

黄土湿陷微观机理研究现状及发展趋势

范文, 魏亚妮, 于渤, 邓龙胜, 于宁宇

Research progress and prospect of loess collapsible mechanism in micro-level

FAN Wen, WEI Yani, YU Bo, DENG Longsheng, and YU Ningyu

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202108064>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

深厚黄土地基浸水湿陷变形及竖向土压力作用分析

Analysis of collapsible deformation and vertical soil pressure action of thick loess foundation

屈宏录, 刘德仁, 孙英萍, 闫炳舟, 徐硕昌, 张严 水文地质工程地质. 2022, 49(4): 157-164

基于主成分分析法的Q2黄土湿陷特性研究

A study of the collapsibility of Q2 loess based on principal component analysis

王玉涛, 刘小平, 曹晓毅 水文地质工程地质. 2020, 47(4): 141-148

改性糯米灰浆固化黄土的微观机理试验研究

A test study of the microscopic mechanism of modified glutinous rice mortar solidified loess

贾栋钦, 裴向军, 张晓超, 周立宏 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 90-96

上海黏土压缩回弹变形的微观机理

Micro-mechanism of compression and rebound of clay in Shanghai

顾迪, 严学新, 张云, 白杨, 杨天亮 水文地质工程地质. 2020, 47(4): 123-131

利用原子力显微镜探针刺入测试黏土颗粒水化膜厚度的试验研究

An experimental study of the measuring hydration film thickness of clay particles with atomic force microscope probe

郭永春, 屈智辉, 许福周, 周相贵 水文地质工程地质. 2021, 48(6): 105-112

冻融循环作用下黄土无侧限抗压强度和微观规律的试验研究

Effect of freezing-thawing cycles on mechanical properties and microscopic mechanisms of loess

刘乐青, 张吾渝, 张丙印, 谷遇溪, 解邦龙 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 109-115



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202108064

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 Yani, YU Bo, *et al.* Research progress and prospect of loess collapsible mechanism in micro-level [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(5): 144-156.

黄土湿陷微观机理研究现状及发展趋势

范文^{1,2,3}, 魏亚妮^{1,2}, 于渤^{1,2}, 邓龙胜^{1,2}, 于宁宇^{1,2}

(1. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054; 2. 西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710054; 3. 信息产业部电子综合勘察研究院, 陕西 西安 710054)

摘要: 黄土特有的湿陷性使其具有遇水软化和工程扰动的强致灾特性, 从根本上认清黄土的湿陷机理, 是解决黄土地区地质灾害及工程地质问题的迫切需求。文章搜集整理黄土湿陷机理方面的研究成果, 从黄土的胶结物组成、性质及胶结方式, 微结构特征和颗粒间作用力等三个方面归纳总结黄土湿陷微观机理的研究现状。通过实例分析初步探讨了延安新区马兰黄土的湿陷机理。结果表明: (1) 黄土的微结构特征回答了黄土“如何湿陷”的问题, 颗粒间胶结物组成、性质及胶结方式以及颗粒间作用力直接回答了黄土“为何湿陷”的问题; (2) 延安新区马兰黄土中大于 23 μm 的镶嵌孔隙为湿陷提供主要空间, 黏土胶结的水化膨胀是引起颗粒间强度降低、发生湿陷的主要原因之一; (3) 目前黄土湿陷机理研究仍不够系统、深入, 一些湿陷现象仍缺乏合理的解释, 由此认为高精度的三维表征是黄土微结构研究的基础, 水、力作用下微结构的高精度动态演化观测, 以及黄土中胶结物的组成、性质及胶结方式的精细化研究, 是理解黄土“如何湿陷”和“为何湿陷”的重要途径; (4) 在此基础上, 建立不同类型黄土的微观信息数据库, 通过数理分析及人工智能等方法, 明确单一要素对宏观湿陷行为的控制作用, 同时构建考虑主要微观要素的理论模型, 预测不同条件下的宏观湿陷行为。以上研究将对深入理解黄土湿陷机理、建立黄土湿陷微观要素与宏观行为的定量联系具有重要理论意义和实际应用价值。

关键词: 黄土湿陷机理; 黄土微结构; 胶结物; 黏土矿物; 颗粒间作用力

中图分类号: TU444

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2022)05-0144-13

Research progress and prospect of loess collapsible mechanism in micro-level

FAN Wen^{1,2,3}, WEI Yani^{1,2}, YU Bo^{1,2}, DENG Longsheng^{1,2}, YU Ningyu^{1,2}

(1. School of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi, 710054, China; 2. Key Laboratory of Western China's Mineral Resources and Geological Engineering, Ministry of Education, Xi'an, Shaanxi, 710054, China; 3. China Electronic Research Institute of Engineering Investigations and Design, Xi'an, Shaanxi, 710054, China)

Abstract: Loess is a typical soil with collapsibility featured with strength reduction under wetting and disasters induced by disturbance. Recognizing the mechanism of loess collapse is urgent demand for solving geological disasters and engineering problems. This paper reviews the achievements related to collapsible mechanism in micro-level, and summarizes the research progress. The Malan loess in Yan'an New District is taken as an

收稿日期: 2021-08-27; 修订日期: 2021-12-06

投稿网址: www.swdgcgz.com

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(42002285); 中央高校基础研究培育项目(300102260103); 陕西科技厅项目(2019SF-233)

第一作者: 范文(1967-), 男, 博士, 教授, 主要从事地质工程与岩土工程方面的教学和科研。E-mail: fanwen@chd.edu.cn

通讯作者: 魏亚妮(1986-), 女, 博士, 讲师, 主要从事黄土湿陷性与微结构方面的研究。E-mail: weiyani2006@126.com

example, and the collapsible mechanism is analyzed and discussed. The results show that (1) loess microstructure feature can answer the question of “how loess collapse”, while components, properties and bonding modes of cementations as well as forces among particles can explain “why loess collapse”. (2) The pores larger than 23 μm provide main space for collapse of the Malan loess in Yan’an New District, and the hydration swelling of clay cementation is one of the main causes for particle movement and collapse. (3) However, research on collapse mechanism is still unclear, some collapse behavior cannot be fully explained. The research interests related to collapsible mechanism are also suggested in this study. It is considered that microstructure characterization in 3D space is the basis of loess microstructure research. Dynamic observation of microstructure with high resolution under loading and wetting, and detail investigation of the components and properties of cementations as well as the bonding modes, are effective ways to interpret “how loess collapse” and “why loess collapse”. (4) The database of various types of loess containing all micro information should be established to definite the influence of single factor on collapse behavior, via mathematical analysis and artificial intelligence. The theoretical model involving major factors should be simultaneously established to predict collapse behavior under different conditions. This work will be of great theoretical and practical significance to interpret loess collapse mechanism and establish quantitative relationship between micro factors and macro behaviors.

Keywords: collapsible mechanism; loess microstructure; cementation; clay mineral; force among particles

黄土是第四纪堆积的以粉土颗粒为主,富含碳酸盐、具有大孔隙、结构疏松的黄色土状沉积物^[1]。由于特殊的结构性和特有的湿陷性^[2-4],黄土在天然或干燥条件下具有很高的强度,但一旦浸水其力学性质则显著恶化,因此在黄土地区,滑坡、崩塌等地质灾害广泛发育,路面塌陷、建筑物不均匀沉降等工程问题层出不穷^[5-8]。近年来,大量平山造城、城市地下空间开发、西气东输、西成高铁等重大工程纷纷在黄土地区上马,这些灾害将对重大工程的建设及运行产生严重威胁,黄土湿陷已成为黄土地区经济快速发展中迫切需要解决的基本问题。

国内外学者对黄土湿陷性及湿陷规律的探索从未间断。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和地质灾害评价及防治方面发挥了举足轻重的作用^[9-12],如黄土地基的湿陷性质、类型和等级评价是黄土地区工程建设的首要工作。近些年来,黄土湿陷性的研究涉及从宏观到微观、从物理到化学、从传统浸水饱和湿陷到广义浸水增湿湿陷、从湿陷路径试验到湿陷本构模型等诸多方面,非饱和土渗流与强度理论也逐渐被纳入黄土的湿陷性研究中^[13-21]。这些卓有成效的研究使学者们对黄土湿陷过程及机理的认识逐渐清晰。但是,黄土湿陷机理方面的研究仍然不够深入,一些深层次科学问题尚不清楚,许多湿陷问题,如湿陷性随压力呈不同规律变化、黄土多次湿陷等,仍缺乏合理的

解释^[22]。

早期国内外学者在黄土湿陷机理方面提出了各种假说,包括毛管假说、溶盐假说、胶体不足说、水膜楔入说、欠压密理论^[23-27]。部分假说通过试验或一定的观测手段被证实成立,但是很难通过一种假说解释所有湿陷问题。20世纪50年代,随着观测和表征技术的发展与更迭,结构学说吸纳了其他学说得以迅速发展。该学说主要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理^[28-33],得到了众多学者的认可。实际上,黄土湿陷的本质是其内部颗粒间强度降低导致颗粒滑移进而引起亚稳态结构体系重组。结构学说从黄土发生湿陷的物理条件解释黄土的湿陷性,回答了黄土“如何湿陷”,但并没有回答黄土遇水后为何会强度降低进而发生湿陷,即“为何湿陷”的问题。事实上,黄土颗粒间胶结物的组成、性质及胶结方式,以及颗粒间作用力的研究可以更直接地回答黄土“为何湿陷”^[26,34]。因此,黄土湿陷机理的研究应涵盖微结构特征,胶结物组成、性质及胶结方式以及颗粒间作用力等三个方面。

本文将综合早期黄土湿陷的各种假说和微结构学说,从微观角度包括胶结物组成、性质及胶结方式,微结构特征以及颗粒间作用力等三个方面,归纳总结黄土湿陷机理的研究现状。同时,以延安新区马兰黄土为例,初步探讨黄土湿陷的微观机理。在此基础上,对湿陷机理研究中存在的问题和发展方向提出几

点建议,以期指导黄土地区地质灾害的评价和防治,并为重大工程的安全建设和运行提供保障。

1 微观角度探讨黄土湿陷机理

1.1 胶结物组成、性质及胶结方式

1.1.1 盐类胶结

溶盐假说认为易溶盐所起的胶结作用是黄土内聚力的一部分,一旦浸水,易溶盐溶解,湿陷发生。但该说法已被很多学者否定,这些学者主要认为易溶盐在黄土中是以溶解状态存在的,因此对湿陷没有明显影响。如杨运来^[26]通过数据分析指出,易溶盐的溶解度和质量分数分别按 19.4 和 0.1% 计,当黄土含水率为 0.52% 时,易溶盐便会处于溶解状态。而一般黄土中易溶盐平均溶解度高于 19.4,质量分数也不足 0.1%,且黄土含水率一般高于 0.52%。因此,易溶盐在黄土中实际为溶解状态,对湿陷没有显著影响。易溶盐含量在不同地区和不同时代黄土中呈不同幅度变化,变化区间主要在 0.01% ~ 0.95% 之间^[35]。因此,一些易溶盐含量较高的地区,易溶盐对湿陷的影响不容忽视。如辛若希^[36]研究了甘肃黑方台灌区黄土在不同含盐量条件下的湿陷性,结果表明湿陷系数与含盐量呈正相关,且含盐量高时,湿陷系数对含盐量变化相对敏感,反之则不敏感。高国瑞^[23]认为易溶盐即使处于溶解状态,仍加强了胶体物质的凝聚,当含水率增加时,易溶盐浓度的降低会引起胶体的离子交换等化学反应,导致黏粒散化,降低胶结强度。一些研究^[37-38]也指出,易溶盐主要通过离子种类和浓度影响胶体扩散层薄膜水厚度,进而影响湿陷性。交通部第一铁路设计院对青海西宁的黄土样品做了不同溶盐溶液的湿陷试验,结果证实了易溶盐对湿陷的影响^[39],加强湿陷还是抑制湿陷取决于离子的种类以及胶体的类型。

碳酸钙也是黄土颗粒胶结的重要组成部分。高国瑞^[28]认为碳酸钙在黄土中以 3 种形式存在,分别为原生碎屑颗粒、再生结晶体以及微晶粉末。其中,微晶粉末附着于碎屑颗粒表面,或将黏粒及一些碎屑矿物胶结为集粒,对强度及湿陷有一定影响。王绪民等^[40]利用酸性溶液浸泡原状黄土,发现碳酸钙胶结的溶蚀使土体黏聚力明显降低,证实了碳酸钙胶结对强度的贡献。实际上,一般黄土在 600 ~ 1 200 s 内完成 90% 的湿陷量,碳酸钙胶结遇水溶解很难解释黄土短时间内的浸水变形。但是,据统计,室内湿陷试验中,个别黄土完成全部湿陷需要十几个小时,这可能与分布于颗粒胶结处碳酸钙的溶解有关^[27,40]。

1.1.2 黏土胶结

马兰黄土中黏粒(<0.005 mm)质量分数为 7.0% ~ 35.7%,离石-午城黄土中黏粒质量分数为 9.2% ~ 43.6%^[35]。一些学者根据黄土黏粒含量对湿陷性进行评价,如 Handy^[41]提出可以通过黄土黏粒含量初步估算黄土的湿陷性:当黏粒(<0.002 mm 或 <0.005 mm)质量分数小于 16% 或 20%,且在现有荷载下从未饱和的黄土发生饱和湿陷的可能性大;当黏粒质量分数小于 24% 或 30% 时,且在现有荷载下从未饱和的黄土饱和后可能会湿陷;当黏粒质量分数介于 24% ~ 32% 或 30% ~ 40% 时,黄土湿陷的可能性小于 50%;当黏粒质量分数大于 32% 或 40% 时,黄土基本不会湿陷。Yuan 等^[42]认为在黏粒含量较低时,黏粒只是附着于粉粒或砂粒上,当遇水时充当润滑剂的角色;当含量继续增加时,这种润滑作用才能增强引起湿陷;而黏粒含量再继续增加时,颗粒之间的孔隙就会被黏粒所填充,且胶结作用增强,湿陷性反而降低。这些成果肯定了湿陷性大小与黏粒含量的相关性。

而高国瑞^[43]认为黏粒含量对湿陷没有明显影响,其赋存状态对湿陷起更重要的作用。黄土中的黏粒一部分赋存于颗粒接触处,充当胶结物角色,赋予颗粒一定的连接强度。一些学者^[34,44]认为,当黄土浸水或在一定压力下浸水后,黏粒的水化膨胀(主要指渗透水化,即扩散双电层理论)使黏粒间距离增大,强度降低,进而引起湿陷。Osipov 等^[34]通过试验进一步提出该过程主要发生在土体饱和度小于 0.15 时,而土体饱和度大于 0.15 时,毛管压力是影响颗粒间强度的主要因素。Mellors^[44]利用四氯化碳、丙酮和甲醇 3 种不同极性的溶液开展湿陷试验,结果表明湿陷量与极性呈正相关,溶液极性越大,黏粒胶结水化膨胀程度越高,湿陷性越强。近年来,有不少学者如 Wang 等^[45]、Li 等^[46]利用等温吸附试验研究了黄土中结合水的类型及含量,证实了黄土中黏粒的水化膨胀效应。Liu 等^[47]、Li 等^[48]、Li 等^[49]综合利用多种观测手段,如扫描电镜(Scanning Electron Microscope, SEM)、能谱(Energy Dispersive Spectroscopy, EDS)分析、X 射线衍射(X-ray Diffraction, XRD)等对黄土微结构进行全面考察,对黏土矿物的赋存状态及含量进行了定性和定量研究,构建了黄土湿陷的概化模型,肯定了黏粒胶结对黄土湿陷性的影响。

1.2 微结构特征

1.2.1 颗粒

黄土中颗粒以粉粒(5 ~ 75 μm)和黏粒(<5 μm,国际上一般 <2 μm)为主。粉粒是构成黄土固体骨架的

基本单元,受矿物成分、搬运过程和沉积环境的影响,其形态特征极其多样,如棱角状、圆状、板状、柱状、长条状等,如图1(a)和图2所示。这些形态特征对于黄土亚稳态结构的形成有直接影响。Rogers等^[50-51]提出有棱角、表面歪曲以及分选性较好的颗粒更易形成亚稳态结构,影响黄土的湿陷性。孙建中^[35]同样认为黄土中棱角颗粒摩擦力大,容易形成丰富的孔隙结构,使湿陷性加强;相反,圆度较高的颗粒一般相互填充,形成密实的结构,使湿陷性变弱。

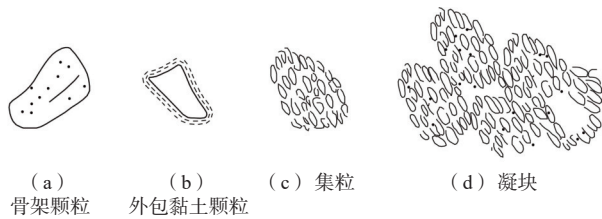


图1 黄土颗粒形态^[52]

Fig. 1 Particle morphologies in loess

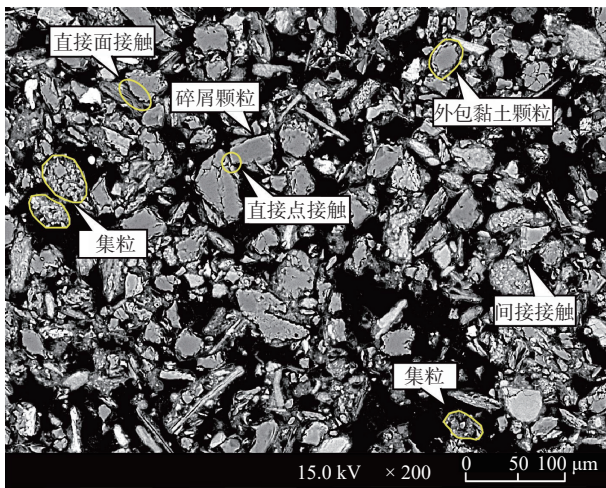


图2 SEM图像中黄土颗粒形态及接触关系

Fig. 2 SEM image showing particle morphologies and contacts

黏粒在黄土中所占比例相对于粉粒较少,成分既有伊利石、蒙脱石、高岭石等黏土矿物,也有一部分风化、搬运产生的石英、长石等碎屑矿物。黏粒的赋存形式多样,一般可概括为3种典型形式^[53-54]:第1种是黏粒附着于颗粒表面,将颗粒完全或部分包裹,形成一层不连续的“膜”或“壳”,一定程度上加强了颗粒间的连接,如图1(b)和图2所示;第2种是黏粒赋存于骨架颗粒接触处形成胶结结构,此时,黏粒中的黏土矿物遇水导致的胶结强度降低,是黄土具有湿陷性的内在原因之一,本文1.1节中已作论述,这里不再赘述;第3种是黏粒与碳酸盐、骨架颗粒等胶结形成集粒,如图1(c)和图2所示,集粒也是黄土骨架的重要

组成部分。高国瑞^[52]将黄土中的集粒分为刚性集粒和柔性集粒,前者表面一般附有较多的碳酸钙微晶体,与碎屑颗粒共同构成黄土的架空松散结构;后者表面一般无碳酸钙晶体,外形柔软,集粒之间相互胶结形成凝块,如图1(d)所示。当黄土中凝块含量较多时,对骨架颗粒具有很好的支撑作用,使黄土湿陷性减弱,甚至不具有湿陷性。

黄土颗粒有些为直接接触,有些通过胶结物质间接接触(图2),这些胶结物质一般为黏粒、溶盐类物质以及微晶碳酸钙粉末等^[23,25,28]。直接接触和间接接触根据接触面大小又分别细化为点接触和面接触(图2)。一些学者,如高国瑞^[28]、雷祥义^[55]认为点接触在水、力作用下稳定性差,容易发生湿陷;面接触相对稳定,不易发生湿陷,即使发生,速度也相对较慢。而方祥位等^[56]认为,直接接触,尤其是直接点接触,对力的作用比较敏感,间接接触对水的作用比较敏感。

1.2.2 孔隙

黄土以疏松多孔著称,孔隙率一般可达42%~55%,孔隙比可达0.8~1.2^[35]。孔隙的数量、尺寸分布等对黄土湿陷影响显著。目前,众多学者^[28,31,35]认为黄土中的孔隙可分为3大类,即大孔隙(macro pores)、粒间孔隙(interparticle pores)以及集粒内孔隙(intraparticle pores)。其中,大孔隙主要包括根洞、虫孔和裂隙等,一般肉眼可见;粒间孔隙是骨架颗粒之间的孔隙,根据颗粒不同的排列方式,粒间孔隙又可分为支架孔隙和镶嵌孔隙,如图3(a)(b)所示;集粒内孔隙主要是指黏粒形成的集粒、胶结物等内部的孔隙,如图3(c)所示。很多学者根据孔隙直径(d)对3类孔隙进行界定(表1),这种界定具有一定的主观性并且受观测手段和表征指标的影响。如雷祥义等^[30-31]基于压汞法将孔隙分为大、中、小及微孔隙,认为黄土中的大、中孔隙,尤其中孔隙,是产生湿陷的主导因素;并提出把大、中孔隙含量作为评价黄土湿陷性的指标,当该指标大于40%时,可初判黄土为湿陷性黄土。由于压汞法的墨水瓶效应,该分类方法很难反映黄土中孔隙的真实分布情况。一些学者利用光学显微镜或扫描电子显微镜,获取孔隙微观图像,借助图像处理方法对孔隙尺寸进行定量描述。如杨运来^[26]利用偏光显微镜研究各孔隙组在黄土湿陷前后的体积变化,提出黄土湿陷主要由孔径小于108 μm 的孔隙引起,其对湿陷空间贡献率大于80%。赵景波等^[32]基于300余张薄片的对比观察得出,20~80 μm 的孔隙是黄土发生极强湿陷和强湿陷的主要因素。Osipov等^[34]将8 μm 和

100 μm 作为 3 大类孔隙的分界线, 并认为 8 ~ 100 μm 的孔隙对黄土的湿陷起关键作用。

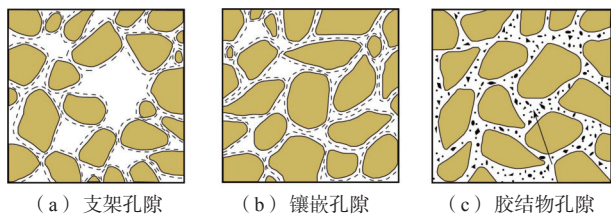


图 3 黄土孔隙类型^[31]

Fig. 3 Types of pores in loess

表 1 国内外黄土孔隙分类
Table 1 Classification of pores in loess

孔隙分类及d的范围/μm	分类依据	参考文献
微孔隙(胶结物孔隙): $d < 2$ 小孔隙(镶嵌孔隙): $2 \leq d < 8$	压汞法	[30]
中孔隙(支架孔隙、镶嵌孔隙): $8 \leq d < 32$		
大孔隙(根洞、虫孔、裂隙): $d \geq 32$		
小孔隙: $d < 108$ 大孔隙: $d \geq 108$	偏光显微镜	[26]
支架孔隙: $8 \leq d < 20$ 架空孔隙: $20 \leq d < 80$	偏光显微镜	[32]
管状孔隙或大孔隙: $100 \leq d < 500$ 粒间孔隙: $8 \leq d < 100$ 集粒内孔隙: $d < 8$	—	[34]

总之, 尽管目前黄土中孔隙的分类没有统一标准, 但是国内外学者对孔隙的类型已有共识, 且普遍认为架空孔隙和镶嵌孔隙的存在是湿陷发生的先决条件和首要因素。

1.2.3 整体结构

颗粒间不同的接触形式及排列方式形成了不同地区、不同地层黄土典型的微结构特征和类型, 一定程度上也决定了黄土的湿陷性强弱。

迄今为止, 黄土微结构类型已有多种分类方案, 张宗祜^[57]、高国瑞^[28]、王永焱等^[58]、雷祥义^[59]等提出的黄土微结构类型已为大家所熟知, 这些分类主要考虑了颗粒大小、颗粒排列及接触等因素的变化。如高国瑞^[28]提出了 12 种湿陷性从强到弱的微结构类型, 其中粒状、架空、接触结构湿陷性最强, 凝块、镶嵌、胶结结构湿陷性最弱。雷祥义^[59]在王永焱等^[58]研究的基础上, 将中国黄土微结构分为 3 个组合, 6 个类型, 并提出由西北向东南, 微结构类型由架空大孔微胶结结构逐渐过渡到凝块胶结结构, 湿陷性由强变弱。近些年来, 有关黄土微结构类型的探讨也基本沿用前人的分类结果。

目前, 黄土微结构特征与湿陷的相关性已被众多学者认可。随着观测手段的发展及各种图像处理软

件的引入, 学者们对黄土微结构的表征逐渐向高精度(微纳米级)、三维(3D)过渡, 并通过考察湿陷过程中微结构参数的变化规律, 试图揭示黄土湿陷的微观机理: 如 Wang 等^[60]建立了孔隙面积比与湿陷系数间的对数关系; Liu 等^[47]、Li 等^[48]、Li 等^[49]通过分析湿陷前后颗粒形态、定向, 孔隙大小、面积等参数在二维(2D)平面的定量变化提出黄土湿陷机理; Wei 等^[61]、Yu 等^[62-63]开展微米级计算机断层扫描(Computed Tomography, CT), 建立了黄土 3D 微结构量化模型, 分析了湿陷前后微结构参数的空间变化特征, 以及湿陷过程中颗粒的运动轨迹及孔隙的演化规律, 以此探讨黄土湿陷的微观机理。这些越来越深入的分析极大深化了人们对黄土湿陷过程的认识。

1.3 颗粒间作用力

黄土颗粒间的库仑力、范德华力以及一定湿度条件下的表面张力等赋予黄土天然条件下一定的强度。而黄土浸水后或在一定压力下浸水后, 强度迅速降低, 颗粒发生滑移引起微结构重组, 进而发生湿陷变形。学者们对黄土颗粒间的作用力已有较为全面的认识, 通过试验观测, 早期太沙基提出的毛管压力被证实存在黄土中存在, 尤其在含水率低的黄土中; 但是该理论不能解释黄土的含水率和成分基本相同时, 为什么有的黄土湿陷, 有的黄土不湿陷^[23]。由此说明, 黄土中的毛管压力并不是引起颗粒间强度降低的唯一因素。郑晏武^[39]认为黄土中颗粒之间的黏结强度分为原始凝聚力和加固凝聚力; 原始凝聚力是分子引力产生的, 加固凝聚力由黏性胶结和铁氧化物、碳酸钙及石膏等水溶盐结晶胶结引起。水的作用一方面使黏土颗粒膨胀, 另一方面起楔入、溶解和润滑作用。杨运来^[26]持类似观点, 认为黄土中的黏粒胶结和非抗水次生云母胶结赋予黄土一定的强度, 湿陷过程中, 胶结物水化膜增厚导致强度降低, 进而发生湿陷变形。而 Osipov 等^[34]在认可上述观点的同时, 也肯定了黄土颗粒间毛管压力对湿陷的影响, 提出毛管压力在土体饱和度介于 0.15 ~ 0.80 之间时发挥主要作用, 且随着饱和度的增加逐渐减小。Mellors^[44]认为颗粒间的胶结强度来源于黏土胶结以及毛管压力。两者随饱和度呈不同规律变化。

黄土颗粒间的作用力类型已为大家所认可, 但是由于各种作用力及其相互作用的测量和量化仍有很大难度, 导致我们对黄土浸水过程中, 哪些作用力对降低强度起主要作用, 哪些起次要作用仍很难判断。

2 实例分析

以延安新区马兰黄土为例,基于湿陷试验结果,选取3种状态下的黄土试样(原状黄土试样、荷载下的黄土试样以及荷载下湿陷后的黄土试样),开展微米级CT扫描并进行3D重构,对颗粒球度、定向以及孔隙尺寸等微结构参数的空间变化进行定量统计。由于3种状态下的黄土试样不是同一黄土样品,样品之间的差异性会对结果有一定影响,因此选取湿陷变形较大时对应的荷载,即1 000 kPa黄土试样及1 000 kPa湿陷后的黄土试样进行对比,以减小样品之间差异性对统计结果带来的可能影响。通过分析黄土湿陷过程中微结构参数的变化规律,结合原状黄土颗粒胶结物的矿物组成、分布及物理化学性质,探讨延安新区马兰黄土湿陷的微观机理^[61,64]。

2.1 微结构参数定量对比

2.1.1 颗粒球度

图4为3种状态下黄土颗粒球度(即与颗粒体积相等的球的表面积与颗粒表面积的比值)的分布对比。可以看出,不同状态试样中颗粒的球度分布特征相似,主要集中在0.4~0.8之间,且无明显规律性变化。说明湿陷过程中颗粒的形态没有显著变化。

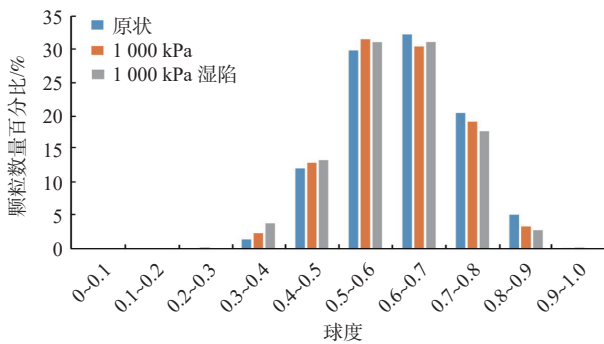


图4 颗粒球度分布变化对比

Fig. 4 Variation in sphericity distribution of particles in loess

2.1.2 颗粒定向

图5为3种状态黄土试样中颗粒方向角(即颗粒长轴与z轴间的夹角)的分布对比。可以看出,荷载作用下,方向角介于75°~85°的颗粒数量相比原状试样增加了7.6%,而25°~35°的颗粒数量减少了3.9%,说明土样受压时一些颗粒会倾向于水平分布。而试样湿陷后,颗粒方向角分布相比湿陷前无明显变化,说明湿陷过程中黄土颗粒在垂向上没有明显旋转。

2.1.3 孔隙分布

将3种状态试样中孔隙数量分布进行统计对比(图6)。孔隙数量基本服从伽马分布,伽马曲线参数

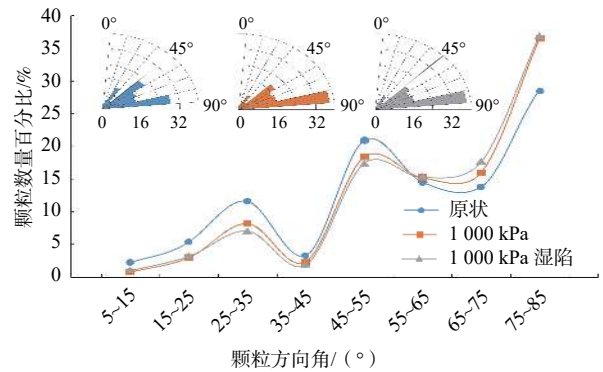


图5 颗粒方向角分布对比

Fig. 5 Variation in orientation distribution of particles in loess

的变化可以反映出孔隙数量分布的变化特征,见表2。湿陷后,伽马曲线形状参数 α 减小,而尺度参数 β 增大,说明湿陷后孔隙数量分布更集中,对应的孔隙数量更大,从图6中也可以得到印证。

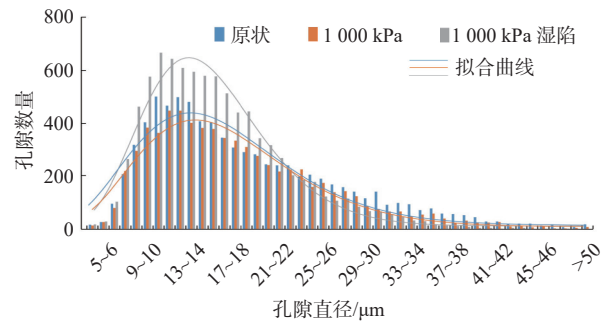


图6 孔隙数量分布对比

Fig. 6 Variation in pore number distribution in loess

表2 孔隙数量分布拟合曲线参数

Table 2 Parameters of the fitting curves for the pore number distribution

样品状态	数量分布(伽马分布)		
	α	β	R^2
原状	2.87	6.29	0.932 0
1 000 kPa	2.81	6.47	0.963 6
1 000 kPa湿陷	1.87	8.80	0.970 2

将1 000 kPa荷载下黄土试样的相对孔隙数量(即1 000 kPa荷载下黄土试样与原状黄土试样的孔隙数量之差),以及1 000 kPa荷载下湿陷后黄土试样的相对孔隙数量(即1 000 kPa荷载下湿陷后黄土试样与1 000 kPa荷载下黄土试样的孔隙数量之差)进行统计(图7)。可以看出,荷载作用下,不同孔径对应的孔隙数量相比原状黄土孔隙均不同程度减小(绿色曲线)。而湿陷后,孔径大于23 μm 的孔隙数量减小了27.1%;小于23 μm 的孔隙数量增加了44.2%,且9~20 μm 的孔隙数量增加幅度较大(黄色曲线),说明在

湿陷过程中,土样中的大孔隙遇水塌陷转为中孔隙或小孔隙。受压与浸水两种状态下孔隙数量的变化体现了两种变形模式。土样在荷载作用下,不同尺寸的孔隙均有可能被压密,因此对压缩量有不同程度的贡献。而土样浸水湿陷后,相对较大的孔隙由于四周颗粒的滑移而减小;较小的孔隙,尤其是尺寸相比四周颗粒偏小的孔隙,湿陷过程中基本不受颗粒滑移的影响,且湿陷后由于大孔隙尺寸的减小其数量反而增加,因此对湿陷几乎没有贡献。

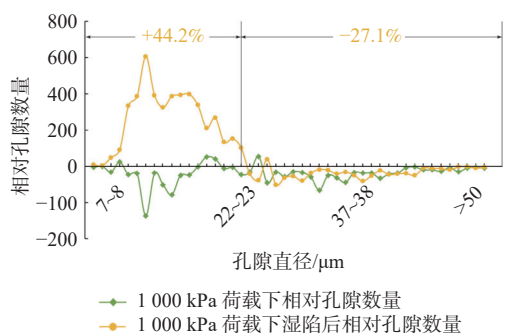


图 7 不同状态下黄土样品中相对孔隙数量分布

Fig. 7 Differences in pore number among intact loess, loess loaded 1 000 kPa and loess collapsed under 1 000 kPa

利用自主研发的微型土样水-力加载系统^[62-63],将同一黄土试样湿陷前后的微米 CT 图像进行对比(图 8)。结果发现,架空孔隙湿陷后,仅出现面积或体积的轻微缩小,并没有出现结构的坍塌,如图 8(a)所示;而镶嵌孔隙湿陷后,颗粒排列更加紧密,如图 8(b)所示。由此推断,镶嵌孔隙对湿陷变形发挥主要作

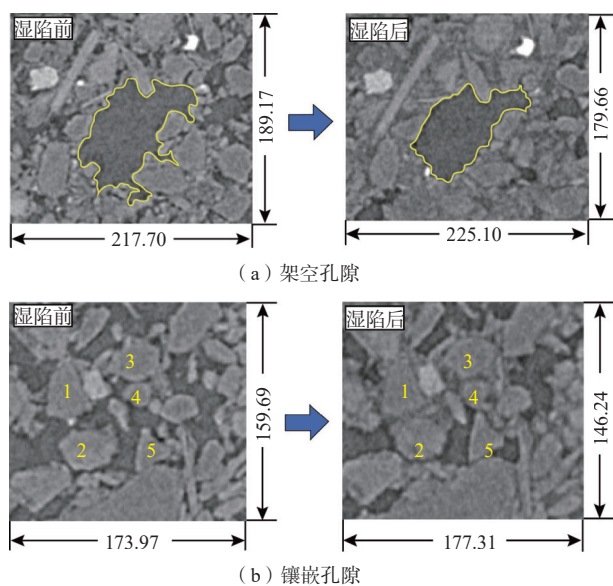


图 8 不同类型孔隙湿陷前后 CT 图像对比 (单位: μm)

Fig. 8 CT images showing evolution of pores of different types during collapse (unit: μm)

用,尤其是大于 23 μm 的镶嵌孔隙。

2.2 胶结物组成及性质

黄土中碎屑矿物占 75.2%,以石英、斜长石和方解石为主;黏土矿物占 24.8%,以伊蒙混层和伊利石为主,其次为绿泥石和高岭石。伊/蒙混层属于膨胀性矿物,具有很高的物理化学活性,对环境干湿变化极为敏感。结晶度高的伊利石,其活性不及伊/蒙混层,但受淋溶作用影响,伊利石会发生退变,内部形成膨胀层,结晶度降低,活性增强。本次对反映伊利石结晶度的 Kübler 指数进行测定,该值为 $0.49^\circ \Delta 2\theta$,显著高于季峻峰等^[65]所研究的洛川黄土-古土壤剖面中伊利石的结晶度值,证实本次所研究黄土中伊利石严重退变,膨胀程度高。因此,两种主要的黏土矿物对浸水条件均相对敏感。由此推测,黏土矿物遇水膨胀可能是导致黄土湿陷的主要原因之一,尤其当黏土矿物存在于颗粒胶结处时,对黄土湿陷的影响不可小觑。

利用扫描电镜结合能谱(SEM-EDS)技术分析黄土中部分骨架颗粒、骨架颗粒间胶结物的元素组成及含量,以此判断黏土矿物的赋存状态。由 EDS 测点分布结果(图 9)发现骨架颗粒(如 C1、C4、C24 等)以及胶结处一些具有一定形状的黏粒(如 C6、C23、C27 等)的元素组成与黄土中碎屑矿物基本一致;而胶结处其余一些测点(如 C3、C16、C25、C32 等)的元素种类较多,包括 O、Mg、Al、Si、K、Ca、Fe 等,与黄土中黏土矿物的元素组成基本一致。由此证实,黄土中

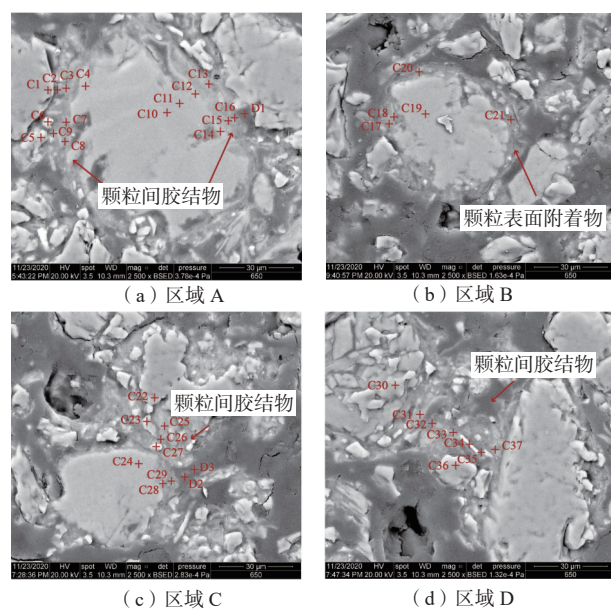


图 9 颗粒间胶结物处 EDS 测点分布

Fig. 9 SEM images showing EDS spots of interest located in the cementations between particles

伊/蒙混层、退变的伊利石等部分黏土矿物以胶结物形式赋存。因此,这些黏土矿物胶结水化膨胀是导致颗粒间距离增加、强度降低,发生湿陷的原因之一。

为了进一步印证上述观点,选取不同极性溶剂(水、环己烷、甲醇以及冰乙酸)开展湿陷试验。试验结果(表3)表明,除冰乙酸外,溶剂极性越强(介电常数越大),对应湿陷量越大,这与 Mellors^[44] 试验结果类似。极性强的溶液增大了黏粒胶结的水化膨胀潜力,使颗粒间强度降低,湿陷量增大。非极性溶剂环己烷阻止了黏粒胶结的水化膨胀,因此黄土湿陷量很小,基本可以忽略不计。冰乙酸的作用主要是溶解黏土中的 Al、Si、Fe 等高价金属盐类,使黏土结构破坏,并且与碳酸钙发生化学反应;因此,尽管冰乙酸极性不如水,但其引起的湿陷量比水更大。

表 3 不同溶液湿陷量对比

Table 3 Comparison of collapsible deformations using solutions with different polarities

溶液	介电常数(室温)	湿陷量/mm
水	80.40	0.87
甲醇	32.70	0.74
环己烷	2.02	0.02
冰乙酸	6.15	1.22

该试验结果进一步证实了黏土胶结水化膨胀对黄土湿陷性的贡献。

2.3 湿陷机理探讨

结合黄土湿陷过程中微结构参数的变化特征,以及胶结物的组成及性质,对延安新区马兰黄土湿陷的微观机理进行探讨。孔隙分布在黄土湿陷前后变化最显著,通过参数的定量统计以及湿陷前后 CT 图像的定性分析发现,大于 23 μm 的镶嵌孔隙对黄土湿陷贡献最大,为湿陷提供主要空间。颗粒间胶结物组成及黏粒性质分析表明,黏粒胶结的水化膨胀是黄土发生湿陷的主要原因之一。但是,本次所研究黄土的湿陷机理有待继续探究。众所周知,黄土湿陷是一个非常复杂的物理及化学过程,并不是单一因素所能充分解释的。本次研究中,毛管压力对黄土湿陷影响如何? 其与黏土的水化膨胀相比,哪种因素发挥主要作用? 或者不同条件下(如不同含水率),黏土水化膨胀与毛管压力的影响程度有何变化? 这些问题在本次研究中尚未涉及。因此,湿陷机理的探究任重道远。

3 存在问题及发展趋势

纵观国内外研究现状,学者们对黄土湿陷机理方

面的分析研究从未止步。从溶盐假说到结构学说、从 2D 定性描述到 3D 定量表征、从低精度的光学观测到微纳米级 CT 扫描、从物质组成到作用力分析,黄土湿陷的微观机理涵盖了黄土胶结物组成、性质及胶结方式,微结构特征,颗粒间作用力等方方面面。这些研究成果十分丰富,对解决黄土地区地质灾害评价与防治以及实际工程问题发挥了积极的指导作用。但是,湿陷机理的研究仍不够系统、深入,以致一些宏观湿陷问题仍然困扰着学者们。作者认为,应在现阶段微观研究的基础上,借助高精尖的观测技术、测试技术、图形处理技术以及大数据人工智能等方法对以下几方面的科学问题进行深入挖掘,以期对黄土湿陷机理这一基础问题有更清晰的认识。

3.1 黄土微结构 3D 表征

目前,黄土微结构的观测多基于光学显微镜或 SEM 等 2D 或准 3D 图像进行定性或定量分析,对黄土中颗粒和孔隙等几何参数的分析统计难免有些片面。同一个颗粒,选取不同的截面,其形状参数千差万别,因此分析结果往往取决于所选取的截面;另外,黄土在水和荷载作用下,土颗粒可能在不同方向发生位移或旋转,其运动是一个 3D 物理过程。因此,黄土微结构的 3D 表征更真实、客观。压汞法可以从 3D 角度对黄土孔隙尺寸分布进行定量分析,很多学者做了相关研究;但是,压汞法获取的孔隙参数较单一,孔隙形貌特征无从考察。CT 技术为黄土 3D 微结构的构建提供了可能,一些学者^[66-67] 基于 CT 图像开展了黄土 3D 微结构表征及水、荷载作用下微结构演化的相关研究,但所选用精度为几十微米,甚至更大,仅限于细观尺度。黄土颗粒以 5~75 μm 的粉粒为主,在该精度下,黄土中的多数颗粒和孔隙无法清晰观测。Deng 等^[68]、Wei 等^[69-71] 基于连续切片及微米 CT 技术,建立了黄土高精度 3D 微结构模型,对颗粒、孔隙等参数进行 3D 量化表征;同时,研究了黄土的湿陷性、渗透性等问题。这些成果使黄土微结构研究进入了一个新阶段,但是相关研究成果屈指可数。对黄土中颗粒、孔隙及骨架结构进行高精度 3D 空间表征,是黄土微结构及湿陷机理研究的基础。

3.2 黄土微结构高精度动态演化

很多学者通过分析黄土湿陷前后颗粒尺寸、形态、定向以及孔隙分布等微结构参数的定量变化探讨黄土“如何湿陷”。实际上,对黄土湿陷的微观过程并不清楚。开发一种微型土样水-力加载系统,实现对黄土湿陷过程的实时、动态、微米级观测,对黄土湿陷

机理的探究至关重要。通过该系统可研究湿陷过程中同一碎屑颗粒的运动路径,孔隙及结构的变形演化^[62-63],进而更好地理解黄土“如何湿陷”,尤其对一些宏观湿陷问题,如湿陷系数随压力呈不同规律变化等,将会有深入的理解。

3.3 黄土胶结物研究

黄土的湿陷性很大程度上由其颗粒间复杂的胶结物类型、胶结方式及其在加载、浸水条件下的演化模式决定。学者们^[39,44]通过研究发现,采用不同溶液进行黄土湿陷试验时,湿陷量表现出显著差异。因此,即使相同或相似的微观结构,由于颗粒胶结处组成物质的种类及胶结方式不同,黄土宏观湿陷性也完全不同。目前,对黄土颗粒间胶结物的研究,多停留在定性描述阶段,一方面缺乏对胶结物本身特性及其对湿陷性影响程度的深入讨论及验证。黏粒是重要的胶结物质,黏粒的胶结水化膨胀是颗粒滑移、发生湿陷的重要诱因,但当前学者对黏粒的矿物类型以及水化膨胀程度并不清楚,如蒙脱石、伊利石、高岭石等黏土矿物具有完全不同的水化性质,结晶度高的伊利石与退变的伊利石亲水性也不尽相同。另外,黄土浸水过程中,黏粒的水化膨胀程度会随饱和度不断变化,对颗粒间强度的影响效应也会有所差别。因此,针对性地开展一系列测试分析及物理化学试验,厘清黏粒胶结的矿物类型和性质,确定黏粒胶结对颗粒间强度影响的尺度界限,是研究其对湿陷性影响的首要工作。另一方面,缺乏对颗粒胶结方式的系统研究,如有些颗粒间仅有极少的胶结物,而有些颗粒间分布着很厚的黏土层或盐类等胶结物。不同的胶结方式在加载、浸水条件下的演化以及颗粒间强度的变化尚不清楚。由于黄土中颗粒间胶结方式极其复杂,且黏粒本身尺寸太小,该方面的研究也一直存在很大挑战。因此,对颗粒间胶结方式及其行为更深入的研究必须借助更先进的观测和表征技术。

3.4 黄土湿陷机理体系化研究

目前,黄土微结构的观测手段和图像分析技术日臻成熟,黄土微结构定量指标体系也基本建立。但是,黄土的微结构要素众多,在探讨微结构特征与宏观湿陷特性的因果关系时很难实现单一变量的精准控制,如颗粒级配、空间排列、孔隙尺寸分布等对黄土湿陷均起到重要作用,但哪些因素起主要和次要作用很难判断。另外,除微结构外,黄土内部颗粒胶结物组成、性质及胶结方式,颗粒间作用力也是影响黄土湿陷发生与否以及湿陷程度的重要因素。这 3 大

类因素对湿陷的贡献程度以及相互之间的联系很难厘清。要解决这个问题需要对不同类型的黄土样品开展大量的观测,形成一个相对全面、系统的涵盖 3D 微结构、胶结物性质和胶结方式、以及颗粒间作用力等信息的数据库,进而通过多变量分析甚至借助基于大数据的人工智能方法对数据进行分析,以明确单一要素对于黄土宏观特性的控制作用。

3.5 微观因素与宏观湿陷定量联系

黄土湿陷机理研究的最终目的在于解释湿陷问题进而预测不同条件下的宏观行为。如何将微观因素与宏观湿陷性定量有效联系以指导实际工作仍是需要解决的一大科学瓶颈。目前的微结构研究已经能够对一些宏观现象作出解释,但是仍然难以将微结构的定量参数通过严谨的方法转化成可用于宏观问题的理论模型。在建立微观与宏观联系方面,针对砂土的研究已经取得重要进展,如 Andrade 等^[72]已经能够根据微观观测到的微结构数据,利用离散元等数值方法建立宏观尺寸的模型,并且计算结果与试验结果吻合较好。黄土这种材料,其远比砂土复杂的微结构特征使得上述方法目前仍然难以用于建立足够真实、客观的宏观尺度模型;再者,黄土内部颗粒胶结物组成、性质及胶结方式,颗粒间作用力等因素目前都难以在模型中体现。此外,黄土作为细粒土,宏观尺度模型包含的颗粒数量也是惊人的,这对计算机的存储和计算能力都提出了非常严苛的要求。因此,笔者认为在构建宏观模型的过程中,势必要对庞杂的微结构、胶结物和作用力等要素进行巧妙、合理的简化,而具体简化哪些要素以及如何简化都将是未来建立宏观模型的重要课题。

4 结论

(1)结合早期黄土湿陷机理的研究成果,从微观角度,包括黄土的胶结物组成、性质及胶结方式,微结构特征和颗粒间作用力等三个方面,归纳总结黄土湿陷机理的研究现状。微结构特征从黄土发生湿陷的物理条件解释黄土的湿陷性,回答了黄土“如何湿陷”;黄土中颗粒胶结物的组成、性质及胶结方式以及颗粒间作用力直接回答了黄土“为何湿陷”的问题。

(2)以延安新区马兰黄土为例,从湿陷过程中微结构参数的定量变化和胶结物组成及性质两个方面探讨黄土湿陷机理。大于 23 μm 的镶嵌孔隙为湿陷提供主要空间;黏粒胶结的水化膨胀是引起颗粒间强度降低、发生湿陷的主要原因之一。但是,湿陷机理的

认识仍不够系统、全面,有待继续探究。

(3)对黄土湿陷机理研究的发展方向提出几点建议。高精度的3D表征是黄土微结构研究的基础,水、力作用下微结构的高精度动态演化观测,以及黄土中胶结物组成、性质及胶结方式的精细化研究,是理解黄土“如何湿陷”和“为何湿陷”的重要途径。在此基础上,对不同地区、不同地层黄土样品开展大量的观测,形成一个相对全面系统的涵盖微结构、胶结物性质及胶结方式、颗粒间作用力等信息的数据库,借助数理分析及人工智能等方法,以明确单一要素对宏观湿陷行为的控制作用;同时可对部分要素进行巧妙、合理的简化,建立理论模型,预测不同条件下的宏观湿陷行为,以指导实际工作。

参考文献 (References) :

- [1] 彭建兵,段钊.听黄土粒儿说滑坡[J].*自然杂志*, 2018, 40(4): 285 - 289. [PENG Jianbing, DUAN Zhao. Landslides in the words of little loess-grain[J]. *Chinese Journal of Nature*, 2018, 40(4): 285 - 289. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 余文龙,张健,张顺峰,等.黄土结构性量化研究新进展[J].*水文地质工程地质*, 2011, 38(5): 120 - 127. [YU Wenlong, ZHANG Jian, ZHANG Shunfeng, et al. Advances in quantitative structural research of loess[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2011, 38(5): 120 - 127. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 邵生俊,龙吉勇,杨生,等.湿陷性黄土结构性变形特性分析[J].*岩土力学*, 2006, 27(10): 1668 - 1672. [SHAO Shengjun, LONG Jiyong, YANG Sheng, et al. Analysis of structural deformation properties of collapsible loess[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(10): 1668 - 1672. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 胡再强,沈珠江,谢定义.非饱和黄土的结构性研究[J].*岩石力学与工程学报*, 2000, 19(6): 775 - 779. [HU Zaiqiang, SHEN Zhujiang, XIE Dingyi. Research on structural behavior of unsaturated loess[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2000, 19(6): 775 - 779. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 张茂省,胡炜,孙萍萍,等.黄土水敏性及水致黄土滑坡研究现状与展望[J].*地球环境学报*, 2016, 7(4): 323 - 334. [ZHANG Maosheng, HU Wei, SUN Pingping, et al. Advances and prospects of water sensitivity of loess and the induced loess landslides[J]. *Journal of Earth Environment*, 2016, 7(4): 323 - 334. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 陈林万,张晓超,裴向军,等.降雨诱发直线型黄土填方边坡失稳模型试验[J].*水文地质工程地质*, 2021, 48(6): 151 - 160. [CHEN Linwan, ZHANG Xiaochao, PEI Xiangjun, et al. Model test of the linear loess fill slope instability induced by rainfall[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(6): 151 - 160. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 成玉祥,张卜平,唐亚明.溯源侵蚀引发的拉裂-倾倒型黄土崩塌形成机制[J].*中国地质灾害与防治学报*, 2021, 32(5): 86 - 91. [CHENG Yuxiang, ZHANG Buping, TANG Yaming. The mechanism of bending-topping loess collapse caused by headward erosion[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2021, 32(5): 86 - 91. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 许强,魏勇,彭大雷,等.泾阳南塬蒋刘4#滑坡特征及成因机制[J].*水文地质工程地质*, 2018, 45(1): 123 - 130. [XU Qiang, WEI Yong, PENG Dalei, et al. Characteristics and failure mechanism of the Jiangliu 4# landslide in the southern tableland in Jingyang County[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2018, 45(1): 123 - 130. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 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 Zaiguan, SHU Tiankai. Preliminary discussion of loess collapsibility in northwest China[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 1958(4): 1 - 7. (in Chinese)]
- [10] 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 Jianguo, ZHANG Sumin. The strength characteristics of collapsible loess during moistening process[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 1989(2): 6 - 10. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 刘祖典.黄土力学与工程[M].西安:陕西科学技术出版社,1997. [LIU Zudian. Mechanics and engineering of loess[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1997. (in Chinese)]
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部.湿陷性黄土地区建筑规范:GB 50025—2004[S].北京:中国建筑工业出版社,2004. [Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for building construction in collapsible loess regions: GB 50025—2004[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2004. (in Chinese)]
- [13] 汤连生.黄土湿陷性的微结构不平衡吸力成因论[J].*工程地质学报*, 2003, 11(1): 30 - 35. [TANG Liansheng. Synthetic effect of microstructure and uneven suction on loess subsidence[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2003, 11(1): 30 - 35. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 陈存礼,高鹏,胡再强.黄土的增湿变形特性及其与

- 结构性的关系[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(7): 1352 - 1360. [CHEN Cunli, GAO Peng, HU Zaiqiang. Moistening deformation characteristic of loess and its relation to structure[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(7): 1352 - 1360. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 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 Haisong, NI Wankui, YAN Bin, et al. Discussion on relationship between structural strength and collapsibility of loess[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(3): 722 - 726. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 骆亚生, 胡仲有, 张爱军. 非饱和黄土结构性参数与其强度指标关系初探[J]. *岩土力学*, 2009, 30(4): 943 - 948. [LUO Yasheng, HU Zhongyou, ZHANG Aijun. Regularity of relation between structural parameter and strength indexes of unsaturated loess[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(4): 943 - 948. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 许领, 戴福初, 金艳丽. 从非饱和土力学角度探讨黄土湿陷机制[J]. *水文地质工程地质*, 2009, 36(4): 62 - 65. [XU Ling, DAI Fuchu, JIN Yanli. Discussion on the mechanism of loess collapsibility from the perspective of unsaturated soil mechanics theory[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2009, 36(4): 62 - 65. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 蒋明镜. 现代土力学研究的新视野—宏微观土力学[J]. *岩土工程学报*, 2019, 41(2): 195 - 254. [JIANG Mingjing. New paradigm for modern soil mechanics: Geomechanics from micro to macro[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 41(2): 195 - 254. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 崔素丽, 黄森, 韩琳, 等. 水泥窑灰改性黄土的湿陷性和强度特性研究[J]. *水文地质工程地质*, 2018, 45(4): 73 - 78. [CUI Suli, HUANG Sen, HAN Lin, et al. A study of the collapsibility and strength property of loess stabilized by cement kiln ash[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2018, 45(4): 73 - 78. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 王玉涛, 刘小平, 曹晓毅. 基于主成分分析法的 Q_2 黄土湿陷特性研究[J]. *水文地质工程地质*, 2020, 47(4): 141 - 148. [WANG Yutao, LIU Xiaoping, CAO Xiaoyi. A study of the collapsibility of Q_2 loess based on principal component analysis[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(4): 141 - 148. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 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 Fengji, NAN Jingjing, WEI Yingqi, et al. Mathematical statistical analysis on factors affecting collapsible coefficient of loess[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2019, 30(2): 128 - 133. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 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. Research status and prospect of loess collapsibility mechanism[J]. *Geoscience*, 2015, 29(2): 397 - 407. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 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. [GAO Guorui. A structure theory for collapsing deformation of loess soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1990, 12(4): 1 - 10. (in Chinese with English abstract)]
- [24] DUDLEY J H. Review of collapsing soils[J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 1970, 96(3): 925 - 947.
- [25] 关文章. 试论可溶盐与黄土湿陷机理[J]. *桂林冶金地质学院学报*, 1986, 6(3): 271 - 278. [GUAN Wenzhang. On soluble salts and the mechanism of loess collapsibility [J]. *Journal of Guilin College of Geology*, 1986, 6(3): 271 - 278. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 杨运来. 黄土湿陷机理的研究[J]. *中国科学(B辑)*, 1988(7): 756 - 766. [YANG Yunlai. Research on mechanism of loess collapsibility[J]. *Science China (B volume)*, 1988(7): 756 - 766. (in Chinese)]
- [27] 郭见扬. 关于湿陷原因的研究[J]. *水文地质工程地质*, 1958(4): 7 - 11. [GUO Jianyang. Research on reason of loess collapsibility[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 1958(4): 7 - 11. (in Chinese)]
- [28] 高国瑞. 黄土显微结构分类与湿陷性[J]. *中国科学*, 1980(12): 1203 - 1208. [GAO Guorui. Microstructure classification and collapsibility of loess[J]. *Science China*, 1980(12): 1203 - 1208. (in Chinese)]
- [29] GAO G R. Formation and development of the structure of collapsing loess in China[J]. *Engineering Geology*, 1988, 25(2/3/4): 235 - 245.
- [30] 雷祥义, 王书法. 黄土的孔隙大小与湿陷性[J]. *水文地质工程地质*, 1987(5): 15 - 18. [LEI Xiangyi, WANG Shufa. Size of loess pores in relation to collapsibility[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 1987(5): 15 - 18. (in Chinese with English abstract)]
- [31] 雷祥义. 中国黄土的孔隙类型与湿陷性[J]. *中国科学(B辑)*, 1987(12): 1309 - 1318. [LEI Xiangyi. Classification of loess pores in relation to collapsibility[J]. *Science China (B volume)*, 1987(12): 1309 - 1318. (in Chinese)]
- [32] 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(2): 76 – 83. [ZHAO Jingbo, CHEN Yun. Study on pores and collapsibility of loess[J]. Journal of Engineering Geology, 1994, 2(2): 76 – 83. (in Chinese with English abstract)]
- [33] 胡瑞林, 官国琳, 李向全, 等. 黄土湿陷性的微结构效应[J]. *工程地质学报*, 1999, 7(2): 161 – 167. [HU Ruilin, GUAN Guolin, LI Xiangquan, et al. Microstructure effect on the subsidence of loess[J]. *Journal of Engineering Geology*, 1999, 7(2): 161 – 167. (in Chinese with English abstract)]
- [34] OSIPOV V I, SOKOLOV V N. Factors and mechanism of loess collapsibility[C]// DERBYSHIRE E, DIJKSTRA T, SMALLEY I J. Genesis and properties of collapsible soils. Loughborough: Springer, 1994: 49 – 63.
- [35] 孙建中. 黄土学(上篇)[M]. 香港: 香港考古学会, 2005. [SUN Jianzhong. Loessology (Previous volume) [M]. Hong Kong: Hong Kong Archaeological Society, 2005. (in Chinese)]
- [36] 辛若希. 可溶盐含量对黑方台黄土湿陷性影响的试验研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2017. [XIN Ruoxi. A laboratory study of the effect of soluble salt on loess collapsibility in Heifangtai area[D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2017. (in Chinese with English abstract)]
- [37] 陈琼. 黏土吸附结合水水动力学模型及机理研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2013. [CHEN Qiong. Kinetics model and mechanism of clay adsorbing bound water[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2013. (in Chinese with English abstract)]
- [38] 张龙. 抑制剂对黏土矿物结合水的影响研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2015. [ZHANG Long. Research on influence of inhibitors on bound water in clay minerals[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2015. (in Chinese with English abstract)]
- [39] 郑晏武. 中国黄土的湿陷性[M]. 北京: 地质出版社, 1982. [ZHENG Yanwu. Collapsibility of loess in China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1982. (in Chinese)]
- [40] 王绪民, 陈善雄, 程昌炳. 酸性溶液浸泡下原状黄土物理力学特性试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(9): 1619 – 1626. [WANG Xumin, CHEN Shanxiong, CHENG Changbing. Experimental study on physico-mechanical characteristics of undisturbed loess soaked in acid solution[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(9): 1619 – 1626. (in Chinese with English abstract)]
- [41] HANDY R L. Collapsible loess in Iowa[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1973, 37(2): 281 – 284.
- [42] YUAN Z X, WANG L M. Collapsibility and seismic settlement of loess[J]. *Engineering Geology*, 2009, 105(1/2): 119 – 123.
- [43] 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(2): 123 – 134. [GAO Guorui. Study of the microstructures and the collapse mechanism in loess soil from Lanzhou[J]. *Journal of Lanzhou University*, 1979(2): 123 – 134. (in Chinese with English abstract)]
- [44] MELLORS T W. The influence of the clay component in loess on collapse of the soil structure[C]//DERBYSHIRE E, DIJKSTRA T, SMALLEY I J. Genesis and properties of collapsible soils. Loughborough: Springer, 1994: 207 – 216.
- [45] WANG H K, QIAN H, GAO Y Y, et al. Classification and physical characteristics of bound water in loess and its main clay minerals[J]. *Engineering Geology*, 2020, 265: 105394.
- [46] LI Y L, WANG T H, SU L J. Determination of bound water content of loess soils by isothermal adsorption and thermogravimetric analysis[J]. *Soil Science*, 2015, 180(3): 90 – 96.
- [47] LIU Z, LIU F Y, MA F L, et al. Collapsibility, composition, and microstructure of loess in China[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2016, 53(4): 673 – 686.
- [48] 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.
- [49] LI P, XIE W L, PAK R Y S, et al. Microstructural evolution of loess soils from the Loess Plateau of China[J]. *Catena*, 2019, 173: 276 – 288.
- [50] ROGERS C D F, DIJKSTRA T A, SMALLEY I J. Hydroconsolidation and subsidence of loess; Studies from China, Russia, North America and Europe; In memory of Jan Sajgalik[J]. *Engineering Geology*, 1994, 37(2): 83 – 113.
- [51] RONGERS C D F. Types and distribution of collapsible soils[C]//DERBYSHIRE E, DIJKSTRA T, SMALLEY I J. Genesis and properties of collapsible soils. Loughborough: Springer, 1994: 1 – 18.
- [52] 高国瑞. 中国黄土的微结构[J]. *科学通报*, 1980, 20: 945 – 948. [GAO Guorui. Microstructure of loess in China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1980, 20: 945 – 948. (in Chinese)]
- [53] DERBYSHIRE E, MELLORS T W. Geological and geotechnical characteristics of some loess and loessic soils from China and Britain; A comparison[J]. *Engineering Geology*, 1988, 25(2/3/4): 135 – 175.
- [54] KLUKANOVA A, SAJGALIK J. Changes in loess fabric

- caused by collapse: An experimental study[J]. *Quaternary International*, 1994, 24: 35 – 39.
- [55] 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): 46 – 71. [LEI Xiangyi. Type of the loess microtextures in Xi'an District[J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 1983(4): 46 – 71. (in Chinese with English abstract)]
- [56] 方祥位, 申春妮, 李春海, 等. 陕西蒲城黄土微观结构特征及定量分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(9): 1917 – 1925. [FANG Xiangwei, SHEN Chunni, LI Chunhai, et al. Quantitative analysis of microstructure characteristics of Pucheng loess in Shaanxi Province[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(9): 1917 – 1925. (in Chinese with English abstract)]
- [57] 张宗祜. 我国黄土类土显微结构的研究[J]. *地质学报*, 1964(3): 357 – 369. [ZHANG Zonghu. Research on the microstructure of loessial soil in China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 1964(3): 357 – 369. (in Chinese)]
- [58] 王永焱, 滕志宏. 中国黄土的微结构及其在时代上和区域上的变化—扫描电子显微镜下的研究[J]. *科学通报*, 1982(2): 102 – 105. [WANG Yongyan, TENG Zhihong. Microstructure of loess in China and its variation in times and region: A study under scanning electron microscope[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1982(2): 102 – 105. (in Chinese)]
- [59] 雷祥义. 黄土显微结构类型与物理力学性质指标之间的关系[J]. *地质学报*, 1989, 63(2): 182 – 191. [LEI Xiangyi. The relationship between the microfabric types and the indices of physico-mechanical properties in loess of China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 1989, 63(2): 182 – 191. (in Chinese with English abstract)]
- [60] WANG M, BAI X H. Collapse property and microstructure of loess[C]//*Advances in unsaturated soil, seepage, and environmental geotechnics*. Reston, VA: ASCE Press, 2006: 111 – 118.
- [61] WEI Y N, FAN W, YU B, et al. Characterization and evolution of three-dimensional microstructure of Malan loess[J]. *Catena*, 2020, 192: 104585.
- [62] YU B, FAN W, FAN J H, et al. X-ray micro-computed tomography (μ -CT) for 3D characterization of particle kinematics representing water-induced loess micro-fabric collapse[J]. *Engineering Geology*, 2020, 279: 105895.
- [63] YU B, FAN W, DIJKSTRA T A, et al. Heterogeneous evolution of pore structure during loess collapse: Insights from X-ray micro-computed tomography[J]. *Catena*, 2021, 201: 105206.
- [64] 魏亚妮. 水作用下黄土三维微结构演化及湿陷机理研究[D]. 西安: 长安大学, 2019. [WEI Yani. Research on three-dimensional microstructure evolution during wetting and collapsible mechanism of loess[D]. Xi'an: Chang'an University, 2019. (in Chinese with English abstract)]
- [65] 季峻峰, 陈骏, 王洪涛. 陕西洛川黄土-古土壤剖面中伊利石结晶度—黄土物质来源和古气候环境的指示[J]. *地质论评*, 1997(2): 181 – 185. [JI Junfeng, CHEN Jun, WANG Hongtao. Crystallinity of illite from the Luochuan loess-paleosol sequence, Shaanxi Province— Indicators origin and paleoclimate of loess[J]. *Geological Review*, 1997(2): 181 – 185. (in Chinese with English abstract)]
- [66] LI Y R, HE S D, DENG X H, et al. Characterization of macropore structure of Malan loess in NW China based on 3D pipe models constructed by using computed tomography technology[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2018, 154: 271 – 279.
- [67] 蒲毅彬, 陈万业, 廖全荣. 陇东黄土湿陷过程的CT结构变化研究[J]. *岩土工程学报*, 2000, 22(1): 49 – 54. [PU Yibin, CHEN Wanyue, LIAO Quanrong. Research on CT structure changing for damping process of loess in Longdong[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2000, 22(1): 49 – 54. (in Chinese with English abstract)]
- [68] DENG L S, FAN W, LIU S P, et al. Quantitative research and characterization of the loess microstructure in the Bai Lu Tableland, Shaanxi province, China[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2020, 2020: 3681382.
- [69] WEI T T, FAN W, YU N Y, et al. Three-dimensional microstructure characterization of loess based on a serial sectioning technique[J]. *Engineering Geology*, 2019, 261: 105265.
- [70] WEI T T, FAN W, YUAN W N, et al. Three-dimensional pore network characterization of loess and paleosol stratigraphy from South Jingyang Plateau, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2019, 78: 333.
- [71] WEI Y N, FAN W, YU N Y, et al. Permeability of loess from the South Jingyang Plateau under different consolidation pressures in terms of the three-dimensional microstructure[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2020, 79: 4841 – 4857.
- [72] ANDRADE J E, VLAHINIĆ I, LIM K W, et al. Multiscale 'tomography-to-simulation' framework for granular matter: The road ahead[J]. *Géotechnique Letters*, 2012, 2(3): 135 – 139.

编辑: 汪美华
实习编辑: 刘真真