

# 基于电性变化进行黄河水下三角洲饱和粉土触变过程研究

郭秀军<sup>1</sup>, 贾永刚<sup>1</sup>, 黄潇雨<sup>2</sup>

(1. 中国海洋大学 环境科学与工程学院, 山东 青岛 266003; 2. 中国海洋大学 高等职业技术学院, 山东 青岛 266003)

**摘要:** 为了研究黄河水下三角洲饱和粉土触变过程特性及探索进行粉土特性研究的新型原位试验手段, 在黄河口潮坪区不同位置沿深度方向取 50 cm 长土样; 现场测试了垂向振动作用和外力停止后恢复过程不同深度区间, 土样电阻率随时间的变化。基于对该地区饱和粉土电性影响因素分析, 研究了垂向作用下粉土体触变过程中土体变化的时空规律。垂向振动作用过程中, 粉土体沿深度方向发生分层变化, 上部土体变软直至流体状态从而导致电阻率降低, 下部土体密实度增加从而导致电阻率增大, 达到一定的振动次数后电阻率保持稳定。这些现象表明: 土体状态并不随振动的持续进行而发生连续变化。外力停止后, 测试电阻率随时间的变化特征显示土体在保持新状态一段时间(2 h)后才逐步向初始状态恢复, 恢复过程也不尽相同, 大约 6 h 后可恢复到初始状态。对试验样品的横切观测表明了所研究结果的正确性。

**关键词:** 土力学; 饱和粉土; 触变; 电阻率; 土体状态

**中图分类号:** TU 43

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2006)增 1 - 3131 - 06

## RESEARCH ON THIXOTROPY CHARACTER OF SATURATED SILT SOIL IN YELLOW RIVER DELTA WITH ELECTRICAL RESISTIVITY METHOD

GUO Xiujun<sup>1</sup>, JIA Yonggang<sup>1</sup>, HUANG Xiaoyu<sup>2</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266003, China;

2. College of Profession Education, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266003, China)

**Abstract:** On purpose of studying the thixotropy character of saturated silt in Yellow River Delta and searching a new in-situ measuring method to test the state change of silt, the electrical resistivities of different sections in some 50 cm-long silt soil samples were tested, which were sampled vertically from silt soil layer at different spots of the Yellow River estuarine area, when they were being librated vertically and after the libration stopped. On analysis of key factors influencing the resistivity variation of saturated silt, it was revealed that the state of silt soil would vary along depth with time during being librated vertically and after the libration stopped. During being librated vertically, the top section of silt soil layer will become melting until hydro-state which makes resistivity of this section decrease, while porosity of the bottom section of silt soil layer decreasing and the resistivity of this section increasing. But the resistivities of different sections would not vary with time while being continually librated vertically, which shows the state of silt soil will not vary continuously as being librated vertically. After the libration stopped, the varied silt soil will transform to the original state. Relation between resistivity and time

**收稿日期:** 2005 - 07 - 26; **修回日期:** 2005 - 10 - 24

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(40172088, 40472137)

**作者简介:** 郭秀军(1972 -), 男, 1994 年毕业于长春地质学院地球物理系地球物理专业, 现为讲师、博士研究生, 主要从事工程和环境测试技术和方法的教学与研究。E-mail: guojunqd@ouc.edu.cn

shows the varied silt soil will keep the new state for about 2 hours firstly, then transform to the original state slowly in 6 hours. The cutting picture of librated silt soil sample proves the analysis of state transform of slit soil is validity with resistivity method.

**Key words:** soil mechanics; saturated silt soil; thixotropy character; electrical resistivity; state of soil

## 1 引言

土壤电阻率包含了土壤品质和物理性质的丰富信息。从 G. Archie<sup>[1]</sup>提出非饱和土的电阻率模型以来,电阻率测试技术在确定土的结构状态、物理力学特征及其他工程地质问题方面已逐步得到应用<sup>[2~10]</sup>,但对土体结构变化过程的监测研究还不多见。

在外力作用下,其结构发生变化,强度剧烈降低,甚至发生流动;而外力停止后则随着时间的增长结构和强度逐渐恢复这一现象被称为土的触变性。砂土具有液化性,黏土具有触变性,粉土的性质则介于二者之间。现代黄河水下三角洲的表层沉积物中粉质土占 90% 以上,10 m 以浅的地层以粉土层和粉质黏土层为主<sup>[11]</sup>。D. B. Prior 等<sup>[12]</sup>和 N. Z. Lu, J. N. Suhayda<sup>[13]</sup>在分析黄河水下斜坡复活现象时,在肯定粉土的液化行为的同时更强调粉土触变行为的作用。研究动力作用下粉土的触变行为对于分析黄河三角洲粉土的失稳机制,进行地质灾害的预测和防治具有重要意义。由于粉土样品的取样和保存存在一定的难度,而配制的土样在赋存状态、结构等方面和原始样品存在较大差别,导致基于传统室内试验方法对该问题的研究虽取得了一些成果<sup>[14]</sup>,但受试验手段限制,整体的研究仍进展不大。

本文基于对该地区粉土电性特征分析,在黄河水下三角洲潮滩区不同位置、不同深度处取大量粉土样品。对典型样品进行垂向振动试验并现场测试了振动导致的触变过程中土样电阻率的变化;试图通过对电阻率变化特征分析研究动力作用下粉土体触变过程中土层变化的时空特征,为研究该地区粉土工程地质特性提供基础数据并探索适合该问题研究的新型原位测试技术。

## 2 试验研究

### 2.1 研究区的选择

根据对已取得研究成果<sup>[15~17]</sup>的分析,典型试验区选定在黄河刁口流路附近,该区域为黄河在 1964~1976 年自此入海时形成的混杂堆积体。研究

区所在潮坪上有一条为开采极浅海石油而铺设的道路沿近垂直海岸线方向延伸入海,另一条通向 106-17-14 井场(北纬 38°8'11.3, 东经 118°46'58.8")的道路与波浪传播方向近垂直,道路两侧水动力条件差异显著。现场工作时,在道路的两侧选定 10 个样点进行了取样观测。并在 2# 取样点的位置处进行了钻孔取样,以分析试验区粉土的典型物理力学性质和微观结构(见图 1)。

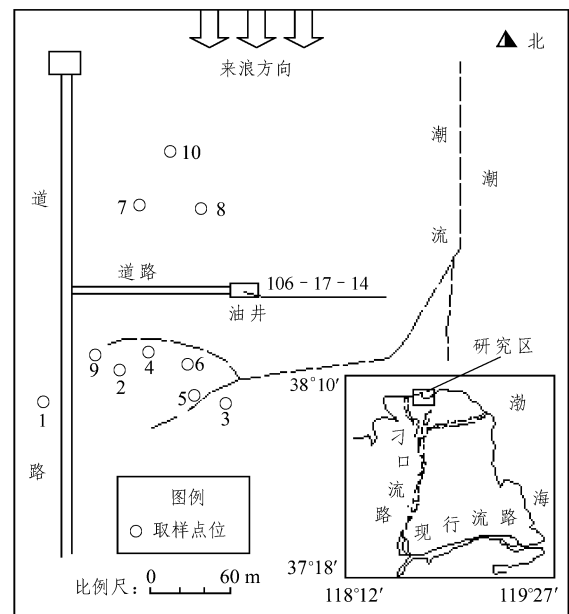


图 1 测区分布及采样点布设

Fig.1 Map of measure area and position of sampling

### 2.2 样品采集、振动试验和电阻率测定

采样取土器用长度为 500 mm、直径为 110 mm 的 PVC 管制作。在管壁上以 100 mm 间隔钻 4 个孔径为 4 mm 的孔,以便插入电极,PVC 管一端外侧 5 mm 磨成斜面,以减小阻力,便于插入土中,同时减小对土体的扰动。取样过程中使用透明胶带缠绕 PVC 管外表面,防止小孔漏水,同时增加 PVC 管的强度,防止取土及振动过程中 PVC 管破裂。取土器两端的堵头采用 110 mm 的 PVC 套管及堵头改制。

取样时将取土器上端用堵头盖好,在工作区取样点位置处竖直将取土器平稳压入土中,直至取土器全部充满,并尽量减少对土样的扰动。在取土器

周围挖坑, 将取土器挖出, 尽量避免对土样的扰动, 同时观察坑壁的土层情况, 记录取样时间。

测量电极采用截面积  $1\text{ mm}^2$ 、长  $200\text{ mm}$  的单股铜导线, 剥去绝缘外皮, 并将一端磨尖, 另一端弯成圆环, 以便于插入土样。取土器取出后, 安装电极及下端堵头, 按土样原始状态竖直放置, 静置至土样稳定。在土样两端加载  $6\text{ V}$  电源, 测量电极 1 和 2, 2 和 3, 3 和 4 间的电流、电压(见图 2)。然后在取土器下放置木板, 将取土器提起  $5\text{ cm}$ , 间隔  $5\text{ s}$  做连续自由落体运动, 模拟土体底部受连续垂向外力作用情况。如此连续振动  $250$  次, 间隔振动  $50$  次重复上述测量。振动完成后, 将取土器静置, 每隔  $15\text{ min}$  测量一次, 直至测量数值稳定。

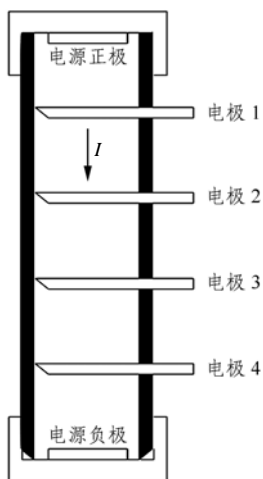


图2 取样装置示意图

Fig.2 Sketch map of sampling setting

根据测量数据, 样品不同区段的电阻率可由下式计算:

$$\rho = (\Delta U / I) S / L \quad (1)$$

式中:  $\rho$  为土样电阻率,  $\Delta U$  为不同电极间的电位差,  $I$  为供电电流强度,  $S$  为样品截面积,  $L$  为测量段的长度。  $S$  可由下式计算:

$$S = \pi D^2 / 4 \quad (2)$$

式中:  $D$  为土样的直径。

### 3 研究区粉土的物理力学特征及电性影响因素分析

土的含水率、饱和度、孔隙度、孔隙水的电阻率、土水结合状态、土的结构、土颗粒的矿物成分

被广泛认为是影响土壤电阻率的主要因素<sup>[7, 8]</sup>。为了分析影响试验区粉土电阻率变化的主要因素, 在此利用 2<sup>#</sup>位置钻孔采集的原状样品进行了微观结构观测和物理力学性质测试(见表 1, 2)。

表 1 2<sup>#</sup>位置点不同深度粉土样品 SEM 照片

Table 1 SEM photos of samples from different depths at 2<sup>#</sup>

土样编号	深度/cm	拍摄方位	SEM 照片
2-1	5	水平剖面	
2-2	25	水平剖面	
2-3	45	水平剖面	

从试验土样的粒度成分来看, 虽然不同深度位置土样的粒度组分存在差异, 但主体以细粒和黏粒为主。除表层土样外, 粒径  $<0.005\text{ mm}$  的黏粒含量可达  $15\%$ ,  $<0.001\text{ mm}$  的黏粒含量也达  $10\%$  左右。从不同深度土样的微观结构来看, 虽然不同深度位置颗粒的均匀性不同, 但主要以片板状和块状形态为主, 定向性不明显。黏粒吸附在骨架颗粒的表面并充填在颗粒孔隙之中。试验粉土的这种结构特征反映了其存在触变的可能性并决定了其电性特征。

推广的求取土样电阻率的 Archie 公式<sup>[1]</sup>为

$$\rho_0 = K \Phi^{-m} S_r^{-n} \rho_w \quad (3)$$

式中:  $\rho_0$  为土样的电阻率;  $\Phi$  为土样的孔隙率;  $S_r$  为土样的饱和度;  $\rho_w$  为孔隙水的电阻率;  $K, m, n$  均为与土性有关的参数。

原始试验样品的  $\Phi, \rho, S_{rw}$  相对稳定(见表 2), 此时影响其导电特性的主要为黏粒的含量和分布特征, 土水的结合状态, 并决定了  $K, m, n$  的取值。土样在循环垂向作用力下发生液化过程会引起不同区段土体的含水率、孔隙度、黏粒分布及土水结合

表2 试验土样的物理力学指标  
Table 2 Physico-mechanical parameters of silty soil samples

土样 编号	取土 深度 /m	粒度成分/mm									$W_s$ /%	$G_s$	$e_o$	$S_r$ /%	
		>0.25	0.25~ 0.125	0.125~ 0.063	0.063~ 0.032	0.032~ 0.016	0.016~ 0.008	0.008~ 0.004	0.004~ 0.002	0.002~ 0.001					<0.001
		0.11	4.11	20.82	45.64	13.00	4.21	1.97	2.27	1.23	6.64	26.2	2.70	0.730	97
2-1	0.25	0.33	1.13	4.24	26.21	35.21	13.04	4.83	2.87	2.10	10.04				
2-1	0.45	0.10	0.14	2.17	30.19	34.49	14.29	4.08	2.04	2.30	10.21				

状态的变化；振动停止后，土体的重新聚结所导致的颗粒结构重新分布都会引起其导电性的变化。

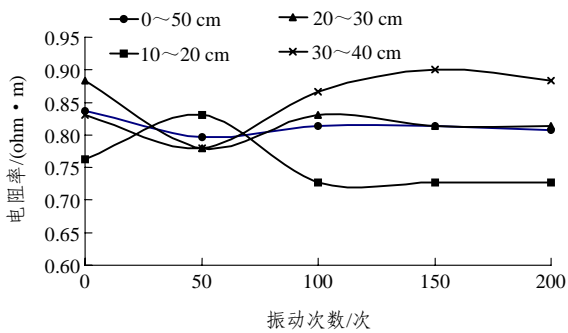
分析整个过程中不同时刻记录电阻率的变化规律便可以确定土体状态的变化特征。

### 4 基于电性变化研究粉土触变过程土体状态变化的时空特征

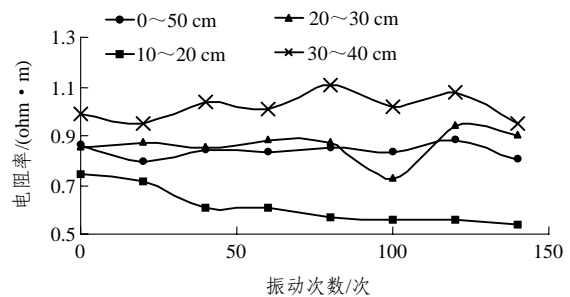
土体的触变过程可分为外力作用下液化变形阶段和外力停止后的聚结恢复阶段。为了克服研究结论的偶然性，对同一试验区不同位置所采集4个土样的测试结果进行分析。

#### 4.1 底部振动作用下土体液化过程的电阻率描述

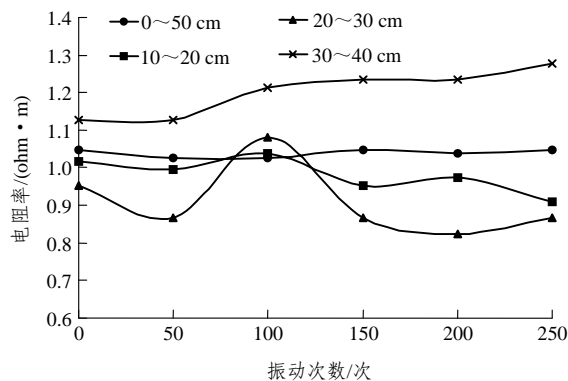
从图3中可以看到，不同土样各区段测试电阻率初始值因土样的颗粒成分和结构存在差异而不同，振动过程中不同区段电阻率在振动过程中的变化特征也不尽相同，但随振动次数的变化存在整体变化规律。主要表现为整体土体的电阻率在振动过程中基本保持不变；上段电阻率总体表现为随振动次数的增加而减小，但在振动100次后电阻率值突然降低，而后随振动次数的增加变化不大；中段电阻率随振动次数的变化有起伏，但基本稳定在一个恒定的数值上；下段的电阻率总体表现随振动次数的增加而增大，但同样在振动100次后电阻率值突



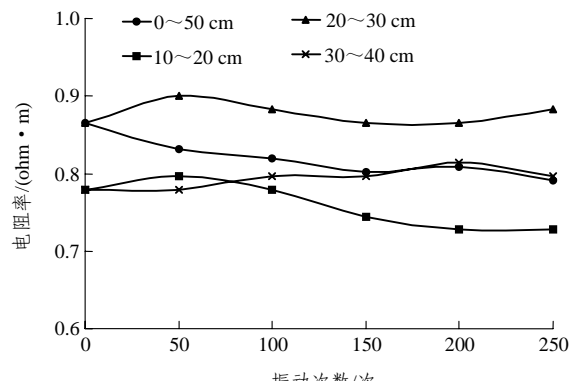
(a) 1#土样



(b) 3#土样



(c) 4#土样



(d) 9#土样

图3 不同土样的测试电阻率和振动次数关系曲线

Fig.3 Relation between electrical resistivities of different silty soil samples and libration times

然增高, 而后随振动次数的增加变化不大。根据电阻率曲线的变化特点可以分析: 在振动过程中土体状态的变化具有成层性, 同时土体状态并不是随振动的持续进行而改变而是变化到一定状态后保持相对稳定。为了揭示电阻率的变化所揭示的土体变化特征, 将振动后的 1# 土样横切并进行了对比分析(见图 4)。从切开的土样剖面可明显发现土样的分布特征。上段土样黏粒含量增大, 土体变软成流体状, 使得该区段的测试电阻率降低; 下段土体的密实度增加, 使得测试电阻率值升高, 中段土样没有明显变化表现为电阻率值的相对稳定。土体的变化特征和电阻率曲线的变化具有对应性。

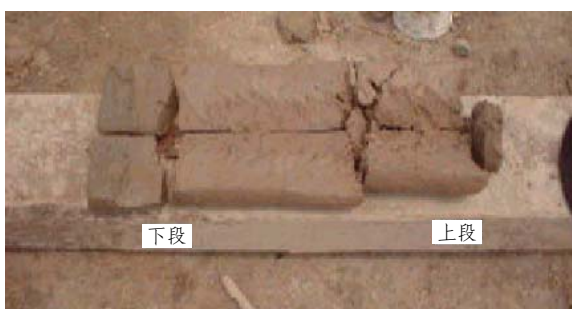


图 4 振动后的土样切面图

Fig.4 Cutting picture of silt soil after being librated vertically

#### 4.2 外力停止后土样聚结恢复过程中土体变化特征的电阻率描述

从 3# 土样振动停止后的电阻率和恢复时间变化曲线(见图 5)可以看到, 不同深度土体恢复原始状态的过程不同。振动作用停止后, 中段土体电阻率变化不大且迅速恢复到原始状态; 而上段和下段土体

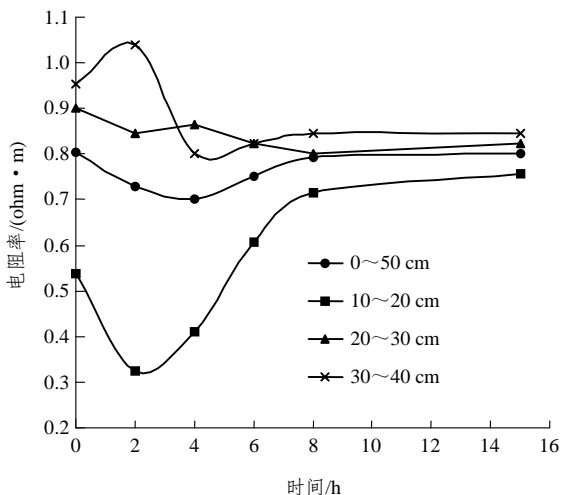


图 5 3#土样振动停止后的电阻率和恢复时间变化曲线

Fig.5 Electrical resistivity change of No.3 silt sample with the time after libration stopped

的电阻率分别继续变小和增大后才逐渐向初始值恢复, 恢复到初始状态后各区段的电阻率相对关系和初始状态一致, 但整体降低。这说明振动停止后上部土体继续向流体状态转化, 而后(大约 2 h)才逐步重新聚结向原始状态转化, 起初转化较快, 而后缓慢转化, 大约 6 h 后土体恢复到原始状态。底部土体结构也保持振动后状态一段时间后才逐步恢复原始状态, 但其恢复速度要比上部土体的快, 大约 2 小时后就基本恢复到原始状态。恢复后的土体电阻率值整体降低的特征说明恢复后的土体和原始状态仍存在差异。

### 5 结 语

(1) 黄河三角洲饱和粉土体的电性特征受黏粒含量的控制, 并受其颗粒结构形态和土水结合形式的直接影响。

(2) 饱和粉土在底部振动作用下, 土体状态变化具有成层性, 浅部自由表层土体变得松软, 深部直接受力土体变的密实、强度增加, 中段土体无明显变化。但振动作用使土体改变到一定状态后, 便不再随振动的持续进行而改变。土体的变化特征和相应电阻率的变化规律具有对应性。

(3) 振动作用停止后土体保持变化的状态一段时间后(大约 2 h), 才逐步向原始状态恢复; 大约 6 h 后整个土体恢复到原始状态。恢复后的状态并不和原始状态完全一致。整个过程可从其电阻率变化曲线上得到反映。

(4) 电阻率测试方法是研究振动作用下粉土体状态变化的有效原位测试手段。

#### 参考文献(References):

- [1] Archie G. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics[J]. Transactions of American Institute of Mining Engineers, 1942, 146: 54 - 62.
- [2] Alain T, Michel D, Albert H, et al. Soil resistivity: a noninvasive tool to map soil structure horization[J]. Geoderma, 2000, 1997, 393 - 404.
- [3] Henri R, Marc D, Michel R, et al. A multiscale electrical survey of a lateritic soil system in the rain forest of Cameroon[J]. Journal of Applied Geophysics, 1996, 34: 237 - 253.
- [4] Fokue M, Minato T, Horibe H, et al. The micro-structure of clay given by resistivity measurements[J]. Engineering Geology, 1999, 54: 43 - 53.

- [5] 郭秀军, 刘涛, 贾永刚, 等. 土的工程力学性质与其电阻率关系试验研究[J]. 地球物理学进展, 2003, 18(1): 151 - 155.(Guo Xiujun, Liu Tao, Jia Yonggang, et al. The study on relationship between engineering mechanical properties and resistivity of soils[J]. Progress in Geophysics, 2003, 18(1): 151 - 155.(in Chinese))
- [6] 于小军, 刘松玉. 电阻率测试技术在水泥土深层搅拌法工程中的应用研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(4): 592 - 598.(Yu Xiaojun, Liu Songyu. Research on application of electrical resistivity method to cement deep mixing pile engineering[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(4): 592 - 598.(in Chinese))
- [7] Sam G P, Hiroshi F, Mi K, et al. Fundamental study on resistivity of soils[J]. Butsuri-Tansa, 1999, 52(4): 299 - 306.
- [8] 刘国华, 王振宇, 黄建平. 土的电阻率特性及其工程应用研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 83 - 87.(Liu Guohua, Wang Zhenyu, Huang Jianping. Research on electrical resistivity feature of soil and it's application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(1): 83 - 87.(in Chinese))
- [9] 于小军, 刘松玉. 电阻率指标在膨胀土结构研究中的应用探讨[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(3): 393 - 396.(Yu Xiaojun, Liu Songyu. Researches on application of electrical resistivity indices to the microstructure of expansive soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(3): 393 - 396.(in Chinese))
- [10] 缪林昌, 刘松玉, 严明良. 水泥土的电阻率特性及其工程应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(1): 126 - 130.(Miao Linchang, Liu Songyu, Yan Mingliang. Research on electrical resistivity feature of cement soil and it's application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(1): 126 - 130.(in Chinese))
- [11] 冯秀丽, 林霖, 庄振业, 等. 现代黄河水下三角洲全新世以来土层岩土工程参数与沉积环境之间的关系[J]. 海岸工程, 1999, 18(4): 1 - 7.(Feng Xiuli, Lin Lin, Zhuang Zhenye, et al. The relationship between geotechnical parameters and sedimentary environment of soil layers since Holocene in modern Yellow River Subaqueous Delta[J]. Coast Engineering, 1999, 18(4): 1 - 7.(in Chinese))
- [12] Prior D B, Suhayda J N, Lu N Z. Storm wave reactivation of a submarine landslide[J]. Nature, 1989, 34: 47 - 50.
- [13] Lu N Z, Suhayda J N. Sediment thixotropy and submarine mass movement, Huanghe Delta, China[J]. Geo-marine Letters, 1991, 11: 9 - 15.
- [14] 冯秀丽, 周松望, 林霖, 等. 现代黄河三角洲粉土触变性研究及其应用[J]. 中国海洋大学学报, 2004, 34(6): 1 053 - 1 056.(Feng Xiuli, Zhou Songwang, Lin Lin, et al. The thixotropy of silt in Yellow River Delta[J]. Periodical of Ocean University of China, 2004, 34(6): 1 053 - 1 056.(in Chinese))
- [15] 贾永刚, 霍素霞, 许国辉, 等. 黄河水下三角洲沉积物强度变化原位测试试验研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(6): 876 - 882.(Jia Yonggang, Huo Suxia, Xu Guohui, et al. Intensity variation of sediments due to wave loading on subaqueous delta of Yellow River[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(6): 876 - 882.(in Chinese))
- [16] 王俊超, 贾永刚, 史文君, 等. 差异水动力导致黄河口粉质土微结构分形特征变化实例研究[J]. 海洋科学进展, 2004, 22(2): 177 - 183.(Wang Junchao, Jia Yonggang, Shi Wenjun, et al. Case study on the fractal characteristic variation of silty soil microstructure due to differential hydrodynamics in the Yellow River Estuarine Area[J]. Advance in Marine Science, 2004, 22(2): 177 - 183.(in Chinese))
- [17] 王小花, 刘红军, 贾永刚. 黄河口粉质土矿物成分特征及对水动力条件响应的研究[J]. 海洋地质动态, 2004, 20(5): 30 - 35.(Wang Xiaohua, Liu Hongjun, Jia Yonggang. Research on the mineral characters of sediment and the responding to the hydrodynamic conditions on the tidal flat northern Yellow River Delta[J]. Marine Geology Lette, 2004, 20(5): 30 - 35.(in Chinese))