



引文格式: 纪成亮, 谢婉丽, 刘琦琦, 等. 矿物-孔隙耦合作用控制下富县黄土增湿变形差异性[J]. 西北地质, 2026, 59(2): 59–71. DOI: 10.12401/j.nwg.2025136

Citation: JI Chengliang, XIE Wanli, LIU Qiqi, et al. Differences in Loess Wetting-Induced Deformation in Fuxian County Controlled by Mineral-Pore Coupling Effects[J]. Northwestern Geology, 2026, 59(2): 59–71. DOI: 10.12401/j.nwg.2025136

矿物-孔隙耦合作用控制下富县黄土增湿变形差异性

纪成亮¹, 谢婉丽^{2,3,4,*}, 刘琦琦^{2,3,4}, 周嘉豪^{2,3,4}, 马陈^{2,3,4}, 曲晨飞¹, 李仁杰¹, 王立波¹

(1. 山东电力工程咨询院有限公司勘测事业部, 山东 济南 250013; 2. 西北大学地质学系, 陕西 西安 710069;

3. 西北大学, 大陆动力与早期生命演化全国重点实验室, 陕西 西安 710069; 4. 西北大学,

西安市黄土动力灾害与低碳修复重点实验室, 陕西 西安 710069)

摘 要: 黄土增湿变形机理研究对黄土高原地区工程灾害防控具有重要价值, 本研究以陕北富县 Q_{3p} 与 Q_{2p} 黄土为研究对象, 旨在揭示不同地质时代黄土在增湿条件下的变形规律及内在机理。通过系统的物理力学试验、矿物成分分析、扫描电镜观测以及多工况固结-湿陷试验, 系统开展了两类黄土的工程特性对比研究。试验结果表明, 两类黄土的固结变形过程均可划分为低压缓慢增长、中压加速变形和高压趋于稳定 3 个阶段, 且在高压条件下黄土的固结变形对初始含水率变化更为敏感。随着初始含水率的增加, Q_{3p} 试样的压缩变形显著加剧, 而 Q_{2p} 试样变形则呈现减弱趋势。在湿陷试验中, 两组试样表现出截然相反的变形特征: Q_{3p} 试样表现为典型湿陷, 其湿陷系数随压力增大呈现先增后减趋势, 而 Q_{2p} 试样则表现出一定膨胀特性。随着初始含水率的增加, Q_{3p} 试样的湿陷系数逐渐减小, 而 Q_{2p} 试样的膨胀性也相应减弱。微观结构分析表明, 黄土微观结构的稳定程度, 特别是大孔隙的存在为压缩和湿陷变形提供了必要的空间条件。矿物成分分析指示, 易溶盐矿物(如方解石)的溶解会加剧土体的压缩和湿陷变形, 而黏土矿物(如伊利石)的吸水膨胀效应则在一定程度上抑制了土体的压缩和湿陷特性。研究表明, 矿物成分与微观结构耦合作用对黄土增湿变形行为的控制机制, 为黄土地区的工程建设和地质灾害防治提供了重要的理论依据和实践指导。

关键词: 黄土; 增湿变形; 扫描电镜; 微观机理

中图分类号: P642.3; TU43

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2026)02-0059-13

Differences in Loess Wetting-Induced Deformation in Fuxian County Controlled by Mineral-Pore Coupling Effects

Ji Chengliang¹, Xie Wanli^{2,3,4,*}, Liu Qiqi^{2,3,4}, Zhou Jiahao^{2,3,4}, Ma Chen^{2,3,4}, Qu Chenfei¹, Li Renjie¹, Wang Libo¹

收稿日期: 2025-10-11; 修回日期: 2025-11-14; 责任编辑: 曹佰迪

基金项目: 国家自然科学基金项目(42372320、41972292), 陕西省创新能力支撑计划项目(2021TD-54), 陕西省重点研发计划项目(2022ZDLSF06-03)联合资助。

作者简介: 纪成亮(1986-), 男, 高级工程师, 从事岩土工程勘察设计及地基处理相关研究。E-mail: jichengliang@sdepci.com。

* 通讯作者: 谢婉丽(1974-), 女, 教授, 主要从事地质灾害防治、监测预警、风险评价及管控技术、绿色边坡防护、环境污染机理和修复技术研发及其数值模拟研究。E-mail: xiewanli@nwu.edu.cn。

© Editorial Office of *Northwestern Geology*. OA under CC BY-NC-ND

- (1. Survey Division, Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Co., Ltd, Jinan 250013, Shandong, China; 2. Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China; 3. State Key Laboratory of Continental Evolution and Early Life, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China; 4. Xi'an Key Lab of Prevention of Loess Dynamic Disaster and Low-Carbon Remediation, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China)

Abstract: The study of the wetting-induced deformation mechanism of loess is of great importance for engineering disaster prevention and control in the Loess Plateau region. This research focuses on the Q_3p and Q_2p loess from Fuxian County, northern Shaanxi, aiming to reveal the deformation behavior and underlying mechanisms of loess from different geological eras under wetting conditions. A comparative study of the engineering properties of the two types of loess was systematically conducted through a series of physico-mechanical tests, mineral composition analysis, scanning electron microscopy (SEM) observations, and multi-condition consolidation-collapse tests. The results indicate that the consolidation deformation process of both types of loess can be divided into three stages: slow deformation under low pressure, accelerated deformation under medium pressure, and stabilized deformation under high pressure. Under high pressure conditions, the consolidation deformation becomes more sensitive to changes in initial water content. With increasing initial water content, the compression deformation of the Q_3p specimens intensifies significantly, while that of the Q_2p specimens weakens. In collapse tests, the two groups exhibited fundamentally opposite deformation characteristics: the Q_3p specimens showed typical collapse behavior, with the collapse coefficient initially increasing and then decreasing with rising pressure, whereas the Q_2p specimens displayed certain expansion characteristics. As the initial water content increased, the collapse coefficient of the Q_3p specimens gradually decreased, while the expansion tendency of the Q_2p specimens also weakened. Microstructural analysis revealed that the stability of the loess microstructure, particularly the presence of large pores, provides the necessary space for compression and collapse deformation. Mineral composition analysis indicated that the dissolution of soluble salt minerals (e.g., calcite) exacerbates soil compression and collapse deformation, while the water-absorbing expansion of clay minerals (e.g., illite) partially suppresses these behaviors. This study elucidates the controlling mechanism of the coupling effect between mineral composition and microstructure on the wetting-induced deformation behavior of loess, providing important theoretical support and practical guidance for engineering construction and geohazard mitigation in loess regions.

Keywords: Loess; wetting-induced deformation; Scanning Electron Microscopy; microscopic mechanisms

作为黄河流域生态保护和高质量发展战略的重要承载区,黄土高原重大工程布局与新型城镇化建设对区域地质安全保障提出了迫切需求。黄土因其多孔隙弱胶结的结构特征,在工程扰动与水环境变化耦合作用下易发生突发性湿陷变形。湿陷也是黄土地区重要的工程地质问题之一,长期以来对工程建设及运营安全构成了重大威胁(钱征宇等, 2006; Li et al., 2019; 《中国公路学报》编辑部, 2021; 范文等, 2022; 王绅皓等, 2023)。黄土自然沉积过程中形成了亚稳定结构,使其在低含水率状态下强度较高,而在水分入渗时强度骤降导致易发生变形并引发工程灾害(罗爱忠等, 2014; 程超等, 2022; Wang et al., 2023; 王昱琛等, 2024, 王媛媛等, 2025)。这种变形特性在道路、建筑

基础和水利设施等工程中表现尤为突出,轻则引发地面沉降,重则导致工程失效和重大经济损失(王长丹等, 2011; 朱云江等, 2020; 蒋臻蔚等, 2024)。近年来,随着黄土地区基础设施建设的加快,黄土湿陷性对工程安全的威胁愈加明显。深入研究黄土在增湿条件下的固结-湿陷变形过程及其内在机理,对于提升工程地基的稳定性评估和灾害防控能力具有重要的理论和实践意义(谢婉丽等, 2015; 魏亚妮等, 2022; Yang et al., 2022)。

陕北至安徽±800 千伏特高压直流输电工程是国家“十四五”重点开工建设的跨省区输电通道,工程起于陕西省延安市宝塔山换流站,止于安徽省合肥市合州换流站。作为安徽省第一条全额消纳的高比例

可再生能源特高压直流输电通道,可优化安徽能源供应结构,提升绿电消费比重,对实现双碳目标具有重要意义。在拟建于延安市富县地区的陕北 ± 800 kV 换流站工程站址区,据山东电力工程咨询院有限公司初勘结果,场地为大厚度第四纪土层覆盖(超 35 m),土层均为中或高压缩性土,区域属于自重湿陷场地(湿陷等级为IV级),湿陷下限可至第四层黄土层(L_4),严重影响电站施工设计与后续防护。因此,开展场地土层湿陷变形特性研究十分必要。大量学者针对黄土湿陷变形进行了研究并取得了丰硕成果,研究方向主要集中在湿陷性的影响因素(Wang et al., 2021; 邓洪力等, 2023)、施工处理(张明等, 2025)及其预测评价(陈志敏等, 2024)等方面。从宏观角度来看,中国黄土的湿陷性表现出自东南向西北逐渐加剧的地区差异性,中国西北部黄土往往表现出较强的湿陷性,造成严重的地表沉降问题(王亚军等, 2025)。而在中西部地区,部分黄土层表现出膨胀性,严重影响隧道施工(张万志等, 2018)。此外,不同深度黄土的湿陷行为也存在显著差异,强湿陷性黄土多为浅层黄土(马兰黄土),而深层黄土则通常表现出更强的稳定性(许领等, 2025)。这些差异性与其含水率、矿物成分及其结构特征等因素密切相关(Yuan et al., 2024; 刘春龙等, 2025)。目前的研究更多聚焦于浅层黄土(Q_{3p} 黄土)天然状态湿陷特性,对于增湿过程中湿陷变形演化规律以及不同深度黄土层湿陷变形差异性研究则相对薄弱。为深入理解黄土湿陷变形的内在机理,学者们提出了诸多假说,包括欠压密理论、可溶盐假说、微结构失稳假说等(许领等, 2009; 谢婉丽等, 2015)。然而黄土湿陷机理复杂,单一的假说往往难以完美解释。近年来,随着黄土微观结构及其定量化的深入研究,越来越多的学者认为黄土中大孔隙的存在是湿陷变形的首要条件(魏亚妮等, 2022)。土体的初始孔隙分布及胶结强度决定了其结构的稳定性及固结-湿陷特性(赵景波等, 1994; Wang et al., 2020; Yuan et al., 2022)。同时,黄土中方解石和伊利石等矿物对土体的湿陷性同样具有重要影响。方解石作为黄土中主要的胶结物质,其在浸水过程中的溶解会加剧土体结构的破坏与塌陷(谢婉丽等, 2015)。而伊利石、蒙脱石等黏土矿物吸水膨胀,会导致黄土中颗粒、孔隙重新排列,进而影响黄土湿陷变形特性(雷祥义, 1987; 高英等, 2019; Wei et al., 2023)。因此,对黄土湿陷变形内在机理的分析需要综合矿物组成、微观结构等诸多方面影响因素。

鉴于此,为了摸清陕北 ± 800 kV 换流站场地不同类型黄土增湿变形特性差异,笔者针对陕北工程场地不同时代黄土地层,开展不同初始含水率下原状试样固结-湿陷试验,探究增湿过程中黄土压缩、湿陷变形演化规律以及时代差异性。基于试验分析结果,结合黄土微观结构及矿物组成差异性,多角度联合分析增湿过程中压缩、湿陷差异性机理。研究结果有助于深入理解黄土湿陷性差异机理,并为湿陷性黄土地区工程建设提供理论参考。

1 取样位置与试验方法

1.1 取样位置及工程概况

陕北 ± 800 kV 换流站场地工程依地形呈阶梯状分三大台阶布置各功能区,对增强陕北能源送出、满足安徽用电需求、优化电网结构、推动特高压技术发展及带动区域经济增长等具有极其重要的意义。工程位于陕西省延安市富县寺仙镇境内,延安市西南约 90 km,富县县城西南约 26 km,寺仙镇东侧约 0.8 km(图 1)。选址区地势开阔,地形为微倾斜平地,总体西北高东南低,由西北向东南缓倾,地形坡度小于 2%。地貌成因类型为黄土堆积地貌,地貌类型为黄土塬。站址区多为果园和农田。勘测期间勘探点高程一般为 1 141.78~1 155.16 m。区域内自重湿陷性黄土广泛分布,湿陷下限深度可达 L_4 以下,地基湿陷等级为 III~IV 级,湿陷性较敏感,不同深度详细湿陷系数室内试验结果(图 1)。可以看出,研究区湿陷性土层以轻微湿陷性和中等湿陷性为主, Q_{2p} 与 Q_{3p} 土层差异较大,其中 1 m 深度试样湿陷性最强烈,而部分埋深较大 Q_{2p} 土层(如 20 m 以下)湿陷系数为负值,表现出

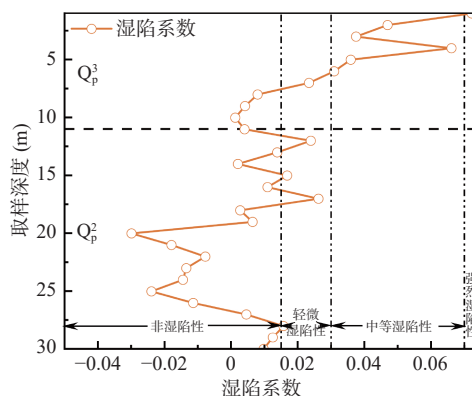


图1 场地黄土层湿陷系数变化图

Fig. 1 Variation of collapsibility coefficient in site loess layers

轻微的膨胀性特征。因此,有必要选取 Q_2p 与 Q_3p 土层典型试样进行深入对比分析以揭示场地黄土增湿变形差异及其内在原因。

利用机械洛阳铲进行取样,取样现场照片如图 2 所示。分别取 Q_2p 与 Q_3p 代表性黄土样(取样深度分别为 1 m 和 25 m)作为研究对象,按照《土工试验方法标准》(GB/T 50123-2019)对样品基本物理性质进行测试,试验结果如表 1 所示。样品含水率均较高,且 Q_2p 试样较 Q_3p 处孔隙比小,试样更加致密。

采用激光粒度分析仪对试样粒度成分进行分析测试,结果见图 3。 Q_3p 处黄土试样的粘粒(粒径 $<5\mu m$)含量 23.23%,粉粒($5\leq$ 粒径 $\leq 75\mu m$)含量 75.41%,砂粒(粒径 $>75\mu m$)含量 1.36%; Q_2p 处黄土试样的粘粒含量为 21.28%,粉粒含量为 77.14%,砂粒含量为 1.58%。

两处深度试样粒度均以粉粒、黏粒为主,砂粒含量较低,总体组成较为相似。

1.2 试验方案

1.2.1 增湿固结-湿陷试验

将野外取回的原状试样去除表层扰动浮土后,削制大环刀试样(直径 79.8 mm,高度 20 mm)。为减少样品差异性对试验结果的影响,本次试验试样的试样间湿土质量均相差 $\pm 3\text{ g}$ 以内。增湿试验设置初始含水率为天然含水率、24%、27%、30%、饱和含水率,采用水膜转移法配制不同初始含水率的试样,使用针管或喷壶,轻轻、均匀地将蒸馏水喷洒至试样表面。将配制好的试样采用保鲜膜进行密封,放置保湿缸中静置 48 h 以上,确保样品中水分充分迁移,以备后续固结湿陷试验使用。

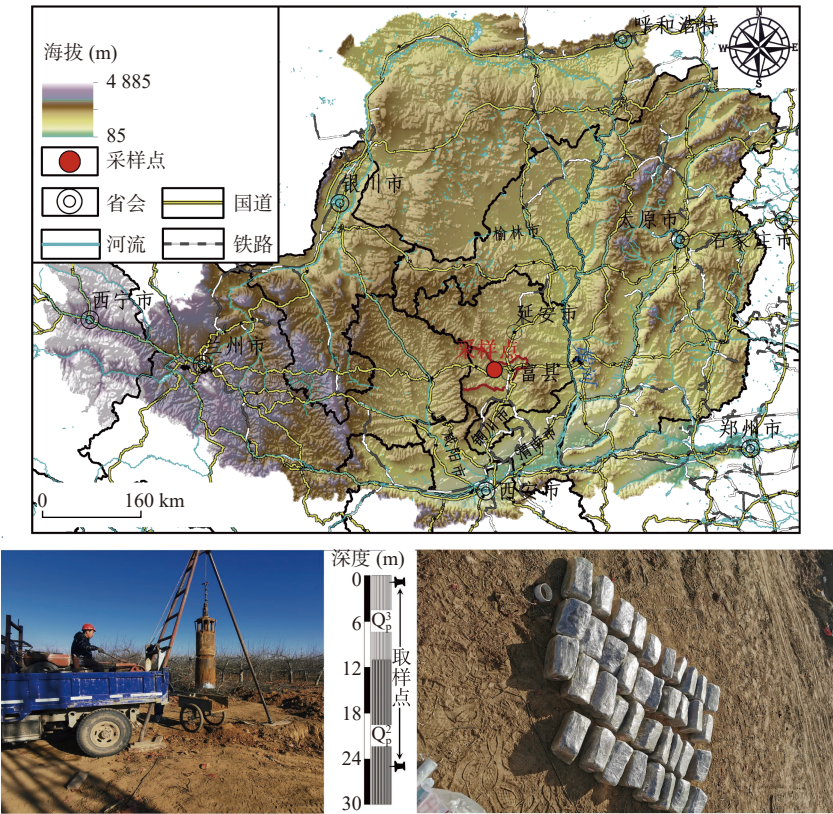


图2 取样位置及现场照片

Fig. 2 Sampling location and site photos

表 1 黄土试样基本物理性质统计表

Tab. 1 Statistical table of basic physical properties of loess specimens

地层代号	取样深度(m)	天然密度 ρ (g/cm ³)	干密度 ρ_d (g/cm ³)	含水率 ω (%)	孔隙比 e	液限 W_L (%)	塑限 W_P (%)	塑性指数 I_p
Q_3p	1	1.64	1.35	18.80	1.00	29.9	20.0	9.9
Q_2p	25	1.80	1.49	20.90	0.82	29.8	19.9	9.9

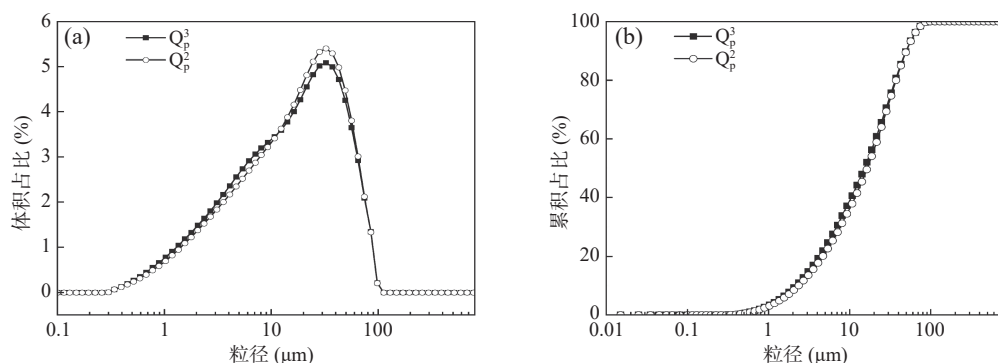


图3 试样粒度分布级配曲线(a)及累积曲线(b)

Fig. 3 Particle size distribution of specimens (a) grading curve and (b) accumulation curve

固结试验所采用的设备是北京路达伟业科技有限公司生产的KTG-ZY全自动中压三联固结仪。试验方法采用双线法进行湿陷系数测定,设定竖向压力为12.5、25、50、100、150、200、300、400、500、600、700及800 kPa的压力等级进行分级加载试验,详细过程严格按照《土工试验方法标准》(GB/T 50123-2019)中双线法步骤要求开展,最终通过计算获得不同含水率试样在各级压力下的湿陷系数。

1.2.2 物质成分试验

本研究采用西北大学大陆动力学国家重点实验室的X射线衍射仪对所取黄土试样的矿物成分进行测定。将散土样品烘干后的粉末状黄土样品过200目筛,压片制样后放入仪器进行扫描获得样品衍射谱图。其后采用Jade 9.0软件进行数据分析。基于PDF数据库定性确定了试样的矿物组成,基于绝热法半定量测定了试样中各组成矿物所含比例(表2)。黄土中主要矿物为石英和长石,分别占Q_{3p}和Q_{2p}试样的66.1%和61.8%,Q_{3p}试样碳酸盐矿物(方解石)含量显著高于Q_{2p}试样。黏土矿物主要包括伊利石、高岭石、绿泥石和蛭石,其中伊利石为主要黏土矿物。

表2 黄土样品矿物成分统计表

Tab. 2 Statistical table of mineral composition of loess specimens

取样 深度(m)	矿物含量(%)						
	石英	伊利石	方解石	长石	绿泥石	高岭石	蛭石
1	49.4	10.8	12.5	16.7	2.9	5.8	1.9
25	45.4	18.7	7.6	16.4	2.4	5.6	3.9

1.2.3 微观结构试验

将原状黄土样移至干燥通风处直至试样自然风干48 h,其后进行封装保存以用于后续开展原状试样

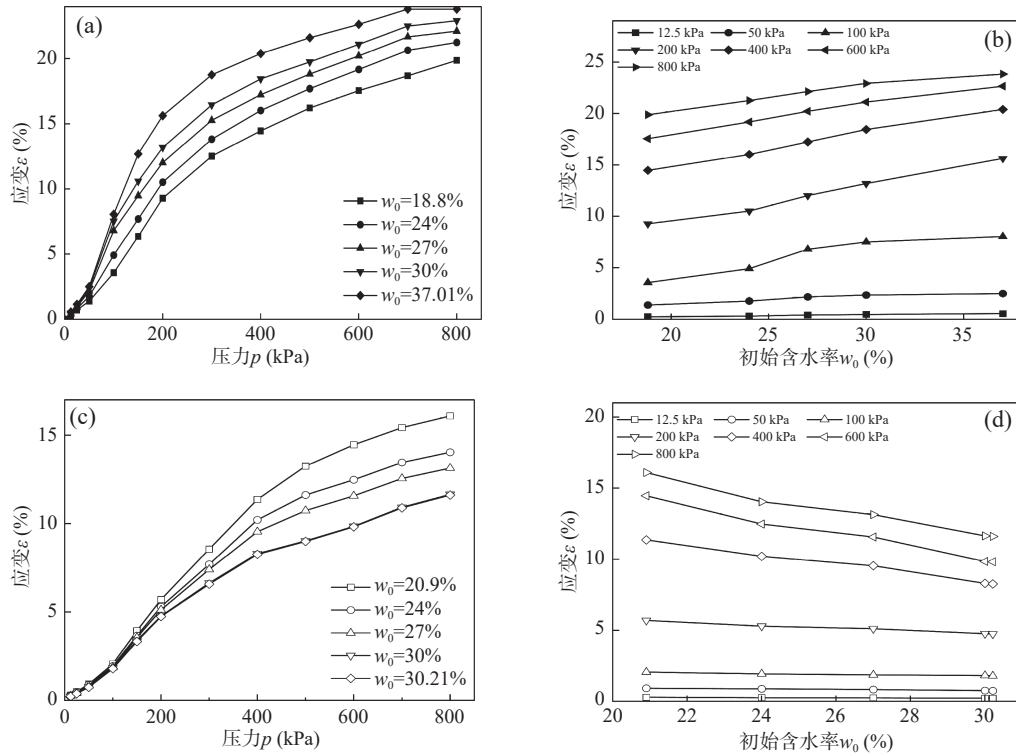
的SEM扫描进行微观结构分析。从Q_{3p}和Q_{2p}干燥的原状黄土样切取直径约1 cm,高度约2 cm的圆柱状试样,并对表面进行注胶固化处理。在上机测试前1~2 h将圆柱样人为掰断以获得新鲜的断裂面进行观察。在新鲜的断裂表面喷洒金粉后,使用FEI Quanta 400型场发射电子显微镜获取扫描电子显微镜图像。

2 试验结果与分析

2.1 压缩变形特性

不同初始含水率Q_{3p}和Q_{2p}的原状黄土固结压缩轴向应变(ϵ)与竖向压力(p)的关系曲线(图4a、图4c)显示,Q_{3p}试样应变普遍大于Q_{2p}试样,表现出更强的压缩性。土体轴向应变随竖向压力增大而逐渐增加,呈现出非线性增长的趋势。Q_{3p}和Q_{2p}土样的应变曲线可以大致划分为3个阶段:①低压力下缓慢增加阶段(压力小于50 kPa);②中段加速变形阶段(50~400 kPa);③高压力下平缓变形阶段(压力大于400 kPa)。低压条件下,不同含水率黄土样压力-应变曲线较为集中,随着压力上升曲线逐渐分散,表明高压力下试样压缩变形对于含水率变化更为敏感。

增湿过程中,两组试样也表现出了相反的变化趋势。Q_{3p}试样在天然含水率状态下,土样应变随压力增加最为缓慢,当竖向压力达到800 kPa时,应变为19.87%。随着初始含水率的增加,土样的应变逐渐加大,饱和状态800 kPa下应变量为23.81%。Q_{2p}试样在天然含水率状态下,土样应变随压力增加最为迅速,当竖向压力达到800 kPa时,应变为16.09%。随着初始含水率的增加,土样的应变逐渐减小,饱和状态800 kPa下应变量为11.61%。这表明初始含水率在一定程度上影响土体的抗压性能,但对两层土样影响效果相反。



a. Q_{3p} 轴向应变与压力的关系; b. Q_{3p} 轴向应变与初始含水率的关系; c. Q_{2p} 轴向应变与压力的关系;
d. Q_{2p} 轴向应变与初始含水率的关系

图4 原状黄土的固结压缩变形试验结果

Fig. 4 Test results of consolidated compressive deformation of the original loess

相同初始含水率下,随着压力增加, Q_{3p} 试样应变增加更为显著。以 27% 初始含水率为例,压力由 0 增加至 800 kPa 时, Q_{3p} 和 Q_{2p} 试样应变分别为 22.12% 和 13.14%。上述结果表明,相较于 Q_{2p} 试样, Q_{3p} 试样压缩变形对于压力变化更为敏感。

不同竖向压力下(p)原状黄土轴向应变(ϵ)与初始含水率(w_0)的关系曲线(图 4b、图 4d)显示,同一竖向压力下,随着含水率增加, Q_{3p} 土体应变增大而 Q_{2p} 土体应变减小。低压力条件下(小于 50 kPa),两组试样随含水率增加应变基本保持稳定。以 50 kPa 为例,试样从天然含水率增湿至饱和含水率, Q_{3p} 试样应变仅增加了 1.11%, Q_{2p} 试样应变则下降了 0.18%。这表明在较低的压力水平下,外部荷载尚不足以充分克服土体自身较强的结构强度。此时,由含水率增加所可能引起的颗粒间润滑作用或轻微软化效应,尚未达到能够引发宏观压缩变形的临界条件,致密的结构得以维持其稳定性,因而应变对含水率的变化不敏感。随着压力的增大,应变-初始含水率曲线变化速率显著增大但两层土样趋势相反。800 kPa 压力下,试样初始含水率从 24% 增湿为 30%, Q_{3p} 试

样应变由 21.25% 增加为 22.92%, Q_{2p} 处试样应变则由 14.04% 下降为 11.65%,表明增湿过程中两层试样压缩变形对含水率变化的响应相反。两试样抗压压缩性与水敏性差异可从其结构性及矿物成分等方面得到一定程度解释, Q_{3p} 试样结构疏松,孔隙比较大而黏土矿物含量较低,增湿过程削弱了其土颗粒间的联结,从而使其在压力作用下更易于压缩;而 Q_{2p} 黄土结构更为致密且富含黏土矿物,吸水后黏土矿物产生轻微的膨胀效应增强了其抵抗压缩的能力,因此表现出与 Q_{3p} 相反的变形特征(表 1, 表 2)。

Q_{3p} 和 Q_{2p} 黄土样不同含水率下孔隙比与竖向压力的 e -lgp 曲线簇(图 5)显示, e -lgp 曲线下速率显著上升的转折点(屈服点)对应的竖向压力被称为结构屈服应力,与黄土的结构性密切相关。结构屈服应力可以间接反映黄土微观结构对压缩行为的影响。与压力-应变曲线相似,孔隙比-压力曲线可被视为 3 个阶段,低压力下缓慢下降阶段(OA)、中段屈服阶段(AB)及高压力下急速下降阶段(BC)。不同含水率曲线阶段分割节点有所差异,与试样结构屈服应力有关。在第一阶段,由于竖向压力小于结构屈服应力,土体

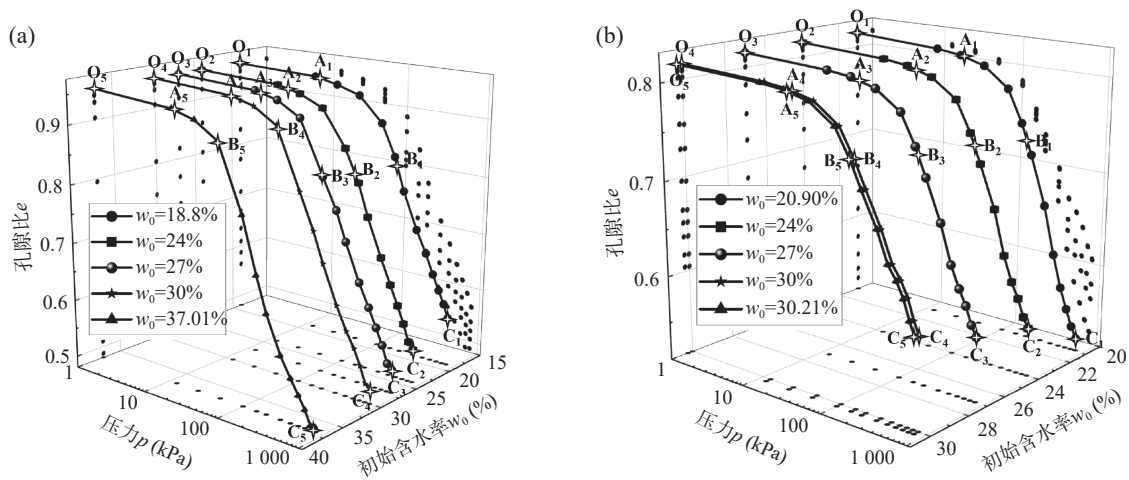


图5 Q_{3p}(a)和Q_{2p}(b)不同初始含水率原状黄土的 e - $\lg p$ 曲线簇

Fig. 5 Clusters of e - $\lg p$ curves for (a) Q_{3p} and (b) Q_{2p} original loess specimens with different initial water contents

结构较为稳定,孔隙比下降缓慢。在第二阶段,竖向压力逐渐趋近屈服应力并最终超过,土体结构开始塌陷,孔隙比下降速率逐渐增大。第三阶段,土体结构破坏加剧塌陷导致孔隙比大幅减小。随着初始含水率的增加,Q_{3p}曲线簇表现出第一阶段变短,第三阶段变长的趋势。Q_{2p}曲线簇则第一阶段和第三阶段均呈现出变短的趋势。这是因为随着初始含水率增加,两层土样结构屈服应力逐渐减小(屈服点左移)。

总之,孔隙比随压力增大而减小,土体密实程度上升。初始含水率对黄土孔隙的压缩有着显著影响。在相同压力条件下,Q_{3p}试样孔隙比随着初始含水率增加而减小,Q_{2p}试样则恰恰相反。以800 kPa为例,试样由天然含水率变化至饱和含水率,Q_{3p}试样孔隙比由0.56减小为0.49,Q_{2p}试样孔隙比则由0.52增加为0.60。上述结果表明,固定压力下,随着含水率的增加,Q_{3p}试样结构塌陷程度升高而Q_{2p}试样结构塌陷程度下降。

相较于Q_{2p}试样,Q_{3p}试样初始孔隙比更大,意味着土体内部可供压缩空间更大。在相同初始含水率下,Q_{3p}试样表现出了更强的可压缩性。以27%初始

含水率为例,压力增加至800 kPa时,Q_{3p}和Q_{2p}试样孔隙比分别下降了0.43和0.24。这一结果表明,Q_{3p}试样土体结构对压力增加更为敏感,易在荷载作用下发生塌陷压实。

天然状态下Q_{3p}试样的压缩系数(a_{1-2})远高于Q_{2p}试样,而压缩模量(E_s)和结构屈服应力(P_{sy})显著低于Q_{2p}试样,表现出较强的压缩性与较低的结构稳定性(表3)。随着含水率增大,Q_{3p}试样压缩性逐渐增强(a_{1-2} 增大, E_s 减小)且结构稳定性降低(P_{sy} 减小),Q_{2p}试样则压缩性逐渐降低(a_{1-2} 减小, E_s 增大)且结构稳定性提升(P_{sy} 增大)。这一结果进一步指示了Q_{3p}和Q_{2p}试样在结构性与水敏性上的显著差异,因此有必要对其湿陷性与微观结构进行深入分析。

2.2 湿陷变形特性

黄土湿陷系数是评价黄土湿陷性的重要力学参数,与试样的含水率及竖向压力密切相关。以0.015、0.03、0.07为湿陷系数界限值,可将黄土分类为非湿陷性黄土、轻微湿陷性黄土、中等湿陷性黄土及强烈湿陷性黄土。Q_{3p}和Q_{2p}试样不同压力下的湿陷系数曲线(图6)显示。天然状态下的两个试样曲线呈现出截

表3 试样压缩参数及结构屈服应力统计表

Tab. 3 Statistical table of specimen compression parameters and structural yield stress

含水率(%)	Q _{3p} 试样					Q _{2p} 试样				
	18.8	24.7	27	30	37.01	20.90	24	27	30	30.21
压缩系数 a_{1-2}/MPa^{-1}	1.12	1.15	1.17	1.20	1.48	0.66	0.61	0.59	0.54	0.54
压缩模量 E_s/MPa	1.74	1.70	1.67	1.63	1.32	2.75	2.98	3.08	3.36	3.36
结构屈服应力 P_{sy}/kPa	68.4	56.5	48.0	40.5	35.1	92.1	86.8	82.2	75.7	75.1

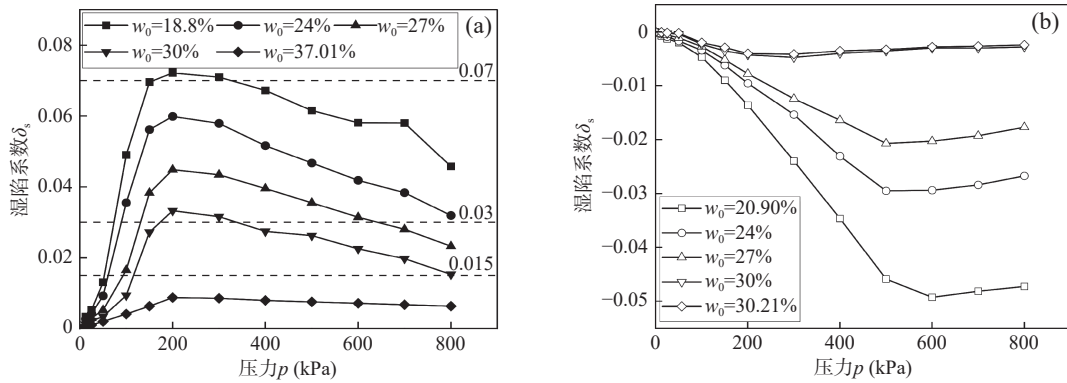


图6 Q_{3p}(a)和Q_{2p}(b)不同含水率黄土的湿陷系数与竖向压力关系曲线

Fig. 6 Curves of collapsible coefficient versus vertical pressure for (a) Q_{3p} and (b) Q_{2p} loess specimens with different water contents

然相反的变化趋势。天然状态下, Q_{3p} 试样的湿陷系数随压力增加先增大后减小, Q_{2p} 试样系数则随压力增加先增大后减小。两层土样湿陷系数值正负性也截然相反, Q_{3p} 试样在试验压力范围内湿陷系数始终为正值, Q_{2p} 试样则一直为负值。这一结果表明, 随着压力增大, Q_{3p} 试样表现出湿陷性特征, Q_{2p} 试样则表现出膨胀性特征。Q_{3p} 天然试样湿陷起始压力为 53 kPa, 在 200 kPa 时湿陷系数达到峰值 0.722, 表现出强烈湿陷。Q_{2p} 天然试样湿陷系数在 600 kPa 达到最小值 -0.049。这也指示了增湿过程中两试样体积变化差异性, Q_{3p} 试样孔隙比较大, 结构稳定性较差, 浸水后易结构失稳迅速软化导致体积塌缩, 从而在压力下表现出典型的湿陷特征; Q_{2p} 试样则孔隙比较小且结构稳定, 黏土矿物吸水膨胀效应主导了增湿过程中试样体积变化, 导致了宏观上一定程度的膨胀。

不同初始含水率的 Q_{3p} 试样湿陷系数-压力曲线表现出了相似的特征。湿陷系数在压力小于 50 kPa 时随压力增加缓慢增大, 50~200 kPa 快速增大, 大于 200 kPa 时缓慢下降或趋于平缓。随着试样初始含水率的增加, 曲线快速上升阶段斜率明显下降。试样湿陷起始压力随含水率增加而增大, 24%、27%、30% 含水率对应的湿陷起始压力分别为 60、93 和 115 kPa。饱和试样在试验压力范围内均无湿陷性。压力小于 50 kPa 时, 曲线较为集中, 随压力增大曲线逐渐分散, 表明高压条件下湿陷系数对含水率变化更敏感。

不同初始含水率的 Q_{2p} 试样湿陷系数-压力曲线也表现出了相似的特征, 但与 Q_{3p} 试样相反。湿陷系数曲线随压力增大表现出缓慢下降、快速下降、缓慢上升或趋于平缓 3 个阶段。随着试样初始含水率的增加, 曲线快速下降阶段明显缩短且斜率下降。所有

含水率、压力下 Q_{2p} 试样湿陷系数均为负值, 表现出膨胀特征。与 Q_{3p} 试样相似, Q_{2p} 试样在高压条件下湿陷系数对含水率变化的敏感性更强。

采用三维曲面的形式表征 Q_{3p} 和 Q_{2p} 试样湿陷系数随初始含水率、压力变化趋势(图 6)。可以看出, 湿陷系数受初始含水率和压力的耦合影响。对 Q_{3p} 试样而言, 初始含水率对湿陷系数呈现出负面影响, 压力对湿陷系数影响则较为复杂。压力在小于 200 kPa 时对湿陷系数表现出积极作用, 而大于 200 kPa 时, 对湿陷系数提升作用不大或为负作用(图 6a)。在压力和初始含水率共同作用下, Q_{3p} 试样的湿陷等级在非湿陷性、轻微湿陷、中等湿陷及强烈湿陷范围内变化(图 7a)。

Q_{2p} 试样的初始含水率对其湿陷系数表现为积极影响, 随初始含水率增加, 湿陷系数逐渐增大(或膨胀性逐渐减弱)。压力对湿陷系数影响存在一个临界值, 低压力下对湿陷系数增大为负面影响, 超出临界值后则为正作用或影响不大。以天然含水率为例, 临界压力为 600 kPa。随着含水率增大, 临界压力逐渐减小(图 6b)。在本研究的含水率及压力范围内, Q_{2p} 试样始终为非湿陷性(图 7b)。

3 增湿变形差异性内因分析

黄土湿陷性是其特殊工程性质之一, 受到多种内外部因素的综合作用和控制。这些因素主要包括含水率、荷载等外部条件及矿物组成、微观结构等内在因素(张明等, 2025)。前文对试样在含水率及压力影响下固结-湿陷特性变化进行了详细分析, 而这些宏观特性通常与其微观结构密切相关。从矿物成分角

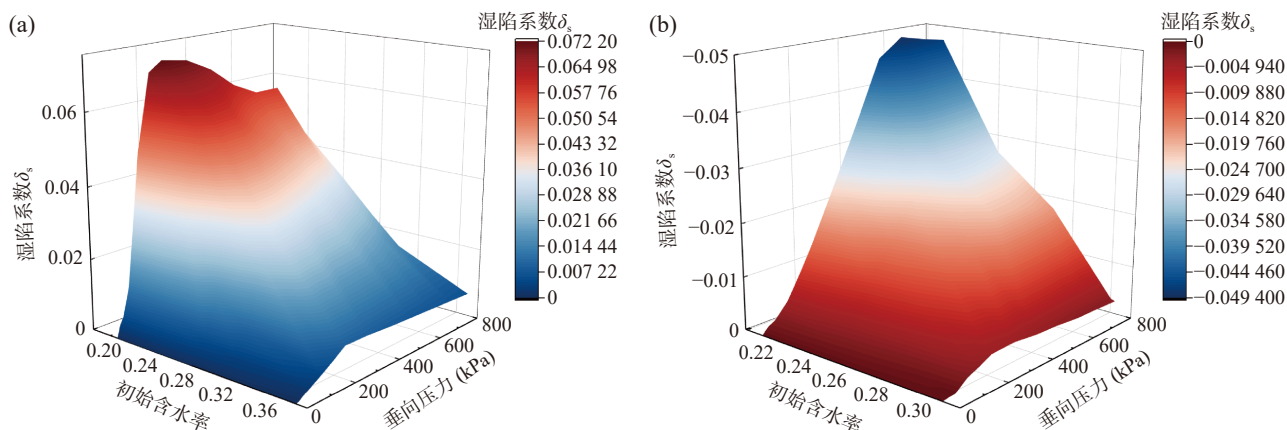


图7 不同初始含水率 Q_{3p} (a)和 Q_{2p} (b)原状黄土的湿陷系数曲面

Fig. 7 Collapsible coefficient surfaces of original loess with different initial moisture contents for (a) Q_{3p} and (b) Q_{2p}

度来看,碳酸盐矿物(如方解石)通常是土颗粒间主要的胶结物质,支撑着土体短期的结构稳定性,但在外界水分的作用下,其容易溶解或软化,从而导致土体结构的塌陷。黏土矿物如伊利石、蒙脱石等存在吸水膨胀特性,在一定程度上影响着增湿过程中土样的微结构变化及宏观变形特性。从微观机理来看,黄土在风成沉积过程中形成的疏松、多孔结构,使其具有较高的孔隙比和特定的颗粒架构,这种初始结构是湿陷性的空间基础。大孔隙及架空结构的存在通常被认为是湿陷发生的重要影响因素(钱征宇, 2006)。鉴于此,笔者将从矿物组成及微观结构两方面对试样固结湿陷机理展开分析。

3.1 矿物成分差异性

在矿物成分方面, Q_{3p} 和 Q_{2p} 试样在伊利石和方解石含量存在显著差异。 Q_{3p} 试样中方解石含量为 12.5%, 显著高于 Q_2 试样的 7.6%; 而 Q_{2p} 试样中伊利石含量为 18.7%, 高于 Q_{3p} 试样的 10.8%。矿物组成的差异性对两层土体的压缩变形及湿陷变形特性均存在一定影响。方解石作为一种易溶解矿物, 在浸水条件下的溶解特性直接影响土体的结构稳定性。 Q_{3p} 试样中较高的方解石含量导致其在受水浸润时胶结物质快速溶解, 从而削弱颗粒间的粘结力与支撑作用。这一过程引发了土体结构的破坏与压缩变形的加剧, 致使 Q_{3p} 试样对含水率变化表现出更高的敏感性。此外, 方解石溶解后的产物进一步增加了孔隙水的润滑作用, 促使颗粒重组与密实化, 最终表现为显著的湿陷变形特征。

Q_{2p} 试样中伊利石含量的显著增加对其湿陷和膨胀行为起到了关键调控作用。伊利石具有较强的吸

水膨胀性, 其层状结构在吸水后发生显著膨胀, 抵消了部分因胶结物质溶解引发的土体结构失稳效应。此外, 伊利石较高的阳离子交换能力和颗粒间粘聚力提升了土体的抗压缩性能, 使 Q_{2p} 试样在水化过程中表现为膨胀性而非湿陷性。在增湿过程中, 由于伊利石的膨胀, 试样抗压缩性逐渐增强。

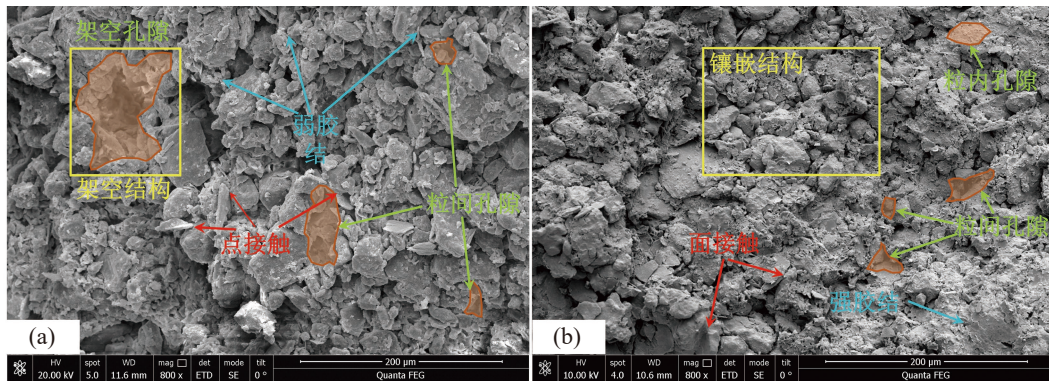
综上所述, Q_{3p} 和 Q_{2p} 试样在矿物成分上的差异对其固结-湿陷变形行为影响显著。 Q_{3p} 试样因方解石含量较高, 对水化作用的敏感性更强, 湿陷变形表现为强烈的结构塌陷; 而 Q_{2p} 试样中伊利石含量的增加通过膨胀作用一定程度上抑制了湿陷性。这种矿物成分与湿陷特性间的耦合机制, 可为深入理解黄土湿陷性的多尺度演化过程提供重要理论参考。

3.2 微观结构差异性

3.2.1 微观结构定性分析

Q_{3p} 和 Q_{2p} 试样电镜下典型微观结构图像(图 8)显示, 两者在颗粒堆积方式、孔隙特征以及胶结特征等方面差异明显, 这些特性与其宏观变形表现密切相关。 Q_{3p} 试样的微观结构相对松散, 存在大量架空结构和架空孔隙。颗粒之间胶结程度相对较差, 观察到许多弱胶结的点接触。 Q_{3p} 试样中孔隙多为架空孔隙和粒间孔隙, 可为土体压缩、湿陷等宏观变形提供空间基础。 Q_{3p} 试样中这些亚稳定的微观结构特征导致其在受到外部荷载或水分浸润时, 颗粒容易发生滑移、旋转和重排, 从而表现出较弱的抗压缩能力和较强的湿陷变形特性。尤其是增湿过程中, 渗入溶解颗粒间的胶结物质(方解石), 使其湿陷性显著增强。

Q_{2p} 试样电镜图像中颗粒堆积明显更为紧密, 微观结构以更稳定的镶嵌结构为主。颗粒之间胶结程

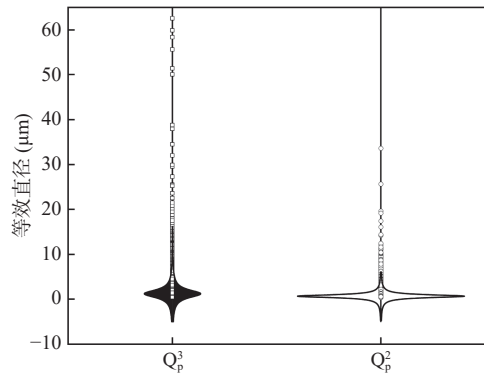
图8 Q_{3p}(a)和Q_{2p}(b)原状黄土微观结构特征Fig. 8 Microstructural characteristics of (a) Q_{3p} and (b) Q_{2p} original loess specimens

度普遍较高,接触方式以面接触为主。孔隙的存在形式主要为粒间和粒内孔隙,架空孔隙较少。颗粒间稳定的接触方式提供了更强的土体结构稳定性。因此,宏观上表现出更强的抗压缩性和更弱的湿陷性。架空孔隙含量的下降造成湿陷空间的压缩。因此,宏观上表现出非湿陷性特征。此外,较高的伊利石含量所带来的膨胀效应进一步提升了试样微结构在增湿过程中的抗压缩性。

因此, Q_{3p} 和 Q_{2p} 试样的固结-湿陷变形差异体现为微观结构和矿物成分间的耦合作用。Q_{3p} 试样因松散的架空结构和高方解石含量,在水分作用下表现出较强的湿陷性;而 Q_{2p} 试样由于其紧密的镶嵌结构和高伊利石含量,表现出更强的抗变形能力和膨胀性。微观结构与矿物成分的联合分析可为黄土湿陷性的形成机制提供了更加系统和深入的认识,同时揭示不同深度土层湿陷行为的内在驱动因素。

3.2.2 孔隙量化分析

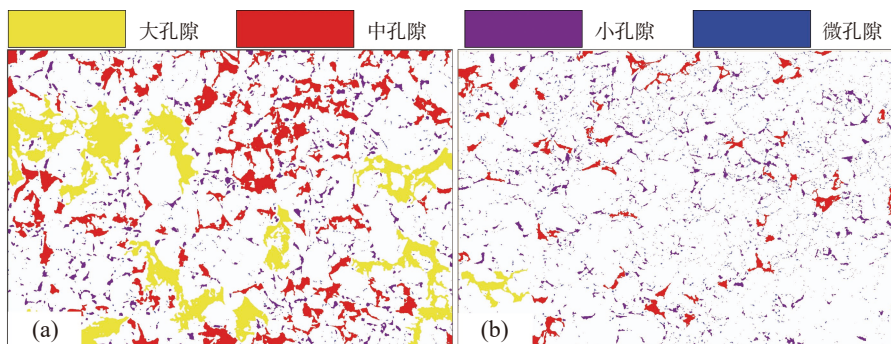
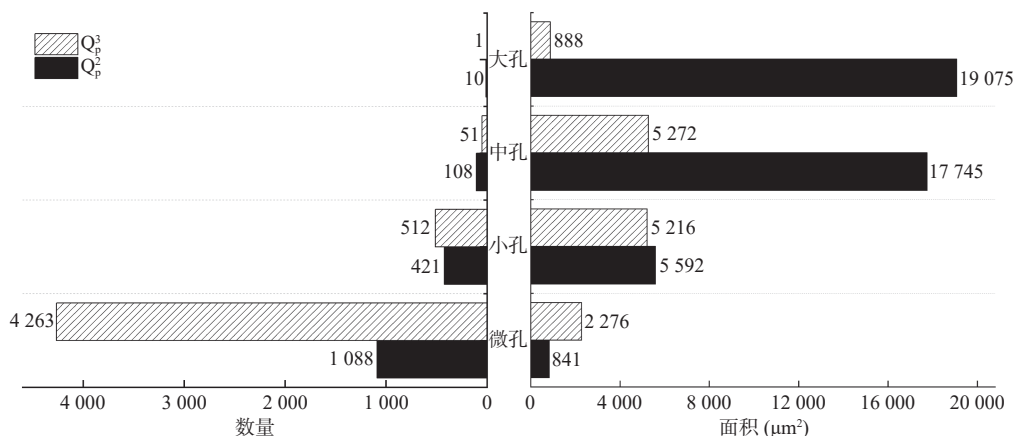
为进一步深入量化分析两层试样间微结构差异性,对电镜图像中孔隙尺寸进行了提取(图8)。可以观察到, Q_{3p} 试样的孔隙尺寸分布呈现出较为宽广的形态(图9),表明其孔隙结构较为疏松,孔隙尺寸分布较为分散,孔隙结构中存在不同尺度的孔隙类型(如架空孔隙和粒间孔隙)。试样的孔隙平均尺寸和最大尺寸分别为 2.77 μm 和 62.50 μm。Q_{2p} 试样孔隙尺寸则分布明显更加集中,以小于 10 μm 的小孔隙为主。孔隙平均尺寸和最大尺寸分别为 1.12 μm 和 33.57 μm。Q_{3p} 试样孔径相较于 Q_{2p} 试样明显偏大,尤其是大于 10 μm 的孔隙数量偏多。这些较大尺寸孔隙的存在,有利于水分的渗透及结构的垮塌,进而促进土体的压缩和湿陷变形。相反的,孔径较小的 Q_{2p} 试样在湿润条件下的变形较小,稳定性较好(图9)。

图9 Q_{3p} 和 Q_{2p} 原状黄土微观孔隙孔径分布图Fig. 9 Microscopic pore size distribution of Q_{3p} and Q_{2p} original loess specimens

参照雷祥义(1987)研究结果,根据孔隙直径大小将土样微观孔隙划分为:微孔隙(<2 μm)、小孔隙(2~8 μm)、中孔隙(8~32 μm)以及大孔隙(>32 μm)。Q_{3p} 和 Q_{2p} 试样中4种孔隙分布图(图10)显示, Q₂ 试样中的大孔隙和中孔隙明显更少且孔隙连通性较差,土体较为致密。

笔者对 Q_{3p} 和 Q_{2p} 试样电镜图像中4种孔隙的数量及面积进行统计对比(图11),发现 Q_{3p} 和 Q_{2p} 试样均以微孔和小孔为主,分别占其总孔隙数量的 92.7% 和 98.9%。在孔隙面积方面, Q_{3p} 试样以大、中孔为主,占总孔隙面积的 85.13%; Q_{2p} 试样则以中、小孔隙为主,占总孔隙面积的 76.82%。

两试样的孔隙数量和面积差异主要集中在大孔隙、中孔隙和微孔隙上,小孔隙差异较小。就孔隙数量而言, Q_{3p} 和 Q_{2p} 试样分别为 1627 和 4827。Q_{2p} 试样中微孔和小孔数量多于 Q_{3p} 试样(尤其是微孔),大孔和中孔则相反。在孔隙面积方面, Q_{3p} 试样的大、中、小孔隙面积均大于 Q_{2p} 试样,尤其是大孔隙面积

图10 Q_3p (a) 和 Q_2p (b) 原状黄土微观孔隙分类分布图Fig. 10 Distribution of microscopic pore classification of (a) Q_3p and (b) Q_2p original loess specimens图11 Q_3p 和 Q_2p 原状黄土试样微观孔隙差异统计Fig. 11 Statistics of microporosity differences between Q_3p and Q_2p original loess specimens

超过了 Q_2p 试样的 20 倍。而 Q_2p 试样的微孔隙面积为 Q_3p 试样的 2.7 倍。

大、中孔隙被认为是黄土固结-湿陷的主要内因, 两土样在大中孔隙数量及面积上的显著差异直接影响其宏观固结-湿陷变形。大、中孔隙更易形成贯通通道, 影响水分的滞留和流动性, 进而降低土体的稳定性。大孔隙数量多导致 Q_3p 试样更容易受到水的影响, 土体的压缩性大, 湿陷性也随之增强。 Q_2p 试样微、小孔隙较多, 连通性较差, 因此在增湿过程中表现出更好的抗压性能和较强的稳定性。较多的小孔隙也能够帮助土体承受更大的外部荷载, 避免过多的湿陷和压缩。

综合上述固结-湿陷试验、矿物成分及微观结构分析结果, 初始含水率、竖向压力、矿物组成及微观结构耦合作用共同决定了试样宏观变形特征。内部因素方面, 矿物组成和微观结构特征对土样固结-湿陷变形影响显著。 Q_3p 试样富含架空孔隙(大孔隙), 为压缩及湿陷变形提供了空间基础。亚稳定的微结

构特征及高碳酸盐矿物含量造成了其在荷载及浸水条件下结构易破坏, 产生强烈压缩及湿陷变形。 Q_2p 试样则微观结构更为稳定, 孔隙以粒间、粒内孔隙为主(中、小、微孔), 压缩及湿陷变形空间有限。膨胀性黏土矿物(伊利石)含量较高, 在增湿过程中进一步抑制了土样结构塌陷并表现出膨胀性。

4 结论

(1) Q_3p 试样比 Q_2p 试样表现出更强的压缩性, 随着初始含水率上升两试样结构屈服应力均减小。两组试样压缩变形对增湿过程的响应呈现出相反的趋势, Q_3p 试样可压缩性逐渐增强而 Q_2p 试样可压缩性逐渐减弱。

(2) Q_3p 和 Q_2p 试样湿陷变形随压力及初始含水率变化也表现出相反的趋势。 Q_3p 天然状态试样湿陷性较强, 随着含水率增加湿陷性逐渐消散。 Q_2p 天然状态试样则表现出膨胀性(湿陷系数为负值), 随着含

水率增加膨胀性逐渐消散(湿陷系数增大)。

(3)矿物组成及微观结构耦合作用共同决定了两组试样宏观变形特征差异。 Q_3p 试样微结构稳定性较差,含架空孔隙(大孔隙)、不稳定点接触,同时易溶碳酸盐含量高,致使其在荷载及浸水条件下结构易破坏,产生强烈压缩及湿陷变形。 Q_2p 试样则微结构稳定性较强,孔隙以粒间、粒内孔隙为主(中、小、微孔),同时富含膨胀性黏土矿物,因此表现出较强的抗压缩性及膨胀性。

(4)研究成果为陕北 ± 800 kV 换流站工程场地土层湿陷变形特性提供了关键数据,助力精准评估地基稳定性。揭示了不同深度黄土湿陷差异机理,为工程设计和施工方案优化提供理论支撑,有效助力防控工程灾害。研究主要聚焦于揭示黄土在增湿过程中压缩与湿陷变形特性的差异性规律,对于 Q_2p 黄土所表现出的膨胀特性,虽在矿物与微观结构层面进行了初步关联,但对其膨胀性的专门、深入研究尚有不足。这一独特的现象揭示了该场地深层黄土性质的复杂性,未来的研究工作可以此为重点,对 Q_2p 黄土的膨胀机理、影响因素及其工程意义进行更深入的探索,以完善对黄土工程地质特性的全面认识。

利益冲突声明(Conflict of Interests):

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

参考文献(References):

- 陈志敏,孙勇,郝彦玉,等.公路地质纵剖面黄土湿陷系数预测及分布规律研究[J].地震工程学报,2024,46(6):1269-1278+1290.
- CHEN Zhiming, SUN Yong, HAO Yanyu, et al. Study on the Prediction and Distribution Patterns of Loess Collapse Coefficients in Highway Geological Cross-Sections[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2024, 46(6): 1269-1278+1290.
- 程超,钟秀梅,刘钊钊,等.饱和黄土动态液化和静态液化机理的差异性研究[J].地震工程学报,2022,44(1):136-144.
- CHENG Chao, ZHONG Xiumei, LIU Zhaozhao, et al. A Study on the Differences in the Mechanisms of Dynamic and Static Liquefaction of Saturated Loess[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2022, 44(1): 136-144.
- 邓洪力,姜海波,侍克斌,等.新疆伊犁湿陷性黄土输水渠道湿陷变形特性及影响因素分析[J].水资源与水工程学报,2023,34(6):139-146.
- DENG Hongli, JIANG Haibo, SHI Kebin, et al. Analysis of the collapse deformation characteristics and influencing factors of water conveyance channels in the collapsible loess of Yili, Xinjiang[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2023, 34(6): 139-146.
- 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 Yanni, YU Bo, et al. Current Status and Development Trends in Research on the Micro-Mechanism of Loess Collapse[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2022, 49(5): 144-156.
- 高英,马艳霞,张吾渝,等.西宁地区黄土增湿变形特性及微观结构分析[J].工程地质学报,2019,27(4):803-810.
- GAO Ying, MA Yanxia, ZHANG Wuyu, et al. Loess wetting deformation characteristics and microstructural analysis in the Xining area[J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27(4): 803-810.
- 蒋臻蔚,王李红,郑瑞杰,等.陕北油田黄土工区道路冲蚀灾害模型试验研究[J].科学技术与工程,2024,24(16):6642-6648.
- JIANG Zhenwei, WANG Lihong, ZHENG Ruijie, et al. Experimental Study on Road Erosion Disaster Model in the Loess Region of Shaanbei Oilfield[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(16): 6642-6648.
- 雷祥义.中国黄土的孔隙类型与湿陷性[J].中国科学(B辑 化学 生物学 农学 医学 地学),1987,(12):1309-1318.
- LEI Xiangyi. Pore Types and Collapsibility of Chinese Loess[J]. Science China (Series B: Chemistry, Biology, Agriculture, Medicine, Geology), 1987, (12): 1309-1318.
- 刘春龙,徐青苗,张小颖,等.易溶盐对黄土状盐渍土地力学特性影响试验研究[J].太原理工大学学报,2025,56(5):1030-1037.
- LIU Chunlong, XU Qingmiao, ZHANG Xiaoying, et al. Experimental study on the influence of soluble salts on the geomechanical properties of loess-like saline-alkali soils[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2025, 56(5): 1030-1037.
- 罗爱忠,邵生俊,陈昌禄,等.湿压剪条件下黄土的结构屈服与强度特性[J].地下空间与工程学报,2014,10(6):1243-1249.
- LUO Aizhong, SHAO Shengjun, CHEN Changlu, et al. Structural yielding and strength characteristics of loess under wet pressure shear conditions[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(6): 1243-1249.
- 钱征宇.湿陷性黄土地区铁路的主要技术问题及其工程措施[J].中国铁路,2006,(2):28-32+82.
- QIAN Zhengyu. Major technical issues and engineering measures for railways in areas with collapsible loess[J]. China Railway, 2006, (2): 28-32+82.
- 王绅皓,谢婉丽,常一伦,等.浸水作用下湿陷性黄土微观结构及分形特征研究[J].高校地质学报,2023,29(2):280-288.
- WANG Shenhao, XIE Wanli, CHANG Yilun, et al. Study on the Microstructure and Fractal Characteristics of Collapsible Loess under Water Immersion[J]. Geological Journal of China Universities, 2023, 29(2): 280-288.
- 王亚军,白晨帆,蒋应军,等.挤密桩对大厚度黄土地基浸水沉降的影响[J].铁道建筑,2025,65(2):126-133.

- WANG Yajun, BAI Chenfan, JIANG Yingjun, et al. The effect of compacted piles on the water-induced settlement of thick loess foundations[J]. *Railway Engineering*, 2025, 65(2): 126–133.
- 王昱琛, 谢婉丽, 高帅, 等. 关中平原与黄土高原过渡带地质灾害危险性耦合评价模型研究——以渭南市富平县为例[J]. *灾害学*, 2024, 39(4): 200–206+227.
- WANG Yuchen, XIE Wanli, GAO Shuai, et al. Research on a Coupled Evaluation Model for Geological Disaster Risks in the Transition Zone Between the Guanzhong Plain and the Loess Plateau: A Case Study of Fuping County, Weinan City[J]. *Journal of Catastrophology*, 2024, 39(4): 200–206+227.
- 王媛媛, 李彦荣. 基于骨架颗粒和基质分类的马兰黄土微观结构研究[J]. *太原理工大学学报*, 2025, 56(5): 944–952.
- WANG Yuanyuan, LI Yanrong. Study on the microstructure of Malana loess based on skeleton particles and matrix classification[J]. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 2025, 56(5): 944–952.
- 王长丹, 王炳龙, 王旭, 等. 湿陷性黄土桩网复合地基沉降控制离心模型试验[J]. *铁道学报*, 2011, 33(4): 84–92.
- WANG Changdan, WANG Binglong, WANG Xu, et al. Centrifugal model test for settlement control of composite foundation with collapsible loess pile grid[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2011, 33(4): 84–92.
- 魏亚妮, 范文, 麻广林. 黄土高原马兰黄土微结构特征及湿陷机理[J]. *地球科学与环境学报*, 2022, 44(4): 581–592.
- WEI Yanni, FAN Wen, MA Guanglin. Microstructural characteristics and collapse mechanism of Malana loess in the Loess Plateau[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2022, 44(4): 581–592.
- 谢婉丽, 王延寿, 马中豪, 等. 黄土湿陷机理研究现状及发展趋势[J]. *现代地质*, 2015, 29(2): 397–407.
- XIE Wanli, WANG Yanshou, MA Zhonghao, et al. Current Status and Development Trends in Research on the Mechanism of Loess Collapse[J]. *Geoscience*, 2015, 29(2): 397–407.
- 许领, 戴福初. 黄土湿陷机理研究现状及有关问题探讨[J]. *地质力学学报*, 2009, 15(1): 88–94+104.
- XU Ling, DAI Fuchu. Current status of research on the mechanism of loess subsidence and discussion of related issues[J]. *Journal of Geomechanics*, 2009, 15(1): 88–94+104.
- 许领, 兰天刚, 陆世锋, 等. 沉积深度对非饱和原状黄土压缩及湿陷特性的影响[J/OL]. *地球科学*, 2025: 1–12.
- XU Ling, LAN Tiangang, LU Shifeng, et al. Influence of deposition depth on the compression and wet slump characteristics of unsaturated original loess[J/OL]. *Earth Science*, 2025: 1–12.
- 张明, 胡栋科, 张建设, 等. 管桩挤土效应消除黄土湿陷效果试验研究[J]. *工程地质学报*, 2025, 33(1): 367–376.
- ZHANG Ming, HU Dongke, ZHANG Jianshe, et al. Experimental study on the elimination of wet collapse of loess by pile-driven soil displacement effect[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2025, 33(1): 367–376.
- 张万志, 徐帮树, 曾仲毅, 等. 降雨入渗下膨胀性黄土隧道围岩破坏演化[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2018, 48(4): 736–744.
- ZHANG Wanzhi, XU Bangshu, ZENG Zhongyi, et al. Evolution of rock mass failure in expansive loess tunnels under rainfall infiltration[J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2018, 48(4): 736–744.
- 赵景波, 陈云. 黄土的孔隙与湿陷性研究[J]. *工程地质学报*, 1994, (2): 76–83.
- ZHAO Jingbo, CHEN Yun. Study on the Porosity and Collapsibility of Loess[J]. *Journal of Engineering Geology*, 1994, (2): 76–83.
- 朱云江, 霍继炜, 高宇甲, 等. 三门峡函谷关地区重塑黄土振动特性试验研究[J]. *建筑结构*, 2020, 50(S1): 1093–1098.
- ZHU Yunjiang, HUO Jiwei, GAO Yujia, et al. Experimental study on the vibration characteristics of reclaimed loess in the Hangu Pass area of Sanmenxia[J]. *Building Structure*, 2020, 50(S1): 1093–1098.
- 《中国公路学报》编辑部. 中国路基工程学术研究综述·2021[J]. *中国公路学报*, 2021, 34(3): 1–49.
- Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review of Academic Research on Road Subgrade Engineering in China · 2021[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2021, 34(3): 1–49.
- Li P, Xie W, Pak R Y S, et al. Microstructural evolution of loess soils from the Loess Plateau of China[J]. *Catena*, 2019, 173: 276–288.
- Wang H, Ni W, Liu H, et al. Study of the repeated collapsibility of undisturbed loess in Guyuan, China[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2021, 80(8): 6321–6330.
- Wang J D, Li P, Ma Y, et al. Change in pore-size distribution of collapsible loess due to loading and inundating[J]. *Acta Geotechnica*, 2020, 15(5): 1081–1094.
- Wang K, Zhang S, Xie W, et al. Prediction of the instability probability for rainfall induced landslides: the effect of morphological differences in geomorphology within mapping units[J]. *Journal of Mountain Science*, 2023, 20(5): 1249–1265.
- Wei Y, Fan W, Fu C, et al. Experimental investigation of the hydration swelling effect of clay minerals on loess collapsibility[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2023, 23(1): 06022036.
- Yang H, Xie W, Liu Q, et al. Three-stage collapsibility evolution of Malan loess in the Loess Plateau[J]. *Catena*, 2022, 217: 106482.
- Yuan K, Ni W, Della Vecchia G, et al. Influence of dry density and wetting-drying cycles on the soil-water retention curve of compacted loess: experimental data and modeling[J]. *Acta Geotechnica*, 2024, 19(12): 8111–8128.
- Yuan K, Ni W, Lü X, et al. Influence of wetting-drying cycles on the compression behavior of a compacted loess from microstructure analysis[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2022, 81(9): 348.