

DOI: 10.11779/CJGE2018S1034

易溶盐含量对伊犁黄土持水特性的影响研究

王毓国, 张爱军*, 赵庆玉, 于春亮

(西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 新疆伊犁河谷地区黄土与黄土高原黄土有较大的区别, 主要表现为成因不同、湿陷性异常强烈、易溶盐含量高。对伊犁黄土工程性质的研究, 是黄土力学发展和“一带一路”建设的需要。用离心机法开展了不同易溶盐含量下伊犁黄土的持水特性试验, 对比了伊犁黄土和黄土高原黄土持水特性的差异, 并对土水特征曲线进行了拟合分析, 在 Gardner 模型的基础上提出了考虑易溶盐含量的土水特征曲线模型。研究表明: 易溶盐含量对基质吸力有一定的影响; 基质吸力的变化主要发生在边界效应区和过渡区; 相较于同密度的黄土高原黄土, 伊犁黄土在高饱和段持水能力增强, 随着饱和度的减少, 二者土水特征曲线趋于一致。

关键词: 伊犁黄土; 易溶盐含量; 土水特征曲线; 拟合模型; 基质吸力

中图分类号: TU444

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2018)S1-0212-06

作者简介: 王毓国(1993-), 男, 硕士研究生, 主要从事非饱和黄土试验研究工作。E-mail: eaglew@nwsuaf.edu.cn。

Effect of soluble salt content on water-holding characteristics of Ili loess

WANG Yu-guo, ZHANG Ai-jun, ZHAO Qing-yu, YU Chun-liang

(College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: The loess in Ili valley region of Xinjiang have great differences from that in Loess Plateau, mainly characterized by different causes, strong collapsibility and high soluble salt content. The researches on the engineering properties of Ili loess are the need for the development of loess mechanics and the building of Belt and Road. The water-holding characteristics of Ili loess under different soluble salt contents are studied by centrifuge modeling. The water-holding characteristics of Ili loess and Loess Plateau are compared, and the soil water characteristic curves are fitted and analyzed. Based on the Gardner model, a soil water characteristic curve model with soluble salt content is proposed. The results indicate that the content of soluble salt has a certain influence on the matrix suction. The change of matrix suction mainly occurs in the boundary effect zone and transition zone. Compared with Loess Plateau loess with the same density, Ili loess has strong water-holding capacity under high saturation, and with the decrease of saturation, the soil water characteristic curve tends to be consistent.

Key words: Ili loess; soluble salt content; soil water characteristic curve; fitting model; matrix suction

0 引言

中国黄土可以分为两类: 一类是受季风影响的季风区黄土, 典型代表为黄土高原黄土; 另一类是受大西洋气候影响的西风区黄土, 即伊犁黄土。伊犁黄土与黄土高原黄土存在着较大的差异。主要表现为: 成因不同、湿陷性异常强烈、易溶盐含量高。现场大型浸水试验表明, 很多地段的黄土属于自重湿陷性 IV 场地。测得易溶盐含量最大为 19.2 g/kg^[1]。

以往对黄土高原黄土的研究较多, 而对伊犁黄土的试验研究相对较少。如: 侯晓坤等^[2]测量了甘肃 Q₃ 黄土的土水特征曲线, 进行了曲线拟合, 并根据土样分布曲线建立了本构关系; 陈存礼等^[3]探究了侧限压缩条件下的西安原状黄土的土水特征曲线, 提出不同应力作用下可以用幂函数来描述其土水特征曲线; 郭鸿

等^[4]测量了宝鸡、岐山、杨凌三地原状黄土的土水特征曲线, 进行了拟合, 并提出拟合公式。同时, 对于黄土与盐渍土的耦合作用研究更少。王利莉等^[5]测量了, 在洛阳黄土中加入 NaCl 溶液, 配成盐渍土的土水特征曲线, 得出易溶盐含量对盐渍土的基质吸力有一定影响; 于沉香等^[6]测量了甘肃盐渍土的土水特征曲线, 提出盐渍土的持水能力有所提高, 并进行了曲线的拟合。

这些研究仅考虑了黄土高原黄土、或仅考虑了单一易溶盐含量的变化, 且变化范围较小。因此, 迫切

基金项目: 国家自然科学基金项目(51279171); 陕西省水利科技项目(201310)

收稿日期: 2017-06-11

*通讯作者(E-mail: zaj@nwsuaf.edu.cn)

需要进一步开展研究, 来探究易溶盐含量对伊犁黄土土水特征曲线的影响规律。本文用离心机法开展了不同易溶盐含量下伊犁黄土的持水特性试验, 并进行了相关拟合分析。

1 试验土样

试验采用原状黄土土样进行, 土样取自新疆河谷昭苏。取土深度为 16.5~17 m。土样初始含水率为 5.53%, 干密度为 1.41 g/cm³。土样初始易溶盐含量见下表 1。

表 1 土样易溶盐含量

Table 1 Soluble salt contents of soil samples	
土样	易溶盐含量/(g·kg ⁻¹)
K ⁺	0
Na ⁺	0.9532
Ca ²⁺	0.0246
Mg ²⁺	0.0287
Cl ⁻	0.1663
SO ₄ ²⁻	0.9285
HCO ₃ ⁻	2.8419
CO ₃ ²⁻	0.2795
总量	4.9361

伊犁黄土易溶盐含量最大为 19.2 g/kg^[1]。因此, 确定试验土样易溶盐含量分别为: 5, 8, 14, 20, 26 g/kg。

利用环刀直接在土体上削取原状土样。依据表 1 中所测得的不同易溶盐离子含量, 配制盐溶液。计算每增加 3 g/kg 总含盐, 所需要加入的溶液质量, 并通过水膜转移法, 用胶头滴管滴加到土样上下表面。每次加完盐溶液后, 自然风干一昼夜, 再进行滴加, 以防止土样中水分过多, 使土样产生过大的膨胀变形。多次加盐, 直至达到所要求的易溶盐含量为止。配制含水, 确保土体中的易溶盐为溶解状态。用保鲜膜包裹土样, 在保湿缸中放置 3 d 以上, 使土样内盐分、水分分布均匀。

2 试验方法

试验采用离心机法测量土水特征曲线, 离心机采用 HITACHI 日立公司生产的 CR21G 二代高速恒温离心机。离心机法的主要原理就是将离心力等效为土体中的吸力。离心机法有着直接、精度高和快速的优点。通过离心机高速转动将土样中的水分逐次排出, 分级测定水分排出过程中所需要的离心加速度和土样的含水率, 通过离心加速度换算土样的吸力值, 从而得到吸力和含水率之间的关系。离心机法所测得的吸力为

基质吸力, 土水特征曲线为减湿曲线。

在重力场中 H 高度的水体受重力加速度 g 的作用; 离心机法中转动加速度 $r\omega^2$ 就是土样的吸力大小。计算公式如下所示:

$$\rho g H = \rho h \left(r - \frac{h}{2} \right) \omega^2 \quad (1)$$

式中 H 为对应土样吸力的水柱高 (cm); r 为离心机半径 (cm), 其值为 4.4 cm; h 为土样高 (cm), 其值为 5.0 cm; ρ 为水的密度; g 为重力加速度等于 980 cm/s²; n 为转速 (转数/min)。

将 H 转化为吸力值, 即将水柱高转化为水压力值, 进而可以计算出吸力和转速的对应关系。本仪器转速和吸力对应表格如下表 2 所示:

表 2 离心机转速与吸力关系表

Table 2 Relationship between centrifuge speed and suction			
吸力		转速	平衡时间
bar	kPa	n/min	/min
0.01	1	310	10
0.1	10	980	26
0.2	20	1387	36
0.4	40	1961	45
0.6	60	2402	51
0.8	80	2774	55
1	100	3101	58
2	200	4385	68
4	400	6202	77
6	600	7596	83
8	800	8771	87
10	1000	9806	90

具体试验步骤如下:

- (1) 将土样浸水饱和 8 h 以上;
- (2) 土样环刀放入转头里, 然后调平质量, 使对称的土样重量差不能大于 0.5 g;
- (3) 放土样时, 应使贮水器靠近转子圆周的外边缘, 土样试管透气孔必须朝上;
- (4) 拧紧转子上的盖子, 确定拧紧后方可开机;
- (5) 关好机壳门, 按要求设置所需的转速和时间, 核对无误后可按 START 键启动;
- (6) 离心结束后, 擦干贮水器离心出来的水, 称量土样与离心管重, 计算土样含水率, 再调平进行下一级转速;
- (7) 最后一级离心结束后将土样烘干, 称量干土重, 做出土水特征曲线。

3 离心机法试验结果

图 1 为离心机试验得到的不同易溶盐含量下伊犁

黄土的土水特征曲线。

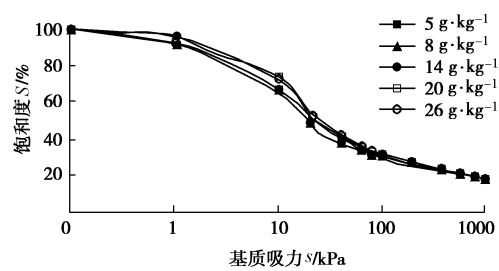


图 1 不同易溶盐含量土水特征曲线
Fig. 1 Characteristics of soils with different soluble salts

从图中可以看出，随着易溶盐含量的增加，土样的持水能力有所增加。5 g/kg 与 26 g/kg 易溶盐含量的土水特征曲线形成了一组边界，5~26 g/kg 之间易溶盐含量的土水特征曲线均在其范围内进行变化。土水特征曲线随易溶盐含量的变化主要发生在高饱和、低吸力部分，即残余效应区和过渡区，在这一段内，基质吸力随易溶盐含量的增大而增大。在低饱和、高吸力部分，即残余区，土水特征曲线趋于统一。

4 曲线拟合、参数分析及模型推导

4.1 土水特征曲线拟合

现用范围较广的拟合模型有：Fredlund & Xing 模型、Gardner 模型、Van Genuchten 模型。通过 spss 软件对试验结果进行了拟合分析。

(1) Fredlund & Xing 模型

$$S = \frac{S_s}{\left\{ \ln \left[\exp(1) + \left(\frac{s}{a} \right)^n \right] \right\}^m} + S_r \quad (2)$$

式中 S 为饱和度； S_r 为残余饱和度； S_s 为饱和饱和度； s 为吸力； a 、 n 、 m 为拟合参数；其中 a 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^[7]。拟合结果如表 3 所示。

表 3 Fredlund & Xing 模型拟合参数

Table 3 Fitting parameters of Fredlund & Xing model						
易溶盐含量/(g·kg ⁻¹)	S_s	S_r	a	n	m	R^2
5	0.799	0.203	25.927	0.801	4.049	0.997
8	0.798	0.202	25.964	0.792	3.669	0.999
14	0.794	0.207	25.979	0.989	3.476	0.999
20	0.791	0.200	25.994	0.938	3.326	0.995
26	0.791	0.197	26.012	0.924	3.141	0.997

(2) Gardner 模型

$$S = S_r + \frac{S_s - S_r}{1 + \left(\frac{s}{a} \right)^n} \quad (3)$$

式中， a 、 n 为拟合参数。拟合结果如表 4 所示。

(3) Van Genuchten 模型

$$S = S_r + \frac{S_s - S_r}{\left[1 + \left(\frac{s}{a} \right)^n \right]^m} \quad (4)$$

式中， a 、 n 、 m 为拟合参数，其中 $m=1-1/n$ 。拟合结果如表 5 所示。

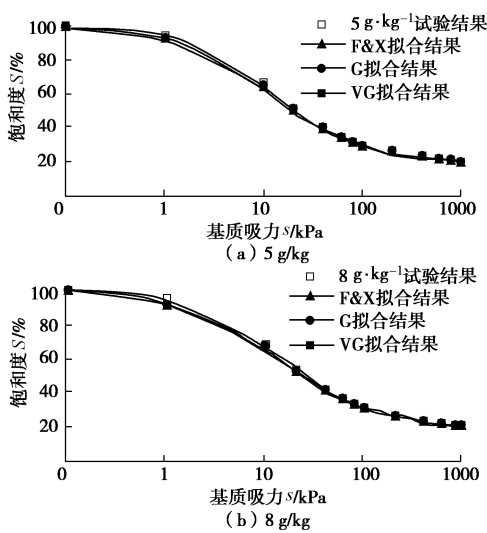
表 4 Gardner 模型拟合参数

Table 4 Fitting parameters of Gardner model					
易溶盐含量/(g·kg ⁻¹)	S_s	S_r	a	n	R^2
5	0.995	0.197	12.672	0.961	0.9979
8	0.995	0.197	14.552	0.921	0.9988
14	0.996	0.207	17.259	1.148	0.9990
20	0.986	0.201	17.942	1.083	0.9957
26	0.984	0.200	19.229	1.044	0.9970

表 5 Van Genuchten 模型拟合参数

Table 5 Fitting parameters of Van Genuchten model						
易溶盐含量/(g·kg ⁻¹)	S_s	S_r	a	n	m	R^2
5	0.973	0.175	5.241	1.634	0.388	0.998
8	0.973	0.167	5.381	1.574	0.365	0.999
14	0.985	0.188	8.149	1.762	0.432	0.999
20	0.971	0.183	8.234	1.727	0.421	0.997
26	0.968	0.177	8.301	1.680	0.405	0.997

用 3 种模型拟合不同易溶盐含量的试验数据如图 2 所示。



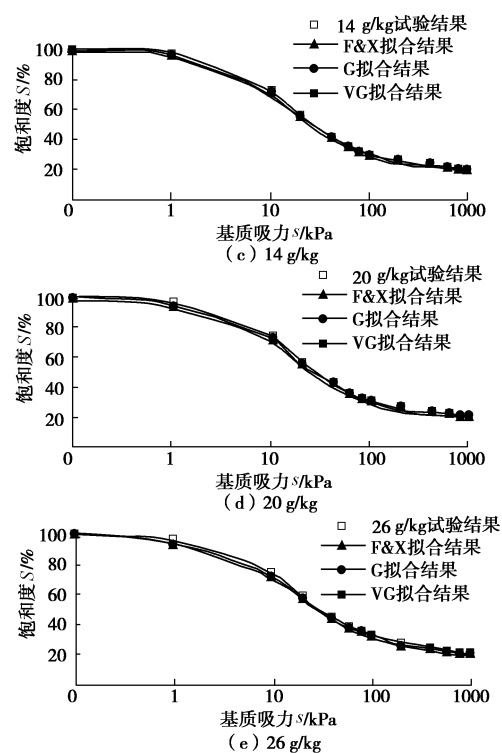


图 2 3 种不同模型的拟合结果

Fig. 2 Fitting results of three different models

3 种模型都可以较好的拟合不同易溶盐含量下伊犁黄土的土水特征曲线, R^2 都达到了 99% 以上。但是, 从图形上来看, Van Genuchten 模型对于低吸力时土水特征曲线的拟合效果较差, 同一吸力下, 饱和度偏高; 从 S_r , S_s 拟合参数来看, Fredlund & Xing 模型拟合结果与参数的物理意义不相符。综上所述, 对于新疆伊犁黄土土水特征曲线拟合效果较好的模型是 Gardner 模型。

4.2 参数分析

利用曾相滨^[8]提出的方法, 求取 Gardner 模型拟合土水特征曲线的相关参数。

如图 3 所示, 将土水特征曲线分成 3 段, 分别为边界效应区、过渡区、残余区。边界效应区与残余区曲线趋近于直线, 故在两段分别取一点, 求取这一点处曲线的斜率, 可以得到边界效应区、残余区曲线的切线; 土水特征曲线拐点处为二阶导数为 0 处, 求得这一点再求取这一点处曲线的斜率, 可以得到过渡区的趋势线; 求得 3 条直线后, 边界效应区切线与过渡区趋势线交点对应的吸力为进气值 s_a , 残余区切线与过渡区趋势线交点对应的饱和度为残余饱和度 S_r 。

进气值 s_a 是空气入侵土的孔隙能够使孔隙中的重力水开始排出时所对应的吸力^[7]; 残余饱和度 S_r 是土体内结合水与毛细水相互转换的分界, 当饱和度大于 S_r 时, 土体内以结合水为主。

利用上述方法, 求得不同易溶盐含量下, 用

Gardner 模型拟合的土水特征曲线进气值 s_a 、残余饱和度 S_r 如下表 6 所示。

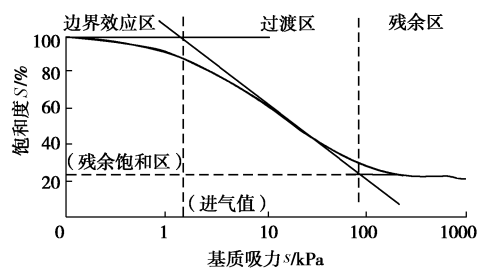


图 3 土水特征曲线相关参数

Fig. 3 Related parameters of soil water characteristic curve

表 6 Gardner 模型拟合曲线参数

Table 6 Fitting curve parameters of Gardner model

易溶盐含量/(g·kg ⁻¹)	s_a /kPa	S_r /%
5	1.541	25.56
8	1.614	25.82
14	2.970	25.25
20	2.650	25.60
26	2.618	26.39

从参数 s_a 来看, 进气值随着易溶盐含量的增大而增大, 14, 20, 26 g/kg 的土样进气值都达到了 2.5 kPa 以上, 较 5 g/kg 土样的进气值增大了 1 kPa, 这说明随着易溶盐含量的增加, 空气进入土体排出水分需要更大的吸力, 表明土体中的溶液更难排出。

从参数 S_r 来看, 残余饱和度随易溶盐含量的变化改变不大。残余饱和度在 25.70% 上下变化。这表明随着饱和度的降低, 土水特征曲线趋于一致, 土体内剩余的结合水的量基本一致。易溶盐含量对残余区影响较小。

综上所述, 伊犁黄土土水特征曲线随易溶盐含量的变化主要存在于边界效应区与过渡区。在高饱和段, 随着易溶盐含量的增大, 伊犁黄土的持水性能有所增大, 主要表现为进气值增大, 进气值从 1.5 kPa 增大到 2.5 kPa 以上。随着土样饱和度的减小, 土水特征曲线趋于统一, 在残余饱和度之后, 不同易溶盐含量的土水特征曲线基本一致, 不同易溶盐含量下的残余饱和度均在 25.70% 上下。

从土体的微观结构进行分析。易溶盐的溶解使得土体液相中的离子浓度增大, 土体颗粒可以吸附更多的阳离子, 形成更厚的双电层结构, 从而对水分产生更大的吸力, 使得土体的持水能力增强, 进气值增大。而随着离心次数的增加, 土体剩余水分减少, 从而导致可吸附的离子数减少, 双电层厚度趋于一致, 土水特征曲线趋于统一, 残余饱和度基本相同。

4.3 考虑含盐量的伊犁黄土持水特性模型

如前所述, Gardner 模型可以较好的拟合不同含盐下伊犁黄土的土水特征曲线, 但是含盐量不同, 模型参数不同。分析表 6 中的 Gardner 模型参数发现: S_r , S_s , n 值变化不大, 参数 a 随易溶盐含量的变化较大, 且与含盐量呈线性关系 (见图 4)。对不同含盐量的 S_r , S_s , n 值取平均值, 即: $S_s = 0.991$, $S_r = 0.2004$, $n = 1.031$, 并将参数 a 与易溶盐含量的线性变化关系代入 Gardner 模型中, 进行归一化处理, 可得考虑含盐量的伊犁黄土土水特征曲线模型公式如下:

$$S = S_r + \frac{S_s - S_r}{1 + \left(\frac{s}{c\theta + d} \right)^n}, \quad (5)$$

式中, θ 为含盐量 (g/kg); $c = 0.298$, $d = 11.976$ 。

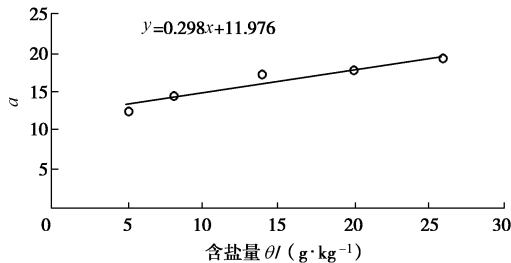


图 4 Gardner 模型参数 a 与含盐量的关系曲线

Fig. 4 Relationship between parameter a of Gardner model and salt content

公式 (5) 可以较好的拟合不同易溶盐含量下的伊犁黄土土水特征曲线, 可以实现用一套参数反映不同含盐量下伊犁黄土土水特征曲线的目的。拟合结果如图 5 所示。

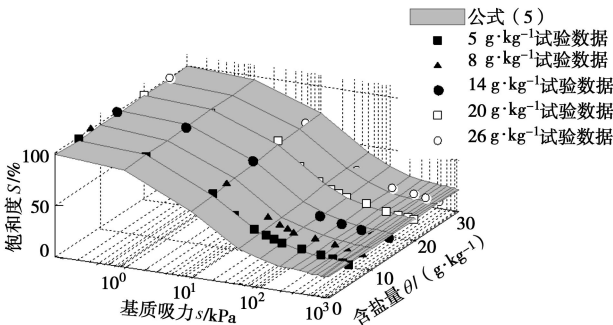
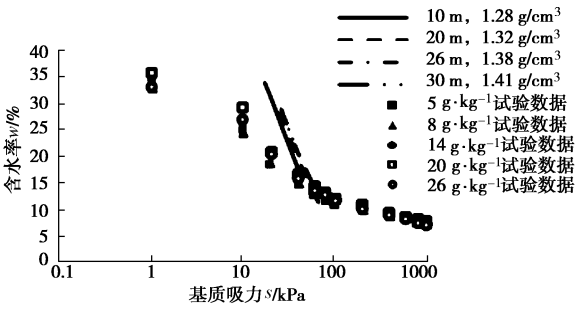


图 5 不同易溶盐含量下公式 (5) 的拟合结果

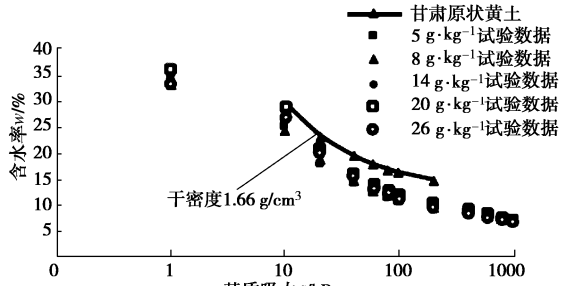
Fig. 5 Fitting results of Formula 5 under different soluble salt contents

5 与黄土高原黄土的对比

将本次试验结果与已知黄土高原黄土试验数据进行对比, 如图 6 所示。



(a) 不同深度甘肃Q3原状黄土



(b) 甘肃原状黄土^[9]

图 6 伊犁黄土试验结果与黄土高原黄土对比

Fig. 6 Comparison of test results between Ili loess and loess of loess Plateau

在相同干密度下, 伊犁黄土在边界效应区和过渡区, 含水率更低, 持水能力更强; 随着吸力的增大, 在残余区, 同密度两种不同黄土的土水特征曲线趋于一致。在低吸力部分, 伊犁黄土土水特征曲线更接近于干密度为 1.66 g/cm^3 的甘肃黄土, 随着吸力的增大, 高密度的甘肃黄土含水率更大, 持水性能更好。

在边界效应区和过渡区, 同密度下, 新疆伊犁黄土, 由于易溶盐的存在有着更好的持水能力; 随着饱和度和度的下降, 两种不同黄土的土水特征曲线趋于一致。

6 讨 论

伊犁黄土与黄土高原黄土的重要区别在于可溶盐含量较高, 甚至超过了盐渍土的含盐量标准。大量可溶盐的存在必将对其力学特性有重要影响, 对其研究意义重大, 而目前这方面的研究极少^[2]。本文针对含盐量对伊犁黄土持水特征的影响展开试验研究工作, 揭示含盐量对基质吸力的影响规律, 是伊犁黄土研究的重要方面。

一般认为, 易溶盐含量主要影响的是土体的溶质浓度, 溶质浓度会引起土中水自由能溶质部分即渗透吸力的变化^[10], 而对基质吸力的影响不大。但是到底在高含盐量情况下黄土中的基质吸力是否会发生改变需要试验验证。本文的试验就是为了回答这个问题。从试验结果看, 含盐量对基质吸力有一定影响, 在边界效应区和过渡区土水特征曲线变化较大, 其原因是

高含量的可溶盐使得土颗粒与孔隙水之间的相互作用有所改变, 可溶盐在低含水时会结晶而改变土体的结构形态。试验结果也表明, 含盐量对黄土基质吸力的影响程度不大, 在初步计算中可不作为主要影响因素。

需要指出的是, 现行的基质吸力土水特征曲线试验方法中, 尤其是压力板仪和离心机法, 在减湿过程中孔隙水中的可溶盐含量基本保持恒定, 渗透吸力应该变化不大, 测得的基质吸力是在含盐量恒定情况下的值。而实际工程中浸入土体的水大部分是含盐量低的清水, 这时增减湿过程中渗透吸力将发生较大的变化, 基质吸力如何变化需要进一步研究。因此下一步我们将开展纯水增减湿情况下伊犁黄土基质吸力、渗透吸力和总吸力变化规律的研究工作。

7 结 论

(1) 含盐量对伊犁黄土的持水特征有一定的影响。随着易溶盐含量的增加, 土水特征曲线边界效应区和过渡区的基质吸力有增大的趋势, 进气值从 1.5 kPa 增加到 2.5 kPa 以上; 而在残余区, 不同易溶盐含量的土水特征曲线趋于一致, 残余饱和度均在 25.70% 上下。

(2) Gardner 模型可以较好的拟合不同含盐下伊犁黄土的土水特征曲线, 但是含盐量不同, 模型参数不同; 本文通过归一化处理, 提出了引入含盐量参量的统一拟合模型, 用一套参数可以反映含盐量不同的伊犁黄土的土水特征曲线, 更适合对伊犁黄土持水特征的描述。

(3) 相较于同密度黄土高原黄土, 伊犁黄土在高饱和段持水能力增强, 随着饱和度的减少, 二者土水特征曲线趋于一致。

参考文献:

- [1] 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): 177 - 122. (in Chinese))
- [2] 侯晓坤, 李同录, 谢 萧, 等. 甘肃 Q3 原状黄土的微观结构对其土-水特征曲线的影响[J]. 水力学报, 2016, **47**(10): 1307 - 1314. (HOU Xiao-kun, LI Tong-lu, XIE Xiao, et al. Effect of undisturbed Q3 loess's microstructure on its SWCC[J]. Chinese Journal of Hydraulic Engineering, 2016, **47**(10): 1307 - 1314. (in Chinese))
- [3] 陈存礼, 褚 峰, 李雷雷, 等. 侧限压缩条件下非饱和原状黄土的土水特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, **30**(3): 610 - 615. (CHEN Cun-li, CHU Feng, LI Lei-lei, et al. Soil-water characteristics of unsaturated undisturbed loess under confined compression condition[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, **30**(3): 610 - 615. (in Chinese))
- [4] 郭 鸿, 陈 茜, 陈栋梁, 等. 原状黄土土水特征曲线拟合方法研究[J]. 人民长江, 2016, **47**(19): 92 - 95. (GUO Hong, CHEN Xi, CHEN Dong-liang, et al. Study on soil-water characteristics curve fitting for undisturbed loess soil[J]. Yangtze River, 2016, **47**(19): 92 - 95. (in Chinese))
- [5] 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(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(2): 19 - 23. (in Chinese))
- [6] 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))
- [7] 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))
- [8] 曾相滨. 水土特征曲线参数的估算[J]. 天津建设科技, 2015, **25**(5): 13 - 16. (ZENG Xiang-bin. Estimation of parameters of soil and water characteristic curve[J]. Tianjin Construction Science and Technology, 2015, **25**(5): 13 - 16. (in Chinese))
- [9] 谷 琪, 王家鼎, 仝云莉, 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] D · G 弗雷德隆德, H · 拉哈尔佐. 非饱和土土力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997. (FREDLUND D G, RAHARDJO H. Soil mechanics for unsaturated soils[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1997. (in Chinese))

(本文责编 黄贤沙)