

# 压实黄土初始孔隙分布对持水性及 V-G 模型参数的影响

张维刚<sup>1</sup>, 江利平<sup>2</sup>, 崔熙灿<sup>3</sup>, 骆亚生<sup>3</sup>, 胡海军<sup>3</sup>

(1. 山东电力工程咨询院有限公司, 济南 250013; 2. 聊城市伯阳给水工程勘察设计所有限公司, 山东 聊城 252002; 3. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** [目的] 确定不同初始湿密状态下非饱和黄土的关键水力参数, 探究其 SWCC 变化规律及对 V-G 模型参数的影响规律, 为阐明初始孔隙结构调控持水性的机制提供新视角。[方法] 通过开展压力板试验和核磁共振(NMR)试验, 分析了不同初始湿密状态下黄土的 SWCC, 并研究了其对 V-G 模型参数的影响, 获取试样的孔隙水分布特征。[结果] (1) 边界效应区中, SWCC 的斜率随着  $K$  和  $w_0$  的增大而减缓; 过渡区中, 斜率随着  $K$  和  $w_0$  的降低, SWCC 曲线的下降速率越快, 试样的水分流失越快; 残余区中, SWCC 越来越接近, 残余值随着  $K$  和  $w_0$  的增加而增大。(2) 进气值参数  $\phi_0$  与  $K$  呈线性正相关关系,  $\phi_0$  与  $w_0$  呈指数型关系,  $\phi_0$  随着  $w_0$  的增大而增加; V-G 模型参数  $\alpha$  与  $K$  呈对数型函数关系,  $\alpha$  与  $w_0$  呈线性关系;  $K$  和  $w_0$  对参数  $m, n$  的影响不大; 并基于 V-G 模型, 修正了考虑饱和度—压实度耦合、饱和度—初始含水率耦合的 SWCC 模型。(3) 随着  $K$  的增加, 土体内部的孔隙结构由较多的架空孔隙转化为较均匀的中小孔隙, 水分在土体内部更难排出, 导致失水速率降低, 进气值增大, 持水能力更强。低  $w_0$  试样的  $T_2$  谱以单峰为主, 高  $w_0$  试样的  $T_2$  谱以双峰为主; 随着  $w_0$  的增加, 小孔隙数量增加, 孔隙间的连通性降低, 水分子运动受限, 更难排出, 试样进气值增加, 持水性增强。[结论] 不同初始状态黄土的微观孔隙结构差异(尺寸分布与孔隙连通性变化)是宏观持水性变化的关键。

**关键词:** 压实黄土; 土-水特征曲线测试; NMR 试验; VanGenuchten 模型; 孔隙水分布

中图分类号: TV93

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)03-0239-08

## Influence of initial pore distribution of compacted loess on water retention and V-G model parameters

Zhang Weigang<sup>1</sup>, Jiang Liping<sup>2</sup>, Cui Xican<sup>3</sup>, Luo Yasheng<sup>3</sup>, Hu Haijun<sup>3</sup>

(1. Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Co., Ltd., Jinan 250013, China; 2. Liaocheng Boyang Water Supply Engineering Investigation and Design Institute Co., Ltd., Liaocheng, Shandong 252002, China; 3. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** [Objective] This study aims to determine the key hydraulic parameters of unsaturated loess under different initial wet densities, investigate the variation patterns of its soil-water characteristic curve (SWCC), and examine their impact on the parameters of the van Genuchten (V-G) model, thereby providing a new perspective for elucidating the mechanism by which the initial pore structure regulates water retention. [Methods] Pressure plate tests and nuclear magnetic resonance (NMR) tests were conducted to analyze the SWCC of loess under different initial wet density conditions, investigate their influence on the parameters of the V-G model, and obtain

收稿日期: 2025-05-30

修回日期: 2025-08-03

接受日期: 2025-09-14

资助项目: 国家自然科学基金面上项目“黄土地基浸水湿陷的尺寸效应及其变形计算”(No52378369); 山东电力工程咨询院有限公司技术开发项目“多维联合地基处理对高含水率湿陷性黄土处理效果研究”(37-2025-21-K0002)

第一作者: 张维刚(1982—), 男, 山东莱州人, 高级工程师, 硕士, 主要从事土力学特性和地基工程等相关研究。E-mail: zhangweigang@spic.com.cn

通信作者: 崔熙灿(1998—), 女, 河南平顶山人, 博士, 主要从事黄土水力和力学特性的相关研究。E-mail: cuixican0317@qq.com

<https://stbcj.publish.founderss.cn>

the pore water distribution characteristics of the samples. [Results] (1) In the boundary effect zone, the slope of the SWCC decreased as  $K$  and  $w_0$  increased. In the transition zone, the slope decreased as  $K$  and  $w_0$  decreased, leading to a faster descending rate of the SWCC curve and an accelerated water loss of the specimens. In the residual zone, the SWCCs gradually converged, and the residual value increased with increasing  $K$  and  $w_0$ . (2) The parameter  $\psi_0$  of the air-entry value showed a linear positive relationship with  $K$  and an exponential relationship with  $w_0$ .  $\psi_0$  increased with the increase of  $w_0$ . The parameters of the V-G model  $\alpha$  were logarithmically related to  $K$  and linearly related to  $w_0$ .  $K$  and  $w_0$  had little influence on parameters  $m$  and  $n$ . Based on the V-G model, the SWCC model considering the coupling of saturation and compaction degree, and saturation and initial moisture content was modified. (3) As  $K$  increased, the pore structure within the soil transformed from more open pores to more uniform small and medium-sized pores. Water became more difficult to discharge within the soil, resulting in a decreased water loss rate, an increased air-entry value, and stronger water retention capacity. The  $T_2$  spectra of low  $w_0$  samples were mainly unimodal, and those of high  $w_0$  samples were mainly bimodal. With the increase of  $w_0$ , the number of small pores increased and the connectivity between pores decreased, restricting the movement of water molecules and making water more difficult to discharge. Therefore, the air-entry value of the samples increased and their water retention capacity was enhanced. [Conclusion] The differences in the micro-pore structure (changes in size distribution and pore connectivity) of loess under different initial conditions are the key to the changes in its macroscopic water retention capacity.

**Keywords:** compacted loess; soil-water characteristic curve test; NMR test; Van Genuchten model; pore water distribution

随着中国“西部大开发”战略和黄河流域生态保护和高质量发展的深入实施,为了抓好黄土高原水土保持,加大水土流失综合治理力度工作的推进,越来越多的基础设施开始向黄土高原地区扩展,形成许多黄土坡地生态区<sup>[1-2]</sup>。其生态建设离不开植物覆盖,黄土坡地植被生长所需水分主要来源于灌溉以及降雨。但在旱季缺乏降雨期间,作为植被生长载体的土壤,其持水性决定了植被能否良好生长。在工程建设中,铺填、整平、碾压等处理会影响坡地黄土的密实程度。而灌溉、降雨、地下水水位的影响会使黄土的含水率具有明显差异。因此为了给黄土高原水土保持生态区的建设提供合理化建议,不同初始湿密状态下非饱和和坡耕地黄土的持水特性机制亟须研究。

影响持水特性的因素分为主要因素和次要因素,主要因素包括非饱和土内部的矿物组成成分以及孔隙结构 2 大类,其他因素为次要因素。(1) 矿物组成的影响:土体矿物成分主要指土颗粒与可溶盐的矿物组成。研究发现高岭石与伊利石对基质吸力的影响显著,而蒙脱石则未表现出显著性<sup>[3]</sup>。(2) 孔隙结构的影响:例如颗粒的粒径组成、土体的初始含水率、初始干密度、应力路径等均会影响土体的孔隙结构。毕庆涛等<sup>[4]</sup>和张林等<sup>[5]</sup>研究发现初始干密度主要影响黄土土水特征曲线(Soil-Water Characteristic Curve, SWCC)的进气值和残余体积含水率,试样的

吸力随干密度的增加而增长。张登飞等<sup>[6-7]</sup>、Peng 等<sup>[8]</sup>针对非饱和土的持水特性展开研究,发现应力对 SWCC 影响显著,随着应力的增加,土样的饱和含水量降低,而进气量增大,过渡段曲线变得平坦。目前对于黄土持水特性的研究多考虑了各种外部因素,而对于实际施工过程中压实度对 SWCC 的影响鲜少报道。

此外,非饱和孔隙介质中水分的分布状态对岩土材料的持水特性也有重要影响<sup>[9]</sup>,而非饱和土的孔隙结构是导致水分赋存状态不同的主要原因<sup>[10]</sup>。大多学者借助微观技术以建立孔隙结构参数与持水性之间的联系,例如张亚国等<sup>[11]</sup>利用电镜扫描技术(Scanning Electron Microscopy, SEM)发现随埋深的增大,黄土优势孔径及其分布密度减小,SWCC 的饱和段增长,进气值增大,过渡段变缓,持水能力增强。Ma<sup>[12]</sup>、何芳婵<sup>[13]</sup>等借助压汞技术,探究了膨胀土在干湿循环过程中吸附水和毛细水随吸力的变化规律。Wen 等<sup>[14]</sup>使用 CT 技术发现,微小孔隙的空间变化和复杂的孔隙结构有助于提高试样的保水能力。而黄土作为特殊性土,内部结构可能更为复杂,SEM 技术难以定量观测孔径分布曲线;而压汞法会在一定程度上损坏试样的初始结构<sup>[15]</sup>;CT 主要通过灰度图像重构孔隙形态,依赖于算法;而且 CT 对孔隙内水分状态的敏感性也较低<sup>[16]</sup>;而核磁共振技术通过

检测氢质子的弛豫时间(如  $T_2$  谱)直接反映孔隙内水分状态,能够区分不同孔隙尺寸,并进一步分析束缚水与自由水的分布,能从微观上更好地解释黄土的持水机制。

鉴于以上情况,本文针对中国陕西某地黄土开展了一系列压力板试验和核磁共振试验。在宏观上,分析不同初始湿密状态下黄土的持水特性和对其V-G模型参数的影响,并基于V-G模型对不同压实度的土水特征模型进行修正,提出考虑饱和度—压实度耦合下的土水特征模型;在微观上,阐明黄土试样的孔隙水分布规律,揭示黄土的持水机制,以此

来解释产生宏观曲线的根本原因。

## 1 试验概况

### 1.1 试验材料

试验用土取自陕西某黄土边坡,取土深度为3.0~5.0 m,其颜色为灰黄色,土质均匀且具大孔隙,结构较为疏松,土中有杂草、细小废浆石等杂质,属Q3 马兰黄土。在去除黄土的杂质后机械碾碎,过2 mm的筛,通过室内试验测得黄土的基本物理力学指标见表1,该土为粉质黏土。黄土的粒径分布结果如图1所示。

表1 黄土的基本物理参数及粒径分布

Table 1 Basic physical parameters and particle size distribution of loess

最优含水率 $w_{opt}/\%$	最大干密度 $\rho_{dmax}/$ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	天然含水率 $w/\%$	液限 $w_l/$ $\%$	塑限 $w_p/$ $\%$	塑性 指数 $I_p$	比重 $G_s$	按塑性指数 分类
17.2	1.72	9.4	35.67	20.44	15.2	2.72	CL

采用BRUKER公司生产的D8ADVANCE型X-ray diffraction(XRD)仪进行矿物相分析,结果表明,黄土土样的主要矿物成分为石英 Quartz、钠长石 Albite、白云母 Muscovite、方解石 Calcite 等(图2)。

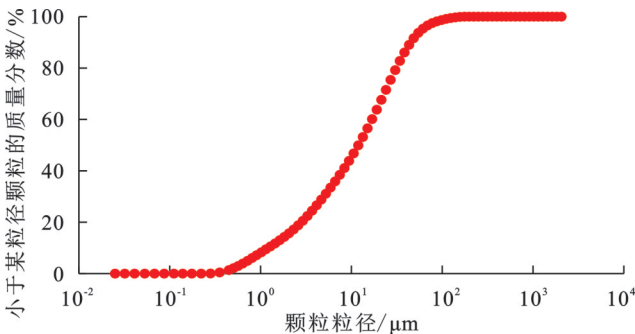


图1 黄土的颗粒级配曲线

Fig. 1 Particle size distribution curve of loess

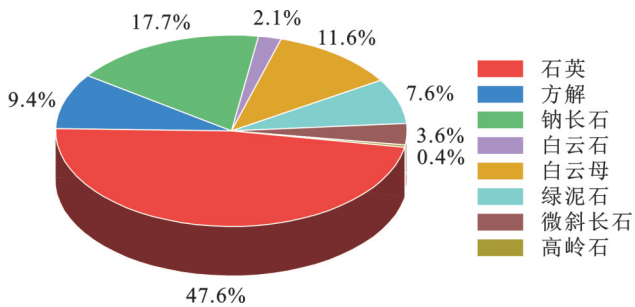


图2 黄土的矿物成分检测结果

Fig. 2 Test results of mineral composition of loess

### 1.2 试验原理及步骤

非饱和土的基质吸力与含水率或饱和度之间的关系曲线被定义为土-水特征曲线(SWCC),SWCC对描述非饱和土强度与变形特性起到关键性作用,因而获得SWCC对研究非饱和土的力学特性具有重要意义<sup>[17-19]</sup>。陈正汉等<sup>[20]</sup>指出“黄土在工作环境下的

吸力上限约为1 000 kPa。”因此本文采取压力板仪(吸力范围0~1 500 kPa)测定非饱和黄土的SWCC。

1.2.1 试验原理 SWCC测试(压力板法)原理:在大气压下,非饱和土试样的孔隙水压  $u_w$  是负值。基质吸力  $\psi = u_a - u_w$ ,同时增加孔隙气压  $u_a$  和孔隙水压  $u_w$ ,使试样中的应力状态保持不变,进而可以解决孔隙水压测量的问题(水室中的水压  $< -75$  kPa时,水会汽化,影响水压力的测量)。压力板法将  $u_a = 0, u_w < 0$  的问题转化为控制  $u_a$  并使  $u_w \geq 0$  的问题。

核磁共振试验(Nuclear Magnetic Resonance, NMR)原理:NMR基于原子核在磁场中的自旋特性和电磁波的相互作用。NMR通过检测氢核在外磁场中的弛豫时间(如横向弛豫时间  $T_2$ ,纵向弛豫时间  $T_1$ )来反映其微观环境。表面弛豫发生在多孔介质的颗粒表面上,当孔隙很小时,表面弛豫很缓慢,导致分子能在孔隙中往返多次,  $T_1$  和  $T_2$  的表面弛豫速率如下式:

$$\frac{1}{T_2} = \rho_2 \frac{S}{V} \tag{1}$$

$$\frac{1}{T_1} = \rho_1 \frac{S}{V} \tag{2}$$

式中:  $\rho_2$  为固体颗粒表面的  $T_2$  弛豫强度(m/s);  $\rho_1$  为固体颗粒表面的  $T_1$  弛豫强度(m/s);  $S$  为孔隙表面积( $m^2$ );  $V$  为孔隙体积( $m^3$ )。对于形状简单的孔隙,  $S/V$  为孔隙的比表面积( $1/m$ ),取决于孔隙尺寸。如:孔隙为球形,  $S/V = 3/r$ ,  $r$  为半径。

本试验使用的NMR分析仪为MesoMR23-060H-I型。通过测量到的横向磁化矢量随着弛豫时间( $T_2$ )变化的关系可反演出  $T_2$  谱,其反映了试样的孔隙孔径分布曲线,  $T_2$  和孔径存在如下关系:

$$\frac{1}{T_2} \approx \rho_2 \frac{\alpha}{R} \quad (3)$$

式中： $\alpha$ 为形状因子，若将孔隙视为球形， $\alpha=3$ ； $R$ 为孔隙半径(m)。

### 1.2.2 试验步骤

(1) 试样制备。取制备好含水率的土样，按下式计算每个试样所需土的质量并放入环刀内。采用液压千斤顶压制成样，其尺寸为 $\Phi 53 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} (2r \times h)$ 。

$$m_w = \pi \times r^2 \times h \times K \times \rho_{d\max} \times (1 + w_{\text{igt}}) \quad (4)$$

式中： $m_w$ 为试样质量(g)； $r$ 、 $h$ 分别为试样的半径和高度(mm)； $K$ 为目标压实度(%)； $\rho_{d\max}$ 为最大干密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ )； $w_{\text{igt}}$ 为目标含水率(%)。

(2) 饱和陶土板和试样。陶土板应该先在蒸馏水中浸泡至少1 h，随后在不超过100 kPa负压下抽气饱和24 h以上，直至不再有气泡冒出。试样采用叠式饱和器进行真空抽气饱和(抽气2 h，水中静止10 h)。

(3) 压力板试验。将陶土板置于压力室中并连接好。为了避免试样直接接触，应将装有试样的环刀间隔放置在陶土板上。密封压力室至少48 h，使试样平衡；平衡后，施加第一级吸力；待第一级吸力平衡后，迅速打开压力室，取出环刀，称重并记录数据 $m_2$ ；随后将环刀依次放回，迅速施加第二级吸力，重复上述步骤。试验结束后，采用烘干法将试样烘干，称重并记录数据 $m_3$ 。

(4) 此外，在试样制备前，应在3个不同位置测量环刀的内径和高度，要求误差小于0.1 mm，再分别取平均值作为环刀的内径和高度，称重并记录环刀的质量 $m_1$ 。在核磁试验过程中，为了减少Fe核等其他磁性原子核对H核的干扰，采用四氟乙烯环刀制备试样。

(5) 试验完成后，按照公式(7)计算基质吸力，按照公式(8)计算试样的含水率。

$$\psi = u_a - u_w \quad (5)$$

$$w = \frac{m_2 - m_3}{m_3 - m_1} \times 100\% \quad (6)$$

其中 $\psi$ 为试样的基质吸力(kPa)； $u_a$ 、 $u_w$ 分别为孔隙气压和孔隙水压(kPa)； $w$ 为试样的含水率(%)； $m_1$ 、 $m_2$ 、 $m_3$ 分别为环刀的质量、试样平衡后的质量、试样烘干后的质量(g)。

### 1.3 试验方案

SWCC测试方案：本试验所有土样均采用重塑黄土，设置5个不同的初始含水率( $w_0=9.4\%$ 、 $13\%$ 、 $17.2\%$ 、 $22\%$ ，饱和)和5个不同压实度(以室内击实试验所得的最大密度为参照，以 $K=80\%$ 、 $84\%$ 、 $88\%$ 、 $92\%$ 、 $96\%$ 确定制样密度)，具体试验方案如表2所示。设置吸力路径为0 kPa→30 kPa→60 kPa→100 kPa→

150 kPa→200 kPa→300 kPa→400 kPa→500 kPa→600 kPa→800 kPa→1 000 kPa→1 200 kPa。

表2 SWCC测试方案  
Table 2 SWCC testing schemes

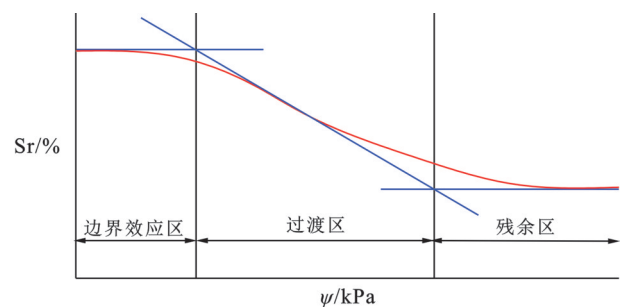
编号	样品编号	$w_0/\%$	$K/\%$
1-A	1-A-9.4	9.4	88
	1-A-13.0	13.0	
	1-A-17.2	17.2	
	1-A-22.0	22.0	
1-B	1-B-80	17.2	80
	1-B-84		84
	1-B-88(1-A-17.2)		88
	1-B-92		92
	1-B-96		96

核磁共振试验(NMR)试验方案：NMR微观试验本质上是对黄土试样内孔隙水分布的检测，NMR信号强度与孔隙含水量成正比 $T_2$ 谱的横向弛豫时间与水的表面张力成反比。当试样饱和时， $\psi=0$  kPa，NMR试验可以反映试样内完整的孔隙分布情况，因此当试样饱和后，应马上进行核磁试验，随后再放入压力板仪中。

## 2 结果与分析

### 2.1 非饱和黄土的持水特性分析

土-水特征曲线(SWCC)能够反映非饱和黄土的持水特性，分为3个阶段，即边界效应区、过渡区以及残余区，典型的SWCC示意图如图3所示。随着基质吸力的增加，试样的饱和度呈下降趋势。



注： $S_r$ 为有效饱和度； $\psi$ 为基质吸力(kPa)。

图3 典型SWCC示意图

Fig. 3 Schematic diagram of typical SWCC

图4为不同压实度 $K$ 下黄土试样的SWCC脱湿曲线。在边界效应区，SWCC的斜率随着压实度的增大而减缓，说明随着压实度的增大，试样的进气值增加，排水性较差，表明土体的小孔隙可能较多。在过渡区，随着吸力的增加，不同 $K$ 黄土试样的SWCC快速下降，过了进气值后，黄土中最大孔隙开始排水，此阶段黄土水分的流失速率急剧增加，饱和度快

速下降;且压实度越低,曲线下降越快,曲线斜率越陡峭,试样的水分流失越快。在残余区,各个 SWCC 的下降速率逐渐变缓,SWCC 越来越接近;此时试样的残余值随着压实度的增加而增大,表明初始压实度大的黄土试样,其持水性更好。

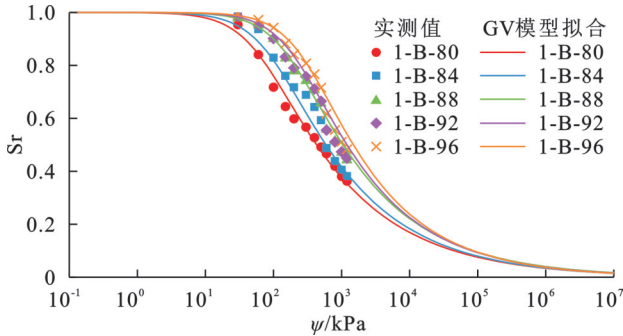


图 4 不同 K 下黄土试样的 SWCC 脱湿曲线 ( $w_0=17.2\%$ )  
Fig. 4 SWCC drying curves of loess samples under different K values ( $w_0=17.2\%$ )

图 5 为不同初始含水率  $w_0$  下黄土试样的 SWCC 脱湿曲线。初始含水率不同的黄土试样,测得的 SWCC 形状基本相同,呈“S”形,主要区别体现在过渡区。

在边界效应区,SWCC 的斜率随着初始含水率的增大而减缓;结果表明,试样的进气值随着初始含水率的增大而增大;当  $w_0$  较低时,土体的可塑性较差,进气值较小;随着  $w_0$  的增加,试样的进气值会随之增大。在过渡区,高初始含水率黄土试样 SWCC 的斜率缓于低初始含水率黄土试样;说明当  $w_0$  较低时,试样的水分流失较快;因为在制样时,初始含水率不同,会造成试样的初始结构不同,进而会影响水分在土体内迁移的难易程度。在残余区,初始含水率的影响逐渐减小,曲线逐渐接近重合;试样的残余值随着初始含水率的增加而增大;当初始含水率较大时,其水膜较厚,颗粒之间阻力较小,土体的塑性强,因此持水能力较强。

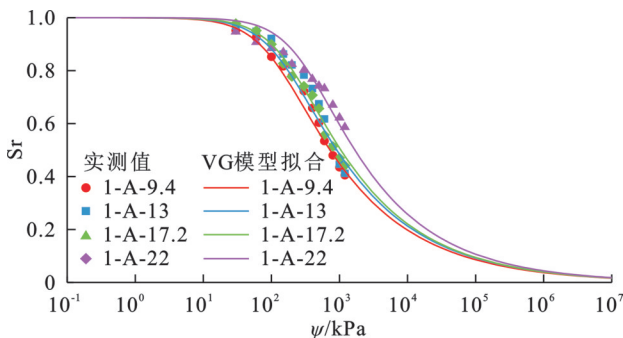


图 5 不同  $w_0$  下黄土试样的 SWCC 脱湿曲线 ( $K=88\%$ )  
Fig. 5 SWCC drying curves of loess samples under different  $w_0$  values ( $K=88\%$ )

## 2.2 Van Genuchten 模型参数分析

目前基于孔隙结构分布有一些常用的 SWCC 模

型,主要有 4 个: Gardner 模型<sup>[21]</sup>、Brooks-Corey(BC)模型<sup>[22]</sup>、Van Genuchten(V-G)模型<sup>[23]</sup>和 Fredlund and Xing(FX)模型<sup>[24]</sup>。这些模型都是通过拟合试验数据得到 SWCC。

已有研究表明,黄土使用 V-G 模型的拟合效果略优于现有的其他模型<sup>[25]</sup>。为了从试验结果中提取到黄土持水特性曲线的关键性参数(如进气值、残余值等),通过 V-G 模型对试验点进行拟合,其表达式为式(10),拟合结果见图 4—5,拟合优度  $R^2$  见表 3。研究结果表明绝大部分持水曲线的  $R^2 > 0.95$ ,说明 V-G 模型能较好地拟合黄土的 SWCC。

$$Sr = [1 + (\alpha\psi)^n]^{-m} \quad (7)$$

式中: $\alpha$ 为与进气值相关的参数,数值上约等于进气值的倒数(1/kPa); $n$ 为孔径分布参数; $m$ 为试验参数, $m=1-n^{-1}$ 。

表 3 V-G 模型的拟合优度  
Table 3 Goodness of fit of V-G model

分组	试样编码	$w_0/\%$	$K/\%$	$R^2$
1-A	1-A-9.4	9.4		0.98
	1-A-13.0	13.0	88	0.95
	1-A-17.2	17.2		0.98
	1-A-22.0	22.0		0.91
1-B	1-B-80		80	0.99
	1-B-84		84	0.96
	1-B-88(1-A-17.2)	17.2	88	0.98
	1-B-92		92	0.96
	1-B-96		96	0.96

用 V-G 模型对不同压实度试样进行 SWCC 拟合,V-G 模型参数如表 4 所示,表中  $\phi_0$  为进气值。模型参数随压实度的变化规律如图 6 所示,参数  $\phi_0$  与压实度呈线性关系, $\phi_0$  随着压实度的增大而增加;同时  $\alpha$  与  $K$  呈对数型函数( $\alpha=A\ln(K+B)+C$ ,  $R^2=0.96$ )关系, $\alpha$  随着  $K$  的减小而增大,当试样的压实度从 96% 变为 80% 时, $\alpha$  增加约 3 倍;另外与  $\alpha$  比, $K$  对参数  $m$ ,  $n$  的影响不大(前后变化均在 10% 左右);因此可以忽略,取平均值。根据上述分析结果,可以得出初始压实度(或压实度)-饱和度耦合下的 V-G 模型来描述黄土的 SWCC,如下式:

$$Sr = \{1 + [A\ln(K+B) + C]\phi_0^n\}^{-m} \quad (8)$$

式中: $A=-0.006$ , $B=-77.345$ , $C=0.022$ , $n=1.375$ , $m=0.273$ 。

用 V-G 模型对不同初始含水率试样进行 SWCC 拟合,V-G 模型参数如表 5 所示,模型参数随压实度的变化规律如图 7 所示。参数  $\phi_0$  与  $w_0$  指数型函数关系, $\phi_0$  随着  $w_0$  的增大而增加; $\alpha$  随着  $w_0$  的增大而减小,当试样的初始含水率从 22.0% 变为 9.4% 时, $\alpha$  减小

约 0.7 倍;其大致呈现线性函数关系( $\alpha=A\omega_0+B, R^2=0.97$ )。与  $\alpha$  比,当试样的初始含水率从 9.4% 变为 22.0% 时  $\omega_0$  对参数  $m, n$  的影响不大,因此可以忽略,取平均值。根据上述分析结果,可以得出初始含水率—饱和度耦合下的 V-G 模型来描述黄土的 SWCC,如下式:

$$Sr = \{1 + [A\omega_0 + B]\psi^n\}^{-m} \quad (9)$$

式中: $A=-0.001, B=0.013, n=1.371, m=0.271$ 。

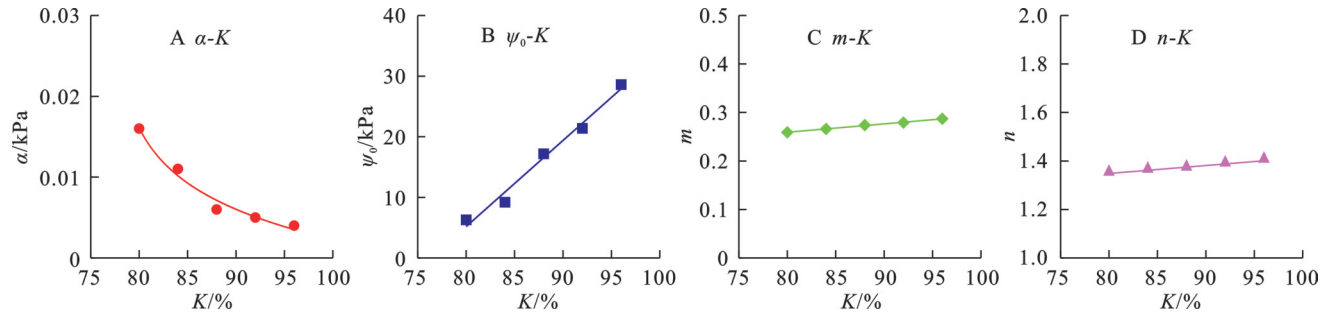


图 6 V-G 模型参数随压实度  $K$  的变化规律

Fig. 6 Variation patterns of V-G model parameters with compaction degree  $K$

表 5 V-G 模型的拟合参数及进气值 ( $K=88\%$ )

Table 5 Fitting parameters and air-entry values of V-G model ( $K=88\%$ )

试样编码	$\alpha/\text{kPa}^{-1}$	$n$	$m$	$\psi_0/\text{kPa}$
1-A-9.4	0.009	1.362	0.266	11.4
1-A-13	0.007	1.365	0.267	14.5
1-A-17.2	0.006	1.371	0.274	17.2
1-A-22	0.003	1.384	0.277	29.4

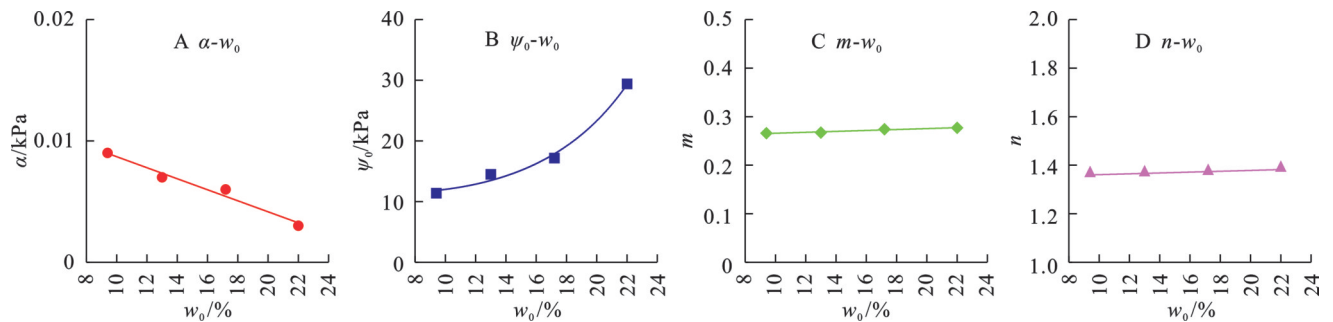


图 7 V-G 模型参数随初始含水率  $w_0$  的变化规律

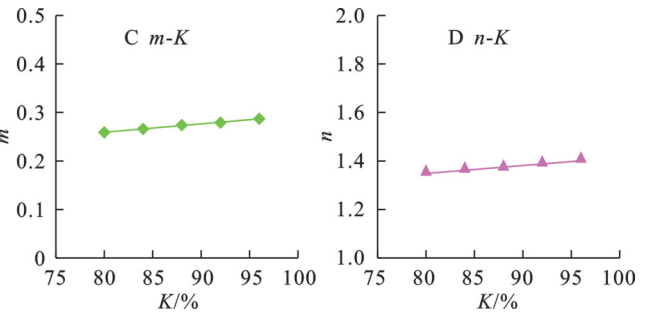
Fig. 7 Variation patterns of V-G model parameters with initial water content  $w_0$

$P_1$  随着压实度的增大而增加,说明试样的大孔隙比例减小;当压实度增加时,  $P_1$  所对应的  $T_2$  弛豫时间有左移趋势;压实度增加导致微小孔隙进一步被压缩,使得黏土颗粒排列更为紧密,结合水与某些矿物成分表面的 H 键和范德华力作用加强,使得水分运动被束缚。例如,在饱和状态下,钠长石 (XRD 检测到的主要矿物成分之一) 易水解生成黏土矿物,黏土矿物晶层间孔隙的强结合水占比增加,使水分进一步被束缚,造成分子运动自由度降低,  $T_2$

表 4 V-G 模型的拟合参数及进气值 ( $w_0=17.2\%$ )

Table 4 Fitting parameters and air-entry values of V-G model ( $w_0=17.2\%$ )

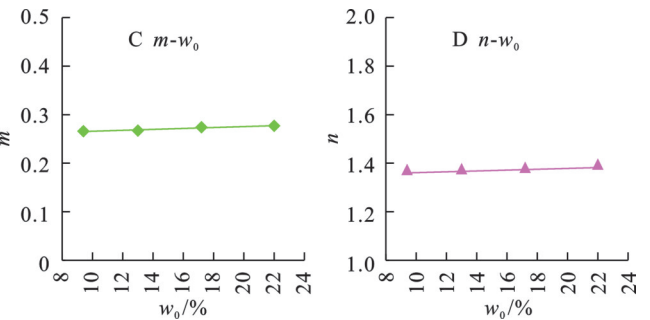
试样编码	$K/\%$	$\alpha/\text{kPa}^{-1}$	$n$	$m$	$\psi_0/\text{kPa}$
1-B-80	80	0.016	1.350	0.259	6.3
1-B-84	84	0.011	1.362	0.266	9.2
1-B-88	88	0.006	1.371	0.274	17.2
1-B-92	92	0.005	1.387	0.279	21.4
1-B-96	96	0.004	1.403	0.287	28.6



### 2.3 NMR 微观试验结果

为了进一步了解不同影响因素下黄土的持水机制,本文基于 NMR 微观试验,考虑孔隙水分布特征对黄土土-水特性曲线的影响,对宏观试验结果进行分析验证。

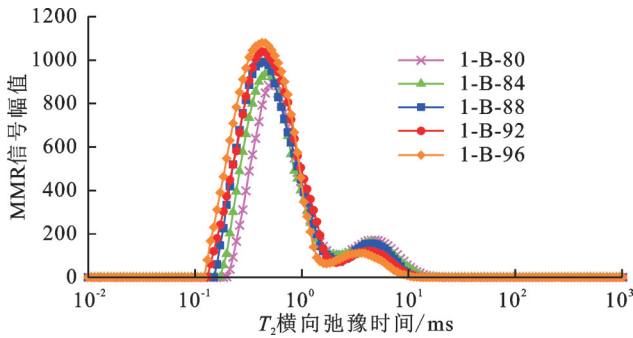
图 8 为初始含水率  $w_0=17.2$  时,不同压实度  $K$  下黄土试样的  $T_2$  曲线。当  $w_0$  相同时,不同压实度试样的  $T_2$  曲线谱的形状大致相同,呈现双峰弛豫分布,其中短弛豫时间的信号幅值  $P_1$  对应小孔隙,而长弛豫时间的信号幅值  $P_2$  对应大孔隙。



弛豫时间左移(缩短)的现象。随着压实度的增加,土体内部的孔隙结构由较多的架空孔隙转化为较均匀的中小孔隙,水分在土体内部更难排出,就导致失水速率降低,进气值增大。例如:当压实度从 80% 变为 96% 时,  $\psi_0=6.3 (K=80\%) < \psi_0=28.6 (K=96\%)$ ,其 NMR 结果能较好地解释 2.1 节和 3.1 节对应的宏观现象。

$P_2$  随着压实度的增大而降低;压实度增加,试样中大孔隙比例大幅下降,导致试样中自由水丧失,饱

和含水率降低;同时  $P_2$  所对应的  $T_2$  弛豫时间有左移(减小)趋势,随着  $K$  的增加,试样的大孔隙进一步被压缩,使得自由水迁移阻力增加,水的流动性降低,自由水在孔隙中的运动被限制,弛豫路径较短,造成  $T_2$  弛豫时间左移(减小)的现象。



注:  $w_0=17.2\%$ ,  $\psi=0$  kPa。

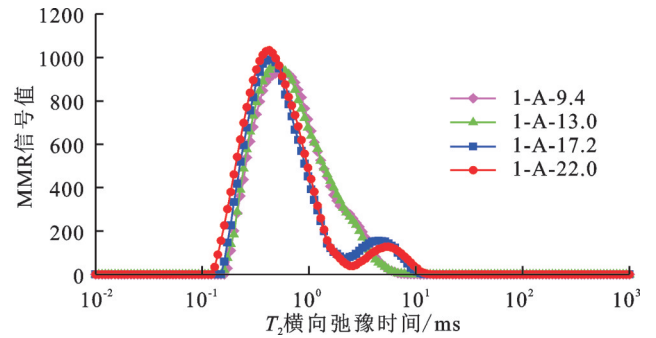
图 8 不同  $K$  下黄土试样的  $T_2$  曲线

Fig. 8  $T_2$  curves of loess samples under different  $K$  values

图 9 为压实度  $K=88\%$  时,不同初始含水率  $w_0$  下黄土试样的  $T_2$  曲线。在  $K$  相同的情况下,低初始含水率试样的  $T_2$  谱以单峰为主,高初始含水率试样的  $T_2$  谱以双峰为主。

当  $w_0$  较低时,土体的可塑性较差;随着  $w_0$  的增加,试样的小孔隙数量增加,这一现象从  $P_1$  值上可以体现出来( $P_1$  随着初始含水率的增大而增加)。随着  $w_0$  的增加,  $P_1$  所对应的  $T_2$  弛豫时间有左移趋势;随着  $w_0$  的增加,结合水层厚度增加,颗粒表面电荷对水分子的极化作用增强,氢键网络更密集,进一步缩短了  $T_2$  弛豫时间,同时试样结构中的孔隙逐渐减小,使孔隙间的连通性降低,结合水与颗粒表面的相互作用增强,被束缚在更狭窄的孔隙中,分子运动受限,导致  $P_1$  峰的横向弛豫时间向左偏移,进气值增加。例如:随着初始含水率的增加,  $\phi_0$  从 11.4 ( $w_0=9.4\%$ ) 增加至 29.4 ( $w_0=22\%$ ), 增加约 160%, 其 NMR 结果能较好地解释 2.2 节和 3.2 节对应的宏观现象。

初始含水率  $w_0$  较低时,  $T_2$  图谱以短弛豫时间峰 ( $P_1$ ) 为主,此时黄土中的结合水占主导,自由水较少;随着初始含水率  $w_0$  增加,长弛豫时间峰逐渐显著 ( $P_2$ ), 表明黄土中的自由水占比随着初始含水率的增加而上升。同时随着  $w_0$  的增加  $P_2$  所对应的  $T_2$  弛豫时间有右移(增加)趋势;当初始含水率较高时 ( $w_0=22\%$ ), 试样结构中的微小孔隙较多,结合水在填充微孔隙后,过剩水分进入大孔隙形成自由水。此时,大孔隙可能因湿陷或结构破坏而扩张,导致自由水分子自由度更高,横向弛豫时间延长 ( $T_2$  值增大), 表现为  $P_2$  峰右移(增加)。



注:  $K=17.2\%$ ,  $\psi=0$  kPa。

图 9 不同  $w_0$  下黄土试样的  $T_2$  曲线

Fig. 9  $T_2$  curves of loess samples under different  $w_0$  values

### 3 结论

(1) 不同初始湿密状态黄土的 SWCC 曲线特征: 边界效应区中 SWCC 的斜率随着压实度  $K$  的增大而减缓;过渡区中 SWCC 随着吸力的增加快速下降,且  $K$  越低,曲线斜率越陡峭,试样的水分流失越快;残余区 SWCC 越来越接近,残余值随着  $K$  的增加而增大。边界效应区中 SWCC 的斜率随着初始含水率  $w_0$  的增大而减缓;过渡区中高  $w_0$  黄土试样 SWCC 的斜率缓于低  $w_0$  黄土试样;残余区中不同  $w_0$  的曲线逐渐接近重合;试样的残余值随着  $w_0$  的增加而增大。

(2) 不同初始湿密状态对黄土 V-G 模型参数的影响:进气值参数  $\phi_0$  与  $K$  呈线性正相关关系,  $K$  增大,黄土的进气值增加,持水性明显增强;  $\phi_0$  与  $w_0$  指数型函数关系,  $\phi_0$  随着  $w_0$  的增大而增加。同时 V-G 模型参数  $\alpha$  与  $K$  呈对数型函数关系,  $\alpha$  随着  $K$  的增大而减小;  $\alpha$  与  $w_0$  呈线性相关关系,其随着  $w_0$  的增大而减小,  $K$  和  $w_0$  对参数  $m$ ,  $n$  的影响不大。同时基于 V-G 模型和其参数影响规律修正了饱和度—压实度耦合、饱和度—初始含水率耦合的土水特征曲线模型。

(3) 不同初始湿密状态下黄土的微观持水性机制:短弛豫时间的信号幅值  $P_1$  随着  $K$  的增大而增加,试样的大孔隙比例减小;当  $K$  增加时,  $P_1$  所对应的  $T_2$  弛豫时间左移,结合水运动被束缚。长弛豫时间的信号幅值  $P_2$  随着  $K$  的增大而降低;压实度增加,试样中大孔隙比例大幅下降,导致试样中自由水丧失,饱和含水率降低;  $P_2$  所对应的  $T_2$  弛豫时间右移,自由水迁移阻力减小,流动性提高,在孔隙中的滞留时间延长,形成更长的弛豫路径。随着  $w_0$  的增加,  $P_1$  增大,小孔隙数量增加;  $P_1$  所对应的  $T_2$  弛豫时间左移,试样结构中的孔隙逐渐减小,孔隙间的连通性降低,水分子运动受限,更难排出,试样进气值增加,持水性增强。低  $w_0$  试样的  $T_2$  谱以单峰为主,高  $w_0$  试样的  $T_2$  谱以双峰为主。

## 参考文献 (References):

- [1] Shu H P, Ma J Z, Guo J B, et al. Effects of rainfall on surface environment and morphological characteristics in the Loess Plateau [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(30):37455-37467.
- [2] Sun L Y, Ma B J, Pei L, et al. The relationship of human activities and rainfall-induced landslide and debris flow hazards in Central China [J]. *Natural Hazards*, 2021, 107(1):147-169.
- [3] 孙银磊,李志妃,陈妍歌,等.矿物成分对红土土-水特性的影响[J].*岩土力学*, 2025, 46(10):3117-3131.  
Sun Y L, Li Z F, Chen Y G, et al. Effect of mineral composition on soil-water characteristics of red soil [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2025, 46(10):3117-3131.
- [4] 毕庆涛,冯巧云,赵俊刚,等.干密度对非饱和黄土土-水特征曲线的影响试验[J].*华北水利水电大学学报:自然科学版*, 2022, 43(2):84-88.  
Bi Q T, Feng Q Y, Zhao J G, et al. Experiment on influence of dry density on soil-water characteristic curve of unsaturated loess [J]. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power: Natural Science Edition*, 2022, 43(2):84-88.
- [5] 张林,李同录,陈存礼.考虑干密度影响的压实黄土土水特征与渗透特性试验研究[J].*岩土工程学报*, 2022, 44(5):945-953.  
Zhang L, Li T L, Chen C L. Soil-water characteristics and permeability of compacted loess considering effects of dry density [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2022, 44(5):945-953.
- [6] 张登飞,陈存礼,杨炯,等.侧限条件下增湿时湿陷性黄土的变形及持水特性[J].*岩土力学与工程学报*, 2016, 35(3):604-612.  
Zhang D F, Chen C L, Yang J, et al. Deformation and water retention behaviour of collapsible loess during wetting under lateral confinement [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(3):604-612.
- [7] 张登飞,陈存礼,张洁,等.等向压缩应力条件下原状黄土的吸湿持水特性[J].*岩土工程学报*, 2018, 40(7):1344-1349.  
Zhang D F, Chen C L, Zhang J, et al. Wetting water retention behaviors of intact loess under isotropic compression stress [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 40(7):1344-1349.
- [8] Peng J H, Hu H R, Zhang J H. Rapid testing and prediction of soil-water characteristic curve of subgrade soils considering stress state and degree of compaction [J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2023, 15(12):3305-3315.
- [9] 谭龙,韦昌富,田慧会,等.土体持水特性及孔隙水分布特性的试验研究[J].*工程地质学报*, 2017, 25(1):73-79.  
Tan L, Wei C F, Tian H H, et al. Experimental study on characteristics of pore water distribution and water-holding capacity of soil [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2017, 25(1):73-79.
- [10] 陶高粱,李进,庄心善,等.利用土中水分蒸发特性和微观孔隙分布规律确定 SWCC 残余含水率[J].*岩土力学*, 2018, 39(4):1256-1262.  
Tao G L, Li J, Zhuang X S, et al. Determination of the residual water content of SWCC based on the soil moisture evaporation properties and micro pore characteristics [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(4):1256-1262.
- [11] 张亚国,梁伟,郭松峰,等.黄土孔隙结构演化对其土-水特性影响分析[J].*工程地质学报*, 2022, 30(6):1998-2005.  
Zhang Y G, Liang W, Guo S F, et al. Analysis for effects of loess pore structure evolution on soil-water characteristics [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2022, 30(6):1998-2005.
- [12] Ma T T, Wei C F, Yao C Q, et al. Microstructural evolution of expansive clay during drying-wetting cycle [J]. *Acta Geotechnica*, 2020, 15(8):2355-2366.
- [13] 何芳婵,张俊然.原状膨胀土干湿过程中持水特性及孔隙结构分析[J].*应用基础与工程科学学报*, 2022, 30(3):736-747.  
He F C, Zhang J R. Water retention behavior and pore structure analysis of undisturbed expansive soil during drying and wetting [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2022, 30(3):736-747.
- [14] Wen T D, Chen X S, Luo Y W, et al. Three-dimensional pore structure characteristics of granite residual soil and their relationship with hydraulic properties under different particle gradation by X-ray computed tomography [J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 618:129230.
- [15] 王海曼,倪万魁,刘魁.延安压实黄土土-水特征曲线的快速预测方法[J].*岩土力学*, 2022, 43(7):1845-1853.  
Wang H M, Ni W K, Liu K. Rapid prediction method of soil-water characteristic curve of Yan'an compacted loess [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(7):1845-1853.
- [16] 郑佳,庄建琦,孔嘉旭,等.基于 CT 扫描的黄土孔隙结构特征研究[J].*地质科技通报*, 2022, 41(6):211-222.  
Zheng J, Zhuang J Q, Kong J X, et al. Study of loess pore structure characteristics based on CT scanning [J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2022, 41(6):211-222.
- [17] 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 Z Q, Li T, Hu R L, et al. Methods for testing and predicting of SWCC<sub>swc</sub> in unsaturated soil mechanics [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2007, 15(5):700-707.
- [18] 刘克振.基于滤纸法测试非饱和土土水特征曲线[D].山东青岛:山东科技大学, 2017.  
Liu K Z. Soil water characteristic curve of unsaturated soil based on filter paper method [D]. Qingdao, Shandong: Shandong University of Science and Technology, 2017.