

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2017.04.010

浅水湖泊表层沉积物粒度垂向分布及其水动力表征

燕文明¹,刘 凌¹,钱 宝²,杨艳青¹,吴挺峰³,王 汗^{1,3},黄 列^{1,3}

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,江苏 南京 210098;
2. 长江水利委员会水文局,湖北 武汉 430010; 3. 南京地理与湖泊研究所,江苏 南京 210008)

摘要:为揭示浅水湖泊表层沉积物粒度组成特征,解析沉积物粒度分布对沉积物物源和水动力的响应,并为浅水湖泊沉积物营养盐分布特征研究提供支撑。利用激光法对里下河地区4个不同大小和形状的浅水湖泊沉积物样品的粒度进行研究,结果表明:(a)研究区表层沉积物平均粒径随深度增加而减小;(b)面积大的湖泊表层沉积物的中值粒径垂向分布差异较大;(c)面积大且宽的湖泊中的砂粒搬运作用强于面积小且窄的湖泊;(d)对于面积较大的湖泊,湖心区砂粒含量高于湖泊周边区域;(e)粒径的三角分布图显示研究区表层沉积物颗粒大多落入壤粒和砂粒的范畴,表明研究区湖泊水动力活动较强;(f)风浪扰动较大的九龙口沉积物垂向分布连续性较差;(g)蜈蚣湖和得胜湖沉积物平均粒径垂向分布变化不大,表明其水动力条件变化相对较小,与实际调查一致。

关键词:浅水湖泊;表层沉积物;粒度;垂向分布;水动力;里下河地区小型湖泊

中图分类号:X17;X524 文献标志码:A 文章编号:1000-1980(2017)04-0345-05

Vertical distribution of particle size and hydrodynamic characterization of surface sediments in shallow lakes

YAN Wenming¹, LIU Ling¹, QIAN Bao², YANG Yanqing¹, WU Tingfeng³, WANG Han^{1,3}, HUANG Lie^{1,3}

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering,
Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Hydrology Bureau of Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, China
3. Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: In order to investigate the composition of particle size of surface sediments in shallow lakes, the response of particle size distribution to the source and hydrodynamic characteristics of sediments, and the distribution characteristics of nutrients in sediments of shallow lakes, the particle size of sediment samples from four shallow lakes with different sizes and shapes in the Lixiahe Region were studied. The results are as follows: (a) The average particle size of the surface sediments in the study area decreases with the increase of depth. (b) The vertical distribution of the median grain diameter of the surface sediments in large lakes is significantly different. (c) The transportation capacity for sands of large and wide lakes is stronger than that of small and narrow lakes. (d) For a large lake, the sand content in the central area is higher than in the surrounding area of the lake. (e) The triangular distribution chart of particle size shows that the surface sediments mostly fall into the categories of silt loam and sandy loam, indicating that the hydrodynamic activity of the lakes in the study area is strong. (f) Poor continuity in the vertical distribution of sediments occurs in Jiulongkou Lake with a large amount of wind disturbance. (g) The vertical distribution of the average particle size of sediments in Wugong Lake and Desheng Lake does not change significantly, indicating that hydrodynamic conditions rarely change. These results agree with the field investigations.

Key words: shallow lake; surface sediment; grain size; vertical distribution; hydrodynamics; small lakes in Lixiahe Region

收稿日期: 2016-05-30
基金项目: 国家自然科学基金(41301531,41471021,51279060)
作者简介: 燕文明(1982—),女,江苏沛县人,高级实验师,博士,主要从事环境水文及水环境保护研究。E-mail:ywm0815@163.com
通信作者: 吴挺峰,副研究员。E-mail:tfwu@niglas.ac.cn

粒度是沉积物重要物理特性之一,是沉积物分类的重要指标。不同粒度的沉积物具有不同的比表面积、质量、有机质含量等,粒度的差异影响着营养盐在沉积物-水界面上的迁移转化过程,并影响沉积物吸附和释放营养盐的能力^[1-3]。沉积物粒度受物源远近以及搬运方式影响;反之,沉积物粒度的分布特征可以识别其所在环境的水动力状况^[4-5],判定沉积物的运动方式^[6],可以辨别沉积物的物源条件^[7-8]。可见,沉积物粒度分析在研究粒径趋势、辨别水动力条件、区分沉积环境和判定物质输运方式等方面具有重要作用。而已有的关于沉积物粒度分布特征的研究多集中在海洋和大型湖泊,且多是进行空间差异对比研究,关于中小型湖泊沉积物粒径垂向分布的研究较少。研究区域地处里下河腹部区,位于淮河中下游,研究区内沟、河、湖荡面积众多。据调查,近50年间里下河地区的湖荡面积缩小了近95%,萎缩速度惊人。笔者选取该区域内4个中小型浅水湖泊的沉积物样品分层后进行粒度分析,阐述沉积物粒度组成及粒度参数空间分布特征,解析中小型湖泊表层沉积物类型,探究其对沉积物物源和水动力的响应。研究成果可为该区域湖泊沉积物营养盐分布特征研究提供支撑。

1 样品来源与实验方法

1.1 样品来源

2012年9月采集里下河地区的蜈蚣湖、得胜湖、九龙口、大纵湖4个湖泊的沉积物原位柱状样,其中大纵湖3个(编号为DZ、DZ3、DZ5),九龙口3个(编号为JLK1、JLK3和JLK4),蜈蚣湖和得胜湖采样点编号为WG和DS。采样中全程采用GPS定位,采样点分布见图1。4个湖泊的平均深度、人类扰动方式、水质情况等湖泊学属性见表1。

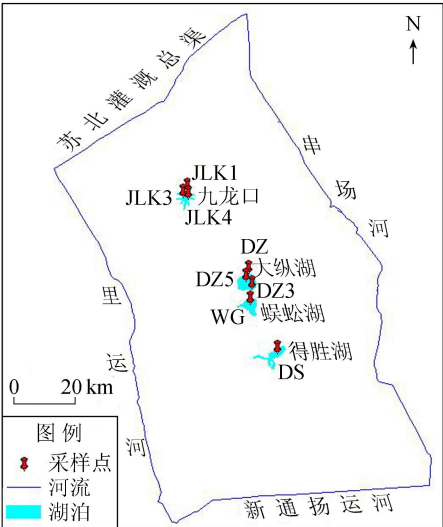


图1 里下河地区浅水湖泊粒度研究点位分布
Fig. 1 Locations of grain size sampling points in shallow lakes of Lixiahe Region

表1 湖泊基本情况

Table 1 Basic characteristics of lakes

湖名	浊度/ NTU	pH	溶解氧质量浓度/ (mg·L ⁻¹)	蓝绿藻密度/ (个·mL ⁻¹)	叶绿素质量浓度/ (mg·L ⁻¹)	平均水深/ m	人类活动方式
蜈蚣湖	6.7	7.4	2.9	1 255.5	4.8	2	畜禽养殖、航运
得胜湖	19.1	7.4	3.9	1 300.5	6.3	1.37	渔业养殖和围垦土地
九龙口	4.8	7.5	5.2	3 363.0	2.3	1.5~2	原始湖荡型湿地
大纵湖	4.0	7.6	5.3	5 646.0	4.5	1.02	存在围网养殖

1.2 粒度分析方法

激光法近年来被推广应用于粒度测量及粒型分析中^[9-10],也是笔者进行粒度测试的选用方法。为更好地反映沉积物的粒度分布特征,在上机测试之前需要去除样品中的有机质和钙质的影响。样品的预处理步骤如下:(a)样品的分散。取约1g样品放于小烧杯中,加入分散剂。分散剂的选择:中性土加0.1mol/L的草酸钠5mL,酸性土加0.1mol/L的氢氧化钠5mL,一般样品加入0.1mol/L的六偏磷酸钠溶液5mL。(b)加入30%的过氧化氢2mL除去有机质。(c)加入0.1mol/L的稀盐酸2mL除去钙质胶结物。(d)超声30s洗去盐分,静置过夜。然后在激光粒度分析仪(LS13320,美国贝克曼公司)上测定沉积物粒径。

2 沉积物粒度分布及其水动力表征

2.1 沉积物粒度等级分布特征

根据国际制土壤质地分级标准^[11],土壤结构分类按照0~2.0μm、2.0~20.0μm和20.0~2 000μm共3个粒径将沉积物分为黏粒、壤粒和砂粒3个不同等级。结合8个采样点垂向分层的沉积物粒径分布,得出沉积物土壤类型分布特征。测点WG和DS的20cm以上沉积物为壤粒;JLK1和JLK3表层6cm以上为黏粒和壤粒的混合,6cm到20cm沉积物为壤粒;JLK4表层20cm沉积物为黏粒和壤粒的混合;DZ、DZ3、DZ5表层4cm以上以黏粒和砂粒的混合为主,DZ、DZ3表层4cm以下为壤粒,DZ5表层4cm以下沉积物是黏粒和

砂粒的混合。

研究区湖泊沉积物 3 个不同等级比例如图 2 所示。由图 2 可知,表层粒径较大的部分沉积物颗粒落入砂粒的范畴,但大部分沉积物颗粒属于壤粒。图 2 从下往上显示依次反映了沉积物由表层向深层的沉积物颗粒分布情况。由于壤粒具有较大的比表面积,对氨氮具有较强的吸附能力,因此导致沉积物对氨氮的吸附容量较大,从而沉积物在一定程度上是氨氮的“汇”,对于本研究区而言,含量较多的壤粒可能会引起沉积物中氨氮的富集。

2.2 沉积物中值粒径和平均粒径垂向分布与水动力特征分析

平均粒径 M 可以用来反映粒度分布的聚集趋向,并能够表达搬运营力的平均动能^[12]。所选研究点沉积物中值粒径 D_{50} 和 M 的垂向分布情况如图 3 所示。

D_{50} 和 M 可以用来表示颗粒分布的集中趋势。式(1)中 D_{16} 、 D_{50} 、 D_{84} 分别表示在测试样品粒度分布范围内,体积分数为 16%、50%、84% 的粒径。

$$M = \frac{D_{16} + D_{50} + D_{84}}{2}$$

(1)

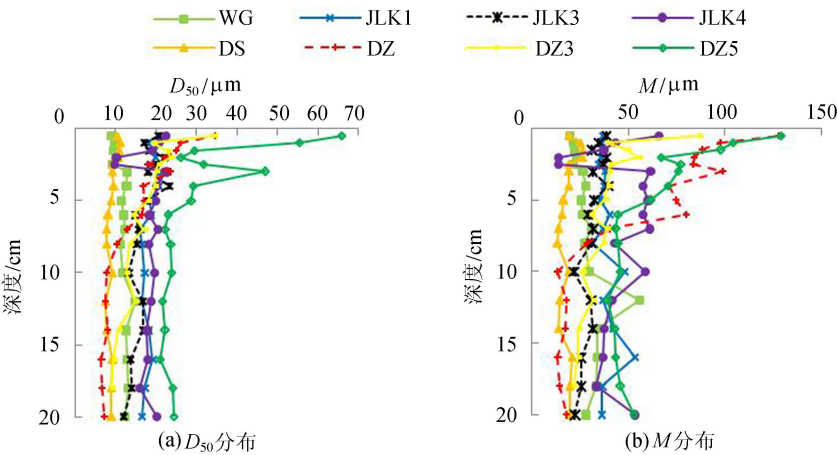


图 3 湖泊沉积物颗粒 D_{50} 和 M 垂直分布

Fig. 3 Vertical distribution of median grain diameter D_{50} and average particle size M in lake sediments

由图 3 可知,蜈蚣湖、得胜湖和九龙口沉积物 D_{50} 随深度的增加变化不大。九龙口呈现锯齿状变化,但中值粒径约是 DS 同一分层处的 2 倍左右,位于 9.69 ~ 23.38 μm 之间,这可能是因为九龙口是一个宽浅湖泊,风浪扰动较大,多条河流注入使湖泊沉积物拥有多种物源供应,进而导致沉积物垂向分布连续性较差。DZ 和 DZ3 的中值粒径垂向分布差异较大,尤其是表层 8 cm 以上,随着深度的增加而减小,下层沉积物的平均粒径明显小于上层。分析原因可能是因为 DZ 和 DZ3 在几十年前离物源较远,大部分沉积物经过长期的水力过程到达此处再进一步沉积下来,而到了当代,表层沉积物平均粒径显著增加,显示湖泊面积萎缩,物源靠近,2 个采样点分别处于入湖口和出湖口的位置,沉积环境受人类活动的影响更明显。DZ5 的表层沉积物中值粒径最大,达到 66 μm ,整体呈现随深度增加而减小的趋势,可能是由于湖泊沉积物固有物理特性所决定的,该采样点位于湖心区,受人类活动影响较小(该采样点沉积物土壤质地明显不同于其他采样点)。

8 个采样点的平均粒径随深度增加而降低,其中大纵湖的平均粒径垂向变幅较大。WG、DS 沉积物平均粒径变化不大,表明影响这 2 个采样点处的动力条件变化不大,其粒径百分含量的变化反映陆源物质运输的变化,该结果与实际调查相一致。蜈蚣湖和得胜湖水面积较小,水面呈狭长形,WG 和 DS 受到的风浪扰动小于湖心区的 JLK4 和 DZ5。DZ 和 DZ5 表层沉积物的平均粒径相对较大且随深度增加呈现明显的降低,DZ 沉积物的平均粒径垂向变幅明显大于 DZ5,表明这两者对环境变化都较敏感,且 DZ 的沉积物比 DZ5 敏感。DZ 位于大纵湖的出湖口,受水动力条件影响,其沉积物主要来自于大纵湖,这也是该采样点与 DZ5 平均粒

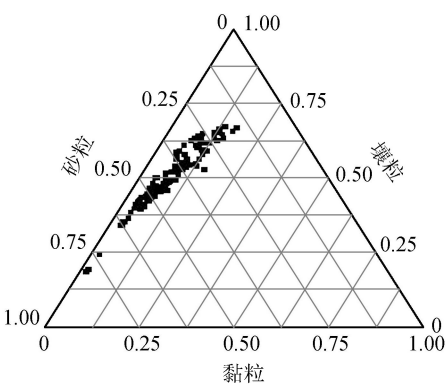


图 2 湖泊沉积物颗粒粒径比例三角图
Fig. 2 Triangular diagram of proportion of particle size in lake sediments

径垂向分布特征相似的原因。而 DZ3 位于大纵湖的南部入湖口,其沉积物组分主要来自上游河流的冲刷,平均粒径垂向分布特征不同于 DZ 和 DZ5。

8 个采样点的平均粒径介于 14 ~ 129 μm 之间,其中,DZ3 和 DZ5 表层 4 cm 以上沉积物平均粒径高于其他 6 个采样点。水动力条件、物质来源及底质环境的变化等因素共同影响着沉积物粒度的空间分布特征,进而导致了沉积物粒径垂向分布呈现锯齿状变化。对于蜈蚣湖、得胜湖、九龙口湖泊的 5 个采样点以及大纵湖的 DZ 和 DZ3,沉积物粒度主要受地表径流、河流冲刷以及降雨等多因素的影响,陆源碎屑物是这 7 个采样点处底质的主要物质来源,进而使底质粒度组成较复杂,颗粒粒度的垂向分布也会发生明显的不均匀变化;DZ5 位于湖心区,沉积物来源比较单一,沉积物粒度主要受到波浪扰动、自身物理特征和降雨等因素的影响,粒径的垂向分布曲线相对较为平滑。

2.3 不同类型沉积物垂向分布及其水动力表征

由图 4 可见,8 个采样点粒径分布不均匀,砂粒组分所占比例顺序为:蜈蚣湖<得胜湖<九龙口<大纵湖;黏粒组分所占比例顺序为:大纵湖<九龙口<蜈蚣湖<得胜湖;壤粒组分所占比例顺序为:大纵湖<九龙口<蜈蚣湖<得胜湖。黏粒的粒径较小,密度也相对较小,代表了水体沉积物中可被再悬浮部分,是水体悬浮物的主要成分。DZ 和 DZ3 中黏粒随深度的增加而增加,其他 6 个采样点黏粒含量变幅较小;除 WG 外,其他 7 个采样点壤粒随深度的增加而增加,砂粒随深度的增加而降低,其中 DZ 的壤粒和砂粒的垂向变幅最大。

不同粒度组分在沉积过程中的行为和动力学性质是不同的^[13],黏粒和壤粒属于悬浮组分,一般呈垂向加积,是弱水动力的标志^[14];沉积物中粒径较大的砂粒等一般作为推移组分,在机械搬运和沉积作用过程中一般呈侧向加积,反映了该粒径沉积物所在环境为较强的水动力环境。大纵湖水面积较大,容易受到风浪扰动的影响,且扰动力较大。而蜈蚣湖和得胜湖为河道型湖泊,由风浪带来的水动力较弱,进而使大纵湖表层沉积物中砂粒等粗颗粒组分所占比例较大,壤粒和黏粒等细颗粒组分相对较小,这一点与尉建功等^[15]对海域表层沉积物粒度的研究类似,其研究指出砂质海岸的沉积物动力过程主要受波浪控制,底质粒度不仅受水文水动力的影响,也会受到流域物源的影响^[1]。在里下河地区,面积大且宽阔的湖泊容易形成大的风浪,加速砂粒沉积物的搬运过程,增加表层沉积物中砂粒的含量。对于该区域中面积最大的大纵湖而言,风浪较大的湖心区沉积物中的砂粒含量多于湖的南部和北部。因此,大面积湖泊沉积物中砂粒含量明显多于小且窄的湖泊,粒度分布情况更容易被改变。而位于底层的沉积物可能是几十年前的产物,当时的水文、河湖联通与现在可能不同,湖泊的大小和形状也会间接改变湖泊表层沉积物颗粒的分布情况。

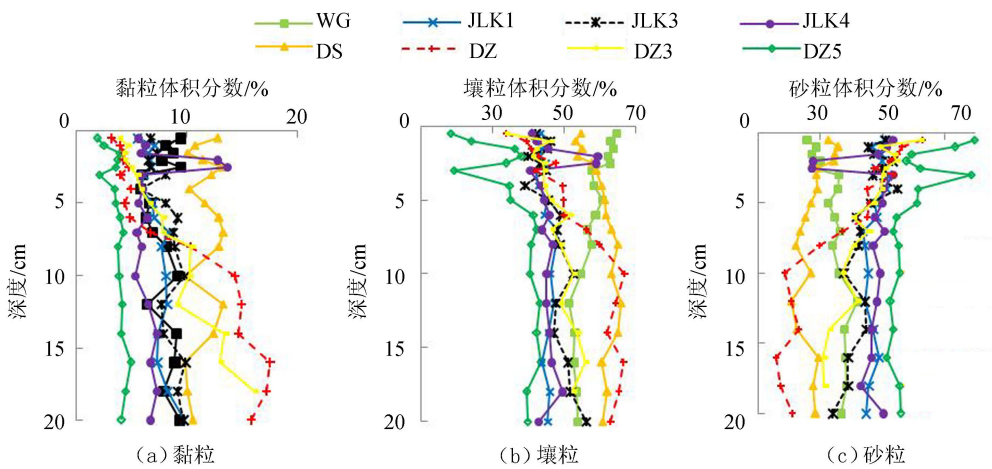


图 4 湖泊沉积物颗粒黏粒、壤粒、砂粒垂直分布
Fig. 4 Vertical distribution of clay, silt, and sand in lake sediments

3 结 论

- a. 蜈蚣湖、得胜湖、九龙口沉积物中值粒径随深度变化不大,8 个采样点沉积物的平均粒径垂向呈现随深度增加而降低的趋势,各采样点的差异反映了对环境的变化敏感程度。
- b. 湖泊的大小和形状间接影响了沉积物颗粒分布,面积大且宽的湖泊中的砂粒搬运作用强于面积小且

窄的湖泊;对于面积较大的湖泊,湖心区砂粒含量高于周边区域。

c. 蜈蚣湖和得胜湖平均粒径变化不大,表明该处水动力条件变化不大,与实际调查一致;沉积物来源较为单一的大纵湖湖心区粒径垂向分布曲线较平滑;风浪扰动较大,多条河流注入使九龙口沉积物拥有多种物源供应,进而导致了沉积物垂向分布连续性较差。

参考文献:

- [1] 侯俊,王超,王沛芳,等.太湖表层沉积物粒度组成时空分布特征及分类命名[J].河海大学学报(自然科学版),2013,41(2):114-119. (HOU Jun, WANG Chao, WANG Peifang, et al. Temporal variability and spatial distribution of granulometric composition of surface sediments and classification in Taihu Lake[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2013, 41(2):114-119. (in Chinese))
- [2] 梁海清,王圣瑞,金相灿,等.不同污染程度沉积物不同粒级有机磷形态及其分布[J].中国农学通报,2007,23(3):380-385. (LIANG Haiqing, WANG Shengrui, JIN Xiangcan, et al. Study on the organic phosphorus form & distribution of different particle size fractions in the different polluted sediments[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2007, 23(3): 380-385. (in Chinese))
- [3] 李富祥,张春鹏,王路,等.基于表层沉积物粒度特征的鸭绿江口沉积环境分析[J].海洋科学,2014,38(5):100-106. (LI Fuxiang, ZHANG Chunpeng, WANG Lu, et al. Analyses of sedimentary environment according to the characteristics of grain size insurface sediment in the Yalu River Estuary[J]. Marine Sciences, 2014, 38(5): 100-106. (in Chinese))
- [4] 张富元,章伟艳,杨群慧.南海东部海域沉积物粒度分布特征[J].沉积学报,2003,21(3):452-460. (ZHANG Fuyuan, ZHANG Weiyan, YANG Qunhui. Characteristics of grain size distributions of surface sediments in the eastern South China Sea [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2003, 21(3): 452-460. (in Chinese))
- [5] 王伟,李安春,徐方建,等.北黄海表层沉积物粒度分布特征及其沉积环境分析[J].海洋与湖沼,2009,40(5):525-531. (WANG Wei, LI Anchun, XU Fangjian, et al. Distribution of surface sediments and sedimentary environment in the North Yellow Sea[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2009, 40(5): 525-531. (in Chinese))
- [6] 乔淑卿,石学法,王国庆,等.渤海底质沉积物粒度特征及输运趋势探讨[J].海洋学报,2010,32(4):139-147. (QIAO Shuqing, SHI Xuefa, WANG Guoqing, et al. Discussion on grain-size characteristics of seafloor sediment and transport pattern in the Bohai Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2010, 32(4): 139-147. (in Chinese))
- [7] 肖晓,石要红,冯秀丽,等.北部湾表层沉积物粒度分布规律及沉积动力分区[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2016,46(5):83-89. (XIAO Xiao, SHI Yaohong, FENG Xiuli, et al. Surface sediment characteristics and dynamics in Beibu Gulf [J]. Periodical of Ocean University of China(Natural Sciences), 2016, 46(5): 83-89. (in Chinese))
- [8] 刘付程,张存勇,彭俊.海州湾表层沉积物粒度的空间变异特征[J].海洋科学,2010,34(7):54-58. (LIU Fucheng, ZHANG Cunyong, PENG Jun. Characteristics of spatial variability of sediment grain size in the Haizhou Bay[J]. Marine Sciences, 2010, 34(7): 54-58. (in Chinese))
- [9] 孙惠凤,曹成林,宋玉鹏.激光粒型分析法在砂质沉积物粒度分析中的应用[J].海洋地质与第四纪地质,2015,35(2):185-192. (SUN Huifeng, CAO Chenglin, SONG Yupeng. Application of laser particle size and shape analyzer in testing grain sizes of sandy deposits[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2015, 35(2): 185-192. (in Chinese))
- [10] 刘秀明,罗伟.粒度分析在沉积物研究中的应用[J].实验技术与管理,2013(8):20-23. (LIU Xiuming, LUO Yi. Application of grain size analysis in sediments research[J]. Experimental Technology and Management, 2013, 30(8): 20-23. (in Chinese))
- [11] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,2000:272-276.
- [12] 杨曦光,黄海军,严立文,等.近岸水体表层悬浮泥沙平均粒径遥感反演[J].武汉大学学报(信息科学版),2015,40(2):164-169. (YANG Xiguang, HUANG Haijun, YAN Liwen, et al. Average grain size inversion of suspended sediment in offshore waters[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2015, 40(2): 164-169. (in Chinese))
- [13] 王中波,何起祥,杨守业,等.谢帕德和福克碎屑沉积物分类方法在南黄海表层沉积物编图中的应用与比较[J].海洋地质与第四纪地质,2008,28(1):1-8. (WANG Zhongbo, HE Qixiang, YANG Shouye, et al. Comparison and application of shepard's and folks classifications to the subsurface mapping in the South Yellow Sea[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2008, 28(1): 1-8. (in Chinese))
- [14] 汤露露,王鹏,姚琪.太湖湖流、波浪、沉积物的三维数值模拟[J].水资源保护,2011,27(2):1-5. (TANG Lulu, WANG Peng, YAO Qi. Three-dimensional numerical simulation of current, waves and sediment transport in Taihu Lake [J]. Water Resources Protection, 2011, 27(2): 1-5. (in Chinese))
- [15] 尉建功,冯秀丽,林霖,等.秦皇岛附近海域表层沉积物粒度分布特征及运移趋势分析[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2013,43(7):66-71. (WEI Jiangong, FENG Xiuli, LIN Lin, et al. Grain-size characteristic of the sediments and transport patterns in Qinhuangdao offshore area[J]. Periodical of Ocean University of China(Natural Sciences), 2013, 43(7): 66-71. (in Chinese))