

DOI: 10.11779/CJGE201906007

伊犁黄土总吸力和基质吸力土水特征曲线拟合模型

张爱军¹, 王毓国^{1*}, 邢义川², 于春亮¹, 赵庆玉¹

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100048)

摘要: 新疆伊犁黄土具有湿陷性强烈、易溶盐含量高的特点, 描述其非饱和土应力状态中的吸力参量时, 须同时考虑总吸力和基质吸力两个参量。为此, 通过滤纸法开展了不同含盐量下伊犁黄土的土水特征曲线试验, 测量了不同含盐下伊犁黄土的总吸力与基质吸力, 计算了不同含盐量下土样中溶液浓度, 分析了含盐量对湿陷的影响, 基于 Gardner 模型, 提出了可以考虑易溶盐含量影响的伊犁黄土总吸力和基质吸力土水特征曲线的拟合模型。研究表明: 含盐量对新疆伊犁黄土的基质吸力有一定影响, 对总吸力与渗透吸力影响较大; 土样溶液浓度随着含盐量的增大而增大, 总吸力与溶液浓度之间呈线性关系; 随着土样内易溶盐含量的增加, 土样湿陷系数明显增大; 提出的土水特征曲线模型可以考虑易溶盐含量的影响, 可以统一描述伊犁黄土总吸力和基质吸力随含水率、易溶盐含量变化的规律。

关键词: 拟合模型; 滤纸法; 含量盐; 溶液浓度; 吸力; 湿陷

中图分类号: TU444 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2019)06-1040-10

作者简介: 张爱军(1964—), 男, 山西阳高人, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程教学与科研工作。E-mail: zaj@nwsuaf.edu.cn.

Fitting models for soil-water characteristic curve of total and matrix suctions of Yili loess

ZHANG Ai-jun¹, WANG Yu-guo¹, XING Yi-chuan², YU Chun-liang¹, ZHAO Qing-yu¹

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling 712100, China; 2. China Institute of Water Resources and Hydro Power Research, Beijing 100048, China)

Abstract: The Yili loess of Xinjiang is characterized by strong collapsibility and high soluble salt content. For describing the suction parameters in the stress state of the unsaturated soils, both the total and matrix suctions should be taken into account. Therefore, the soil-water characteristic curve (SWCC) tests on Yili loess with different salt contents are carried out by using the filter paper method. The total and matrix suctions of Yili loess with different salt contents are measured. The solution concentrations of samples with different salt contents are calculated. Additionally, the effects of salt content on the collapsibility are analyzed. Based on the Gardner model, fitting models for SWCC of total and matrix suctions for Yili loess which can consider the influences of soluble salt content are proposed. The test results show that the salt content has a certain influence on the matrix suction of Yili loess of Xinjiang, and it has a great effect on the total and osmotic suction. The solution concentration in the soil samples increases with the increase of the salt content, and there is a linear relationship between the total suction and the concentration. With the increase of soluble salt content, the collapsibility of soil samples increases obviously. The proposed SWCC models can consider the influences of soluble salt content, and they can describe the variation of the total suction and matrix suctions for Yili loess with water content and soluble salt content.

Key words: fitting model; filter paper method; salt content; solution concentration; suction; collapsibility

0 引言

在非饱和土力学问题中, 吸力被公认为是不可缺少的应力状态变量之一^[1]。土体中的吸力由基质吸力和渗透吸力两部分组成。基质吸力是由土体液相与气象交界面—土体的收缩膜结构两侧的压力差所引起的, 主要受土体结构、含水率的影响; 渗透吸力是由土中溶液引起的, 主要受溶液浓度的影响。总吸力就

是基质吸力和渗透吸力之和。

测量吸力有很多种方法, 对于总吸力、基质吸力、渗透吸力的量测又有着各自不同的试验方法。测量总

基金项目: “十三五”国家重点研发计划资助项目(2017YFC0405103);

陕西省重点研发计划(2017ZDXM-SF-074)

收稿日期: 2018-04-10

*通讯作者(E-mail: eaglew@nwsuaf.edu.cn)

吸力有冷静湿度计法、非接触式滤纸法、双压湿度控制法、等压湿度控制法、热电偶干湿度计法^[2]、晶体干湿度计法 (transistor psychrometer)、冷镜干湿度计法 (chilled-mirror psychrometer)^[3]; 测量基质吸力有接触式滤纸法、轴平移法、电/热传导传感器法、张力计法^[2]; 测量渗透吸力有挤液法^[4], 或是直接用总吸力减去基质吸力即为渗透吸力。

新疆伊犁黄土是较为特殊的黄土, 从成因上属于西风区黄土, 与中国广泛分布的季风区黄土高原黄土明显不同。从土性上有两个重要特点: ①自重湿陷性土层深厚、湿陷性异常强烈, 很多地段的黄土属于自重湿陷性IV场地, 现场浸水试验测得的最大自重湿陷量达到 3.52 m; ②易溶盐含量高, 易溶盐含量 (以下简称含盐量) 最大为 19.2 g/kg^[5]。描述其应力状态时不仅需要考虑基质吸力, 还需要考虑渗透吸力, 而含盐量是影响渗透吸力的主要因素, 必须考虑。

以往的试验研究中, 对含盐量影响下非饱和土的吸力研究较少。孙德安等^[1]通过滤纸法测量了不同 NaCl 含量盐渍土的土水特征曲线, 得出了含盐量对基质吸力影响不大, 总吸力与基质吸力的差值随着含盐量的增加而增加的结论; Fattah M Y 等^[6]测量了不同 NaCl 含量下非饱和土的基质吸力与总吸力, 得出在将 NaCl 加入土样中, 基质吸力与总吸力都有明显的增加的结论。

同时, 与黄土相关的总吸力试验研究更是少之又少, 大部分仅测量了黄土的基质吸力^[7-10]。因此, 很有必要开展进一步试验研究, 来探究易溶盐含量对伊犁黄土总吸力、基质吸力、渗透吸力的影响规律。本文通过滤纸法开展了不同含盐量下伊犁黄土的土水特征曲线试验, 测量了不同含盐下伊犁黄土的总吸力与基质吸力, 计算了土样中溶液浓度, 分析了含盐量对湿陷的影响; 基于 Gardner 模型, 提出了可以考虑易溶盐含量影响的伊犁黄土总吸力和基质吸力土水特征曲线的拟合模型。

1 试验土样

试验所用土样取自新疆伊犁昭苏县特克斯河III级阶地上, 取土深度为 21.5~22 m, 土样初始含水率为 6.67%, 干密度为 1.37 g/cm³。土样初始易溶盐含量如表 1 所示。鉴于实测得到同区域伊犁黄土的易溶盐含量最大为 19.2 g/kg^[5], 确定试验土样易溶盐含量分别为 5, 8, 14, 20, 26 g/kg。

试验所用土样均为原状样。依据表 1 中所测得易溶盐离子浓度及比例, 确定在土样中加设的易溶盐为 MgSO₄、CaCl₂、NaHCO₃、NaOH, 质量比为 10.32:2.16:1:15.39。将 4 种溶液近似配置为饱和盐溶液,

以减少所加入的水分, 计算土样易溶盐含量达到 5, 8, 14, 20, 26 g/kg 时所需要加入的易溶盐质量, 吸取一定量的溶液, 通过水膜转移法, 分次加入土样当中, 确保每次加入的溶液小于 10 mL。每次加完盐溶液后, 自然风干一昼夜, 再进行下一次的滴加, 防止土样中水分过多, 产生膨胀变形。少量多次加入盐溶液, 直至达到所要求的易溶盐含量为止。加盐过程持续时间较长, 通过水膜转移法自然渗透增加盐分, 对原状样微观结构扰动较小。将加盐后的土样用保鲜膜包裹, 置于保湿缸养护 3 d 以上, 确保土样内盐分分布均匀, 试验时抽取一定数量的土样进行复测, 确保含盐量、含水率和密度符合试验要求。

表 1 土样易溶盐含量

物质	含量/(g·kg ⁻¹)
K ⁺	0
Na ⁺	2.3379
Ca ²⁺	0.7251
Mg ²⁺	0.5291
Cl ⁻	0.3535
SO ₄ ²⁻	1.6161
HCO ₃ ⁻	0.1861
CO ₃ ²⁻	0
总量	5.7478

2 土水特征曲线试验

2.1 试验方法与结果

本次试验采用滤纸法测量土样的总吸力、基质吸力。试验方法参考 ASTM D5298 规范^[11]和文献[12]。滤纸法测定总吸力、基质吸力的试验装置如图 1 所示。土样下方放置三层滤纸与土样紧密贴合, 上、下两片为保护滤纸, 中间滤纸为测试滤纸, 滤纸含水率与土样溶液交换平衡后测得的吸力即为基质吸力。在土样上部放置两种不同直径的“O”型圈, “O”型圈上部铺设两层滤纸, 此时试验滤纸不与土样接触, 下层滤纸含水与土样周围的水蒸气达到平衡后测得的吸力即为总吸力。将土样与滤纸置于密闭容器, 并在容器外部包裹保鲜膜, 置于密封盒中, 防止水分流失, 如图 2 所示。

试验操作步骤:

(1) 从养护缸中取出不同含盐量的土样, 通过风干及水膜转移法用纯水将土样的含水率配置为 7%。

(2) 将土样用保鲜膜包好放入养护缸, 养护 3 d, 使水分在土样中分布均匀。

(3) 将试验所用滤纸提前 1 d 放入 105℃烘箱烘至恒重, 冷却后按图 2 所示方法将土样与滤纸装入密闭容器中, 包裹保鲜膜, 放入密封盒中, 置于恒温柜 (20±2℃), 放置 7 d, 使土样与滤纸达到水分平衡。

(4)打开容器,迅速称取土样质量计算其含水率。

(5)打开容器,迅速称取基质吸力、总吸力滤纸样的湿重量(精确到0.0001g)。

(6)将湿滤纸放入105℃烘箱8h以上,烘干后,将滤纸迅速放入密封的自封袋中,放入干燥缸冷却30min,称取干滤纸质量(精确到0.0001g),反复多次烘干称量,直至两次滤纸重量差值小于0.0003g;由滤纸的湿重量和烘干重量计算滤纸的含水率,并通过率定曲线确定相应的吸力值。

(7)土样的含水率分别配置到10%,13%,16%,19%,22%,25%,28%,31%,34%,重复上述步骤(2)~步骤(6),得到基质吸力和总吸力土水特征曲线。

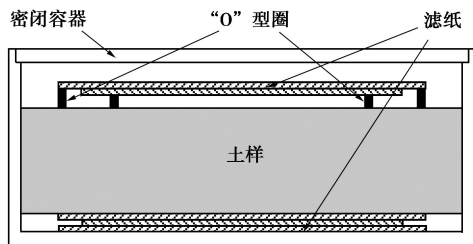


图1 滤纸法试验装置

Fig. 1 Test equipment for filter paper method

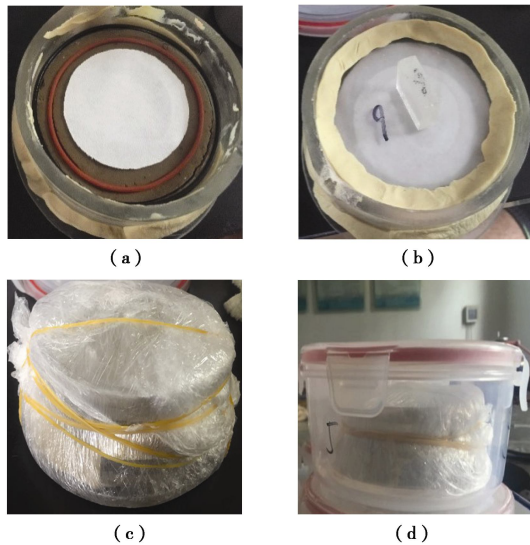


图2 滤纸法装样过程图

Fig. 2 Loading process of filter paper method

本次试验采用Whatman 42号滤纸^[12],率定曲线采用Leong等根据试验结果给出的双线性率定曲线方程^[12](式(1)~(4)),率定曲线如图3所示。

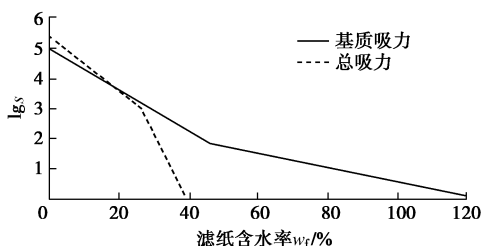


图3 率定曲线

Fig. 3 Calibration curves of suctions

基质吸力率定曲线方程:

$$\lg s_m = 2.909 - 0.0229w_f \quad (w_f \geq 47), \quad (1)$$

$$\lg s_m = 4.945 - 0.0673w_f \quad (w_f < 47). \quad (2)$$

总吸力率定曲线方程:

$$\lg s_t = 8.778 - 0.222w_f \quad (w_f \geq 26), \quad (3)$$

$$\lg s_t = 5.31 - 0.0879w_f \quad (w_f < 26). \quad (4)$$

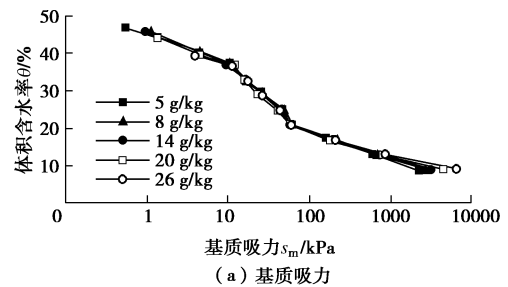
式中 s_m 为基质吸力(kPa); s_t 为总吸力(kPa); w_f 为滤纸含水率(%)。

本文采用土样中液体的体积占总体积的百分比,即体积含水率 θ ,来描述土样的含水率变化。土样体积含水率计算如下所示:

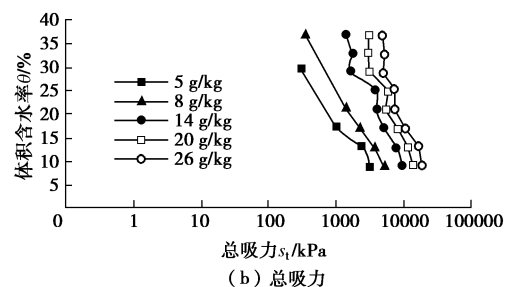
$$\theta = \rho_d w, \quad (5)$$

式中, θ 为体积含水率(%), ρ_d 为土样干密度(g/cm^3), w 为土样含水率(%)。

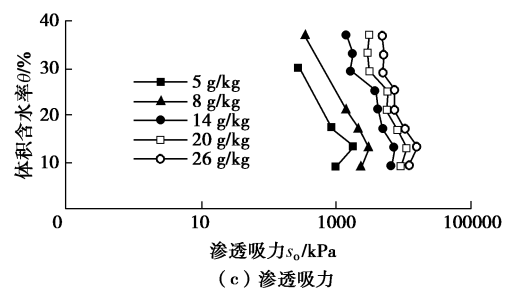
图4为滤纸法得到的不同易溶盐含量下伊犁黄土基质吸力、总吸力和渗透吸力的土水特征曲线。从图4可以看出:含盐量的改变对基质吸力有一定影响;随着含盐量的增大总吸力与渗透吸力明显增大,在低含水率(8%)时,总吸力受基质吸力影响较大,在高含水率较时(13%~38%),总吸力的增大主要是由渗透吸力的增大引起的;随着含水率的降低,试验所加



(a) 基质吸力



(b) 总吸力



(c) 渗透吸力

图4 滤纸法所得土水特征曲线

Fig. 4 SWCCs obtained by filter paper method

几种盐在孔隙溶液中趋于饱和, 渗透吸力存在一极值, 最终不超过 25000 kPa, 这与孙德安等^[1]所得结论相一致。由于易溶盐含量较高, 渗透吸力较基质吸力大很多, 较大的渗透吸力会使土颗粒之间引力增强, 从而提升土体的强度, 但是土体的湿陷性会增大。

2.2 试验结果分析

(1) 饱和体积含水率

试验所用土样 OH 离子含量较大可以保证 Mg²⁺ 离子完全析出; 同时, 随着含水率的增加 Ca²⁺ 离子虽未完全析出, 但所剩 Ca²⁺ 离子浓度较低, 小于 0.0003 mol/L, 可以忽略。故在计算土样的饱和体积含水率时, 认为土样中的 Mg²⁺ 离子、Ca²⁺ 离子以 Mg(OH)₂、CaSO₄ 的形式析出, 剩余离子完全溶解不再产生其他沉淀。基于这一点, 可以通过 Mg²⁺ 离子、Ca²⁺ 离子的摩尔浓度计算出体积为 100 cm³ 的土样饱和时析出沉淀的质量 m'_盐,

$$m'_{盐} = \alpha \frac{m_s}{1000} (r_{Mg^{2+}} M_{Mg(OH)_2} + r_{Ca^{2+}} M_{CaSO_4}) \quad (6)$$

式中 m'_盐 为土样饱和时盐分析出的质量 (g); α 为易溶盐含量 (g/kg); m_s 为土样干土重 (g); r_{Mg²⁺} 为 1 g 土样中 Mg²⁺ 离子的摩尔浓度 (0.00298 mol/g); r_{Ca²⁺} 为 1 g 土样中 Ca²⁺ 离子的摩尔浓度 (0.000673 mol/g); M_{Mg(OH)₂} 为 Mg(OH)₂ 的摩尔质量 (58 g/mol); M_{CaSO₄} 为 CaSO₄ 的摩尔质量 (136 g/mol)。

联立式 (7), (8), 可得不同易溶盐含量下土样的饱和体积含水率如表 2 所示。

$$S_r = \frac{w' G \rho_d}{G \rho_w - \rho_d} \quad (7)$$

$$\theta_s = w_s m_s \quad (8)$$

式中 $\rho_w = \frac{0.001\alpha m_s - m'_{盐} + m_s w_s}{m_s w_s}$; w' =

$$\frac{0.001\alpha m_s - m'_{盐} + m_s w_s}{m_s + m'_{盐}} \times 100\%; \rho_d = \frac{m_s + m'_{盐}}{V}$$

。S_r 为土样的饱和度 (取 1); G 为土样的相对密度 (2.72); w' 为含液率, 即土样中溶液质量与土样盐相对密度的比值^[13] (%); ρ_w 为土样溶液密度 (g/cm³); w_s 为土样饱和含水率 (%); V 为土样体积 (100 cm³); θ_s 为土样饱和体积含水率 (%)。

表 2 饱和体积含水率

Table 2 Saturated volumetric water contents

易溶盐含量 a/(g·kg ⁻¹)	5	8	14	20	26
饱和体积含水率 θ _s /%	48.95	49.95	50.94	51.89	52.82

(2) 溶液浓度

伊犁黄土易溶盐含量较高, 随着体积含水率和温度的变化易溶盐溶解、析出, 土样内溶液浓度发生较

大变化, 从而对伊犁黄土的土水特征曲线, 尤其是总吸力土水特征曲线产生较大的影响, 因此很有必要计算不同体积含水率下, 土样内的溶液浓度, 分析其对土水特征曲线的影响, 本文暂不考虑温度的影响。

根据表 1 所测土样中原有各离子摩尔浓度, 确定所加 4 种溶液: MgSO₄, CaCl, NaHCO₃, NaOH 溶液摩尔浓度比为 0.22 : 0.05 : 0.03 : 1。4 种盐相互反应会生成溶解度较低的 Ca(HCO₃)₂, Ca(OH)₂, CaSO₄, Mg(HCO₃)₂, Mg(OH)₂。除去析出盐分, 剩余易溶盐溶解于土样液体当中, 土中溶解易溶盐的质量除以土样中溶液的质量即为土样的溶液浓度。

依据溶解度小的盐分先析出的原则, 几种盐析出的先后顺序为 Mg(OH)₂, CaSO₄, Ca(OH)₂, Ca(HCO₃)₂, Mg(HCO₃)₂。溶液中溶质是否析出可以用溶液的离子积 (Q_i) 与溶度积 (K_{sp}) 的大小来进行判断。离子积为溶液中各离子浓度的乘积^[14], 不同溶液的溶度积可以通过化学手册得到^[15], 如表 3 所示。当 Q_i=K_{sp} 时, 溶液达到沉淀-溶解平衡状态, 溶液是饱和溶液; Q_i>K_{sp} 时, 溶质析出; Q_i<K_{sp} 时溶液为不饱和溶液。当离子剩余浓度小于 10⁻⁵ mol/L 时, 可以认为离子完全析出^[14]。

表 3 溶度积

Table 3 Solubility products

盐	溶度积 K _{sp}
Mg(OH) ₂	1.8 × 10 ⁻¹¹
CaSO ₄	9.1 × 10 ⁻⁶
Ca(OH) ₂	5.5 × 10 ⁻⁶
Ca(HCO ₃) ₂	5.2 × 10 ⁻⁵
Mg(HCO ₃) ₂	4.5 × 10 ⁻¹

计算过程:

a) 计算溶液中 Mg(OH)₂, CaSO₄ 的离子积, 与其溶度积进行比较, 判断溶质是否析出, 如果析出则需依步骤 2 判断 Mg²⁺, Ca²⁺ 离子是否完全析出, 若不析出则盐分完全溶解;

b) 由于溶液中 OH⁻, SO₄²⁻ 离子较多, 故依公式 Q_i=K_{sp} 计算 Mg²⁺, Ca²⁺ 离子剩余 10⁻⁵ mol/L 所需要的 OH⁻, SO₄²⁻ 离子浓度, 分别为 1.34 × 10⁻³, 0.91 mol/L。与溶液中 OH⁻, SO₄²⁻ 离子浓度进行比较, 若阴离子浓度较大, 则阳离子完全析出, 反应停止, 以阳离子浓度计算析出溶质质量。若阴离子不足, 则需通过公式 Q_i=K_{sp} 来计算阳离子的剩余的浓度;

c) 依次比较剩余溶液中 Ca(OH)₂, Ca(HCO₃)₂, Mg(HCO₃)₂ 的离子积 (Q_i) 与溶度积 (K_{sp}), 重复步骤 a), b), 判断盐分是否析出, 计算至溶液达到平衡状态, 得到析出盐分的总质量 m_盐。

土样中溶液浓度的计算公式:

表4 不同体积含水率下试样内溶液浓度

Table 4 Solution concentrations in samples under different volumetric water contents

5 g/kg 土样		8 g/kg 土样		14 g/kg 土样		20 g/kg 土样		26 g/kg 土样	
体积含水率/%	土样溶液浓度/%	体积含水率/%	土样溶液浓度/%	体积含水率/%	土样溶液浓度/%	体积含水率/%	土样溶液浓度/%	体积含水率/%	土样溶液浓度/%
8.80	5.55	8.89	8.37	8.93	13.61	9.04	18.03	9.04	22.04
13.12	3.79	12.90	5.92	12.83	9.38	12.87	13.39	12.99	16.44
17.27	2.91	17.06	4.55	17.01	7.64	16.82	10.58	16.83	13.18
20.97	2.41	21.09	3.71	21.04	6.27	20.93	8.68	20.91	10.89
25.32	2.00	24.94	3.16	25.12	5.30	24.94	7.39	25.11	9.24
29.90	1.70	28.99	2.73	29.22	4.60	29.07	6.40	28.83	8.14
32.69	1.56	32.40	2.45	33.01	4.09	33.07	5.67	32.58	7.27
37.49	1.36	37.00	2.15	36.98	3.67	36.87	5.12	36.64	6.52
40.67	1.26	40.37	1.97	40.52	3.36	39.80	4.76	39.46	6.08
46.90	1.09	46.10	1.73	45.62	2.99	44.13	4.31	52.82	1.05
48.95	1.01	49.95	1.02	50.94	1.03	51.89	1.04		

$$k = \frac{0.001\alpha m_s - m_{\text{盐}}}{m_s(w + 0.001\alpha) - m_{\text{盐}}} \times 100\% \quad (9)$$

式中 k 为土样中溶液浓度 (%)； $m_{\text{盐}}$ 为析出盐分的质量 (g)。

通过计算可得不同易溶盐含量土样，在不同体积含水率下，土样内溶液浓度，如表 4，图 5 所示。

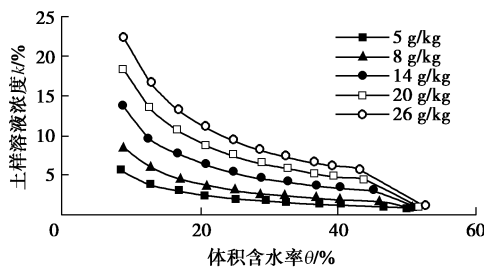


图5 体积含水率与试样溶液浓度关系曲线

Fig. 5 Relationship between volumetric water contents and solution concentrations of samples

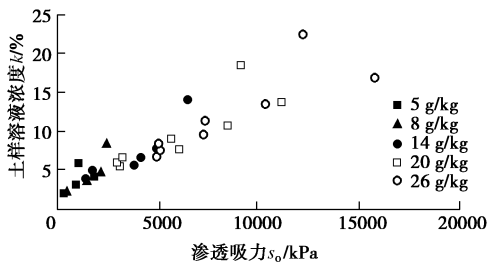


图6 渗透吸力与试样溶液浓度关系曲线

Fig. 6 Relationship between osmotic suctions and solution concentrations of samples

随着含盐量的增加，土样溶液浓度明显增大，随着体积含水率的增加，土样溶液浓度逐渐减小，趋于一致。从图 6，7 可以看出，渗透吸力随土样溶液浓度

的变化而变化，二者基本呈线性关系，总吸力与溶液浓度之间呈线性关系。

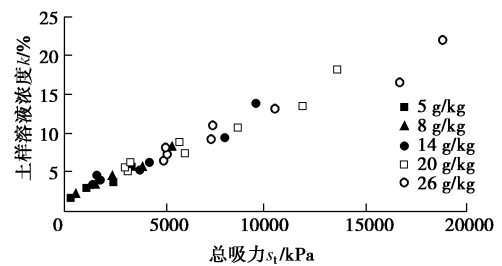


图7 总吸力与试样溶液浓度关系曲线

Fig. 7 Relationship between total suctions and solution concentrations of samples

2.3 考虑含盐量变化的土水特征曲线拟合模型建立

(1) 基质吸力

用 3 种常用模型: Fredlund & Xing 模型、Gardner 模型、Van Genuchten 模型 (式 (10) ~ (12)), 通过 Matlab 中 lsqnonlin 函数对试验所得基质吸力土水特征曲线进行拟合。Fredlund & Xing 模型和 Van Genuchten 模型拟合参数 θ_r 与实际情况不符, Gardner 模型拟合 R^2 均达到 0.97 以上, 拟合结果较好, 最适合拟合新疆伊犁黄土基质吸力土水特征曲线, Gardner 模型拟合参数如表 5 所示。

表5 Gardner 模型拟合基质吸力参数

Table 5 Matrix suction parameters fitted by Gardner model

易溶盐含量 $\alpha/(g \cdot kg^{-1})$	b	n	$\theta_r/\%$	R^2
5	28.464	0.776	8.44	0.994
8	26.333	0.728	8.74	0.994
14	21.853	0.714	8.56	0.993
20	21.427	0.664	8.07	0.987
26	20.090	0.639	8.39	0.983

a) Fredlund & Xing 模型

$$\theta = \frac{\theta_s}{\left\{ \ln \left[e + \left(\frac{s}{b} \right)^n \right] \right\}^m} + \theta_r \quad (10)$$

式中 θ_s 为饱和体积含水率 (%)； θ_r 为残余体积含水率 (%)； b, n, m 为拟合参数；其中 b 为曲线内弯点对应的吸力值，稍大于进气压力； n 为与土水特征曲线内弯点斜率有关的参数； m 为与残余饱和度有关的拟合参数^[16]。

b) Gardner 模型

$$\theta = \frac{\theta_s - \theta_r}{\left(\frac{s}{b} \right)^n + 1} + \theta_r \quad (11)$$

式中, b, n 为拟合参数。

c) Van Genuchten 模型

$$\theta = \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[\left(\frac{s}{b} \right)^n + 1 \right]^m} + \theta_r \quad (12)$$

式中, b, n, m 为拟合参数, 其中 $m=1-1/n$ 。

如图 8 所示, 从 Gardner 模型拟合的结果可以发现, 含盐量对 Gardner 模型参数 b 影响较大, 二者近似成线性关系。含盐量对参数 n, θ_s, θ_r 影响较小, 可取平均值。将参数 b 与含盐量 α 的关系带入 Gardner 模型公式中, 可得考虑含盐量的伊犁黄土基质吸力水特征曲线模型公式, 式 (13) 可以反映含盐量和含水率耦合变化情况下伊犁黄土的土水特征, 拟合结果如图 9 所示。

$$\theta = \frac{\theta_s - \theta_r}{\left(\frac{s_m}{ca + d} \right)^n + 1} + \theta_r \quad (13)$$

式中, $n=0.704, \theta_s=50.91\%, \theta_r=8.44\%, c=-0.391, d=29.343$ 。

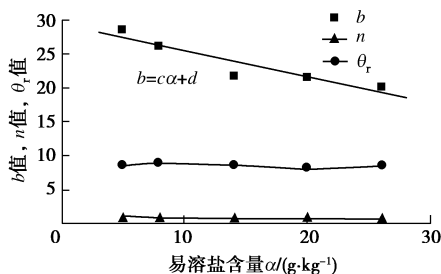


图 8 Gardner 模型参数与含盐量的关系曲线

Fig. 8 Relationship between Gardner model parameters and salt contents

(2) 总吸力

滤纸法在测量总吸力时, 测试范围有一定的局限性。当总吸力较小时, 滤纸平衡后含水率较大, 含水率越大受试验温度等环境的影响就越大, 此时很难得到一个准确的滤纸含水率, 从而难以推导出正确的土

样吸力。当吸力范围为 1000~500000 kPa 时试验所得结果才是可靠的^[2]。

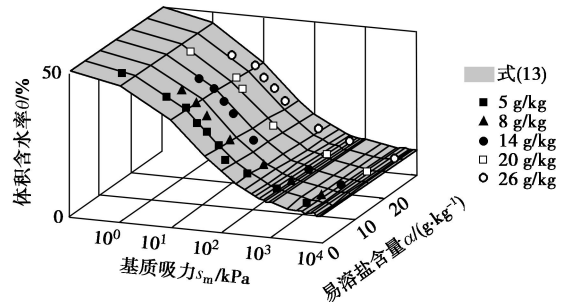


图 9 不同易溶盐含量下公式 (13) 的拟合结果

Fig. 9 Fitting results of Formula (13) under different soluble salt contents

由于滤纸法测试范围的缺陷, 导致试验结果在高体积含水率、低吸力部分存在缺失。常用的拟合公式难以拟合不完整的总吸力下伊犁黄土的土水特征曲线。

残余体积含水率反映了土中孔隙水由结合水和毛细水转向重力水的界限。当土样的体积含水率低于残余体积含水率时, 土中水以结合水和毛细水为主^[16], 基质吸力会出现急剧增加的现象; 结合水不溶解盐分^[13]、毛细水含量很少, 土样渗透吸力较小; 此时, 土样的总吸力与基质吸力基本相同^[16]。因此, 总吸力与基质吸力土水特征曲线应该具有相同的残余体积含水率。

将土样饱和体积含水率和基质吸力拟合所得的残余体积含水率带入 Gardner 模型后, 再对总吸力土水特征曲线进行拟合, 可以得到一个较好的拟合结果。如图 10、表 6 所示。

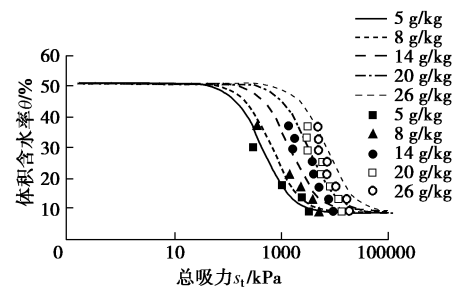


图 10 Gardner 模型拟合总吸力土水特征曲线结果

Fig. 10 Results of SWCCs of total suction fitted by Gardner model

表 6 Gardner 模型拟合总吸力参数

Table 6 Total suction parameters fitted by Gardner model

易溶盐含量 $a/(g \cdot kg^{-1})$	b	n	R^2
5	346.131	1.225	0.977
8	690.785	1.267	0.980
14	2093.836	1.460	0.925
20	3724.745	1.760	0.920
26	5428.708	2.303	0.940

同样对总吸力 Gardner 模型拟合参数进行分析,

我们可以发现：如图 11, 12 所示，参数 n 、饱和体积含水率 θ_s 、残余体积含水率 θ_r 变化较小，可取平均值。而参数 b 随含盐量的变化较大，将参数 b 与含盐量 α 的函数关系带入 Gardner 模型公式中，可得考虑含盐量的伊犁黄土总吸力土水特征曲线模型公式：

$$\theta = \frac{\theta_s - \theta_r}{\left(\frac{s_t}{ke^{j\alpha}}\right)^n + 1} + \theta_r \quad (14)$$

式中 s_t 为总吸力(kPa), $n=1.603, k=235.839, j=0.131$ 。

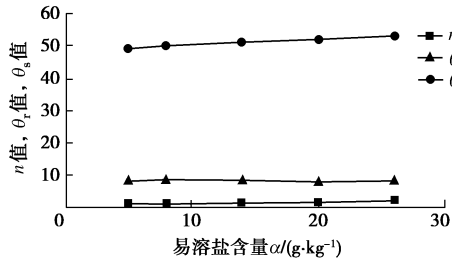


图 11 Gardner 模型参数 n, θ_s, θ_r 与含盐量的关系曲线

Fig. 11 Relationship between Gardner model parameters n, θ_s and θ_r and salt contents

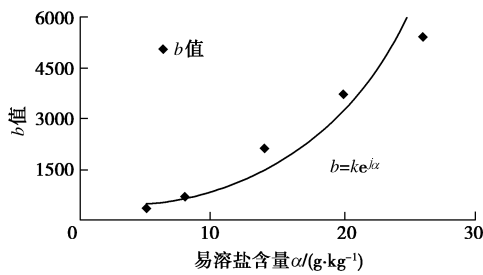


图 12 Gardner 模型参数 b 与含盐量的关系曲线

Fig. 12 Relationship between Gardner model parameter a and salt contents

将考虑含盐量的伊犁黄土总吸力土水特征曲线模型公式与试验数据绘入图 13，可以发现拟合结果较好，式 (14) 适用于不同含盐量下伊犁黄土总吸力的计算公式。对比图 9, 13 可以看出，总吸力受易溶盐含量影响更大，变化更加剧烈。

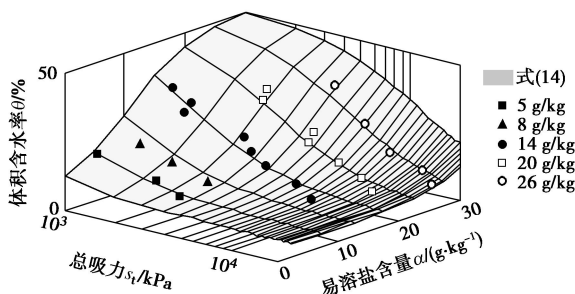


图 13 不同易溶盐含量下式 (14) 的拟合结果

Fig. 13 Fitting result of Formula (14) under different soluble salt contents

(3) 模型验证

通过式 (13) 对文献[6]中不同 NaCl 含量试样的基质吸力土水特征曲线进行拟合，拟合结果如图 14 所示，拟合结果较好， R^2 均在 0.94 以上。文献[6]中试验数据较少，难以用式 (14) 对其总吸力土水特征曲线进行拟合。通过 Gardner 模型，对不同 NaCl 含量试样的总吸力土水特征曲线进行拟合，如图 15 所示，结果较好。其拟合参数 b 与含盐量 α 同样呈指数关系，如图 16 所示，与式 (14) 规律相一致。式 (13) 与式 (14) 可以较好地反映易溶盐含量对基质吸力、总吸力土水特征曲线的影响。

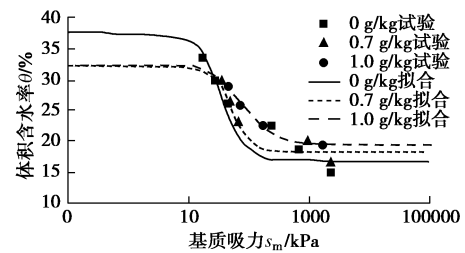


图 14 不同 NaCl 含量下式 (13) 的拟合结果

Fig. 14 Fitting results of Formula (13) under different NaCl contents

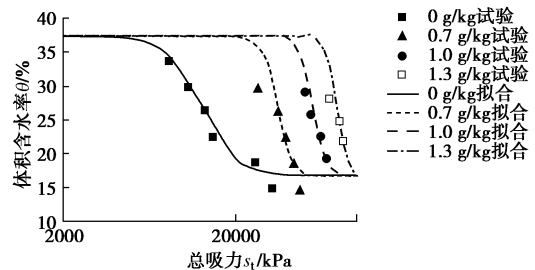


图 15 不同 NaCl 含量下式 (14) 的拟合结果

Fig. 15 Fitting results of Formula (14) under different NaCl contents

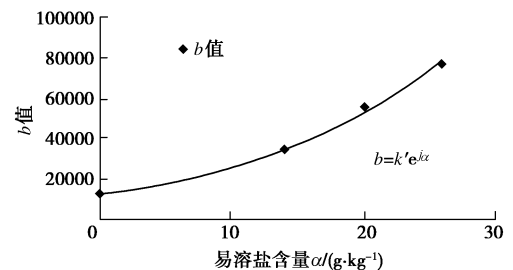


图 16 Gardner 模型参数 b 与含盐量的关系曲线

Fig. 16 Relationship between Gardner model parameter a and salt contents

3 湿陷试验

3.1 试验方法与结果

湿陷试验采用双线法进行，拉瑞昂诺夫^[17]认为黄

表 7 湿陷试验参数

Table 7 Soil parameters of collapsibility tests

易溶盐含量 (g·kg ⁻¹)	湿陷系数	初始含水率土样				饱和土样	
		体积含水率/%	基质吸力/kPa	总吸力/kPa	溶液浓度/%	体积含水率/%	溶液浓度/%
5	0.046	17.06	152.24	2035.05	2.97	48.23	1.01
8	0.048	17.54	151.30	3345.31	4.68	47.13	1.02
14	0.081	17.50	138.24	8796.89	7.90	47.84	1.03
20	0.110	17.23	166.34	11725.33	10.92	49.12	1.04
26	0.109	17.17	177.51	14431.17	13.75	49.78	1.05

土中含水率在 10% 之上时, 土颗粒中易溶盐均是溶解的, 因此选择含水率为 12% 的试样进行试验, 将试样依据不同易溶盐含量分为 5 组, 每组 2 个土样。其中一个土样试验过程中保持初始含水率, 另一个土样则在 50 kPa 净法向应力下达到变形稳定后, 加水饱和, 待再度稳定后, 继续加压进行试验。净法向应力等级为 50, 100, 150, 200, 300 kPa。同一级压力下, 浸水变形减去不浸水变形即为湿陷变形。变形量与土样原高度的比值即为湿陷系数。室内一维双线法湿陷试验所得初始含水率 12% 的土样, 在不同净法向应力下湿陷系数如图 17 所示。

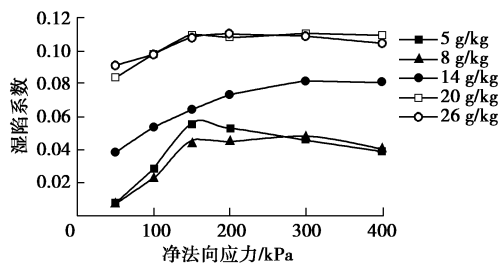


图 17 不同净法向应力下湿陷系数

Fig. 17 Collapsibility coefficients under different net normal stresses

从图 17 可以看出, 易溶盐含量对湿陷系数影响较大, 随易溶盐含量的增加土样的湿陷系数明显增大, 但含盐量为 5 g/kg 的土样与 8 g/kg 的土样湿陷系数接近, 含盐量为 20 g/kg 的土样与 26 g/kg 的土样湿陷系数接近。

3.2 土样初始吸力与湿陷的关系

伊犁黄土具有较强烈的湿陷性, 在同等条件下是兰州、西安地区黄土的 2.1 倍和 3.1 倍^[18]。试验所用土样深度在 10 m 以上, 故取净法向应力为 300 kPa 时的湿陷系数判断土样的湿陷性^[19]。依照土水特征曲线中计算土样内溶液浓度的方法, 可计算出湿陷土样初始状态与饱和状态下, 土样的溶液浓度、体积含水率。将其与净法向应力 300 kPa 时土样的湿陷系数, 初始状态下土样的基质吸力、总吸力汇总, 如表 7 所示。

从湿陷系数来看新疆伊犁黄土为强烈湿陷性黄土。随着土样内易溶盐含量的增加, 土样湿陷系数明显增大。分析原因, 易溶盐对黄土湿陷性主要存在两方面的影响: ①易溶盐晶体的溶解、软化。浸水后由于颗粒表面的薄膜水增厚, 水溶盐类被溶解或软化, 强度降低, 土体结构遭到破坏, 产生湿陷^[20]。②孔隙中高浓度盐溶液的吸水作用。土样中的水分存在于土样各个大小不一的孔隙中, 随着易溶盐含量的增大, 土样溶液浓度明显增大, 在水分增加的过程中, 溶液浓度越大, 吸水越多, 大量水分进入孔隙中破坏土样骨架结构, 从而导致土体湿陷变形的发生^[21]; 但是这种对土样结构的破坏并不是无限增长的, 因此, 20 g/kg 与 26 g/kg 土样的湿陷系数较为接近。

4 讨 论

4.1 滤纸法与离心机法

在之前的试验中, 通过离心机法测量了同一批土样的基质吸力土水特征曲线, 如图 18 所示, 两次试验结果较为接近, 含盐量的变化对基质吸力有一定影响。同样将离心机法所得含水率换算成体积含水率, 并用 Gardner 模型拟合可得表 8 所示拟合参数。

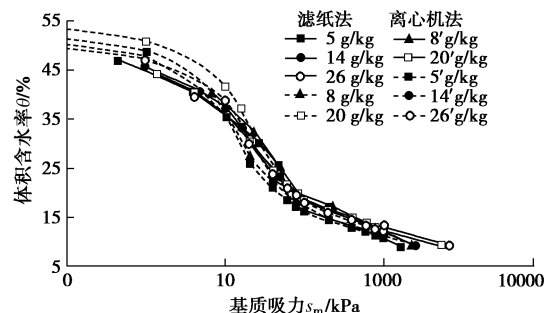


图 18 滤纸法与离心机法所测得基质吸力土水特征曲线

Fig. 18 SWCCs obtained by filter paper method and centrifuge method

从 R^2 来看 Gardner 模型适用于拟合伊犁黄土基质吸力土水特征曲线, 且模型拟合参数随体积含水率的变化也体现在参数 b 上。但是, 与滤纸法相比, 二者

的拟合参数在数值上存在着一定差异,离心机法参数 b 随含盐量的增大而增大,滤纸法参数 b 随含盐量的增大而减小(图19)。

表8 Gardner模型拟合基质吸力参数(离心机法)

Table 8 Matrix suction parameters fitted by Gardner model (centrifuge method)

易溶盐含量 $a/(g \cdot kg^{-1})$	b	n	θ_r	R^2
5	15.423	1.129	11.397	0.995
8	17.545	1.073	11.429	0.997
14	18.557	1.220	11.897	0.998
20	21.410	1.257	13.112	0.992
26	18.538	1.006	11.996	0.995

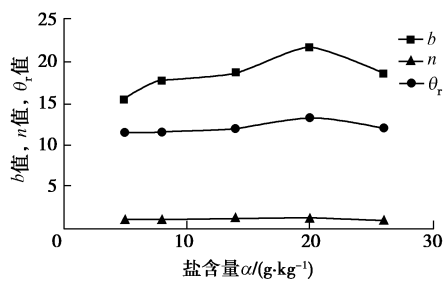


图19 Gardner模型参数与含盐量的关系曲线(离心机法)

Fig. 19 Relationship between Gardner model parameters and salt contents (centrifuge method)

分析差异,有以下两点原因:①二者使用土样虽均是新疆伊犁黄土,但是在取土深度、取土位置存在着一定差异,很难保证每块原状样性质完全相同。土样的差异可能是参数数值大小不同的一个主要原因;②滤纸法是在土样加完盐后逐级增加纯水,以达到不同含水率,这一过程中土样的溶液浓度是逐渐减小的;而离心机法是将加完盐的土样饱和后逐级离心,离心时甩出的是溶液,这一过程中土样的溶液浓度是保持不变的。试验过程的差异可能是参数 b 变化趋势不同的主要原因。

4.2 纯水增湿与盐溶液增湿

上述离心机法与滤纸法产生的差异主要在于土样内溶液浓度的变化,因此,很有必要开展相关试验,探究土样内溶液浓度对土水特征曲线的具体影响。本次试验研究过程是在土样中逐级加入纯水,以达到不同含水率,再通过滤纸法测量土样的总吸力与基质吸力;下一步的试验中,可以保证土样中的溶液浓度一定,通过加盐水的方法增加土样的含水率。前者模拟的是土样在降雨或施工过程中吸力的变化情况,后者模拟的是土样在灌溉过程中吸力的变化情况。探究含盐量对土样总吸力、基质吸力、渗透吸力的影响,纯水增湿与盐溶液增湿这两种试验过程都是必不可少的。

5 结论

(1) 含盐量对新疆伊犁黄土的基质吸力有一定影响,对总吸力与渗透吸力影响较大。随着含盐量增加,总吸力与渗透吸力逐渐增大,但由于土样中含水率很低时溶质趋于饱和,使得渗透吸力存在一极值,最终不超过 25000 kPa。

(2) 土样溶液浓度随着含盐量的增大而增大,但土样含水率增加到一定程度后,不同含盐量土样的溶液浓度趋于一致。

(3) 总吸力与溶液浓度之间呈线性关系。

(4) 伊犁黄土的湿陷系数随易溶盐含量的增加而明显增大,易溶盐含量是决定湿陷性大小的一个重要因素。

(5) 本文基于 Gardner 模型提出的伊犁黄土土水特征曲线拟合模型,可以考虑含盐量、含水率两个因素耦合变化情况下总吸力和基质吸力的变化,与试验数据符合较好。

参考文献:

- [1] 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-seng. Experimental study of soil-water characteristic curve of chlorine saline soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(4): 955-960. (in Chinese))
- [2] LU N, LIKOS W J. 非饱和土力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2012. (LU N, LIKOS W J. Unsaturated soil mechanics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2012. (in Chinese))
- [3] BULUT R, LEONG E C. Indirect measurement of suction[J]. Geotechnical & Geological Engineering, 2008, 26(6): 633-644.
- [4] FREDLUND D G, RAHARDJO H. Soil mechanics for unsaturated soils[M]. New York: Wiley Inter, 1993.
- [5] 张爱军,邢义川,胡新丽,等. 伊犁黄土强烈自重湿陷性的影响因素分析[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(增刊2): 117-122. (ZHANG Ai-jun, XING Yi-chuan, HU Xin-li, et al. Influence factors of strong self-weight collapsibility of Ili loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(S2): 117-122. (in Chinese))
- [6] FATTAH M Y, YAHYA A Y, AL-HADIDI M T, et al. Effect of salt content on total and matric suction of unsaturated soils[J]. European Journal of Scientific Research, 2013(9): 228-245.
- [7] 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. (in Chinese))
- [8] 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. (in Chinese))
- [9] 谷琪, 王家鼎, 全云莉, 等. 滤纸法测非饱和黄土土水特征曲线试验及拟合研究[J]. *土壤通报*, 2016, **47**(3): 588 - 593. (GU Qi, WANG Jia-ding, TONG Yun-li, et al. Soil-water characteristic curve test and simulation of unsaturated loess based on filter paper method[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2016, **47**(3): 588 - 593. (in Chinese))
- [10] MUÑOZ-CASTELBLANCO J A, PEREIRA J M, DELAGE P, et al. The water retention properties of a natural unsaturated loess from northern France[J]. *Géotechnique*, 2012, **62**(2): 95 - 106.
- [11] D 5298-10: Standard test method for the measurement of soil potential (suction) using filter paper[S]. 2010.
- [12] LEONG E C, HE L, RAHARDJO H. Factors affecting the filter paper method for total and matric suction measurements[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2002, **25**(3): 1 - 12.
- [13] 铁道部第一勘测设计院. 盐渍土地区铁路工程[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1988. (Ministry of Railways First Survey and Design Institute. Saline soil area railway engineering[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1988. (in Chinese))
- [14] 孟庆珍, 胡鼎文, 程泉寿, 等. 无机化学[M]. 北京: 北京师范大学出版社, 1988. (MENG Qing-zhen, HU Ding-wen, CHENG Quan, et al. Inorganic chemistry[M]. Beijing: Beijing Normal University Press, 1988. (in Chinese))
- [15] 印永嘉. 大学化学手册[M]. 山东: 山东科学技术出版社, 1985. (YIN Yong-jia. University chemistry handbook[M]. Shandong: Shandong Science and Technology Press, 1985. (in Chinese))
- [16] 谢定义. 非饱和土土力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2015. (XIE Ding-yi. Soil mechanics for unsaturated soils[M]. Beijing: Higher Education Press, 2015. (in Chinese))
- [17] DUDLEY J H. Review of collapsing soils[J]. *Journal of Soil Mechanics & Foundations Div*, 1970, **97**(3): 925 - 947.
- [18] 张婉, 张爱军, 陈佳玫, 等. 含水率和密度对伊犁黄土湿陷系数的影响[J]. *西北农林科技大学学报 (自然科学版)*, 2017, **45**(5): 211 - 220. (ZHANG Wan, ZHANG Ai-jun, CHEN Jia-mei, et al. Effect of moisture content and density on collapsibility coefficient of ili loess[J]. *Journal of Northwest A & F University (Nature Science Edit.)*, 2017, **45**(5): 211 - 220. (in Chinese))
- [19] 刘祖典. 黄土力学与工程[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1997. (LIU Zu-dian. Mechanics and engineering of loess[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1997. (in Chinese))
- [20] 汪海涛, 司富安, 段世委, 等. 湿陷性黄土地区渠道工程地质勘察体会[J]. *资源环境与工程*, 2014, **28**(4): 501 - 505. (WANG Hai-tao, SI Fu-an, DUAN Shi-wei, et al. Experience on engineering geological survey of channel construction in collapsible loess area[J]. *Resources Environment & Engineering*, 2014, **28**(4): 501 - 505. (in Chinese))
- [21] 高凌霞. 黄土湿陷性的微结构效应及其评价方法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2011. (GAO Ling-xia. Study on microstructural effects on collapsibility of loess and its evaluation methods[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011. (in Chinese))