta \bar{G} = -\bar{V} \cdot \tau, \quad \Delta \bar{S} = \bar{V} \left(\frac{\partial \tau}{\partial T} \right), \quad \Delta \bar{H} = \Delta \bar{G} + T \cdot \Delta \bar{S}$$

式中: \bar{V} ——纯水的偏摩尔体积 (m³/mol), τ ——土壤水吸力 (Pa), T ——绝对温度 (K), $\Delta \bar{G}$ ——大气压下土壤水的相对偏摩尔自由能, $\Delta \bar{S}$ ——大气压下土壤水的相对偏摩尔熵, $\Delta \bar{H}$ ——大气压下土壤水的相对偏摩尔焓。

2 结果与讨论

2.1 供试土壤的水势及导水率

为了研究土壤水分运动与热力学函数的关系,首先研究温度、土壤水势与非饱和土壤水分导水率的关系。

表2 不同温度、水势(含水量)条件下土壤非饱和导水率($k \times 10^{-3} \text{ cm/d}$)
Table 2 Water transmitting rate of unsaturated soil under different temperature and water potential (water content)

土壤含水量 Soil Water content	温度 Temperature (K)														
	288	293	298	303	308										
(%)	Ψ (Pa)	$\bar{\Psi}$ (Pa)	k	Ψ (Pa)	$\bar{\Psi}$ (Pa)	k	Ψ (Pa)	$\bar{\Psi}$ (Pa)	k	Ψ (Pa)	$\bar{\Psi}$ (Pa)	k	Ψ (Pa)	$\bar{\Psi}$ (Pa)	k
17.5	-8765	-80552		-73790	-67895										
18	-84969	-82267	2.487	-78435	-79494	4.523	-71538	-72664	6.657	-66107	-67001	9.276	-59953	-61168	11.864
19	-79967	-82468	3.196	-71738	-75087	4.937	-60748	-66143	6.805	-59923	-63015	9.877	-54169	-57061	12.763
20	-70274	-75121	4.094	-60467	-66103	5.894	-57382	-59065	8.191	-50991	-55457	11.097	-45560	-49865	14.487
21	-56780	-63527	5.249	-49270	-54869	8.002	-46660	-52021	9.542	-40680	-45836	13.565	-35677	-40619	16.067
22	-44666	-50723	6.383	-38776	-44523	9.467	-35371	-41016	11.370	-28970	-34825	15.987	-24913	-30295	23.767
23	-34079	-39373	8.563	-28792	-34284	13.430	-25111	-30241	16.770	-20487	-24729	27.413	-16775	-20844	35.191
23.5	-28064	-31072	15.181	-23986	-26389	22.987	-19734	-22423	26.270	-15682	-18085	36.432	-12685	-14730	47.087
24	-21902	-24987	21.097	-18049	-21018	27.324	-14844	-17289	29.935	-10677	-13180	44.383	-7158	-9923	56.236
17.5	-60780			-56837			-52197			-48561			-45057		
18	-57986	-59288	11.496	-54486	-55662	13.663	-49979	-51088	15.556	-46477	-47519	17.456	-43367	-44212	19.623
19	-51984	-54985	12.564	-48923	-51705	14.492	-44961	-47470	16.521	-41743	-44110	18.389	-37704	-40536	20.581
20	-42672	-47328	13.882	-39964	-44444	16.213	-35989	-40475	18.798	-33492	-37618	20.594	-27987	-32846	23.085
21	-30867	-31770	17.498	-28679	-34322	20.016	-24780	-30385	23.689	-22541	-28017	26.560	-16872	-22430	31.867
22	-19768	-25318	26.573	-17798	-23239	30.917	-14782	-19781	35.901	-12398	-17470	40.021	-18894	-22883	48.011
23	-13023	-16396	35.868	-10856	-14327	42.769	-7812	-11297	48.765	-5650	-9024	55.498	-2841	-5868	68.566
23.5	-9981	-11502	51.873	-7598	-9227	58.698	-5035	-6424	66.861	-3467	-4559	74.597	-1503	-2172	81.492
24	-7487	-8734	60.901	-5513	-6556	68.027	-3829	-4432	75.681	-2789	-3128	83.789	-967	-1235	90.094

黄粘土

表 3 不同温度和水势下土壤水分热力学函数

Table 3 Thermodynamic functions of soil water under different temperature and water potential

温度 Tempe- rature (K)	含水量 Water content (%)	垆土 Lou soil					黄绵土 Cultivated loessial soil				
		Ψ (Pa)	$\Delta\bar{G}$ (J/mol)	$\Delta\bar{H}$ (J/mol)	$\Delta\bar{S}$ (J/mol · K)	k ($\times 10^{-3}$ cm/d)	Ψ (Pa)	$\Delta\bar{G}$ (J/mol)	$\Delta\bar{H}$ (J/mol)	$\Delta\bar{S}$ (J/mol · K)	k ($\times 10^{-3}$ cm/d)
288	17.5	-87565	-1.576	-8.115	-1.26	2.487	-60789	-1.094	-5.126	-0.795	11.496
	18.0	-84969	-1.529	-8.010	-1.24	3.196	-57986	-1.044	-4.788	0.745	12.564
	19	-79967	-1.439	-8.065	-1.22	4.094	-51984	-0.936	-4.680	-0.725	13.882
	20	-70274	-1.265	-7.37	-1.18	5.249	-42672	-0.768	-4.512	-0.716	17.498
	21	-56780	-1.022	-0.629	-1.03	6.383	-30867	-0.555	-4.011	-0.683	26.573
	22	-44666	-0.804	-6.020	-1.00	8.563	-19768	-0.356	-3.236	-0.543	35.868
	23	-34079	-0.613	-5.05	-0.86	15.181	-13023	-0.234	-2.826	-0.511	51.873
	23.5	-28064	-0.505	-4.537	-0.78	21.097	-9981	-0.180	-2.196	-0.422	60.901
	24	-21902	-0.394	-4.224	-0.74		-7487	-0.135	-1.863	0.315	
293	17.5	-80552	-1.450	-8.101	-1.26	4.523	-56837	-1.023	-5.125	-0.795	13.663
	18.0	-78435	-1.412	-8.000	-1.24	4.937	-54486	-0.981	-4.790	0.745	14.492
	19	-71738	-1.291	-8.03	-1.22	6.894	-48923	-0.881	-4.690	-0.725	16.213
	20	-60467	-1.088	-7.30	-1.18	8.002	-39964	-0.719	-4.528	-0.716	20.016
	21	-49270	-0.887	-6.25	-1.03	9.467	-28679	-0.516	-4.032	-0.683	30.917
	22	-39776	-0.716	-6.02	-1.00	13.430	-17798	-0.320	-3.250	-0.543	42.769
	23	-28792	-0.518	-5.03	-0.86	22.987	-10856	-0.195	-2.832	-0.511	58.698
	23.5	-23986	-0.432	-4.534	-0.78	27.324	-7598	-0.137	-2.888	-0.422	68.027
	24	-18049	-0.325	-4.224	-0.74		-5513	-0.099	-1.857	-0.315	
298	17.5	-73790	-1.328	-8.093	-1.26	6.657	-5219	-0.940	-5.112	-0.795	15.556
	18.0	-71538	-1.288	-7.99	-1.24	6.805	-49979	-0.900	-4.774	0.745	16.521
	19	-60748	-1.183	-8.04	-1.22	8.191	-44961	-0.809	-4.683	-0.725	18.798
	20	-57382	-1.033	-7.35	-1.18	9.542	-35989	-0.648	-4.522	-0.716	23.689
	21	-46660	-0.840	-6.29	-1.03	11.370	-24780	-0.446	-4.022	-0.683	35.901
	22	-35371	-0.637	-6.03	-1.00	16.770	-14782	-0.266	-3.246	-0.543	48.765
	23	-25111	-0.452	-5.04	-0.86	26.270	-7812	-0.141	-2.823	-0.511	66.861
	23.5	-19734	-0.355	-4.527	-0.78	29.935	-5035	-0.091	-2.177	-0.422	75.681
	24	-14844	-0.280	-4.243	-0.74		-3829	-0.069	-1.857	-0.315	
303	17.5	-67895	-1.222	-8.10	-1.26	9.276	-48561	-0.874	-5.116	-0.795	17.456
	18.0	-66107	-1.190	-8.01	-1.24	9.877	-46477	-0.837	-4.776	0.745	18.389
	19	-59923	-1.079	-8.05	-1.22	11.097	-41743	-0.751	-4.690	-0.725	20.594
	20	-50991	-0.918	-0.734	-1.18	13.565	-33492	-0.603	-4.542	-0.716	26.560
	21	-40680	-0.732	-6.28	-1.03	15.987	-22541	-0.406	-4.042	-0.683	40.021
	22	-28970	-0.521	-6.01	-1.00	27.413	-12398	-0.223	-3.253	-0.543	55.498
	23	-20487	-0.369	-5.04	-0.86	36.432	-5650	-0.102	-2.829	-0.511	74.597
	23.5	-15682	-0.282	-4.524	-0.78	44.383	-3467	-0.062	-2.183	-0.422	83.789
	24	-10677	-0.192	-4.223	-0.74		-2789	-0.050	-1.868	-0.315	
308	17.5	-62378	-1.123	-8.115	-1.26	11.864	-45057	-0.811	-5.123	-0.795	19.623
	18.0	-59953	-1.079	-8.01	-1.24	12.763	-43367	-0.781	-4.785	-0.745	20.581
	19	-54169	-0.975	-8.06	-1.22	14.487	-37704	-0.679	-4.683	-0.725	23.085
	20	-45560	-0.820	-7.35	-1.18	16.067	-27987	-0.504	-4.508	-0.716	31.867
	21	-35677	-0.642	-6.28	-1.03	23.767	-16872	-0.304	-4.000	-0.683	48.011
	22	-24913	-0.448	-6.02	-1.00	35.191	-8894	-0.160	-3.240	-0.543	68.566
	23	-16775	-0.302	-5.05	-0.86	47.087	-2841	-0.051	-2.823	-0.511	81.492
	23.5	-12685	-0.228	-4.54	-0.78	56.236	-1503	-0.027	-2.183	-0.422	90.094
	24	-7158	-0.129	-4.225	-0.74		-1967	-0.017	-1.865	-0.315	

由表 2 可看出, 温度对土壤水势具有明显的影响, 温度升高土壤水势提高。在研究土壤含水量范围, 随温度升高, 土壤非饱和导水率也随之增大。这是因温度升高, 水的粘滞度和表面张力降低所致^[4,5]。垆土和黄绵土的水势与导水率温度效应总的趋势是随土壤含水量增加, 水势 Ψ 和导水率 k 温度效应 (温度变化 1 单位而引起土壤水势或导水率的变化值之比用 $d\Psi/dt$ 或 dk/dt 表示) 降低。两种土壤比较, 垆土比黄绵土水势温度效应相对较高, 表明垆土水势对温度的反应更为灵敏, 随温度升高土壤水分有效性提高较大, 这与垆土质地较重, 有机质含量较高有关^[6,7]。

土壤水势反映土壤水的能量水平, 土壤水势梯度是非饱和土壤水分运动的驱动力。在一定温度条件下, 研究的含水量范围内, 两种土壤均呈现随土壤水势提高, 导水率增大的变化趋势。在不同温度条件下, 同一土壤含水量, 非饱和土壤水分导水率黄绵土 > 垆土。这与黄绵土质地轻, 大孔隙多等有关^[5,8]。

2.2 土壤水分热力学函数与导水率

2.2.1 供试土样土壤水分热力学函数 本文采用相对偏摩尔自由能 ($\Delta\bar{G}$)、焓 ($\Delta\bar{H}$)、熵 ($\Delta\bar{S}$) 三种热力学函数, 从不同侧面反映土壤水分能量及状态特征。相对偏摩尔焓反映土壤水以热的形式表现出的总能量变化; 相对偏摩尔自由能反映土壤水分有效能量的高低; 相对偏摩尔熵反映土壤水分子的有序程度^[3]。

由表 3 可见, 两种土壤不同水势, 不同温度下的土壤水分热力学函数皆为负值。这表明土壤水的相对偏摩尔自由能、焓和熵均较纯水低, 这与 Low 等人的结论是一致的^[3]。温度对 $\Delta\bar{G}$ 具有明显的影响, 在不同含水量时, 两种土壤皆呈现随温度升高土壤水分 $\Delta\bar{G}$ 的绝对值减小, 即土壤水分偏摩尔自由能增大的特点。

比较两种土壤, 在同一含水量条件下, $\Delta\bar{G}$ 、 $\Delta\bar{H}$ 、 $\Delta\bar{S}$ 值皆是黄绵土 > 垆土。这表明, 在同一含水量条件下, 黄绵土水分自由能高, 水分的总能量也高, 相应的土壤水分子混乱度较大, 有序性较小。相反垆土水分自由能低, 总能量也低, 水分子混乱度小, 有序性较好, 这显然与垆土粘粒含量较高, 比表面较大是密切相关的。

2.2.2 土壤水分相对偏摩尔自由能变与导水率的关系 本试验土柱含水量是从 24% 开始连续蒸发, 不断称重求其导水率, 为探讨导水率与水分热力学函数关系, 引入土壤水分相对偏摩尔自由能变 [$\Delta(\Delta\bar{G})$] 量值, 即以土柱初始含水量 (24%) 为基础, 以土柱蒸发后任

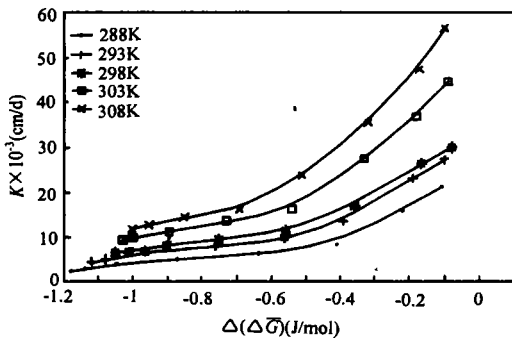


图 1 垆土 [$\Delta(\Delta\bar{G})$] 与导水率 (k) 关系曲线

Fig.1 Relationship curves between [$\Delta(\Delta\bar{G})$] and water transmitting rate (k) in loess soil

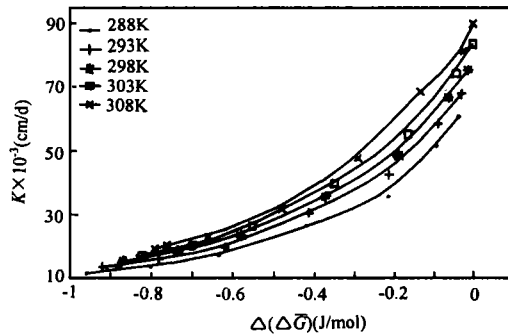


图 2 黄绵土 [$\Delta(\Delta\bar{G})$] 与导水率 (k) 关系曲线

Fig.2 Relationship curves between [$\Delta(\Delta\bar{G})$] and water transmitting rate (k) in cultivated loessial soil

一土壤含水量的偏摩尔自由能($\Delta\bar{G}$)减去土壤含水量 24% 的偏摩尔自由能($\Delta\bar{G}_0$),即为该土壤含水量区间的水分相对偏摩尔自由能变, $[\Delta(\Delta\bar{G})] = \Delta\bar{G} - \Delta\bar{G}_0$ 。

图 1, 2 可见,在一定土壤温度条件下,随着土壤水分相对偏摩尔自由能变 $[\Delta(\Delta\bar{G})]$ 的增大,土壤非饱和导水率升高, $[\Delta(\Delta\bar{G})]$ 与导水率(k)呈正相关,这是由于土壤水分有效能量变化越大,对土壤水分运动推动力影响越大,土壤非饱和导水率(k)值越大。比较埧土、黄绵土可看出,在同一相对偏摩尔自由能变下,黄绵土非饱和导水率大于埧土,这是由于在同一水分运动推动下,黄绵土质地轻,大孔隙多,水分运动受到阻力小;相反,埧土质地重,小孔隙较多,水分运动受到阻力较大。

将导水率($\ln k$)与 $\Delta(\Delta\bar{G})$ 进行回归,得一组 $\ln k$ 与 $\Delta(\Delta\bar{G})$ 经验方程(见表 4)。

表4 土壤导水率(k)与相对偏摩尔自由能变 $[\Delta(\Delta\bar{G})]$ 相关方程

Table 4 Correlation equation between soil water transmitting rate (k) and relative partial molal free energy variation $[\Delta(\Delta\bar{G})]$

土壤	温度	相关方程	相关系数	\bar{k}_1	\bar{k}_2	$\bar{k}_2 - \bar{k}_1$
Soil	Temperature	Correlation	Correlation	$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-3}$
	(K)	equation	coefficient	(cm/d)	(cm/d)	(cm/d)
埧土	288	$\ln k = -3.8504 + 1.6735\beta$	$r = 0.975$	8.2813	8.1061	-0.0752
	293	$\ln k = -3.5414 + 1.6523\beta$	$r = 0.985$	12.1955	12.0390	-0.1565
	298	$\ln k = -3.4546 + 1.5442\beta$	$r = 0.990$	14.4425	14.3144	-0.1281
	303	$\ln k = -3.0559 + 1.6314\beta$	$r = 0.989$	21.0041	20.7988	-0.2053
	308	$\ln k = -2.7820 + 1.7307\beta$	$r = 0.971$	27.1828	27.0683	-0.1145
黄绵土	288	$\ln k = -2.8293 + 1.7728\beta$	$r = 0.992$	28.8319	28.9338	0.1019
	293	$\ln k = -2.6925 + 1.8031\beta$	$r = 0.995$	33.0994	33.2409	0.1415
	298	$\ln k = -2.6005 + 1.8489\beta$	$r = 0.997$	37.7215	38.0129	0.2914
	303	$\ln k = -2.5117 + 1.9218\beta$	$r = 0.998$	42.1130	42.2894	0.1764
	308	$\ln k = -2.4276 + 1.9550\beta$	$r = 0.998$	47.9225	48.0978	0.1753

注: \bar{k}_1 为定温下不同含水量土壤的导水率测定平均值; \bar{k}_2 为定温下不同含水量利用 $\ln k$ 与 $\Delta(\Delta\bar{G})$ 关系式计算的导水率平均值; $\beta = \Delta(\Delta\bar{G})$

从相关方程可看出,两种土壤的 $\ln k$ 与 $[\Delta(\Delta\bar{G})]$ 均达到极显著的正相关,同时由表 4 可见,在各温度条件下,导水率(k)的计算值与测定值之间的差异很小(含水量 $\leq 21\%$)。例如:含水量为 20% 时,298K 埧土 $k_2 - k_1 = -0.382 \times 10^{-3}$ (cm/d),黄绵土 $k_2 - k_1 = -0.762 \times 10^{-3}$ (cm/d)。这说明在试验温度条件及一定含水量范围内, k 与 $[\Delta(\Delta\bar{G})]$ 的经验方程有良好的适应性,可由土壤水分相对偏摩尔自由能变推求相应的土壤导水率。

2.2.3 土壤水分相对偏摩尔焓变与导水率的关系 与 $[\Delta(\Delta\bar{G})]$ 类同,土壤水分相对偏摩尔焓变 $[\Delta(\Delta\bar{H})]$ 是指任一土壤含水量相对偏摩尔焓($\Delta\bar{H}$)减去土壤含水量 24% 的相对偏摩尔焓($\Delta\bar{H}_0$),即 $\Delta(\Delta\bar{H}) = \Delta\bar{H} - \Delta\bar{H}_0$ 。

从图 3, 4 可以看出,在同一土壤温度条件下,随着土壤水分相对偏摩尔焓变 $[\Delta(\Delta\bar{H})]$ 的增大,土壤非饱和导水率也增大, $[\Delta(\Delta\bar{H})]$ 与导水率(k)呈正相关。这与土壤水分总能量变化越大,驱动土壤水分运动的能量越大有关。并且在同一相对偏摩尔焓变条件下,黄绵土非饱和导水率大于埧土。

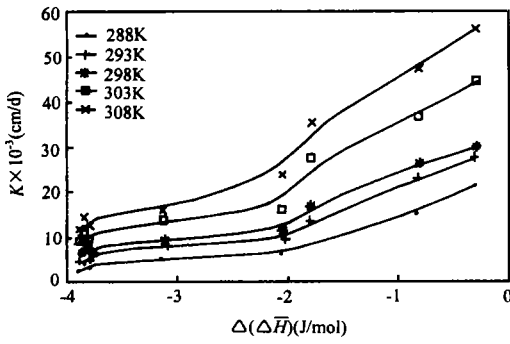


图3 壤土 [Δ(ΔH̄)] 与导水率 (k) 关系曲线

Fig.3 Relationship curves between [Δ(ΔH̄)] and water transmitting rate (k) in lou soil

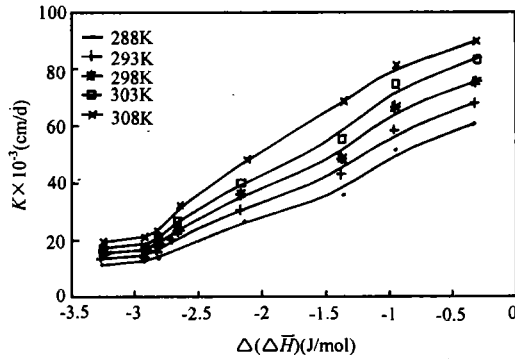


图4 黄绵土 [Δ(ΔH̄)] 与导水率 (k) 关系曲线

Fig.4 Relationship curves between [Δ(ΔH̄)] and water transmitting rate (k) in cultivated loessial soil

与 $\ln k - [\Delta(\Delta\bar{H})]$ 关系式相同, 得出导水率 ($\ln k$) 与 $[\Delta(\Delta\bar{H})]$ 的经验方程见表5。

表5 土壤导水率 (k) 与相对偏摩尔焓变 [Δ(ΔH̄)] 相关方程

Table 5 Correlation equation between soil water transmitting rate (k) and relative partial molal enthalpy variation [Δ(ΔH̄)]

土壤	温度	相关方程	相关系数	\bar{k}_1	\bar{k}_3	$\bar{k}_3 - \bar{k}_1$
Soil	Temperature	Correlation equation	Correlation coefficient	$\times 10^{-3}$ (cm/d)	$\times 10^{-3}$ (cm/d)	$\times 10^{-3}$ (cm/d)
	(K)					
壤土	288	$\ln k = -3.7880 + 0.5125\alpha$	$r = 0.975$	8.2813	8.1668	-0.1145
	293	$\ln k = -3.4864 + 0.4598\alpha$	$r = 0.973$	12.1955	12.0028	-0.1927
	298	$\ln k = -3.4007 + 0.4098\alpha$	$r = 0.980$	14.4425	14.2936	-0.1489
	303	$\ln k = -3.0003 + 0.4216\alpha$	$r = 0.978$	21.0041	20.7571	-0.2470
	308	$\ln k = -2.7267 + 0.4274\alpha$	$r = 0.988$	27.1828	26.9379	-0.2449
黄绵土	288	$\ln k = -2.4739 + 0.6125\alpha$	$r = 0.988$	28.8319	28.5134	-0.3185
	293	$\ln k = -2.3488 + 0.5984\alpha$	$r = 0.985$	33.0994	32.8620	-0.2374
	298	$\ln k = -2.2313 + 0.5907\alpha$	$r = 0.981$	37.7215	37.5130	-0.2085
	303	$\ln k = -2.1292 + 0.5887\alpha$	$r = 0.980$	42.1130	41.9326	-0.1804
	308	$\ln k = -2.0176 + 0.5795\alpha$	$r = 0.969$	47.9225	47.7464	-0.1761

注: \bar{k}_1 为定温下不同含水量土壤的导水率测定平均值; \bar{k}_3 为定温下不同含水量利用 $\ln k - [\Delta(\Delta\bar{H})]$ 关系式计算的导水率平均值; $\alpha = \Delta(\Delta\bar{H})$

从表5经验方程可以看出, 两种土壤的 $\ln k$ 与 $[\Delta(\Delta\bar{H})]$ 均达显著及极显著的正相关, 同时由表5可见, 在各温度条件下, 导水率 (k) 的理论计算值与测量值之间的差异很小 (含水量 $\leq 21\%$), 这说明在试验温度与一定土壤含水量范围, $\ln k$ 与 $[\Delta(\Delta\bar{H})]$ 的相关方程有较好的适应性。为试验条件下 k 与 $[\Delta(\Delta\bar{H})]$ 的互求提供了方便。

参 考 文 献

1. 王全九、王文焰. 土壤水分运移热力学特性的研究. 水土保持学报. 1994, 8(1): 56~62
2. 陈志雄、于德芬. 稳定流法测定土壤非饱和导水率. 重庆全国土壤物理专业委员会学术论文集. 1989. 112~118

3. 张一平,白锦麟,张君常等. 土壤水分热力学函数研究. 西北农业大学学报, 1990, 18(3): 43~50
4. 袁剑舫. 土壤水分特征曲线和土壤水分的滞后现象. 土壤通报, 1986, (1): 43~47
5. 张一平,白锦麟,张君常等. 温度对土壤水势影响的研究. 土壤学报, 1990, 27(4): 454~458
6. 刘思春,张一平,白锦麟等. 温度梯度对非饱和土壤水分运动的影响. 西北农业大学学报, 1994, 22(1): 44~49
7. 易福华. 地膜内由温度梯度引起的土壤水分运动及其应用. 中国农业科学, 1994, 21(1): 27~31
8. [澳] T. J 马歇尔, J. W 霍姆斯著. 土壤物理学. 北京: 科学出版社, 1986. 114~156

STUDY ON RELATIONSHIP OF WATER MOVEMENT AND THERMODYNAMIC FUNCTION IN UNSATURATED SOIL

Liu Si-chun Lu Jia-long Zhang Yi-ping Zeng Biao

(Department of Resources and Environmental Science, Northwestern Agricultural University, Yangling, Shaanxi 712100)

Summary

Effect of water movement by soil potential under different temperature was studied. The results showed that unsaturated water transmitting rate was rising with the increasing of soil potential in case that temperature was constant, the rising value in cultivated loessial soil was larger than that in lou soil, and was rising with temperature rising in case that soil water content was constant, the value of temperature effect of unsaturated water transmitting rate $\left(\frac{dk}{dt}\right)$ in lou soil was larger than that in cultivated loessial soil. Water transmitting rate of unsaturated soil also increased with the increasing of relative partial molal free energy variation, $[\Delta(\Delta\bar{G})]$, and relative partial molal enthalpy variation, $[\Delta(\Delta\bar{H})]$, in case that soil water content was constant. The increasing of water transmitting rate in cultivated loessial soil was larger than that in lou soil. The equations were regressed between $[\Delta(\Delta\bar{G})]$ and $[\Delta(\Delta\bar{H})]$ and k , they had better suitable.

Key words Thermodynamic functions, Water transmitting rate, Soil potential