

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2021.0045

JIANG Hao, BING Hui. Experimental and theoretical study on soil-water characteristic curve of sodium sulfate saline soil[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(2):497-509. [姜浩, 郇慧. 硫酸钠盐渍土土-水特征曲线的试验与理论研究[J]. 冰川冻土, 2021, 43(2):497-509.]

# 硫酸钠盐渍土土-水特征曲线的试验与理论研究

姜浩<sup>1,2</sup>, 郇慧<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院西北生态环境资源研究院 冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 土-水特征曲线(SWCC)在非饱和土力学中扮有重要的角色,是非饱和土力学的核心问题。以西北地区黄土中含有的典型硫酸钠盐为变化因素,采用滤纸法测得了兰州黄土及不同含盐量黄土状硫酸钠盐渍土的基质吸力并绘制土-水特征曲线,通过试验测试和理论分析来解释硫酸钠盐分对黄土状硫酸钠盐渍土基质吸力的影响规律,以期工程实践提供一定的理论依据。结果表明:相同含水率下硫酸钠盐渍土的含盐量越高,基质吸力越大。以非饱和土力学理论和表面物理化学理论为基础,考虑了土中的盐分对基质吸力的毛细部分及吸附部分的影响,得到了土中含盐量与基质吸力关系的半经验公式。利用该公式计算得到不同含盐量硫酸钠盐渍土的土-水特征曲线,计算曲线与试验曲线吻合程度较高,表明该公式可以很好地描述盐渍土中不同含盐量与基质吸力的关系。

**关键词:** 土-水特征曲线; 滤纸法; 硫酸钠盐渍土; 基质吸力; 含盐量

**中图分类号:** TU448 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2021)02-0497-13

## 0 引言

盐渍土是一系列受盐碱作用的,包括各种盐土、碱土及其他不同程度盐化、碱化土壤的统称。我国盐渍土分布广泛,总量约为9 913万公顷<sup>[1]</sup>。兰州地区属黄河中上游半干旱-半荒漠盐渍区,地下水矿化度较高<sup>[2-3]</sup>。兰州黄土中风化的岩盐矿物成分比较多,含盐量较大且主要以硫酸盐为主,是典型的硫酸盐盐渍土<sup>[4]</sup>。

非饱和土力学理论中,土的总吸力由基质吸力和渗透吸力(溶质吸力)两部分组成,其中基质吸力是非饱和土重要的应力状态变量,是影响非饱和土力学性质的重要因素<sup>[5]</sup>。土-水特征曲线(SWCC)是用来描述土吸力(基质吸力或总吸力)与土的含水量(体积含水量、质量含水率或饱和度)之间本构关系的曲线,是非饱和土力学性质研究的核心问题<sup>[6]</sup>。

此前,学者们进行了较多的盐渍土土-水特征曲线研究。孙德安等<sup>[7]</sup>、张悦等<sup>[8]</sup>、马田田等<sup>[9]</sup>对氯

盐盐渍土的土-水特征曲线进行研究,认为NaCl对盐渍土的基质吸力影响较小,盐渍土中的盐分主要对土的渗透吸力产生影响。王利莉等<sup>[10]</sup>、He等<sup>[11]</sup>、Ravi等<sup>[12]</sup>、Fattah等<sup>[13]</sup>对氯盐盐渍土的土-水特征曲线进行研究,认为NaCl对盐渍土的基质吸力有一定影响,并且对盐渍土的渗透吸力有较大的影响。张宏等<sup>[14]</sup>测定了含硫酸钠风积沙路基的土-水特征曲线,认为硫酸钠盐分对风积沙路基的基质吸力有一定的影响,对渗透吸力有较大的影响。郭全恩等<sup>[15-16]</sup>根据试验及模拟结果指出,土中不同盐分类型(NaCl、Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)溶液及不同浓度溶液对盐渍土的基质吸力均有影响。上述研究多集中在氯盐盐渍土,对西北地区广泛分布的硫酸盐盐渍土的土-水特征曲线的研究却相对较少。且对于盐分对渗透吸力影响的研究结果基本相同,而盐分对盐渍土基质吸力影响的研究方面不同研究者得到的结果并不相同,有必要对硫酸钠盐渍土盐分含量与基质吸力的关系进行深入的研究。

滤纸法是一种较为常用的土-水特征曲线试验

收稿日期: 2020-09-23; 修订日期: 2020-12-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(41371090)资助

作者简介: 姜浩, 硕士研究生, 主要从事盐渍土物理力学性质研究. E-mail: jianghao2018@nieer.ac.cn

通信作者: 郇慧, 副研究员, 主要从事冻土物理力学性质研究. E-mail: binghui@lzb.ac.cn

方法,大量应用于各种类非饱和土的土-水特征曲线试验中,具有操作简单、测量范围广等优点<sup>[17-18]</sup>。自 1937 年 Gardner<sup>[19]</sup>提出滤纸法后,国内外采用滤纸法开展了大量的研究。王钊等<sup>[20]</sup>、刘可定等<sup>[21]</sup>、白福青等<sup>[22]</sup>、朱赞成等<sup>[23]</sup>、张华等<sup>[24]</sup>、唐栋等<sup>[25]</sup>对国产 No. 203 型滤纸的率定曲线进行了研究,得到了受到广泛认可与应用的这一型号滤纸的率定曲线;王钊等<sup>[26]</sup>、陈东霞等<sup>[27]</sup>、唐东旗等<sup>[28]</sup>、辛保泉等<sup>[29]</sup>、刘欢等<sup>[30]</sup>采用前人测得该型号滤纸的率定曲线,对非饱和土的土-水特征曲线进行了研究。孙德安等<sup>[7]</sup>、张悦等<sup>[8]</sup>、Fattah 等<sup>[13]</sup>、张宏等<sup>[14]</sup>、Thyagaraj 等<sup>[31]</sup>采用滤纸法对不同种类盐渍土的土-水特征曲线进行研究,滤纸法在盐渍土土-水特征曲线的研究中有广泛的应用。

本文采用滤纸法测定了兰州黄土及不同含盐量硫酸钠盐渍土的基质吸力并绘制土-水特征曲线,以探究硫酸钠对兰州黄土基质吸力的影响。以非饱和土力学理论<sup>[5-6]</sup>和表面物理化学理论<sup>[32]</sup>为基础,结合 Philip<sup>[33]</sup>、McQueen & Miller<sup>[34]</sup>、Tuller & Miller<sup>[35]</sup>、Iwamatsu 等<sup>[36]</sup>提出的一系列理论,得到了土中含盐量与基质吸力关系的半经验公式。将所得半经验公式的各个部分进行定量化的表达,采用少量的试验数据拟合得到方程的全部参数,计算得到不同含盐量硫酸钠盐渍土的计算土-水特征曲线,计算曲线与试验曲线吻合程度较高,可以用来计算不同含盐量盐渍土的基质吸力。

1 试验材料

本次试验采用兰州黄土,取土点位置为 36°05′24″ N、103°47′01″ E,海拔 1 800.3 m。试验所用兰州黄土属粉质黏土,其基本物理性质、主要矿物成分及颗粒分析结果分别见表 1~2 及图 1。

使用过 2 mm 筛后的黄土配制初始含水率为 16%,含盐量为 0%、0.5%、1%、2% 的硫酸钠盐渍土,

表 1 兰州黄土基本物理性质

Table 1 Basic physical properties of Lanzhou loess

物理量	数值
最大干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	1.78
最优含水率/%	16.16
比重	2.72
BET 比表面积/(m <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup> )	11.46
液限 W <sub>L</sub> /%	28.35
塑限 W <sub>p</sub> /%	13.04
定名	粉质黏土

表 2 兰州黄土的主要矿物成分

Table 2 Main mineral composition of Lanzhou loess

矿物名称	分子式	含量/%
石英	SiO <sub>2</sub>	38.7
钠长石	(Na <sub>0.98</sub> Ca <sub>0.02</sub> )(Al <sub>1.02</sub> Si <sub>2.98</sub> O <sub>8</sub> )	27.4
方解石	CaCO <sub>3</sub>	13.4
斜绿泥石	(Mg <sub>2.96</sub> Fe <sub>1.55</sub> Fe <sub>0.136</sub> Al <sub>1.275</sub> )(Si <sub>2.662</sub> Al <sub>1.376</sub> O <sub>10</sub> )(OH) <sub>8</sub>	11.9
白云石	CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	8.6

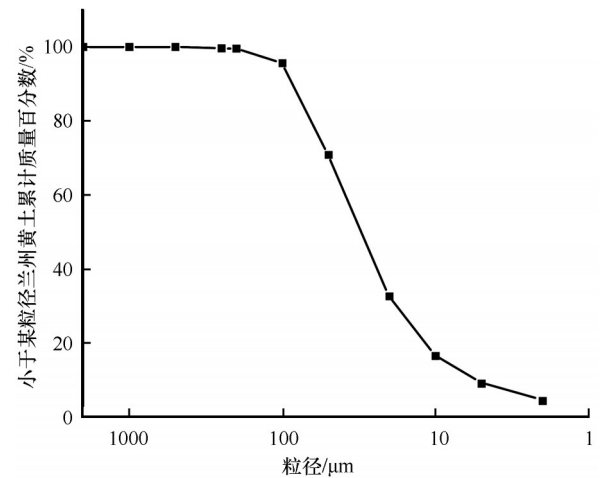


图 1 兰州黄土颗粒级配曲线

Fig. 1 Grain size distribution curve of Lanzhou loess

配制后的土样装入密封袋静置 24 h 以上使其中的盐分水分分布均匀。采用制样机制成干密度 1.69 g·cm<sup>-3</sup> 的环刀重塑土试样,对环刀试样采用抽真空法进行饱和,饱和时环刀试样之间用滤纸隔开,根据所配制土样的含盐量,饱和时使用的 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液浓度分别为 0 g·L<sup>-1</sup>、21.92 g·L<sup>-1</sup>、43.83 g·L<sup>-1</sup>、87.65 g·L<sup>-1</sup>,饱和后的土样通过风干法控制含水率。

2 试验方法

本次黄土状硫酸钠盐渍土 SWCC 的试验采用滤纸法,滤纸法使用的主要器材有恒温箱、电子天平(精度到 0.0001 g)、滤纸、密封罐、保鲜膜、密封袋、环刀、干燥剂、饱和器、镊子等。试验用水均为试验室 I 级水。

2.1 滤纸法的测试原理

滤纸法使用滤纸作为被动传感器,以测试土壤的基质吸力或总吸力,滤纸法的吸力量测范围为 10<sup>1</sup>~10<sup>5</sup> kPa<sup>[37]</sup>。在恒定温度下,将滤纸与环刀土样共同放置在一个密封罐中,滤纸与土样直接接触(三张滤纸夹在两个土样中间)以测量土中的基质吸力。这是由于滤纸在与土样直接接触时土样中

的水分或溶液迁移到了滤纸中,忽略了土中渗透吸力的影响,滤纸的水分与土样的水分达到平衡状态,测定滤纸的含水量,通过该滤纸的率定曲线得到土样的基质吸力。

## 2.2 滤纸法的试验过程

本次试验使用的滤纸为国产“双圈”牌 No. 203 型定量滤纸,滤纸直径为 70 mm,滤速为慢速。采用王钊等<sup>[20]</sup>测得该型号滤纸的率定曲线。

基质吸力与滤纸含水率之间关系曲线(率定曲线)的方程为

$$\lg s = \begin{cases} 5.493 - 0.0767w_f (w_f \leq 47\%) \\ 2.470 - 0.0120w_f (w_f > 47\%) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $s$ 为基质吸力(kPa); $w_f$ 为滤纸质量含水率(%)。

滤纸法测 SWCC 的试验过程如下:

①将滤纸裁剪到直径 55 mm 大小,在烘箱(温度设置为 105 ℃)中烘干 16 h 后放入干燥盒备用;

②在两个环刀试样中间叠放三张滤纸与试样接触(两张直径为 70 mm 的滤纸起保护作用,中间一张直径为 55 mm 的滤纸用于测量土样的基质吸力),如图 2 所示;

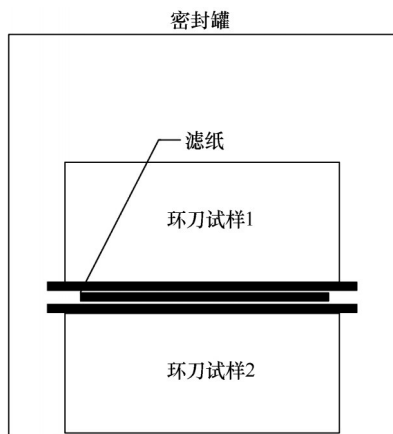


图2 滤纸法测 SWCC 示意图

Fig. 2 Schematic diagram of SWCC measurement by filter paper method

③环刀试样与滤纸放置在密封罐中,密封罐外包裹保鲜膜,包裹好的密封罐放入密封袋中保护;

④土样放于恒温箱中,不同含盐量盐渍土的 SWCC 试验同时进行,吸力平衡时间为 10 d,恒温箱温度保持在(25±1) ℃;

⑤平衡 10 d 后打开密封罐,用镊子将湿滤纸取出,采用精度到 0.0001 g 的电子天平直接进行称重,每次称重必须在 15 s 内完成,称量后的湿滤纸装入密封袋中并标号;

⑥用镊子将湿滤纸放在铝盒中(铝盒底部垫一张干净的滤纸),将铝盒放入温度为 105 ℃ 的烘箱中烘 16 h,滤纸烘干后采用干燥的密封袋转移,且密封袋储存在干燥盒中;

⑦用镊子将烘干后的滤纸从密封袋中取出快速称重,计算得出滤纸的含水率,使用率定曲线可计算出该含水率对应的基质吸力值;

⑧通过烘干法测得土样的质量含水率,绘制不同含盐量硫酸钠盐渍土的 SWCC。

## 3 结果与分析

### 3.1 试验结果

不同含盐量硫酸钠盐渍土的 SWCC 如图 3 所示,从图中可以看出硫酸钠盐渍土 SWCC 呈反 S 形。在本次试验测试的 SWCC 的整个阶段,相同含水率下土样的基质吸力基本服从 2% 硫酸钠盐渍土 > 1% 硫酸钠盐渍土 > 0.5% 硫酸钠盐渍土 > 兰州黄土这一规律。由此可见,硫酸钠盐的存在及含量大小对兰州黄土的基质吸力影响较大,硫酸钠盐渍土的持水能力随着含盐量的增加而提高。这一结果与张宏等<sup>[14]</sup>得到的试验结果较为相近。

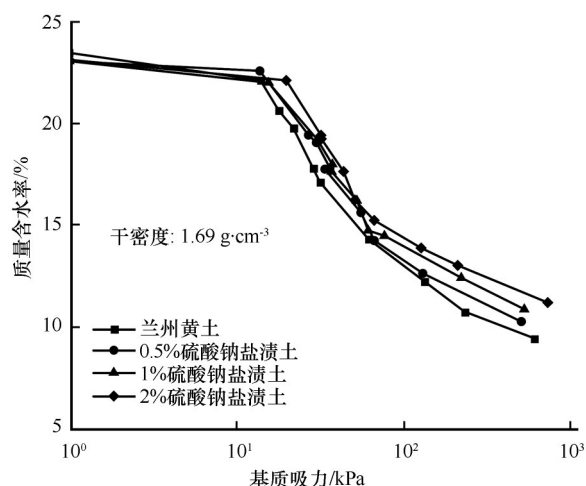


图3 不同含盐量硫酸钠盐渍土 SWCC

Fig. 3 SWCC of saline soil with different sodium sulfate content

在含水率较高的 SWCC 阶段,不同硫酸钠含量土体的基质吸力差别较小,表明在含水率较高时含盐量对基质吸力的影响很小。这是因为在高含水率下,土体中的盐分完全溶于孔隙溶液中,孔隙盐溶液的表面张力增大,随着表面张力的增大液-固接触角  $\delta$  也会增大。毛细作用与表面张力的增加呈正相关,而与接触角的增加呈负相关,两种因素共



同作用导致含盐量的增加对土体毛细作用的改变较小,最终结果即为在含水率较高的SWCC阶段,含盐量对基质吸力的影响较小。

随着含水率的降低,不同含盐量土的SWCC差异显著,特别是不含盐的兰州黄土与2%含盐量的硫酸钠盐渍土,两种土在含水率为12%时基质吸力相差数百千帕。这是由于盐渍土中的含水率较低时,土体中的基质吸力主要由吸附作用主导,而较高的孔隙盐溶液浓度对吸附作用有较大的影响,盐分对基质吸力的影响是通过吸附作用增强来体现。

### 3.2 Van Genuchten土-水特征曲线模型

Van Genuchten土-水特征曲线模型(简称VG模型)<sup>[38]</sup>是一种得到广泛认可的描述基质吸力与土壤含水率之间关系的经验模型,本文采用VG模型对试验数据进行拟合并进行验证<sup>[39-41]</sup>。

VG模型的具体表达式为

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[ \frac{1}{1 + (\alpha s)^n} \right]^m \quad (2)$$

$$m = 1 - \frac{1}{n}, 0 < m < 1 \quad (3)$$

式中: $\alpha$ 、 $n$ 、 $m$ 均为经验参数,需通过实测数据拟合求得; $\theta_s$ 为饱和质量含水率(%); $\theta_r$ 为残余质量含水率(%); $\theta$ 为基质吸力 $s$ 对应的质量含水率(%); $s$ 为基质吸力(kPa);参数 $\alpha$ 一般为土进气值的倒数,与土的最大孔径有关,最大孔径越大,进气值越小<sup>[42]</sup>;参数 $n$ 与土孔径分布有关,一般来说粗颗粒土的 $n$ 值较高,细颗粒土的 $n$ 值较低<sup>[43]</sup>;参数 $m$ 与参数 $n$ 有关, $m=1-1/n$ 。

将式(2)代入式(3),得到常用的VG模型表达 $\theta$ - $s$ 关系的表达式为

$$\theta = (\theta_s - \theta_r) \left[ \frac{1}{1 + (\alpha s)^n} \right]^{(1 - \frac{1}{n})} + \theta_r \quad (4)$$

### 3.3 VG模型的试验结果拟合

使用MATLAB中的lsqcurvefit函数进行模拟,式(4)中饱和含水率 $\theta_s$ 为定值, $\alpha$ 、 $n$ 、 $\theta_r$ 为拟合参数。利用总试验数据的60%进行拟合,40%进行验证。不同含盐量硫酸钠盐渍土的土-水特征曲线拟合结果如表3,拟合曲线见图4。

从表3、图4可以发现拟合曲线与实测数据的均方差(RMSE)较小,VG模型的拟合效果较好。不同含盐量硫酸钠盐渍土的VG模型拟合参数不同,但其间有规律可循。硫酸钠盐渍土的参数 $\alpha$ 值均小于去离子水处理的兰州黄土,进气吸力均大于去离子水处理的兰州黄土,不同含盐量盐渍土间进气吸力

表3 VG模型拟合参数

Table 3 Fitting parameters of VG model

含盐量	拟合参数			
	$\alpha$	$n$	$\theta_r$	RMSE
兰州黄土	0.0418	1.9672	9.0785	0.3674
0.5%	0.0334	2.2381	10.1436	0.3079
1%	0.0318	2.4329	11.0979	0.4029
2%	0.0289	2.5086	11.5983	0.4749

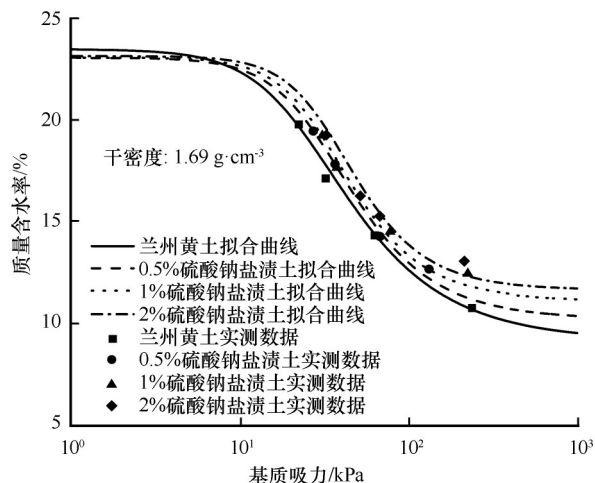


图4 实测数据与拟合曲线对比

Fig. 4 Comparison between measured data and fitting curves

的关系为2%硫酸钠盐渍土>1%硫酸钠盐渍土>0.5%硫酸钠盐渍土>兰州黄土;VG模型拟合曲线的参数 $n$ 、 $\theta_r$ 随着含盐量增加而增加。

## 4 非饱和盐渍土含盐量与基质吸力关系的半经验公式

### 4.1 McQueen & Miller土-水特征曲线概念模型

McQueen & Miller<sup>[34]</sup>于1974年提出的土-水特征曲线概念模型(图5)认为,吸力值在0~10<sup>2</sup> kPa之间为毛细作用段,基质吸力主要由毛细作用影响;吸力值约为10<sup>2</sup>~10<sup>4</sup> kPa之间为水膜吸附段,基质吸力主要受土体内固-液间的短程相互作用影响;吸力值约为10<sup>4</sup>~10<sup>6</sup> kPa之间为紧密吸附段,基质吸力主要与分子间作用力有关。

### 4.2 含盐量对毛细作用的影响

假设土体中孔隙均为毛细管形式,土中孔隙的液-气界面压力差( $u_a - u_w$ )均可以用Yang-Laplace方程表示。Yang-Laplace方程中弯液面(图6)内外压力差与表面张力和曲率半径的关系<sup>[5,44]</sup>为

$$(u_a - u_w) = T \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = T \frac{2}{R} \quad (5)$$

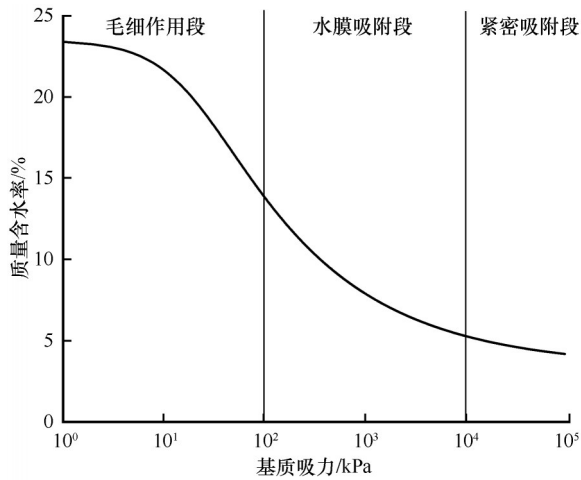


图5 土-水特征曲线概念模型

Fig. 5 The conceptual model of SWCC

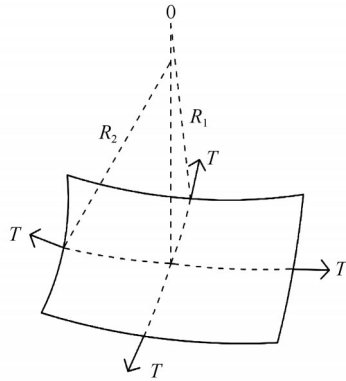


图6 弯液面

Fig. 6 Meniscus

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (6)$$

式中:  $u_a$  为孔隙气压力 (kPa);  $u_w$  为孔隙水压力 (kPa);  $T$  为表面张力 ( $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ );  $R_1$  和  $R_2$  为弯液面在正交平面上的曲率半径 (m);  $R$  为平均曲率半径 (m)。基质吸力与表面张力  $T$  成正比, 与弯液面平均曲率半径  $R$  成反比。

非饱和土力学理论的毛细管模型中<sup>[6]</sup>, 平均曲率半径  $R$  由毛细半径  $r$  和液-固接触角  $\delta$  来确定, 关系为

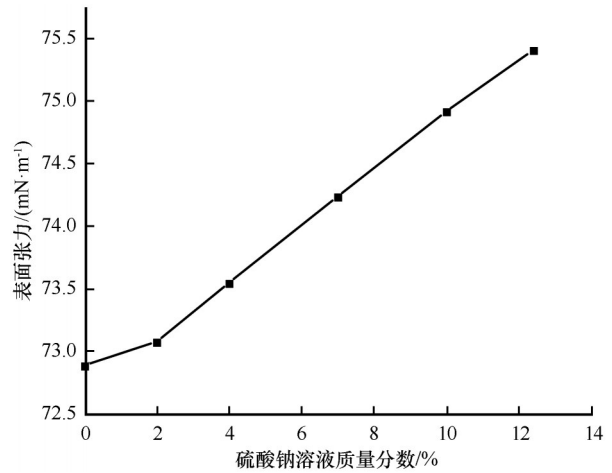
$$R = \frac{r}{\cos \delta} \quad (7)$$

式中:  $r$  为毛细半径 (m);  $\delta$  为液-固接触角 ( $^\circ$ )。

因此, Yang-Laplace 方程可以表示为

$$(u_a - u_w) = \frac{2T \cos \delta}{r} \quad (8)$$

表面物理化学理论认为, 无机盐类溶液中溶质浓度的增大可以使溶液的表面张力随之一起增大<sup>[32]</sup>。当温度为  $20^\circ\text{C}$  时, 硫酸钠水溶液表面张力与浓度的关系见图7。

图7  $20^\circ\text{C}$  硫酸钠水溶液表面张力与浓度关系曲线<sup>[45]</sup>Fig. 7 Relationship between surface tension and concentration of sodium sulfate aqueous solution at  $20^\circ\text{C}$ <sup>[45]</sup>

硫酸钠水溶液的表面张力与溶液浓度近乎线性相关, 仅考虑盐溶液浓度对表面张力的影响, 设  $T_0$  为纯水的表面张力, 则盐渍土中的盐溶液表面张力  $T_x$  为

$$T_x = T_0 + c \frac{x}{\theta} \quad (9)$$

式中:  $T_0$  为纯水的表面张力 ( $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ ), 通常取  $T_0 = 0.072 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ ;  $T_x$  为盐溶液的表面张力 ( $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ );  $c$  为在特定土类中某一种溶质对孔隙溶液表面张力影响的参数;  $x$  为盐渍土的含盐量 (%);  $\theta$  为不含盐土任意基质吸力对应的质量含水率 (%);  $x/\theta$  为孔隙盐溶液浓度 (%)。

表面物理化学理论认为, 溶液在光滑低能表面形成的接触角随液体表面张力的变化而变化,  $\cos \delta$  与液体表面张力关系的经验公式为

$$\cos \delta = f - eT \quad (10)$$

式中:  $e$  为在特定土类中孔隙溶液表面张力对接触角影响的参数;  $f$  为同种盐溶液在指定聚合物表面上的常数。

将式(9)代入式(10), 得到盐渍土中液-固接触角  $\delta_x$  随孔隙盐溶液浓度变化的关系式为

$$\cos \delta_x = f - eT_x = f - e(T_0 + c \frac{x}{\theta}) \quad (11)$$

在非饱和土中, 由于土颗粒表面吸附水膜的存在, 某一含水率对应的开尔文半径  $r^k$  (空气填充孔隙半径) 小于毛细半径  $r$ 。假定相同干密度不同含盐量土的孔隙分布相同, 不考虑盐分对孔隙的影响, 则盐渍土基质吸力的毛细部分为

$$C_x = 2 \frac{T_x \cos \delta_x}{r^k} = 2 \frac{T_x (f - eT_x)}{r^k} = 2 \frac{fT_x - eT_x^2}{r^k} \quad (12)$$

式中:  $C_x$  为盐渍土基质吸力的毛细部分;  $r^k$  为开尔文半径(m)。

不含盐土基质吸力的毛细部分为

$$C_0 = 2 \frac{T_0 \cos \delta_0}{r^k} = 2 \frac{T_0(f - eT_0)}{r^k} = 2 \frac{fT_0 - eT_0^2}{r^k} \quad (13)$$

式中:  $C_0$  为不含盐土基质吸力的毛细部分;  $\delta_0$  为不含盐土液-固接触角( $^\circ$ )。

含盐量增加时基质吸力的毛细部分增量  $\Delta C$  为

$$\Delta C = C_x - C_0 = 2 \frac{f(T_x - T_0) - e(T_x^2 - T_0^2)}{r^k} \quad (14)$$

$$= 2 \frac{[f - e(T_x + T_0)]}{r^k} (T_x - T_0)$$

$$\Delta C = 2 \frac{[f - e(T_x + T_0)]}{r^k} (T_x - T_0)$$

$$= 2 \frac{[f - e(2T_0 + c \frac{x}{\theta})]}{r^k} c \frac{x}{\theta} \quad (15)$$

$$\Delta C = 2 \frac{[\cos \delta_0 - e(T_0 + c \frac{x}{\theta})]}{r^k} c \frac{x}{\theta}$$

$$= 2c \left( \frac{\cos \delta_0}{r^k} - \frac{eT_0}{r^k} \right) \frac{x}{\theta} - 2 \frac{c^2 e}{r^k} \left( \frac{x}{\theta} \right)^2 \quad (16)$$

式中:  $\Delta C$  为含盐量增加基质吸力中的毛细部分增量。

由式(16)可以发现, 含盐量增加时基质吸力的毛细部分增量  $\Delta C$  与孔隙盐溶液浓度为过原点开口向下的一元二次方程关系。对式(16)求导, 盐溶液对基质吸力影响最大时的孔隙盐溶液浓度为

$$\frac{x}{\theta} = \frac{\cos \delta_0 - eT_0}{2ce} \quad (17)$$

### 4.3 含盐量对吸附作用的影响

非饱和土力学理论认为<sup>[6,34]</sup>, 基质吸力主要由毛细作用和短程吸附作用组成, 需要考虑含盐量对吸附作用的影响。Tuller & Miller<sup>[35]</sup>给出的干燥端土壤质量含水率与吸附水膜厚度的关系为

$$\theta = h S_a \rho_w \quad (18)$$

式中:  $\theta$  为质量含水率(%);  $h$  为土中吸附水膜厚度(m);  $S_a$  为土壤比表面积( $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ );  $\rho_w$  为土中水溶液的密度( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )。

盐溶液密度为浓度和温度的函数, 当温度为 25  $^\circ\text{C}$  时, 硫酸钠水溶液密度与浓度的关系如图 8 所示。

由图 8 可知, 硫酸钠水溶液密度与浓度线性相关, 不考虑空气溶解对孔隙水溶液密度的影响, 相同含水率下盐渍土中孔隙溶液密度  $\rho_x$  相对纯水的关系为

$$\rho_x = \rho_0 + d \frac{x}{\theta} \quad (19)$$

式中:  $\rho_0$  为纯水的密度( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ), 本文取  $\rho_0 = 1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ;

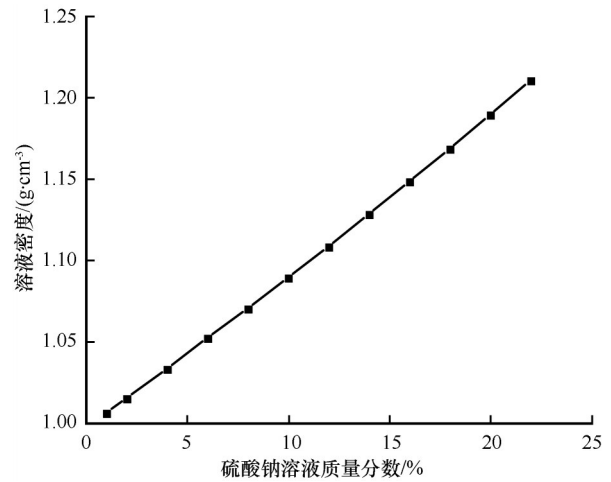


图 8 25  $^\circ\text{C}$  硫酸钠水溶液密度与浓度关系曲线<sup>[45]</sup>

Fig. 8 Relationship between density and concentration of sodium sulfate solution at 25  $^\circ\text{C}$ <sup>[45]</sup>

$\rho_x$  为孔隙溶液的密度( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ );  $d$  为在特定土类中某一种溶质对孔隙溶液密度影响的参数。

由式(18)可知, 某一含水率下土颗粒表面吸附水膜厚度与孔隙溶液密度负相关。则某一含水率下盐渍土的吸附水膜厚度为

$$h_x = \frac{h_0}{1 + d \frac{x}{\theta}} \quad (20)$$

式中:  $h_x$  为盐渍土的吸附水膜厚度(m);  $h_0$  为不含盐土的吸附水膜厚度(m)。

根据表面物理化学理论<sup>[32,36]</sup>, 吸附水膜厚度与范德华力的关系为

$$h = \sqrt[3]{\frac{A_{svl}}{6\pi H}} \quad (21)$$

式中:  $A_{svl}$  为土体的 Hamaker 常数, 通常取  $A_{svl} = 6 \times 10^{-20} \text{ J}^{[35]}$ ;  $H$  为单位面积的范德华力( $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$ )。

假设在 SWCC 的水膜吸附段 ( $10^2 \sim 10^4 \text{ kPa}$ ), 吸附作用仅与平面上的范德华力有关<sup>[35]</sup>, 随着孔隙水分的不断排出, 已排水孔隙比表面积增加, 范德华力随着吸附水膜厚度的减小和已排水孔隙比表面积的增加而增加。宏观上看范德华力表现在单位土体的总比表面积上, 在式(21)的基础上考虑范德华力的作用范围, 则基质吸力的吸附部分  $F$  为

$$F = H \frac{S_s}{S_0} = \frac{A_{svl} S_s}{6\pi h^3 S_0} \quad (22)$$

式中:  $F$  为基质吸力的吸附部分;  $S_s$  为已排水孔隙比表面积( $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ );  $S_0$  为土的总比表面积( $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ )。

联立式(20)、(22), 可得盐渍土基质吸力的吸附部分  $F_x$  与含盐量的关系为

$$F_x = \frac{A_{svl} S_s}{6\pi h_0^3 S_0} \left(1 + d \frac{x}{\theta}\right)^3 \quad (23)$$

不含盐土基质吸力的吸附部分  $F_0$  为

$$F_0 = \frac{A_{svl} S_s}{6\pi h_0^3 S_0} \quad (24)$$

硫酸钠盐渍土在含盐量增大时基质吸力的吸附部分增量为

$$\Delta F = F_x - F_0 = \left( \frac{A_{svl} S_s}{6\pi h_0^3 S_0} \right) \left[ \left(1 + d \frac{x}{\theta}\right)^3 - 1 \right] \quad (25)$$

式中:  $\Delta F$  为含盐量增大时基质吸力中的吸附部分增量。

由式(23)、(25)可以发现,在含水率相同的情况下,孔隙盐溶液浓度对土体吸附作用的影响为幂函数关系。硫酸钠盐渍土在 SWCC 水膜吸附段基质吸力主要由毛细作用和吸附作用共同影响,在这一阶段不同含盐量盐渍土在相同含水率下的基质吸力差别显著。随着含水率的下降,孔隙盐溶液浓度逐渐增大,最终导致吸附作用逐渐增强,含盐量对基质吸力产生较大的影响。同时可以发现,式(25)仅在盐渍土孔隙盐溶液未达到饱和浓度的情况下成立,若孔隙盐溶液达到饱和浓度,则式(25)不再适用。

## 5 非饱和盐渍土土-水特征曲线计算

### 5.1 盐渍土基质吸力关系的半经验公式

Philip<sup>[33]</sup>在 1977 年提出了考虑吸附作用的增量 Yang-Laplace 方程模型,基质吸力与毛细作用和吸附作用有关,表达形式为

$$s = C(R) + F(h) \quad (26)$$

式中:  $s$  为基质吸力(kPa);  $C$  为基质吸力中的毛细部分;  $F$  为基质吸力中的吸附部分。

则不同含盐量盐渍土在同一含水率下基质吸力的关系为

$$s_x = s_0 + \Delta C + \Delta F \quad (27)$$

式中:  $s_x$  为盐渍土的基质吸力(kPa);  $s_0$  为不含盐土的基质吸力(kPa); 其他参数物理意义与式(16)、(25)相同。

结合式(16)、(25)、(27),得到如下的不同含盐量盐渍土在同一含水率下基质吸力的关系,为

$$s_x = s_0 + 2c \left( \frac{\cos \delta_0}{r^k} - \frac{eT_0}{r^k} \right) \frac{x}{\theta} - 2 \frac{c^2 e}{r^k} \left( \frac{x}{\theta} \right)^2 + \left( \frac{A_{svl} S_s}{6\pi h_0^3 S_0} \right) \left[ \left(1 + d \frac{x}{\theta}\right)^3 - 1 \right] \quad (28)$$

式中各参数物理意义与前文相同。

### 5.2 基质吸力毛细部分的关系

以非饱和土力学理论为基础<sup>[6]</sup>,联系土-水特征曲线与 Yang-Laplace 方程,可以通过下式(29)确定兰州黄土基质吸力在第  $i$  步增量时对应的开尔文半径  $r_i^k$  (空气填充孔隙半径)的关系,为

$$r_i^k = \frac{2T_0 \cos \delta_0}{u_a - u_w} \quad (29)$$

式中:  $r_i^k$  为兰州黄土基质吸力在第  $i$  步增量时对应的开尔文半径(m)。

不含盐土的土-水特征曲线通常假设接触角  $\delta_0 = 0^\circ$ , 纯水的表面张力为  $T_0 = 0.072 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ , 则式(29)可以简化为

$$r_i^k = \frac{2 \times 0.072}{1000(u_a - u_w)} \quad (30)$$

通过土-水特征曲线与式(30)的联合使用,可以确定兰州黄土每级基质吸力对应的开尔文半径  $r_i^k$  与质量含水率之间的关系如图9所示。

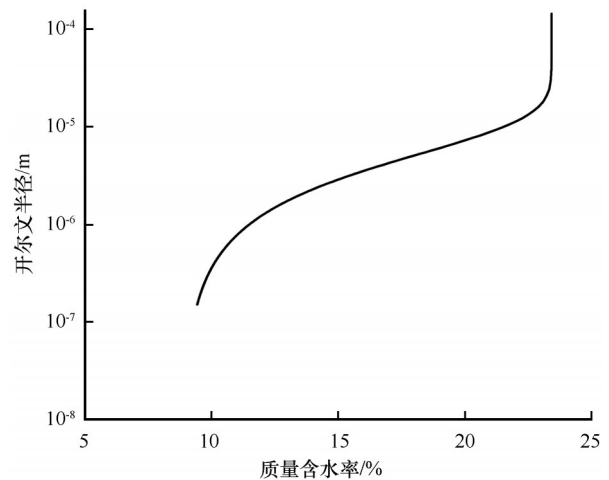


图9 兰州黄土含水率与开尔文半径关系曲线  
Fig. 9 Relationship curve between Kelvin radius and water content of Lanzhou loess

基质吸力值在  $0 \sim 10^2$  kPa 之间为 SWCC 毛细作用段,这一阶段不同含盐量盐渍土的基质吸力主要与毛细作用有关,可以不考虑吸附作用对基质吸力的影响,给出式(16)中除参数  $c$ 、 $e$  外其他部分的数值,式(28)化简为

$$s_x^i = s_0^i + 2c \left( \frac{1 - 0.072e}{1000r_i^k} \right) \frac{x}{\theta_i} - 2 \frac{c^2 e}{1000r_i^k} \left( \frac{x}{\theta_i} \right)^2 \quad (31)$$

式中:  $s_0^i$  为兰州黄土的第  $i$  步基质吸力(基质吸力为  $i$  kPa);  $s_x^i$  为盐渍土的第  $i$  步基质吸力(kPa);  $\theta_i$  为基质吸力为第  $i$  步时的质量含水率(%)。

选取毛细作用段接近饱和含水率的任一含水



率下不同含盐量盐渍土的基质吸力(本次拟合选取质量含水率为20%),结合图9开尔文半径与质量含水率的关系曲线,得到质量含水率为20%时对应的开尔文半径 $r_i^k=7.1464 \times 10^{-6}$  m。使用MATLAB中的cftool工具拟合得到式(31)中的参数 $c$ 、 $e$ (表4),拟合曲线见图10。

表4 式(31)拟合参数 $c$ 、 $e$

Table 4 The parameters  $c$  and  $e$  of equation (31)

含水率为20%的基质吸力/kPa				拟合参数		
兰州黄土	0.5%	1%	2%	$c$	$e$	$R^2$
20.15	24.43	26.13	28.75	0.8628	4.086	0.98

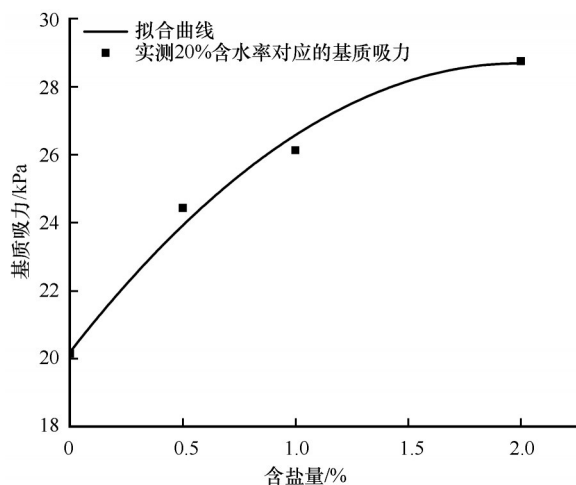


图10 含水率20%盐渍土基质吸力关系拟合曲线

Fig. 10 Matric suction fitting curve of saline soil with 20% water content

将参数 $c$ 、 $e$ 代入式(31),得到毛细作用段不同含盐量硫酸钠盐渍土基质吸力毛细部分的关系式为

$$s_x^i = s_0^i + \left( \frac{1.2179 \times 10^{-3}}{r_i^k} \right) \frac{x}{\theta_i} - \left( \frac{6.0834 \times 10^{-3}}{r_i^k} \right) \left( \frac{x}{\theta_i} \right)^2 \quad (32)$$

### 5.3 基质吸力吸附部分的关系

非饱和土力学理论<sup>[6]</sup>认为若孔隙为圆柱体形态,则兰州黄土基质吸力在第 $i$ 步增量时,比表面积的增加可以表示为

$$\Delta S_s^i = \frac{2\Delta V_i}{r_i} \quad (33)$$

式中: $r_i$ 为基质吸力在第 $i$ 步增量时对应的毛细半径(m); $\Delta V_i$ 为单位质量土体内被气体或水填充的孔隙体积变化量( $\text{m}^3$ ),可以表示为式(34)的形式。

$$\Delta V_i = \frac{\Delta \theta_i}{\rho_w} \quad (34)$$

式中: $\Delta \theta_i$ 为质量含水率变化量(%); $\rho_w$ 为孔隙水的

密度( $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ),本文中纯水的密度取值为 $10^6 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

将式(33)、(34)积分可得

$$\int_{i-1}^i \Delta S_s^i = \frac{2(V_i - V_{i-1})}{r_i} = \frac{2(\theta_i - \theta_{i-1})}{10^6 r_i} \quad (35)$$

式中: $\int_{i-1}^i \Delta S_s^i$ 为基质吸力在第 $i-1$ 步至第 $i$ 步时的比表面积增量( $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ); $\theta_{i-1}$ 为基质吸力为第 $i-1$ 步时的质量含水率(%)。

取基质吸力每增加1 kPa为一步,则兰州黄土基质吸力为第 $i$ 步时已排水孔隙的比表面积为

$$S_s^i = \sum_n^i \frac{2(\theta_i - \theta_{i-1})}{10^6 r_i} \quad (i \geq 1) \quad (36)$$

式中: $S_s^i$ 为兰州黄土基质吸力为第 $i$ 步时已排水孔隙的比表面积( $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ )。

根据非饱和土力学理论<sup>[6]</sup>,兰州黄土基质吸力在第 $i$ 步增量时对应的吸附水膜厚度可以按下式计算。

$$h_i = \tau \left[ \frac{5RK}{1000(u_a - u_w)v_w} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (37)$$

式中: $h_i$ 为兰州黄土基质吸力在第 $i$ 步增量时对应的吸附水膜厚度(m); $R$ 为通用气体常数( $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ),取 $R=8.134 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ;  $K$ 为热力学温度(K),取 $K=298.5 \text{ K}$ ;  $v_w$ 为水的摩尔体积( $\text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$ ),取 $v_w=1.8 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$ ;  $\tau$ 为一个水分子的厚度(m),取 $\tau=2.77 \times 10^{-10} \text{ m}$ 。

计算得到兰州黄土质量含水率与吸附水膜厚度的关系如图11所示。

毛细半径为开尔文半径与吸附水膜厚度之和,则毛细半径 $r_i$ 可以按照下式计算。

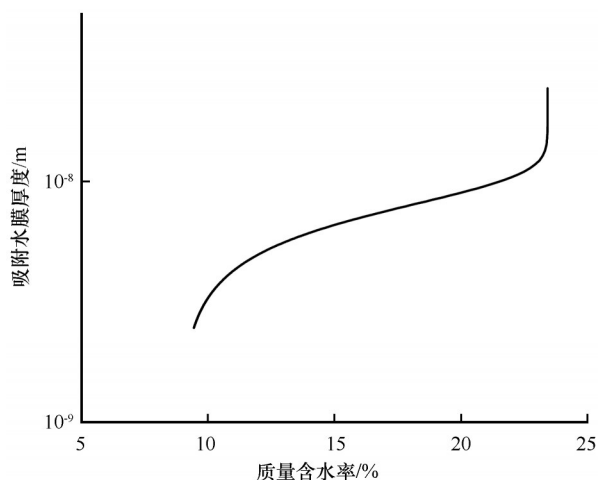


图11 兰州黄土含水率与水膜厚度关系曲线

Fig. 11 Relationship curve between water content and water film thickness of Lanzhou loess



$$r_i = r_i^k + h_i = \frac{2 \times 0.072}{1000(u_a - u_w)} + 2.77 \times 10^{-10} \left[ \frac{5 \times 8.134 \times 298.15}{1000 \times 1.8 \times 10^{-5}(u_a - u_w)} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (38)$$

采用式(36)、(38)计算得到兰州黄土的质量含水率与已排水孔隙比表面积的关系如图12所示。

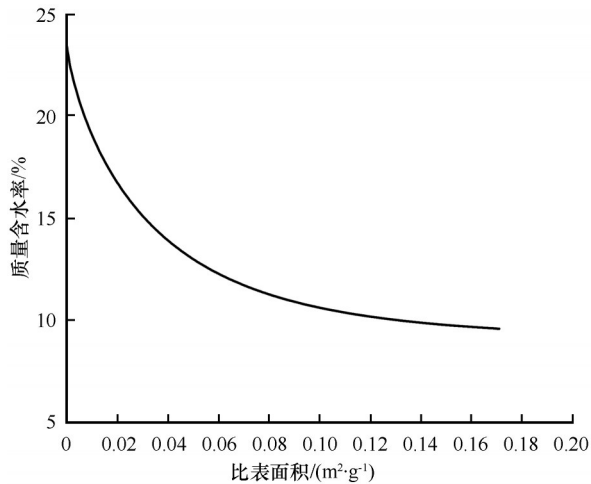


图12 兰州黄土含水率与比表面积关系曲线  
Fig. 12 Relationship curve between water content and specific surface area of Lanzhou loess

吸力值在  $10^2 \sim 10^4$  kPa 之间为 SWCC 水膜吸附段,这一阶段不同含盐量盐渍土的基质吸力主要与毛细作用和吸附作用有关,需要考虑吸附作用对基质吸力的影响,给出式(28)除参数  $d$  外其他部分的数值,式(28)简化为

$$s_x^i = s_0^i + \left( \frac{1.2179 \times 10^{-3}}{r_i^k} \right) \frac{x}{\theta_i} - \left( \frac{6.0834 \times 10^{-3}}{r_i^k} \right) \left( \frac{x}{\theta_i} \right)^2 + \left( \frac{6 \times 10^{-20} S_s^i}{1000 \times 6\pi h_i^3 S_0} \right) \left[ \left( 1 + d \frac{x}{\theta_i} \right)^3 - 1 \right] \quad (39)$$

选取水膜吸附段的任一含水率下不同含盐量盐渍土的基质吸力(本次拟合选取质量含水率为12%),结合图9、图12,得到质量含水率为12%时对应的开尔文半径  $r_i^k = 1.1803 \times 10^{-6}$  m、比表面积  $S_s^i = 0.0633 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 、总比表面积  $S_0 = 11.4606 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 、吸附水膜厚度  $h_i = 4.8960 \times 10^{-9}$  m。使用 MATLAB 中的 cftool 工具拟合得到式(39)中的参数  $d$ (表5),拟合曲线见图13。

表5 式(39)拟合参数  $d$

Table 5 The parameter  $d$  of equation (39)

含水率为12%的基质吸力/kPa				拟合参数	
兰州黄土	0.5%	1%	2%	$d$	$R^2$
122.00	150.01	214.50	389.50	64.11	0.99

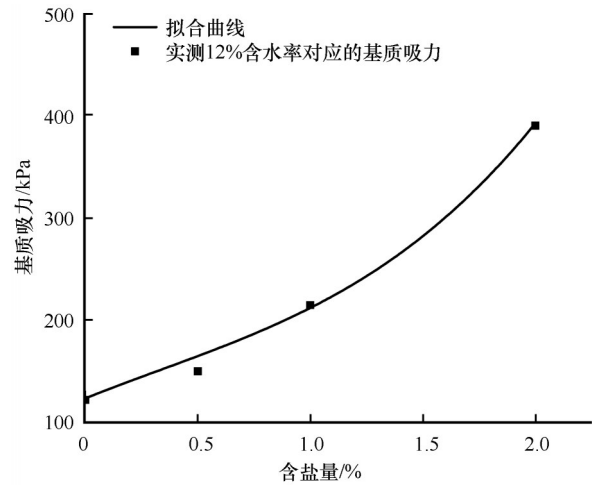


图13 含水率12%盐渍土基质吸力关系拟合曲线

Fig. 13 Matric suction fitting curve of saline soil with 12% water content

将参数  $d$  代入式(39)中,得到

$$s_x^i = s_0^i + \left( \frac{1.2179 \times 10^{-3}}{r_i^k} \right) \frac{x}{\theta_i} - \left( \frac{6.0834 \times 10^{-3}}{r_i^k} \right) \left( \frac{x}{\theta_i} \right)^2 + \left( \frac{2.7788 \times 10^{-25} S_s^i}{h_i^3} \right) \left[ \left( 1 + 64.11 \frac{x}{\theta_i} \right)^3 - 1 \right] \quad (40)$$

式中各参数物理意义与前文相同。

#### 5.4 土-水特征曲线计算

采用式(28)计算不同含盐量盐渍土土-水特征曲线步骤如下:

①试验得到不含盐兰州黄土的土-水特征曲线,采用VG模型对实测土-水特征曲线进行拟合,得到兰州黄土  $1 \sim 10^3$  kPa 吸力段的土-水特征曲线;

②将兰州黄土的土-水特征曲线分为1000份,每1 kPa 基质吸力为一级( $s_0^i = i$  kPa,  $i=1, 2, 3, \dots, 1000$ ),通过兰州黄土的土-水特征曲线确定每级吸力  $s_0^i$  对应的质量含水率  $\theta_i$ ;

③采用式(30)和兰州黄土的土-水特征曲线计算得到每级吸力  $s_0^i$  对应的开尔文半径  $r_i^k$ ,采用式(37)和兰州黄土的土-水特征曲线计算得到每级吸力  $s_0^i$  对应的吸附水膜厚度  $h_i$ ,采用式(36)、(38)和兰州黄土的土-水特征曲线计算得到每级吸力  $s_0^i$  对应的比表面积  $S_s^i$ ;

④通过与步骤①相同的试验方法测得兰州黄土、0.5%、1%、2% 含盐量盐渍土在质量含水率为20%、12% 对应的基质吸力值,再通过式(31)、(39)拟合得到参数  $c$ 、 $d$ 、 $e$ ;

⑤将参数  $c$ 、 $d$ 、 $e$  代入到式(28)中,得到不同含盐量硫酸钠盐渍土基质吸力的关系式(40)。

使用式(40)计算得到不同含盐量盐渍土的土-水特征曲线见图 14。由表 6、图 14 可以看出,式(28)可以很好地描述孔隙盐溶液浓度未达到饱和浓度的不同含盐量土的基质吸力与含盐量的关系,计算得到的结果与实测数据的均方差(RMSE)较小,决定系数( $R^2$ )接近于 1。在得到不含盐土的土-水特征曲线的基础上,仅需要两组试验(不同含盐量土在两个不同质量含水率下对应的基质吸力)便可以通过半经验方程计算得到孔隙盐溶液浓度未达到饱和浓度的不同含盐量土的基质吸力土-水特征曲线。

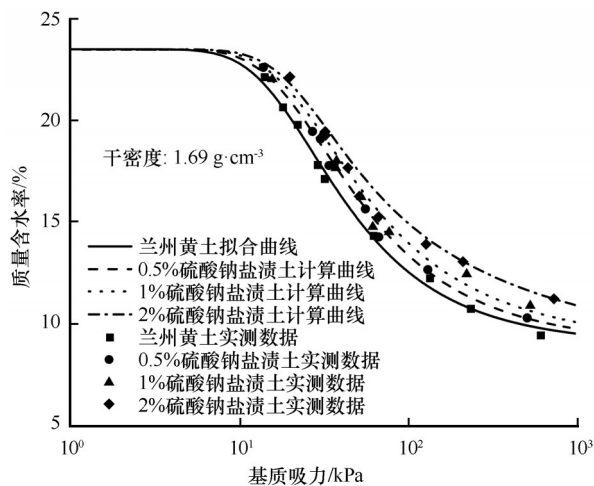


图 14 计算曲线与实测数据对比

Fig. 14 Comparison between calculated curve and measured data

表 6 计算参数及误差

拟合参数			RMSE			$R^2$		
$c$	$d$	$e$	0.5%	1%	2%	0.5%	1%	2%
0.8628	64.11	4.086	0.2860	0.5410	0.5996	0.99	0.95	0.99

6 结论

本文采用滤纸法对不同含盐量硫酸钠盐渍土的基质吸力土-水特征曲线进行研究,利用VG模型对试验结果进行拟合,对不同含盐量盐渍土的VG模型拟合参数进行对比,联系增量Yang-Laplace方程及表面物理化学理论,考虑盐渍土中盐分对孔隙溶液表面张力、密度以及液-固接触角的影响,提出了描述不同含盐量盐渍土间基质吸力关系的半经验公式并进行验证,得到以下结论:

(1)硫酸钠盐分的存在及含量大小对兰州黄土的基质吸力有较大的影响,相同含水率下硫酸钠盐

渍土的含盐量越高,基质吸力越大。

(2)VG模型对滤纸法测得的黄土状硫酸钠盐渍土基质吸力土-水特征曲线拟合结果较好,不同含盐量的情况下得到的VG模型拟合参数也不相同。

(3)考虑盐渍土中盐分对孔隙溶液表面张力、密度以及液-固接触角的影响,通过理论推导和对少量实测数据的分析,得出了描述不同含盐量盐渍土间基质吸力关系的半经验公式,经验证该公式可以很好地描述这一关系,计算结果与实测结果吻合度较高。

(4)滤纸法在盐渍土土-水特征曲线试验中的应用还有待继续深入地研究,另外本文中提出的盐渍土含盐量与基质吸力关系的半经验公式需要更多的试验数据来验证。

参考文献(References):

[1] Wang Zunqin. Saline soil in China[M]. Beijing: Science Press, 1993: 1-6. [王遵亲. 中国盐渍土[M]. 北京: 科学出版社, 1993: 1-6.]

[2] Lü Xiaoli, Shao Jingli, Liu Jingtao, et al. Distribution characteristics and origin of total dissolved solids in groundwater under Lanzhou city[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2013, 27(7): 23-27. [吕晓立, 邵景力, 刘景涛, 等. 兰州市区地下水矿化度分布特征及成因分析[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(7): 23-27.]

[3] Ma Baoqiang, Zhang Lingpeng, Fan Bin, et al. Analysis of geochemical characteristics of geothermal water in Lanzhou city [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2019, 33(9): 125-132. [马宝强, 张凌鹏, 范斌, 等. 兰州市区地热水地球化学特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(9): 125-132.]

[4] Bing Hui, Wu Junjie, Deng Jin. Variations of physical and mechanical properties of saline loess before and after desalting[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(4): 796-800. [邴慧, 武俊杰, 邓津. 黄土状盐渍土洗盐前后物理力学性质的变化[J]. 冰川冻土, 2011, 33(4): 796-800.]

[5] Fredlund D G, Rahardjo H. Soil mechanics for unsaturated soil [M]. New York: Wiley, 1993: 1-123.

[6] Lu N, Likos W J. Unsaturated soil mechanics [M]. New York: Wiley, 2004: 3-169.

[7] Sun De'an, Zhang Jinyi, Song Guoseng. Experimental study of soil-water characteristic curve of chlorine saline soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(4): 955-960. [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.]

[8] Zhang Yue, Ye Weimin, Wang Qiong, et al. Suction measurement and SWRC modelling for reconstituted salt-laden soils in earthen heritages [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(9): 1661-1669. [张悦, 叶为民, 王琼, 等. 含盐遗址重塑土的吸力测定及土水特征曲线拟合[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(9): 1661-1669.]

[9] Ma Tiantian, Wei Changfu, Chen Pan, et al. An experimental study of effect of NaCl solution on soil water characteristics [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(10): 2831-2836.

- [马田田, 韦昌富, 陈盼, 等. NaCl溶液对土体持水特性影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(10): 2831-2836.]
- [10] Wang Lili, Dang Jinqian, Yang Xiaosong, et al. The research of soil-water characteristic curves of saline soil[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2009, 37(2): 19-23. [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.]
- [11] He Y, Chen Y, Ye W, et al. Influence of salt concentration on volume shrinkage water retention characteristics of compacted GMZ bentonite[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(6): 535.
- [12] Ravi K, Rao S M. Influence of infiltration of sodium chloride solutions on SWCC of compacted bentonite-sand specimens[J]. Geotechnical & Geological Engineering, 2013, 31: 1291-1303.
- [13] Fattah M Y, Yahya A Y, Alhadidi M T, et al. Effect of salt content on total and matric suction of unsaturated soils[J]. European Scientific Journal, 2013, 9(9): 228-245.
- [14] Zhang Hong, Liu Haiyang. Experimental study and model correction of soil-water characteristic curve of aeolian sand subgrade containing sodium sulfate[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(9): 85-93. [张宏, 刘海洋. 含硫酸钠风积沙路基土土-水特征曲线试验研究与模型修正[J]. 中国公路学报, 2020, 33(9): 85-93.]
- [15] Guo Quan'en, Wang Yiquan, Che Zongxian, et al. Effect of temperature and degree of mineralization on the water-retention properties of soil[J]. Journal of Irrigation Drainage, 2012, 31(6): 52-55. [郭全恩, 王益权, 车宗贤, 等. 温度及矿化度对土壤持水性能的影响[J]. 灌溉排水学报, 2012, 31(6): 52-55.]
- [16] Guo Quan'en, Wang Yiquan, Nan Lili, et al. Effect of solute type and salinity on soil-water retention curve[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2014, 45(2): 340-344. [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.]
- [17] Leong E C, He L, Rahardjo H, et al. Factors affecting the filter paper method for total and matric suction measurements[J]. Geotechnical Testing Journal, 2002, 25(3): 321-332.
- [18] Bulut R, Wray W K. Free energy of water suction in filter papers[J]. Geotechnical Testing Journal, 2005, 28(4): 355-364.
- [19] Gardner R. A method of measuring the capillary tension of soil moisture over a wide moisture range[J]. Soil Science, 1937, 43(4): 277-283.
- [20] Wang Zhao, Yang Jinxin, Kuang Juanjuan, et al. Application of filter paper method in field measurement of matric suction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(4): 405-408. [王钊, 杨金鑫, 况娟娟, 等. 滤纸法在现场基质吸力量测中的应用[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(4): 405-408.]
- [21] Liu Keding, Lin Liping. Calibration curve of matric suction measurement with filter paper[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2017, 37(5): 35-39. [刘可定, 林丽萍. 滤纸基质吸力率定曲线的率定方法[J]. 矿冶工程, 2017, 37(5): 35-39.]
- [22] Bai Fuqing, Liu Sihong, Yuan Jiao. Calibration test for total suction wetting curve of filter paper[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(8): 2336-2340. [白福青, 刘斯宏, 袁骄. 滤纸总吸力吸湿曲线的率定试验[J]. 岩土力学, 2011, 32(8): 2336-2340.]
- [23] Zhu Zancheng, Sun De'an, Tian Jin. Calibration curves of two filter papers at high suction and temperature and their application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(6): 1020-1027. [朱赞成, 孙德安, 田进. 高吸力高温下2种滤纸率定曲线及其应用[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(6): 1020-1027.]
- [24] Zhang Hua, Zhang Feng, Yuan Mi, et al. Study of temperature effect on domestic quantitative filter paper's calibration curves[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(Suppl 1): 274-280. [张华, 张沅, 袁密, 等. 温度对国产滤纸率定曲线的影响研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(增刊1): 274-280.]
- [25] Tang Dong, Li Dianqing, Kim Hobi, et al. Research on calibration curves of home-made "Double Circle" filter papers[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2016, 49(1): 1-8. [唐栋, 李典庆, 金浩飞, 等. 国产"双圈"牌滤纸吸力率定曲线研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2016, 49(1): 1-8.]
- [26] Wang Zhao, Gong Biwei, Bao Chenggang. Measurement of matric suction of expansive soil slope in Northern Hubei[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(1): 64-67. [王钊, 龚璧卫, 包承纲. 鄂北膨胀土坡基质吸力的量测[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(1): 64-67.]
- [27] Chen Dongxia, Gong Xiaonan. Experiment and modeling of soil-water characteristic curve of unsaturated residual soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(7): 1885-1891. [陈东霞, 龚晓南. 非饱和残积土的土-水特征曲线试验及模拟[J]. 岩土力学, 2014, 35(7): 1885-1891.]
- [28] Tang Dongqi, Peng Jianbing, Sun Weiqing. Matric suction test based on the filter paper method for unsaturated loess[J]. Coal Geology & Exploration, 2012, 40(5): 37-41. [唐东旗, 彭建兵, 孙伟青. 非饱和黄土基质吸力的滤纸法测试[J]. 煤田地质与勘探, 2012, 40(5): 37-41.]
- [29] Xin Baoquan, Duan Zhengxiao, Wan Lu. Experimental study on matric suction of tailings sand by filter paper method[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2020, 37(7): 125-129. [辛保泉, 段正肖, 万露. 滤纸法测定尾矿砂基质吸力试验研究[J]. 长江科学院院报, 2020, 37(7): 125-129.]
- [30] Liu Huan, Zhu Menglong, Jiang Rui, et al. Research on soil-Water characteristics of silty sand of lacustrine plateau[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2020, 18(4): 305-312. [刘欢, 朱孟龙, 蒋锐, 等. 高原湖相沉积粉砂土土水特性[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2020, 18(4): 305-312.]
- [31] Thyagaraj T, Salini U. Effect of pore fluid osmotic suction on matric and total suctions of compacted clay[J]. Geotechnique, 2015, 65(11): 952-960.
- [32] Chen Chuanxuan. Surface physical chemistry[M]. Beijing: Scientific and Technical Documentation Press, 1995: 1-388. [程传煊. 表面物理化学[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1995: 1-388.]
- [33] Philip J R. Unitary approach to capillary condensation and adsorption[J]. The Journal of Chemical Physics, 1977, 66(11): 5069-5075.
- [34] McQueen I S, Miller R F. Approximating soil moisture characteristics from limited data: empirical evidence and tentative model[J]. Water Resources Research, 1974, 10(3): 521-527.
- [35] Tuller M, Miller D O. Water films and scaling of soil characteristic curves at low water contents[J]. Water Resources Research, 2005, 41(9): 1-6.
- [36] Iwamatsu M, Horii K. Capillary condensation and adhesion of two wetter surfaces[J]. Journal of Colloid & Interface Science, 1996, 182(2): 400-406.
- [37] Standard test method for measurement of soil potential (suc-

- tion) using filter paper: ASTM D5298-16 [S]. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2016.
- [38] 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(5): 892-898.
- [39] Wang Xiaohua, Jia Keli, Liu Jinghui, et al. Application of Van Genuchten model to analysis of soil moisture characteristic curve[J]. Agricultural Research in Arid Areas, 2009, 27(2): 179-183. [王小华, 贾克力, 刘景辉, 等. Van Genuchten模型在土壤水分特征曲线拟合分析中的应用[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(2): 179-183.]
- [40] Lai Jianbin, Wang Quanjiu. Comparison of soil-water retention curve model [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2003, 17(1): 137-140. [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.]
- [41] Zhao Tianyu, Wang Jinfang. Soil-water characteristic curve for unsaturated loess soil considering density and wetting-drying cycle effects [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2012, 43(6): 2445-2453. [赵天宇, 王锦芳. 考虑密度与干湿循环影响的黄土土水特征曲线[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(6): 2445-2453.]
- [42] Yao Hailin. Some considerations about the concept of matric suction and questions related to matric suction [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(1): 67-70. [姚海林. 关于基质吸力及几个相关问题的一些思考[J]. 岩土力学, 2005, 26(1): 67-70.]
- [43] Wang Kang. Water flow and solute transport in unsaturated soils[M]. Beijing: Science Press, 2010: 67-84. [王康. 非饱和土壤水流运动及溶质迁移[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 67-84.]
- [44] Baker R, Frydman S. Unsaturated soil mechanics critical review of physical foundations [J]. Engineering Geology, 2009, 106(1/2): 26-39.
- [45] Liu Guangqi. Chemical and chemical properties data book [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2002: 405-433. [刘光启. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002: 405-433.]



## Experimental and theoretical study on soil-water characteristic curve of sodium sulfate saline soil

JIANG Hao<sup>1,2</sup>, BING Hui<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Soil-water characteristic curve (SWCC) is a curve describing the relationship between soil matric suction and water content, which is the core of unsaturated soil mechanics research. Matric suction is an important stress state variable of unsaturated soil, which controls the balance between soil structure and shrinkage membrane, and is an important factor affecting mechanical properties of unsaturated soil. Loess containing sodium sulfate is widely distributed in Northwest China, and has been widely used in engineering practice. The relationship between the matric suction of loess and the content of sodium sulfate is studied by experimental test and theoretical analysis, and the law of the matric suction of loess like sodium sulfate saline soil affected by sodium sulfate is obtained. Taking the typical sodium sulfate contained in loess in Northwest China as the variable factor, the matric suction of Lanzhou loess and sodium sulfate saline soil with different salt content was measured by filter paper method, and the soil water-characteristic curve was drawn. The results show that the existence and content of sodium sulfate have a great influence on the matric suction of loess, and the higher the salt content of sodium sulfate saline soil is, the greater the matric suction is. The influence of sodium sulfate on the matric suction of loess is different under different water content: when the water content is high, the influence of sodium sulfate on the matric suction of loess is small; when the water content is low, the influence of sodium sulfate on the matric suction of loess is great. Based on unsaturated soil mechanics theory and surface physicochemical theory, assuming that the salt solution in soil does not affect the pore structure of soil, considering the influence of salt solution in soil on the capillary part and adsorption part of matric suction, a semi empirical formula is obtained, which can be used to calculate the relationship between salt content in soil and matric suction. The Kelvin radius and the thickness of adsorbed water film corresponding to each suction in the formula are calculated by the method introduced in unsaturated soil mechanics. The measured data are used to fit the three parameters in the formula. The matric suction corresponding to each water content of sodium sulfate saline soil with different salt content is calculated by the semi empirical formula, and the soil-water characteristic curve is drawn. The results show that the calculated curve is in good agreement with the experimental curve, which shows that the formula can well describe the relationship between different salt content and matric suction in saline soil. In this paper, the law of the influence of sodium sulfate content on the matric suction of loess is obtained through experiments, and the law is expressed quantitatively by theoretical derivation and semi empirical formula, which provides certain theoretical basis and data support for the future engineering practice in this area. The semi empirical formula obtained in this paper can also be applied to the calculation of soil-water characteristic curve of other saline soils, but it should be noted that the formula will not be applicable when the concentration of salt solution in soil reaches the saturation concentration.

**Key words:** soil-water characteristic curve; filter paper method; sodium sulfate saline soil; matric suction; salt content

(责任编辑: 李国玉; 编辑: 武俊杰)