

DOI: 10.11779/CJGE201610008

基于动态多步流动法的非饱和土水力特性测试研究

伊盼盼^{1,2}, 牛圣宽³, 韦昌富², 陈盼²

(1. 武昌理工学院, 湖北 武汉 430023; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071;

3. 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 湖北 武汉 430010)

摘要: 非饱和土水力特性在非饱和土的研究中起重要作用。鉴于传统的测试方法耗时较长, 提出能够快速测定非饱和土水力特性的动态多步流动方法。该方法基于 Wei & Dewoolkar 提出的多孔介质热动力学混合物理论模型, 推导出能够描述非平衡态的非饱和土饱和度的演化方程, 通过对粉土和粉质黏土两种试样开展动态多步流动试验, 并根据动态试验结果求解饱和度演化方程, 得出试样处于平衡状态时的土水特征曲线和渗透函数。该方法不需要求解初边值问题, 仅仅需要动态多步流动的试验数据求解饱和度的演化方程, 进而得出试样的水力特性参数, 与其它方法相比, 该方法更加简单有效。

关键词: 联合测试系统; 多步流动试验; 土水特征曲线; 渗透函数

中图分类号: TU443

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2016)10 - 1797 - 05

作者简介: 伊盼盼(1984 -), 女, 博士, 主要从事岩土工程方向的教学与研究工作。E-mail: ppan2003@163.com。

Dynamic multi-step outflow method for tests on hydraulic properties of unsaturated soils

YI Pan-pan^{1,2}, NIU Sheng-kuan³, WEI Chang-fu², CHEN Pan²

(1. Wuchang University of Technology, Wuhan 430223, China; 2. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences,

Wuhan 430071, China; 3. Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research Co., Ltd., Wuhan 430010, China)

Abstract: Hydraulic properties of unsaturated soils play an important role in the studies on unsaturated soils. Because the traditional testing method takes a long time, a dynamic multi-step outflow method for fast determination of hydraulic characteristics of unsaturated soils is proposed. The method is based on the thermodynamic mixture of theoretical models proposed by Wei & Dewoolkar to derive saturation evolution equations to describe the non-equilibrium unsaturated soil by conducting two dynamic multi-step flow experiments on silt and silt clay samples. The dynamic evolution equations for saturation are solved according to the test results, and when the samples are in equilibrium state, the soil water characteristic curve and permeability function are obtained. This method does not solve the initial boundary values, just needs test data of dynamic multi-step outflow to solve the evolution equations for saturation, and thus hydraulic parameters of the samples are obtained. Compared with other methods, this method is more simple and effective.

Key words: combined testing system; multi-step outflow test; soil-water characteristic curve; hydraulic conductivity function

0 引言

非饱和土水力特性包括土水特征曲线和渗透函数。土水特征曲线描述基质吸力与饱和度之间的关系。渗透函数描述渗透系数与含水率之间的关系。这两大水力特性在非饱和土的理论研究和工程实践中起着重要作用^[1-3]。

传统的测试非饱和土水力特性的方法多是在试样处于平衡状态下进行的, 耗时较长^[4-7]。目前, 有关非平衡态对试样渗流物理过程影响的研究开展的还不多, 文献[8~10]对土水特征曲线的唯一性进行了研

究, 发现试样在平衡状态下的含水率不但与基质吸力有关, 而且与施加的基质吸力步长有关, 这种现象被称为“动效应”。Wildenschild等^[11]也发现了这种“动效应”, 并从包气水、进气值、动态接触角等方面解释了产生“动效应”的原因。Hassanizadeh等^[12]基于热动力学多孔介质理论, 提出了一个能够描述非平衡流动过程的动态模型, 指出基质吸力和饱和度随时间变化的速率是线性相关的。近年来, 许多科研工作者利

基金项目: 国家自然科学基金项目(11302243); 湖北省建设科技计划项目; 湖北省教育厅科研计划项目(B2016342)

收稿日期: 2015 - 08 - 20

用该模型并结合传统的土水特征经验模型开展了非饱和和土水力特性的研究工作。研究发现^[13]，该模型中的材料参数 ξ 不仅与含水率有关还受到孔隙流速的制约。

为了解决这个问题，Wei等^[14-15]指出可以把这种基质吸力和饱和度随时间变化率值的线性相关性用来模拟非平衡态的多步流动试验结果。本文在此基础上提出了能够快速测定非饱和土水力特性的动态多步流动方法，该方法的思路是：首先，建立能够描述非平衡态的非饱和土饱和度的演化方程，接着开展动态多步流动试验；然后，根据动态试验结果求解饱和度演化方程，得出不同基质吸力步下试样处于平衡状态下的土水特征曲线和渗透函数。

1 动态多步流动方法的原理

1.1 饱和度的演化方程的建立

Wei等^[14-15]指出土体中基质吸力的变化与饱和度之间存在以下关系：

$$p_c^{\text{dyn}} = p_c^{\text{eq}} - \xi \dot{S}_r, \quad (1)$$

式中， p_c^{dyn} 为动态吸力值， p_c^{eq} 为平衡态下吸力值， ξ 为参数（与施加的吸力值有关）， S_r 为饱和度。

若吸力增加一小量 δp_c ，则

$$\delta p_c = \left. \frac{dp_c^{\text{eq}}}{dS_r} \right|_{S_{r0}} \delta S_r - \xi \delta \dot{S}_r. \quad (2)$$

令 $\frac{1}{C} = \left. \frac{dp_c^{\text{eq}}}{dS_r} \right|_{S_{r0}}$ ，则式(2)变为

$$\delta p_c = \frac{1}{C} \delta S_r + \frac{\tau_c}{C} \delta \dot{S}_r, \quad (3)$$

式中， C 是土水特征曲线 $S_r^{\text{eq}}(p_c)$ 的斜率或 $p_c^{\text{eq}}(S_r)$ 斜率的倒数，也称容水率。 τ_c 表示在扰动后土样中孔隙水流动（Darcy流动）的特征时间， $\tau_c = -C\xi$ 。

假设扰动（吸力）是突然增加的，故有

$$\delta p_c(t) = \sum_{i=1}^n \Delta p_c^i H(t-t_i), \quad (4)$$

式中， $H(t)$ 是所谓的Heaviside函数。

把式(4)带入式(3)可以得到多步流动下试样饱和度随时间的演化方程：

$$S_r(t) = S_r^0 + \sum_{i=1}^n \Delta p_c^i C_i \left[1.0 - \exp\left(-\frac{t-t_i}{\tau_{ci}}\right) \right], \quad (5)$$

式中， C_i 和 τ_{ci} 分别是吸力为 p_c^i 时的稳态土水特征曲线斜率（容水率）和扰动后孔隙水流动的特征时间。

1.2 土水特征曲线和渗透函数的确定

根据实测的饱和度随时间的演化曲线，采集足够多且有代表性的点，采用最小二乘法可以得出每级吸力步对应的 C_i 和 τ_{ci} 值，其原理表示为

$$E(C_i, \tau_{ci}) = \sum_{j=1}^m \left[S_r^{ij} - S_r(t_{ij}, C_i, \tau_{ci}) \right]^2. \quad (6)$$

给 C 和 τ_c 定一个初值 C^0 ， τ_c^0 ，根据施加的吸力步及实测的溢出水量随时间的变化关系逐级求解 $E(C_i, \tau_{ci})$ 最小时对应的 C_i ， τ_{ci} 值。

确定了各级吸力作用下的容水率 C_i 和特征时间 τ_{ci} ，可以得到在基质吸力 p_c^i 作用下，试样处于平衡态时对应的饱和度，

$$S_r^{\text{eq}} = S_r^0 + \sum_{k=1}^i C_k \Delta p_c^k. \quad (7)$$

孔隙水压力耗散时间（特征时间） τ_c 与土样的渗透性有关，通过对孔隙水的渗流过程分析，可以建立特征时间 τ_c 与渗透系数 k_w 的关系。若不考虑变形的影响（孔隙率为常数）。孔隙水质量平衡方程为

$$\frac{\partial S_r}{\partial t} + \nabla \cdot (S_r \mathbf{v}^w) = 0. \quad (8)$$

孔隙水的流动由以下Darcy一类方程控制：

$$\mathbf{v}^w = -\frac{k(p_c)}{n\gamma_w} \nabla p^w. \quad (9)$$

利用土水特征关系 $S_r(p_c)$ 及 C 的定义，将式(9)代入式(8)可得

$$C(p_c) \frac{\partial p^w}{\partial t} = -\frac{S_r k(p_c)}{n\gamma_w} \nabla \cdot \nabla p^w. \quad (10)$$

式(10)可以写为

$$\frac{\partial p^w}{\partial t} = c_v \nabla \cdot \nabla p^w, \quad (11a)$$

$$c_v = -\frac{S_r k(p_c)}{n\gamma_w C(p_c)}. \quad (11b)$$

这是在上述试验条件下土样孔隙水压力耗散过程的控制方程，其中 c_v 为孔隙水压力耗散系数。

设试样的长度为 H ，那么由式(11)得出Darcy流动的特征时间 τ_c 为 $\frac{H^2}{\tau_c} - c_v \frac{p_w}{H^2}$ ，即

$$\tau_c = \frac{H^2}{c_v}. \quad (12)$$

1.3 动态多步流动方法的数值实施

通过开展动态多步流动试验，可以得到不同基质吸力下饱和度随时间的演化方程。根据前面提出的理论模型，用MATLAB编程进行求解，进而得到试样在平衡状态下的土水特征曲线和渗透函数，其求解流程图如图1所示。

首先，整理采集数据。本试验采集的数据包括：各时刻的溢出水量、基质吸力。根据试验中试样的初始状态参数：初始饱和度、初始吸力值和饱和试样中水的质量，得到每级压力下、各个时刻试样的饱和度。

然后结合前面的理论推导，采用最小二乘法，求

解出每级压力下对应的 C_i 和 τ_{ci} 。

根据求得 C_i 和 τ_{ci} 值代入式 (7) ~ (12), 可以求得平衡态下试样的饱和度 S_r^{eq} , 渗透系数 k_w 。

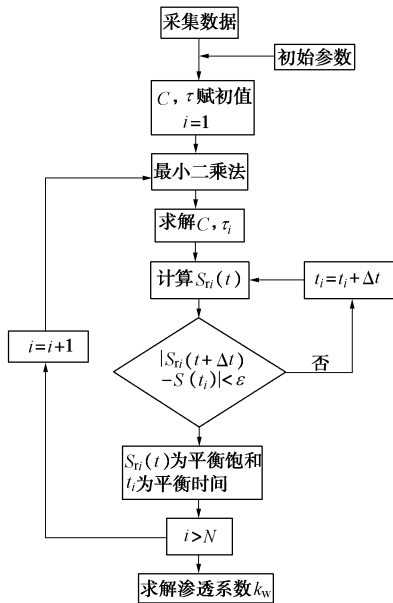


图 1 动态多步方法的数值流程图

Fig. 1 Flow chart of dynamic multi-step process

2 试验设备和试验方法

2.1 试验设备

这里采用联合测试系统开展多步流动试验。其示意图如图 2 所示。该系统主要由压力控制系统、压力室、储水容器、称量系统、数据采集系统等主要部分构成。

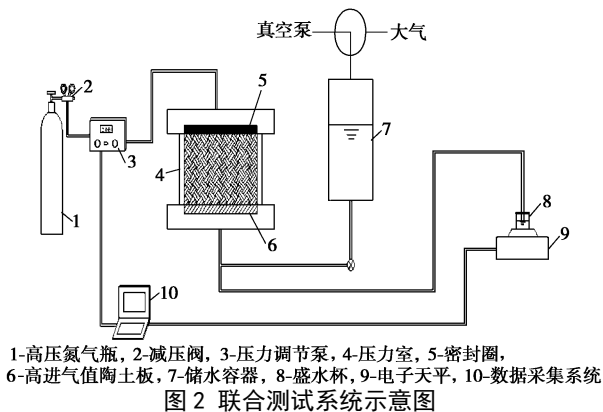


图 2 联合测试系统示意图

2.2 试验步骤

首先, 制备试样。取重塑土样过 2 mm 筛, 根据试验设计的干密度、初始含水率配制土样, 将配好的土样静置 24 h 后用压样法压入环筒内, 将压好的试样和试验中选用的陶土板进行抽真空饱和。

接着, 组装试样。取出饱和和试样放在陶土板上, 在试样上部放密封圈和上盖, 四周用螺栓使上盖和底座压紧把试样密封起来, 通过快接头把排水管线与

装样容器连接。

然后, 按下述步骤开展动态多步试验: 在 t_0 时刻, 对试样施加第 1 级吸力增量 Δp_c^1 , 直至 t_1 时刻 (此时试样并没有达到平衡状态) 在该时刻施加第 2 级吸力增量 Δp_c^2 , 根据类似的步骤, 施加第 n 级吸力增量 Δp_c^n , 直至 t_n 时刻。全程利用 LabVIEW 数据采集软件, 记录施加的吸力及溢出水量随时间的变化曲线。

3 试验结果分析

这里采用了粉土和粉质黏土两种土样对上述动态多步流动方法进行验证。

3.1 粉土试样动态流动试验结果

对粉土试样开展动态多步流动试验施加的吸力共 9 步, 施加的吸力历程为 20 kPa—30 kPa—40 kPa—60 kPa—90 kPa—130 kPa—170 kPa—210 kPa—290 kPa, 加载历时约 5 d。通过 LabVIEW 数据采集软件可以得到试样溢出水量随时间的演化曲线和吸力与加载时间的关系曲线, 如图 3 所示。从图中可以看出, 试样在各吸力步下的溢出水量均未达到平衡状态即进入了下一级吸力状态, 且前期溢出水量变化较快, 而后期则逐渐趋于平缓。

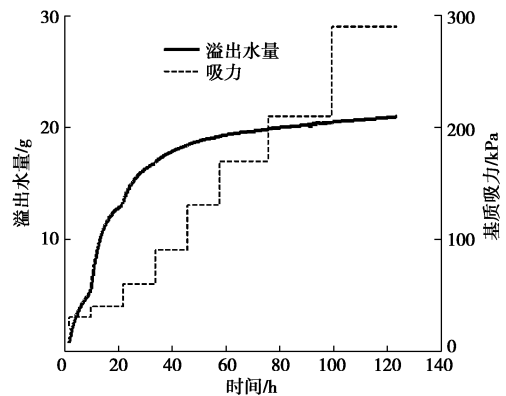


图 3 粉土试验中溢出水量及基质吸力随时间变化关系

Fig. 3 Variation of overflow water and matric suction in silt tests with time

由溢出水量随时间的变化曲线可以得到试样饱和度的变化, 利用饱和度随时间演化方程得出的各级吸力步下 C 和 τ_c 值。根据前面的理论模型, 可以得到平衡状态下试样的土水特征曲线和渗透函数曲线, 如图 4, 5 所示。

从图 4 中可以看出, 由动态多步流动方法得到的土水特征曲线和平衡状态下用压力板测得的 SWCC 曲线几乎重合。另外, 压力板测试试样平衡态下 SWCC 用了 17 d 时间, 而动态多步流动方法仅用了约 5 d 时间, 节省了约 12 d 时间。由此可见, 动态多步流动方法能够快速、有效的测定非饱和土的水力特性参数。

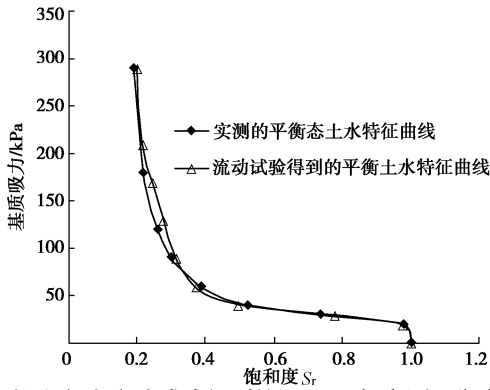


图4 粉土多步流动试验得到的 SWCC 与实测平衡态对比
Fig. 4 Comparison between measured SWCC of equilibrium silt and results of multi-step outflow tests

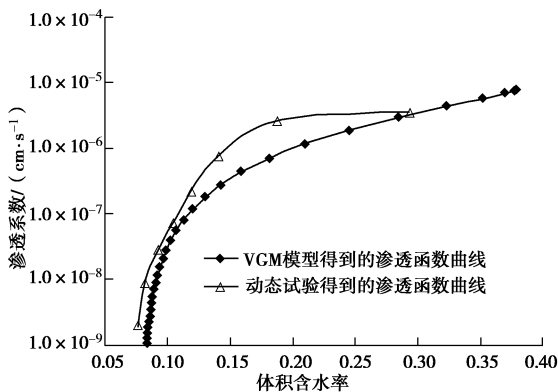


图5 粉土多步流动试验的渗透函数曲线与 VGM 模型结果的对比
Fig. 5 Comparison between hydraulic conductivity in silt multi-step outflow tests and VGM model results

根据上述理论模型同样能够计算出试样的渗透函数,把该模型得出的渗透函数和传统的 VGM 模型^[16-17]得到的渗透函数做了对比,如图 5 所示。从图中可以看出通过该模型得出的渗透函数和 VGM 模型得到的渗透函数在小吸力范围内有些偏差,而在吸力较大时几乎重合。

3.2 粉质黏土试样动态流动试验结果

对粉质黏土开展动态多步流动试验,这里施加的吸力共 10 步,施加的吸力历程为 20 kPa—30 kPa—40 kPa—60 kPa—90 kPa—120 kPa—160 kPa—200 kPa—240 kPa—290 kPa。加载历时约 5 d。通过 LabVIEW 数据采集软件可以得到试样溢出水量随时间的演化曲线和吸力步与加载时间的关系曲线,如图 6 所示。

同样,根据前面的理论模型可以得到平衡状态下试样的土水特征曲线和渗透函数曲线,如图 7,8 所示。

图 7 为理论模型得到粉质黏土试样平衡状态下的土水特征曲线与压力板实测的平衡态下试样土水特征曲线对比。通过对比可知,由理论模型拟合得到的土水特征曲线与实测值相差不大。另外,实测试样平衡态土水特征曲线用了 70 d 时间,而动态方法由于仅测量了 300 kPa 以内的土水特征曲线点,仅用了 4~5 d

时间,大量节省了测试时间。

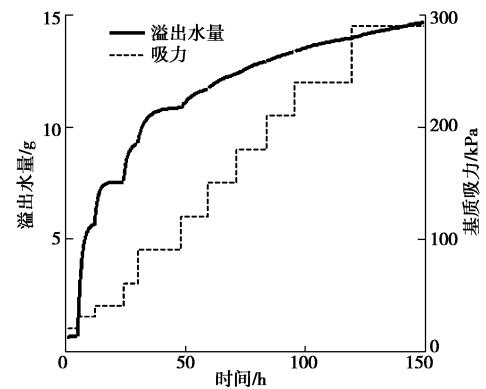


图6 粉质黏土试验溢出水量及基质吸力随时间变化关系
Fig. 6 Variation of overflow water and matric suction in silty clay tests with time

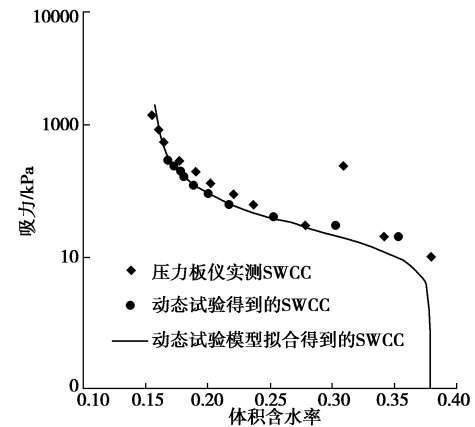


图7 粉质黏土多步流动试验得到的 SWCC 与实测值对比
Fig. 7 Comparison between measured SWCC of equilibrium silty clay and results of multi-step outflow tests

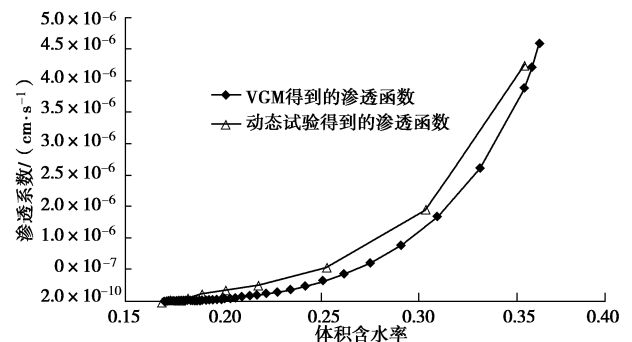


图8 粉质黏土多步流动试验的渗透函数曲线与 VGM 模型结果的对比
Fig. 8 Comparison between hydraulic conductivity in silty clay multi-step outflow tests and VGM model results

而动态方法由于仅测量了 300 kPa 以内的土水特征曲线点,而对于粉质黏土,一般要求施加的吸力值较大,为解决这个问题,这里采用 VGM 模型对试验点进行拟合,如图 7 中实线所示。可以看出由 VGM 模型外推得到的 SWCC 曲线和压力板实测值几乎重合。由此可见,对于超出试验吸力范围的土水特征曲

线可以用前面理论模型结合 VGM 模型进行外推的办法得出。

图 8 为理论模型得出的渗透函数和传统的 VGM 模型结果的对比。可以看出, 该理论模型得出的非饱和土渗透函数与 VGM 模型结果比较接近; 但由于加载基质吸力步的影响, 模型得到的渗透系数值偏少, 得到的渗透函数曲线不够平滑。

4 结 论

(1) 通过建立非平衡态的非饱和土饱和度的演化方程及开展动态多步流动试验确定的平衡状态下试样的土水特征曲线和渗透函数与平衡态下的结果一致。

(2) 通过对粉土和粉质黏土两种试样进行验证, 可知动态多步流动方法能大量缩短测试时间, 并且土样的黏性越强, 缩短的时间越多。

(3) 该方法仅需要根据动态多步流动的试验数据求解饱和度的演化方程, 进而得出试样的水力特性参数。因此, 与其他方法相比, 该方法更加简单有效。

参考文献:

- [1] FREDLUND D G, XING A Q, FREDLUND M D, et al. The relationship of the unsaturated soil shear strength to the soil-water characteristic curve[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1996, **33**(3): 440 - 448.
- [2] 李爱国, 岳中琦, 谭国焕, 等. 野外土-水特征及其工程意义[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, **23**(6): 969 - 973. (LI Ai-guo, YUE Zhong-qi, THAM L G, et al. Field soil-water characteristics and its engineering implication[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, **23**(6): 969 - 973. (in Chinese))
- [3] 刘汉乐, 周启友, 徐 速. 非饱和带中非均质条件下 LNAPL 运移与分布特性实验研究[J]. *水文地质工程地质*, 2006, **5**: 52 - 57. (LIU Han-le, ZHOU Qi-you, XU Su. An experimental investigation of LNAPL migration and redistribution in unsaturated heterogeneous porous media[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2006, **5**: 52 - 57. (in Chinese))
- [4] FREDLUND D C, RAHARDJO H. 非饱和土力学[M]. 陈仲颐, 译. 北京: 中国建筑出版社, 1997. (FREDLUND D G, RAHARDJO H. *Unsaturated soil mechanics*[M]. CHEN Zhong-yi, trans. Beijing: China Architecture and Building Press, 1997. (in Chinese))
- [5] 孙树国, 陈正汉, 朱元青, 等. 压力板仪配套及 SWCC 试验的若干问题探讨[J]. *后勤工程学院学报*, 2006, **4**: 1 - 5. (SUN Shu-guo, CHEN Zheng-han, ZHU Yuan-qing, et al. Coordinated ceramic plate extractors and some problems of SWCC test[J]. *Journal of Logistical Engineering University*, 2006, **4**: 1 - 5. (in Chinese))
- [6] 李志清, 李 涛, 胡瑞林, 等. 非饱和土土水特征曲线(SWCC)测试与预测[J]. *工程地质学报*, 2007, **15**(5): 700 - 707. (LI Zhi-qing, LI Tao, HU Rui-lin, et al. Methods for testing and predicting of SWCC in unsaturated soil mechanics[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2007, **15**(5): 700 - 707. (in Chinese))
- [7] LU N, WAYLLACE A, CARRERA J, et al. Constant flow method for concurrently measuring soil-water characteristic curve and hydraulic conductivity function[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2006, **29**(3): 230 - 241.
- [8] VACHAUD G, VAUCLIN M, WAKIL M. A study of the uniqueness of the soil moisture characteristic during desorption by vertical drainage[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1971, **36**(3): 531 - 532.
- [9] TOPPG C, KLUTE A, PETERS D B. Comparison of water content-pressure head data obtained by equilibrium, steady-state, and unsteady-state methods[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1966, **31**(3): 312 - 314.
- [10] SMILES D, VAEHAUD G, VAULIN M. A test of the uniqueness of the soil moisture characteristic during transient, nonhysteretic flow of water in a rigid soil[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1971, **35**(4): 534 - 539.
- [11] WILDENSCHILD D, HOPMANS J W, SIMUNEK J. Flow rate dependence of soil hydraulic characteristics[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2001(65): 35 - 48.
- [12] HASSANIZADEH S M, GRAY W G. Thermodynamic basis of capillary pressure in porous media[J]. *Water Resources Research*, 1993, **29**(10): 3389 - 3405.
- [13] CARROLL D M, PHELAN T J, ABRIOLO L M. Exploring dynamic effects in capillary pressure in multistep outflow experiments[J]. *Water Resources Research*, 2005, **41**(11): 1 - 14.
- [14] WEI C F, DEWOLKAR M M. Formulation of capillary hysteresis with internal state variables[J]. *Water Resources Research*, 2006, **42**: W07405: 1 - 16.
- [15] WEI C F, MURALEETHARAN K K. Linear viscoelastic behavior of porous media with non-uniform saturation[J]. *International Journal of Engineering Science*, 2007, **45**: 698 - 715.
- [16] VAN GENUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1980, **44**: 892 - 898.
- [17] MUALEM Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media[J]. *Water Resources*, 1976, **12**: 513 - 522.