

# 微观尺度下黄土多级湿陷性研究

张晓周<sup>1,2</sup>, 卢玉东<sup>1,2</sup>, 郭雯<sup>1,2</sup>, 李鑫<sup>1,2</sup>, 梁少欢<sup>1,2</sup>

(1. 长安大学 环境科学与工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 陕西 西安 710054)

**摘要:** [目的] 验证黄土多级湿陷性以及探究微观尺度下黄土的湿陷变形方式, 为黄土的湿陷变形机理研究提供科学依据。[方法] 分别设计、实施了室内循环加水湿陷试验和相同样品增湿前后微观结构观察试验, 并分别对湿陷数据与扫描电镜影像进行分析和对比。[结果] 湿陷数据表明, 在黄土达到一次湿陷稳定以及去水稳定后, 在装置内再次加水会导致试样再次发生明显形变, 而黄土的微观结构在湿陷过程中发生了溶解、移动、重组三种变形方式。[结论] 黄土结构这种破坏—重组—破坏的动态循环过程是黄土能够发生多级湿陷的内在原因。

**关键词:** 湿陷性; 多级湿陷性; 增湿减湿; 电镜扫描

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2019)06-0170-06

中图分类号: TU411.92

**文献参数:** 张晓周, 卢玉东, 郭雯, 等. 微观尺度下黄土多级湿陷性研究[J]. 水土保持通报, 2019, 39(6): 170-175. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2019.06.025; Zhang Xiaozhou, Lu Yudong, Guo Wen, et al. A study on multi-level collapsibility of loess at microscale[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(6):170-175.

## A Study on Multi-level Collapsibility of Loess at Microscale

Zhang Xiaozhou<sup>1,2</sup>, Lu Yudong<sup>1,2</sup>, Guo Wen<sup>1,2</sup>, Li Xin<sup>1,2</sup>, Liang Shaohuan<sup>1,2</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China;

2. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecology in Arid Areas, Ministry of Education, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

**Abstract:** [Objective] The multi-level collapsibility of loess was investigated and the way of loess collapsibility deformation was studied at the microscale in order to provide a scientific basis for the study of loess collapsible deformation mechanism. [Methods] We designed and conducted a indoor cyclic collapsibility test, to observe the micro-structure of the same samples under repeated humidification and dehumidification processes. The collapsibility data were analyzed and the scanning electron microscopy images were compared. [Results] The collapsibility data showed that after the loess reached the first collapsibility and water removal stability, adding water into the device would cause the deformation of the sample again. During the collapsibility process, the micro-structure undergone three deformation modes: dissolution, movement and reconstruction. [Conclusion] It is the dynamic process of destruction-reconstruction-destruction of loess structure that leads to multi-level collapsibility of loess.

**Keywords:** collapsibility; multi-level collapsibility; humidification and dehumidification; SEM

黄土作为一种特殊性工程材料,在我国西北地区有着广泛的分布。长期以来,由黄土水敏性引起的黄土湿陷性对该地区实际工程应用造成很大的困扰。地基沉陷、边坡失稳、房屋开裂等危害均与黄土的湿陷性有着紧密的联系。为了揭示黄土的这种性质,同

时为了更好地指导工程施工建设,长期以来,学者们做着不懈的努力。Tovey<sup>[1-3]</sup>、高国瑞<sup>[4-5]</sup>、雷祥义<sup>[6-7]</sup>等通过扫描电子显微镜对黄土的微观结构进行观察,在分析黄土颗粒接触方式、孔隙类型后,得出黄土中架空孔隙的存在是黄土能够发生湿陷的主要原因。

收稿日期:2019-06-02

修回日期:2019-06-18

资助项目:国家自然科学基金重点项目“环境影响下黄土边坡灾变力学机制的微—细—宏观多尺度研究”(41630634);长安大学研究生科研实践创新项目(300103002025);贵州省教育厅创新群体重大项目(黔教合 KY[2016]054;黔教合 KY 字[2016]055)

第一作者:张晓周(1990—),男(汉族),河北省邯郸市人,博士研究生,主研究方向为水文地质学。E-mail:zhang29060926@163.com。

通讯作者:卢玉东(1969—),男(汉族),河北省唐山市人,博士,博士生导师,主要从事水文地质学研究。E-mail:luyudongphd@163.com。

黄土的湿陷性是由于骨架颗粒之间起到黏结作用的胶结物在水的作用下发生软化导致的。胡再强<sup>[8]</sup>、王常明<sup>[9]</sup>等通过对黄土增湿前后微观结构的观察,发现在水作用后,黄土中的架空孔隙显著减少,黄土微观结构变得更为致密,印证了前人的猜想。李喜安<sup>[10-11]</sup>团队将黄土颗粒级配、孔隙率、孔隙类型等因素与湿陷性质相结合,并尝试用单纯形法对黄土湿陷起关键作用的矿物进行判别<sup>[12-13]</sup>,这些定量分析对黄土湿陷性模型的建立至关重要。学者们也依据这些成果提出了胶体不足说、盐溶假说、欠压密理论等湿陷机理。虽然这些基于影像分析以及室内试验得出的结论能够很好地阐释黄土的湿陷机理并在一定程度上解决了工程实践中湿陷量的计算问题。但这些观点大多认为黄土在一次饱和湿陷后会达到其最大湿陷量,之后不会再发生湿陷。而孙建中<sup>[14-15]</sup>、姚志华<sup>[16]</sup>等通过野外大型灌溉试验数据的分析,认为黄土发生湿陷后仍具有剩余湿陷量,这种剩余湿陷量的存在使得黄土在发生一次湿陷后仍能再次发生湿陷变形。这种观点让我们对黄土的湿陷性有了新的认识,意识到黄土的湿陷性可能是一个动态过程,是随着黄土中水分的变化而发生变化的。为此本研究分别设计了室内湿陷试验和电镜扫描试验来验证黄土的多级湿陷性的存在,并试图从微观角度来探究黄土的湿陷变形机理。

## 1 材料与方法

选取甘肃省榆中县具有典型湿陷性的马兰黄土作为试验样品,在测定其基本物理参数后分别实施室内循环增湿、减湿湿陷试验以及同一样品增湿前后黄土微观结构观察对比试验。

### 1.1 研究区概况

研究区位于甘肃省榆中县西部金崖镇金家崖村北侧的农田中。距兰州市区 16.7 km,距榆中县城 20 km。东与夏官营镇、三角城乡、贡井乡相邻,南与定远镇、连搭乡接壤,西依来紫堡乡、皋兰县的什川镇,北靠哈岷乡。陇海铁路、岷柳高速公路、宝兰铁路复线等重要交通线路穿境而过,此地为榆中北山地区与会宁西部地区进入兰州的必经之地,地理位置重要,区位优势明显。金崖镇境内有黄河一级支流宛川河由东向西横贯境内,河流南岸土地较为平整,是当地主要的蔬菜种植区;河流北侧土地以丘陵为主,是当地加工厂的聚集地。金崖镇地处黄土高原腹地,属温带半干旱大陆性气候,夏季炎热,冬季寒冷干燥。最高日平均温度为 7 月的 21.4℃,最低日平均温度为 1 月的 -5.8℃,年平均气温为 9.1℃。全年降雨

量约为 400 mm,几乎所有降雨都集中在 5—10 月。

### 1.2 样品制备与处理

为验证黄土在湿陷之后仍具有湿陷的可能,选取一块常年灌溉的水浇地作为本次试验的试验点。该试验点位于宛川河第三阶地之上,三级阶地高出宛川河约 60~70 m,阶地上部为 30~50 m 的风成黄土。黄土在干燥条件下疏松、松散、不结块,呈浅灰黄色;在湿润条件下黏性大,易黏连成块,呈深褐色。阶地下部为 10 m 厚的河床相砂砾石,砂砾石上部有约 10 m 厚的冲积次生黄土。样品在人工垂直开挖直径 1.0 m,深 5.1 m 的探井中取得。待去除表面 30 cm 的浮土和耕植土后,每隔 60 cm 取一组土样,在 5.1 m 深的探井内共取得 9 层土样。而表层土在经过一天的暴晒之后含水率与最开始取样时有了明显的变化,所以在表层加取一组土样作为第一组的参照,共制取 10 组土样。每组样品包含用于测量渗透性和湿陷性的环刀样,用于测量现场含水率的铝盒样,以及用于观测原状黄土微观结构的扫描样。在室内制备扫描样时,首先用小刀沿着环刀内侧顺时针小心切割,待土样与环刀完全分离之后将整块土样取出,而后将土样中间受扰动较小的部分进一步切割成顶、底面为 2 cm×2 cm 的立方体土柱。土柱在室内经过 72 h 自然风干后进一步被割制成直径约为 1 cm 的圆柱,然后沿着圆柱肋部水平划刻浅浅的细线,并迅速将土柱掰断,得到新鲜断面<sup>[12,17]</sup>。本次试验共制取了 20 个扫描样。

要揭示黄土在湿陷过程中的变形方式,就要对其增湿前后的微观结构进行比较分析。胡再强等人虽然观测了黄土湿陷前后的微观结构,但却不是对同一样品进行的观测,对比结果的客观性稍有欠缺。而常用的注胶法在一次观测之后无法使水分渗入,不能实现增湿目的;未经固定的黄土试样颗粒在观测过程中易脱落污染试验仪器,并且遇水迅速崩解分散的性质使得增湿之后试样被破坏而不能进行第二次观察。所以为了实现对同一样品增湿前后微观结构观察的目的,我们采取半注胶法(亦称边缘注胶法)进行扫描样品的制取。半注胶法是将胶水在试样周边和底面进行胶封并保持顶部观测面不被扰动的制样方法,这样制出的扫描样一方面能够为水、土作用提供场所,另一方面能够模拟土样在自然条件下的侧限压力。

### 1.3 研究方法

增湿、减湿湿陷试验是在《土工试验方法标准》湿陷系数测定的基础上改进实施的;黄土增湿前后微观

结构的对比是通过扫描电镜实现的。

1.3.1 增湿减湿试验 按照《土工试验方法标准》中湿陷试验的步骤开展试验,在所有试样达到稳定之后(两次读数相差不大于 0.01 mm)继续观察 3 d,而后,在不扰动装置的前提下实施增湿、减湿试验。在湿陷试验结束之后装置内是注满水的,所以后续试验的第一步是减湿过程。在操作时为了避免仪器的扰动,我们采用针管抽取的方法将装置内的水分抽出,并用干燥纸巾做成的导流桥将装置底部以及土样内部的水尽可能多的导出,从而达到减湿的目的。在做好导流的同时需同步观测千分表的变化情况并做好记录。待两次连续读数相差小于 0.01 mm 的时候结束一次减湿过程的观测。减湿过程完成后将导流桥去除,沿装置外壁重新向装置内注满水,同时观察上顶盖气泡的产生并详细记录,之后按照预定步骤实施并记录装置的形变量。重复上述减湿增湿过程直至试验结束。

1.3.2 微观影像观察 由于室内湿陷样无法同时制备湿陷前后两个样品,因此扫描试验选取湿陷样相同层位的环刀样进行扫描样品的制备。每 1 层制备 2 个样品,共制备了 20 个样品。在对样品进行首次观测之后紧接着进行室内逐步增湿过程。由于试样尺寸较小、结构疏松,对试样直接加水难免会对微观结构造成一定程度的破坏,所以我们借助小型加湿器,将雾化后的水作用于试样表面,尽可能地减少人为因素对试样的干扰。水分经过加湿器处理后雾化程度较高,在样品表面很难形成易于观察的积水现象,无法判断何时满足加湿要求。为此设计了一个专门用于观测加湿样微观结构的装置。该装置在样品的底部有一个与试样同等尺寸的透水石,我们规定当透水石由干燥的浅灰色变为湿润的深灰色时就认为满足了试验的增湿要求。该试验每次增湿过程持续了 2 d。待试样完成增湿过程并在室内自然风干后,进行第二次微观结构的观察,也就是黄土增湿后的微观结构观察。重复增湿、重复观测就能实现对同一样品多次增湿前后的微观结构对比的目的。

## 2 结果与分析

### 2.1 增湿减湿结果与分析

为了确定含水率对黄土固结、湿陷的影响,取样开始阶段和取样结束阶段在 0.3 m 处共制取了两组土样用于参照对比,并分别编号为 01 组和 10 组。经测定,01 组平均含水率为 17.3%,10 组平均含水率为 12.6%。两组试样湿陷前的固结曲线如图 1 所示。由图 1 中曲线变化情况可以得知,无论是高含水

率的 01 组土样还是低含水率的 10 组土样,其形变量在每施加一级压力时均会在一小时内发生一次突变,而后进入逐步稳定阶段。有所不同的是,在 25 kPa 之前,低含水率的土样较高含水率的土样在相同压力下能更快达到稳定。在超过 25 kPa 的压力范围后,高含水率土样反而能在短时间内达到稳定。这种现象说明黄土的变形与其含水率有着一定的联系。因为在固、液、气三态共存的土样中,当含水率较低时,较多的气体充斥于黄土的孔隙之中,受到外界压力作用时,气体不能像液体那样对黄土颗粒起到一定的支撑作用,其所占的空间更易被颗粒占据,在相同压力下形变量往往要比高含水率土样的形变量大,气体更易排出土样,更先达到稳定。而在达到 50 kPa 之后,土样中大部分架空孔隙被破坏,含水率高的土样的形变量主要表现为颗粒挤占水分所占据的空间。由于黄土中水分的排出要比气体的转移困难得多,所以在该阶段土样达到稳定所需的时间往往是整个固结试验中耗时最长的阶段。在固结的后半段,土样的形变主要来自于黄土内部颗粒的移动以及重组。在这个过程中水同样起到了关键作用,高含水率土样中的颗粒或团聚体在受到水的作用后,更易发生破裂、重组,所以在该级压力下,高含水率的土样达到稳定的时间要先于低含水率的土样。

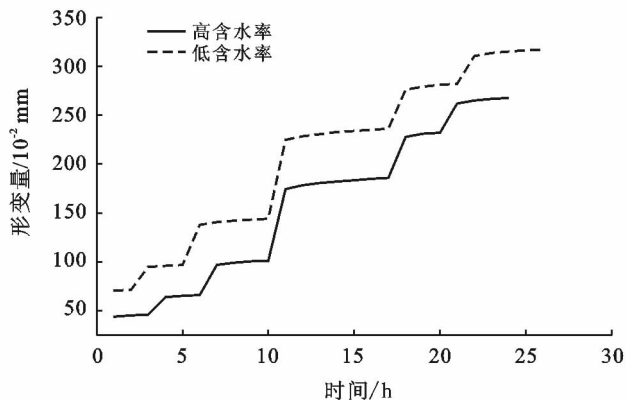


图 1 表层土样湿陷前固结曲线

黄土湿陷前固结曲线的变化启发我们黄土的湿陷性不仅仅受限于黄土自身结构,还与黄土中含水率、孔隙率有着密切的联系。为此我们设计了在固结湿陷试验后的增湿、减湿湿陷试验。黄土的增湿、减湿湿陷试验共持续了 160 d,在不同的时间段内分别实施增压、退压,并在每次增压、退压结束后实施增湿、减湿过程。试验后半段,在保持压力不变的情况下仅实施增湿、减湿过程。试验结果如图 2 所示。从图 2 可以看出,由于两个土样均已达到先期固结稳

定,因此在前42 d内,无论是增压、退压还是增湿、减湿,两个不同含水率土样的变化情况几乎一致。与我们以往认知所不同的是在增湿、减湿过程中黄土形变量呈现出的规律,即,土样在减湿去水阶段并未如预期般表现出形变量的下降,反而和增湿阶段一样,形变量都有一个突然的增加。根据扫描电镜下微观结构的观察可知,增湿时黄土形变量的变化是由于起到胶结作用的黏粒在水的作用下发生溶解、分离,粉粒和砂粒发生位置上的移动造成的;而在减湿去水阶段试样形变量同样增大可能与水分的丢失导致颗粒进一步挤占水分的空间有关。需要指出的是,在将水完全去除的瞬间百分表的读数也有一个微小的回升,没有观测到形变量的减小可能与观测时间间隔较长有关。从图1的最终形变量上可以得出,初始含水率有可能决定着黄土的最大形变量,含水率低的土样形变量要较含水率高的土样的形变量大。反言之,对于同一块土样,含水率不相同能够得到的最大形变量是不一样的。固结湿陷稳定后的土样,一旦重新受到水的作用,无论是增湿还是减湿,都会进一步加深黄土的湿陷性,说明黄土的湿陷性是一个动态的过程。

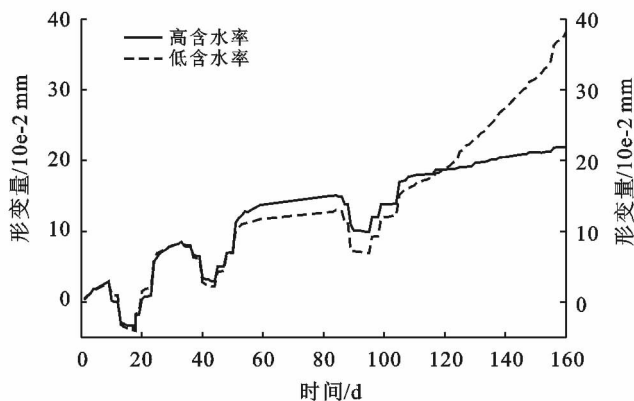


图2 表层土样加压退压、增湿减湿曲线

## 2.2 微观影像分析

试样的微观结构如图3所示,图a,c,e为试样增湿前影像,由图3中砂粒对应的特定形态可知,图b,d,f分别为图a,c,e相同位置增湿后影像。图中 $A_1$ ,  $A_2$ 等表示特定的影像区域; $P_1$ ,  $P_2$ 表示特定的黄土颗粒; $T_1$ 为三角几何区域; $L_1$ 为指示线。图3中的分析结果与泾阳地区黄土微观结构变化类似<sup>[18]</sup>,黄土颗粒在微观上变化方式主要表现为:溶解、移动、重组三大类。

**2.2.1 颗粒的溶解** 颗粒的溶解是黄土微观结构发生变化的主要形式,发生溶解的颗粒一般为碳酸钙、蒙脱石等黏粒胶结物以及部分有机质。例如,在图

3a中的 $A_2$ 区域和图3e中的 $P_6$ 颗粒,增湿前的针状有机物以及黏粒在增湿后完全溶解消失, $P_2$ 颗粒的末端黏粒也与原来附着的石英颗粒剥离脱落。图3c中的 $P_5$ 颗粒周围包裹的胶结物在水的作用下大部分被溶解掉,与原来相连接的颗粒呈现出明显的剥离态(典型剥离现象如图4所示)。这种溶解的胶结物一部分随着水的流动排出土体,另一部分则会在水流作用变弱时随机重新聚集,再次起到胶结作用。

**2.2.2 颗粒的移动** 伴随着黏粒的溶解往往会造成脱离母体的粉粒或者团聚体的移动。在图3a中与土样主体脱离的团聚体 $A_1$ 移动到了图3d中的 $A_1$ 区域,这种团聚体的移动不仅会在原有的土体中留下较大的孔隙,也会在重新聚集的地方形成新的架空孔隙。例如,在 $A_1$ 原有的架空孔隙的基础上叠置了 $A_1$ 团聚体,使得该区域的架空孔隙空间大幅增加,从而使该区域为下次湿陷变形提供新的变形空间。而团聚体留下的孔隙空间同样会被其他团聚体占据,图3e,3f就清晰的呈现了这一特点。在三角形 $T_1$ 保持基本形状、大小和相对角度关系不变的情况下, $A_5$ 团聚体向上方移动了 $50^\circ$ ,而该团聚体原有位置则被 $A_3$ 团聚体占据,形成新的孔隙结构。这种以团聚体为主的移动往往会造成部分区域的不稳定。而类似于 $P_1$ ,  $P_3$ 等以粉粒为主的单独颗粒的移动,其颗粒表面较为平整,没有较多的胶结物附着,一般填充于较大的粒间孔隙内,减小黄土的孔隙率,起到稳定作用。

**2.2.3 颗粒的重组** 颗粒的重组是伴随着胶结物或者有机质的重新聚集而形成的。图3f中的 $P_8$ 颗粒,虽然较之增湿前颗粒周围胶结物被溶解掉一部分,但是在这些胶结物重新聚集之后该区域的孔隙明显降低。这种胶结物的重新聚集对黄土的稳定性起到了促进作用。而胶结物重组时,如果起到了黏结其他颗粒的作用时,往往对该区域的黄土稳定性造成不利影响。黄土颗粒的这三种主要的变形方式,一方面破坏了黄土结构的稳定性,使得黄土趋向更稳定的方向发展,另一方面,黄土颗粒的这种变化使得局部区域重新建立新的非稳定孔隙结构,为之后遇水湿陷提供了变形的可能。

## 3 讨论

之前学者<sup>[19-21]</sup>认为黄土的湿陷性除了与起始湿陷压力有关之外,黄土起始含水率也决定着黄土能否发生湿陷。但这些观点均聚焦于黄土发生湿陷的开始阶段,对于不同含水率的黄土湿陷中间过程以及最

终阶段的湿陷量未进行统计。本试验结果发现,即使同一层位、含水率不同的土样在经过相同的固结过程,或者固结稳定后的不同含水率的土样在经过相同的加压、退压、增湿、减湿过程后均会产生不同的形变量。这表明:黄土的初始含水率也影响着黄土的湿陷过程和湿陷结果。当黄土含水率较低时,黄土的变形方式以颗粒挤占气体所占据的孔隙为主,该过程能够很快达到稳定;而当含水率较高时,黄土的变形方式以颗粒挤占水分所占据的孔隙为主,该过程达到稳定

所需时间较长。本试验还克服了以往不能对同一黄土样品增湿前后微观结构进行观察的难点<sup>[22]</sup>,黄土湿陷过程中微观尺度上颗粒的溶解、移动、重组等变形方式让我们认识到黄土的湿陷过程是一个动态循环过程。黄土在一次饱和湿陷中即使达到该初始含水率的最大湿陷量,随着后续含水率的变化,一方面,黄土的最大湿陷量有可能发生变化;另一方面,黄土微观结构的变化也导致了黄土孔隙的重组、新的架空孔隙的形成,从而促使黄土再次发生湿陷。

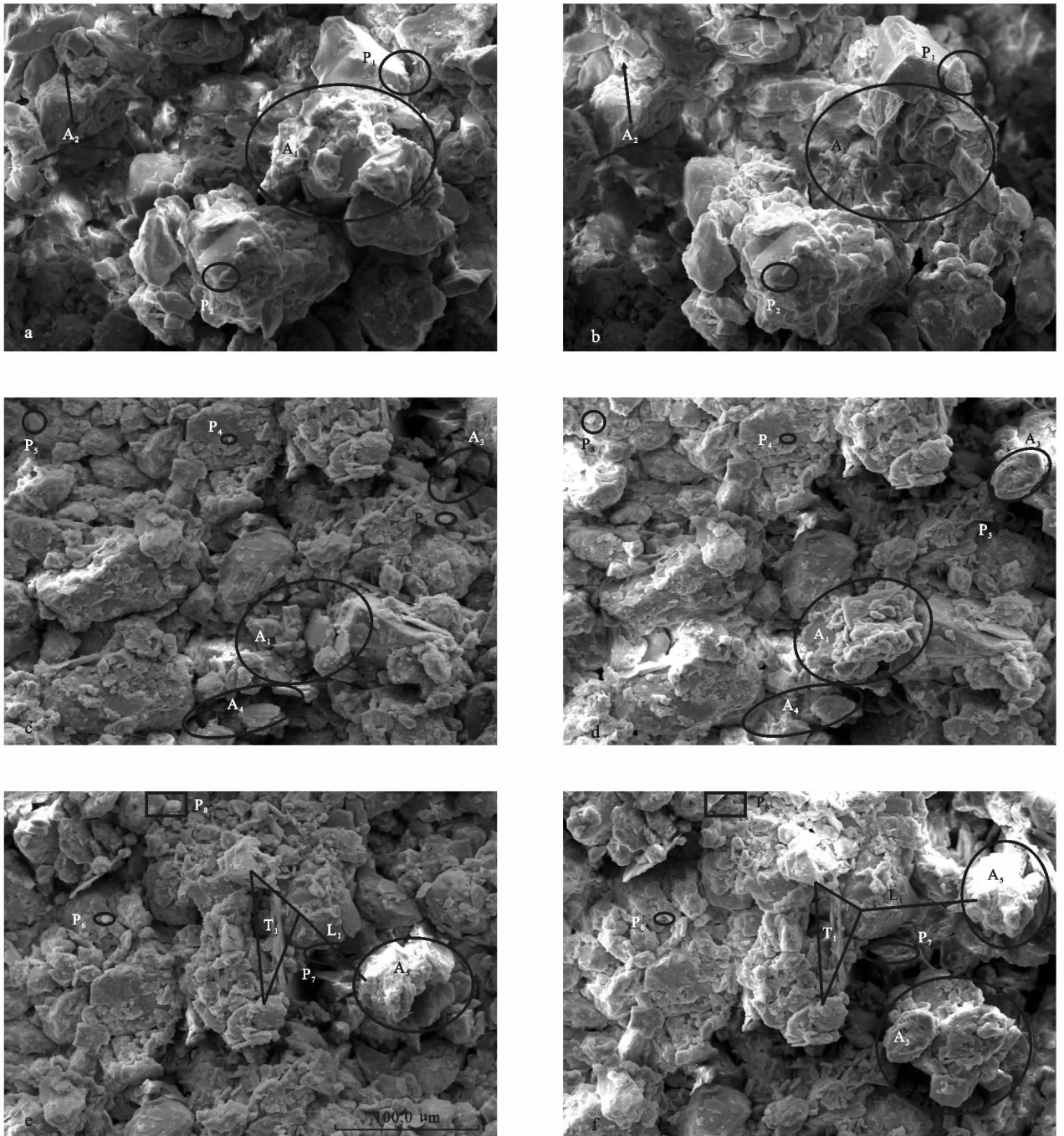


图 3 黄土样相同位置增湿前(a,c,e)、后(b,d,f)影像对比

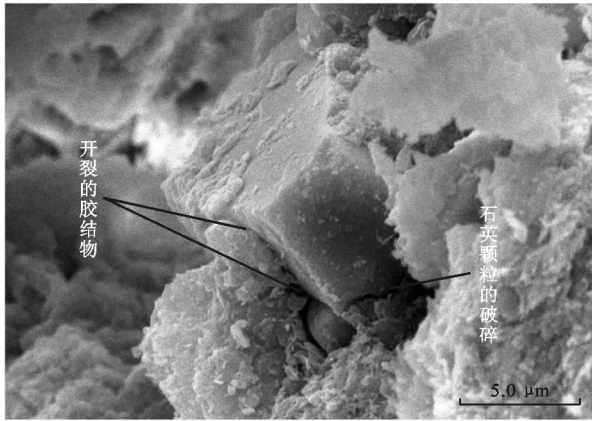


图4 石英颗粒破裂以及表面胶结物剥离示意图

## 4 结论

(1) 黄土的湿陷量与黄土初始含水率有关,含水率低的黄土在遇水湿陷后产生的湿陷量要大于含水率高的黄土的湿陷量。

(2) 黄土的湿陷过程是一个动态过程,即使是达到饱和湿陷的黄土,一旦黄土中的含水率发生变化,仍能再次发生湿陷。

(3) 黄土的动态湿陷过程表现在黄土颗粒溶解、移动、重组的变化。黄土颗粒的这种变形方式在整体上使黄土趋于稳定,但在局部上仍具有湿陷的可能。

(4) 黄土结构这种破坏—重组—破坏的动态循环是黄土能够发生多级湿陷的内在原因。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] Tovey N K, Dent D L, Corbett W M, et al. Quantitative micro-mineralogy and micro-fabric of soils and sediments[J]. *Developments in Soil Science*, 1993, 22: 541-547.
- [2] Tovey N K, Kinsley D H. Mapping of the orientation of fine-grained minerals in soils and sediments[J]. *Bulletin of the International Association of engineering Geology*, 1992, 46: 93-101.
- [3] Tovey N K, Smart P, Hounslow M W, et al. Automatic orientation mapping of some types of soil fabric [J]. *Geoderma*, 1992, 53(3): 179-200.
- [4] 高国瑞. 兰州黄土显微结构和湿陷机理的探讨[J]. *兰州大学学报*, 1979, 15(02): 123-134.
- [5] 高国瑞. 黄土湿陷变形的结构理论[J]. *岩土工程学报*, 1990, 12(4): 1-10.
- [6] 雷祥义. 西安黄土显微结构类型[J]. *西北大学学报: 自然科学版*, 1983, (4): 56-65, 127-132.
- [7] 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, 17(12): 1309-1318.
- [8] 胡再强, 沈珠江, 谢定义. 非饱和黄土的显微结构与湿陷性[J]. *水利水运科学研究*, 2000(2): 68-71.
- [9] 王常明, 林容, 陈多才, 等. 辽西黄土湿陷变形特性及湿陷后微观结构变化[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2011, 41(2): 471-477.
- [10] Li Xian, Li Licui, Song Yanxun, 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.
- [11] Li Xian, Li Lincui. Quantification of the pore structures of Malan loess and the effects on loess permeability and environmental significance, Shaanxi Province, China: An experimental study [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2017, 76(15): 523.
- [12] 郭泽泽, 李喜安, 陈阳, 等. 基于 SEM-EDS 的湿陷性黄土黏土矿物定量分析[J]. *工程地质学报*, 2016, 24(5): 899-906.
- [13] Galván Josa V, Castellano G, Bertolino S R. Quantification by SEM-EDS in uncoated non-conducting samples[J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2013, 88: 32-37.
- [14] 卢玉东, 孙建中. 黄土的多级湿陷性研究[J]. *煤田地质与勘探*, 2005, 33(4): 63-65.
- [15] 孙建中, 刘健民. 黄土的未饱和湿陷、剩余湿陷和多次湿陷[J]. *岩土工程学报*, 2000, 22(3): 365-367.
- [16] 姚志华, 黄雪峰, 峰正汉, 等. 关于黄土湿陷性评价和剩余湿陷量的新认识[J]. *岩土力学*, 2014, 35(4): 998-1006.
- [17] 张晓周, 卢玉东, 李鑫, 等. 增湿条件下泾阳南塬马兰黄土孔隙率变化研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2019, 33(6): 99-104.
- [18] Zhang Xiaozhou, Lu Yudong, Li Xin, et al. Microscopic structure changes of Malan loess after humidification in South Jingyang Plateau, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2019, 78: DOI: 10.1007/s12665-019-8290-4.
- [19] 曾国红, 孟宪, 裘以惠. 关于黄土湿陷起始压力、湿陷起始含水量的探讨[J]. *太原工业大学学报*, 1997, 28(S1): 20-23, 121-122.
- [20] 郑建国, 张苏民. 黄土的湿陷起始压力和起始含水量[J]. *工程勘察*, 1989, 17(2): 6-10.
- [21] 涂光社. 湿陷性黄土的起始含水量[J]. *工程勘察*, 1987, 15(3): 24-26.
- [22] 王常明, 林容, 陈多才, 等. 辽西黄土湿陷变形特性及湿陷后微观结构变化[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2011, 41(2): 471-477.