

DOI: CNKI: 32. 1309. P. 20110709. 1619. 005

温度对土壤水分运动基本参数的影响

高红贝^{1,2}, 邵明安^{2,3}

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 为探讨土壤温度变化对土壤中水分运动过程和运动参数影响机理, 在室内实验的基础上结合理论探讨, 对不同温度条件下实验土壤的水分特征曲线、导水率、扩散率和比水容量等土壤水分运动基本参数的温度效应进行了研究分析。结果表明: 土壤温度对土壤水分性质及土壤结构性影响显著, 二者共同作用使得土壤水分运动过程发生改变, 且其影响效应可通过土壤水分动力学参数的温度效应进行定量描述; 温度变化对土壤水分性质的影响主要造成土壤中水分动能和势能的改变, 对土壤结构性的改变主要作用于土壤水分的势能; 不同质地土壤受温度变化影响具有明显差异; 砂性轻质土壤, 土壤水分运动过程中可忽略温度变化对其结构造成的影响, 但粘粒含量较多的粘重土壤则应予以考虑。

关键词: 温度; 土壤水分; 导水率; 土壤入渗

中图分类号: S152.7

文献标志码: A

文章编号: 1001-6791(2011)04-0484-11

近年来, 随着全球淡水资源紧缺和农业高耗水问题的持续存在, 如何能够合理高效的利用有限的土壤水资源成为相关领域中亟待解决的重大问题^[1]。研究表明, 土壤中水分的运动与保持受到诸如土壤植被状况、土壤理化性质、土壤环境状况以及气候等众多因素的综合影响, 其中温度作为重要的环境气候因子之一, 其变化对土壤水分运动的影响作用, 历来受到许多研究者的重视^[2]。多年来国内外一些研究人员就温度变化对土壤水分运动过程及其影响机理开展了大量研究并取得长足进展。Haridasan等^[3]、Navak等^[4]研究表明, 土壤水分特征曲线 $h(\theta)$ 及土壤导水率 $K(\theta)$ 明显受到温度变化的影响, 并得出土壤水分温度效应取决于土壤水分特性及其热效应; Nimmo等^[5]在此基础上利用表面张力-粘滞流理论(STVF)和 $G(\theta)$ 经验因子模型对土壤水分温度效应进行描述并被广泛认可, Zhang等^[6]分析土壤饱和水流及土壤水分吸渗参数对温度变化的敏感性时引入表面活化能概念, 认为其敏感度与土壤水分表面活化能呈线性相关, 而与绝对温度呈负相关; Cheng等^[7]研究认为土壤水分对土壤温度变化有着重要影响, 并且得出对温度变化在结冰期比融冰期更显著; Christopher等^[8]认为明确土壤水分与温度的相互作用对地表能量平衡及相关模型建立具有重要意义。土壤水分的温度效应研究也引起许多国内研究人员的重视。梁冰等^[9]对非等温条件下土壤水分运动过程进行了解析分析, 认为温度对水分运动过程的影响不可忽略。辛继红等^[10]认为温度对水分运动和保持有着显著影响。夏自强^[11]、李慧星等^[12]通过野外试验认为在地面无水补给的情况下土壤中含水量的变化与土壤温度日变化密切相关, 并认为温度变化是土壤水分运动主要影响因素之一。王风等^[13]通过对黑土野外观测认为在冻融交替过程中在深度为2 m范围内造成上层水分高于下层的主要原因是温度梯度, 且土壤固态含水量是土壤温度与土壤含水量共同作用的结果; 这些重要研究成果对土壤水分运动与保持受到温度的影响提供了重要事实和理论依据, 但对于不同的水分运动参数的温度效应大小及影响机理并没给出较详细的解释。本文在

收稿日期: 2010-09-08; **网络出版时间:** 2011-07-09

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20110709.1619.005.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(90502006)

作者简介: 高红贝(1986-), 男, 山西临汾人, 硕士研究生, 主要从事土壤物理学研究。

E-mail: gaohongbeifsh@126.com

通信作者: 邵明安, E-mail: mashao@ms.iswc.ac.cn

室内试验的基础上结合理论分析,分析了温度变化对土壤水分运动基本参数的影响途径及影响机理,以期为相关研究特别是水资源严重缺乏的寒区旱区农田土壤水分管理提供参考依据。

1 试验材料与方法

1.1 供试材料

实验所用土壤为取自黄土高原的杨凌塬土和安塞黄绵土,取样时间为2008年9月,取样时除去样点处表层杂物后挖取深度为0~20 cm间的土壤;取样后将同种供试土壤不同取样点样品充分混合并带回实验室自然风干、研磨并过1 mm筛,由经典烘干法(105℃下烘干时间大于8 h)测定其初始含水率。利用MS2000激光颗粒分析仪分析实验土壤的机械组成(表1)。

表1 供试土样的基本物理性质
Table 1 Basic properties of tested soils

土壤	采集地点	取样深度/cm	各粒级含量/%		
			砂粒(1~0.05 mm)	粉粒(0.05~0.002 mm)	粘粒(<0.002 mm)
塬土	陕西杨凌	0~20	4.73	83.43	11.85
黄绵土	陕西安塞	0~20	35.74	58.78	5.48

1.2 研究方法

本实验是在中国科学院水土保持研究所数控恒温恒湿密闭实验室内进行。采用日产CR21G高速恒温冷冻离心机(离心槽内可调控温度)获取土壤水分特征曲线数据。按设定容重(1.35 g/cm³)称取一定量供试土壤填装离心机专用环刀(环刀容积为100 cm³),将填装好的环刀放入离心杯之后充分饱和、称重后放入离心槽内,在不同温度条件下按设定转速做高速离心,每次改变离心转速之前将离心土样(含离心杯)迅速取出称重并放回,在下一阶段离心之前将土壤在离心槽内平温一定时间(≥20 min)。离心结束后将离心机转速转换为吸力值,结合称重值获得不同温度下供试土壤的水分特征曲线(SWCC)。

采用定水头垂直土柱入渗实验测定不同温度下实验土壤非饱和导水率和饱和导水率。实验前将供试土壤按预设容重(1.35 g/cm³)分层装入内径为10 cm,长为40 cm的有机玻璃柱(柱壁开有小孔,孔径为1.5 cm,孔间距为2 cm);每层装土高度为5 cm,层装土质量按预设容重计算称取,总装土高度为30 cm,用马氏瓶向土柱供水。实验之前将所有实验装置放入温控室恒温一定时间(≥3 h),实验过程中尽量减少实验室受外界环境的干扰以保证室温恒定。测定非饱和导水率入渗过程中记录入渗时间 t 、累积入渗量 m_s 、湿润锋距离 d ;入渗结束后通过柱壁小孔迅速挖取土样后称重、烘干以测定土柱剖面含水量。饱和导水率测定则在土柱充分饱和后记录一定时间段内接取的水量。

土壤水分扩散率采用一维水平土柱吸渗法测定,实验装置及过程与上述非饱和导水率测定过程基本相同。实验过程中在土柱进水端维持一个接近饱和状态的稳定土壤含水状态,因此马氏瓶供水孔要略高于进水孔;实验结束后从湿润锋处迅速取土并烘干称重,测定剖面含水量。

上述所有实验除土壤水分特征曲线测定过程外,其它实验过程均在密闭温控室内进行。实验室设定试验温度为6℃、18℃、24℃、36℃($\Delta T \leq 0.5^\circ\text{C}$),离心机设定温度与此相同。所有实验均有重复。

2 结果与分析

2.1 温度对土壤水分特征曲线的影响分析

土壤水分特征曲线用来表示土壤水的能量与数量状态,反映了土壤空隙状况和含水率间的关系,是研究土壤水分保持与运动特性的基本参数曲线。图1为不同温度条件下两种供试土壤的水分特征曲线示意图。分析图示可知:当土壤含水率相同时,随着温度升高,土壤水吸力降低,相同条件下土壤的持水能力减弱,土壤水势升高;当土壤水吸力相同时,随着温度升高,土壤含水率降低,土壤水势增加。表明温度变化对土壤水分特征曲线有着重要影响,在一定的土壤水势下,温度高时土壤持水能力较小,保持的水量也就较少,反

之土壤持水能力较强, 保持的水量也就较多。

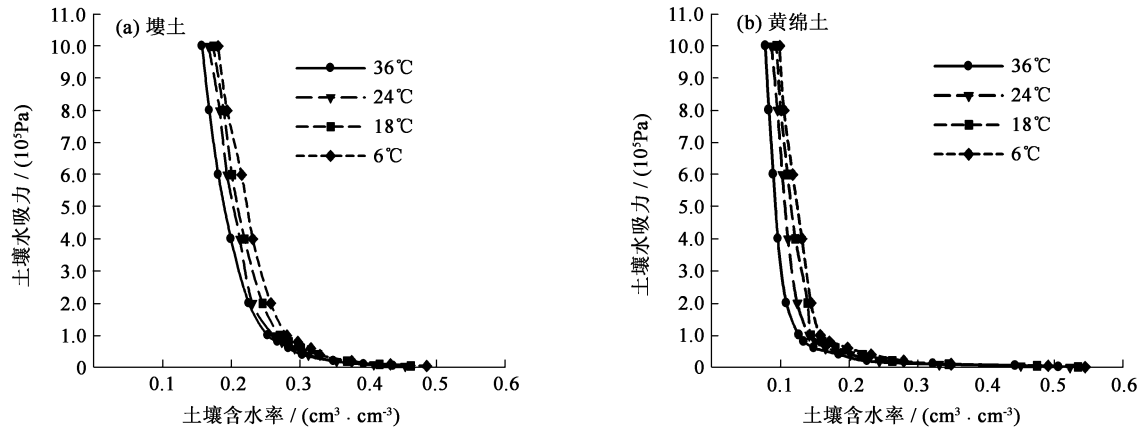


图1 不同温度下供试土壤的水分特征曲线

Fig. 1 Soil water retention curves of the tested soils under different temperatures

对于不同含水率及土壤水吸力阶段, 温度对土壤水分特征曲线的影响也不尽相同。为便于观察分析将两种供试土壤水分不同温度下土壤水分特征曲线分为如图2所示两个不同阶段。比较壤土在不同含水率阶段(图2(a)、图2(b))土壤水分特征曲线: 当土壤含水率低于 $0.4 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 时, 随着含水率的降低温度对土壤水分特征曲线的影响更为显著, 而高于时显著性明显降低; 比较黄绵土不同含水率阶段(图2(c)、图2(d))发现, 当含水率低于 $0.3 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 时其温度效应变得更为显著, 高于 $0.3 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 时显著性明显降低, 表明温度变化对土壤水吸力的影响在低含水率阶段时更为明显, 但不同质地土壤间存在显著差异。

由于目前还没有提出能够明确描述土壤水分特征曲线物理意义的公式或方法, 因此本研究采用广泛应用

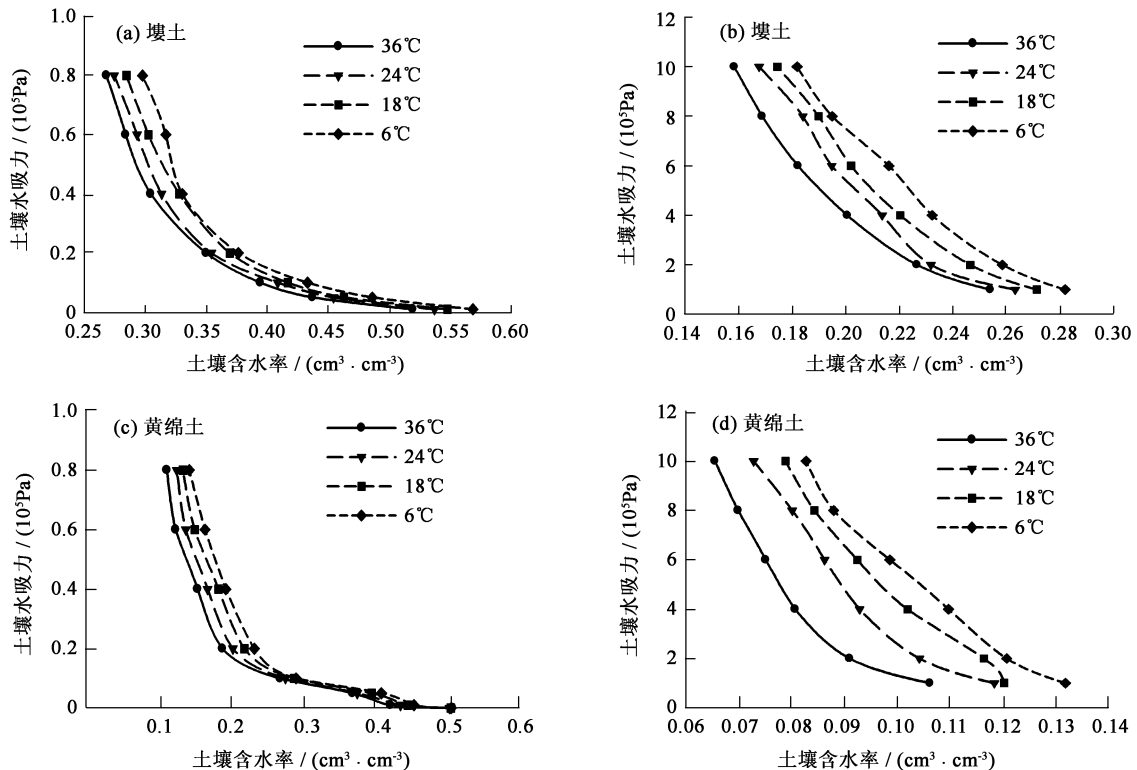


图2 不同含水率阶段温度对土壤水分特征曲线的影响

Fig. 2 Effect of temperatures on soil water retention curves under different soil water content

于土壤水力学研究中的 Van Genuchten^[14] 土壤水分特征曲线经验模型, 该模型不仅能够表征整个土壤水吸力范围内的水分特征数据, 还可方便的利用统计孔径分布模型估计土壤导水率参数^[15]。模型如下:

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{1}{[1 + (\alpha h)^n]^m} \quad (1)$$

式中 θ 为土壤含水率, cm^3/cm^3 ; θ_s 为土壤饱和含水率, cm^3/cm^3 ; θ_r 为土壤残余含水率, cm^3/cm^3 ; h 为土壤水吸力, cm ; S_e 为有效饱和度; α 为与进气吸力相关的参数, 且 $\alpha = 1/h_d$, h_d 为土壤进气吸力; m 、 n 为形状参数, 通常假定 $m = 1 - 1/n$ 。

利用 Van Genuchten 经验模型对不同温度下的土壤水分特征曲线数据进行拟合, 所得参数拟合值如表 2 所示。表中显示, 两种土壤的形状参数 n 拟合值随着温度的升高而增大, 并且温度越高, 这种趋势越明显; 参数 α 、残余含水率 θ_r 、饱和含水率 θ_s 值随着温度的升高而减小; 参数 α 是土壤进气吸力相关的参数, α 值随温度升高而减小, 表明土壤进气吸力在增大, 相同条件下土壤持水能力减小, 土壤水势升高; 残余含水率 θ_r 与饱和含水率 θ_s 是与土壤结构性质密切相关的土壤物理参量, 二者拟合值减小表明土壤孔隙状况随着温度的升高发生变化: 温度升高, 土壤总孔隙度在减小, 但土壤有效大空隙相对在增加。

表 2 供试土壤不同温度条件下 Van Genuchten 模型参数拟合值

Table 2 Fitting values of parameters in Van Genuchten model under different temperature of tested soils

温度/°C	壤土				黄绵土			
	n	α	$\theta_r/(\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	$\theta_s/(\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	n	α	$\theta_r/(\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	$\theta_s/(\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$
6	2.0132	0.0224	0.0950	0.4370	2.4115	0.1494	0.0698	0.3954
18	2.0138	0.0217	0.0838	0.4328	2.4421	0.1415	0.0656	0.3839
24	2.0428	0.0177	0.0826	0.4222	2.5448	0.1415	0.0614	0.3758
36	2.3667	0.0160	0.0787	0.4179	2.6329	0.1172	0.0582	0.3677

对 Van Genuchten 经验模型各参数拟合值进行统计分析, 结果如表 3 所示。表中显示: 对于两种供试土壤, 温度变化对模型参数 α 的影响最为明显, 其中壤土 α 值的变异系数为 15.91%, 黄绵土为 10.17%, 均为中等变异性 ($10\% < C_v < 100\%$, C_v 为变异系数), 其它各参数的变异系数均小于 10%, 为弱变异性, 表明在土壤水分运动过程中温度变化对土壤水分性质的影响要大于对土壤结构的影响^[16]。对比壤土与黄绵土各参数拟合值的变异性发现温度变化对壤土参数的影响程度均大于对黄绵土参数影响。来剑斌等^[17]通过对 5 种不同质地土壤的颗粒组成对 Van Genuchten 模型参数的影响分析认为, 该模型参数与土壤粘粒含量有着极显著关系, 并且随着粘粒含量的升高, 参数 α 、 n 减小, 结合本实验结果认为对于不同质地土壤, 粘粒含量越高, 温度变化对其水分运动过程影响越显著。

表 3 Van Genuchten 模型参数拟合值统计分析

Table 3 Statistical analysis of the fitted value for parameters in Van Genuchten model

参 数	壤土				黄绵土			
	n	α	$\theta_r/(\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	$\theta_s/(\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	n	α	$\theta_r/(\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	$\theta_s/(\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$
最大值	2.3667	0.0224	0.0950	0.4370	2.6329	0.1494	0.0698	0.3954
最小值	2.0132	0.0160	0.0787	0.4179	2.4115	0.1172	0.0582	0.3677
平均值	2.1091	0.0196	0.0851	0.4275	2.5078	0.1374	0.0637	0.3807
标准差	0.1723	0.0031	0.0070	0.0089	0.1010	0.0140	0.0051	0.0118
变异系数/%	8.1679	15.9110	8.2001	3.0852	4.0278	10.1690	7.9377	2.1019

结合对 Van Genuchten 模型参数随温度变化的统计分析结果, 在温度变化过程中假定土壤残余含水率不变, 对于温度 T 及参考温度 T_0 , 其对应的 Van Genuchten 模型相比可得

$$\frac{\theta_T - \theta_r}{\theta_{T_0} - \theta_r} = \frac{\theta_{sT} - \theta_r}{\theta_{sT_0} - \theta_r} \frac{[1 + (\alpha h_T)^n]^m}{[1 + (\alpha h_{T_0})^n]^m} \quad (2)$$

当土壤含水率较高时, 土壤水势较低, 温度对土壤水分特征曲线的影响较小, 土壤含水率较低时, $(\alpha h)^n$ 远大于 1, 忽略温度对土壤高含水率阶段的影响及数值 1, 上式可变为

$$\frac{\theta_T - \theta_r}{\theta_{T_0} - \theta_r} = \frac{\theta_{sT} - \theta_r}{\theta_{sT_0} - \theta_r} (\alpha h_T)^{n-1} \quad (3)$$

由于土壤水吸力可用毛细管压力水头表示,并且土壤饱和含水率与土壤残余含水量的差值的变化反映了土壤有效空隙状况,结合毛细管理论上式可变化为

$$\theta_T - \theta_r = \frac{f_{sT}}{f_{sT_0}} \left(\frac{\sigma_{T_0} \rho_T}{\sigma_T \rho_{T_0}} \right)^{n-1} (\theta_{T_0} - \theta_r) \quad (4)$$

式中 f_{sT} 、 f_{sT_0} 为任意温度 T 和参考温度 T_0 下土壤有效孔隙度; θ_T 、 θ_{sT} 分别为温度 T 时供试土壤含水率和饱和含水率, cm^3/cm^3 ; θ_{T_0} 、 θ_{sT_0} 分别为温度 T_0 时供试土壤含水率和饱和含水率, cm^3/cm^3 ; σ_T 、 σ_{T_0} 分别为任意温度 T 和参考温度 T_0 下的土壤水表面张力, N/m ; ρ_T 、 ρ_{T_0} 为任意温度 T 和参考温度 T_0 时土壤水密度, g/cm^3 ; h_T 、 h_{T_0} 为任意温度 T 与参考温度 T_0 对应的进气吸力。

从以上分析表明,土壤温度环境的改变一方面引起土壤孔隙状况发生改变,另一方面引起土壤水表面张力及水密度等土壤水分性质发生改变,两方面的共同作用造成在温度变化过程中土壤水势及土壤含水率的温度效应的存在,表现为土壤水分特征曲线的变化。

2.2 温度对土壤饱和导水率的影响分析

土壤饱和导水率是描述土壤水分运动的基本量化参数之一,了解土壤在不同环境条件下的饱和导水率直接表征了环境条件对土壤水分入渗能力的影响^[18]。图3为实验室内不同温度条件下供试土壤的饱和导水率随温度变化的趋势图。从图中可以看出,温度变化对两种土壤的饱和导水率均具有显著影响:供试土壤的饱和导水率随着温度的升高而增大;对于较为粘重的杨凌塬土,温度对饱和导水率的影响在较高温度阶段比在低温阶段更为显著,以 24°C 时其饱和导水率为基准值,当温度由 6°C 升高到 24°C 时,饱和导水率平均变化率为 $5.06 \times 10^{-5} \text{ cm}/\text{min}$, 24°C 升高为 36°C 时饱和导水率平均变化率为 $1.7 \times 10^{-3} \text{ cm}/\text{min}$,质地较轻的黄绵土则在不同温度下影响趋势基本相同,这是由于杨凌塬土质地较为粘重,粘粒含量较高,在温度较低时,温度的变化对土壤粘粒影响较小,随着温度升高,这种温度效应逐渐显现,粘粒膨胀变大,使得原来由粘粒结构构成的小空隙也随之变大,土壤大空隙增多,饱和导水率增加;土壤温度变化对土壤大空隙影响较小,因此土壤温度变化对质地较轻的黄绵土饱和导水率影响近似线性。

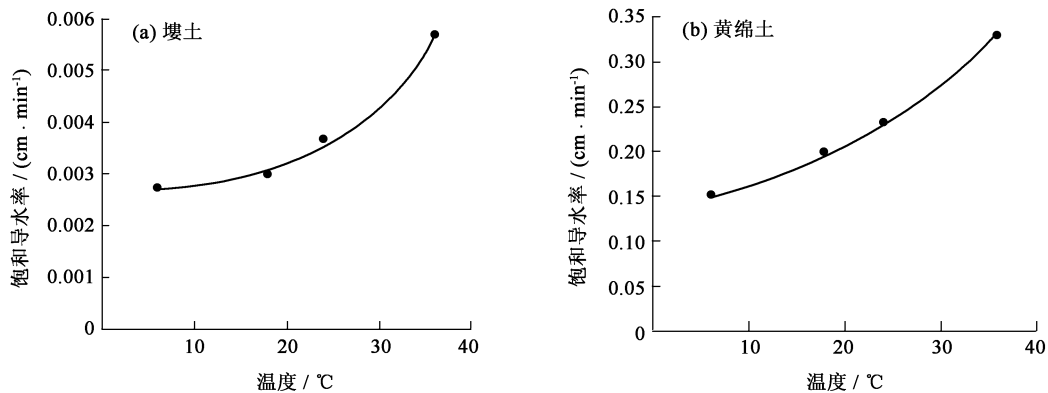


图3 不同温度下供试土壤的饱和导水率

Fig. 3 Saturated hydraulic conductivity of the tested soils under different temperature

通常认为土壤空隙是由一系列尺寸不等,相互连通的毛细管组成,土壤饱和导水率是与土壤大空隙密切相关的运动参数。之前分析表明温度变化对土壤大空隙影响不明显,因此忽略温度变化对土壤自身结构性质的影响,流体在毛细管中运动时遵从泊肃叶(Poiseuille)定律^[19]。假设流过毛细管的流体体积为 V ,经过的时间为 t ,管两端的压强差为 ΔP ,则 $Q = V/t$ 。在任意温度 T 和参考温度 T_0 ,其相对应的动力学粘滞系数为 η_T 和 η_{T_0} ,结合泊肃叶定律,相比得

$$\frac{\eta_T}{\eta_{T_0}} = \frac{t_T \Delta P_T}{t_{T_0} \Delta P_{T_0}} \quad (5)$$

进而可得

$$\frac{\eta_T}{t_T \rho_T} = \frac{\eta_{T_0}}{t_{T_0} \rho_{T_0}} = \eta_c^* \quad (6)$$

式中 η_c^* 为一个与温度变化无关的规格化函数, 仅与土壤水分自身性质相关; 其它参数意义同前。

流体的粘度系数与压强和温度有关, 但普通压强对流体粘度影响很小, 因此, 一般认为流体粘度只随温度变化。从上式可以看出, 在饱和导水过程中, 温度变化虽然引起毛细管中液态水粘滞系数以及水密度的改变, 但这种变化并不是杂乱无章的。水通量相同时, 不同温度下水的动力学粘滞系数与时间和密度的比值为—常数 η_c^* , 并且该常数与温度变化无关, 只受到流体(液态水)和土壤自身性质的影响。当土柱充分饱和后, 结合泊肃叶定律可得水流通量 K 为

$$K = \frac{R^2 \Delta h \rho g}{8l \eta} \quad (7)$$

K 亦称为饱和导水率。令 $\frac{\eta}{\rho} = \nu$, $\frac{R^2 g \Delta h}{8l} = M$, 则

$$K\nu = M \quad (8)$$

式中 ν 为运动粘度; M 为特征参数, 受到土壤性质的影响, 与流体性质无关。结合式(7)可以得出对于不同温度下

$$K_T \nu_T = K_{T_0} \nu_{T_0} = M \quad (9)$$

式(9)表明温度对土壤饱和导水率的影响主要是通过改变土壤水分的运动粘度而产生影响, 即通过改变土壤水的动力学粘滞系数和土壤水密度。对于既定土壤, 不同温度下土壤饱和导水率与土壤水分运动粘度的乘积为一定值, 不随土壤温度的改变而改变。黄锦土土壤饱和导水率与温度和运动粘度的关系如图 4 所示。

2.3 土壤非饱和导水率的温度效应分析

土壤非饱和导水率是土壤含水率和土壤水吸力的函数, 因此了解不同温度下土壤非饱和导水率的特征性质具有重要理论意义和现实意义。图 5 为供试土壤在不同温度条件下的非饱和导水率曲线示意图, 结果显示:

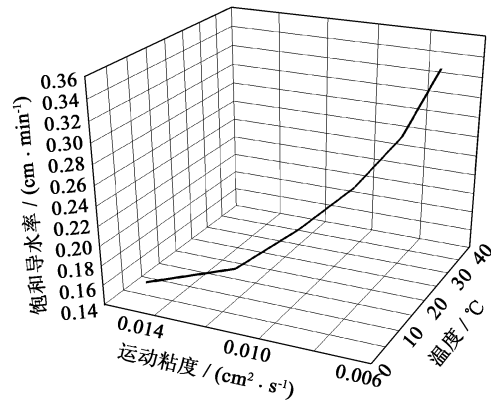


图 4 黄锦土饱和导水率与温度和运动粘滞系数的变化关系

Fig. 4 Relationship between saturated hydraulic conductivity and temperatures and kinematics viscosity of loessal soil

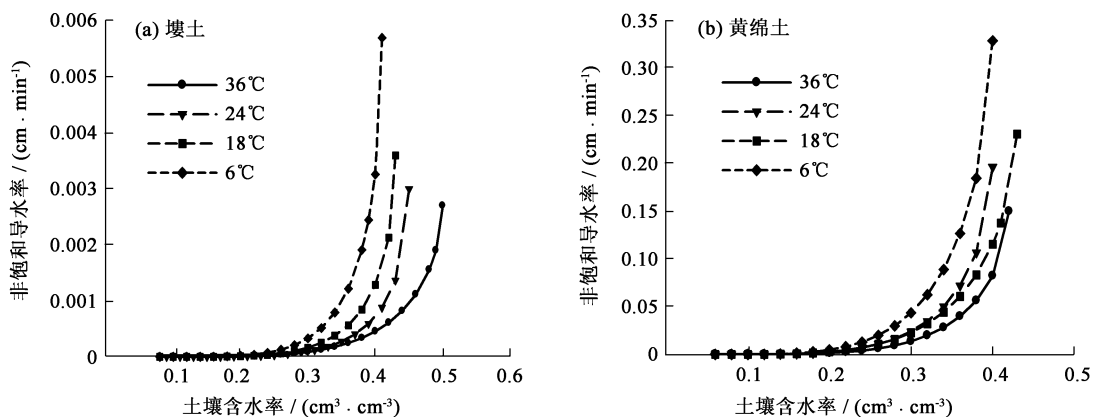


图 5 不同温度下供试土壤的非饱和导水率

Fig. 5 Unsaturated hydraulic conductivity of the tested soils at different temperatures

随着温度的升高,在土壤含水率相同时,供试土壤的非饱和导水率随着温度的升高而增大,而在相同的非饱和导水率下,土壤含水率随着温度的升高而减小;两种土壤的非饱和导水率在含水率较低区域(壤土 < 0.24、黄绵土 < 0.20)非饱和导水率温度效应不明显;随着含水率的增加,其温度效应渐为明显;另外,从图4中可以看出,温度的升高还引起土壤饱和含水率的变化:温度升高,饱和含水率减小。

由于土壤非饱和导水率是土壤含水率和土壤水吸力的函数,因此温度对土壤非饱和导水率的影响也间接反映了温度变化对土壤含水率和土壤水势的影响。温度升高,相同含水率下土壤非饱和导水率增大,土壤水势加大,土壤持水能力减弱,也就导致了在非饱和导水率相同时土壤含水率降低。因此,温度变化对土壤中水分态势的影响具有紧密相连的特征。

对于不同质地的土壤,温度对非饱和导水率影响也不尽相同,对于粘粒含量较高的粘重土壤,温度除了影响土壤水分自身性质外,对土壤粘粒等也产生一定影响:温度升高,土壤粘粒膨胀增大,土壤粘粒间空隙变大,当土壤含水率不变时,土壤水势升高,非饱和导水率增大;温度对于土壤大空隙影响较小,因此对于质地较轻的砂性土壤,温度主要是通过影响土壤水的性质而改变土壤导水率。

王印杰等^[20]从土壤微观结构的统计学角度提出土壤非饱和导水率。

$$K(\theta) = K_s \left(\frac{\theta}{f} \right)^{2c+1} \quad (10)$$

式中 $K(\theta)$ 为非饱和导水率, θ 为体积含水率; K_s 为饱和导水率; f 为土壤有效孔隙度; c 为土壤孔径级配参数,代表土壤孔隙孔径随机分布的统计规律,其值确定方法详见文献[20]。

由于温度的变化将会引起土壤水分以及土壤自身性质的变化,设存在参考温度 T_0 和任意温度 T ,使得非饱和导水率有

$$K_{T_0}(\theta) = K_{sT_0} \left(\frac{\theta}{f} \right)^{2c_{T_0}+1} \quad (11)$$

$$K_T(\theta) = K_{sT} \left(\frac{\theta}{f} \right)^{2c_T+1} \quad (12)$$

将式(11)与式(12)相比,并结合式(9)可知

$$K_T(\theta) = K_{T_0}(\theta) \frac{\nu_{T_0}}{\nu_T} \left(\frac{\theta}{f} \right)^{2(c_T - c_{T_0})} \quad (13)$$

对于既定土壤,温度对土壤非饱和导水率可描述为不同温度下土壤水分的运动粘滞系数的比与土壤结构温度效应的乘积。从上述分析过程可以看出,随着温度的变化,土壤水分运动粘度对土壤水分运动的影响主要是作用于土壤水分动能,温度升高,土壤运动粘度减小,使得水分运动的阻力减小,进而引起非饱和导水率的升高;土壤结构性质的变化对土壤水分运动的影响主要是作用于土壤水分势能,从式(13)可以看出,由于温度的变化所引起得土壤粒径级配参数的变化使得土壤饱和度发生了改变,造成了土壤水分基质势能的改变,土壤非饱和导水率由此发生改变。

从温度对土壤水分特征曲线的影响分析可知,在温度变化过程当中,土壤饱和度 $\Delta\theta/f$ 随之发生变化,对式(4)进行分析可得

$$\frac{\Delta\theta_T / \Delta\theta_{T_0}}{f_{sT} / f_{sT_0}} = \left(\frac{\sigma_{T_0} \rho_T}{\sigma_T \rho_{T_0}} \right)^{n-1} \quad (14)$$

式中 $\Delta\theta_T$ 、 $\Delta\theta_{T_0}$ 分别表示任意温度与参考温度下土壤有效含水量,且 $\Delta\theta_T = \theta_T - \theta_r$, $\Delta\theta_{T_0} = \theta_{T_0} - \theta_r$ 。

将式(14)代入式(13)可得

$$K_T(\theta) = \lambda^{-2c_T} \frac{\nu_{T_0}}{\nu_T} \left(\frac{\sigma_{T_0} \rho_T}{\sigma_T \rho_{T_0}} \right)^{n-1} h_{T_0}^{2(c_{T_0} - c_T)} K_{T_0}(\theta) \quad (15)$$

式中 λ 为土壤水吸力受温度影响的敏感度参数,可表示为任意温度下与参考温度下土壤水表面张力的比值,即 $\lambda = \sigma_T / \sigma_{T_0}$ 。

对于粘粒含量较少的轻质砂性土壤,由于温度变化对土壤孔隙影响较小,孔径统计分布变化可忽略,即 $c_T - c_{T_0} = 0$, 由此对于式(13)、式(15)可得

$$K_T(\theta) = K_{T_0}(\theta) \frac{\nu_{T_0}}{\nu_T} \quad (16)$$

$$K_T(\theta) = \lambda^{-2c} \frac{\nu_{T_0}}{\nu_T} \left(\frac{\sigma_{T_0} \rho_T}{\sigma_T \rho_{T_0}} \right)^{n-1} K_{T_0}(\theta) \quad (17)$$

温度变化对土壤非饱和导水率的影响是一个复杂的过程,主要通过3个方面发生作用:一是通过影响土壤水分性质的改变而产生作用,包括对土壤水的表面张力、粘滞度及密度的影响;二是通过影响土壤结构而发生作用,温度变化会引起土壤中部分颗粒的粒径发生变化,从而引起土壤粒径级配参数改变,造成了土壤结构及孔隙度改变,引起土壤非饱和导水率发生变化;三是在土壤温度变化过程中土壤水分性质的变化与土壤结构性质的变化间也会产生相互影响,进而影响到土壤非饱和导水率。从式(15)中可知,在较粘重土壤中温度对土壤非饱和导水率的影响还与初始温度下土壤水吸力有密切关系。

通常情况下,如果仅考虑温度变化对土壤水分性质和土壤结构性质的影响,利用式(13)和式(16)便可对其进行定量描述;上述分析可知土壤水分性质和土壤结构性质的变化会产生相互影响,此时可利用式(15)或式(17)对其进行描述。

2.4 土壤水分扩散率的温度效应分析

利用水平土柱入渗法测定不同温度条件下两种供试土壤的土壤水分扩散率,如图6所示,图中曲线表明温度的变化对土壤水分扩散率有显著影响:随着温度的升高,两种供试土壤的水分扩散率都在不断加大;当土壤含水率相同时,供试土壤的水分扩散率随着温度的升高而增大;当扩散率相同时,随着温度的升高两种土壤含水率相应减小;相同土体中,在含水率(液相)较低时,温度对土壤液相水分扩散率的影响并不明显,随着土壤含水率的不断增加,扩散率的温度效应逐渐变得显著。

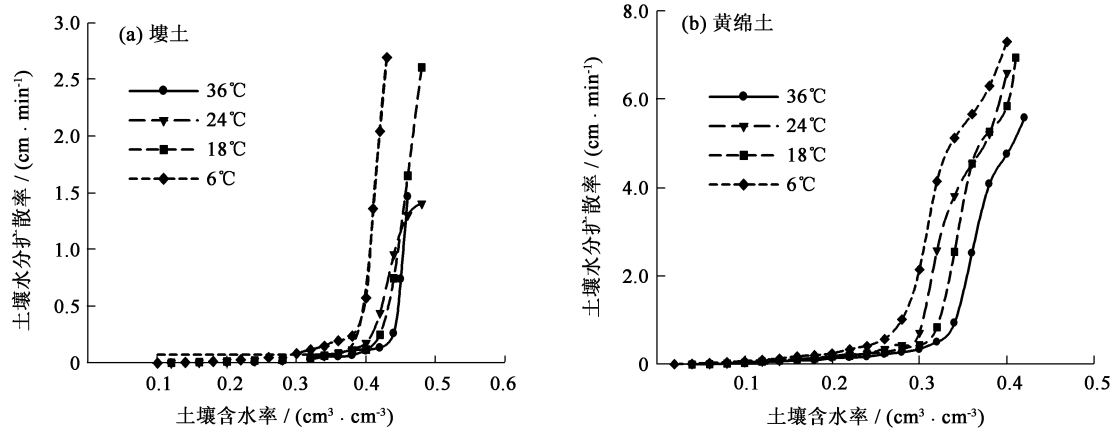


图6 不同温度下供试土壤的土壤水分扩散率

Fig. 6 Soil water diffusivities of the tested soils under different temperatures

之前研究表明,温度变化主要通过影响土壤水分表面张力、动力学粘滞系数及土壤结构性质来影响土壤导水率。土壤水分扩散率为

$$D(\theta) = K(\theta) \frac{d\psi}{d\theta} \quad (18)$$

在任意温度 T 和参考温度 T_0 下,认为其对应的土壤水分扩散率 $D_T(\theta)$ 与 $D_{T_0}(\theta)$,将两者相比并结合式(13)和式(15)有

$$D_T(\theta) = D_{T_0}(\theta) \frac{\sigma_T \nu_{T_0}}{\nu_T \sigma_{T_0}} \left(\frac{\theta}{f} \right)^{2(c_T - c_{T_0})} \quad (19)$$

$$D_T(\theta) = \lambda^{1-2c_T} \frac{\nu_{T_0}}{\nu_T} \left(\frac{\sigma_{T_0} \rho_T}{\sigma_T \rho_{T_0}} \right)^{n-1} h_{T_0}^{2(c_{T_0}-c_T)} D_{T_0}(\theta) \quad (20)$$

对于土壤粘粒含量较少的砂性土壤, 温度对土壤扩散率的影响可表示为

$$D_T(\theta) = D_{T_0}(\theta) \frac{\sigma_T \nu_{T_0}}{\nu_T \sigma_{T_0}} \quad (21)$$

$$D_T(\theta) = \lambda^{1-2c} \frac{\nu_{T_0}}{\nu_T} \left(\frac{\sigma_{T_0} \rho_T}{\sigma_T \rho_{T_0}} \right)^{n-1} D_{T_0}(\theta) \quad (22)$$

上述分析表明, 对于粘质土壤, 土壤粘粒含量较高, 温度变化通过影响土壤水分的表面张力和动力学粘滞系数以及土壤结构性质而影响土壤水分扩散率; 对于粘粒含量较小的轻质土壤, 温度主要通过影响土壤水分的表面张力和粘滞系数来影响土壤水分扩散率; 并且温度对土壤水分扩散率的影响与水分的表面张力正相关, 与粘滞度负相关。

2.5 温度变化对土壤比水容量的影响

比水容量 $C(\theta)$ 作为土壤水分运动的 3 个主要参数之一, 同土壤非饱和导水率及土壤水分扩散率等共同构成模拟土壤水分运动的基本要素参数。土壤比水容量是土壤水分特征曲线斜率 ($d\theta/d\psi$) 的值, 表示了单位土水势变化是单位体积土壤可释放或吸入的水量, 是说明土壤水持水性能的一个重要参数。因此了解不同土壤环境因素的变化对比水容量的影响具有重要意义^[21]。

比水容量 $C(\theta)$ 与土壤非饱和导水率 $K(\theta)$ 和土壤水分扩散率 $D(\theta)$ 作为模拟土壤水分运动的 3 个基本参量之间并不相互孤立, 而是存在一定的函数关系^[18]。

$$C(\theta) = \frac{K(\theta)}{D(\theta)} \quad (23)$$

因此, 在任意温度条件 T 和参考温度 T_0 下的比水容量的相互关系, 结合式 (13) 和式 (18), 可得

$$C_T(\theta) = \frac{\sigma_{T_0}}{\sigma_T} C_{T_0}(\theta) \quad (24)$$

土壤温度变化对比水容量的影响是通过影响水的表面张力而发生作用。随着温度的升高, 水表面张力的不断减小, 比水容量在不断加大, 说明在土壤水分运动过程中, 单位水势的变化对吸收和解吸土壤水分的大小随着温度升高而增大, 即当土壤温度较高时, 单位土壤水势的升高或降低较土壤温度较低时解吸或吸收的水量要大。

3 结 论

(1) 温度变化主要通过影响土壤水分性质及土壤结构性质对土壤水分运动过程产生作用, 并且其影响机理及程度可以通过土壤水分运动参数的分析进行定量描述。

(2) 对不同的土壤水分运动参数的温度效应分析认为, 温度变化对各参数的影响途径均存有一定差异, 温度对土壤水分特征曲线的影响主要是通过改变土壤孔隙结构以及土壤水分的表面张力和密度而发生作用, 并以此为基础, 通过改变土壤水分运动粘度影响饱和和导水率; 通过改变土壤自身结构和土壤水分运动粘度作用于土壤非饱和导水率; 通过改变土壤结构、土壤水分运动粘度和表面张力而影响土壤水分扩散率; 通过改变土壤表面张力而影响比水容量。

(3) 通过对土壤非饱和导水率、扩散率等参数温度效应分析发现, 土壤水分运动过程中由于温度条件的改变所引起的土壤水分运动粘度的改变作用于土壤水分的动能, 而土壤水分表面张力和土壤结构性质的改变主要作用于土壤水分的势能, 并且两方面存在相互作用。

(4) 土壤质地结构对土壤水分运动温度效应具有重要影响, 其中粘粒含量的差异尤为重要, 对于粘粒

含量较高的粘重土壤,温度变化对其结构性质的影响不宜忽略;对于粘粒含量较少的砂性土,由于温度变化对其结构影响较小,可以忽略。

参考文献:

- [1] 许振柱,周广胜. 农业水分利用率及其对环境和管理活动的响应[J]. 自然资源学报, 2003, 18(3): 294-303. (XU Zhen-zhu, ZHOU Guang-sheng. Agriculture water use efficiency and its response to environments and managing activities[J]. Journal of Natural Resources, 2003, 18(3): 294-303. (in Chinese))
- [2] 冯宝平,张展羽,张建丰,等. 温度对土壤水分运动影响的研究进展[J]. 水科学进展, 2002, 13(5): 643-648. (FENG Bao-ping, ZHANG Zhan-yu, ZHANG Jian-feng, et al. Review of effect of temperature on soil water movement[J]. Advances in Water Science, 2002, 13(5): 643-648. (in Chinese))
- [3] HARIDASAN M, JENSEN R D. Effect of temperature on pressure head-water content relationship and conductivity of two soils [J]. Soil Sci Soc Am J, 1972, 36: 703-708.
- [4] NOVAK N. Non-isothermal flow of water in unsaturated soils[J]. Hydro Sci, 1975, 2: 37-51.
- [5] NIMMO J R, MILLER E E. The temperature dependence of isothermal moisture vs. potential characterizes of soils[J]. Soil Sci Soc Am J, 1986, 50: 1105-1113.
- [6] ZHANG Fu-cang, ZHANG Ren-duo, KANG Shao-zhong. Estimating temperature effects on water flow in variably saturated soils using activation energy[J]. Soil Sci Soc Am J, 2003, 67: 1327-1333.
- [7] CHENG Hui-yan, WANG Gen-xu, HU Hong-chang, et al. The variation of soil temperature and water content of seasonal frozen soil with different vegetation coverage in the head water region of the Yellow River, China[J]. Environmental Geology, 2007, 54: 1755-1762.
- [8] CHRISTOPHER M G, DVAID J S. Soil temperature and moisture errors in operational eta model analyses[J]. Journal of Hydrometeorology, 2008, 9(3): 367-387.
- [9] 梁冰,刘晓丽,薛强. 非等温入渗条件下土壤中水分运移的解析分析[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2002, 21(6): 741-744. (LIANG Bing, LIU Xiao-li, XUE Qiang. Resolution analysis of moisture migration in soil in condition of transient temperature [J]. Journal of Liaoning Technical University, 2002, 21(6): 741-744. (in Chinese))
- [10] 辛继红,高红贝,邵明安. 温度对土壤水分入渗的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(3): 217-220. (XIN Ji-hong, GAO Hong-bei, SHAO Ming-an. Study of the effect of soil temperature on soil water infiltration[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(3): 217-220. (in Chinese))
- [11] 夏自强. 温度变化对土壤水运动影响研究[J]. 地球信息科学, 2001, 4: 19-24. (XIA Zi-qiang. Effect of temperature variation on soil water movement and water exchange between soil water and phreatic water[J]. Geo-information Science, 2001, 4: 19-24. (in Chinese))
- [12] 李慧星,夏自强,马广慧. 含水量变化对土壤温度和水分交换的影响研究[J]. 河海大学学报:自然科学版, 2007, 35(2): 172-175. (LI Hui-xing, XIA Zi-qiang, MA Guang-hui. Effects of water content variation on soil temperature process and water exchange [J]. Journal of Hohai University: Natural Science, 2007, 35(2): 172-175. (in Chinese))
- [13] 王凤,乔云发,韩晓增,等. 冻融过程黑土 2 m 土体固液态水分含量动态特征[J]. 水科学进展, 2008, 19(3): 361-366. (WANG Feng, QIAO Yun-fa, HAN Xiao-zeng, et al. Study on the dynamic characteristics of solid and liquid water in the process of freezing-thawing in black soil[J]. Advances in Water Science, 2008, 19(3): 361-366. (in Chinese))
- [14] VAN GENUCHTEN M T, LEI J F J, YATES S R. The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils [M]. USEPA Report 600/2-91/065 U S Environmental Protection Agency, Ada, Oklahoma, 1991.
- [15] 郭向红,孙西欢,马娟娟. 基于混合遗传算法估计 Van Genuchten 方程参数[J]. 水科学进展, 2009, 20(5): 677-682. (GUO Xiang-hong, SUN Xi-huan. MA Juan-juan. Parametric estimation of the Van Genuchten's equation based on hybrid genetic algorithm[J]. Advances in Water Science, 2009, 20(5): 677-682. (in Chinese))
- [16] 王云强,张兴昌,韩凤鹏. 黄土高原淤地坝土壤性质剖面变化规律及其功能探讨[J]. 环境科学, 2008, 29(4): 1020-1026. (WANG Yun-qiang, ZHANG Xing-chang, HAN Feng-peng. Profile variability of soil properties in check dam on the Loess Plateau and its functions [J]. Environmental Science, 2008, 29(4): 1020-1026. (in Chinese))
- [17] 来剑斌,王全九. 土壤水分特征曲线模型比较分析[J]. 水土保持学报, 2003, 17(1): 137-140. (LAI Jian-bin, WANG

- Quan-jiu. Comparison of soil water retention curve model[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2003, 17(1):137-140. (in Chinese))
- [18] 姚贤良, 程云生, 等. 土壤物理学[M]. 北京: 农业出版社, 1986: 326-334. (YAO Xian-liang, CHENG Yun-sheng, et al. Soil physical [M]. Beijing: Agriculture Press, 1986: 326-334. (in Chinese))
- [19] 徐英勋. 泊肃叶公式的推导及实验验证[J]. 安庆师范学院学报, 2005, 11(4):56-57. (XU Ying-xun. Derivation and experimental verification of Poiseuille's formula[J]. Journal of Anqing Normal College, 2005, 11(4):56-57. (in Chinese))
- [20] 王印杰, 王玉珉. 土壤非饱和导水率机理的探讨[J]. 水利学报, 1994(12):78-82. (WANG Yin-jie, WANG Yumin. Characteristic function of soil moisture and analytical solution of Richards equation [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1994(12):78-82. (in Chinese))
- [21] 吕殿青, 邵明安. 变容重土壤水分运动参数与方程研究[J]. 自然科学进展, 2008, 18(7):795-800. (LÜ Dian-qing, SHAO Ming-an. Research on soil moisture movement parameters and equations for changing soil density [J]. Progress in Natural Science, 2008, 18(7):795-800. (in Chinese))

Effect of temperature on soil moisture parameters*

GAO Hong-bei^{1,2}, SHAO Ming-an^{2,3}

(1. College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling 712100, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A & F University, Yangling 712100, China; 3. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: In order to understand the effect of temperature on soil moisture movement and dynamic parameters, a combined study of laboratory experiments and theoretical analysis is conducted to examine the variation of soil moisture movement parameters due to temperature changes. The study involves the soil moisture retention curve, the hydraulic conductivity, the soil moisture diffusivity and the specific moisture capacity. Results show that soil temperature has a significant effect on soil moisture characteristics and soil structures. The effect of temperature variation can be quantified and described by examining the changes in soil moisture dynamic parameters. The effect of temperature changes on soil moisture characteristics is mainly through altering the kinetic energy and potential energy of the moisture, while on soil structure is mainly reflected in the potential energy of the moisture. Additionally, there has been a noticeable variation of the effect for different soils. The temperature effect on soil moisture movement can be neglectable for sandy soils, for clay soils; however, the opposite is true.

Key words: temperature; soil moisture; hydraulic conductivity; soil infiltration

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No.90502006).