

DOI: 10.16285/j.rsm.2015.10.012

NaCl 溶液对土体持水特性影响的试验研究

马田田, 韦昌富, 陈 盼, 夏晓龙

(中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘 要: 分别采用不同浓度的 NaCl 溶液对低塑性黏土进行饱和, 然后进行压力板和蒸汽平衡法试验, 获得整个吸力范围内的土-水特征曲线 (SWCC)。分析不同浓度的孔隙溶液对 SWCC 的影响规律, 结果表明: 盐分对基质吸力的影响较小, 对总吸力影响较大, 这主要是因为盐溶液引起的渗透吸力所致。在蒸汽平衡法试验中, 随着含水率的降低, 孔隙浓度增大, 渗透吸力增大。然而, 基质吸力随着含水率的减小迅速增大, 使得渗透吸力所占的比例逐渐减小。在非饱和土中, 总吸力包括基质吸力和渗透吸力; 基质吸力包括毛细部分和吸附部分, 当土体中含水率较低时, 主要是吸附效应在起作用; 渗透吸力与溶液浓度有关。根据试验结果深入分析了吸附水膜和土颗粒之间的相互作用, 得出由于溶质的存在对分子间吸附力的影响规律。根据表面化学原理, 建立了分子间作用力和吸附水膜厚度之间的关系, 以描述处于吸附状态的土-水特征曲线。

关 键 词: 盐溶液; 土-水特征曲线; 基质吸力; 渗透吸力; 分子间作用力

中图分类号: TU 411.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2015) 10-2831-06

An experimental study of effect of NaCl solution on soil water characteristics

MA Tian-tian, WEI Chang-fu, CHEN Pan, XIA Xiao-long

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: The soil-water characteristic curve (SWCC) of a low-plasticity clay over a wide range of suction was determined based on the pressure plate and vapor equilibrium techniques. The soil samples were prepared by saturating the low-plasticity clay with NaCl solutions with different concentrations. The effect of pore solution concentration on the SWCC was analyzed. The experimental results show that the effect of salt content has little influence on the matric suction, and has great influence on the total suction, the reason for this is that the saline solution induces the osmosis suction. In the vapor equilibrium experiments, it is found that the solution concentration increases with the decrease of water content, and correspondingly the osmosis suction increases. With the decrease of water content, however, the matric suction increases rapidly, while the contribution of osmosis suction decreases gradually. In unsaturated soils, the total suction (the negative value of pore water potential) includes the matric suction and the osmosis suction, where the matric suction has two contributions, i.e. capillary and adsorption, and the osmosis suction depends on the concentrations of pore solution. When the water content of the sample is low, the adsorption effect is dominant. Based on the experimental results, the interaction between adsorption water film and the soil particles is analyzed, and the influence of the solute on the intermolecular forces is also investigated. According to the surface chemistry theory, a relationship between intermolecular forces and adsorbed water film is proposed to describe the soil-water characteristics at low water potential.

Keywords: saline solution; soil-water characteristic curve; matric suction; osmosis suction; intermolecular forces

1 引 言

在描述非饱和土的流动及力学行为时, 土-水特征曲线 (SWCC) 是一个很重要的理论和工具。该曲线为土体持水能力的表征, 定义为土中吸力 (孔

隙水势能) 和重量含水率、体积含水率或饱和度之间的关系^[1]。土体中孔隙水的总吸力 (总势能) 主要包括基质吸力和渗透吸力。在非饱和土的研究中, 一般主要关注基质吸力的作用, 很少考虑孔隙溶液的影响及渗透吸力的作用^[2]。然而, 当土中含盐量

收稿日期: 2014-12-06

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 11502276, No. 11372078)。

第一作者简介: 马田田, 女, 1986 年生, 博士, 助理研究员, 主要从事非饱和土方面的研究工作。E-mail: ttma@whrsm.ac.cn

通讯作者: 韦昌富, 男, 1966 年生, 博士, 研究员, 博导, 主要从事多孔介质理论及其工程应用研究。E-mail: cfwei@whrsm.ac.cn

较高时,土中的渗透吸力是不可忽略的^[3]。对黏性土,其骨架带有不同的电荷,而孔隙水中也包含有各种不同价位的离子,因此,研究孔隙溶液对土-水特征曲线的作用与影响具有重要的理论价值和实践意义。

Miller等^[3]根据试验结果指出,土中含盐量对基质吸力的影响较小,主要是渗透吸力和总吸力与含盐量有关。孙德安等^[2]对粉土的试验研究也得出了相似的结论,并且总吸力和基质吸力的差值大于相同浓度纯盐溶液的渗透吸力,他们认为这是由于土颗粒表面对溶液的吸附作用引起的。然而,王利莉等^[4]根据试验结果指出,含盐量对盐渍土的基质吸力有一定的影响;Thyagaraj等^[5]认为,溶液流向会对基质吸力产生影响。

土体中固相和液相之间存在着复杂的相互作用,孔隙溶液对土体的物理特性和持水特征具有重要的影响,因此,土-水特征曲线同时也反映了土体中孔隙溶液的性质。栗现文^[6]、郭全恩^[7]等通过试验研究了不同浓度的孔隙溶液对土壤持水特性的影响,认为水质的矿化度对土壤饱和含水率有一定的影响。王伟等^[8]指出,水质主要是通过影响近饱和和段土壤结构,从而影响土壤持水特性;于沉香等^[9]发现,渗透吸力的存在使得盐渍土的持水能力有所增强。

在模型方面,Nitao和Bear^[10]指出,在很多毛细压力或基质势的模型中,一般只考虑了毛细作用,当饱和度达到残余状态时,计算出的毛细压力是无限增大的。当与Kevin's方程联合时,此关系会错误地预测此时气相中水蒸汽的浓度为0。通过膜流动(蒸发)或化学作用饱和度还可以进一步减小,甚至到0,但在很多模型中此时的液相压力和基质势是没有定义的。同时由于试验仪器上存在的困难,在低含水率时的试验数据非常稀少,这也限制了SWCC模型较干燥段的发展^[11]。另外,由于在模型中引入了残余含水率这个参数,阻碍了在低势能区域对干燥过程物理意义的进一步理解。残余含水率只是一个拟合参数,并没有具体定量的值。Philip^[12]提出了一个在多孔介质中考虑毛细凝结和吸附的统一方法,通过增加吸附项,提出了改进后的Young-Laplace方程。根据该扩展方程,Tuller和Or^[13]同时考虑了吸附和毛细过程,得到了饱和度和液相的界面面积与化学势之间的关系表达式。这样可将SWCC的描述范围扩大,在传输过程中从质量流动

到蒸汽传输之间架起了一座桥梁。

本文以含有不同浓度NaCl溶液的低塑性黏土为研究对象,采用压力板仪和蒸汽平衡法(相对湿度法)获得整个吸力范围内的土-水特征曲线,分析含盐量对基质吸力和总吸力的影响规律。根据表面化学的概念,提出分子间吸附力和吸附水膜厚度之间的关系,为进一步描述比“残余含水率”更干状态下的土-水特征曲线(此处的“残余含水率”为建立数学模型时人为引入的一个参数)。

2 试验材料

本文采用低塑性黏土为试验材料,其物理性质如表1所示。采用N₂吸附法获得该黏土的比表面积 $S_a = 22.63 \text{ m}^2/\text{g}$ 。分别采用不同浓度的NaCl溶液配制成初始含水率为20%的土样,静置48h,使其水分分布均匀。试验中采用的土样均为重塑土样,静压法制样,设定的干密度为 $1.4 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。然后将制备好的试样采用抽真空方法进行饱和,饱和时采用相同浓度的NaCl溶液。试验中设定NaCl溶液的浓度分别为0、0.1、0.2、0.5、1.0 mol/L。

表1 土样的物理性质指标
Table 1 Physical properties of clay sample

土粒相 对密度 G_s	比表 面积 S_a / m^2/g	液限 w_L /%	塑限 w_p /%	各粒组含量/%		
				0.25~ 0.075 mm	0.075~ 0.005 mm	<0.005 mm
2.71	22.63	32.9	19.1	17.7	79.4	2.9

3 含盐量对土-水特征曲线影响的试验研究

3.1 试验方法

在低吸力阶段时,采用常规压力板仪测得该黏土在不同含盐量下的土-水特征曲线。环刀土样的截面积为 30 cm^2 ,高度为2cm。首先将陶土板和土样抽真空饱和,然后将土样放在饱和的陶土板上,用力按压,使土样和陶土板紧密接触。土样从饱和状态开始脱湿,压力板施加的吸力等级为10、20、40、80、138、199、286、435、683、958、1 288 kPa,每级吸力的平衡时间约为7~10 d。试验所得结果如图1中的低吸力段所示,采用重量含水率表示。压力板方法测量到的是土样的基质吸力,并且在试验过程中,土样中的孔隙水溶液和陶土板中的水溶液是连续的,因此,土样中孔隙溶液的浓度与初始配制浓度相同。

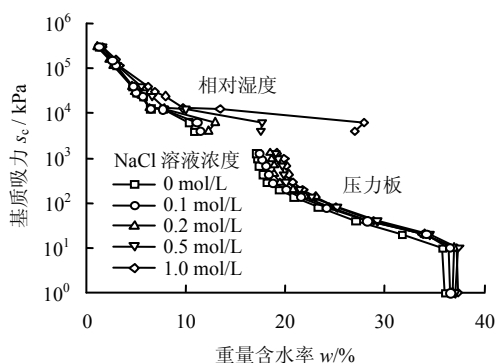


图 1 吸力与重量含水率之间的关系

Fig.1 Relationships between suction and gravimetric water content

在高吸力阶段，采用相对湿度法来测量低含水率状态时的土-水特征曲线。试验中所使用的饱和盐溶液及对应的吸力见表 2（温度为 27 °C）。相对湿度法获得的是总吸力，包括基质吸力和渗透吸力。其中基质吸力又可以分为毛细部分（即孔隙气压力和孔隙水压力的差值）和吸附部分（分子间吸附力），渗透吸力主要与水中溶质有关。总吸力与相对湿度的关系为

$$s_t = s_o + s_m = -\frac{RT}{V_w} \ln RH \quad (1)$$

式中： s_t 、 s_o 、 s_m 分别为总吸力、渗透吸力和基质吸力； R 为气体状态常数； T 为 Kelvin 温度； V_w 为水的单位摩尔体积； RH 为对应的相对湿度。式 (1) 假设基质吸力和渗透吸力不存在相互作用，具有加和性。

表 2 饱和盐溶液及其对应吸力值（温度为 27 °C）

Table 2 Saturated salt solutions and corresponding suctions at 27 °C

饱和盐溶液	吸力 / MPa	饱和盐溶液	吸力 / MPa
K ₂ SO ₄	3.97	(NH ₄) ₂ SO ₄	29.65
CuSO ₄ · 5H ₂ O	6.25	NaCl	34.50
KNO ₃	12.38	K ₂ CO ₃ · 2H ₂ O	116.37
ZnSO ₄ · 7H ₂ O	12.90	MgCl ₂ · 6H ₂ O	155.21
KCl	24.09	LiCl	302.39

土样的制作方法和压力板仪试验是一致的，将制备好的土样放入相对湿度控制箱里，如图 2 所示。其中每级吸力平衡时间为 60 d，10 个测点（对应 10 级吸力）同时平行进行，这样就大大短缩了试验时间，试验结果如图 1 中的高吸力段所示。

3.2 试验结果分析

根据热力学原理，渗透吸力与浓度之间的关系为

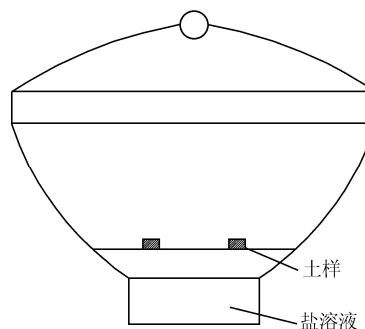


图 2 相对湿度法示意图

Fig.2 Sketch of vapor equilibrium method

$$s_o = -\frac{RT}{V_w} \ln a^w \quad (2)$$

式中： a^w 为孔隙溶液中水的活性，假设 NaCl 溶液为理想溶液，则 $a^w = x^w$ ， x^w 为孔隙溶液中水的摩尔分数。

在压力板试验中，当施加吸力时，孔隙溶液向外排出，并且一直与土样中的孔隙溶液连续，因此，假设溶质也随着水分一起排出，土样中的溶液浓度保持不变。而在相对湿度试验中，水分是通过气相平衡的，假设溶质不具有挥发性，不随着水分向外排出。因此，随着含水率的降低，土体中孔隙溶液的浓度是逐渐增大的，渗透吸力也逐渐增大。由此可以根据相对湿度法测量到的总吸力和计算得出的渗透吸力，可以推得对应含水率下的基质吸力。

从压力板仪试验结果中可以看出，随着孔隙溶液浓度的增大，饱和含水率增大。不同浓度的土-水特征曲线是平行的，也就是说孔隙溶液对该土样的基质吸力影响较小，此处可以假设基质吸力和渗透吸力部分不存在相互作用。在相同含水率时，相对湿度试验测量到的总吸力明显比压力板仪得到的基质吸力大。随着浓度的增大，渗透吸力增大，使得测量得到的总吸力增大。然而随着含水率的进一步减小，基质吸力迅速增大，渗透吸力所占的比例越来越小。

对于蒸馏水饱和的土样来说（见图 1 中 NaCl 溶液浓度为 0 mol/L 的曲线），渗透吸力可以忽略，此时总吸力就是基质吸力，而此时压力板得出的结果和相对湿度法的结果并不是连续一致的。如图 1 所示，当吸力大于 500 kPa 时，压力板得出的曲线明显变得陡峭。此时采用相对湿度法得到的吸力比压力板测得的结果较小，而这与前人的研究成果是一致的。Madsen 等^[14]指出，在含水率相同时，热电偶干湿表测量到的势能（负的吸力）比压力板得到的要大。Peck 和 Rabbidge^[15]也得到了相似的结论，

压力板得到的势能低于张力计的测量值。这主要是因为，在势能很低时（吸力较大时），土样和压力板中水的连续性较差，导致土样平衡时间很慢，造成压力板的误差较大^[14, 16]。

4 低含水率状态下的分子间吸附力

当非饱和土中的含水率很低时（即处于吸附区域），孔隙中不再存在自由水，此时孔隙水主要是吸附在固体颗粒表面以及残留在颗粒接触面附近，如图3所示。另外，对于一些致密的饱和黏土介质（膨胀土等），由于孔隙尺寸很小，孔隙水也主要以吸附水为主，可视为类似的情况。而对于这种状态时，常用模型一般都是引入残余含水率来表示，当土体处于比“残余含水率”更干状态时，则此类模型不再适用。

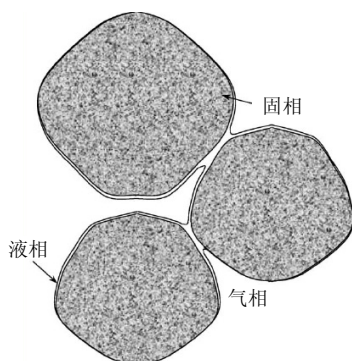


图3 低饱和度时多孔介质中以吸附膜形式存在的孔隙水^[17]

Fig.3 Wetting phase film coating the solid at low content^[17]

在上述极端条件下，孔隙水的流动不受重力作用的影响，主要是由分子间作用力所控制。这种分子间作用力主要包括：固体表面所带电荷与极性水分子之间的静电力、范德华力、水分子电极与固体颗粒表面的相互作用力、氢键作用等^[17]。分子间作用力主要在吸附层起作用，这层水膜的厚度约为1~100 nm，要比孔隙尺寸小得多。因此，对于中、高饱和度的粗颗粒多孔介质，分子间作用力对孔隙液体平均化学势的贡献是很小的，可以忽略。但对于低饱和度或细颗粒多孔介质（如某些黏土或膨胀土），该分子间作用力是不能忽略的。此时孔隙水的流动主要是以吸附膜的流动进行的，而正是由于这些分子间作用力导致多孔介质中的膜流动现象。膜流动是地表土壤蒸发干燥的一个重要过程^[10]，也是寒区地表土层发生冻胀的主要原因。

根据表面化学原理，土-水之间的相互作用分为

非极性范德华作用和极性作用。该吸附作用力为基质吸力的一部分，可以表示为

$$\Pi = \frac{A_H}{6\pi h^3} + \frac{V_{HR}^0}{h_0} \exp\left(-\frac{h}{h_0}\right) \quad (3)$$

式中： Π 为吸附作用力；等号右边第1项表示颗粒间的范德华力； h 为吸附膜厚度，可通过声干涉方法和椭圆光度法来测得； A_H 为Hamaker常数，与介电常数有关，表示颗粒表面和液体之间由于短程范德华力产生的相互作用^[17]；等号右边第2项表示为水合结构力； V_{HR}^0 为相互作用能量常数，与表面润湿性有关； h_0 为衰减长度。

范德华力在所有的物质中均存在，当 $h < 50$ nm时较明显。当膜的厚度 h 为10 nm左右时，水合结构力开始起作用，并随着膜厚度的减小较快地增长。

固-液-气之间的Hamaker常数 A_H 对描述吸附过程来说，是个很重要的参数，囊括了表面特性的非均质性、几何形态、静电作用和范德华相互作用，在土中典型的取值为 $-10^{-19} \sim -10^{-20}$ J。从文献中可知 $A_H = -6 \times 10^{-20}$ J对土体来说是个有效值^[13]。另外，由于土颗粒具有亲水性，水分会在固体表面铺展开来，因此， V_{HR}^0 与铺展系数有关。

土体中吸附水的数量和位置与土体的比表面积和黏土颗粒含量是密切相关的，本文采用Tuller & Or^[13]给出的重量含水率与水膜厚度之间的关系：

$$w = h S_a \rho_w \quad (4)$$

式中： S_a 为比表面积（ m^2/g ）。由此可以建立重量含水率与吸附力之间的关系为

$$w = f(\Pi) \quad (5)$$

假设在低含水率状态，只考虑吸附作用，忽略毛细的影响，上述模型可以描述处于吸附状态时的土-水特征曲线。采用式（3）得出的分子间吸附力与渗透吸力相加，即为对应含水率下的总吸力

$$s_t = s_0 + \Pi \quad (6)$$

s_0 采用式（2）来表达，随着含水率的减小，溶质浓度不断增大至饱和浓度，渗透吸力也在不断增大。图4为模拟结果与相对湿度试验数据的对比图，其中当总吸力增大到300 MPa时，仍有0.5 nm厚度的水膜（1层水分子）包围在土颗粒表面。其中该黏土取 $A_H = -6 \times 10^{-20}$ J， $h_0 = 0.782$ nm， $V_{HR}^0 = 0.458$ N/m。

另外，对于比表面积较大的土，如黏土，在一

定范围内毛细势只占据了基质势能的小部分, 大部分是土颗粒表面的吸附势。很多研究者通过试验得出的压缩土样的势能, 也进一步证明了上述现象^[18]。另外, 在非饱和土吸力的测量时, 一般都是基于平衡状态, 即土中水的势能与测量系统中的势能相等。因此, 在试验中传感器测量到的是土中水的势能而不是压力。若将吸力理解为土中水拉力的概念, 则是不可测量的。因此, 如何将测量到的势能概念与力学范畴内的应力概念相调和是个很关键的问题。

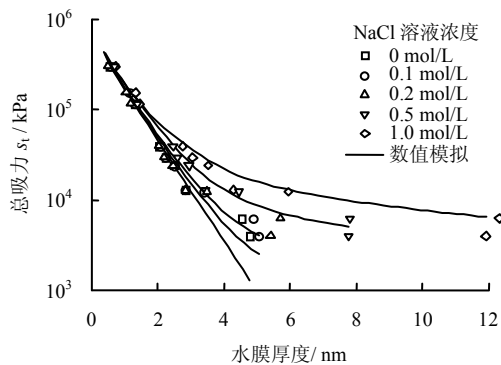


图 4 不同 NaCl 浓度下吸附水膜与吸力之间的关系
Fig.4 Relationships between water film thickness and suction at different NaCl concentrations

5 结 论

(1) 采用压力板仪和相对湿度方法获得不同 NaCl 浓度下低塑性黏土在整个吸力范围内的土-水特征曲线。从试验结果中可以看出, 盐溶液对该土体的基质吸力影响较小, 主要是通过渗透吸力对总吸力产生了影响。在相对湿度试验中, 随着含水率的降低, 孔隙溶液的浓度增大, 渗透吸力进一步增大。同时, 基质吸力迅速增大, 使得渗透吸力的比例越来越小。当吸力增大到 300 MPa 时, 仍有一层水分子吸附在土颗粒上。

(2) 当土体中含水率较低时, 主要是吸附效应在起作用, 此时可以忽略毛细效应的影响。根据表面化学原理, 建立了分子间作用力和吸附水膜厚度之间的关系, 以描述处于吸附状态的土-水特征曲线。采用该关系式结合渗透吸力可以得出对应含水率下的总吸力, 与相对湿度方法得出的试验结果拟合较好。当土体处于较干状态时, 主要是分子间的吸附力使得土-水特征曲线能够一直向上延伸。

参 考 文 献

[1] VANAPALLI S K, FREDLUND D G, PUFAHL D E. The influence of soil structure and stress history on the soil-

water characteristics of a compacted till[J]. *Geotechnique*, 1999, 49(2): 143–158.

- [2] 孙德安, 张谨绎, 宋国森. 氯盐渍土土-水特征曲线的试验研究[J]. *岩土力学*, 2013, 34(4): 955–960.
SUN De-an, ZHANG Jin-yi, SONG Guo-sen. Experimental study of soil-water characteristic curve of chlorine saline soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(4): 955–960.
- [3] MILLER D J, NELSON J D. Osmotic suction in unsaturated soil mechanics[C]//Fourth International Conference on Unsaturated Soils. Arizona, USA: [s. n.], 2006: 1382–1393.
- [4] 王利莉, 党进谦, 杨晓松. 盐渍土土-水特征曲线的研究[J]. *工程勘察*, 2009, 37(2): 19–23.
WANG Li-li, DANG Jin-qian, YANG Xiao-song. The research of soil-water characteristic curves of saline soil[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2009, 37(2): 19–23.
- [5] THYAGARAJ T, RAO S. Influence of osmotic suction on the soil-water characteristic curves of compacted expansive clay[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2010, 136(12): 1695–1702.
- [6] 栗现文, 周金龙, 靳孟贵, 等. 高矿化度土壤水分特征曲线及拟合模型适宜性[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(13): 135–141.
LI Xian-wen, ZHOU Jin-long, JIN Meng-gui, et al. Soil-water characteristic curves of high-TDS and suitability of fitting models[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(13): 135–141.
- [7] 郭全恩, 王益权, 南丽丽, 等. 溶质类型与矿化度对土壤持水特性的影响[J]. *土壤通报*, 2014, 45(2): 340–344.
GUO Quan-en, WANG Yi-quan, NAN Li-li, et al. Effect of solute type and salinity on soil water retention curve[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2014, 45(2): 340–344.
- [8] 王伟, 傅臣家, 曾德超. 水质对土壤持水特性的影响[J]. *山东农业大学学报(自然科学版)*, 2009, 40(1): 88–92.
WANG Wei, FU Chen-jia, ZENG De-chao. Effects of water quality on soil water retention[J]. *Journal of*

- Shandong Agricultural University (Natural Science)**, 2009, 40(1): 88—92.
- [9] 于沉香, 张虎元, 王志硕, 等. 盐渍土土-水特征曲线测试及预测[J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(2): 113—118.
YU Chen-xiang, ZHANG Hu-yuan, WANG Zhi-shuo, et al. Test and prediction of SWCC of saline soil[J]. **Hydrogeology & Engineering Geology**, 2013, 40(2): 113—118.
- [10] NITAO J J, BEAR J. Potentials and their role in transport in porous media[J]. **Water Resources Research**, 1996, 32(2): 225—250.
- [11] TULLER M, OR D, DUDLEY L M. Adsorption and capillary condensation in porous media: Liquid retention and interfacial configurations in angular pores[J]. **Water Resources Research**, 1999, 35(7): 1949—1964.
- [12] PHILIP J R. Unitary approach to capillary condensation and adsorption[J]. **The Journal of Chemical Physics**, 1977, 66(11): 5069—5075.
- [13] TULLER M, OR D. Water films and scaling of soil characteristic curves at low water contents[J]. **Water Resources Research**, 2005, 41(9): W09403 1—6.
- [14] MADSEN H B, JENSEN C R, BOYSEN T. A comparison of the thermocouple psychrometer and the pressure plate methods for determination of soil water characteristic curves[J]. **Journal of Soil Science**, 1986, 37(3): 357—362.
- [15] PECK A J, RABBIDGE R M. Design and performance of an osmotic tensiometer for measuring capillary potential[J]. **Soil Science Society of America Journal**, 1969, 33(2): 196—202.
- [16] CAMPBELL G S. Soil water potential measurement: An overview[J]. **Irrigation Science**, 1988, 9(4): 265—273.
- [17] ISRAELACHVILI J N. Intermolecular and surface forces[M]. Burlington: Academic Press, 2010.
- [18] BAKER R, FRYDMAN S. Unsaturated soil mechanics: Critical review of physical foundations[J]. **Engineering Geology**, 2009, 106(1—2): 26—39.

上接第 2830 页

- [15] 吴礼舟, 许强, 黄润秋. 非饱和黏土的冻胀融沉过程分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(4): 1025—1028.
WU Li-zhou, XU Qiang, HUANG Run-qiu. Analysis of freezing-thawing test process of unsaturated clay[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(4): 1025—1028.
- [16] 鲍俊安, 杨平, 陈成. 基于灰色关联优势分析冻胀融沉影响因素研究[J]. 路基工程, 2012, (1): 21—23.
BAO Jun-an, YANG Ping, CHEN Cheng. Research on factors influencing frost heaving and thaw collapsing based on grey relational preponderance analysis[J]. **Subgrade Engineering**, 2012, (1): 21—23.
- [17] 于春海, 贾文君, 杨有海. 兰新线路基冻害影响因素的灰关联分析[J]. 低温建筑技术, 2009, 31(3): 86—87.
YU Chun-hai, JIA Wen-jun, YANG You-hai. Grey relation analysis method for road foundation freeze injury in a section of Lanzhou-Xinjiang railway[J]. **Low Temperature Architecture Technology**, 2009, 31(3): 86—87.
- [18] 赵安平, 王清, 车茜, 等. 季冻区土冻胀量影响因素的灰关联度分析[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2007, 24(4): 28—30.
ZHAO An-ping, WANG Qing, CHE Qian, et al. Grey relation analysis on frost heaving susceptibility of soil in seasonal frost regions[J]. **Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition)**, 2007, 24(4): 28—30.
- [19] 中铁第一勘察设计院集团有限公司. TB10102—2010铁路工程土工试验规程[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2010.