南黄海中部泥质区黏性土的微结构特征及其成因分析

徐元芹[1,2,3], 李 萍[1,2,3], 高 伟[1,2,3], 刘 杰[1,2,3]

（1. 自然资源部 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061；
2. 自然资源部 海洋地质与成矿作用重点实验室, 山东 青岛 266061；
3. 崂山实验室 海洋地质过程与环境功能实验室, 山东 青岛 266237）

摘 要：通过对南黄海中部泥质区 27 张黏性土微结构图片的分析，发现该区黏性土具有粒状链接结构、絮状链接结构和黏土基质结构三种微结构类型，以黏土基质结构为主。分别从地形特征、物质来源、水动力条件、沉积速率等宏观因素，以及粒度成分、矿物组成、化学成分等微观因素分析微结构的成因，得知平坦的海底地形、较弱的水动力条件、较长的搬运距离使得研究区沉积物来源较少，沉积速率较低，沉积物颗粒以粉粒和黏粒为主。伊利石、绿泥石和蒙脱石等黏土矿物和有机质含量较高，这些物质成分的亲水性特征使得研究区的黏性土易吸水膨胀，微结构类型以孔隙非常发育，结构极为疏松的黏土基质结构为主。研究成果揭示了南黄海中部泥质区黏性土宏观工程性质的微观机理，加深了对海洋沉积物工程性状的认识。

关键词：南黄海中部泥质区；黏性土；微结构；成因分析

中图分类号：P736 **文献标志码：**A **文章编号：**1002-3682(2023)04-0330-11

doi: 10.12362/j.issn.1002-3682.20230219001

引用格式：徐元芹, 李萍, 高伟, 等, 2023. 南黄海中部泥质区黏性土的微结构特征及其成因分析[J]. 海岸工程, 42(4): 330-340. XU Y Q, LI P, GAO W, et al, 2023. Microstructure features and their genetic analysis of cohesive soil in the muddy area of the central South Yellow Sea[J]. Coastal Engineering, 42(4): 330-340.

土体微结构是指结构单元体（由矿物颗粒集合体组成）之间的相互联系、相互作用的方式和秩序，包括结构单元体的大小、形状、排列组合方式及其结构连接状况。微结构是确定土体工程性质的一个重要因素，早在 20 世纪 20 年代，Terzaghi（1925）指出在评价黏性土的工程性质时，考虑其微结构很有必要。微结构一方面反映了土体的形成条件——沉积环境，另一方面又是决定土体物理、力学及声学等性质的重要因素，可为土体工程性质的评价提供直接证据（卢博等, 2002）。因此，在黏性土工程性质的评价体系中，对其微结构的研究具有重要的理论和实践意义。

海洋黏性土是特殊类型的海底沉积物，其具有含水率高、压缩性大、抗剪强度低等特征，属不良地基土，对海洋开发的安全性有着重大的影响。海洋黏性土在我国近海广泛分布，尤其是经济高度发达、近海工程建设比较密集的地区。研究海洋黏性土的微结构，并深入探讨其成因机制，是揭示其工程性状的重要途径。本文以南黄海中部泥质区的黏性土为研究对象，划分黏性土的微结构类型，并从地形特征、物质来源、水动力条件、沉积速率等宏观因素，以及粒度成分、矿物组成、化学成分等微观因素进行微结构成因分析，探讨各个因素对黏性土微结构的影响机制。研

收稿日期：2023-02-19
资助项目：中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目（GY0213G04）；中国科学院海洋地质与环境重点实验室开放基金项目（MGE2013KG06）
作者简介：徐元芹（1982—），女，高级工程师，博士，主要从事工程地质与灾害地质方面研究.
E-mail: xuyuanqin03@126.com

（陈 靖 编辑）

究成果揭示了南黄海中部泥质区黏性土宏观工程性质的微观机理，加深了对海洋沉积物工程性状的认识。研究成果可为该海域油气开发、海上钻井平台建设、海底电缆管线铺设等各类海洋工程的开发提供理论基础和应用指导。

1　样品与方法

本文研究所用的重力柱样品来源于国家海洋勘测专项——灾害地质环境与评价项目(HY126-04-04)调查航次，于 1998 年 9 月取自南黄海中部泥质区(图 1)。每根柱状样选取 1～2 个典型样品，在中国地质大学(北京)扫描电镜实验室利用日本日立公司生产的 HITACHIS-450 型扫描电镜完成微结构实验。为减少样品扰动，搬运过程尽量轻搬轻放。样品从海底取至甲板，尽快封存，并存放于 4 ℃ 冷库，避免脱水。样品运回实验室后，尽快开展测试。实验过程中选取柱状样中心样品，利用钢丝锯取样，样品在 35 ℃ 下烘样 15 d。待样品干燥后，将其掰开，用砂纸将新鲜面磨平，每个土样取 4～5 个子样，放入扫描电镜的样品室内，选择典型区域，放大至 30～6 000 倍，观察矿物颗粒、团聚体等的结构特征，拍摄具有代表性的微结构图像。

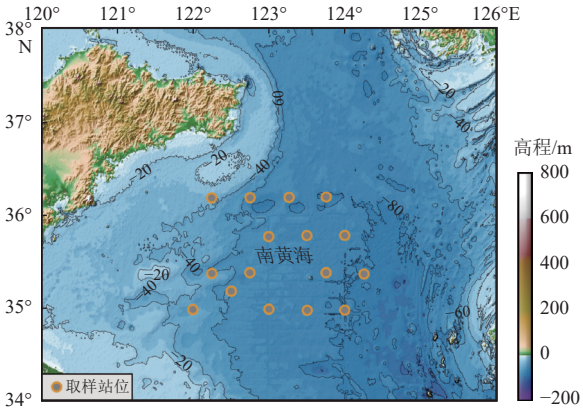


图 1　研究区域及取样站位

Fig. 1　Locations of the study area and the sampling stations

2　微结构分类依据

Gao(1984)和高国瑞(1984, 1985, 1986)对我国海洋沉积物的微结构特征做了大量研究，根据颗粒形态、孔隙特征、胶结和链接类型之间的关系对我国海洋沉积物的微结构类型进行了划分，并对不同微结构类型沉积物的工程性质作出了评价(表 1)。本文根据该方案分析了黏性土微结构。

表 1　南黄海中部黏性土的微结构分类

Table 1　Microstructure classification of the cohesive soils in the central South Yellow Sea

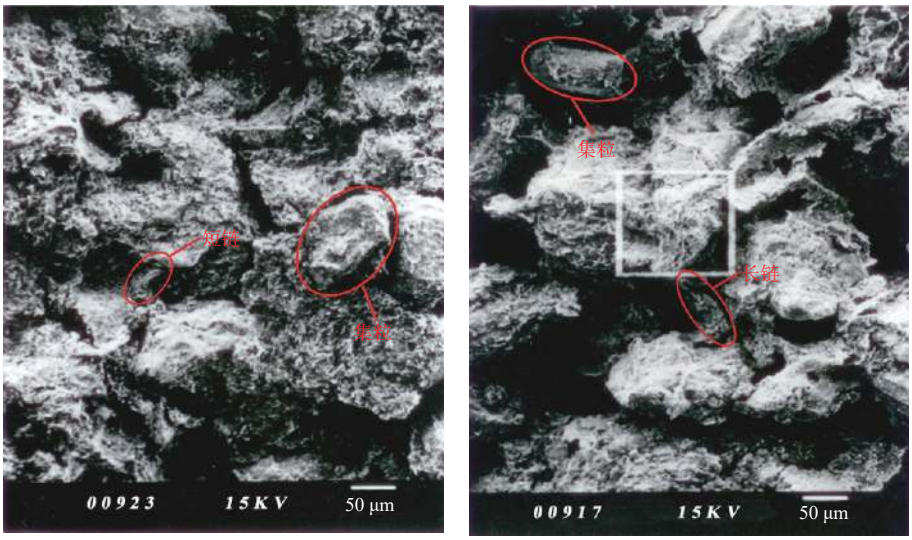
颗粒形态		颗粒连接		结构类型	结构亚类
集粒或粉粒		胶结	盐晶	粒状胶结结构	粒状盐晶胶结结构
			黏土		粒状黏土胶结结构
		链接	长链	粒状链接结构	粒状长链链接结构
			短链		粒状短链链接结构
絮凝体	致密	链接	长链	絮状链接结构	致密絮状长链链接结构
			短链		致密絮状短链链接结构
	开放		长链		开放絮状长链链接结构
			短链		开放絮状短链链接结构
黏土基质	致密	无链		黏土基质结构	黏土定向基质结构
	开放				黏土开放基质结构

注：数据来源于高国瑞(1984)。

3 南黄海中部黏性土的微结构特征

对南黄海中部泥质区 27 张黏性土微结构图片的分析发现，该区黏性土具有粒状链接结构、絮状链接结构、黏土基质结构三种微结构类型，并以黏土基质结构为主。

1)粒状链接结构(图 2)：骨架颗粒为粉粒或集粒，颗粒之间部分接触，部分不接触，粒间由黏土片或黏土畴组成的链连接起来，是粒间孔隙较大的结构。颗粒排列堆垒较为致密、连接链较短的为粒状短链链接结构(图 2a)；排列较为疏松、连接链较细长的为粒状长链链接结构(图 2b)(杨位洸等, 1995)。具有该结构类型的黏性土，粉粒含量相对较高，粉粒大小、形状不一，排列不规则，粒间由少量黏土填充，孔隙相对较小，结构相对致密。沉积物表现为强度中偏低，压缩性中偏高，孔隙度中等。研究区东侧沉积物相对南黄海泥质区中心沉积物粒度偏粗，具有该结构类型。



(a) 粒状短链链接结构 (b) 粒状长链链接结构

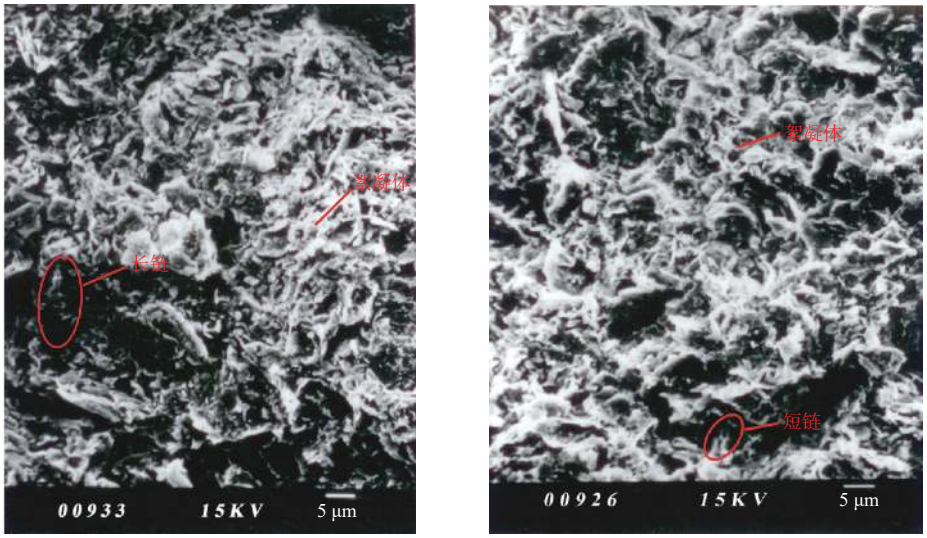
注：图内下方第 1 组数据为粒状短链链接结构序号，第 2 组为粒状长链链接结构电压；图片放大倍数为 150 倍。

图 2 南黄海中部黏性土粒状链接结构

Fig. 2 Granular bonded structure of the cohesive soils in the central South Yellow Sea

2)絮状链接结构(图 3)：具有该结构类型的黏性土主要是在静水环境下形成的，骨架为絮凝体，絮凝体之间有一定的间隙，由黏土片或黏土畴将絮凝体连接在一起，絮凝体内和絮凝体之间多孔，结构比较疏松。根据扫描电镜图片分析，研究区黏性土主要为开放絮状长链结构(图 3a)和开放絮状短链结构(图 3b)。具有该结构类型的黏性土，黏粒组分含量相对较高，易与海水发生絮凝作用，粒间孔隙发育，结构较为疏松。研究区西侧南黄海泥质区中心的沉积物粒度偏细，具有该结构类型，土体抵抗变形的能力较弱，压缩性较大，孔隙度较高。

3)黏土基质结构(图 4)：基质由大小不等、形状各异的黏土片或黏土畴构成。孔隙非常发育，无定向性，其大小、形状变化多端，排列比较疏松的称为开放黏土基质结构，排列较为紧密的称为黏土定向基质结构。黏土基质结构是研究区黏性土主要的微结构类型。具有该结构类型的黏性土，黏粒含量极高，粒间孔隙非常发育，结构极为疏松，沉积物强度极低，压缩性极大。研究区西侧南黄海泥质区中心沉积物粒度极细，具有该结构类型。

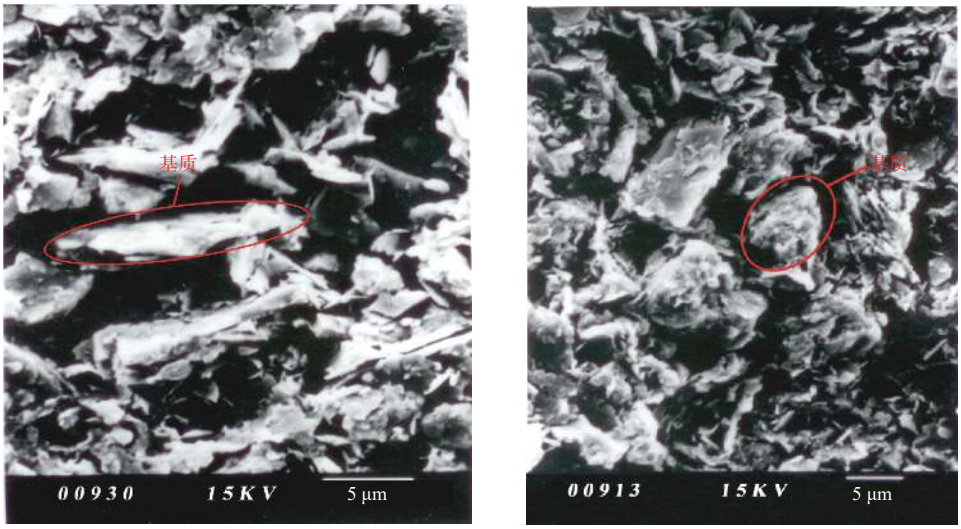


(a) 开放絮状长链结构　　(b) 开放絮状短链结构

注：图内下方第 1 组数据为序号，第 2 组为电压；图片放大倍数为 1 000 倍。

图 3　南黄海中部黏性土絮状链接结构

Fig. 3　Flocculent bonded structure of the cohesive soils in the central South Yellow Sea



(a) 开放黏土基质结构　　(b) 黏土定向基质结构

注：图内下方第 1 组数据为序号，第 2 组为电压；图片放大倍数为 3 000 倍。

图 4　南黄海中部黏土基质结构

Fig. 4　Clay matrix structure of the cohesive soils in the central South Yellow Sea

4　黏性土微结构特征的成因分析

沉积物的微结构与其沉积环境、沉积历史以及物质来源等因素关系密切。在分析沉积物微结构特征的同时，若能很好地了解其形成过程中的沉积环境和水动力条件等因素，将对沉积物工程性质的形成有更深入的认识，这对工程建设方案的选取有着重要的指导意义(吴燕开等, 2003)。本文

分别从地形特征、物质来源、水动力条件、沉积速率等宏观因素，以及粒度成分、矿物组成、化学成分等微观因素对黏性土微结构的成因进行分析，探讨各个因素对黏性土微结构的影响机制。

4.1 宏观因素

4.1.1 海底地形特征

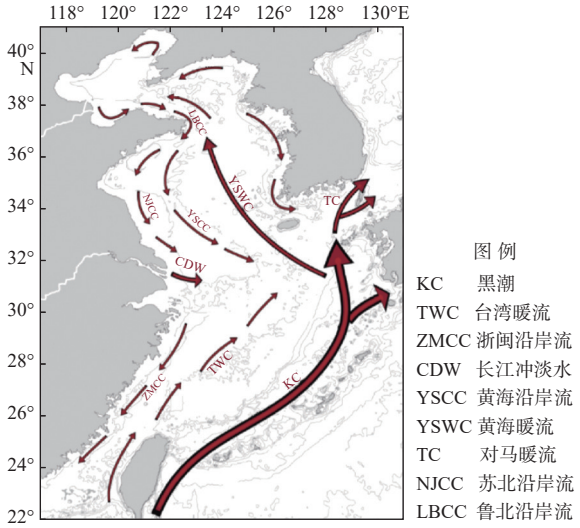
不同地形特征的区域，海洋动力条件存在一定的差异，从而对入海沉积物的搬运和沉积产生影响；海底地形还对入海物质的扩散起着重要的控制作用，进而对沉积物的微结构产生直接影响。南黄海中部为平原区，水深较大，海底地势由东西两侧向中部倾斜，是南黄海海底地势最平坦低洼的区域(蓝先洪等, 2000)。研究区离陆较远，水域开阔，水体与外海交换通畅，能够扩散至此的沉积物以黏土颗粒为主，水动力较弱，沉积环境稳定，沉积物沉积后不易再悬浮，所以沉积物主要为含水量极高的淤泥，微结构以孔隙极为发育、结构极为疏松的黏土基质结构为主。

4.1.2 物质来源

海洋沉积物的来源以陆表径流携带的物质为主。不同流域的地质背景、母岩类型、气候条件不同，从而导致风化作用类型和风化后的产物不同，这些风化物质进入河流后，粗颗粒物质大多沿途沉淀下来，细颗粒物质被携带入海沉积下来。在细颗粒物质的搬运过程中，河流径流量和输沙量对其起着重要的控制作用。对于黄河、长江及朝鲜半岛入海河流搬运的陆源物质如何影响南黄海中部泥质区的沉积作用，大量的研究得出黄河、长江和朝鲜半岛来源的物质对南黄海不同区域影响作用不同的结论(秦蕴珊等, 1989; 蓝先洪等, 2000, 2007, 2009)。本文认为研究区以现代黄河和老黄河搬运的物质为主，其成分继承了黄河源物质的特征，但由于经历了现代黄河的长途搬运和老黄河物质的再悬浮搬运，沉积物以细颗粒为主，且蒙脱石含量较高，使得研究区黏性土微结构以絮凝体和黏土片(或黏土畴)等孔隙含量较高的骨架为主。

4.1.3 水动力条件

海洋水动力条件影响着沉积物的扩散、沉积，还能使沉积后的物质发生再悬浮和再搬运，水动力条件的强弱还影响着沉积物的搬运距离和泥沙颗粒的分布等，从而对沉积物的微结构产生一定的影响。水动力条件对南黄海中部泥质区沉积物分布的控制作用主要由黄海沿岸流和黄海暖流产生(图 5)。黄海沿岸流携带的现代黄河物质的运移范围东部大体以黄海暖流或黄海槽为界，南部约到达 35°N，外海区约至南黄海中部泥质区的南界(吴鹏, 2007)，并与黄海暖流携带来的物质发生不同程度的重合(尹秀珍等, 2007)。苏北老黄河物质由于受黄海沿岸流和潮流的影响侵蚀强烈，在沿岸流作用下向东南搬运，在长江口附近受台湾暖流、长江冲淡水及冬季浙闽沿岸流的顶托改道向东北搬运(蓝先洪等, 2005)。黄海暖流在其运移过程中，与黄海沿岸流互相作用产生了一系列涡旋(毛汉礼, 1986)，在南黄海中央海域底层的水团则为著名的“黄海冷水团”(申顺喜等, 1993)。南黄海中部是弱潮流区，其环流只能影响大于 4Φ



注：本图改绘自李广雪等(2005)。

图 5 渤、黄、东海流系分布

Fig. 5 Map of ocean current system in the Bohai Sea, the Yellow Sea, and the East China Sea

的细粒悬浮物质(申顺喜等, 1996)，所以该区域的沉积物粒度较细，主要为泥质沉积物，且饱水，含水率极高(申顺喜等，1993)。此外，该冷水团底层水的年平均温度低于 8 ℃(24 a 平均值)(徐刚等, 2010)，底质沉积物的 Eh 平均值介于−30～−150 mV，表明研究区为还原环境(石学法等, 2001)，从而使得沉积物呈现灰绿色，富含自生黄铁矿(王琦等, 1981; 秦蕴珊等, 1989)。大量自生黄铁矿的出现，代表沉积物中富含有机质(秦蕴珊等, 1992)，而有机质的存在对沉积物的结构强度起到了弱化作用。

4.1.4　沉积速率

沉积速率是海洋沉积学的一个重要指标(胡邦琦等, 2011)，它是沉积物物质来源、水动力条件、搬运距离、沉积盆地地形特征等多项因素综合配置的结果，研究沉积速率更能直接反映沉积物微结构的成因特征。南黄海中部大部分地区近百年来的沉积速率较低，普遍小于 0.2 cm/a(李凤业等, 2002)，表明研究区的物质供应较少，且处于低能环境(胡邦琦等, 2011)。该沉积速率低值区与南黄海冷涡的位置相重合，沉积速率的分布特征较好地指示了南黄海中部泥质区沉积物的扩散格局和沉积模式。

4.2　微观因素

海洋黏性土多为饱和土体，主要由土颗粒和水组成。其中，土颗粒是组成主体，在与水的相互作用时占主导地位，水则充填于黏性土内部的孔隙之间，含有多种溶液组分，对沉积物的结构也会产生影响。在研究沉积物的物质组成对微结构特征的影响时，一般从粒度成分、矿物组成和化学成分三个方面来考虑(冯蕾, 2009)。

4.2.1　粒度成分

粒度成分对沉积物的成因、沉积环境、物源供应及自然地理条件等具有很好的指示作用，这些因素影响着沉积物的微结构特征(张宏等, 2007)。颗粒越细，与水的作用越强烈。随着沉积物的粒径由大变小，其工程性质由无黏性、无塑性逐渐变至具有较大的黏性和塑性，以及吸水膨胀性等一系列特殊性质。南黄海中部泥质区黏性土以粉粒和黏粒为主，黏粒含量较高(表 2)，使得研究区黏性土的结构主要以黏土絮凝体、黏土片或黏土畴为骨架，由于黏土颗粒的吸水膨胀特征，骨架颗粒之间孔隙极为发育。

表 2　不同类型黏性土的粒度组分质量分数

Table 2　Contents of grain size compositions in different cohesive soils Grain size distribution of different types of cohesive soil

黏性土类型	砂粒		粉粒		黏粒	
	范围/%	平均值/%	范围/%	平均值/%	范围/%	平均值/%
淤泥	0.00～9.00	1.31	0.71～74.30	39.39	24.40～91.40	58.69
淤泥质黏土	0.00～16.00	3.41	3.07～78.30	54.24	19.60～80.68	41.72
黏土	0.70～23.00	8.17	52.90～64.20	58.13	19.70～46.30	33.70

注：土体分类参照《海洋调查规范: 第 11 部分　海洋工程地质调查》(国家海洋标准计量中心, 2007)。

4.2.2　化学成分

海洋沉积物是由固相和液相(含有多种溶解物质)所组成的复杂多相体系，其化学成分是指固相和液相中的化学元素、化合物的种类及它们之间的相对含量(冯蕾, 2009)。南黄海中部泥质区黏性土的固相化学成分以 SiO_2、Al_2O_3、Fe_2O_3、CaO 和 $CaCO_3$ 为主，另有少量的 MgO、K_2O 和 Na_2O 等(表 3)。

高岭石的特征是 Al_2O_3 含量高，伊利石的特征是 K_2O 含量较高，蒙脱石类和蛭石类矿物的含量可依 MgO 的含量来判断(唐大雄等, 1999)。根据沉积物中的固相化学成分可以预测南黄海中部黏性土中高岭土、伊利石和蒙脱石等典型黏土矿物含量较高(Millogo et al, 2008)，尤其是蒙脱石类黏土矿物，其与水作用强烈，能够在土粒外围形成很厚的水化膜。沉积物中只要有少量蒙脱石存在，就能使其含水量极大提高，结构变得极为疏松。

表 3 南黄海中部黏性土的主要化学成分质量分数

Table 3 The main chemical compositions of the cohesive soils in the central South Yellow Sea

化学成分	范围/%	平均值/%
SiO_2	53.19～72.28	60.03
Al_2O_3	8.66～18.00	13.06
Fe_2O_3	2.75～6.86	5.12
CaO	0.09～2.50	1.05
MgO	1.36～3.23	2.38
K_2O	1.74～3.64	2.92
Na_2O	2.02～3.38	2.64
$CaCO_3$	0.70～3.14	1.66

液相化学成分主要是指易溶盐、中溶盐，它们是溶液的主要成分，以离子形式存在，一部分与黏粒表面的电荷相作用成为反离子层的组成部分，另一部分离子进入黏粒土的扩散层(郑志昌等, 2004)。可溶盐类对沉积物微结构的影响在于其存在能够削弱土的粒间联结，使得粒间孔隙增大、土体结构松散。

4.2.3 矿物组成

沉积物中的矿物包括原生矿物、次生矿物和有机质。原生矿物颗粒较大，物理、化学性质稳定，亲水性弱或较弱，对研究区黏性土的微结构影响较小。次生矿物主要为黏土矿物，其与有机质的含量和组成对黏性土的微结构有重要控制作用。

黏土矿物主要包括高岭石、伊利石、绿泥石和蒙脱石。高岭石易形成较粗的黏土颗粒，其亲水性较弱；蒙脱石易形成较细的黏土颗粒，亲水能力较强，遇水极度膨胀；伊利石和绿泥石介于两者之间(Millogo et al, 2008)，这 4 种黏土矿物是海洋黏性土的主要组分。沉积物中所含黏土矿物的种类及含量对微结构有很大的影响，少量蒙脱石、伊利石类黏土矿物就可使其结构变得极为疏松，土体强度降低＞50%(徐元芹等, 2010)。研究区黏性土中伊利石、绿泥石和蒙脱石等亲水性较强的矿物含量较高(表 4)，使得该区黏性土含水量极高(最高达 153.03%)，形成的微结构孔隙非常发育，结构非常疏松。

有机质能够吸收水分而使黏土颗粒聚集形成开放结构(吴鹏, 2007)，比黏土矿物有更强的胶体特性和更高的亲水性，对土的微结构形态的影响甚至比蒙脱石还大(孔令伟等, 2002)。当沉积物中含有 1%～2% 的有机质时，就会使土的分散性加大(李丽华等, 2009)，孔隙度增大，强度降低(牟春梅等, 2008; 吕岩等, 2011)。研究区黏性土中有机质的平均质量分数为 1.35%，其存在对黏性土的结构强度起到了削弱作用。

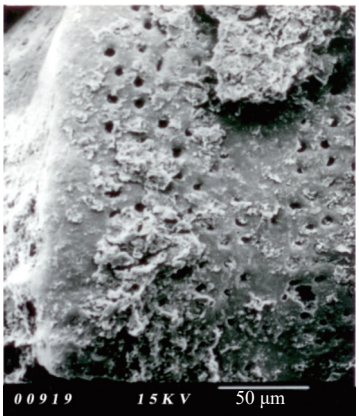
通过扫描电镜实验还发现沉积物中存在硅藻(图 6)，其具有密度小、多孔、结构松散、比表面积大和吸附性强(吸水率为 75%～120%)等特点(高华喜等, 2007)，它也直接影响了沉积物的含水率、孔隙度、压缩性等性质。

表 4　南黄海中部黏性土的矿物质量分数

Table 4　Mineral compositions of the cohesive soils in the central South Yellow Sea

黏土矿物	范围/%	平均值/%
伊利石	48.01～75.06	60.99
绿泥石	9.85～22.87	17.06
高岭石	9.19～18.13	13.94
蒙脱石	3.70～16.78	8.00
有机质	0.07～3.09	1.35

注：沉积物中的有机质含量为 TOC 分析仪法获得的有机碳含量乘以系数 1.724(总有机质转化系数)，该方法是目前准确度和精密度较高的有机质测量方法(钱宝等, 2011)。



注：图内下方第 1 组数据为序号，第 2 组为电压；图片放大倍数为 6 000 倍。

图 6　硅藻扫描电子显微镜照片

Fig. 6　A scanning electron microscope photograph of diatom

5　结　论

本文通过对南黄海中部泥质区 27 张黏性土微结构图片的分析，划分了该区黏性土的微结构类型，并探讨了地形特征、物质来源、矿物组成、化学成分等宏观和微观因素对黏性土微结构的影响机制，得出了如下结论。

1)南黄海中部泥质区黏性土具有粒状链接结构、絮状链接结构和黏土基质结构三种微结构类型，以黏土基质结构为主，具有这种结构的黏性土骨架由大小不等、形状各异的黏土片或黏土畴构成，孔隙非常发育，土体结构疏松。

2)微结构成因的宏观因素分析表明，南黄海中部泥质区离陆较远、水深较大、地势低洼平坦，加之该区水动力条件较弱为还原环境，现代黄河、老黄河和少量长江来源的物质能够扩散至此的以极细的黏粒物质为主，沉积速率较低，使得该区黏性土的骨架颗粒以黏土片或黏土畴为主。

3)微结构成因的微观因素分析表明，南黄海中部泥质区沉积物的黏粒含量极高，黏性土中伊利石、绿泥石和蒙脱石等亲水性较强的矿物及有机质含量较高，使得该区黏性土易吸水膨胀，孔隙发育，形成以黏土基质结构为主的松散结构。

参考文献 (References):

冯蕾, 2009. 垃圾填埋场替代衬垫研究[D]. 兰州: 兰州大学. FENG L, 2009. Research on alternative liner in lanfill[D]. Lanzhou: Lanzhou University.

高国瑞, 1984. 中国海洋土微结构特征[J]. 工程勘察, 12(4): 32-36. GAO G R, 1984. The microstructural characteristics of China's marine soil[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 12(4): 32-36.

高国瑞, 1985. 微结构分析在滨海软土地基勘察中的初步应用[J]. 勘察科学技术, (2): 14-19. GAO G R, 1985. Preliminary application of microstructure analysis in investigating the littoral soft soil foundation[J]. Site Investigation Science and Technology, (2): 14-19.

高国瑞, 1986. 中国近海海相沉积物的物质成分、微结构及与工程性质的关系[J]. 海洋学报, 8(5): 581-589. GAO G R, 1986. Material composition, microstructure and their relationship with engineering properties of marine soils in Chi-

na[J]. Haiyang Xuebao, 8(5): 581-589.

高华喜, 殷坤龙, 周春梅, 2007. 硅藻土滑坡稳定性分析及其时间预报[J]. 西北大学学报(自然科学版), 37(1): 127-130. GAO H X, YIN K L, ZHOU C M, 2007. Diatomite landslides stability analysis and time forecast[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 37(1): 127-130.

国家海洋标准计量中心, 2007. 海洋调查规范: 第11部分 海洋工程地质调查: GB/T 12763.11—2007[S]. 北京: 中国标准出版社. General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China, 2007. Specifications for oceanographic survey: part 11 marine engineering geological investigation: GB/T 13763.11—2007[S]. Beijing: Standards Press of China.

胡邦琦, 李国刚, 李军, 等, 2011. 黄海、渤海铅-210沉积速率的分布特征及其影响因素[J]. 海洋学报, 33(6): 125-133. HU B Q, LI G G, LI J, et al, 2011. Spatial variability of the 210Pb sedimentation rates in the Bohai and Huanghai Seas and its influencing factors[J]. Haiyang Xuebao, 33(6): 125-133.

孔令伟, 吕海波, 汪稔, 等, 2002. 湛江海域结构性海洋土的工程特性及其微观机制[J]. 水利学报, 33(9): 82-88. KONG L W, LÜ H B, WANG R, et al, 2002. Engineering properties and micro-mechanism of structural marine soil in Zhanjiang sea area[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 33(9): 82-88.

蓝先洪, 申顺喜, 2000. 南黄海中部沉积岩芯的地球化学特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 20(2): 3-38. LAN X H, SHEN S X, 2000. Geochemical characteristics of sediment cores from the central South Yellow Sea[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 20(2): 3-38.

蓝先洪, 张训华, 张志珣, 2005. 南黄海沉积物的物质来源及运移研究[J]. 海洋湖沼通报, (4): 53-60. LAN X H, ZHANG X H, ZHANG Z X, 2005. Material sources and transportation of sediments in the Southern Yellow Sea[J]. Transaction of Oceanology and Limnology, (4): 53-60.

蓝先洪, 王红霞, 李日辉, 等, 2007. 南黄海沉积物常量元素组成与物源分析[J]. 地学前缘, 14(4): 197-203. LAN X H, WANG H X, LI R H, et al, 2007. Major elements composition and provenance analysis in the sediments of the South Yellow Sea[J]. Earth Science Frontiers, 14(4): 197-203.

蓝先洪, 张宪军, 赵广涛, 等, 2009. 南黄海NT1孔沉积物稀土元素组成与物源判别[J]. 地球化学, 38(2): 123-132. LAN X H, ZHANG X J, ZHAO G T, et al, 2009. Distributions of rare earth elements in sediments from Core NT1 of the South Yellow Sea and their provenance discrimination[J]. Geochimica, 38(2): 123-132.

李凤业, 高抒, 贾建军, 等, 2002. 黄、渤海泥质沉积区现代沉积速[J]. 海洋与湖沼, 33(4): 364-369. LI F Y, GAO S, JIA J J, et al, 2002. Contemporary deposition rates of fine-grained sediment in the Bohai and Yellow Seas[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 33(4): 364-369.

李广雪, 杨子庚, 刘勇, 等, 2005. 中国东部海域海底沉积环境成因研究[M]. 北京: 科学出版社. LI G X, YANG Z G, LIU Y, et al, 2005. The cause of seafloor sedimentary environment of the East China Sea[M]. Beijing: Science Press.

李丽华, 陈轮, 高盛焱, 2009. 三江平原沼泽土微观特性试验研究[J]. 岩土力学, 30(8): 2295-2299. LI L H, CHEN L, GAO S Y, 2009. Study of microstructure properties of swamp soil in Sanjiang Plain[J]. Rock and Soil Mechanics, 30(8): 2295-2299.

卢博, 李传荣, 2002. 珠江口外海沉积物(原状样)微结构特征及其物理性质[J]. 海洋学报, 24(2): 94-100. LU B, LI C R, 2002. Microstructure features of sediment and its physical characteristics in off-sea of the Zhujiang River Mouth[J]. Haiyang Xuebao, 24(2): 94-100.

吕岩, 佴磊, 徐燕, 等, 2011. 有机质对草炭土物理力学性质影响的机理分析[J]. 岩土工程学报, 33(4): 655-660. LÜ Y, ER L, XU Y, et al, 2011. The mechanism of organic matter effect on physical and mechanical properties of turfy soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 33(4): 655-660.

毛汉礼, 1986. 东海北部的一个气旋型涡旋[J]. 海洋科学集刊, 27: 23-31. MAO H L, 1986. A cyclone in the north of the East China Sea[J]. Studia Marina Sinica, 27: 23-31.

牟春梅, 李佰锋, 2008. 有机质含量对软土力学性质影响效应分析[J]. 水文地质工程地质, 35(3): 42-46. MU C M, LI B F, 2008. Influence of organic matter on mechanical character of soft soil[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 35(3): 42-46.

钱宝, 刘凌, 肖潇, 2011. 土壤有机质测定方法对比分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 39(1): 34-38. QIAN B, LIU L, XIAO X, 2011. Comparative tests on different methods for content of soil organic matter[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 39(1): 34-38.

秦蕴珊, 赵一阳, 陈丽蓉, 等, 1989. 黄海地质[M]. 北京: 海洋出版社. QIN Y S, ZHAO Y Y, CHEN L R, et al, 1989. The Yellow Sea Geology[M]. Beijing: China Ocean Press.

秦蕴珊, 赵一阳, 陈丽蓉, 等, 1992. 东海地质[M]. 北京: 地质出版社. QIN Y S, ZHAO Y Y, CHEN L R, et al, 1992. The East China Sea Geology[M]. Beijing: Geology Press.

申顺喜, 陈丽蓉, 高良, 等, 1993. 南黄海冷涡沉积和通道沉积的发现[J]. 海洋与湖沼, 24(6): 563-570. SHEN S X, CHEN L R, GAO L, et al, 1993. Discovery of holocene cyclonic eddy sediment and pathway sediment in the Southern Yellow Sea[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 24(6): 563-570.

申顺喜, 李安春, 袁巍, 1996. 南黄海中部的低能沉积环境[J]. 海洋与湖沼, 27(5): 518-523. SHEN S X, LI A C, YUAN W, 1996. Low energy environment of the central South Yellow Sea[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 27(5): 518-523.

石学法, 申顺喜, YI H, 等, 2001. 南黄海现代沉积环境及动力沉积体系[J]. 科学通报简报, 46(增刊1): 1-6. SHI X F, SHEN S X, YI H, et al, 2001. Modern sedimentary environment and dynamic deposit system[J]. Chinese Science Bulletin, 46(Suppl.1): 1-6.

唐大雄, 刘佑荣, 张文殊, 等, 1999. 工程岩土学[M]. 2版. 北京: 地质出版社. TANG D X, LIU Y R, ZHANG W S, et al, 1999. Science of engineering rock and soil[M]. 2nd ed. Beijing: Geology Press.

王琦, 杨作升, 1981. 黄海南部表层沉积中的自生黄铁矿[J]. 海洋与湖沼, 12(1): 25-32. WANG Q, YANG Z S, 1981. Authigenic pyrite in the surface sediments of the Southern Huanghai Sea[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 12(1): 25-32.

吴鹏, 2007. 东、黄海典型海域初级生产力和氮、磷营养要素的近代沉积记录[D]. 青岛: 中国海洋大学. WU P, 2007. Recent sedimentary records of primary production and nutrients in the typical areas of the East China Sea and the Yellow Sea[D]. Qingdao: Ocean University of China.

吴燕开, 刘松玉, 洪振舜, 2003. 土层工程性质与其沉积环境关系分析研究[J]. 工程地质学报, 12(3): 263-267. WU Y K, LIU S Y, HONG Z S, 2003. The relationship between the geotechnical properties and the deposited environment for the soil[J]. Journal of Engineering Geology, 12(3): 263-267.

徐刚, 刘健, 孔祥淮, 等, 2010. 南黄海中部泥质沉积成因和物源研究综述[J]. 海洋地质动态, 26(2): 8-12. XU G, LIU J, KONG X H, et al, 2010. Sedimentary origin and provenance of the muddy deposition in the central South Yellow Sea[J]. Marine Geology Letter, 26(2): 8-12.

徐元芹, 李萍, 李培英, 等, 2010. 闽浙沿岸沉积物的工程地质特性及其成因简析[J]. 海洋学报, 32(1): 107-113. XU Y Q, LI P, LI P Y, et al, 2010. Geotechnical properties of sediments from the Fujian-Zhejiang coastal area and their cause brief analysis[J]. Haiyang Xuebao, 32(1): 107-113.

杨位洸, 温耀霖, 卢博, 1995. 珠江口外浅海区底质的工程性质研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 23(1): 135-143. YANG W G, WEN Y L, LU B, 1995. Investigations on the engineering properties of marine sediment in the sea area off the Pearl River Mouth[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 23(1): 135-143.

尹秀珍, 刘万洙, 蓝先洪, 等, 2007. 南黄海表层沉积物的碎屑矿物、地球化学特征及物源分析[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 37(3): 491-499. YIN X Z, LIU W Z, LAN X H, et al, 2007. Detrital minerals and geochemistry of the surface soft sediments and their provenance, South Yellow Sea, China[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 37(3): 491-499.

张宏, 柳艳华, 杜东菊, 2007. 渤海湾西岸沉积物粒度参数特征及其工程性质分析[J]. 天津城市建设学院学报, 13(2): 104-110. ZHANG H, LIU Y H, DU D J, 2007. Analysis of characters of granularity parameters and engineering properties of sediments in western coast of Bohai Bay[J]. Journal of Tianjin Institute of Urban Construction, 13(2): 104-110.

郑志昌, 陈俊仁, 朱照宇, 2004. 南海海底土体物理力学特征及其地质环境初步研究[J]. 水文地质工程地质, 31(4): 50-65.
ZHENG Z C, CHEN J R, ZHU Z Y, 2004. Physical and mechanical characteristics of seabed soils and its geological environment in South China Sea[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 31(4): 50-65.

GAO G R, 1984. Microstructure of marine soils in China and their engineering properties[J]. Scientia Sinica (Series B), XXⅦ(11): 1203-1212.

MILLOGO Y, TRAORE K, OUEDRAOGO R, et al, 2008. Geotechnical, mechanical, chemical and mineralogical characterization of a lateritic gravels of Sapouy (Burkina Faso) used in road construction[J]. Construction and Building Materials, 22(2): 70-76.

TERZAGHI K, 1925. Principles of soil mechanics: Ⅳ settlement and consolidation of clay[J]. Engineering News-Record, 95(3): 874-878.

Microstructure Features and Their Genetic Analysis of Cohesive Soil in the Muddy Area of the Central South Yellow Sea

XU Yuanqin[1,2,3], LI Ping[1,2,3], GAO Wei[1,2,3], LIU Jie[1,2,3]

（1. *First Institute of Oceanography*, *MNR*, Qingdao 266061, China；
2. *Key Laboratory of Marine Geology and Metallogeny*, *MNR*, Qingdao 266061, China；
3. *Laboratory of Marine Geological Processes and Environmental Functions*, *Laoshan Laboratory*, Qingdao 266237, China）

Abstract: According to the analysis of 27 microstructure pictures, we found that the cohesive soil in the central South Yellow Sea has three microstructure types: granular link-bond structure, flocculent link-bond structure, and clay matrix structure. The cohesive soil in the study area is mainly of clay matrix structure which has well developed pore and loose structure. The factors that lead to the loose microstructure feature of the cohesive soil have been analyzed for macroscopic aspects (topographic features, sediment source, hydrodynamic environment, deposition rate) and microscopic aspects (grain size distribution, mineral component, chemical composition), the analytical results revealed that flat seabed terrain, weak hydrodynamic conditions, long transportation distance cause this area has small sediment source and low deposition rate, consequently the deposition substances is mainly of silt and clay particles. The content of illite, chlorite, montmorillonite and organic matter is abundant in the cohesive soil, their hydrophilic characteristics make the cohesive soil in this area swell, thus formed the clay matrix structure with well developed pore and poor structure. The results revealed the microscopic mechanism of the macroscopic engineering properties of the cohesive soil in the muddy area of the central South Yellow Sea and deepen the understanding of the engineering properties of marine sediments.

Key words: the muddy area of the central South Yellow Sea；cohesive soil；microstructure features；genetic analysis

Received: February 19, 2023