

靖边 Q₃ 砂质黄土湿陷特征及其微观机制研究

慕焕东^{1,2}, 何 也¹, 白逸松¹, 邓亚虹^{2,3}, 郑龙浩¹

(1. 西安理工大学 岩土工程研究所, 陕西 西安 710048; 2. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054;
3. 长安大学 西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710054)

摘 要: 沙漠-黄土高原过渡带的砂质黄土遇水后会产生明显的湿陷变形, 广泛分布于陕北靖边的长庆油田工程遭受砂质黄土湿陷危害严重, 揭示砂质黄土湿陷特性及湿陷机制是长庆油田工程建设迫切需求。为此, 以陕北靖边沙漠-黄土高原过渡区 Q₃ 砂质黄土为研究对象, 通过室内基本物理性质、X 射线衍射和湿陷试验, 研究砂质黄土基本物理特性和物质组成, 厘清湿陷特性、影响因素及其规律。在此基础上, 通过扫描电子显微镜试验和孔隙及裂隙图像识别分析手段, 探究砂质黄土湿陷前后的微观结构, 孔隙大小分布、方向频率及丰度变化, 从微观角度揭示砂质黄土湿陷机制。研究表明: 靖边 Q₃ 砂质黄土具有湿陷性, 且湿陷系数随着轴向压力的增加先增加后减小, 随着干密度、含水率的增加而逐渐减小, 轴向压力为 150 kPa 时湿陷系数达到峰值; 靖边 Q₃ 砂质黄土以石英、钠长石、白云母以及方解石为主, 颗粒形态多以棱角状或次棱角状为主, 具有架空排列结构和架空孔隙, 以点-点接触为主, 黏粒胶结物多分布在骨架颗粒接触处。靖边 Q₃ 砂质黄土的架空孔隙结构崩塌是砂质黄土湿陷变形的本质, 为湿陷提供主要空间, 黏粒胶结物包裹少量碎屑颗粒形成的凝块结构产生的沉降变形为砂质黄土湿陷变形提供了增量。研究成果为长庆油气田工程建设区砂质黄土湿陷性评价提供了数据依据。

关 键 词: 靖边; Q₃ 砂质黄土; 湿陷特性; 微观机制; 扫描电镜

中图分类号: TU 444

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2024) 10-3024-13

Collapse characteristics and microscopic mechanism of Q₃ sandy loess in Jingbian

MU Huan-dong^{1,2}, HE Ye¹, BAI Yi-song¹, DENG Ya-hong^{2,3}, ZHENG Long-hao¹

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048 China;

2. School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054 China;

3. Key Laboratory of Western Mineral Resources and Geological Engineering, Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: The sandy loess in the desert-loess Plateau transition zone exhibits obvious collapse deformation when it encounters water. The collapsibility of the sandy loess in Changqing Oilfield, widely distributed in Jingbian, northern Shaanxi province, is seriously influenced by the collapsibility of sandy loess. It is urgent to reveal the collapsibility characteristics and mechanism of the sandy loess in Changqing Oilfield construction. Therefore, taking the sandy loess of Jingbian Q₃ in the transition area of Jingbian Desert-Loess Plateau in northern Shaanxi as the research object, the basic physical properties and material composition of the sandy loess were analyzed using laboratory basic physical properties, X-ray diffraction and collapsibility tests. The collapsibility characteristics, influencing factors and rules were clarified. On this basis, the microstructure, pore size distribution, directional frequency and abundance changes before and after the collapse of sandy loess were explored using scanning electron microscopy test and pore and fissure image recognition analysis. The collapse mechanism of the sandy loess was revealed from a microscopic perspective. The results show that the Jingbian Q₃ sandy loess has collapsibility. The collapsibility coefficient first increases and then decreases with the increase of axial pressure, and it gradually decreases with the increase of dry density and moisture content. The collapsibility coefficient peaks at the axial pressure of 150 kPa. Jingbian Q₃ sandy loess is mainly composed of quartz, albitite, muscovite and calcite. The grain morphology is mostly angular or subangular, with overhead arrangement structure and overhead pores, and point-to-point contact. Clay cements are mostly distributed in the contact areas of skeleton particles. The collapse of the overhead

收稿日期: 2024-01-17

录用日期: 2024-05-15

基金项目: 国家自然科学基金 (No.42372336); 陕西省自然科学基金基础研究计划一般项目 (No.2022JQ-289); 长安大学中央高校基本科研业务费专项资金 (No.300102262505)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (42372336), the General Project of Natural Science Basic Research Program of Shaanxi Province (2022JQ-289) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities, CHD (300102262505).

第一作者简介: 慕焕东, 男, 1989 年生, 硕士, 高级实验师, 硕士生导师, 主要从事岩土工程减灾防灾方面的研究工作。E-mail: mhdyhx@xaut.edu.cn

pore structure in Jingbian Q₃ sandy loess is the essence of its collapsible deformation, providing the main space for collapse. Subsidence deformation, caused by the coagulated structure formed by a small amount of debris particles wrapped in the clay cement, contributes to the increment of collapsible deformation. The research results provide a data basis for evaluating the collapsibility of sandy loess in the construction area of Changqing oil and gas field engineering.

Keywords: Jingbian; Q₃ sandy loess; collapsibility characteristics; micro-mechanism; scanning electron microscopy

1 引言

沙漠-黄土高原过渡区是指贺兰山以东,阴山以南,吕梁山以西,白于山以北的鄂尔多斯高原风沙区和黄土高原北部砂质黄土区,在风、水两相营力作用下,具有特殊的岩土工程特性,是典型的生态脆弱带。其中,位于黄土高原北部的砂质黄土区,是我国长庆油、气田工程建设的主战场区,目前已建成各类场站 2 800 余座,各类输油输气管线 8 万余 km,分散在大漠深处、梁峁之间的油气水井 12 万余口。这些位于砂质黄土区的建(构)筑物受砂质黄土增湿(湿陷)变形显著影响,黄土湿陷变形使得场站地基失稳破坏,造成管沟等局部坍塌,管线悬空或断裂,严重影响工程建(构)筑物的安全稳定及其长期服役寿命^[1-4]。因此,研究沙漠-黄土高原过渡区砂质黄土的湿陷特性及湿陷机制,对长庆油田工程建(构)筑物的安全稳定及其长期服役性能具有重要的理论实际意义。

黄土按区域粒径粗细变化规律可分为砂质黄土、粉质黄土和黏质黄土 3 个典型岩相带^[5]。其中,砂质黄土是指砂粒($0.05\text{ mm} < d < 2\text{ mm}$)含量大于 30%且黏粒($d < 0.005\text{ mm}$)含量小于 15%的一种第四纪松散沉积物,具有孔隙大、透水性强、水稳性差、抗冲蚀能力弱、遇水结构性迅速丧失等特点^[6-8]。笔者前期也以沙漠-黄土高原过渡区砂质黄土带为研究区域,进行了砂质黄土强度特性、蠕变特性等研究^[9-10],研究发现砂质黄土颗粒组成中 $0.05\sim 0.25\text{ mm}$ 的砂粒含量较多(5%~25%),具有显著的结构性,遇水后强度显著降低。

国内外学者对不同岩相带黄土湿陷性研究从未间断。20 世纪 30 年代以来,大量有关黄土湿陷假说、湿陷系数与起始压力、湿陷变形量、湿陷性评价等方面的研究成果在工程建设、地质灾害评价及防治方面发挥了举足轻重的作用^[11-14]。例如,关于黄土湿陷的假说就经历了毛管假说、溶盐假说、胶体不足说、水膜楔入说、欠压密理论等不同学说理论;在湿陷系数与起始压力方面,陈立等^[15]研究表明,Q₃黄土在 200~300 kPa 下已经达到结构屈服压力,对于 Q₂黄土还有待深入研究;在湿陷试验及变形分析方面,崔靖俞等^[16]对不同深度西宁地区原状

黄土的湿陷性进行了研究;穆青翼等^[17]通过对比研究具有相同初始干密度和含水率的原状和压实黄土,揭示了黄土结构对其持水特性和湿陷性的影响;在湿陷性评价方面,朱凤基^[18]、邵生俊^[19]等通过建立湿陷系数与黄土基本物理指标的关系来评价黄土的湿陷性。近些年来,黄土湿陷性的研究逐渐由宏观特性到微观机制^[20-26],湿陷过程也由单一的浸水饱和转变到浸水增湿湿陷亦或非饱和入渗等^[27-29]。随着研究的进一步深入,学者们普遍认为可以从黄土骨架颗粒的形态、接触关系、排列方式、胶结状态以及孔隙尺寸、形态分布等自身结构特征解释黄土的湿陷机制,该观点最终发展成为黄土湿陷机制的结构学说^[30]。值得注意的是,黄土湿陷机制的结构学说认为其湿陷的本质是内部颗粒间强度降低导致颗粒滑移引起亚稳态结构体系重组,较少从颗粒的接触形式及胶结方式揭示其湿陷机制。

为此,以陕北靖边沙漠-黄土高原过渡区 Q₃ 砂质黄土为研究对象,从颗粒胶结物组成、胶结方式微观角度出发,通过室内基本物理性质、X 射线衍射和湿陷试验,研究砂质黄土基本物理性质和物质组成,揭示其湿陷特性,通过扫描电镜试验研究砂质黄土湿陷前后的微观结构及参数变化规律,揭示其湿陷微观机制。研究成果对长庆油田工程建设区砂质黄土湿陷性评价具有重要理论实际意义。

2 试验概况

2.1 研究区场地概况

靖边某天然气厂厂区(见图 1)为黄土梁峁丘陵沟壑区,以黄土梁为主,部分梁顶上发育有孤立峁,在主分水岭处多为宽梁和长梁,在沟谷处短梁和薄梁居多。根据黄土颗粒粒径特征,该场地属于典型的砂质黄土区。场地内地层主要为 Q₄ 素填土、Q₄



图 1 靖边某天然气厂场地概况

Fig.1 Site overview of a natural gas plant in Jingbian

黄土状土、Q₃ 马兰黄土、Q₃ 古土壤、Q₂ 离石黄土。湿陷变形使得天然气厂区内地面沉降、部分构筑物的超限倾斜与地表裂缝等隐患问题凸显（见图 2），对厂区建（构）筑物造成严重危害。



图 2 靖边某天然气厂区湿陷沉降
Fig.2 Subsidence of a natural gas plant in Jingbian

2.2 砂质黄土基本特性

试验所用土样取自靖边县沙渠村某天然气厂场地周围，所取试样为 Q₃ 砂质黄土原状试样，位于第一带砂质黄土区。

对所取试样进行室内基本物理性质试验，得到其主要物理指标如表 1 所示。采用激光粒度分布仪进一步分析靖边 Q₃ 砂质黄土的颗粒组成，得到其颗粒大小分布及级配曲线如图 3 所示。由图可知，靖边砂质黄土砂粒含量为 31.60%，粉粒含量为 60.02%，黏粒含量为 8.38%，不均匀系数为 $C_u=5.5$ ，曲率系数为 $C_c=1.48$ ，属于不良级配的土。

表 1 靖边砂质黄土基本物理指标

Table 1 Basic physical indexes of sandy loess in Jingbian			
天然密度/(g·cm ⁻³)	干密度/(g·cm ⁻³)	天然含水率/%	土粒相对密度
1.82	1.69	7.83	2.69

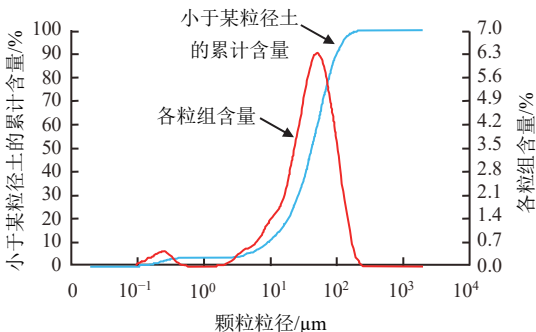


图 3 靖边砂质黄土颗粒级配曲线
Fig.3 Grain size distribution curves of sandy loess in Jingbian

为进一步探明砂质黄土矿物成分，采用普析 XD-3 自动 X 射线粉末衍射仪进行矿物成分鉴定。试验时首先制备过 0.15 mm 筛孔的风干土试样；其

次将制备好的试样填入开有试样孔的载样片上，填入试样时使其厚度略高出载样片，用软毛刷小心地扫除多余土样后，将载样片插在 X 射线衍射仪进行试验。通过试验测试得到靖边砂质黄土的矿物成分如图 4 所示。由图可知，靖边砂质黄土的矿物成分以石英、钠长石、白云母以及方解石为主。

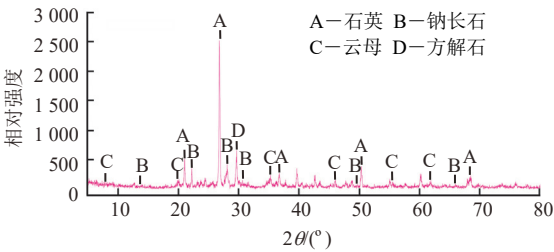


图 4 靖边砂质黄土矿物成分
Fig.4 Mineral compositions of sandy loess in Jingbian

2.3 试验方案设计

砂质黄土室内湿陷试验采用双线法，所用仪器为 WG 型单杠杆固结仪（见图 5），所用环刀尺寸为 $\phi 61.8\text{ mm}\times 20\text{ mm}$ ，试验时，以原状土的含水率 7.83%和干密度 1.69 g/cm^3 为依据，设置含水率分别为 1.83%、4.83%、7.83%和 11.83%，干密度分别为 1.59、1.64、1.69、1.74 g/cm^3 ，加载压力分别为 25、50、100、150、200 kPa，达到湿陷稳定标准为连续 2 次每小时变形量不大于 0.01 mm。试验考虑 4 种含水率、4 种干密度、5 种加载压力，共计开展室内湿陷试验 80 次，试验方案如表 2 所示。

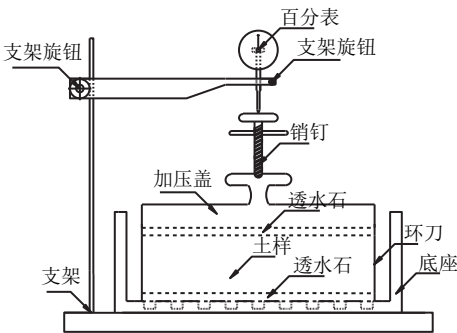


图 5 WG 型单杠杆固结仪
Fig.5 WG single lever consolidation instrument

表 2 砂质黄土湿陷试验方案

Table 2 Collapsibility test scheme of sandy loess		
含水率/%	干密度/(g·cm ⁻³)	压力/kPa
1.83, 4.83, 7.83, 10.83	1.59, 1.64, 1.69, 1.74	25, 50, 100, 150, 200

3 结果分析

3.1 压缩特性变化规律

通过室内湿陷试验，得到不同干密度条件下靖

边 Q₃ 砂质黄土的 e - P 曲线如图 6 所示。

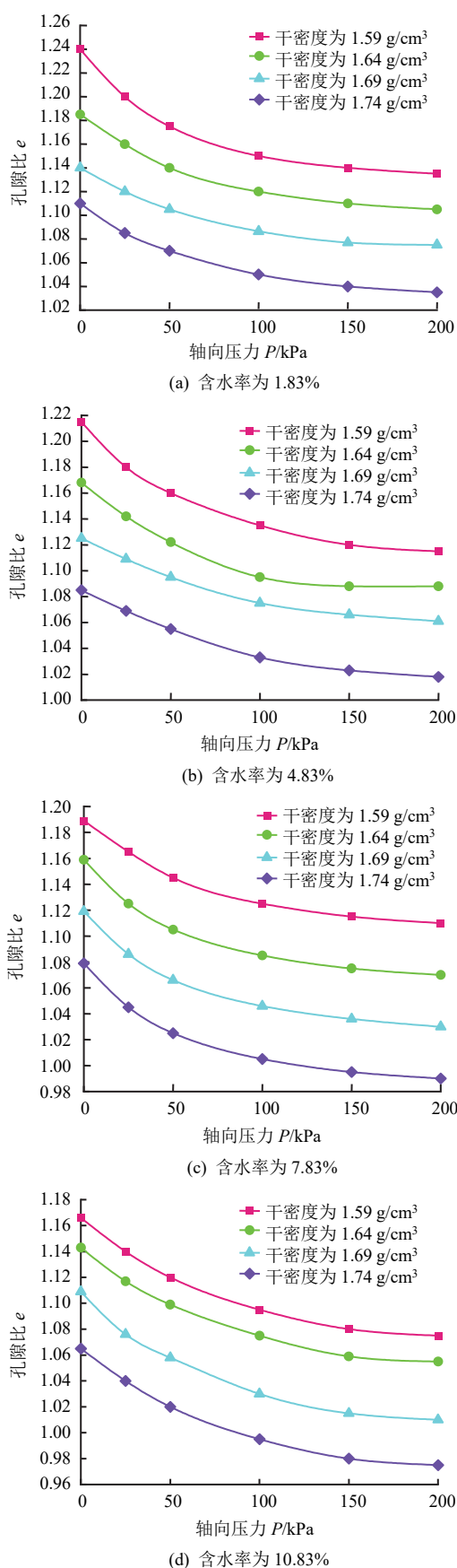


图 6 不同干密度下孔隙比随轴向压力变化曲线

Fig.6 Variation of pore ratio with axial pressure under different dry densities

由图 6 可知, 开始加压时, 孔隙体积减少很快, 曲线斜率较大, 表明该阶段主要是接触不稳定颗粒移动产生变形。随着压力的增加和进一步压缩, 孔隙中水和气体被挤出, 孔隙体积逐渐变小。当孔隙中水和气体不再被挤出时, 土的压缩逐渐停止, e - P 曲线也逐渐趋于平缓。同一轴向压力下, 干密度越大, e - P 曲线越平缓, 表明干密度越大, 土被压缩的越密实。由 e - P 曲线可以得到不同干密度下靖边 Q₃ 砂质黄土的压缩性指标如表 3 所示。由表可知, 不同靖边 Q₃ 砂质黄土属于中压缩性土。需要说明的是, 在表 3 中含水率为 7.83%, 干密度为 1.69 g/cm³ 是原状土 (下同) 试样得到的压缩性指标, 其余均为重塑土试样得到的压缩性指标。

表 3 砂质黄土压缩性指标

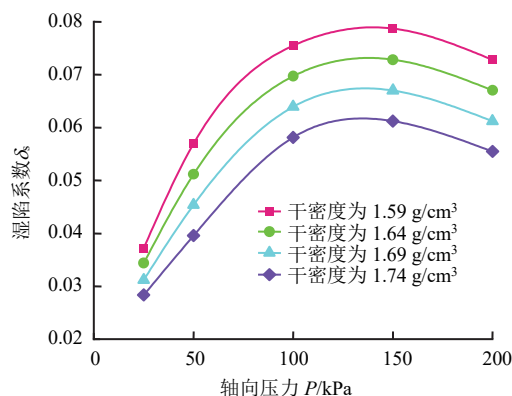
Table 3 Compressibility indices of sandy loess

含水率/%	干密度/(g · cm ⁻³)	压缩系数 a_{1-2}	压缩模量/MPa ⁻¹
1.83	1.59	0.14	14.72
	1.64	0.14	14.03
	1.69	0.15	13.86
	1.74	0.15	13.57
4.83	1.59	0.16	12.58
	1.64	0.16	12.62
	1.69	0.17	11.72
	1.74	0.17	11.45
7.83	1.59	0.17	11.07
	1.64	0.18	10.80
	1.69	0.18	10.69
	1.74	0.18	10.27
10.83	1.59	0.18	10.38
	1.64	0.19	10.28
	1.69	0.20	10.05
	1.74	0.20	9.88

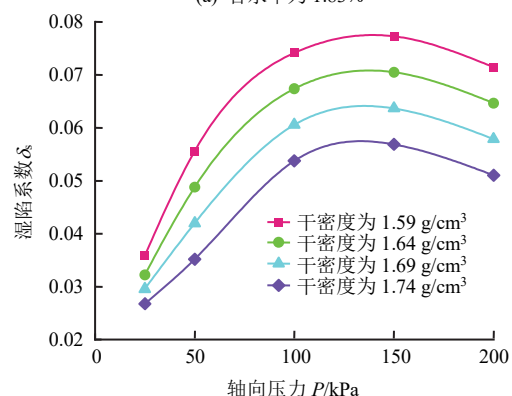
3.2 湿陷性变化规律

3.2.1 湿陷系数 δ_s 随轴向压力变化规律

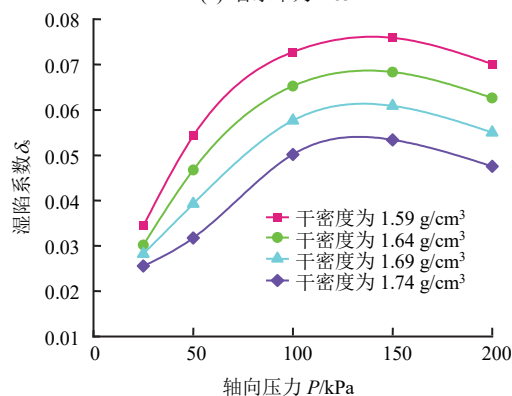
在压缩特性分析的基础上, 进一步分析靖边 Q₃ 砂质黄土的湿陷特性, 可以得到其不同干密度条件下 δ_s - P 曲线, 如图 7 所示。由图可知, 不同干密度条件下靖边 Q₃ 砂质黄土的湿陷系数随着轴向压力的增加呈现先增加后减小的趋势, 湿陷变形曲线呈现出抛物线型。轴向压力由初始状态增加至 100 kPa 时, 湿陷系数随轴向压力升高迅速增长, δ_s - P 曲线较陡, 表明湿陷变形迅速增加。随着轴向压力逐渐增大至 150 kPa, 湿陷系数随轴向压力升高增速变缓, δ_s - P 曲线逐渐趋于平缓, 轴向压力在 150 kPa 时湿陷系数达到峰值, 表明湿陷变形程度最大。随着轴向压力进一步增大, 湿陷系数逐渐减小, 表明湿陷变形增量逐渐减小。这是由于随着水与轴向压



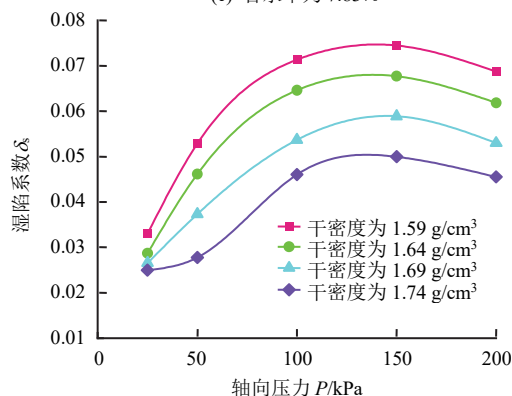
(a) 含水率为 1.83%



(b) 含水率为 4.83%



(c) 含水率为 7.83%



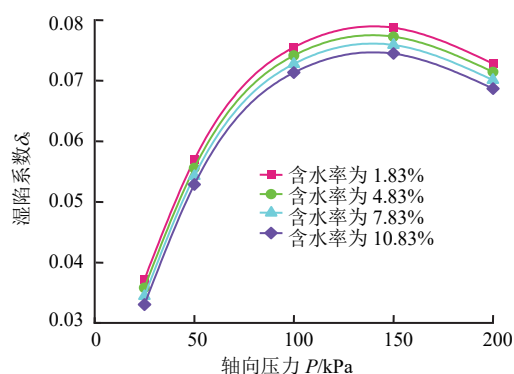
(d) 含水率为 10.83%

图 7 不同干密度下湿陷系数随轴向压力变化曲线
Fig.7 Variation of collapsibility coefficient with axial pressure under different dry densities

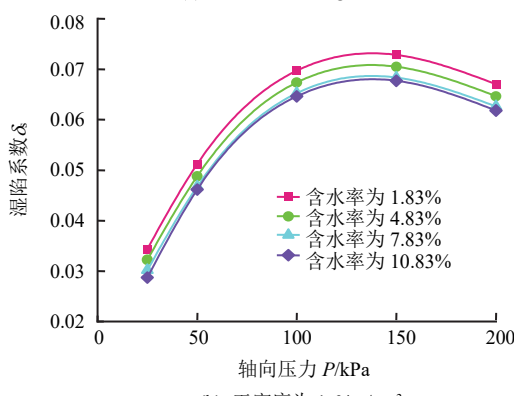
力的介入, 粒间孔隙崩塌, 湿陷量逐渐增大, 随着孔隙逐渐转变为镶嵌孔隙, 在压力增大的作用下,

其孔隙逐渐被压密, 湿陷量逐渐减小。

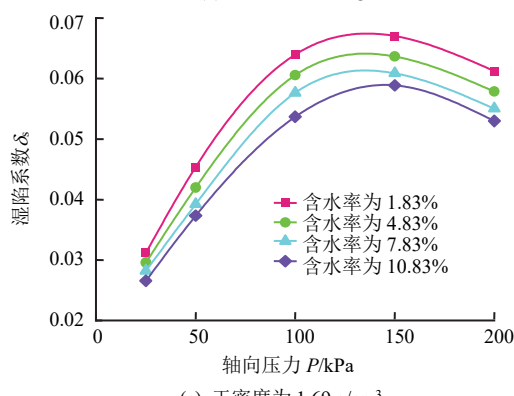
绘制同一干密度下不同含水率湿陷系数随轴向压力变化曲线, 如图 8 所示。由图可知, 不同含水



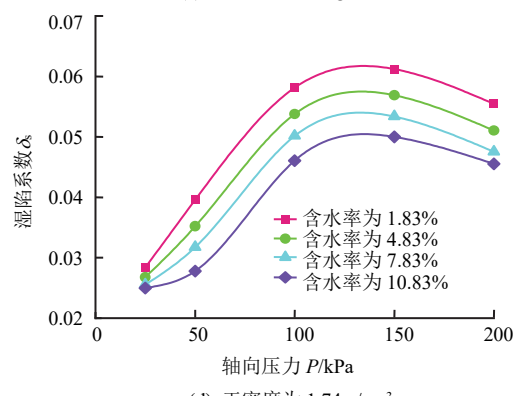
(a) 干密度为 1.59 g/cm³



(b) 干密度为 1.64 g/cm³



(c) 干密度为 1.69 g/cm³



(d) 干密度为 1.74 g/cm³

图 8 不同含水率下湿陷系数随轴向压力变化曲线
Fig.8 Variation of collapsibility coefficient with axial pressure under different water contents

率条件下靖边 Q₃ 砂质黄土的湿陷系数随着轴向压力的增加呈现先增加后减小的趋势,湿陷变形曲线呈抛物线型。

3.2.2 湿陷系数随含水率变化规律

以含水率为自变量,湿陷系数为因变量,得到

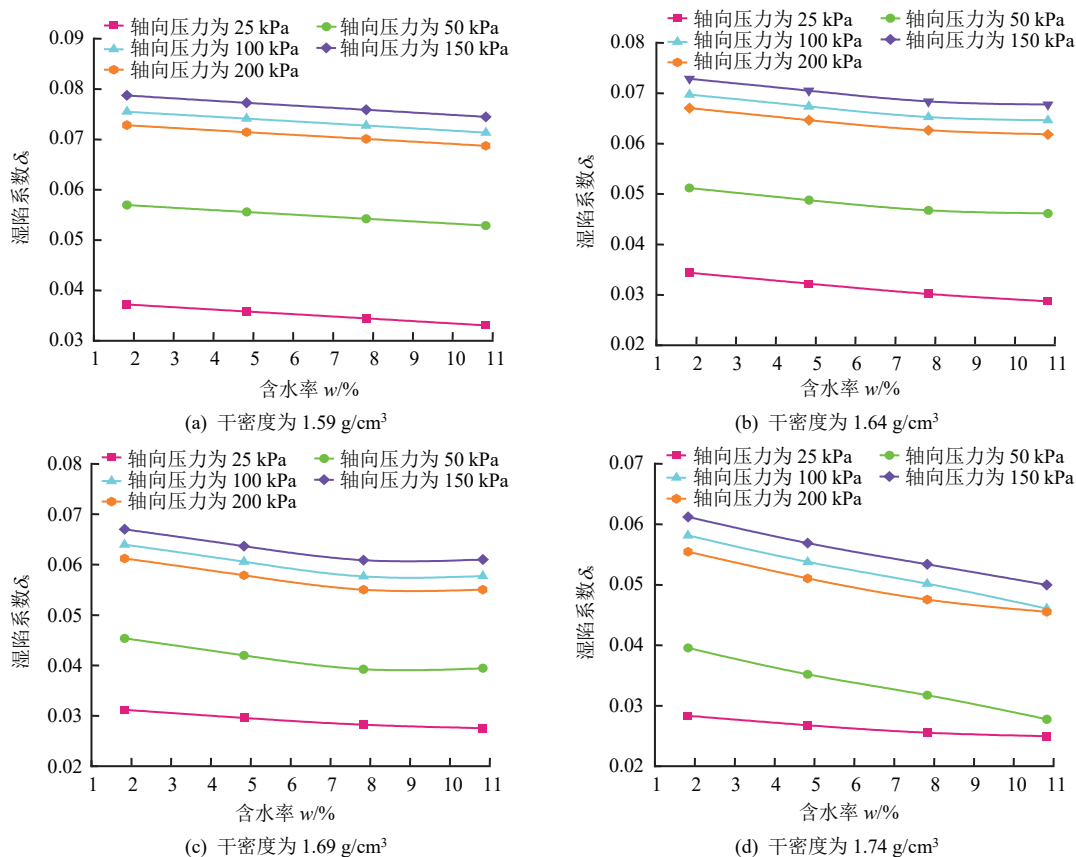


图 9 湿陷系数随含水率变化曲线

Fig.9 Variation of collapsibility coefficient with moisture content

黄土的微结构和胶结物产生影响。受到水的作用,黄土的胶结物与颗粒会变得更加紧密,强度也会变大,原状黄土中的黏土颗粒胶结作用减弱。根据室内湿陷试验结果可知靖边某天然气场地类型为自重湿陷性场地,结合《湿陷性黄土地区建筑标准》(GB 50025—2018)^[31]可知,区内 Q₃ 砂质黄土的湿陷程度为中等湿陷,其黄土地基的湿陷等级为Ⅱ级(中等)自重湿陷性。考虑到场地建筑类型为丙类建筑,且涉及油气管道,采取结构措施和检漏防水措施,并消除地基部分湿陷量的最小处理厚度。

3.2.3 湿陷系数随干密度变化曲线

以干密度为自变量,湿陷系数为因变量,得到靖边 Q₃ 砂质黄土的 $\delta_s - \rho_d$ 曲线如图 10 所示。由图可知,靖边 Q₃ 砂质黄土的湿陷系数随着干密度增加逐渐减小, $\delta_s - \rho_d$ 曲线下降幅度明显。表明湿陷系数随干密度的增加其衰减速率较大,亦即干密度对

靖边 Q₃ 砂质黄土的 $\delta_s - w$ 曲线如图 9 所示。由图可知,靖边砂质黄土的湿陷系数随着含水率的增加逐渐减小, $\delta_s - w$ 曲线呈现出直线型下降趋势,曲线接近水平,表明含水率对靖边 Q₃ 砂质黄土的湿陷变形影响较小。含水率对黄土湿陷性的影响主要是对

靖边 Q₃ 砂质黄土的湿陷变形影响较大。究其原因,是因为干密度越大,土的密实程度往往越高,孔隙比较小,所以黄土的湿陷性弱。

4 砂质黄土湿陷微观机制研究

4.1 扫描电镜试验

在室内湿陷试验的基础上,采用 JSM-7610F 场发射电子显微镜开展扫描电镜试验。试验时,考虑不同干密度对黄土内部结构的影响,制备两组试样,试样 1 为重塑样 ($\rho_d=1.6 \text{ g/cm}^3$, $w=11\%$),试样 2 为原状样 ($\rho_d=1.7 \text{ g/cm}^3$, $w=11\%$)。对于湿陷后试样,通过冻结法将其冻结,避免人为扰动试样(尤其是破坏土样内部结构)而影响试验结果,试验时取出冻结试样并进行风干。

扫描电镜试验时,对湿陷前、后的砂质黄土的环刀试样(见图 11(b)),使用小型取土器取出扫描

电镜试验所需样品（见图 11(c)），对所取试样进行风干、固化（见图 11(d)）、切割（见图 11(e)）、抛光（见图 11(f)）与喷金，将试样装入场发射扫描电子显微镜，采用 250 倍与 500 倍放大倍数进行分析观察。其中，风干为湿陷试验后的自然风干，保证其水分缓慢蒸发，这样不会对土体内部结构产生太大影响，且满足扫描电镜试验真空状态试验条件；

在风干后，采取添加环氧树脂、丙酮、乙二胺和邻苯二甲酸丁二酯混合硬化剂的方法对试样进行固化，以保证在切割时磨片和抛光处理时土样原本的结构；固化完成后进行切割、抛光，并进行喷金使黄土具有一定的导电性，保证样品表面能成功发出电子信号，镀金后的样品应及时放进扫描电镜中观察，避免金发生氧化。

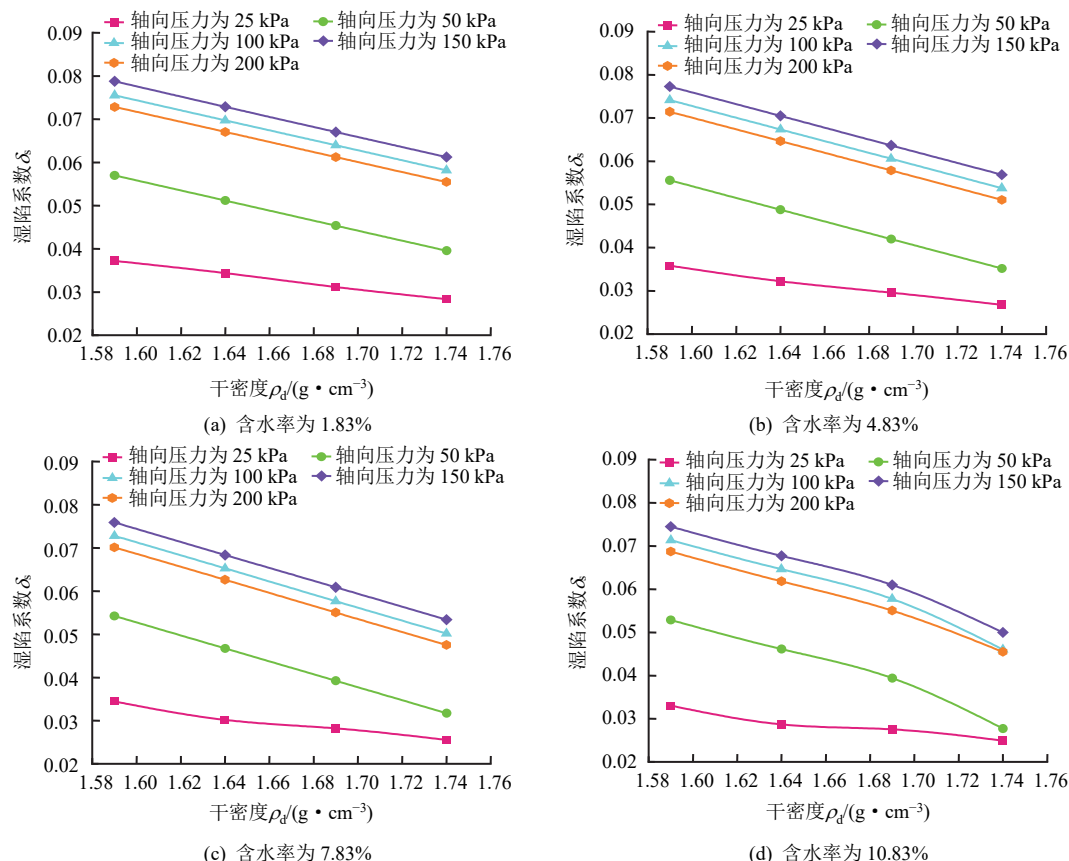


图 10 湿陷系数随干密度变化曲线

Fig.10 Variation of collapsibility coefficient with dry density

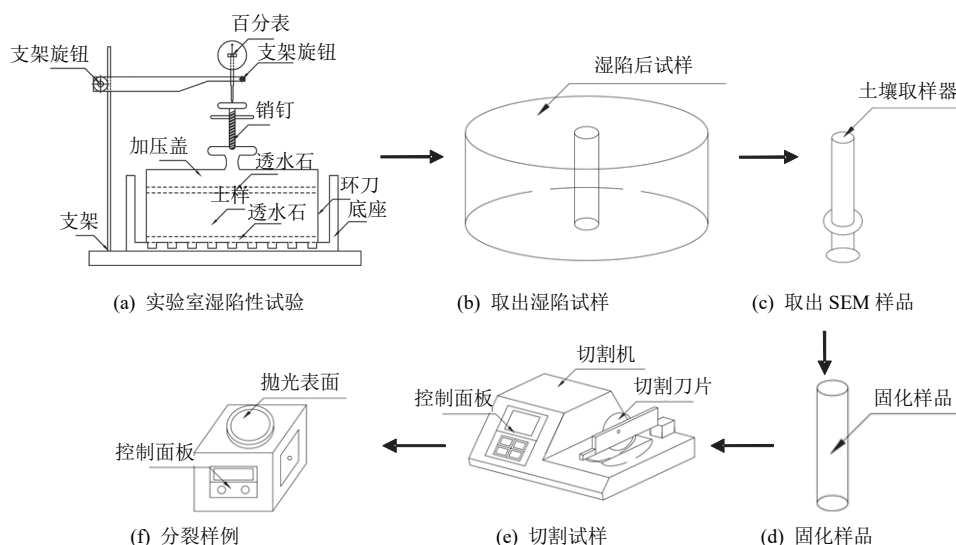


图 11 扫描电镜试验实施步骤

Fig.11 Procedure of SEM test

4.2 试验结果分析

4.2.1 砂质黄土微观结构

通过对靖边 Q₃ 砂质黄土试样进行湿陷前、后的扫描电镜试验, 得到其微观结构如图 12 所示。

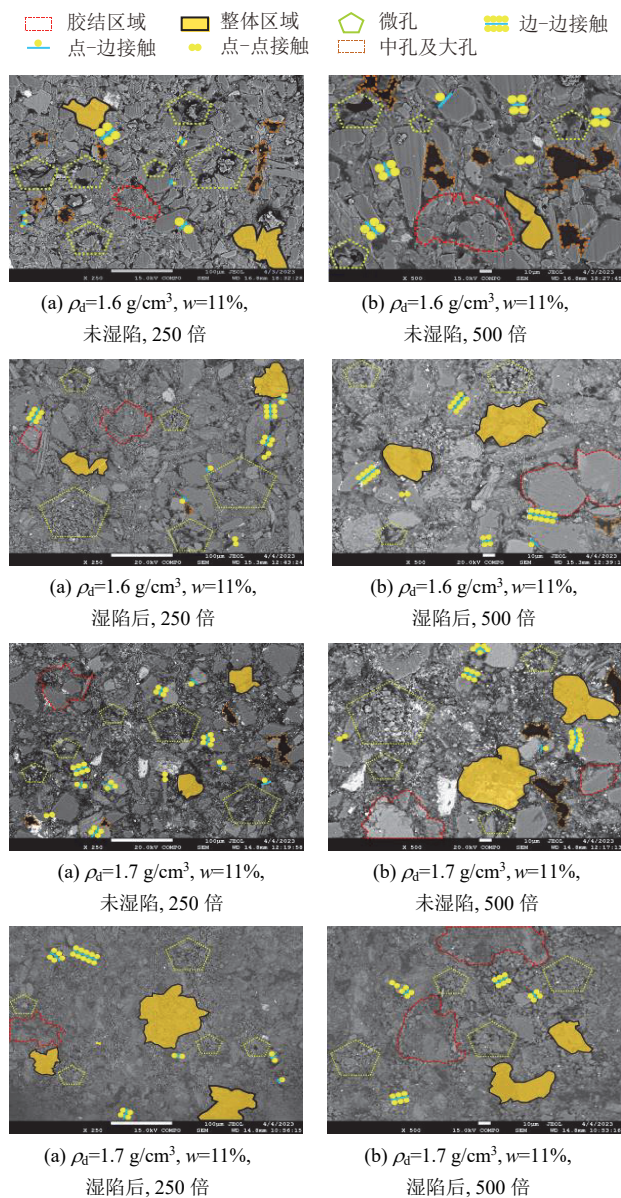


图 12 靖边砂质黄土微观结构

Fig.12 Microstructure of sandy loess in Jingbian

由图 12(a)、12(b)、12(e)、12(f)可知, 靖边 Q₃ 砂质黄土在同一含水率不同干密度未湿陷时, 其主体结构主要为架空结构, 存在较多架空孔隙, 其次为镶嵌孔隙, 具有少量的胶结物孔隙; 颗粒间的接触方式主要以点-点为主, 点-边、边-边接触形式次之, 黏粒主要以包裹附着于颗粒表面为主。对比图 12(a)与 12(e)、12(b)与 12(f)发现, 在干密度增大时, 架空孔隙与镶嵌孔隙明显减少, 存在面积较大的胶结物孔隙。由图 12(c)、12(d)、12(g)、12(h)可知,

靖边 Q₃ 砂质黄土在同一含水率不同干密度湿陷后, 架空孔隙完全消失, 但仍有少量镶嵌孔隙与胶结物孔隙; 颗粒间的接触方式主要以点-点、边-边接触两种形式存在, 点-边接触几乎不存在; 黏粒与细小颗粒充当连接与填充孔隙的作用; 对比图 12(c)与 12(g)、12(d)与 12(h)发现, 在干密度增大时, 颗粒间多个单粒与黏粒形成一个团聚体, 组成整体结构。进一步从颗粒形貌、颗粒分布、粒间接触方式及颗粒间胶结形式 4 个方面对靖边 Q₃ 砂质黄土的微观结构特征进行分析, 并与粉质黄土、黏质黄土的微观结构进行对比 (见图 13)。

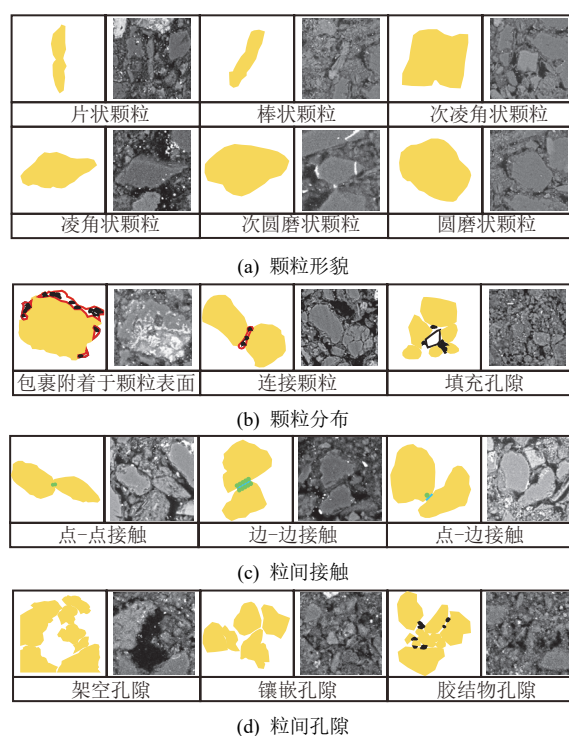


图 13 不同粒度成分黄土的微观结构特征

Fig.13 Microstructure characteristics of loess with different grain size compositions

首先, 在颗粒形貌方面, 砂质黄土多为次棱角状、棱角状, 粉质黄土多为片状、棒状, 黏质黄土多为次圆磨状、圆磨状。其次, 在黏粒分布特征方面, 砂质黄土中的黏粒多包裹附着于颗粒表面, 粉质黄土多连接颗粒, 黏质黄土多填充于孔隙之中。再次, 在粒间接触方式方面, 砂质黄土中的颗粒主要以点-点为主, 点-边、边-边接触形式次之; 粉质黄土中的颗粒主要以点-边为主, 点-点、边-边接触形式次之; 黏质黄土中的颗粒主要以边-边为主, 点-点、点-边接触形式次之。最后, 在颗粒间胶结形式方面, 砂质黄土主要以架空孔隙为主, 镶嵌孔隙及胶结物孔隙较少; 粉质黄土主要以镶嵌孔隙为

主, 架空孔隙及胶结物孔隙较少; 黏质黄土主要以胶结物孔隙为主, 架空孔隙及镶嵌孔隙较少。

可见靖边砂质黄土湿陷过程受砂土颗粒、粉土颗粒和黏土颗粒的颗粒形貌、颗粒分布、粒间接触方式及颗粒间胶结形式影响显著, 尤其是砂土颗粒的存在, 显著影响了其湿陷性。靖边原状砂质黄土砂颗粒含量较多, 湿陷前黏粒主要包裹附着于砂土颗粒的表面, 有少部分黏粒聚集在砂土颗粒之间, 起到连接颗粒的作用, 使得颗粒与颗粒之间形成团聚体。湿陷后团聚体基本消失, 原本包裹附着于颗粒表面的黏粒有部分也散落在颗粒之外, 轴向压力导致土颗粒发生重新排列, 颗粒出现了较多的边-边接触, 点-点接触减少最为明显, 导致架空孔隙明显减少, 多转化为镶嵌孔隙。

4.2.2 砂质黄土微观参数

为了更精确地识别颗粒和孔隙的边界, 使用孔隙 (颗粒) 及裂隙图像识别与分析系统 (particles (pores) and cracks analysis system, PCAS) 对扫描电镜试验结果进行识别分析。通过 PCAS 可以得到靖边 Q_3 砂质黄土的微观结构量化参数, 包括湿陷前后的孔径数量与分布、方向角及丰度。

(1) 孔径分布

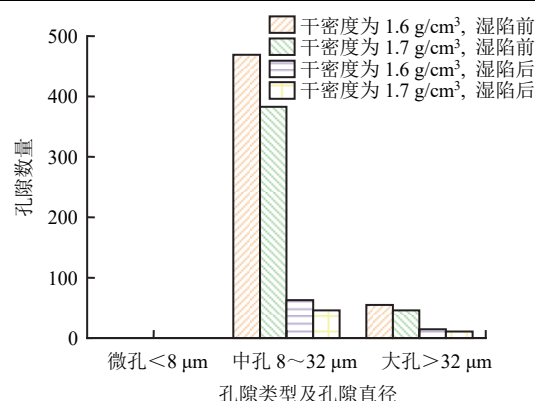
根据孔隙的直径大小将其分为孔隙直径 $<8\ \mu\text{m}$ 的微孔、孔隙直径在 $8\sim32\ \mu\text{m}$ 的中孔、孔隙直径 $>32\ \mu\text{m}$ 的大孔^[32]。绘制靖边 Q_3 砂质黄土的孔径分布图如图 14 所示。

由图可知, 同一含水率干密度条件下, 不同放大倍数下靖边 Q_3 砂质黄土湿陷前均以中孔最为丰富, 其次为大孔, 未出现微孔; 湿陷后中孔、大孔均急剧降低, 尤其是中孔个数降幅近 90%, 大孔隙也降低了近 67%; 干密度的增加会降低试样的孔隙数量 (中孔和大孔)。由此可见, 颗粒间黏粒胶结强度降低, 架空结构崩塌, 颗粒重新排列组合填充, 小颗粒填充于大孔隙之间, 架空孔隙消失, 孔隙类型转换为个别镶嵌孔隙及胶结孔隙是靖边 Q_3 砂质黄土的湿陷变形的本质。

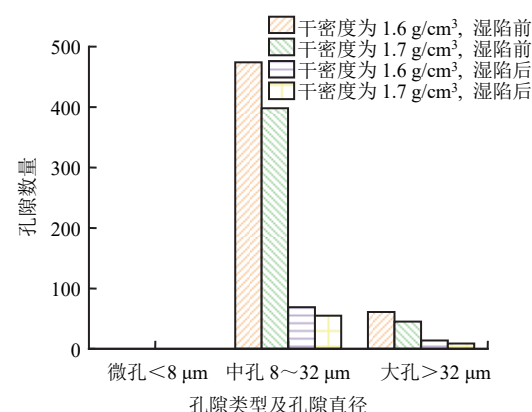
(2) 孔隙方向频率

方向角是指颗粒或孔隙的长轴与同一平面法线方向的夹角。方向频率定义为在 0° 到 180° 之间每 10° 区间内方向角的比例^[33]。据此绘制靖边 Q_3 砂质黄土的孔隙方向频率如图 15 所示。

由图 15 可知, 同一含水率同一干密度条件下, 不同放大倍数下靖边 Q_3 砂质黄土湿陷前颗粒方向集中在 $0^\circ\sim45^\circ$ 与 $135^\circ\sim180^\circ$ 之间, 湿陷试验后颗粒方向集中减少, 且 0° 、 90° 、 180° 方向的孔隙减少



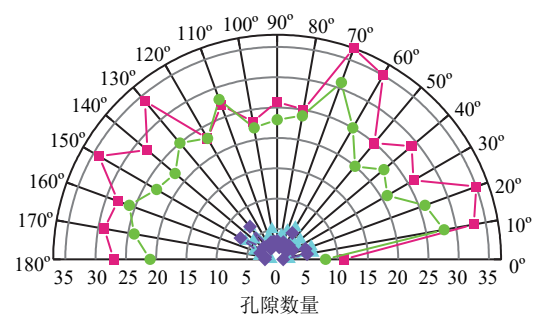
(a) 含水率为 11%, 放大 250 倍



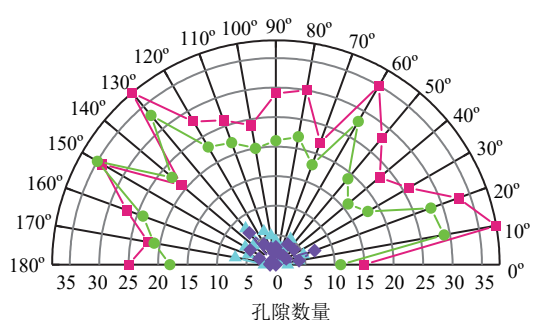
(b) 含水率为 11%, 放大 500 倍

图 14 靖边砂质黄土孔径分布

Fig.14 Pore size distribution of sandy loess in Jingbian



(a) 含水率为 11%, 放大 250 倍



(b) 含水率为 11%, 放大 500 倍

图 15 靖边砂质黄土方向频率

Fig.15 Direction frequency of sandy loess in Jingbian

最为明显，表明垂直方向与水平方向的孔隙更容易压缩变形。随着干密度增加，孔隙方向频率会发生一定变化，但变化的幅度较小。

(3) 孔隙丰度

丰度 C 为单位颗粒或孔隙的短轴长度 W 与长轴长度 L 之比，即 $C=W/L$ ，其范围为 $0\sim 1$ ，丰度的值越大表示形状越趋向圆形^[30]。据此绘制靖边 Q₃ 砂质黄土的孔隙丰度如图 16 所示。由图可知，含水率和干密度都相同的条件下，不同放大倍数下靖边 Q₃ 砂质黄土湿陷试验前至湿陷试验后孔隙丰度均变大，表明湿陷后颗粒间的孔隙重新排列组合，大、中孔隙结构和不规则形状的孔隙基本消失。同时，随着干密度的增大，孔隙平均丰度均逐渐增大，表明干密度增加与湿陷后孔隙形态更趋于椭圆形。

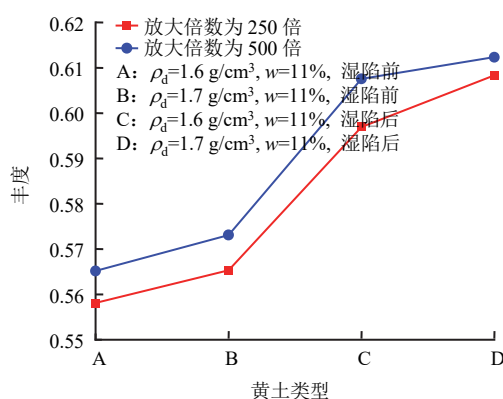


图 16 靖边砂质黄土孔隙丰度

Fig.16 Porosity abundance of sandy loess in Jingbian

4.3 砂质黄土微观湿陷机制讨论

通过湿陷前后砂质黄土成因、颗粒形态、排列方式、接触形式与胶结形式微观结构的变化，提出靖边 Q₃ 砂质黄土湿陷微观机制概念模型，如图 17 所示，进而对其微观湿陷机制进行讨论分析。

4.3.1 湿陷前砂质黄土微观结构特征

从砂质黄土成因分析，其一般为风积成因，在形成时气候干燥，加上颗粒风力搬运距离较短，沉积的颗粒相对较大，结合其颗粒分析试验可知其砂粒含量多，黏粒含量相对较少。图 17(a)给出了湿陷前砂质黄土颗粒形态、排列方式、接触形式与胶结形式，具体描述如下。

从砂质黄土颗粒形态分析，砂质黄土颗粒风力搬运距离较短，使得其颗粒形态多以棱角状亦或次棱角状为主，次圆磨状及圆磨状颗粒相对较少。

从砂质黄土颗粒排列方式分析，其颗粒接触形式多为点-点接触，黏粒胶结物分布在骨架颗粒接触处，由于砂土颗粒较多，颗粒间极易形成架空结构，

对应的孔隙类型为架空孔隙，同时含有少量的镶嵌孔隙和胶结孔隙。

从砂质黄土颗粒接触形式分析，砂土颗粒棱角状的颗粒形态使得其颗粒接触形式以点-点接触为主，有少量点-边、边-边形式接触。

从砂质黄土颗粒胶结方式分析，其颗粒接触形式为点-点接触形式时，黏粒胶结物分布在骨架颗粒接触处，黏粒含量决定了颗粒间的胶结牢固程度；其颗粒接触形式为点-边接触形式时，黏粒胶结物附着在较大的颗粒表面，在颗粒表面形成一层黏粒附着的膜，在一定程度上加强了颗粒间的连接；其颗粒接触形式为边-边接触时，黏粒胶结物包裹少量碎屑颗粒，构成凝块结构，对黄土骨架结构起到支撑作用。

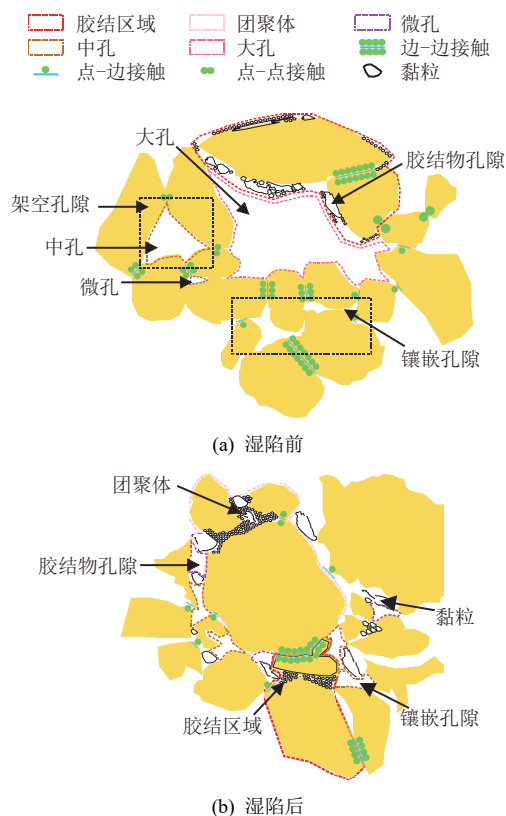


图 17 靖边砂质黄土微观湿陷机制

Fig.17 Microscopic collapsibility mechanism of sandy loess in Jingbian

4.3.2 湿陷后砂质黄土微观结构特征

如图 17(b)所示，浸水饱和和湿陷后，砂质黄土颗粒间黏粒胶结强度降低，架空结构崩塌，颗粒重新排列组合填充，小颗粒填充于大孔隙之间，颗粒之间的接触面积增加，颗粒接触形式变为边-边接触，架空孔隙消失，孔隙类型转换为个别镶嵌孔隙及胶结孔隙，黏粒包裹附着于颗粒表面连接大、小颗粒，同时填充于大、小颗粒形成的微孔隙之间，形成较

大的团聚体。同时,随着浸水饱和湿陷,颗粒表面形成的黏粒包裹膜被润滑,黏粒胶结物包裹少量碎屑颗粒形成的凝块结构在水的作用下强度降低,产生沉降变形。

因此,靖边砂质黄土湿陷的机制可认为砂土颗粒的广泛存在是前提,黏土颗粒包裹砂土颗粒是条件,由砂土颗粒较多而形成的架空孔隙结构崩塌是砂质黄土湿陷变形的本质,为湿陷提供主要空间。黏粒胶结物包裹少量碎屑颗粒形成的凝块结构产生的沉降变形为砂质黄土湿陷变形提供了增量。

5 结 论

本文对沙漠-黄土高原过渡区的靖边 Q_3 砂质黄土进行了室内基本物理性质、X 射线衍射、湿陷试验研究。通过试验研究砂质黄土基本物理特性和物质组成,厘清湿陷特性、影响因素及其规律,探究砂质黄土湿陷前后的微观结构,孔隙大小分布、方向频率及丰度变化,从微观角度揭示砂质黄土湿陷机制。得出主要结论如下:

(1)靖边 Q_3 砂质黄土属不良级配的土,矿物成分以石英、钠长石、白云母以及方解石为主。具湿陷性且湿陷系数随着轴向压力的增加先增加后减小,随着干密度、含水率的增加而逐渐减小,轴向压力为 150 kPa 时湿陷系数达到峰值。

(2)靖边 Q_3 砂质黄土颗粒形态多以棱角状亦或次棱角状为主,多具架空排列结构和架空孔隙,以点-点接触为主,黏粒胶结物多分布在骨架颗粒接触处。

(3)靖边 Q_3 砂质黄土的架空孔隙结构崩塌是砂质黄土湿陷变形的本质,为湿陷提供主要空间。黏粒胶结物包裹少量碎屑颗粒形成的凝块结构产生的沉降变形为砂质黄土湿陷变形提供了增量。

本文所做工作为长庆油、气田工程建设区砂质黄土湿陷性评价提供数据依据,后续可进一步开展长庆油、气田工程建设区不同类型黄土(砂质、粉质、黏质黄土)的微观结构特征及湿陷机制研究,构建不同类型黄土湿陷性评价方法。

参 考 文 献

[1] 蔡国庆, 韩博文, 韦靖威, 等. 复杂水-力路径下非饱和砂质黄土增湿变形特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(增刊 1): 3073-3080.
CAI Guo-qing, HAN Bo-wen, WEI Jing-wei, et al. Wetting deformation characteristics of unsaturated sandy loess under complex hydro-mechanical paths[J]. *Chinese*

Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(Suppl.1): 3073-3080.

[2] 周凤玺, 周志雄, 邵生俊. 非饱和黄土的增湿湿陷变形特性分析[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(增刊 1): 36-40.
ZHOU Feng-xi, ZHOU Zhi-xiong, SHAO Sheng-jun. Wetting deformation properties of unsaturated collapsible loess[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, 43(Suppl.1): 36-40.

[3] 吴占东. 冻融环境浅埋砂质黄土隧道围岩变形规律研究[J]. 铁道工程学报, 2021, 38(1): 55-59.
WU Zhan-dong. Research on the surrounding rock deformation law of shallow buried sandy loess tunnel in freeze-thaw environment[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2021, 38(1): 55-59.

[4] 王开洋, 余相贵, 林达明. 浅埋风积砂质黄土隧道变形综合控制技术研究[J]. 工程地质学报, 2022, 30(4): 1223-1234.
WANG Kai-yang, YU Xiang-gui, LIN Da-ming. Comprehensive deformation control technology for shallow buried tunnel in aeolian sandy loess[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2022, 30(4): 1223-1234.

[5] 刘东生. 黄土的物质成分和结构[M]. 北京: 科学出版社, 1966.
LIU Dong-sheng. Material composition and structure of loess[M]. Beijing: Science Press, 1966.

[6] MAHER B A. Palaeoclimatic records of the loess/palaeosol sequences of the Chinese Loess Plateau[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2016, 154: 23-84.

[7] YAO Y G, ZHANG Y C, GAO X L, et al. Study on permeability and collapsibility characteristics of sandy loess in northern Loess Plateau, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 603(A): 126883.

[8] 刘东生, 文启忠, 郑洪汉, 等. 黄土的物质成分和结构与水土保持的关系[J]. 水土保持通报, 1981(1): 16-19.
LIU Dong-sheng, WEN Qi-zhong, ZHENG Hong-han, et al. The relationship between material composition and structure of loess and soil and water conservation[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1981(1): 16-19.

[9] 慕焕东, 邓亚虹, 张文栋. 沙漠-黄土高原过渡区砂质黄土强度试验研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2020, 48(8): 146-154.
MU Huan-dong, DENG Ya-hong, ZHANG Wen-dong. Experimental study on strength of sandy loess in the transition zone of desert and the Loess Plateau[J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2019, 48(8): 146-154.

- [10] 慕焕东, 邓亚虹, 赫佳, 等. 基于分数阶导数理论的 Q₃ 黄土流变本构模型研究[J]. 工程地质学报, 2022, 30(4): 1077-1086.
- MU Huan-dong, DENG Ya-hong, HE Jia, et al. Study on rheological model of Q₃ loess based on fractional derivative theory[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2022, 30(4): 1077-1086.
- [11] 林在贯, 舒天开. 西北黄土湿陷性之初步探讨[J]. 水文地质工程地质, 1958(4): 1-7.
- LIN Zai-guan, SHU Tian-kai. Preliminary discussion of loess collapsibility in northwest China[J]. **Hydrogeology & Engineering Geology**, 1958(4): 1-7.
- [12] 郑建国, 张苏民. 湿陷性黄土在增湿时的强度特性[J]. 水文地质工程地质, 1989(2): 6-10.
- ZHENG Jian-guo, ZHANG Su-min. The strength characteristics of collapsible loess during moistening process[J]. **Hydrogeology & Engineering Geology**, 1989(2): 6-10.
- [13] 刘祖典, 李靖, 郭增玉, 等. 陕西关中黄土变形特性和变形参数的探讨[J]. 岩土工程学报, 1984, 3(6): 24-34.
- LIU Zu-dian, LI Jing, GUO Zeng-yu, et al. Discussion on deformation characteristics and parameters of loess in Guanzhong, Shaanxi[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1984, 3(6): 24-34.
- [14] 范文, 魏亚妮, 于渤, 等. 黄土湿陷微观机理研究现状及发展趋势[J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(5): 144-156.
- FAN Wen, WEI Ya-ni, YU Bo, et al. Research progress and prospect of loess collapsible mechanism in micro-level[J]. **Hydrogeology & Engineering Geology**, 2022, 49(5): 144-156.
- [15] 陈立, 李靖, 王俊卿, 等. 黄土的结构强度及其与结构屈服压力的关系[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(6): 895-899.
- CHEN Li, LI Jing, WANG Jun-qing, et al. Relationship between structural strength and structural yield pressure of loess[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2008, 30(6): 895-899.
- [16] 崔靖俞, 张吾渝, 解邦龙, 等. 西宁地区不同深度原状黄土湿陷性及微观机理研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(增刊 2): 249-252.
- CUI Jing-yu, ZHANG Wu-yu, XIE Bang-long, et al. Collapsibility and microscopic mechanism of intact loess at different depths in Xining area[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2019, 41(Suppl.2): 249-252.
- [17] 穆青翼, 党影杰, 董琪, 等. 原状和压实黄土持水特性及湿陷性对比试验研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(8): 1496-1504.
- MU Qing-yi, DANG Ying-jie, DONG Qi, et al. Water-retention characteristics and collapsibility behaviors: comparison between intact and compacted loess[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2019, 41(8): 1496-1504.
- [18] 朱凤基, 南静静, 魏颖琪, 等. 黄土湿陷系数影响因素的相关性分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(2): 128-133.
- ZHU Feng-ji, NAN Jing-jing, WEI Ying-qi, et al. Mathematical statistical analysis on factors affecting collapsible coefficient of loess[J]. **The Chinese Journal of Geological Hazards and Control**, 2019, 30(2): 128-133.
- [19] 邵生俊, 杨春鸣, 马秀婷, 等. 黄土的独立物性指标及其与湿陷性参数的相关性分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(增刊 2): 27-34.
- SHAO Sheng-jun, YANG Chun-ming, MA Xiu-ting, et al. Correlation analysis of collapsible parameters and independent physical indices of loess[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(Suppl.2): 27-34.
- [20] LI Xi-an, LI Lin-cui, SONG Yan-xun, et al. Characterization of the mechanisms underlying loess collapsibility for land-creation project in Shaanxi Province, China: a study from a micro perspective[J]. **Engineering Geology**, 2019, 249.
- [21] HU Jin-fang, LIU Hong-tai, REN Wen-yuan, et al. An experimental study for evaluation of collapsible loess roadbed replacement method using lightweight soil[J]. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, 2023, 82(9): 359.
- [22] ZHANG Yan-jie, HAN Jian-long, WANG Xu, et al. Evaluation of loess collapsibility based on random field theory in Xi'an, China[J]. **Mathematical Problems in Engineering**, 2022, 2022: 8665061.
- [23] HUI Yang, XIE Wan-li, LIU Qi-qi, et al. Three-stage collapsibility evolution of Malan loess in the Loess Plateau[J]. **Catena**, 2022, 217: 106482.
- [24] YU B, FAN W, DIJKSTRA T A, et al. Pore structure evolution due to loess collapse: a comparative study using MIP and X-ray micro-CT[J]. **Geoderma**, 2022, 424: 115955.
- [25] 侯乐乐, 翁效林, 李林, 等. 考虑含水率影响的结构性黄土临界状态模型[J]. 岩土力学, 2022, 43(3): 737-748.
- HOU Le-le, WENG Xiao-lin, LI Lin, et al. A critical state model for structural loess considering water content[J].

- Rock and Soil Mechanics**, 2022, 43(3): 737-748.
- [26] 刘德仁, 安政山, 徐硕昌, 等. 靖远地区大厚度黄土地基浸水湿陷过程及土中竖向应力特征试验研究[J]. 岩土学, 2023, 44(1): 268-278.
- LIU De-ren, AN Zheng-shan, XU Shuo-chang, et al. Experimental study on immersion collapsibility process and vertical stress characteristics of large thickness loess foundation in Jingyuan area[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2023, 44(1): 268-278.
- [27] 蔡国庆, 张策, 黄哲文, 等. 含水率对砂质 Q_3 黄土抗剪强度影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(增刊 2): 32-36.
- CAI Guo-qing, ZHANG Ce, HUANG Zhe-wen, et al. Experimental study on influences of moisture content on shear strength of unsaturated loess[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2020, 42(Suppl.2): 32-36.
- [28] 蔡国庆, 刘倩倩, 杨雨, 等. 水-力耦合作用下干燥和湿润砂质黄土渗透特性试验研究[J]. 土木工程学报, 2022, 55(3): 74-82.
- CAI Guo-qing, LIU Qian-qian, YANG Yu, et al. Experimental study on seepage characteristics of dry and wet sandy loess under hydro mechanical coupling[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2022, 55(3): 74-82.
- [29] 蔡国庆, 韩博文, 杨雨, 等. 砂质黄土土-水特征曲线的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(增刊 1): 11-15.
- CAI Guo-qing, HAN Bo-wen, YANG Yu, et al. Experimental study on soil-water characteristic curves of sandy loess[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2020, 42(Suppl.1): 11-15.
- [30] 刘海松, 倪万魁, 颜斌, 等. 黄土结构强度与湿陷性的关系初探[J]. 岩土力学, 2008, 29(3): 722-726.
- LIU Hai-song, NI Wan-kui, YAN Bin, et al. Discussion on relationship between structural strength and collapsibility of loess[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(3): 722-726.
- [31] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50025—2018 湿陷性黄土地区建筑标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. GB 50025—2018 Standard for building construction in collapsible loess regions[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018.
- [32] HU Wen-le, CHENG Wen-Chieh, WEN Shao-jie, et al. Effects of chemical contamination on microscale structural characteristics of intact loess and resultant macroscale mechanical properties[J]. **Catena**, 2021, 203: 105361.
- [33] DUAN Zhao, LI Zhen-Yan, WU Yan-Bin, et al. Mechanical and microscopic properties of soil according to the rate of increase in pore water pressure[J]. **Soil & Tillage Research**, 2023, 225: 105530.

上接第 3023 页

- [37] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 41-46.
- YANG Shi-ming, TAO Wen-shuan. Theory of heat[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006: 41-46.
- [38] 程超, 于文刚, 贾婉婷, 等. 岩石热物理性质的研究进展及发展趋势[J]. 地球科学进展, 2017, 32(10): 1072-1083.
- CHENG Chao, YU Wen-gang, JIA Wan-ting, et al. Research progress and development tendency about thermal physical properties of rocks[J]. **Advances in Earth Science**, 2017, 32(10): 1072-1083.
- [39] 贾蓬, 杨其要, 刘冬桥, 等. 高温花岗岩水冷却后物理力学特性及微观破裂特征[J]. 岩土力学, 2021, 42(6): 1568-1578.
- JIA Peng, YANG Qi-yao, LIU Dong-qiao, et al. Physical and mechanical properties and related microscopic characteristics of high-temperature granite after water-cooling[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2021, 42(6): 1568-1578.
- [40] 陈世万, 杨春和, 刘鹏君, 等. 热损伤后北山花岗岩裂隙演化及渗透率试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(8): 1493-1500.
- CHEN Shi-wan, YANG Chun-he, LIU Peng-jun, et al. Evolution of cracks and permeability of granites suffering from different thermal damages[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2017, 39(8): 1493-1500.
- [41] 邵保平, 吴阳春, 王帅, 等. 青海共和盆地花岗岩高温热损伤力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(1): 69-83.
- XI Bao-ping, WU Yang-chun, WANG Shuai, et al. Experimental study on mechanical properties of granite taken from Gonghe basin, Qinghai province after high temperature thermal damage[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2020, 39(1): 69-83.