

# 灌溉诱发湿陷性黄土性能劣化机理及试验研究

马世雄<sup>1,2</sup>, 王述红<sup>1</sup>, 刘智<sup>2</sup>

(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 宁夏理工学院 建筑与环境学院, 宁夏 石嘴山 753000)

**摘要:** 为探究湿陷性黄土受灌溉影响产生性能劣化的机理, 通过差异盐分质量分数状态下不同灌溉-蒸发循环次数的室内试验, 建立重塑黄土湿陷性受灌溉-蒸发循环作用的劣化模型, 提出评估劣化性能指标, 并通过扫描电镜(SEM)试验获取其微观结构的变化特征. 结果表明, 湿陷系数随灌溉-蒸发循环次数增加及盐分质量分数升高呈现不同的增长规律. 灌溉-蒸发和盐蚀的耦合作用使黄土骨架结构更加松散和弱化, 为湿陷性提供了更多的孔隙空间. 盐分质量分数小于0.3%时, 灌溉-蒸发劣化率高于盐蚀劣化率; 盐分质量分数大于0.6%时, 盐蚀劣化率高于灌溉-蒸发劣化率. 该研究可为黄土高原地区的湿陷性黄土性能劣化产生的灾害评价和预测提供参考依据.

**关键词:** 重塑黄土; 盐蚀; 灌溉-蒸发循环; 湿陷性能劣化; 土壤结构

中图分类号: TU 411 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2025)11-0134-09

## Mechanism and Experimental Study on Deterioration of Collapsible Loess Performance Induced by Irrigation

MA Shi-xiong<sup>1,2</sup>, WANG Shu-hong<sup>1</sup>, LIU Zhi<sup>2</sup>

(1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. School of Architecture and Environment, Ningxia Institute of Science and Technology, Shizuishan 753000, China. Corresponding author: WANG Shu-hong, E-mail: shwangneu@126.com)

**Abstract:** In order to investigate the mechanism of performance deterioration in collapsible loess under the influence of irrigation, laboratory tests with varying irrigation and evaporation cycles under different salt mass fraction conditions were conducted. A deterioration model of remolded loess collapsibility affected by irrigation and evaporation cycles was established, along with proposed evaluation indices for deterioration performance. The microstructural evolution characteristics were obtained through scanning electron microscopy (SEM) tests. Results indicate that the collapsibility coefficient exhibits different growth patterns with increasing irrigation and evaporation cycles and rising salt mass fraction. The coupled effects of irrigation and evaporation and salt erosion render the loess skeletal structure more porous and weaker, providing additional pore space for collapsibility. When the salt mass fraction is below 0.3%, the deterioration rate caused by irrigation and evaporation exceeds that from salt erosion. Conversely, when the salt mass fraction exceeds 0.6%, the deterioration rate from salt erosion surpasses that caused by irrigation and evaporation. This research can serve as a reference for hazard assessment and prediction of performance deterioration in collapsible loess within the Loess Plateau region.

**Key words:** remolded loess; salt erosion; irrigation and evaporation cycle; deterioration of collapsibility; soil structure

黄土是一种典型的结构性土壤, 具有水敏性和湿陷性<sup>[1]</sup>. 黄土的吸水性与其结构密切相关, 当

收稿日期: 2024-05-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52374157); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N2301005; N2301006); 宁夏回族自治区教育厅高等学校科学研究资助项目(CBSC-PA202403070029); 宁夏自然科学基金资助项目(2024AAC03333).

作者简介: 马世雄(1987—), 男, 宁夏固原人, 东北大学博士研究生; 王述红(1969—), 男, 江苏泰州人, 东北大学教授, 博士生导师.

浸水时,它可能会在自重和/或超载作用下坍塌<sup>[2]</sup>.宁夏地处西北典型干旱-半干旱地区,干旱少雨,蒸发强烈.灌溉不仅给土壤输送了水分,也带来了盐分,粗放式的大水漫灌,致使局部潜水位埋深变浅,加之降水稀少、蒸发强烈等因素叠加,土壤中的可溶盐成分产生大的变动.越来越多的研究表明,溶解在孔隙水中的可溶性盐增加了土壤中离子的种类和浓度<sup>[3-4]</sup>,从而改变黄土颗粒表面的水膜厚度<sup>[5-6]</sup>和黄土颗粒之间的吸力<sup>[7]</sup>,这都会不同程度地改变黄土的微观结构,从而影响其湿陷性.更重要的是,灌溉-蒸发形成了土壤的干湿循环作用,而干湿循环不仅为可溶性盐迁移到土壤表面提供驱动力<sup>[8]</sup>,还导致可溶性盐的溶解和结晶,从而对土壤的结构强度产生负面影响<sup>[9]</sup>,这一过程被称为盐蚀<sup>[10]</sup>.

黄土的湿陷性与其微观结构密切相关<sup>[11]</sup>.干湿循环改变了土壤的微观结构,如土壤颗粒的大小、形状和排列<sup>[12]</sup>、孔隙结构的类型和颗粒间结合的强度<sup>[13]</sup>,从而以不同的方式影响土壤的物理和力学性质.研究证明,黄土的湿陷性、变形和抗剪强度在干湿循环下会发生不可逆的劣化<sup>[14]</sup>.

上述研究表明,灌溉-蒸发和盐蚀扰动对黄土湿陷性的影响不容忽视,但研究很少涉及这一问题.此外,有些学者为了研究土的强度与干湿循环或可溶性盐分质量分数的关系,建立了描述强度参数劣化过程的数学模型<sup>[15]</sup>,如 Scelsi 等<sup>[16]</sup>提出了一种弹塑性模型,可以再现非饱和黏土在盐环境中的行为,以解决化学-水力-非饱和黄土的力学响应.然而,这两个影响因素与湿陷性之间的定量关系很少报道.

因此,为了黄土地区的工程安全,揭示灌溉-蒸发作用下湿陷性黄土性能劣化的机理显得尤为重要.本研究使用不同盐分质量分数的溶液模拟灌溉水,采用“加湿-干燥”循环过程处理制备试验黄土土样.通过双密度仪测试和扫描电镜(SEM)测试,研究了土样在灌溉-蒸发后的颗粒、孔隙外观形貌和湿陷性的变化.通过分析不同影响因素下的湿陷系数,提出了考虑盐分质量分数和灌溉-蒸发循环次数的黄土湿陷性劣化指标,从微观角度揭示了灌溉-蒸发和盐蚀耦合作用下的湿陷性劣化机理.研究成果为黄土高原地区的农业灌溉及工程建设提供参考依据.

## 1 试验设计与方法

### 1.1 样品制备

本研究以宁夏固原彭阳县 Q<sub>3</sub> 黄土为研究对象,土样呈黄色或淡黄色.在当地灌溉田间地头地表 0.5 m 以下深处取样.研究区灌溉水源为店子洼水库,该水体环境中 pH 范围在 6.65~9.61,平均值为 7.71,变异系数为 6.59%,总体呈中性-弱碱性,样品间差异较小.

依据《土工试验方法标准》<sup>[18]</sup>测定了黄土的基本物理性质(见表 1),采用中和滴定法和离子色谱法测定了黄土中可溶盐离子的质量分数(见表 2),结果显示,该地区黄土中可溶盐的阳离子主要是 Na<sup>+</sup>,阴离子主要是 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>.由此可以推断,该地区黄土可溶盐的主要成分为 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>,但其初始含量极低,在本次试样制备时可忽略其影响.

表 1 Q<sub>3</sub> 黄土样品的物理性质

Table 1 Physical properties of Q<sub>3</sub> loess sample

自然密度 $\rho_v/(g \cdot cm^{-3})$	干密度 $\rho_d/(g \cdot cm^{-3})$	天然含水率 $w_0/\%$	初始孔隙比 $e_0$	土粒相对密度 $\rho_s$	塑限 $w_p/\%$	液限 $w_L/\%$	pH	电导率 $mS \cdot cm^{-1}$
1.54	1.34	14.80	1.10	2.69	17.40	26.60	7.68	1.00

表 2 Q<sub>3</sub> 黄土土样初始可溶盐离子成分及其质量分数

Table 2 Initial soluble salt ion composition and mass fraction of Q<sub>3</sub> loess sample

类型	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>
质量分数	87.44	53.99	130.50	6.86	233.29	246.43	101.18	89.21

研究区域多数田地黄河水土壤灌溉模式,银川平原地表水主要的可溶盐化学成分为 Na<sup>+</sup>和 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>,即以可溶盐 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 为主<sup>[18]</sup>.为了更准确地模拟实际工程土质条件,黄土样品的干密度设定为 1.34 g·cm<sup>-3</sup>,含水率设定为 15%.设计灌溉水盐分质量分数( $w_s$ )分别为 0, 0.3%, 0.6% 和 1.0% 共 4 个水平.

### 1.2 试验流程

首先,将收集的黄土粉碎并在 105 °C 的烘箱中干燥,然后过 2 mm 筛.接下来,将黄土放入直径  $d=61.8$  mm、高度  $h=20.0$  mm 的模具中重塑,通过静态压实制作成试验所需黄土试样.然后按照试验设计,通过滴定蒸馏水将土样调整至目标含

水率( $w=15\%$ ),随后密封于气密容器中 5 d 以实现水分均匀化。

为了更准确地模拟自然条件下灌溉-蒸发的影响,本研究中的灌溉-蒸发过程包括两个阶段:加湿(即灌溉)和干燥(即蒸发),如图 1 所示.干燥过程通过使用  $65\text{ }^\circ\text{C}$  的恒温鼓风干燥箱(模拟当地夏季平均高温)来实现,而加湿过程通过使用滴定管从样品的顶部和底部均匀添加预设浓度的  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  溶液模拟实际灌溉水来完成.采用称重法测定了样品在加湿和干燥过程中的含水率.测试结果表明,在所考虑的 4 种盐分质量分数下,黄土样品在烘箱中干燥 5 d( $w=1\%$ )或加湿至饱和度为 95%(即含水率  $w=28\%$ )后达到恒重.因此,在干燥-加湿(即灌溉-蒸发)循环期间水的质量分数的上限和下限分别控制为 1% 和 28%.在加湿过程中,将所需浓度的  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  溶液缓慢滴入黄土试样中,然后将试样置于恒温恒湿箱中保存 24 h,即可满足从外到内的均匀湿化条件.因此,加湿过程的持续时间控制为 24 h.在经历预设的灌溉-蒸发循环之后,即  $N=0, 2, 4, 6, 8$  和 10( $N$  为灌溉-蒸发的循环次数),对黄土试样进行湿陷性试验和扫描电镜试验。

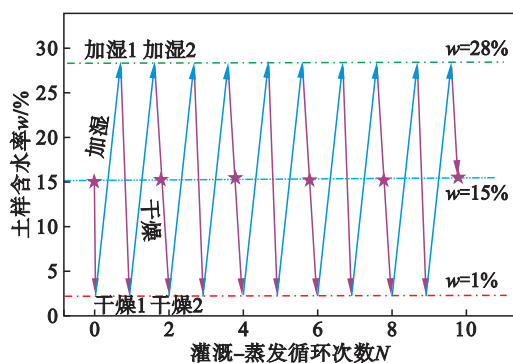


图 1 黄土试样的灌溉-蒸发循环试验研究

Fig. 1 Experimental study by irrigation and evaporation cycles of loess samples

采用 5 种试验条件下的标准黄土样验证了土壤水盐均匀性,即:  $\text{TY}_1$  ( $w=28\%$ ,  $w_s=0.3\%$ ,  $N=0$ ),  $\text{TY}_2$  ( $w=28\%$ ,  $w_s=0.6\%$ ,  $N=0$ ),  $\text{TY}_3$  ( $w=28\%$ ,  $w_s=1\%$ ,  $N=0$ ),  $\text{TY}_4$  ( $w=28\%$ ,  $w_s=0.3\%$ ,  $N=4$ ) 和  $\text{TY}_5$  ( $w=1\%$ ,  $w_s=0.6\%$ ,  $N=2$ ),  $\text{TY}_i$  表示土样,下标  $i$  表示  $i$  号土样.每个标准黄土试样分为两个高度为 10 mm 的圆柱形截面.每个部分首先取一部分土壤干燥以测量含水量,而剩余的土壤经风干后通过 2 mm 筛过筛.使用可溶盐水以 1:5 的土壤与水的质量比制备浸出液.取 50 mL 浸出液并装入测试前称重的烧杯中.将其在电炉上干燥,每隔 0.5 h 称量烧

杯和样品的总质量,直到两个连续质量值的差小于 0.001 g,然后计算每个部位的盐分质量分数.结果表明,对于目标含水率为 1% 和 28% 的黄土样品,测量数据的最大偏差分别为 0.110% 和 0.160%,与目标值相比可忽略不计.目标盐分质量分数为 0.3%~1.0% 的黄土样品,内部的盐分质量分数差异分别为 0.012%, 0.015% 和 0.014%,表明同一组土样断面可溶性盐总量与灌溉水可溶盐分质量分数基本一致.通过对比分析,验证了不同试验阶段黄土试样的均匀性。

### 1.2.1 湿陷性试验

本研究采用湿陷性黄土固结试验<sup>[19]</sup>评估黄土样品的湿陷性.在此基础上,计算了在一定荷载作用下的湿陷系数  $\delta_s$ :

$$\delta_s = \frac{H_1 - H_2}{H_0} \quad (1)$$

式中:  $H_0$  表示试样初始高度;  $H_1$ 、 $H_2$  分别代表在某一垂直应力作用前后的试样高度。

黄土的湿陷性可根据湿陷系数  $\delta_s$  的大小进行分类<sup>[20]</sup>: 当  $\delta_s < 0.015$  时,为非湿陷性黄土; 当  $0.015 \leq \delta_s < 0.03$  时,为弱湿陷性黄土; 当  $0.03 < \delta_s \leq 0.07$  时,为中度湿陷性黄土; 当  $\delta_s > 0.07$  时,为强湿陷性黄土。

湿陷性测试采用多台 WG 型三联高压固结仪装置.对所有土样施加一系列大小分别为 50, 100, 150, 200, 300, 400, 600 和 800 kPa 的垂直应力.各阶段应力荷载下的稳定标准为沉降小于 0.01 mm/h,待沉降稳定后再施加下一阶段荷载。

### 1.2.2 扫描电镜试验

扫描电镜测试过程主要分为 4 个步骤.第 1 步,将制备的  $\text{TY}_1 \sim \text{TY}_5$  黄土试样从中心切割成  $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 20\text{ mm}$  的立方体试样.第 2 步,用真空冷冻干燥器干燥立方体试样以去除水分.第 3 步,从中间分开立方体试样,并用导电胶带将新鲜切面朝上粘在基底上.第 4 步,对试样喷金处理,使用 Quanta 450 FEG 扫描电镜观察并记录试样的微观结构。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 湿陷系数 $\delta_s$

如图 2a 所示,未经历灌溉-蒸发循环( $N=0$ )的重塑压实黄土试样在各种应力下的湿陷系数均小于 0.015 的临界值,即完全压实的黄土其湿陷性可忽略不计.但随着灌溉-蒸发循环次数的增加,土样湿陷系数  $\delta_s$  在不同应力下随灌溉-蒸

发循环次数的增加而增大.值得注意的是,  $w_s=0$  时经过 8 次循环后, 200 kPa 应力下的湿陷系数达到 0.015, 表明此时的压实黄土试样出现了二次湿陷, 即重塑压实黄土再次达到或超过定义黄土湿陷性的基准值<sup>[1,21]</sup>. 而  $w_s=0.3\%$  的压实黄土在 200 kPa 应力下, 发生二次湿陷所需的灌溉-蒸发循环次数为 6 次(见图 2b), 这意味着土样中可溶盐含量的增加促进了二次湿陷的发生.

初始湿陷应力  $p_{s0}$  是反映黄土湿陷性的重要

指标, 它标志着黄土开始湿陷, 通常取湿陷系数  $\delta_s=0.015$  时的应力值作为  $p_{s0}$ . 比较图 2b 和图 2c, 当土样的盐分质量分数从 0.3% 增加到 0.6% 时, 6 次灌溉-蒸发交替下的湿陷应力  $p_{s0}$  值从 200 kPa 下降至 100 kPa. 当土样  $w_s=0.6\%$  时, 经历 2 次灌溉-蒸发循环后的  $p_{s0}$  值显著小于经历 0 次灌溉-蒸发循环的  $p_{s0}$  值. 如图 2d 所示, 当土样  $w_s=1.0\%$  时, 经历 2 次灌溉-蒸发循环后的  $p_{s0}$  值显著小于经历 0 次灌溉-蒸发循环后的  $p_{s0}$  值.

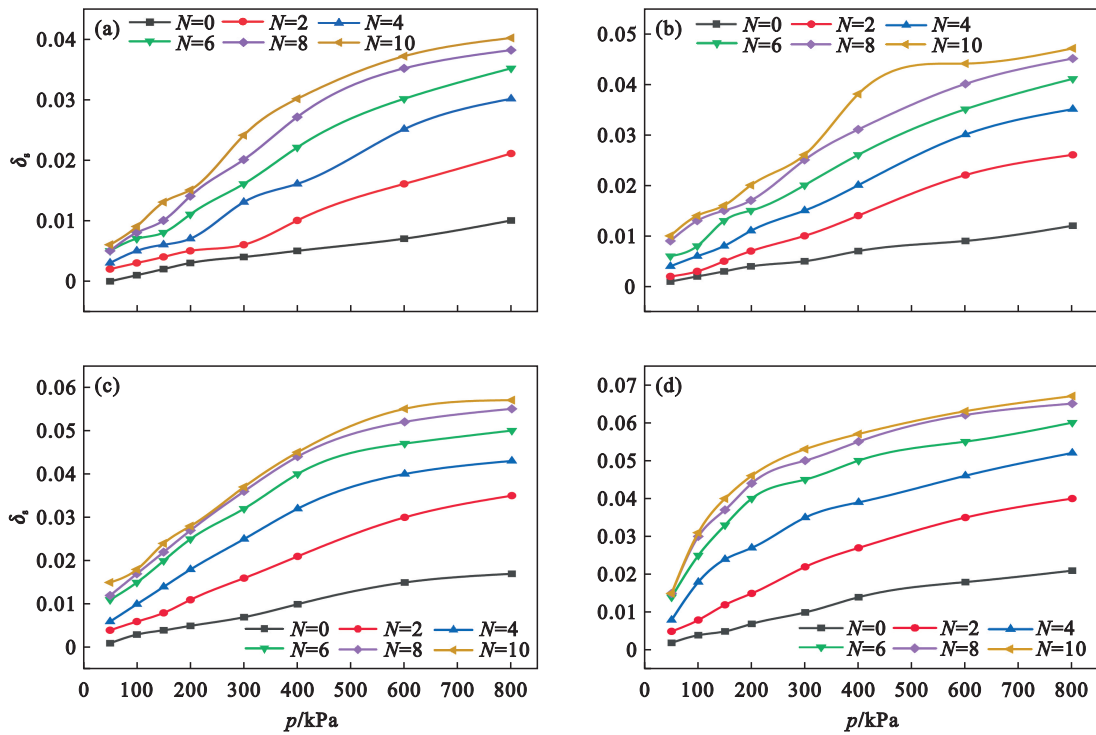


图 2 不同循环次数下湿陷系数  $\delta_s$  与垂直应力  $p$  之间的关系曲线

Fig. 2 Relationship between collapsibility coefficient  $\delta_s$  and vertical stress  $p$  under different cycles  
(a)— $w_s=0\%$ ; (b)— $w_s=0.3\%$ ; (c)— $w_s=0.6\%$ ; (d)— $w_s=1.0\%$ .

在实际工程建设中, 通常以 200 kPa 压力下的湿陷系数作为定量评价黄土湿陷性的标准, 如图 3 和图 4 所示.

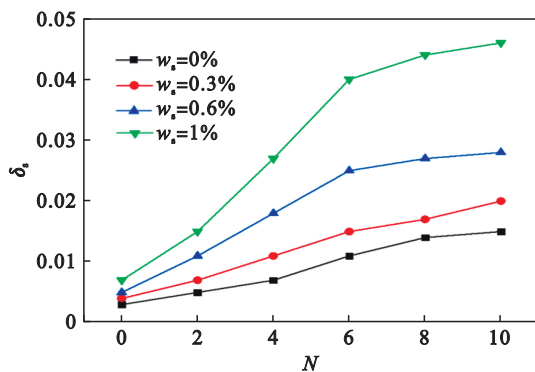


图 3 200 kPa 下湿陷系数与灌溉-蒸发循环次数关系曲线  
Fig. 3 Relationship between collapsibility coefficient and irrigation and evaporation cycles at 200 kPa

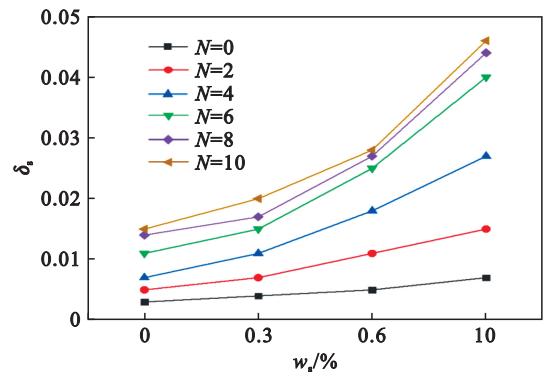


图 4 200 kPa 下湿陷系数与盐分质量分数的关系曲线  
Fig. 4 Relationship between collapsibility coefficient and salt mass fraction at 200 kPa

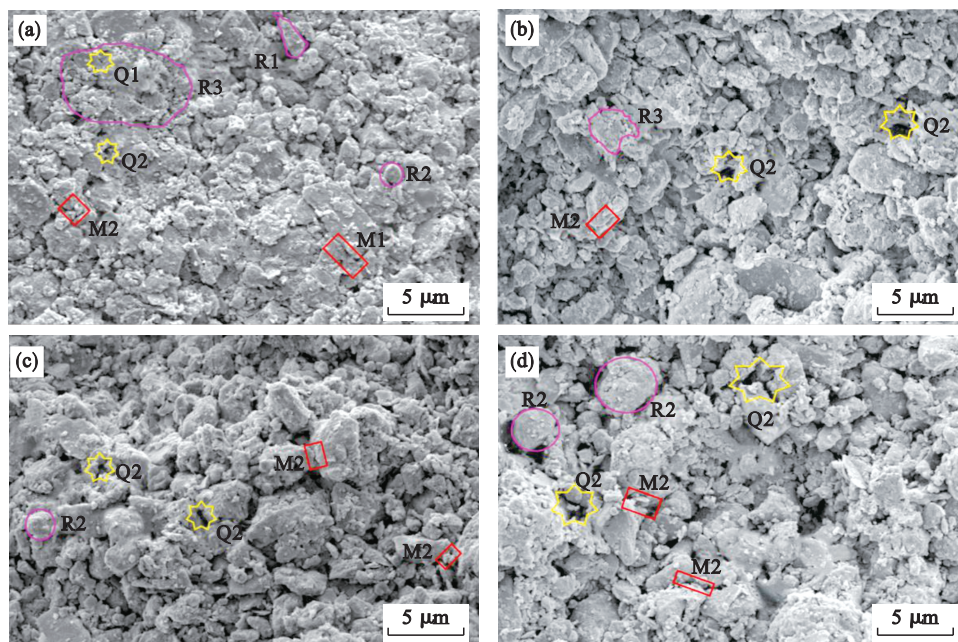
压实黄土试样湿陷系数随灌溉-蒸发循环次数的增加而增大, 但大多数土样湿陷性增长率逐渐减小, 呈对数增长趋势, 见图 3. 以  $w_s=0.6\%$  的

土样为例,在 0, 2, 4, 6, 8, 10 次循环中,各循环的湿陷系数分别为 0.005, 0.011, 0.018, 0.025, 0.027, 0.028, 呈上升趋势,但增幅分别为 120.0%, 63.6%, 38.9%, 8.0%, 3.7%, 增长速率下降.对于其他不同盐分质量分数(0, 0.3% 和 1.0%)的压实黄土试样,湿陷系数在灌溉-蒸发循环作用下表现出相似的变化趋势.此外,值得注意的是,在灌溉-蒸发循环之前( $N=0$ ),与灌溉-蒸发循环之后相比,湿陷系数随盐分质量分数的变化并不显著(见图 4).但当  $N>0$  时,随着盐分质量分数的增加,土样湿陷系数不同程度地显著增加,呈指数增长趋势.例如,对于 10 次灌溉-蒸发循环后的压实黄土试样,盐分质量分数为 0, 0.3%, 0.6% 和 1.0% 的压实黄土对应的湿陷系数  $\delta_s$  分别为 0.015, 0.020, 0.028 和 0.046, 分别增加了 33.3%, 40.0% 和 64.3%,

呈上升趋势;其它灌溉-蒸发循环次数下的湿陷系数也基本符合这一趋势.

## 2.2 扫描电镜(SEM)图像

图 5 显示了灌溉-蒸发循环前后压实黄土样品 SEM 图像.灌溉-蒸发循环促进了土壤水分的积累、颗粒类型和颗粒间接触类型的转变.可以理解为,循环之前的黄土骨架主要由胶结骨料和较大的角状或圆形颗粒组成,这些颗粒间为点接触或面接触,骨料间孔隙和骨料内孔隙共存.2 次灌溉-蒸发循环后,部分胶结骨料崩解,土中出现更多的骨料间孔隙,颗粒间接触减弱,骨架趋于疏松.经过 4 次循环后,角状颗粒和颗粒间的面接触减少,而更多的圆形颗粒和点接触出现.经过 8 次循环后,颗粒间的接触以点接触为主,孔隙以骨料间孔隙为主.



注:R1—角状颗粒,R2—圆形颗粒,R3—胶结骨料;M1—面接触,M2—点接触;Q1—骨料内孔隙,Q2—骨料间孔隙.

图 5 不同灌溉-蒸发循环次数后样品的 SEM 图像 ( $w_s=0$ )

Fig. 5 SEM images of samples after different irrigation and evaporation cycles ( $w_s=0$ )

(a)— $N=0$ ; (b)— $N=2$ ; (c)— $N=4$ ; (d)— $N=8$ .

图 6 显示了不同盐分质量分数的压实黄土样品的 SEM 图像.黄土骨架主要由胶结骨料和较大的单体颗粒组成,盐分质量分数的升高加剧了黄土结构的弱化.当  $w_s=3.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  时,单体颗粒的数量减少,而碎片聚集体的数量增加.当  $w_s=0.6\%$  时,黄土骨架趋于疏松,被盐晶覆盖的颗粒增多.当  $w_s=1.0\%$  时,黄土结构进一步松散,颗粒接触面被破坏,团聚体间孔隙明显增大.如图 7 所示,将图 6c 的 SEM 图像二值化,并使用孔隙和裂纹分析系统进行孔隙鉴定<sup>[22]</sup>.选取孔隙面积和分形维

数作为衡量压实黄土微观孔隙结构变化的指标.根据文献[23]提出的等效孔径划分标准,黄土孔隙分为微孔( $d \leq 2 \mu\text{m}$ )、小孔( $2 \mu\text{m} < d \leq 8 \mu\text{m}$ )、中孔( $8 \mu\text{m} < d \leq 32 \mu\text{m}$ )和大孔( $d > 32 \mu\text{m}$ ).图 8 显示了黄土样品的孔隙面积百分比.可以看出,随着  $N$  和  $w_s$  的增加,大孔和中孔的面积增加,而小孔和微孔的面积减少.当  $w_s=0$  时,10 次循环后样品中的中孔和大孔的面积百分比分别增加了 23.29% 和 3.73%,而小孔和微孔的面积百分比分别减少了 19.82% 和 7.20%.与灌溉-蒸发循环前相比,循

环后试样的孔隙面积百分比发生了显著变化,主要是由微孔和小孔向中孔和大孔转变所致.中孔和大孔比例的增加增强了黄土的孔隙结构,并显著提升了黄土样品孔隙结构的连通性,这一现象

在盐分质量分数较高的样品中尤为明显.与此同时,也说明灌溉-蒸发循环下黄土样品孔隙形态的复杂性降低,与棱角状颗粒向圆形颗粒转化的趋势相对应<sup>[24]</sup>.

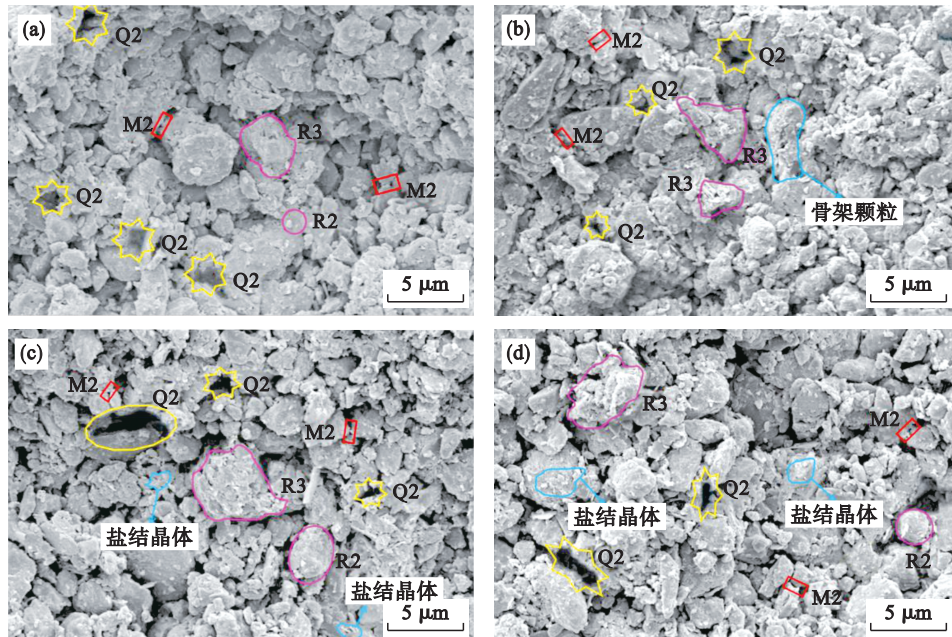


图 6 不同盐分质量分数下样品的 SEM 图像 (N=10)

Fig. 6 SEM images of samples at different salt mass fractions (N=10)

(a)— $w_s=0$ ; (b)— $w_s=0.3\%$ ; (c)— $w_s=0.6\%$ ; (d)— $w_s=1.0\%$ .

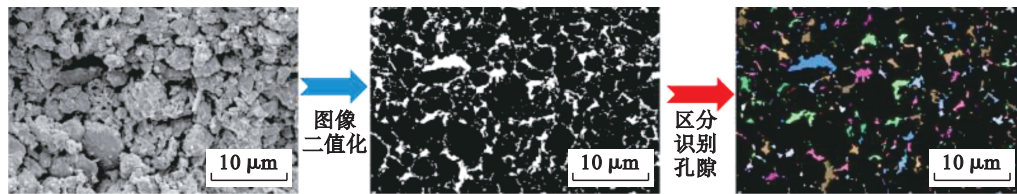


图 7 SEM 图像的二值化与孔隙识别

Fig. 7 Binarization and pore identification of SEM image

### 2.3 湿陷性劣化机理分析

黄土湿陷性的变化是黄土孔隙结构变化在宏观层面上的表现.结合上述试验结果,从灌溉-蒸发循环和盐蚀两个方面分析压实黄土在灌溉-蒸发循环条件下的湿陷性劣化机理.

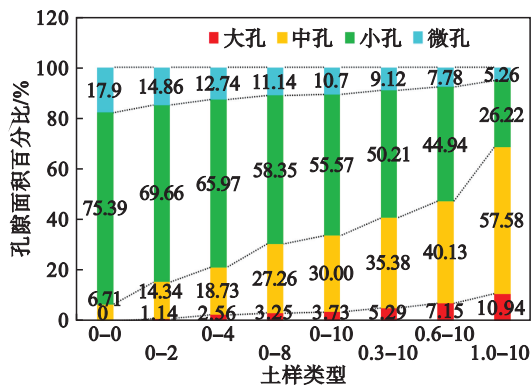
1) 黄土试样增湿后,黄土颗粒间的水化膜不断增厚,从而增大了颗粒间的距离,减弱了团聚体内部颗粒间的黏结强度.而在压实过程中,由于水分的不断流失,黄土样品中的基质吸力逐渐增加<sup>[25]</sup>,这将对土壤团聚体产生拉应力,从而削弱其黏结强度.当拉应力达到临界值时,土壤将发生开裂<sup>[26]</sup>,这减少了土壤颗粒的接触(见图 5).在灌溉-蒸发交替引起的孔隙水不断的液-气转化过程中,压实黄土的整体结构强度被削弱和破坏,这种负面影响一般是不可逆的<sup>[27]</sup>.微观上表

现为干湿交替作用下黄土样品中的团聚体崩解、颗粒运动和团聚体间孔隙逐渐增多(见图 5),导致孔隙类型以大孔和中孔为主(见图 8),这为黄土颗粒在湿陷过程中的滑移提供了有利条件<sup>[28]</sup>.经过几次循环后,黄土的整体结构趋于平衡状态<sup>[29]</sup>,黄土吸水性所依赖的团聚体间孔隙的压缩空间受到限制.因此,随着灌溉-蒸发循环次数的增加,黄土湿陷系数的增大趋势也逐渐减缓(见图 3).

2) 黄土样品中的可溶盐(主要是  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ )也会对黄土结构造成实质性破坏.在黄土样品的循环过程中,溶解在孔隙水中的  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  会逐渐结晶成  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ,黄土颗粒间距因盐胀作用而增大(图 6),因为  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  的体积是  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  的 4.18 倍<sup>[29-30]</sup>.然后,当黄土样品经历增湿过程时,

Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>·10H<sub>2</sub>O 逐渐溶解在孔隙水中,导致黄土骨架中的盐结晶丧失.因此,黄土颗粒失去支撑,黄土骨架的松动导致黄土结构的进一步破坏. Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>在灌溉-蒸发循环作用下的反复结晶和溶解,削弱了压实黄土颗粒间的胶结作用,甚至使胶结作用消失.随着压实黄土样品盐分质量分数的增加,黄土结构受到的扰动更加明显,由于盐胀作用的增强,大孔隙和中孔隙的孔隙面积百分比增加(见图6和图8).在没有灌溉-蒸发循环(N=0)的情况下,Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>含量的变化对压实黄土结构的扰动有限,因为此时Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>没有发生相变,黄土样品中不会发生盐蚀,引起湿陷系数的变化有限(见图4).

上述效应的综合作用导致了压实黄土在灌溉-蒸发循环作用下的湿陷性劣化.



注:样品组如0-4表示盐分质量分数为0,灌溉-蒸发循环次数N=4.

图8 不同黄土样品的孔隙面积分布

Fig. 8 Pore area distribution of different loess samples

### 2.4 灌溉-蒸发和盐蚀效应对比

在灌溉-蒸发循环过程中,黄土结构受到灌溉-蒸发和盐蚀的耦合作用,但各影响因素对黄土结构的破坏程度难以量化.因此,可基于湿陷系数变化进行灌溉-蒸发与盐蚀劣化的解耦分析.

以6次灌溉-蒸发循环下的压实黄土为例(图9),灌溉-蒸发循环下的湿陷性劣化可归纳为4条典型路径:A-B路径代表6次灌溉-蒸发循环后仅由干湿作用引起的湿陷性劣化;B-C路径表示6次循环后仅由0.3%盐分质量分数下的盐蚀作用引起的劣化;B-D路径表示6次循环后仅由0.6%盐分质量分数下的盐蚀作用引起的劣化;以及B-E路径表示在6次循环后当盐分质量分数为1.0%时仅由盐蚀作用引起的劣化.

湿陷性劣化率K如式(2)所示.将灌溉-蒸发

和盐蚀引起的劣化从任一路径的劣化总量中分离出来,并对各因素引起的劣化所占比例进行了量化和比较.

$$K_1 = \frac{\delta_{n0} - \delta_0}{\delta_{ns} - \delta_0}, K_2 = \frac{\delta_{ns} - \delta_{n0}}{\delta_{ns} - \delta_0} \quad (2)$$

式中:K<sub>1</sub>和K<sub>2</sub>分别为灌溉-蒸发和盐蚀湿陷性劣化率;δ<sub>ns</sub>为盐分质量分数为s的压实黄土在第n次灌溉-蒸发循环后的湿陷系数;δ<sub>n0</sub>为w<sub>s</sub>=0时第n次灌溉-蒸发循环后的湿陷系数;δ<sub>0</sub>为初始湿陷系数.其中,n为2,4,6,8,10,s为0.3%,0.6%,1.0%.

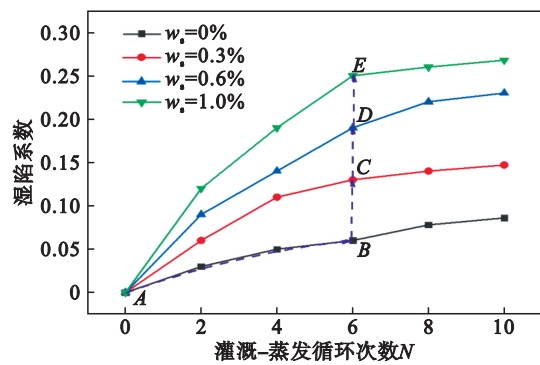


图9 200 kPa下不同盐分质量分数土样湿陷系数与灌溉-蒸发循环次数关系曲线

Fig. 9 Relationship between collapsibility coefficient of loess samples at different salt mass fractions and irrigation and evaporation cycles at 200 kPa

K<sub>1</sub>+K<sub>2</sub>=1,并且在6次循环之后两者的变化如图10所示.K<sub>1</sub>值随盐分质量分数的增加而减小,而K<sub>2</sub>值增大,说明在一定的循环次数下,盐分质量分数的增加会导致与干湿相关的劣化程度下降,盐蚀引起的劣化比例逐渐增大.可以看出,盐分质量分数越高,湿陷性劣化率K<sub>2</sub>越大,K<sub>1</sub>值越小.

此外,当盐分质量分数低(w<sub>s</sub>=0.3%)时,K<sub>1</sub>/K<sub>2</sub>的值总是大于1,表明灌溉-蒸发劣化率高于盐蚀的劣化率,这意味着灌溉-蒸发对黄土结构的作用比盐蚀更明显.灌溉-蒸发循环次数越多,该值越大,说明灌溉-蒸发循环对黄土结构的影响越显著.然而,在所预设的其他盐分质量分数条件下(w<sub>s</sub>=0.6%,w<sub>s</sub>=1.0%),K<sub>1</sub>/K<sub>2</sub>值总是小于1,这意味着在较高浓度的盐分质量分数条件下,盐蚀对黄土结构产生的影响更大.因此,对于银川地区灌溉湿陷性黄土,可能存在一个临界盐分质量分数w<sub>sc</sub>,它控制灌溉-蒸发和盐蚀对湿陷性劣化的影响.当盐分质量分数高于w<sub>sc</sub>时,盐蚀对湿陷性的劣化大于灌溉-蒸发,即可溶性盐相变引起的结构破坏程度高于孔隙水相变引起的结构破坏程

度;反之,当盐分质量分数小于等于  $w_{sc}$  时,灌溉-

蒸发对湿陷性劣化的影响更显著.

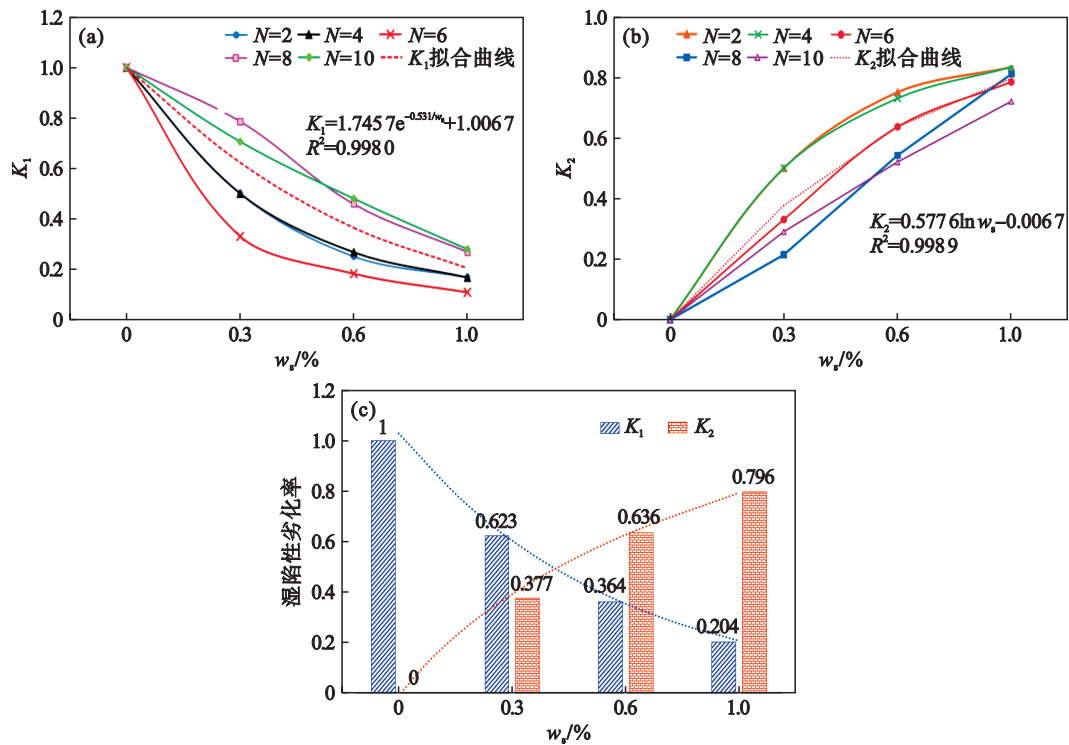


图 10 湿陷性劣化率与盐分质量分数关系曲线

Fig. 10 Relationship between collapsibility deterioration rate and salt mass fraction

(a)— $K_1$ 与盐分质量分数的关系曲线; (b)— $K_2$ 与盐分质量分数的关系曲线; (c)— $K_1, K_2$ 变化趋势曲线.

### 3 结 论

1) 在灌溉-蒸发循环条件下,重塑压实黄土试样的湿陷性均劣化.随着灌溉-蒸发循环次数的增加,土样的湿陷系数逐渐增大并趋于稳定,而湿陷系数与盐分质量分数呈指数关系.

2) 压实黄土的微观结构表明,经过灌溉-蒸发循环后,大量的微孔和小孔隙发育为中孔和大孔.在预设的盐分质量分数范围内,土壤骨架趋于疏松,结构趋于弱化,表现为干湿和盐蚀耦合作用使大中孔隙占比和土颗粒间孔隙面积百分比增大.

3) 当土样盐分质量分数低( $w_s=0.3\%$ )时,灌溉-蒸发对黄土结构的干扰比盐蚀更明显;而盐分质量分数较高时( $w_s=0.6\%, 1.0\%$ ),盐蚀对黄土产生的影响更大.

#### 参考文献:

[1] Li Y R, Shi W H, Aydin A, et al. Loess genesis and worldwide distribution [J]. *Earth-Science Reviews*, 2020, 201: 102947.  
 [2] 屈宏录,刘德仁,孙英萍,等.深厚黄土地基浸水湿陷变形及竖向土压力作用分析[J].*水文地质工程地质*, 2022, 49(4):157-164.

(Qu Hong-lu, Liu De-ren, Sun Ying-ping, et al. Analysis of collapsible deformation and vertical soil pressure action of thick loess foundation [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(4):157-164.)  
 [3] Wang Q H, Wang J D, Li S, et al. Experiments to simulate the salinisation process of loess under a dynamic water cycle [J]. *Environmental Research*, 2025, 268: 120739.  
 [4] Ying C Y, Hu X L, Zhou C, et al. Analysis of chemo-mechanical behavior of silty soil under long-term immersion in saline reservoir water [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2021, 80(1): 627-640.  
 [6] Xu J, Zhang L L, Li Y F, et al. Mechanical, mineralogical, and microstructural characterization of collapsible loess cured by NaOH solution [J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 421:135678.  
 [7] Zhang F Y, Wang G H, Kamai T, et al. Undrained shear behavior of loess saturated with different concentrations of sodium chloride solution [J]. *Engineering Geology*, 2013, 155:69-79.  
 [8] Xue C, Wang X G, Liu K. Effect of soaking time and salt concentration on mechanical characteristics of slip zone soil of loess landslides [J]. *Water*, 2020, 12(12):3465.  
 [9] Hu M, Liu Y X, Ren J B, et al. Laboratory test on crack development in mudstone under the action of dry-wet cycles [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2019, 78(1):543-556.  
 [10] Xu L, Coop M R. Influence of structure on the behavior of a saturated clayey loess [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2016, 53(6):1026-1037.  
 [11] Ietto F, Perri F, Cella F. Weathering characterization for landslides modeling in granitoid rock masses of the Capo Vaticano promontory (Calabria, Italy) [J]. *Landslides*,

- 2018, 15(1):43-62.
- [12] Wang L Q, Shao S J, She F T. A new method for evaluating loess collapsibility and its application [J]. *Engineering Geology*, 2020, 264:105376.
- [13] Ni W K, Yuan K Z, Lyu X F, et al. Comparison and quantitative analysis of microstructure parameters between original loess and remoulded loess under different wetting-drying cycles[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1):5547.
- [14] Pires L F, Auler A C, Roque W L, et al. X-ray microtomography analysis of soil pore structure dynamics under wetting and drying cycles[J]. *Geoderma*, 2020, 362: 114103.
- [15] Chou Y L, Wang L J. Soil-water characteristic curve and permeability coefficient prediction model for unsaturated loess considering freeze-thaw and dry-wet [J]. *Soils and Rocks*, 2021, 44(1): 1-11.
- [16] 郝奇琛. 中国内陆盆地地下水流与水盐运移耦合模拟研究:以柴达木盆地典型剖面为例[D]. 北京:中国地质大学(北京),2015.  
(Hao Qi-chen. Study on coupling simulation of groundwater flow and water and salt transport in inland basin of China: a case study of typical profile in Qaidam Basin [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2015.)
- [17] Scelsi G, Abed A A, Della Vecchia G, et al. Modelling the behaviour of unsaturated non-active clays in saline environment[J]. *Engineering Geology*, 2021, 295:106441.
- [18] 中华人民共和国水利部. 土工试验方法标准:GB/T 50123—2019[S]. 北京:中国计划出版社,2019.  
(Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Standard for geotechnical testing method: GB/T 50123—2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019.)
- [19] 弓永峰. 人类活动影响下银川平原地下水循环特征与土壤盐渍化研究[D]. 武汉:中国地质大学,2023.  
(Gong Yong-feng. Study on the characteristics of groundwater circulation and soil salinization in Yinchuan Plain under the influence of human activities [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2023.)
- [20] Li X A, Li L C, Song Y X, 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, 249:77-88.
- [21] Wang F, Li G Y, Ma W, et al. Effect of repeated wetting-drying-freezing-thawing cycles on the mechanic properties and pore characteristics of compacted loess[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2020, 2020(1):8839347.
- [22] Liu C, Shi B, Zhou J, et al. Quantification and characterization of microporosity by image processing, geometric measurement and statistical methods: application on SEM images of clay materials[J]. *Applied Clay Science*, 2011, 54(1):97-106.
- [23] 雷祥义. 中国黄土的孔隙类型与湿陷性[J]. 中国科学(B), 1987, 17(12):1309-1318.  
(Lei Xiang-yi. Pore types and collapsibility of loess in China [J]. *Science in China(B)* 1987, 17(12):1309-1318)
- [24] Xu P P, Zhang Q Y, Qian H, et al. Microstructure and permeability evolution of remolded loess with different dry densities under saturated seepage[J]. *Engineering Geology*, 2021, 282:105875.
- [25] Soulié F, Cherblanc F, El Youssoufi M S, et al. Influence of liquid bridges on the mechanical behaviour of polydisperse granular materials [J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2006, 30(3):213-228.
- [26] Tang C S, Shi B, Liu C, et al. Influencing factors of geometrical structure of surface shrinkage cracks in clayey soils[J]. *Engineering Geology*, 2008, 101(3/4):204-217.
- [27] Yan C G, An N, Wang Y C, et al. Effect of dry-wet cycles and freeze-thaw cycles on the antierosion ability of fiber-reinforced loess [J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2021, 2021(1):8834598.
- [28] Shao X X, Zhang H Y, Tan Y. Collapse behavior and microstructural alteration of remolded loess under graded wetting tests[J]. *Engineering Geology*, 2018, 233:11-22.
- [29] Liu W H, Tang X W, Yang Q, et al. Influence of drying/wetting cycles on the mechanical cyclic behaviours of silty clay [J]. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2015, 19(7):867-883.
- [30] Peng S Q, Wang F, Fan L. Experimental study on influence of vaporous water on salt expansion of sulfate saline soil[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2019, 2019(1): 6819460.
- [31] 李艺, 李少锋, 高炎. 氯盐干湿循环下尾矿球混凝土气体渗透性与孔轴线可靠性[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2021, 42(10):1483-1490.  
(Li Yi, Li Shao-feng, Gao Yan. Air permeability and pore axis reliability of tailing-ball concrete under chloride salt dry-wet cycle [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2021, 42(10):1483-1490.)