

温度对砂型土壤和石英砂水分特征曲线的影响

董晓华^{1,2}, 姚着喜¹, 彭涛^{1,2}, 刘冀^{1,2}, 李英海^{1,2}, 刘潇钧¹, 郭梁锋¹

(1. 三峡大学 水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 水资源安全保障湖北省协同创新中心, 武汉 430072)

摘 要:为了研究温度变化对土壤和石英砂持水特性差异的影响机理,在离心机试验的基础上结合理论分析,对不同温度下土壤和石英砂水分特征曲线实测数据、低吸力段比水容及 Van Genuchten 经验模型的拟合参数进行了研究分析。结果表明:温度的变化对土壤水分特征曲线的位置影响显著,对曲线的走势无太大影响;而对于石英砂样本受温度变化的影响并不明显;温度对土壤持水能力的影响很大部分是由土壤中水分的性质和土壤自身性质共同决定的;同时,结合比水容的概念和水分特征曲线的 VG 模型参数较准确地评价温度变化下两种供试样品的持水性能和水分的有效程度。

关键词:水分特征曲线; Van Genuchten 模型; 离心机法; 温度

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2016)06-0064-05

Effects of Temperature on Comparative Study of the Water Characteristic Curve of Soil and Quartz Sand

DONG Xiaohua^{1,2}, YAO Zhuoxi¹, PENG Tao^{1,2}, LIU Ji^{1,2}, LI Yinghai^{1,2}, LIU Xiaojun¹, GUO Liangfeng¹

(1. College of Hydraulic and Environment, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443000,

China; 2. Hubei Collaborative Innovation Center for Water Resources Security, Wuhan 430072, China)

Abstract: In order to study the change of temperature on the influence mechanism of difference of water-holding capability of soil and quartz sand, based on the centrifuge experiments we may combine theoretical analysis to check measured data of quartz and soil water characteristic curves, the water volume and fitting parameters of Van Genuchten empirical model at different temperatures. The results showed that temperature change had the significant effect on the position of the soil-water characteristic curve and no effect on the trend of curve; however, temperature changes had no obvious impact on quartz sand sample; the effect of temperature on water holding ability of soil would rather mostly be determined by soil humidity characteristics and the nature of soil itself than the nature of soil itself directly; at the same time, we can combine the concept of specific water volume and VG model parameter to assess accurately water-holding capacity and available extent of water of two test samples under temperature variation.

Keywords: moisture characteristic curve; Van Genuchten method; centrifuge method; temperature

非饱和土壤水分特征曲线^[1] (SWCC) 是土壤水管理和研究的最基本资料,是描述非饱和土壤中土壤水分含量或饱和度与土壤基质势之间的关系曲线,同时它也是研究土壤水分运动和溶质运移等问题的基础,反映土壤水分能态和持水特征,对研究土壤水分运移及植物生长等方面有重要意义。土壤水分特征曲线的测定方法^[2] 和试验装置^[3] 种类繁多,其测定技术相对而言也比较成熟,常用的方法有离心机法、张力计法、压力膜仪法、砂芯漏斗法和平衡水汽压法等。

离心机法最早由斯科菲尔德在 1935 年提出,其基本原理就是利用圆周运动的离心运动原理将重力场中的样品搬到离心场中。由于离心机法的操作方法简单、测定速度快、省时及可测定较宽的吸力范围等优点广泛应用于土壤水分动态模拟,随后,国内一些学者也运用离心机法做过大量的相关研究^[4-6]。

由于土壤水分特征曲线的影响因素复杂,至今尚没有从理论上建立土壤含水量和基质势之间的关系。对于土壤水分特征曲线的研究大多是基于试验的基

收稿日期: 2016-05-18

修回日期: 2016-05-23

资助项目: 国家自然科学基金项目(51409152); 湖北省自然科学基金项目(2012FFB03802)

第一作者: 董晓华(1972—),男,湖北秭归人,教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail: xhdong@ctgu.edu.cn

姚着喜(1990—),男(回族),安徽阜阳人,研究生,硕士,主要从事水文循环模型研究。E-mail: yaozhuoxi2007@126.com

通信作者: 彭涛(1973—),男,湖南保靖人,副教授,博士,主要从事水文水资源及生态水文研究。E-mail: pengtao306@163.com

础上开展的,通过大量的试验数据得出某种特定条件下土壤含水量或者饱和度和土壤基质势之间的关系,然后归纳出数学表达式并提出相应的经验模型。比较常用的有 Van Genuchten 模型^[7]、Brooks-Corey 模型^[8]、Gardner 模型^[9] 和 Gardner-Russo 模型^[10] 等。徐绍辉、朱蔚利等^[11-12] 在对多个模型进行了适应性的分析之后认为 Van Genuchten 模型无论是对粗质地土壤,还是较黏质地的土壤,其拟合效果均较好;夏卫生等^[13] 通过对国内外土壤水动力学参数研究结果进行分析也得出,该模型不仅拟合效果较好,并能和土壤的机械组成和土壤体积、质量等联系起来,从土壤本身特性上找到其含义。

目前,人们对于土壤水分特征曲线的研究往往局限于分析密度、质地及粒径组成等方面的影响。对于考虑温度对土壤水分特征曲线影响的研究尚少,而由于在自然条件下,土壤温度随着一天内时间的早晚或者季节更替都有显著的变化,因此,忽略温度影响对于各种土壤水分特征曲线经验模型的实际应用以及土壤水分特征曲线的准确测定均带来一定的局限性。Philip 和 de Vries^[14] 最早对温度变化对土壤水分特征曲线的影响进行了研究。随后,Nimmo^[15]、蔡国庆^[16]、高红贝^[4] 等都针对温度的影响进行了一系列的研究。而这些研究均是在同一类型土壤或者是多种类型土壤样本的基础上进行的,并没有综合考虑像

石英砂这种性质类似于土壤,经常被应用于土壤试验中的多孔介质。本文结合前人的研究成果,通过离心机法测定宜昌地区砂型土壤和 60 目规格石英砂两种样品在不同温度情况下的土壤水分特征曲线。通过实测资料分析砂型土壤与石英砂受温度的影响情况及不同温度条件下供试样本供水能力的变化情况,同时结合 Bachmann 等^[17] 给出的考虑温度影响的 Van Genuchen 模型拟合不同温度情境下的模型参数,分析各参数随温度的变化趋势,为今后研究温度对土壤入渗的影响及运用数值模拟不同温度土壤入渗情况奠定基础;同时,本文选用石英砂作对比试验,从温度的角度分析石英砂与土壤的部分性质差异,为运用石英砂模拟土壤入渗提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本试验所用土壤采自三峡大学桃花林的砂型土壤,取样时选取多个取样点,去除取样点处的表层杂物挖取深度为 0—20 cm 间的土壤,取样后将多个不同取样点的样品充分混合带回实验室自然烘干、大块体粉碎并过 2 mm 的筛;石英砂为普通石英砂场生产使用较多的 60 目的石英砂。样品由经典的烘干法(105℃下烘干 8 h 以上)测定其初始含水率。利用湿筛法结合密度计法分析土壤的机械组成,如表 1 所示。

表 1 供试样品的基本物理性质

样品	采样地点	各粒级含量/%			容重/ (g·cm ⁻³)
		砂粒(1~0.05)	粉粒(0.05~0.002)	黏粒(<0.002)	
土壤	三峡大学	79	10	11	1.4
石英砂	石英砂场	平均粒径为 0.25 mm			1.4

试验所用离心机为配有 10 号转子的 GL-22 M 高速冷冻离心机,其温度控制范围为-20~+40℃,精度为±1℃;时间控制范围为 0~99 h 59 min,精度为±1%;最高转速为 10 000 rpm;最大容量为 100 ml×4。

1.2 试验方法

本次研究选用的两种样品分别是宜昌地区的普通砂型土壤和石英砂场购买的 60 目的石英砂。试验之前首先按预设容重称取一定量的供试样品填装容积为 100 ml 的离心机专用环刀中,样品高度不易超过环刀高度的 80%,将填装好的样品放入薄蒸馏水层中进行饱和处理至少 24 h,饱和水层厚 5 mm,以减小样品在饱和过程中的体积膨胀。待样品达到充分饱和状态之后,取出擦干环刀外部的水分并称重。然后用离心机在设定的不同温度情境下对样品进行脱湿处理,从小到大分别设置 9 个不同转速,分别为 2 000,3 000,4 000,5 000,6 000,7 000,8 000,9 000,10 000 rpm,根据尚慢廷等^[18] 研究表明最佳离心时

间为 100 min,每次旋转完成之后从离心机中将环刀取出,再用干燥的布或者吸水纸吸干环刀表面的水分之后使用天平进行称重,并用游标卡尺测量样品高度。待试验完全结束后对样品进行烘干称重。每次离心之前将样品放入离心槽内平温一定时间(≥20 min),试验均有重复样本。根据所测样本质量变化数据、离心机的转速和离心半径可计算出不同转速下所对应的样品吸力和质量含水率。设定不同的温度情景重复上述试验过程可得到不同温度下的实测样品水分特征曲线。由于质量含水率与土壤密度无关,因此在试验过程中离心力导致土壤体积变化对试验结果的影响可以忽略。

1.3 经验模型

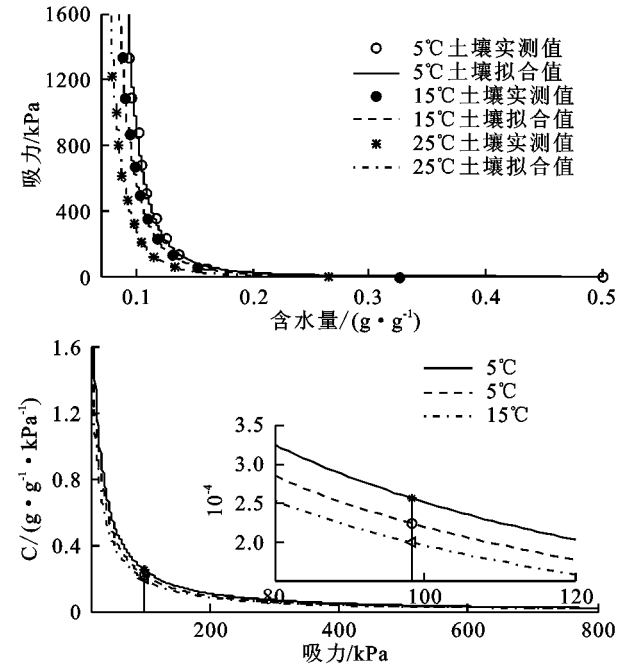
Van Genuchten 模型^[7] 在 1980 年被初次提出,由于其不仅能够表征整个压力水头范围内的水分特征数据,所得曲线光滑,而且该公式几乎适用于所有的土壤质地类型,因此在国内外得到广泛的应用。它的具体表达形式为:

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

2002 年 Bachamann 等^[17]结合温度对土壤吸力的影响给出了考虑温度影响的 Van Genuchten 模式表达式:

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

式中: $\theta(h,T)$ 是 T 温度下土壤质量含水量 (g/g); $h(T)$ 是 T 温度下压力水头 (kPa); θ_r 和 θ_s 分别代表相应温度下土壤的剩余和饱和质量含水量 (g/g); α (kPa^{-1}) 和 $n(-)$ 是相对温度下的经验拟合参数(或曲线性状参数), 而 $m=1\sim 1/n$ 。



2 结果与分析

2.1 温度变化对实测样品水分特征曲线的影响

离心机法测定土壤水分特征曲线是根据不同离心力下土壤能够持有的水分不同而得到的土壤水分含量和吸力之间的关系。在实际情况下, 温度对土壤基质势及持水能力都有一定的影响。因此, 在样品离心过程中, 由于温度的改变, 在相同的离心力作用下, 相同试验样品对水分的持有能力也会发生变化。设定不同的温度, 便可得到不同温度下的实测土壤水分特征曲线。

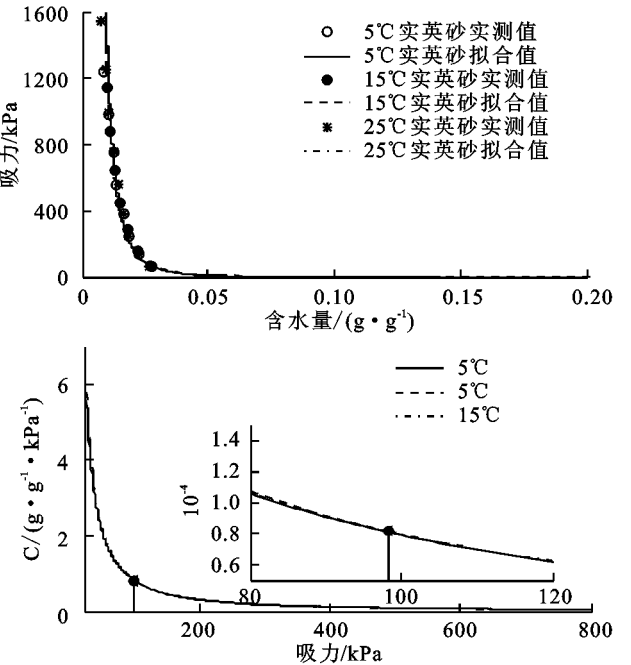


图 1 供试样品水分特征曲线和比水容变化曲线

由图 1 中土壤和石英砂两种供试样品的实测水分特征曲线可以看出, 不同温度下两种供试样本的水分特征曲线形态类似, 局部的差异是由于样本类型和温度的差异所致。当吸力较高时, 土体对水分的吸持力较大, 样品含水率随吸力水头的变化不明显, 在该吸力范围内土壤水分特征曲线呈现“陡直”状; 当吸力较低时, 样品对水分的吸持能力较差, 样品吸力变化引起含水率的变化较为明显, 在该吸力范围, 土壤水分特征曲线呈现“平缓”状。在不同温度情景下, 两种供试样本含水率减小速率均表现为 $25^{\circ}\text{C} > 15^{\circ}\text{C} > 5^{\circ}\text{C}$, 且对于不同样本受温度的影响大小存在差异。

对于普通砂型土壤来说, 温度越高, 相同土壤含水率的情况下对应的土壤水吸力越低, 相同条件下土壤的持水能力越弱, 土壤水势升高; 同理, 随着温度的升高, 相同土壤水吸力的情况下对应的土壤含水率降低, 土壤水势增加。由此表明温度的变化对土壤水分特征曲线的影响是不能忽略的, 在土壤水势一定的情

况下, 高温土壤持水能力较差, 保持的水量较少, 反之土壤持水能力较强, 土壤能够保持的水量也较多。温度对土壤样本水分特征曲线的影响在不同的土壤含水率和土壤水吸力阶段也不相同。在低含水率(高吸力)阶段温度对土壤水分特征曲线的影响尤为明显, 随着含水率的不断升高(吸力降低), 温度的影响效果逐渐减弱。由此可以推断, 土壤在接近饱和的情况下温度的变化对土壤持水能力的影响较小; 在土壤含水量较低时, 温度的变化对土壤的持水能力影响较大, 温度越高相同情况下土壤能够维持的水分越少。

同理, 对于不同温度情景下石英砂的水分特征曲线, 虽然一般认为石英砂的性质很类似于土壤, 理论上来说不同温度情况下石英砂水分特征曲线的变化规律也很类似于普通土壤, 但是石英砂的持水能力比普通土壤差很多, 相同温度梯度下温度对基质势的影响较小, 石英砂对温度变化的敏感程度较土壤低。由于试验精度的限制, 本次试验结果显示温度的变化对

石英砂的持水能力基本无影响或者影响可以忽略。

结合土壤和石英砂实测水分特征曲线可以发现, 相同情况下, 土壤和石英砂两种试验样品持水性有很大的差异。普通土壤在相同吸力的情况下对应的含水率远大于石英砂。结合试验样品的机械组成分析可知, 石英砂的粒径范围主要集中在砂粒, 而粉粒和黏粒含量较低, 基本可以忽略。相同条件下黏粒和粉粒的粒径较小, 总表面积较大, 对水分的吸附能力较强; 而砂粒的粒径较大, 总表面积相对较小, 对水分的吸附能力较弱。因此, 对于土壤和石英砂两种试验样品来说砂粒含量较低(粉粒和黏粒含量高)的土壤比砂粒含量较高(粉粒和黏粒含量低)的石英砂在相同基质吸力的条件下持水量更大, 持水能力更强。而温度对土壤持水能力的影响是通过水分分子的活性和土壤本身性质共同作用而间接影响的, 所以黏粒含量较高, 持水量较大的土壤受温度的影响程度比砂粒含量大的石英砂大。

2.2 温度变化对样品比水容的影响

土壤比水容 $C(h)^{[19]}$ 是指土壤单位基质势的增加所引起的土壤含水量的变化, 是衡量土壤水分对植物的有效性和反映土壤持水性能的一个重要指标^[20-21]。土壤比水容可由较为简单的水分特征曲线模型 $\theta=A h^{-B}$ 的一阶导数求得:

$$C(h)=\frac{d\theta}{d\varphi}=-\frac{d\theta}{dh}=ABh^{-(B+1)}$$

式中: $C(h)$ 为土壤的比水容; A, B 为经验拟合参数。运用比水容量即土壤水分特征曲线的评价标准对土壤持水能力的强弱进行评定, 是一种较为传统的方法, 它可以对土壤的持水能力进行定性分析。庄季屏等^[17] 学者认为土壤水吸力为 100 kPa 时的比水容量值可以

较好地表征土壤持水能力。从图 1 中两种供试样品的比水容随吸力的变化曲线可以看出, 两种样品比水容均随吸力的增加而减小, 曲线随吸力的增加逐渐趋于平缓。表 2 为在不同温度情境下两种供试样品的比水容表达式和吸力为 100 kPa 时的比水容值。在 5℃, 15℃, 25℃ 三种情境下, 土壤样本在 100 kPa 时的比水容依次减小, 即土壤样本的持水能力依次减小; 石英砂样本在 100 kPa 时的比水容量随温度的增加无明显变化, 即温度的变化对石英砂样本的持水能力基本无影响。总的来说, 相同条件下普通土壤样本的持水能力受温度的影响情况比石英砂样本明显, 这与实测两种样品的水分特征曲线反映的结果一致。

表 2 供试样本比水容表达式

样品	温度	比水容表达式	偏离度	100 kPa 时的 比水容
土壤	5℃	$C=0.0557\times h^{-1.1735}$	4.9404 E-06	2.5600 E-04
	15℃	$C=0.0500\times h^{-1.1793}$	5.3057 E-06	2.2371 E-04
	25℃	$C=0.0417\times h^{-1.1650}$	1.2931 E-06	1.9918 E-04
石英砂	5℃	$C=0.0363\times h^{-1.3307}$	5.8159 E-06	8.1536 E-05
	15℃	$C=0.0375\times h^{-1.3314}$	3.6700 E-06	8.1514 E-05
	25℃	$C=0.0367\times h^{-1.3321}$	1.1661 E-05	8.1548 E-05

2.3 水分特征曲线的拟合

目前对于水分特征曲线模型参数的拟合国内外也有许多的研究^[22], 常见的有 RETC 程序(最速下降法)、REDT 程序(单形调优法)、最小二乘法等。本文在综合考虑程序源代码或软件的公开性以及编程复杂程度等原因后, 选用较为方便的最小二乘法对 Van Genuchten 模型经行拟合, 并求出相关参数值。不同温度情景下的土壤和石英砂两种供试样品的水分特征曲线数据进行拟合所得参数如表 3 所示。

表 3 水分特征曲线方程拟合参数

温度	土壤					石英砂				
	α	n	θ_s	θ_r	resnorms	α	n	θ_s	θ_r	resnorms
5℃	1.6166	1.2734	0.4999	0.0536	1.0329 E-05	3.7436	1.3317	0.1716	0.0002	5.7570 E-06
15℃	0.5189	1.2734	0.3250	0.0388	2.4376 E-06	3.6002	1.3569	0.1711	0.0002	3.8264 E-06
25℃	0.4661	1.2776	0.2649	0.0369	5.4652 E-06	3.4821	1.3353	0.1694	0.0002	1.1846 E-05
平均值	0.8672	1.2748	0.3633	0.0431	—	3.6086	1.3413	0.1707	0.0002	—
标准差	0.6496	0.0024	0.1221	0.0091	—	0.1310	0.0136	0.0012	0.0000	—
变异系数	0.7490	0.0019	0.3360	0.2115	—	0.0363	0.0102	0.0068	0.0516	—

Van Genuchten 模型虽属于经验模型但也包含一定的物理意义。因此在不同温度下通过拟合得到的模型参数在一定程度上也反映出两种供试样本受温度影响的情况。根据参数拟合结果, 对比土壤和石英砂两种供试样品的水分特征曲线实测值与拟合值可以发现六组试验的拟合偏离度(resnorms)均小于 10 E-5, 拟合效果较好。对于土壤样本来说, 其形状参数(α)、饱和含水率(θ_s)和残余含水率(θ_r)的拟合值随温度升高而减小; 形状参数(n)的拟合值随温度升

高而降低但趋势不明显。形状参数(n)只描述曲线的形状, 因此受温度的影响不大。参数 α 是土壤进气吸力相关的参数, 一般认为 $\alpha=1/h_d$, h_d 为土壤进气吸力, α 值随温度升高而减小, 表明土壤进气吸力在增大, 相同情况下样品的持水能力减小, 水势升高; 饱和含水率和残余含水率受温度的影响主要由于温度的变化影响样本水分分子的活性, 使水分子的运动发生变化, 从而导致水分粘滞性发生变化, 土壤颗粒与水分子之间的相互吸附能力发生变化, 相同吸力条件下

样品的持水能力不同。对 Van Genuchten 模型各参数拟合值进行统计分析可知,对于普通土壤来说,其形状参数(α)、饱和含水率(θ_s)和残余含水率(θ_r)的变异性均在 10%~100%之内,属于中等变异性,形状参数(n)的变异性系数较小属于弱变异性;对于石英砂样品来说,各参数的变异系数均小于 10%,为弱变异性,温度对石英砂影响较小。对比石英砂和土壤样本各参数的变异性发现温度的变化对于土壤参数的影响均大于对石英砂参数的影响,进一步验证了温度对土壤持水能力的影响很大部分是由土壤中水分的性质和土壤自身性质共同决定的,而并非传统的认为完全由于通过土壤自身性质或者土壤中的水分直接导致的。

3 结论

(1) 温度是影响土壤持水能力的重要因素,在不同含水率(土壤吸力)阶段影响程度不同。不同温度下土壤水分特征曲线的整体趋势变化不大,位置发生偏移。石英砂样品对温度变化的敏感性比普通土壤差,结合土壤机械组成进一步证明,粒径含量分配不同导致样本孔隙率不同是土壤与石英砂持水能力有显著差异的重要原因,同时也是样品持水能力受温度影响大小的重要原因。通过低水头段的比水容量对温度变化情境下的两种供试样本进行研究,在数值上进一步论证了水分特征曲线的研究结果,更加准确地评价土壤的持水性能和水分的有效程度。

(2) 对比土壤与石英砂的土壤水分特征曲线及模型拟合参数发现,两种样品的水分特征曲线和相关参数虽然随温度变化趋势相同但在实际数值上存在很大差异。温度的改变对土壤样本模型拟合参数的影响较大,对石英砂样本来说影响不明显。因此,如若选择石英砂替代土壤进行相关试验研究需慎重考虑。

参考文献:

- [1] 黄晓波,高冰可. 土壤水分特征曲线研究综述[J]. 农技服务,2016,33(4):22-23.
- [2] 赵雅琼. 非饱和带土壤水分特征曲线的测定与预测[D]. 西安:长安大学,2015.
- [3] Cai G Q, Zhao C G, Li J, et al. . 一种测试不同温度下非饱和土土—水特征曲线的试验装置(英文)[J]. Journal of Zhejiang University-Science A: Applied Physics&Engineering,2014,15(5):364-373.
- [4] Gao H, Shao M. Effects of temperature changes on soil hydraulic properties [J]. Soil and Tillage Research, 2015,153:145-154
- [5] 郑健,王燕,蔡焕杰,等. 植物混掺土壤水分特征曲线及拟合模型分析[J]. 农业机械学报,2014,45(5):107-112.
- [6] 吕殿青,王宏,王玲. 离心机法测定持水特征中的土壤收缩变化研究[J]. 水土保持学报,2010,24(3):209-212.
- [7] Van Genuchten MT. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980,44(5):892-898.
- [8] Brooks R H, Corey A T. Hydraulic properties of porous medium-Hydrology Paper[R]. Fort Collins: Colorado State University, 1964.
- [9] Gardner W. Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table[J]. Soil Science, 1958,85(4):228-232.
- [10] Russo D. Determining soil hydraulic properties by parameter estimation: On the selection of a model for the hydraulic properties [J]. Water Resources Research, 1988,24(3):453-459.
- [11] 徐绍辉,张佳宝,刘建立,等. 表征土壤水分滞留曲线的几种模型的适应性研究[J]. 土壤学报,2002,39(4):498-504.
- [12] 朱蔚利,肖自幸,牛健植,等. 两种模型对土壤水分特征曲线拟合的比较分析[J]. 湖南农业科学,2011,23(17):47-51.
- [13] 夏卫生,雷廷武,潘英华,等. 土壤水分动力学参数研究与评价[J]. 灌溉排水,2002,21(1):72-75.
- [14] Philip J, De Vries D. Moisture movement in porous materials under temperature gradients[J]. Eos, Transactions American Geophysical Union, 1957, 38(2):222-232.
- [15] Nimmo J, Miller E. The temperature dependence of isothermal moisture vs. potential characteristics of soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1986,50(5):1105-1113.
- [16] 蔡国庆,赵成刚,刘艳. 非饱和土土—水特征曲线的温度效应[J]. 岩土力学,2010,31(4):1055-1060.
- [17] Bachmann J, Horton R, Grant SA, et al. Temperature dependence of water retention curves for wettable and water-repellent soils[J]. Soil Science Society of America, 2002,66(1):44-52.
- [18] 尚曼廷,冯杰,刘佩贵,等. SWCC 测定时吸力计算公式与最佳离心时间的探讨[J]. 河海大学学报:自然科学版,2009,37(1):12-15.
- [19] 尚曼廷,张建云,刘九夫,等. 大孔隙对土壤比水容重及非饱和导水率影响的试验研究[J]. 灌溉排水学报,2012,31(2):1-5.
- [20] 马昌臣,王飞,穆兴民,等. 小麦根系机械作用对土壤水分特征曲线的影响[J]. 水土保持学报,2013,27(2):105-109.
- [21] 邢旭光,赵文刚,马孝义,等. 土壤水分特征曲线测定过程中土壤收缩特性研究[J]. 水利学报,2015,46(10):1181-1188.
- [22] 刘洪波,张江辉,虎胆·吐马尔白,等. 土壤水分特征曲线 VG 模型参数求解对比分析[J]. 新疆农业大学学报,2011,34(5):437-441.