

基于 GIS 实现湿陷作用对海岸带黄土微结构的影响研究

徐璐^{1,2}, 孙永福^{2,3}, 刘绍文¹, 张伟朋^{2,4}

(1. 南京大学 海岸与海岛开发教育部重点实验室, 江苏 南京 210023;

2. 国家海洋局 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061;

3. 青岛海洋科学与技术国家实验室 区域海洋动力学与数值模拟功能实验室, 山东 青岛 266061;

4. 兰州大学 土木工程与力学学院, 甘肃 兰州 730000)

摘要:海岸带黄土与内陆黄土相比具有显著特殊性,是我国黄土的另一种重要组成类型。以环渤海海岸带黄土为研究对象,获取 4 处典型海岸带黄土场地湿陷前、后扫描电镜图像,利用 GIS 提供的图像分析工具并结合三维分析模块对所获取的微结构图像进行研究,通过对样品 SEM 图像定性分析,发现颗粒间接触关系,由原状样的架空接触为主,逐渐转向湿陷样的镶嵌接触为主。获取了试样二维及三维形态下颗粒及孔隙的面积、周长、体积、等效直径等微观结构参数,定量分析了黄土湿陷前后土样中大、中、小、微孔隙的数量和面积变化。结论表明:湿陷后孔隙总数量增加,大中孔隙数量及面积显著减少,小孔隙数量及面积显著增加,微孔隙变化幅度较小,表明大、中孔隙的存在是海岸带黄土产生湿陷的主要原因。湿陷后孔隙的分形维数增加,说明湿陷作用增大了海岸带黄土土体孔隙形态的复杂程度。为定量研究黄土湿陷性的微结构影响效应做了有益的探索。

关键词:海岸带黄土;湿陷性;微观结构;GIS;扫描电子显微镜

中图分类号:P736

文献标识码:A

文章编号:1671-6647(2018)03-0423-12

doi:10.3969/j.issn.1671-6647.2018.03.009

我国渤海海峡以及胶东半岛、辽东半岛区域海岸带(陆架)黄土分布广泛。海岸带黄土因其同时具有陆相物质和海相物质的双重特征,所以是我国学者研究黄土堆积中的一种重要类型^[1]。李培英等^[2]首次论述了我国辽东海岸带黄土的成因;之后其提出并完善了海岸带黄土的“风成—海源成因”理论^[3],创建了海岸带黄土的地层层序、时间标尺及其古气候演化序列。程振波等^[4]通过对胶、辽半岛海岸带黄土中古生物化石的分析,探讨了胶、辽半岛海岸带黄土的物源及分布规律。倪志超^[5]通过分析海岸带黄土样品的颗粒粒径和元素地球化学特征,对庙岛群岛地区的物质来源进行探讨。然而从海岸带黄土的微观结构入手进行其特征研究仍较为匮乏,黄土微结构决定了在外力作用下内部应力应变的分布状态,并很大程度上控制了其宏观力学响应和破坏机理及过程^[6]。因此,黄土微结构是影响黄土湿陷性形成的重要因素,用黄土微结构理论来研究黄土湿陷性形成机理具有重大意义。高凌霞等^[7]通过改变含水率与固结压力,对西安原状黄土进行了湿陷性试验,由此分析了不同含水率与固结压力条件下湿陷性的差异与联系。付宇^[8]研究了湿陷系数和黄土物理指标的关系,并建立了黄土湿陷性分析模型。张豫川等^[9]定量研究力和水两个外因作用下湿陷黄土的孔隙大小、数量及其分布规律的变化,结果表明胶结作用的强弱是影响黄土湿陷性大小的主要因素。

目前,扫描电镜图像(SEM)已成为对黄土微观结构进行定性、定量描述与分析的重要研究手段之一,同其他各类图像处理软件结合使得土体微观结构参数定量化描述更加成熟^[10-12]。施斌^[13]应用 Videolab 图像

收稿日期:2017-12-08

资助项目:国家海洋公益性行业科研专项——近海海底地质灾害预测评价及防控关键技术研究(201005005);国家重点研发计划项目——水合物形成与分解过程微观结构与宏观力学特性(2017YFC0307305)

作者简介:徐璐(1993-),女,山东济南人,硕士研究生,主要从事海洋工程地质灾害方面研究. E-mail: xulu_2016@fio.org.cn

(陈靖 编辑)

分析系统,对黏性土在击实过程中形成的 5 种微观结构类型进行了定量评价,为土体微观结构特征的定量研究提供了评价指标;Liu 等^[14]开发了孔隙(颗粒)裂隙分析系统(PCAS)软件,有效地实现了对黏土微观孔隙和裂隙系统的定量分析;徐世民等^[15]利用 Matlab 和 IPP 软件相结合的方法对黄土微结构图像进行处理,提出一种基于灰度计算土的三维孔隙率方法,并从空间方向和土体深度入手对黄土微结构进行定性与定量分析;苗得雨^[16]利用 Matlab,针对土体显微图像的特征,系统提出了 Matlab 条件下适用于土体显微图像全流程三阶段处理方法;汤强等^[17]基于软件 PCAS 阐释图像识别中阈值、孔喉封闭半径、最小孔隙面积以及统计参数的意义,提出了土体 SEM 图像处理时这些参数的选取方法;王宝军等^[18]提出利用 GIS 三维分析模块,通过计算获取土颗粒形态三维分形维数的方法,该方法简化了计算过程,提高了分维确定的工作效率。本文利用 GIS 提供的图像处理功能并结合其他图像处理技术,对土样进行二维及三维数据处理和分析,计算了海岸带黄土湿陷前后孔隙数量、面积及分形维数等微结构参数的变化,通过海岸带黄土湿陷前后微观结构参数变化的对比与讨论,定量研究湿陷作用对海岸带黄土微结构的影响效应。

1 材料与方法

1.1 样品采集

试验所用黄土试样取自不同地区、不同的埋藏深度,力求本文所用试验方法具有广泛的应用性,实验结果具有代表性。样品分别取自北隍城岛、北长山岛、蓬莱林格庄三个地区的 4 处典型黄土地带(简称 BC, LS, ML, PL),取样深度分别为 1,3,3 和 4 m。样品具体的基本物理性质如表 1 所示。

表 1 4 组海岸带黄土原状样品基本物理性质
Table 1 The properties of four coastal loess samples

物理性质	BC	LS	ML	PL
取样深度/m	1	3	3	4
天然含水率/%	19	14	16	16
比重	2.68	2.67	2.69	2.69
干密度/Mg · m ⁻³	1.54	1.49	1.53	1.48
孔隙比	0.78	0.79	0.76	0.82
饱和度/%	67	47	57	52
塑性指数/%	13.4	11.4	13.7	12.5

1.2 SEM 图像获取

将试样放置于背阴通风处,自然风干至含水率小于 5%,再切削成 2~3 cm 边长的立方体,用小刀沿其四周刻划出一圈 3~5 cm 深的凹槽。为尽可能保证黄土土体微结构不受破坏,制样时用手小心将其掰断,露出新鲜断面,再用导电胶固定于托盘之上,放入真空泵内抽气,直至土内气体压力低至 1 Pa 以下。选取试样将其连同托盘放入扫描电镜工作室,调节焦距分别获取 300 倍、500 倍、1 000 倍的扫描电镜图像。300 倍的 SEM 图像颗粒有较多团聚和黏连现象;1 000 倍的 SEM 图像所包含的颗粒及孔隙数量不足,因此选用 500 倍的 SEM 图像,这样既保证了足够的信息量,又使得结果较为准确。本次试验共获取了 24 张海岸带黄土原状样(简称:YZ)和湿陷样(简称: SX)的扫描电镜图像。

1.3 SEM 图像处理

1.3.1 二维图像

SEM 图像是了解黄土微结构特征的重要依据,但 SEM 图像无法直接应用于软件中进行定量研究与分析。利用 ArcGIS 软件中 Reclassify 工具,基于灰度图像不连续性和相似性的性质对微结构图像进行二值化处理。通过保证试样孔隙比与宏观实际孔隙比一致而调整阈值,继而达到颗粒和孔隙准确分割的目的。经二值化预处理后的 SEM 图像如图 2 所示,白色和黑色像素分别表示土的颗粒和孔隙,并分别赋予 1 和 0 的字段色彩值。

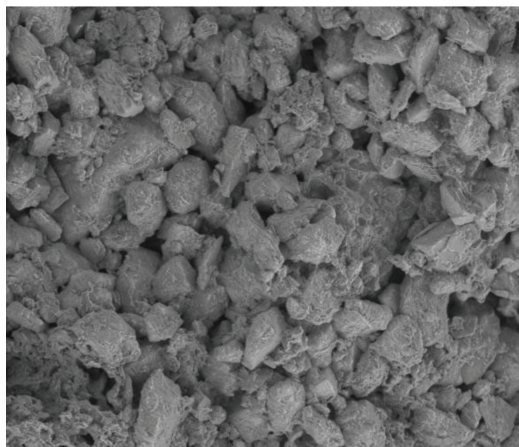


图 1 黄土 500 倍扫描电镜图像
Fig.1 SEM images of loess ($\times 500$)



图 2 预处理后 500 倍扫描电镜图像
Fig.2 SEM images after pretreatment ($\times 500$)

利用 ArcGIS 提供的矢量化工具,将栅格图像文件转化为含有多边形的矢量文件。由于在利用计算机进行自动二值化的过程中,部分孔隙会相连在一起,此时采用人机交互式分割法将其分离,以原始图像为底图,对比二值化前后图像,并手动分割。经分割后的矢量文件中包含代表颗粒和孔隙的多边形,且矢量文件属性表中包含该多边形在转化之前的属性值,白色(颗粒)值为 1,黑色(孔隙)值为 0。最终在属性表中添加面积及周长字段,计算颗粒多边形和孔隙多边形的面积及周长值。如若计算和处理孔隙多边形的图像,则利用 ArcGIS 中属性选择功能,选择所有属性为 1(颗粒)的多边形,并将其删除,图 3 中每一个多边形区域都是矢量多边形,最后将包含有多边形等效面积和周长的属性文件导出为数据文件。

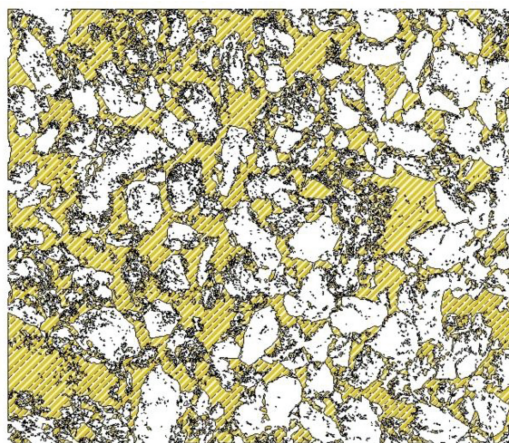


图 3 矢量化后的孔隙多边形图层
Fig.3 Polygon map layer of pores after vectoring

1.3.2 三维图像

若实现三维颗粒的表面积和体积计算,在二维图像所获取的数据基础上,还需颗粒的高程信息。借助 GIS 提供的三维分析功能实现对栅格图像颗粒表面积和体积的计算,其原理源自 GIS 中广泛使用的数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)^[18]。将 SEM 灰度图像中颗粒的不同灰度值看作是地形高程,以此建立土样表面的“高程模型”(图 4),利用 GIS 提供的地形分析功能计算颗粒的表面积和体积。

利用 GIS 对试样的 SEM 图像进行三维表面建模,综合考虑了试样整体表面的起伏状态,反映了土样整

体形态的粗糙程度;三维可视化则拓展了 SEM 照片的应用范围和视域,使浏览者对图像中的颗粒和孔隙及其关系有更加直观的了解。所以三维数据处理方法其获得的信息量远远超过二维图像本身,增强研究者对土样微观结构的理解。

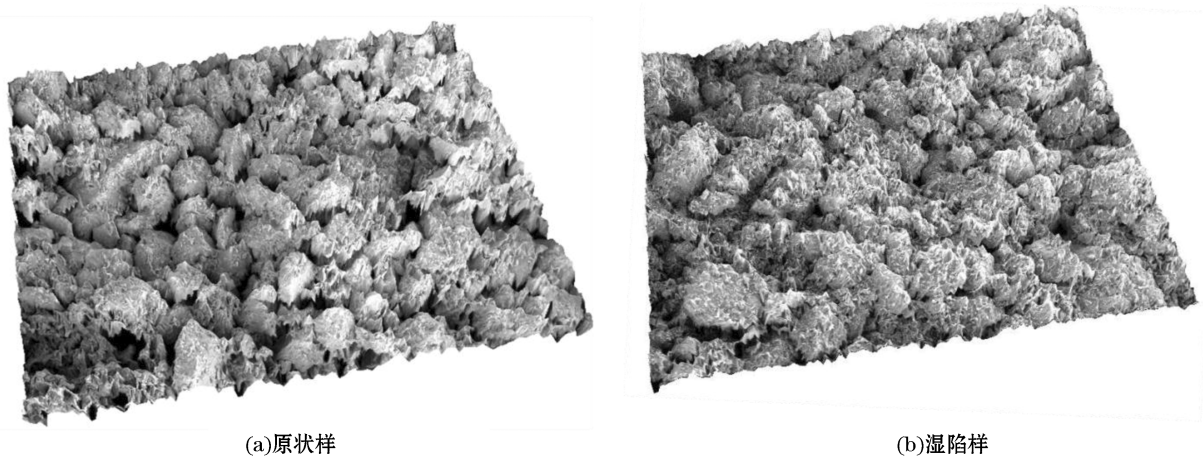


图 4 样品湿陷前后颗粒表面的三维显示

Fig.4 3D visualization of loess surface before and after collapse

2 结 果

2.1 SEM 图像分析结果与土工试验结果对比

利用实验室常用的土工试验颗粒分析仪器甲种密度计,获取粒径小于 0.075 mm 的颗粒粒径累计百分含量。测量前将土样内加入分散剂,使得土样中的黏粒分散开来。通过 EXCEL 软件中“CORREL”函数命令,将通过处理分析 SEM 图像获取的颗粒分布曲线和土工试验获取的颗粒分布曲线(图 5)进行相关性分析,两者间相关系数如表 2 所示。黄土湿陷性对孔隙的数量和面积影响较大,对颗粒粒径分布影响不大,所以每组样品我们采用同一条土工试验颗分曲线进行对比。由 SEM 图像分析获取的颗粒分布曲线和土工试验获取的颗分曲线相关系数均在 0.93 以上,其中相关系数最小为 0.930 1,最大为 0.960 3,说明采用 GIS 手段处理和分析 SEM 图像方法可行。

表 2 SEM 图像处理结果与土工实验结果曲线对比相关系数

Table 2 The correclation coefficient of SEM images and densimeter test results

项 目	BC		LS		ML		PL	
	YZ	SX	YZ	SX	YZ	SX	YZ	SX
相关系数	0.955 9	0.930 1	0.949 3	0.934 5	0.943 9	0.960 3	0.942 6	0.936 4

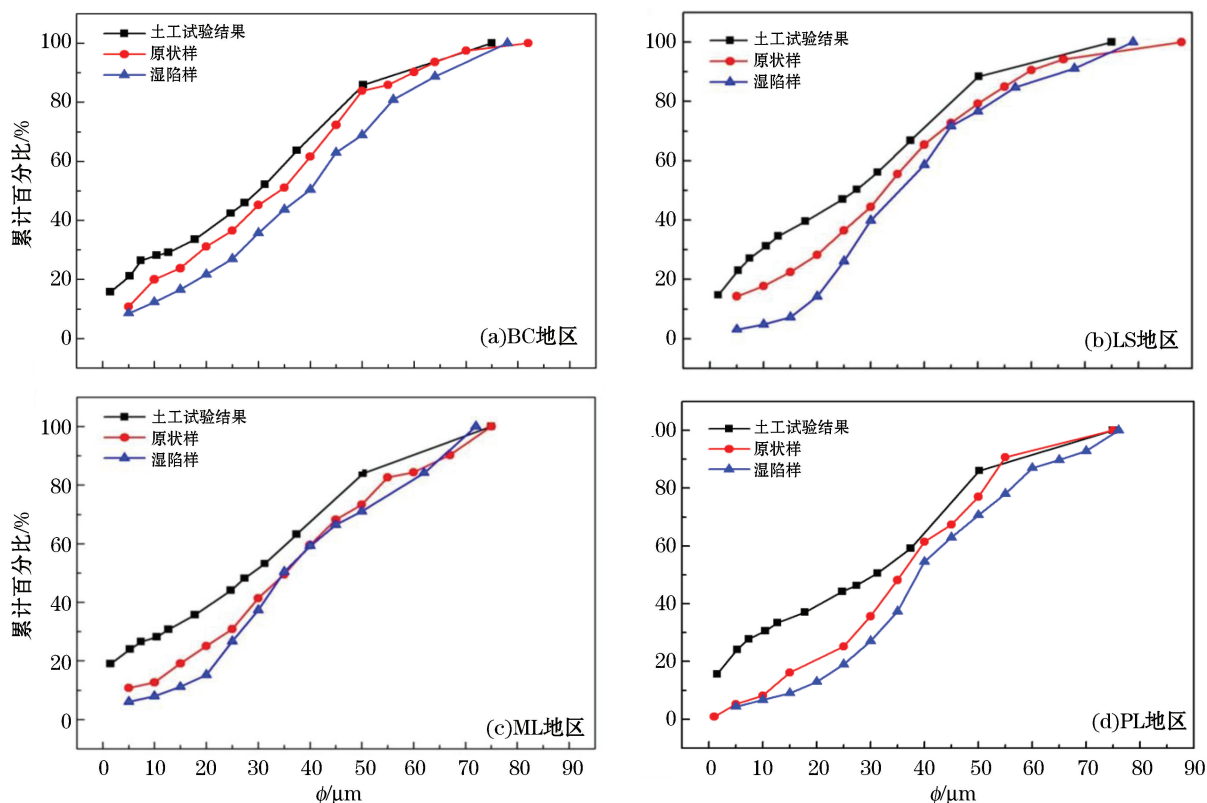


图 5 SEM 图像颗分处理结果与土工实验结果对比图

Fig.5 The particle distribution curve comparison of SEM images and densimeter test results

2.2 湿陷前后孔隙数量及面积分布结果对比与分析

通过 SEM 图像(图 6)表观特征分析可知,湿陷前土样微观结构较为疏松,骨架单元体相互排列形成了较大孔径的架空孔隙,有些架空孔隙的孔径与周围骨架单元体粒径相当。湿陷后大多数的骨架单元体都是以内部存在微孔的大颗粒聚合物存在,这些大颗粒通过胶结物质连接一起,没有胶结的区域形成缺口由孔隙镶嵌其中^[20]。颗粒间接触关系由原状样的架空接触为主,逐渐转向湿陷样的镶嵌接触为主。

通过软件计算得到的孔隙等效直径(μm)按照大孔隙($\phi > 30$)、中孔隙($5 < \phi \leq 30$)、小孔隙($1 < \phi \leq 5$)、微孔隙($\phi \leq 1$)进行分类^[21]。上述分类标准是按照孔隙实际尺寸划分,但软件获取的数据是以像素为单位,因此需要将计算出的数据进行换算。通过比对 SEM 图像比例尺,计算出相应的转换系数,获取土样周长、面积等实际尺寸的微观结构参数。

基于 GIS 图像处理技术对选取的 24 张 SEM 图像进行数据处理及分析,把每张 SEM 图像获得的数据输出到 Excel 中进行整理和对比,取每组数据的平均值进行统计,共计得出湿陷前后 BC, ML, LS, PL 四个地区的 8 组数据。图 7 为土样湿陷前后孔隙的实际数量及面积变化结果;图 8 为土样湿陷系数与湿陷前后 $5 < \phi \leq 30$ 粒径范围内孔隙面积变化散点图;为更直观感受湿陷前后孔隙的变化特征,我们将土样湿陷前后孔隙的数量及面积变化转换为百分比形式,结果如表 3~表 5 所示。“负值”表示此孔径范围内孔隙的数量及面积减小,“正值”表示此孔径范围内孔隙的数量及面积增加。

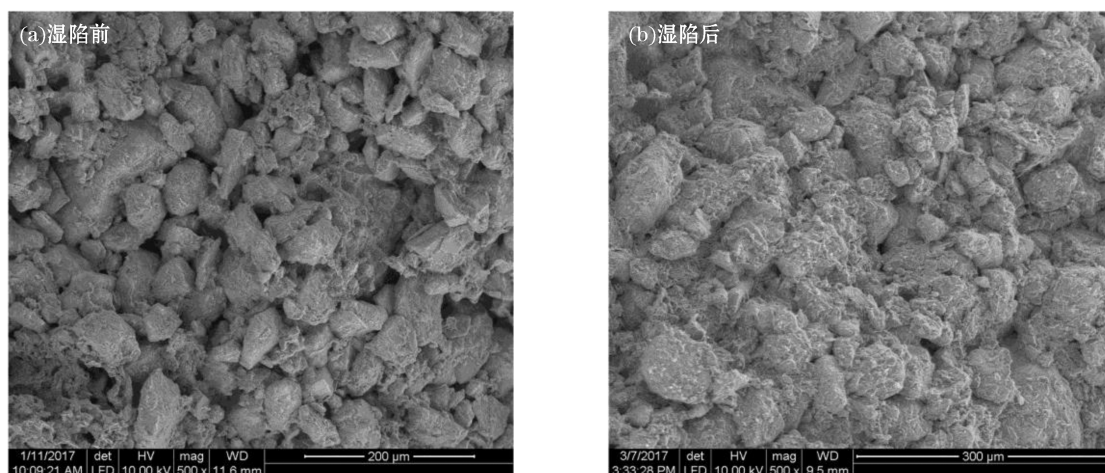


图6 ML地区土样湿陷前后 SEM 图像

Fig.6 The SEM images of BC samples before and after collapse in ML

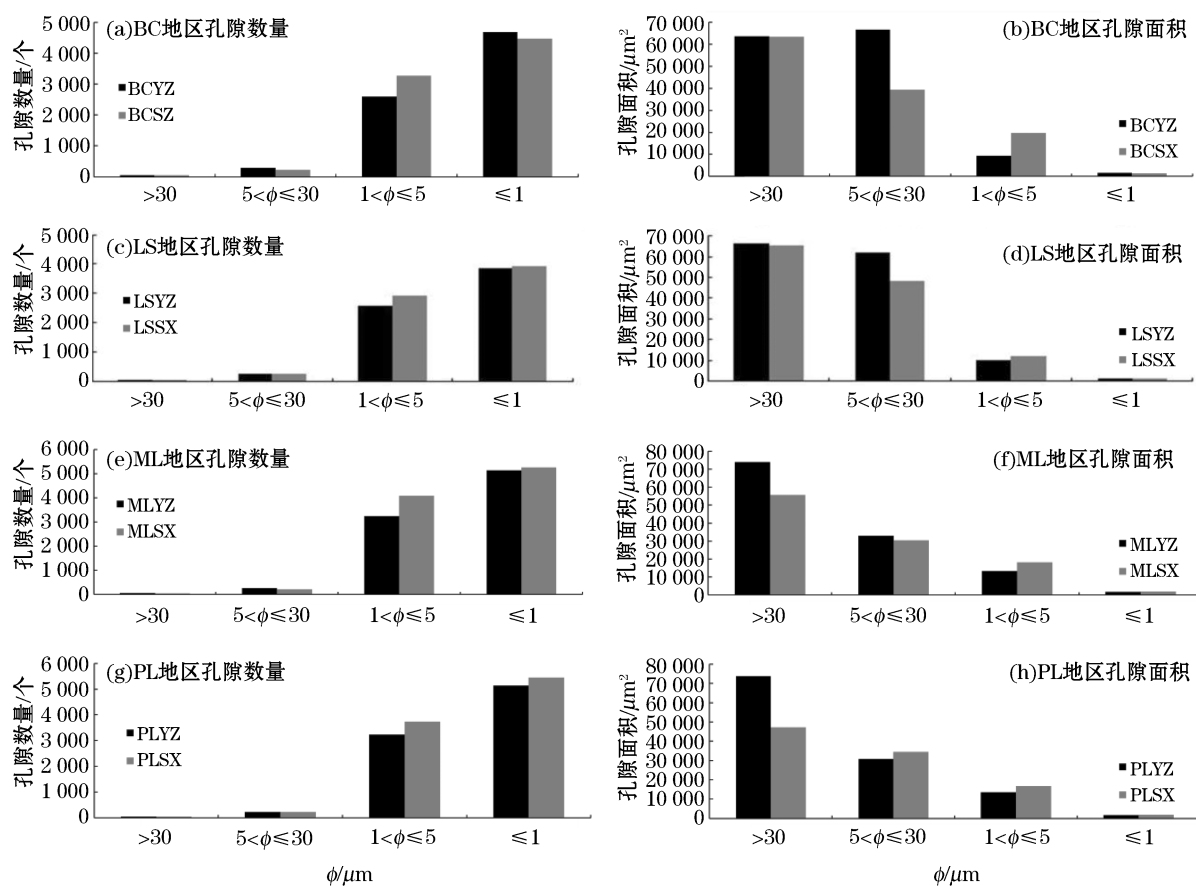


图7 样品湿陷前后孔隙数量、面积变化柱状图

Fig.7 Histogram of variations in the numbers and areas of pores before and after collapse

表 3 样品湿陷前后孔隙数量变化百分比 (%)

Table 3 Percentage change in number of pores before and after collapse (%)

$\phi/\mu\text{m}$	BC			LS			ML			PL		
	YZ	SX	变化/%	YZ	SX	变化/%	YZ	SX	变化/%	YZ	SX	变化/%
>30	47	45	-4.26	50	45	-10.00	46	44	-4.35	49	35	-28.57
$5<\phi\leq 30$	288	222	-22.92	262	249	-4.96	255	204	-20.00	217	225	3.69
$1<\phi\leq 5$	2 597	3 266	25.76	2 583	2 920	13.05	3 234	4 082	26.22	3 234	3 725	15.18
≤ 1	4 680	4 477	4.34	3 863	3 917	1.40	5 131	5 257	2.46	5 131	5 443	6.08
总孔隙数量	7 612	8 010	5.23	6 758	7 131	5.52	8 666	9 687	10.63	8 631	9 428	9.23

表 4 BC、LS 地区样品湿陷前后孔隙面积变化百分比 (%)

Table 4 Percentage change in area of pores before and after collapse in BC and LS (%)

$\phi/\mu\text{m}$	BC			LS		
	YZ/ μm^2	SX/ μm^2	变化/%	YZ/ μm^2	SX/ μm^2	变化/%
>30	63 491.93	63 272.39	-0.34	66 174.32	65 241.03	-1.41
$5<\phi\leq 30$	66 489.71	39 332.39	-40.84	61 764.38	48 176.90	-22.00
$1<\phi\leq 5$	9 322.04	12 672.98	35.95	10 146.71	12 085.17	19.10
≤ 1	1 637.52	1 483.09	-9.43	1 319.21	1 357.89	2.93

表 5 ML、PL 地区样品湿陷前后孔隙面积变化百分比 (%)

Table 5 Percentage change in area of pores before and after collapse in ML and PL (%)

$\phi/\mu\text{m}$	ML			PL		
	YZ/ μm^2	SX/ μm^2	变化/%	YZ/ μm^2	SX/ μm^2	变化/%
>30	73 805.25	55 587.59	-24.68	73 805.25	47 288.16	-35.93
$5<\phi\leq 30$	32 992.15	30 332.01	-8.06	30 762.19	34 507.99	12.18
$1<\phi\leq 5$	13 411.97	18 083.85	34.83	13 411.97	16 749.04	24.88
1	1 746.97	1 890.94	8.24	1 746.98	1 836.88	5.15

通过对土样湿陷前后孔隙数量、面积变化的微观结构特征研究可知:1)4 个地区土样湿陷后孔隙总数量均增多,平均增加 7.65%。2)BC,LS,ML 地区湿陷后大中孔隙数量和面积显著减少,数量平均减少22.16%,面积平均减少 32.45%;小孔隙数量和面积显著增多,数量平均增加 21.68%,面积平均增加 29.96%。3)PL 地区大孔隙数量减少 28.57%,面积减少 35.93%;中孔隙数量增加 3.69%,面积增加 12.18%;小孔隙数量增加 15.18%,面积增加 24.88%。PL 地区湿陷后大孔隙数量和面积大幅减少,小孔隙大幅增多,而中孔隙小幅增长,我们推测 PL 土样湿陷后大孔隙转换为中孔隙,没有彻底分解为小孔隙,所以中孔隙呈

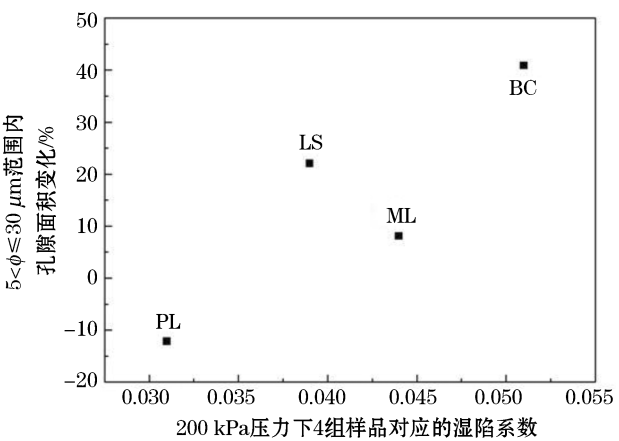


图 8 样品湿陷系数与孔隙面积变化量散点图

Fig.8 Scatter diagram of sample collapsibility coefficient and pore area variation

增长趋势。4) 4 个地区微孔隙与大中孔隙和小孔隙变化相比,微孔隙数量及面积变化幅度较小,变化幅度均低于 10%。5) 如图 8 所示,4 个地区样品在 200 kPa 压力下对应的湿陷系数分别为 0.051, 0.039, 0.044, 0.031, 湿陷系数与 $5 < \varphi \leq 30$ 粒径范围内孔隙面积变化量总体趋势成正比,说明 $5 < \varphi \leq 30$ 粒径范围内孔隙面积变化越大,土样湿陷性越强。综上所述,大、中孔隙的存在是黄土产生湿陷的主要原因。

2.3 湿陷前后孔隙分形维数结果对比与分析

研究表明^[19],在二维 SEM 图像处理中,黄土中孔隙等效面积与等效周长具有以下关系:

$$\lg P = \frac{D}{2} \times \lg A + C, \quad (1)$$

与面积—等效周长法类似,三维形态下可建立表面积—体积法。研究表明^[18],在三维 SEM 图像处理中,黄土中孔隙等效面积与等效体积具有以下关系:

$$\lg V = \frac{3}{D} \times \lg A - \lg a_0^3, \quad (2)$$

式中: P 代表图像中任意一个孔隙多边形的等效周长; A 代表相应孔隙多边形的等效面积; V 代表相应孔隙多边形的等效体积; C 和 a_0 为常数; D 代表图像对应的海岸带黄土孔隙的分形维数。

把利用 ArcGIS 软件提取的孔隙多边形等效周长和等效面积绘制双对数坐标图(图 9)。这些数据点拟合成一条直线,通过该直线斜率即可获得土样孔隙形态分形维数:

$$D = 2K. \quad (3)$$

同理,绘制 $\lg V - \lg A$ 双对数坐标图,见图 10。通过得到该直线部分的斜率获取三维图像中孔隙形态的三维分形维数:

$$D = 3/K, \quad (4)$$

式中: D 为该图像对应的海岸带黄土孔隙的分形维数; K 为直线斜率。

从图 9 和图 10 中可看出这些离散点数据具有非常好的相关关系,且存在线性对数相关,说明黄土的微观结构中孔隙形态是分形的。分形几何可以对表面起伏性、颗粒和孔隙级配等非确定型结构参数进行量化^[12],孔隙分维越大,说明孔隙结构越复杂。由此可按上述方法,通过定量分析各组试样湿陷前后孔隙二维、三维分形维数,以表征试样的分形特征,结果如表 6 和表 7 所示。湿陷后土样的孔隙分形维数 D 较原状样增大,孔隙分维越大,说明孔隙结构越复杂。计算四个地区土样湿陷前后孔隙分形维数平均值可得,二维分形维数由湿陷前 1.170 增大到湿陷后 1.194; 三维分形维数则由湿陷前 2.15 增大到湿陷后 2.23,说明土样发生湿陷变形后,孔隙的复杂程度有所增加。

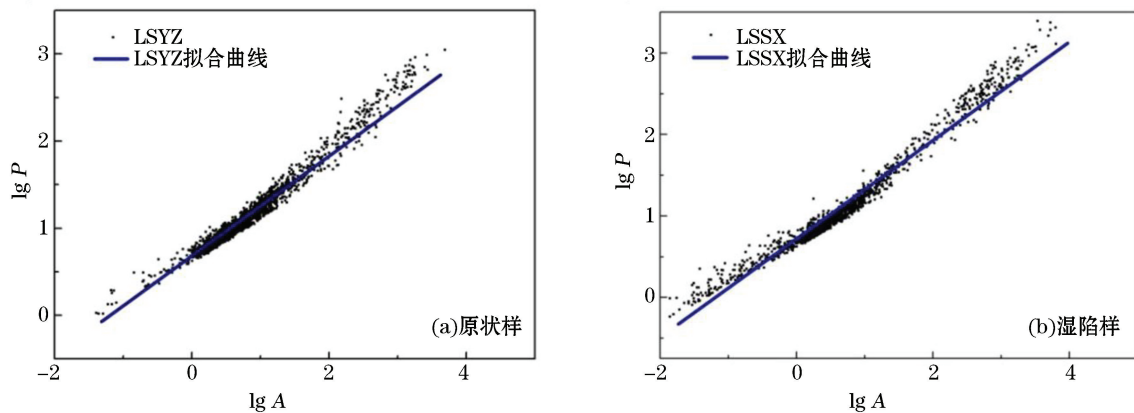


图 9 样品湿陷前后孔隙等效面积—等效周长的双对数图

Fig.9 $\lg P - \lg A$ graph of pores before and after collapse

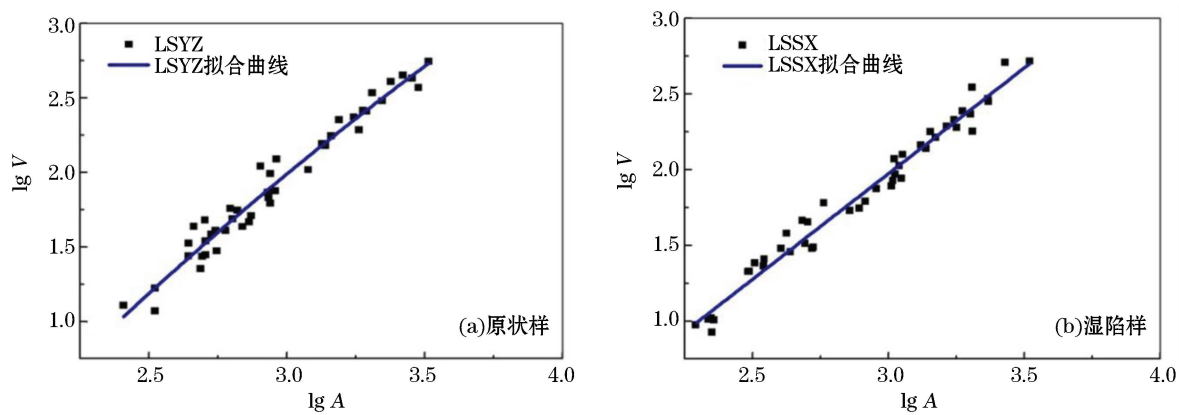


图 10 样品湿陷前后孔隙等效体积—等效周长的双对数图
Fig.10 lg V-lg A graph of pores before and after collapse

表 6 二维 SEM 图像孔隙形态的分形维数

Table 6 Fractal dimension of pore morphology of 2D SEM images

样品编号	散点拟合方程	相关系数(R^2)	分形维数(D)
BCYZ	$\lg P=0.574\ 4\ \lg A+0.708\ 8$	0.981 3	1.148 9
BCSX	$\lg P=0.594\ 3\ \lg A+0.707\ 9$	0.980 2	1.188 6
LSYZ	$\lg P=0.575\ 4\ \lg A+0.706\ 6$	0.979 9	1.150 7
LSSX	$\lg P=0.591\ 6\ \lg A+0.709\ 5$	0.979 7	1.183 2
MLYZ	$\lg P=0.595\ 5\ \lg A+0.709\ 7$	0.978 1	1.190 9
MLSX	$\lg P=0.600\ 4\ \lg A+0.712\ 6$	0.976 8	1.200 9
PLYZ	$\lg P=0.595\ 3\ \lg A+0.696\ 7$	0.974 3	1.190 5
PLSX	$\lg P=0.602\ 3\ \lg A+0.712\ 7$	0.976 3	1.204 6

表 7 三维 SEM 图像孔隙形态的分形维数

Table 7 Fractal dimension of pore morphology of 3D SEM images

样品编号	散点拟合方程	相关系数(R^2)	分形维数(D)
BCYZ	$\lg V=1.409\ 9\ \lg A-2.165\ 0$	0.975 2	2.127 8
BCSX	$\lg V=1.357\ 5\ \lg A-2.059\ 5$	0.979 8	2.209 9
LSYZ	$\lg V=1.402\ 6\ \lg A-2.190\ 9$	0.962 0	2.138 9
LSSX	$\lg V=1.374\ 9\ \lg A-2.210\ 1$	0.975 0	2.182 0
MLYZ	$\lg V=1.406\ 0\ \lg A-2.183\ 5$	0.976 3	2.133 7
MLSX	$\lg V=1.303\ 9\ \lg A-1.896\ 7$	0.978 3	2.300 8
PLYZ	$\lg V=1.365\ 3\ \lg A-2.089\ 8$	0.979 7	2.197 3
PLSX	$\lg V=1.348\ 9\ \lg A-2.022\ 1$	0.968 7	2.224 0

3 讨 论

二维数据处理时利用 GIS 矢量化功能自动提取出封闭的孔隙轮廓,因此产生的数据样本数非常大,可

达 5 000 个以上。但进行三维数据处理时需手动选择一定数量的孔隙,将这些孔隙提取出来,保存为独立的图像文件并创建这些孔隙的独立高程模型,然后再分别计算这些孔隙的表面积和体积,时间成本较高,工作量较大。文中每个地区的试样分别选取 60 个大、中、小微规格的孔隙,与自动矢量化获得的上千个多边形相比数据量不足,因此用于数据分析的样本数较少。

4 结 论

GIS 软件可作为土体微观结构图像的定量处理手段,提取土体中结构要素的定量数据,其提供的对矢量图像的矢量化功能和栅格图像的三维分析功能可以很容易地计算出给定孔隙的表面积和体积,大大提高分析效率和精度。利用 ArcGIS 提供的图像分析工具并结合其他图像处理技术,对试样的 SEM 图像进行了基于二维图像和三维图像的定性分析和孔隙微观结构参数的定量计算,实现了海岸带黄土湿陷前后的微观结构对比研究,为定量研究黄土湿陷性的微结构影响效应做了有益的探索,根据对比分析得出结论:

1)通过土样表观特征定性分析可知,土样湿陷前以粒状单元体接触连接形成架空孔隙体系为主,湿陷后转变成以较多颗粒集合物胶结连接形成镶嵌孔隙的结构体系为主。

2)定量分析土样中 4 类孔隙在湿陷前后的变化及对黄土湿陷的贡献量,结果表明:湿陷后孔隙总数量增加;大中孔隙数量及面积显著减少,小孔隙数量及面积显著增加,与大中孔隙和小孔隙相比,4 个地区微孔隙变化幅度较小。说明海岸带黄土中大、中孔隙的存在对其发生湿陷现象的贡献量较大。

3)定量分析发现微观孔隙的几何形态变化显著,分形几何理论适用于描述孔隙形态特征。孔隙二维分形维数由湿陷前的 1.170 增大到湿陷后的 1.194;三维分形维数由湿陷前的 2.15 增大到湿陷后的 2.23,说明土样湿陷变形后,孔隙的形态特征复杂程度有所增加。

参考文献(References):

- [1] LI P Y, XU X Y, ZHAO S L. Coastal loess and paleo-glaciation remain[M]. Beijing: China Ocean Press, 2008: 1-328. 李培英, 徐兴永, 赵松龄. 海岸带黄土与古冰川遗迹[M]. 北京: 海洋出版社, 2008: 1-328.
- [2] LI P Y. Distributive properties of coastal zone loess in Bohai Strait, Jiaodong Peninsula and Liaodong Peninsula[J]. Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Sea, 1992, 10(1): 25-33. 李培英. 渤海海峡及胶、辽两半岛海岸带黄土的分布特征[J]. 黄渤海海洋, 1992, 10(1): 25-33.
- [3] LI P Y, CHENG Z B, LYU H Y, et al. The coastal zone loess of the Liaodong Peninsula, Liaoning Province[J]. Acta Geologica Sinica, 1992, 66(1): 82-94. 李培英, 程振波, 吕厚远, 等. 辽东海岸带黄土[J]. 地质学报, 1992, 66(1): 82-94.
- [4] CHENG Z B, FU M Z, JU X H. Geological significance of paleontological fossils in coastal loess in the Bohai Strait and Liaodong Peninsula[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1996(1): 85-94. 程振波, 傅命佐, 鞠小华. 渤海海峡和辽东半岛海岸带黄土中的古生物化石的地质意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1996(1): 85-94.
- [5] NI Z C. Optically stimulated luminescence dating and the provenance analysis of Loess in Miaodao Islands, Shandong Province[D]. Jinan: Shandong Normal University, 2015. 倪志超. 山东庙岛群岛黄土光释光年代及物源探讨[D]. 济南: 山东师范大学, 2015.
- [6] CHEN Y, LI X A, HUANG R Q, et al. Micro experimental research on influence factors of loess collapsibility[J]. Journal of Engineering Geology, 2015, 23(4): 646-653. 陈阳, 李喜安, 黄润秋, 等. 影响黄土湿陷性因素的微观试验研究[J]. 工程地质学报, 2015, 23(4): 646-653.
- [7] GAO L X, LUAN M T, YANG Q. Evaluation of loess collapsibility based on principal components of microstructural parameters[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(7): 1921-1926. 高凌霄, 栾茂田, 杨庆. 基于微结构参数主成分的黄土湿陷性评价[J]. 岩土力学, 2012, 33(7): 1921-1926.
- [8] FU Y. Correlation of the collapsibility of loess and the physical index[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2016. 付宇. 黄土湿陷性与物理指标相关性研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2016.
- [9] ZHANG Y C, YANG Q F, ZHANG X Y, et al. Microstructure of loess in collapsibility and seismic subsidence[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2011, 47(2): 72-76. 张豫川, 羊群芳, 张兴元, 等. 基于湿陷性和震陷性的黄土微结构[J]. 兰州大学学报

- (自然科学版), 2011, 47(2): 72-76.
- [10] COX M, BUDHU M. A practical approach to grain shape quantification[J]. *Engineering Geology*, 2008, 96(1-2): 1-16.
- [11] OBARA B, KOZUSNIKOVA A. Utilisation of the image analysis method for the detection of the morphological anisotropy of calcite grains in marble[J]. *Computational Geosciences*, 2007, 1(4): 275-281.
- [12] PRAKONGKEP N, SUDDHIPRAKARN A, KHEORUENROMNE I, et al. SEM image analysis for characterization of sand grains in Thai paddy soils[J]. *Geoderma*, 2010, 156(1-2): 20-31.
- [13] SHI B. Simple Quantitative analysis of microstructure of cohesive soil[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 1997, 24(1): 7-10. 施斌. 粘性土微观结构简易定量分析法[J]. *水文地质工程地质*, 1997, 24(1): 7-10.
- [14] 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.
- [15] XU S M, WU Z J, ZHAO W C, et al. Study of the microscopic pores of structured loess based on Matlab and IPP[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2017, 39(1): 80-87. 徐世民, 吴志坚, 赵文琛, 等. 基于 Matlab 和 IPP 的黄土孔隙微观结构研究[J]. *地震工程学报*, 2017, 39(1): 80-87.
- [16] MIAO D Y, BAI X H. Microstructure of soil using SEM images based on Matlab[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2014, 41(6): 141-146. 苗得雨, 白晓红. 基于 Matlab 的土体 SEM 图像处理方法[J]. *水文地质工程地质*, 2014, 41(6): 141-146.
- [17] TANG Q, LIU C, GU Y F, et al. Microstructure identification and statistical method of the soil SEM image[J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 2017, 37(3): 547-552. 汤强, 刘春, 顾颖凡, 等. 土体 SEM 图像微观结构的识别和统计方法[J]. *桂林理工大学学报*, 2017, 37(3): 547-552.
- [18] WANG B J, SHI B, TANG C S. Study on 3D fractal dimension of clayey soil by use of GIS[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, 29(2): 309-312. 王宝军, 施斌, 唐朝生. 基于 GIS 实现黏性土颗粒形态的三维分形研究[J]. *岩土工程学报*, 2007, 29(2): 309-312.
- [19] TANG C S, SHI B, WANG B J. Factors affecting analysis of soil microstructure using SEM[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, 30(4): 560-565. 唐朝生, 施斌, 王宝军. 基于 SEM 土体微观结构研究中的影响因素分析[J]. *岩土工程学报*, 2008, 30(4): 560-565.
- [20] JIAO P F, SUN Y F, LIU X Y, et al. Microstructure characteristics of the disturbed silt on Subaqueous Delta of Yellow River[J]. *Advances in Marine Science*, 2018, 36(2): 253-261. 焦鹏飞, 孙永福, 刘晓瑜, 等. 黄河水下三角洲扰动粉土微观结构特征分析[J]. *海洋科学进展*, 2018, 36(2): 253-261.
- [21] LEI X Y. The Types of loess pores in China and their relationship with collapsibility[J]. *Science in China: Series B*, 1987, 17(12): 1309-1318. 雷祥义. 中国黄土的孔隙类型与湿陷性[J]. *中国科学: B 辑*, 1987, 17(12): 1309-1318.

Study on the Influence of Collapsibility on Coastal Loess Microstructure by GIS

XU Lu^{1,2}, SUN Yong-fu^{2,3}, LIU Shao-wen¹, ZHANG Wei-peng^{2,4}

(1. *The Key Laboratory of Coast & Island Development of Ministry of Education, Nanjing University, Nanjing 210023, China;*

2. *The First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao 266061, China;*

3. *Laboratory for Regional Oceanography and Numerical Modeling, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266061, China;*

4. *School of Civil Engineering and Mechanical, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)*

Abstract: Coastal loess is an important component of Chinese loess because of its specific characteristic compared to inland loess. This study focused on coastal loess around the Bohai sea, obtained the SEM images of four typical coastal loess fields before and after collapse. These data, combining with image analysis tool offered with 3D analysis module in GIS, were used to study the image of the micro-structure of loess. According to the apparent characteristic of SEM images, by using qualitative analysis of apparent characteristic, we found that the inter-particle contact relationship is changed from overhead contact to mosaic contact after sample collapse. After acquiring area, perimeter, volume, equivalent diameter and other microstructure parameters of sample particle and pore in two-dimension and three-dimension form, we analyzed the number and area variation of large pores, medium pores, small pores and micro-pores in loess before and after collapse quantitatively. The result showed that the total number of pores increases. The number and area of large and medium pores decreased dramatically while that of small pores increased significantly and the variation of micro-pores was small. That means, the existence of large and medium pores is the main reason for the occurrence of loess collapse in coastal zones. In addition, the increase in pores dimension indicates that the collapse might increase the complexity of coastal loess pores. In this paper, we also explored the effect of quantitative study on the microstructure of loess collapse.

Key words: coastal loess; collapsibility; microstructure; GIS; scanning electron microscope

Received: December 8, 2017