

长江口徐六泾滩槽含沙量波动研究

周昊*, 刘曙光[#]

同济大学, 上海

收稿日期: 2022年10月30日; 录用日期: 2023年2月3日; 发布日期: 2023年2月27日

摘要

研究长江口徐六泾1#边滩、4#深槽的含沙量在不同潮型下的波动规律及相关要素,有助于认知潮汐河口的水沙分布规律,计算推求断面含沙量及输沙率,为河口航道冲淤与河势变化的分析、河道治理与涉水工程的规划等科学提供理论基础。本文利用横式采样器、临底采样器等对徐六泾断面的滩槽垂线进行了现场水文测验,对测验数据进行了相关关系分析和HHT变换分析,研究表明:徐六泾滩槽含沙量波动峰值多发生在落潮时段;总体流速越大含沙量波动越剧烈,边滩含沙量波动峰值与流速峰值较为同步,深槽含沙量波动峰值则相对滞后于流速峰值;越近水底含沙量越大且波动越剧烈,边滩含沙量波动程度比深槽更为剧烈;含沙量波动与泥沙 d_{50} 相关性较小;28 h、17 h、14 h波动是边滩含沙量变化的主要模式,14 h、8 h、5 h波动是深槽含沙量变化的主要模式,边滩含沙量波动规律性不强。

关键词

潮汐河口, 徐六泾, 水文测验, 含沙量, 波动, 相关性, 边滩, 深槽

Research on Fluctuation of Suspended Sediment Concentration in Yangtze Estuary Xuliujing Shoal and Groove

Hao Zhou*, Shuguang Liu[#]

Tongji University, Shanghai

Received: Oct. 30th, 2022; accepted: Feb. 3rd, 2023; published: Feb. 27th, 2023

Abstract

Studying the fluctuation law of suspended sediment concentration in 1# marginal shoal and 4# deep groove of Xuliujing section of Yangtze Estuary under different tidal types and analyzing the related factors.

作者简介: 周昊, 男, 籍贯江苏盐城, 研究方向为港口、海岸及近海工程, Email: 718792539@qq.com

*第一作者。

[#]通讯作者 Email: liusgliu@tongji.edu.cn

tors is helpful to recognize and understand the distribution law of flow and sediment in tidal estuary. This paper calculates and calibrates the section sediment concentration and sediment transport rate, provides theoretical basis for scientific research on analysis of erosion and deposition of estuary channel and change of river regime, plan of river regulation and wading projects. Used horizontal sampler, bottom sampler and other instruments to conduct on-site hydrological tests on shoal and groove verticals of Xuliujing, conducted correlation and HHT transformation analysis on the test data. The research conclusion: Peak values of sediment concentration fluctuation in shoal and groove of Xuliujing mostly occur at falling tide; The higher the overall flow velocity is, the more violent the fluctuation is, peak values of sediment concentration fluctuation in shoal are more synchronous with peak values of flow velocity, while peak values of sediment concentration fluctuation in groove are relatively lagging behind peak values of flow velocity; The closer to the river bottom, the higher sediment concentration is and the more violent sediment concentration fluctuation is, the sediment concentration fluctuation in shoal is more violent than that of groove; Correlation between sediment concentration fluctuation and sediment d_{50} is small; 28 h, 17 h, 14 h and 14 h, 8 h, 5 h fluctuations are main patterns of sediment concentration changes in shoal and groove, regularity of sediment concentration fluctuation in shoal is relatively weaker.

Keywords

Tidal Estuary, Xuliujing, Hydrological Test, Suspended Sediment Concentration, Fluctuation, Correlation, Marginal Shoal, Deep Groove

Copyright © 2023 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

长江口徐六泾[1][2][3][4][5]江面宽阔，航道布置复杂，水上交通繁忙，是长江入海的咽喉要道，也是长江河口区多级分汊的起点(图1)。徐六泾水文断面所处环境复杂，水沙观测难度较大。目前对其泥沙在横断面以及垂向

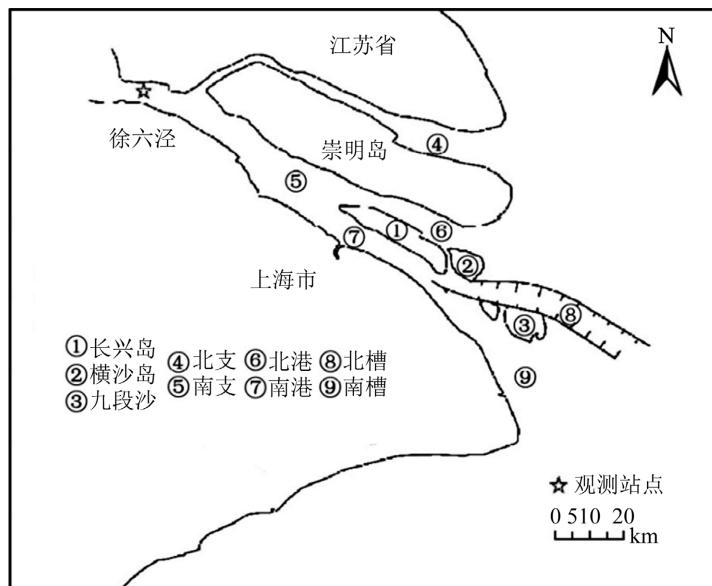


Figure 1. The geographical location of Xuliujing in the Yangtze River
图 1. 长江口徐六泾地理位置状况

分布规律的认识均不够全面。相较于上游的大通水文站，徐六泾所处河段支流较少，水沙运动为径潮流双向运动，因此其水沙数据对于长江口航道冲淤与河势变化的分析、河道治理与涉水工程的规划等科学研究更具有代表意义。

在本研究中，利用 ADCP、横式采样器、临底采样器[6]对徐六泾 1#与 4#垂线在大、中、小潮情况下进行现场测流测沙，将实测的水位、流速、粒径、悬移质含沙量 SSC (Suspended Sediment Concentration) 等数据进行统计分析与图表分析，对比不同垂线、水层、潮型的含沙量波动变化量、峰值大小及次数、峰值出现时刻、泥沙粒径大小及变化量，建立含沙量与其它各要素的相关关系，进行 HHT (Hilbert-Huang) 变换，分析含沙量波动变化[7][8]的相关要素。从而有助于认知和理解潮汐河口水沙的时空分布和变化规律，定线计算率定潮汐河口的断面含沙量，推求连续输沙率以及整编输沙量，为潮汐河口航道冲淤与河势变化的分析、河道治理与涉水工程的规划等科学研究提供理论基础。

2. 现场测验

2.1. 测验位置

本次测验选择了徐六泾断面上的两条代表垂线，如图 2 所示，分别是 1#边滩(起点距 2558 m)和 4#深槽(起点距 4343 m)垂线，1#水深较浅，水深在 13 m 左右，4#水深较深，水深在 50 m 左右。

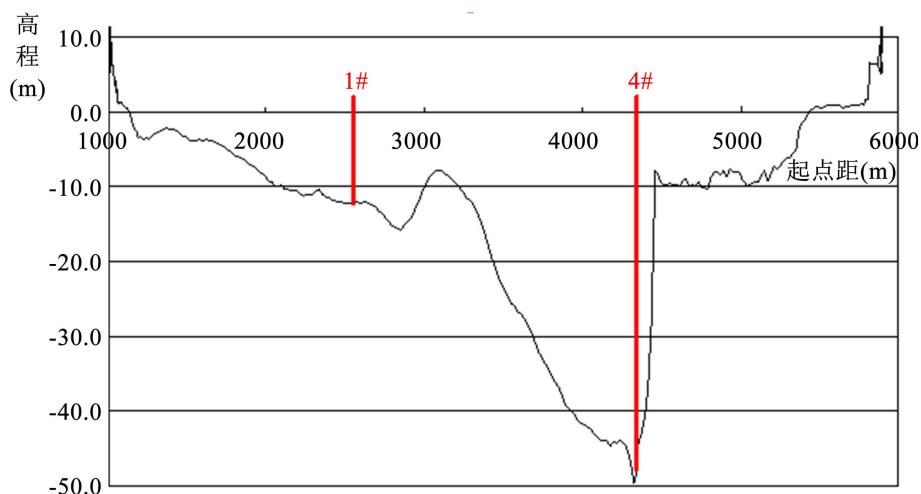


Figure 2. Location of 1# and 4# sediment measuring verticals on Xulujing section
图 2. 徐六泾断面 1#、4#测沙垂线位置

2.2. 测验时间

实地测验分别在大、中、小三种潮型下进行，大潮测验时间为 2021 年 3 月 30 日 12 点至 2021 年 3 月 31 日 14 点；中潮测验时间为 2021 年 4 月 1 日 13 点至 2021 年 4 月 2 日 15 点；小潮测验时间为 2021 年 4 月 6 日 18 点至 2021 年 4 月 7 日 22 点，每种潮型测验持续时间均大于等于 26 小时。

2.3. 测验方式

本次研究中，在两条测沙垂线上分别测有 8 层数据，从水面到河底分别为水下 0.5 m (0.0 H 层)，相对水深 0.2 H 层、0.4 H 层、0.6 H 层、0.8 H 层，水深 H-0.7 m 层(1.0 H 层)，水深 H-0.5 m 层和水深 H-0.1 m 层，其中 1.0 H 层原本横式采样器的设定是距离河底 0.5 m，但是在实际操作中，在采样器触底上提过程中会产生 0.2 m 的误差，因此实际测量的水深为距离河底 0.7 m，1.0 H 层为 H-0.7 m 层。H-0.5 m 层和 H-0.1 m 层由临底采样仪器采集，这样从上至下共 8 个水层，分别为 0.0 H、0.2 H、0.4 H、0.6 H、0.8 H、H-0.7 m、H-0.5 m、H-0.1 m 每 1 小时采集 1 次的数据。悬沙粒径每个潮型分别测 4 次(涨急、涨憩、落急、落憩)；对于两条测沙垂线的床沙粒

径每个潮型分别测 1 次，具体测验详情见表 1。

Table 1. Test details
表 1. 测验详情

观测内容	观测点位	观测仪器	观测频次
流速流向	0.0 H~1.0 H	ADCP	每个潮型 半小时 1 次
含沙量	上部 6 层	0.0 H~1.0 H	横式采样器
	临底 2 层	H-0.5 m H-0.1 m	临底采样器
悬沙粒径	上部 6 层	0.0 H~1.0 H	横式采样器
	临底 2 层	H-0.5 m H-0.1 m	临底采样器
床沙粒径	河床	临底采样器	每个潮型测 1 次

3. 测验结果

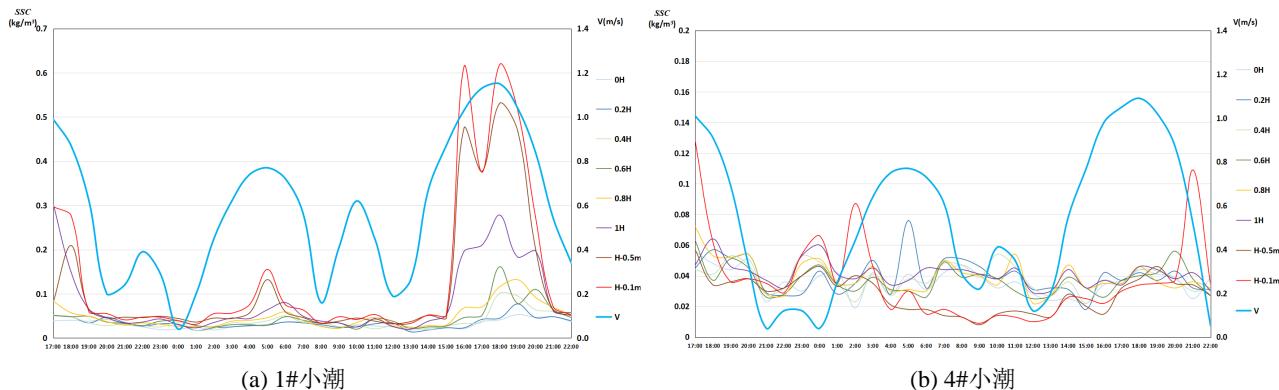
3.1. 垂线平均流速与含沙量波动过程

3.1.1. 边滩 1#垂线

1#垂线的垂线平均流速与含沙量波动过程如图 3 所示。可以看出，1#垂线越近水面含沙量波动变化量越小，0.0 H 水层含沙量随时间几乎无明显变化，因此可定性地认为越近水面含沙量波动程度越小。1#垂线 H-0.1 m 水层的含沙量随时间的波动变化量相较于其它水层最大，因此以 H-0.1 m 水层为代表进行含沙量波动分析。小潮条件下，含沙量波动峰值出现次数较少，在测验时间内仅出现了 4 次较为明显的波动峰值，发生时刻均处于落潮时段，含沙量波动峰值均较小，最大峰值为 0.62 kg/m^3 ；大潮条件下，含沙量波动峰值出现次数比小潮时多了 4 次，在测验时间内出现了 8 次较为明显的波动峰值，发生时刻 4 次处于涨潮时段，4 次处于落潮时段，含沙量波动峰值相对于 1#中潮时较大，最小峰值为 0.96 kg/m^3 ，最大峰值为 4.47 kg/m^3 。

3.1.2. 深槽 4#垂线

4#垂线的垂线平均流速与含沙量波动过程如图 3 所示。可以看出，4#垂线越近水面含沙量波动变化量越小，0.0 H 水层含沙量随时间几乎无明显变化，因此可定性地认为越近水面含沙量波动程度越小。4#垂线 H-0.1 m 水层的含沙量随时间的波动变化量相较于其它水层最大，因此以 H-0.1 m 水层为代表进行含沙量波动分析。小潮条件下，含沙量波动峰值出现次数较少，在测验时间内仅出现了 4 次较为明显的波动峰值，发生时刻均处于落潮时段，含沙量波动峰值相对于 1#中潮时较大，最小峰值为 0.96 kg/m^3 ，最大峰值为 4.47 kg/m^3 。



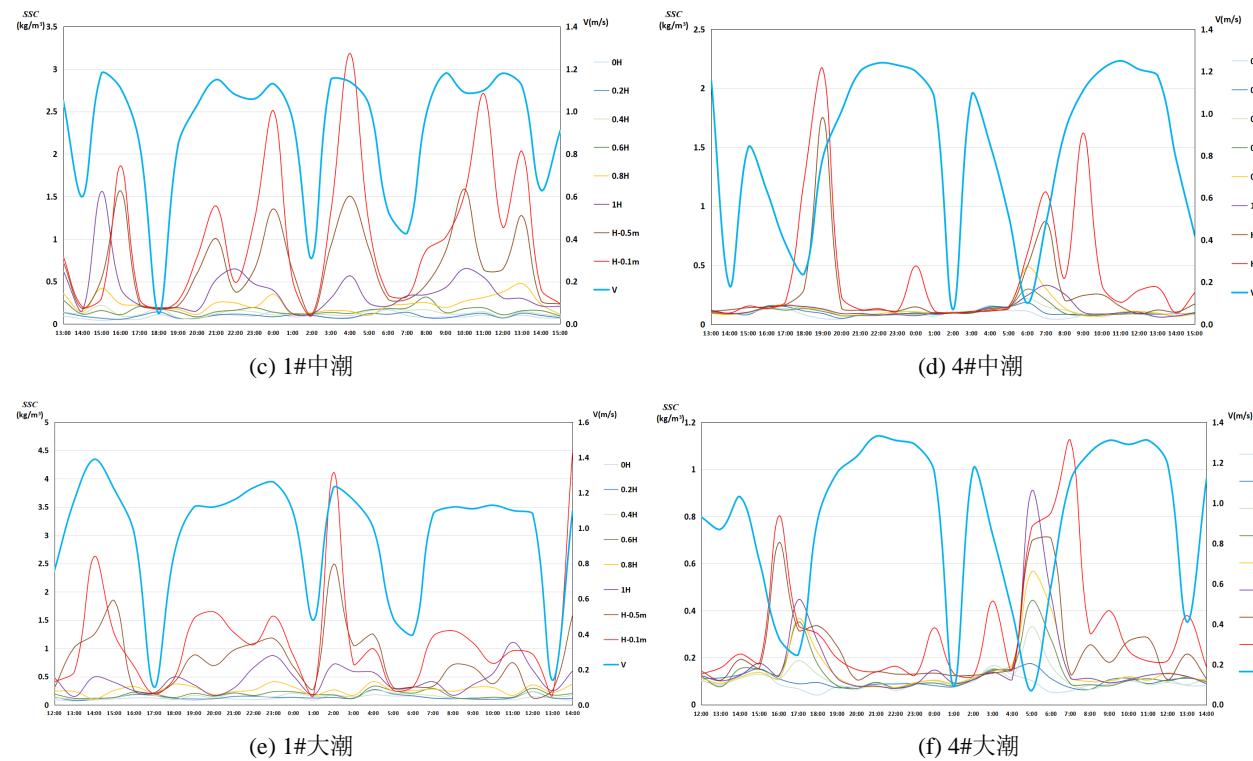


Figure 3. Vertical average velocity and SSC fluctuation process of shoal and groove ((a) 1# Neap tide; (b) 4# Neap tide; (c) 1# Middle tide; (d) 4# Middle tide; (e) 1# Spring tide; (f) 4# Spring tide)

图3. 滩槽平均流速与含沙量波动过程((a) 1#小潮; (b) 4#小潮; (c) 1#中潮; (d) 4#中潮; (e) 1#大潮; (f) 4#大潮)

Table 2. Summary of rising and falling tide periods and SSC fluctuation peak values in shoal and groove

表2. 边滩深槽涨落潮时段及含沙量波动峰值汇总

	落潮时段	涨潮时段	含沙量波动峰值时刻	含沙量峰值 (kg/m ³)
1#小潮	4/6/17:00~4/6/20:00	4/6/20:30~4/7/0:00	4/6/17:00(落) 4/7/5:00(落)	0.297 0.155
	4/7/0:30~4/7/8:00	4/7/8:30~4/7/12:30	4/7/16:00(落) 4/7/18:00(落)	0.614 0.619
	4/7/13:00~4/7/21:00	4/7/21:30~4/7/22:00		
1#中潮	4/1/13:00~4/1/13:30	4/1/14:00~4/1/18:00	4/1/16:00(涨) 4/1/21:00(落) 4/2/0:00(落)	1.86 1.387
	4/1/18:30~4/2/1:30	4/2/2:00~4/2/6:30	4/2/4:00(涨) 4/2/11:00(落) 4/2/13:00(落)	2.505 3.183
	4/2/7:00~4/2/14:00	4/2/14:30~4/2/15:00		2.71 2.032
1#大潮	3/30/12:00	3/30/12:30~3/30/17:00	3/30/14:00(涨) 3/30/20:00(落) 3/30/23:00(落)	2.624 1.645
	3/30/17:30~3/31/0:30	3/31/1:00~3/31/5:30	3/31/2:00(涨) 3/31/4:00(涨) 3/31/8:00(落)	1.57 4.108
	3/31/6:00~3/31/13:00	3/31/13:30~3/31/14:00	3/31/11:00(落) 3/31/14:00(涨)	0.994 1.312
4#小潮	4/6/17:00~4/6/21:00	4/6/21:30~4/6/23:30	4/6/17:00(落) 4/7/0:00(落) 4/7/2:00(落)	0.128 0.066
	4/7/0:00~4/7/8:30	4/7/9:00~4/7/12:00 4/7/22:00	4/7/21:00(落)	0.087 0.109
	4/7/12:30~4/7/21:30			
4#中潮	4/1/13:00~4/1/13:30	4/1/14:00~4/1/17:30	4/1/19:00(落) 4/2/0:00(落) 4/2/7:00(落)	2.163 0.493
	4/1/18:00~4/2/2:00	4/2/2:30~4/2/6:00 4/2/15:00	4/2/9:00(落) 4/2/13:00(落)	1.12 1.62
	4/2/6:30~4/2/14:30			0.312
4#大潮	3/30/12:00~3/30/12:30	3/30/13:00~3/30/16:30	3/30/16:00(涨) 3/31/0:00(落) 3/31/3:00(涨)	0.801 0.326
	3/30/17:00~3/31/0:30	3/31/1:00~3/31/5:00	3/31/7:00(落) 3/31/9:00(落) 3/31/13:00(落)	0.44 1.12 0.399
	3/31/5:30~3/31/13:00	3/31/13:30~3/31/14:00		0.378

量波动峰值相对于 1# 小潮时均较小, 最大峰值仅为 0.13 kg/m^3 ; 大潮条件下, 含沙量波动峰值出现次数比小潮时多了 2 次, 在测验时间内出现了 6 次较为明显的波动峰值, 发生时刻两次处于涨潮时段, 4 次处于落潮时段, 含沙量波动峰值相对于 1# 大潮与 4# 中潮时均较小, 相对于 4# 小潮时较大, 最小峰值为 0.33 kg/m^3 , 最大峰值为 1.12 kg/m^3 。

对 1#、4# 各自的涨落潮时段以及含沙量峰值及其时刻进行汇总, 如表 2 所示。可以看出, 1# 较 4# 含沙量波动峰值更大, 次数更多, 程度更为剧烈。两垂线大部分含沙量波动峰值均发生在落潮时段, 1# 中潮两次波动峰值发生在涨潮时段, 大潮 4 次发生在涨潮时段; 4# 仅有大潮两次波动峰值发生在涨潮时段。

3.2. 悬沙与床沙 d_{50} 沿水深变化

3.2.1. 边滩 1# 垂线

1# 垂线各潮型下 0.0H 水层悬沙沿水深至床沙的 d_{50} 垂线变化如图 4 所示。可以看出, 大、中、小潮情况下

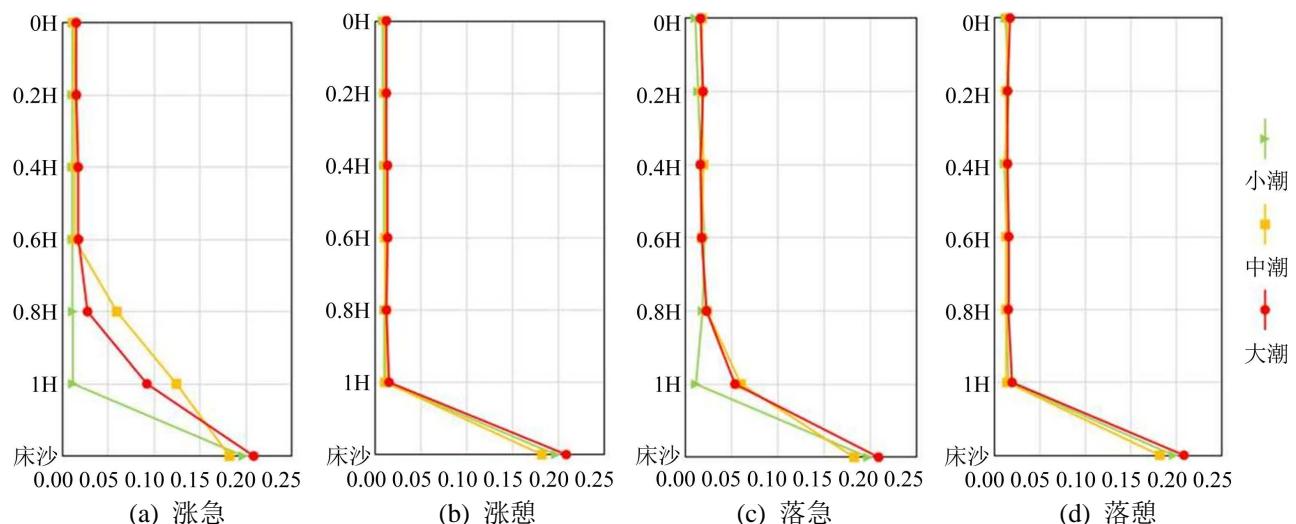


Figure 4. 1# Suspended sediment and bed sediment d_{50} ((a) Upward rush; (b) Upward rest; (c) Downward rush; (d) Downward rest)

图 4. 1#悬沙与床沙 d_{50} ((a) 涨急; (b) 涨憩; (c) 落急; (d) 落憩)

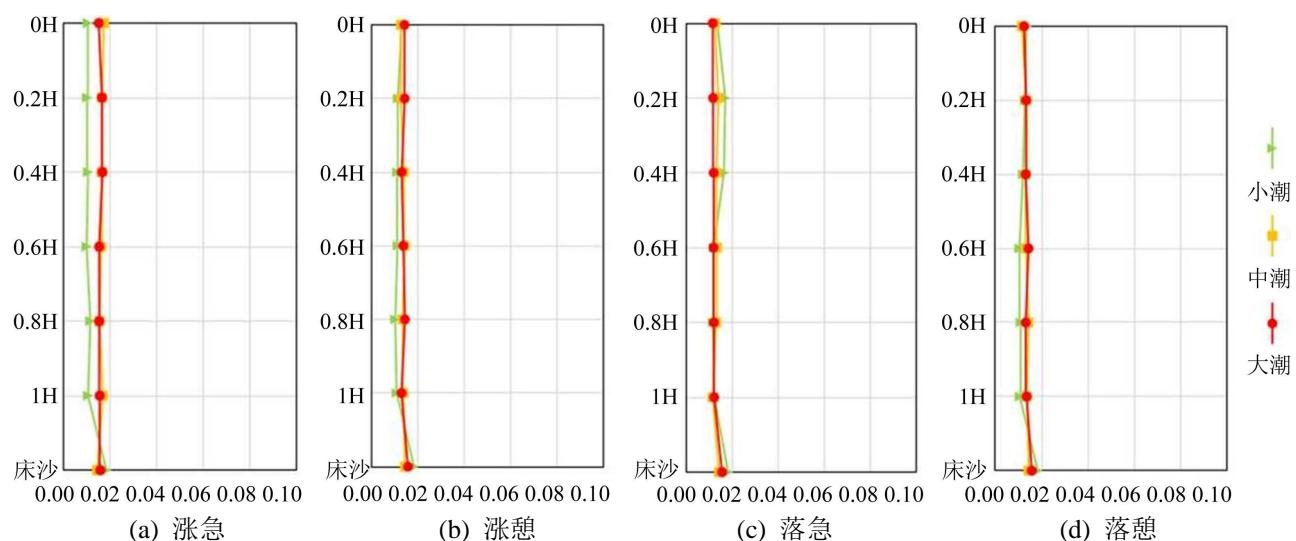


Figure 5. 4# Suspended sediment and bed sediment d_{50} ((a) Upward rush; (b) Upward rest; (c) Downward rush; (d) Downward rest)

图 5. 4#悬沙与床沙 d_{50} ((a) 涨急; (b) 涨憩; (c) 落急; (d) 落憩)

床沙 d_{50} 均在 0.2 mm 左右；涨憩、落憩情况下，大、中、小潮的各层悬沙 d_{50} 均在 0.01 mm 左右，无明显差异，1#床沙 d_{50} 比各层悬沙均大很多；涨急、落急情况下，小潮的各层悬沙 d_{50} 均在 0.01 mm 左右，无明显差异，中、大潮的底层悬沙 d_{50} 出现了较为明显的增大，涨急时的 1.0 H 的 d_{50} 在 0.1 mm 左右，落急时的 1.0 H 的 d_{50} 在 0.05 mm 左右。

3.2.2. 深槽 4#垂线

4#垂线各潮型下 0.0 H 水层悬沙沿水深至床沙的 d_{50} 垂线变化如图 5 所示。可以看出，4#床沙 d_{50} 与各层悬沙差异不大，大、中、小潮情况下床沙与悬沙 d_{50} 均在 0.015 mm 左右；涨憩、落憩、涨急、落急情况下，大、中、小潮的各层悬沙 d_{50} 均在 0.015 mm 左右，无明显差异。

4. 相关关系分析

将 1#、4#不同潮型下的含沙量、流速、粒径等各要素的测验情况进行汇总，结果如表 3 所示。从图 3~5 及表 3 可以看出，1#、4#各水层的含沙量波动曲线均表明越近河底振幅越大；垂线平均流速波动曲线也与含沙量波动曲线有类似的振幅和频率，1#的流速与含沙量曲线还可以看出有一定的同步性；而泥沙粒径 d_{50} 的变化则较少，大部分情况下粒径 d_{50} 均无明显变化，仅 1#垂线在大、中潮涨、落急情况下底层悬沙 d_{50} 有增大的情况。因此可以认为，1#、4#的含沙量波动变化与水深、流速具有较为明显的相关性，与粒径 d_{50} 相关性则较小。对含沙量与水深、流速这两项要素的相关关系进行具体分析。

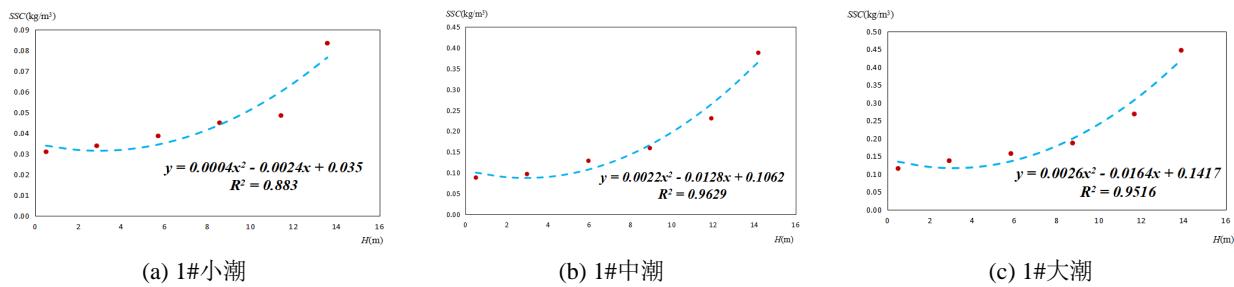
Table 3. Summary of test element properties in shoal and groove under each tidal type

表 3. 边滩深槽各潮型测验要素性质汇总

位置潮型	含沙量最大峰值 (kg/m ³)	含沙量峰值次数	含沙量峰值时刻	含沙量垂线变化	流速峰值 (m/s)	悬沙 d_{50} 垂线变化	床沙 d_{50} (mm)
1#小潮	0.62	4	落潮	从上到下递增	1.32	无明显变化	0.197
1#中潮	3.18	6	涨、落潮	从上到下递增	1.46	涨、落急底层增大	0.182
1#大潮	4.47	8	涨、落潮	从上到下递增	1.62	涨、落急底层增大	0.208
4#小潮	0.13	4	落潮	从上到下递增	1.2	无明显变化	0.018
4#中潮	2.16	5	落潮	从上到下递增	1.4	无明显变化	0.014
4#大潮	1.12	6	涨、落潮	从上到下递增	1.41	无明显变化	0.016

4.1. 含沙量与水深相关关系分析

将各水层的时均含沙量与对应水深建立关系，进行相关关系分析，分析结果如图 6 所示。可以看出，1#与 4#垂线的含沙量与水深均呈正相关，除了 4#小潮相关程度较低，为 50%，其余各情况相关度均超过 85%，印证了越近水底含沙量波动越剧烈。同时根据图 3 中 1#、4#垂线同潮型的纵坐标含沙量值可以看出，同水层的含沙量值 1#均大于 4#，结合图 5 中的含沙量波动次数，可以得出 1#的含沙量波动程度比 4#更为剧烈。



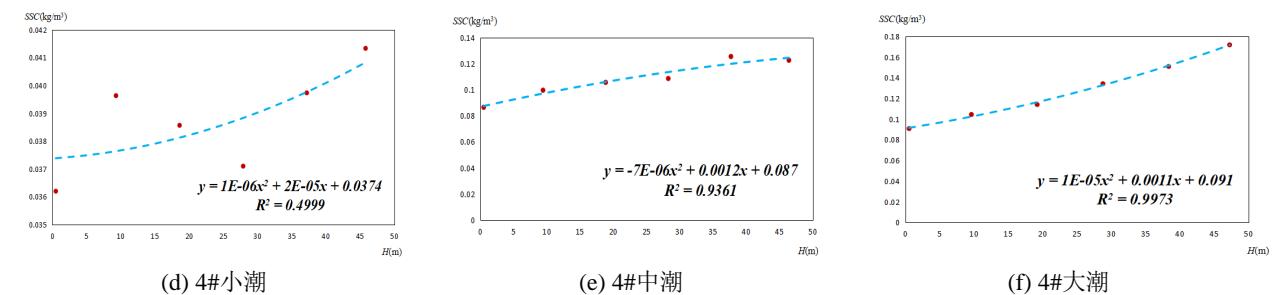


Figure 6. 1# and 4# Correlation between SSC and water depth ((a) 1# Neap tide; (b) 1# Middle tide; (c) 1# Spring tide; (d) 4# Neap tide; (e) 4# Middle tide; (f) 4# Spring tide)

图 6.1#与4#含沙量与水深相关关系((a) 1#小潮; (b) 1#中潮; (c) 1#大潮; (d) 4#小潮; (e) 4#中潮; (f) 4#大潮)

4.2. 含沙量与流速相关关系分析

由于越近水底含沙量波动程度越大，因此底层的含沙量波动更具有代表性，将 1.0 H ($H=0.7\text{ m}$) 水层的逐时含沙量与对应流速建立关系，进行相关关系分析，分析结果如图 7 所示。可以看出，1#的含沙量与流速呈正相关，相关度小潮最大，为 90.5%，中潮与大潮相关度分别为 68.2% 与 64.5%；4#的含沙量与流速呈负相关，相关度大潮最大，为 87.8%，中潮与小潮相关度分别为 69.1% 与 58.2%。说明 1#的含沙量波动峰值主要发生在流速较大的时刻，且在小潮时这一现象尤为明显；4#的含沙量波动峰值主要发生在流速较小的时刻，且在大潮时这一现象尤为明显。主要原因在于 1#水深较小，水流的扰动作用较强，流速与含沙量的波动峰值相对同步，4#水深较大，水流对泥沙的扰动作用相对较弱及滞后，含沙量的波动峰值滞后于流速波动峰值。也与各自的泥沙粒径(d_{50})有一定关系，1#泥沙 d_{50} 较大，因此在流速较大时才会受到扰动而悬扬扩散，这也符合图 4(a)、图 4(c) 中涨急落急时 1# 底层悬沙 d_{50} 有增大趋势的现象；4#泥沙 d_{50} 较小，在流速较小时即可受到扰动而悬扬扩散。此外也与滩槽之间的泥沙输移有一定联系。

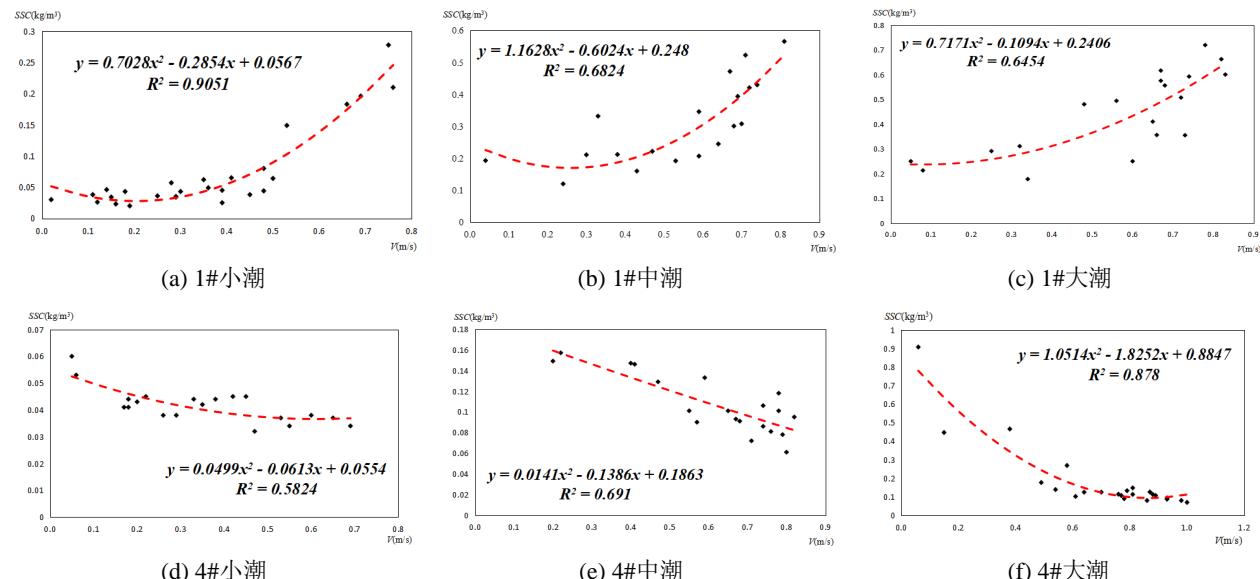


Figure 7. 1# and 4#Correlation between SSC and flow velocity ((a) 1# Neap tide; (b) 1# Middle tide; (c) 1# Spring tide; (d) 4# Neap tide; (e) 4# Middle tide; (f) 4# Spring tide)

图 7: 1#与4#含沙量与流速相关关系((a) 1#小潮; (b) 1#中潮; (c) 1#大潮; (d) 4#小潮; (e) 4#中潮; (f) 4#大潮)

5. 滩槽底层含沙量 HHT 分析

由于 H-0.1 m 层的含沙量波动变化最为剧烈, 因此以 H-0.1 m 层作为代表层进行 HHT 变换分析[9][10][11]

[12] [13]。将滩槽 H-0.1 m 层的含沙量以大、中、小潮测验时间顺序进行合并，得到滩槽两条含沙量波动序列，对这两条序列进行 HHT 变换，分析滩槽含沙量波动频率、振幅、周期等特征规律。

5.1. EMD 分解

首先对滩槽的原始含沙量波动过程信号进行 EMD 分解[14] [15] [16]，得到 5 个内在模函数 IMF1-IMF5 以及 1 个趋势项 Re，如图 8 所示。可以看出，IMF1 是频率最高、波长最短的一个波动，IMF2-IMF5 振幅逐渐减小，频率逐渐降低，波长逐渐增大。但是出现了个别 IMF 的振幅比前一个 IMF 大的现象，这种异常情况是 EMD 分解的常见现象，不会影响整体的变化趋势。从趋势项 Re 可以看出，边滩大潮含沙量波动程度最大，中潮次之，小潮最小；深槽中潮含沙量波动程度最大，大潮次之，小潮最小。

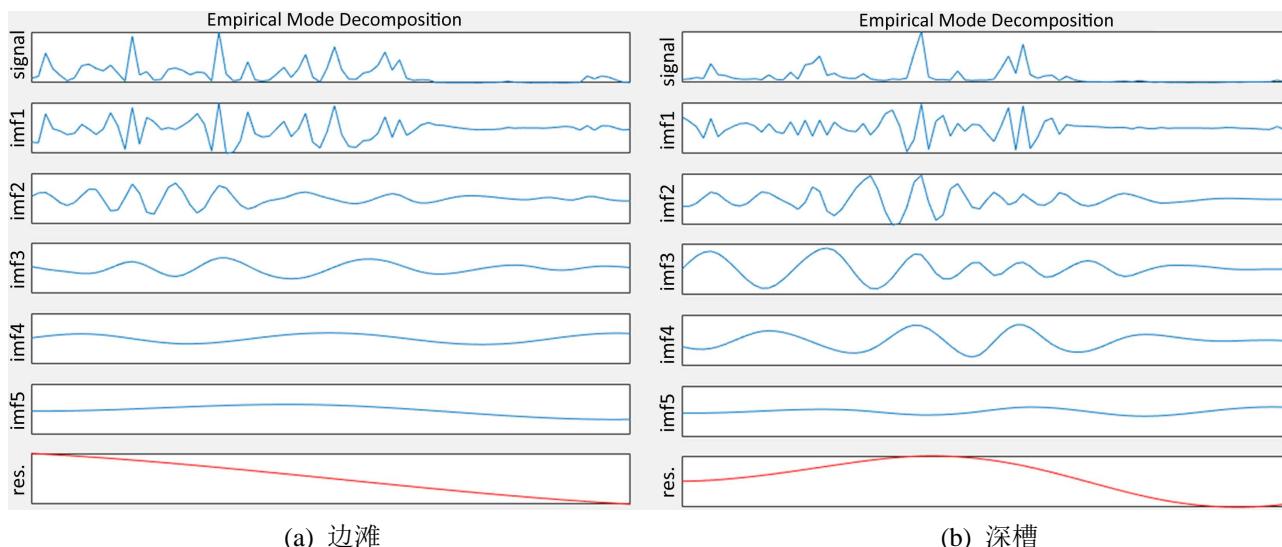


Figure 8. EMD decomposition results of suspended sediment concentration in shoal and groove ((a) Marginal shoal; (b) Deep groove)

图 8. 滩槽含沙量 EMD 分解结果((a) 边滩; (b) 深槽)

5.2. HHT 变换

对滩槽含沙量 EMD 分解得到的内在模函数进行 Hilbert 变换[17] [18] [19]，得到 Hilbert 谱与频率、振幅统计特征值，并利用 IMF1~IMF5 跨零点个数计算了每个内在模函数的平均周期，如表 4 所示。可以看出，滩槽 IMF1~IMF5 中心频率逐渐降低，除个别模态，总体振幅逐渐减小，平均周期逐渐增大；边滩含沙量波动频率略小于深槽，周期大于深槽，振幅远大于深槽；滩槽含沙量的波动能量基本集中在频率小于 0.1 的范围内，0.1~0.5 的高频能量与代表长周期的低频能量相比并不突出，且 IMF3~IMF5 的变化轨迹连续且清晰，说明 28 h、17 h、14 h 波动是边滩含沙量变化的主要模式，14 h、8 h、5 h 波动是深槽含沙量变化的主要模式。

Table 4. Statistical eigenvalue of intrinsic modulus functions after hilbert transform for SSC of shoal and groove

表 4. 滩槽含沙量 HHT 变换后内在模函数的统计特征值

变量	位置	模态	中心频率/Hz	平均振幅	平均周期/h
含沙量	边滩	IMF1	0.22	0.75	1.93
		IMF2	0.12	0.49	4.15
		IMF3	0.06	0.47	13.83

Continued

	边滩	IMF4	0.03	0.39	16.60
		IMF5	0.03	0.46	27.67
含沙量		IMF1	0.27	0.20	1.73
		IMF2	0.14	0.22	3.61
深槽		IMF3	0.09	0.26	4.88
		IMF4	0.08	0.24	7.55
		IMF5	0.03	0.08	13.83

6. 结论

通过现场水文测验，获取了长江口徐六泾滩槽大、中、小潮的流速、含沙量(含沙量)、泥沙粒径(d_{50})等水文数据，对这些数据进行了相关关系分析和 HHT 变换分析，研究了徐六泾滩槽含沙量的波动规律，得出结论：

1) 滩槽含沙量波动峰值多发生在落潮时段，主要原因是潮波在上溯过程中发生变形，徐六泾所处的位置涨潮时间小于落潮时间；

2) 滩槽含沙量波动与流速相关性较大，最大相关度达到 90.5%，总体流速越大含沙量波动越剧烈。小潮含沙量波动程度均较小，边滩大潮含沙量波动程度最大，深槽中潮含沙量波动程度最大，主要原因是小潮时流速较小，水流对泥沙的扰动作用较小；边滩含沙量波动峰值与流速峰值较为同步，含沙量波动峰值主要发生在流速较大的时刻，且在小潮时这一现象尤为明显；深槽含沙量波动峰值则相对滞后于流速峰值，含沙量波动峰值主要发生在流速较小的时刻，且在大潮时这一现象尤为明显。这与各自的水深、泥沙粒径 d_{50} 及滩槽泥沙输移均有一定联系。

3) 滩槽含沙量波动与水深相关性较大，最大相关度达到 99.7%。均为越近水底流速越小，含沙量越大且波动越剧烈，距水底 0.1 m 处的含沙量波动最为剧烈，主要是底部水流对泥沙的扰动使泥沙发生了悬扬与扩散运动。边滩比深槽的含沙量波动峰值更大，次数更多，且根据 HHT 变换分析结果，边滩含沙量波动频率略小于深槽，振幅远大于深槽，说明边滩含沙量波动程度更为剧烈。主要原因是边滩水深较小，水流对泥沙的扰动作用更强；

4) 滩槽含沙量波动与泥沙 d_{50} 相关性较小。边滩悬沙 d_{50} 较小，床沙 d_{50} 较大，中、大潮出现含沙量波动峰值时，底层悬沙 d_{50} 增大；深槽泥沙 d_{50} 均较小，出现含沙量波动峰值时，各层悬沙 d_{50} 均无明显变化；

5) 滩槽含沙量波动模式以长周期为主，28 h、17 h、14 h 波动是边滩含沙量变化的主要模式，14 h、8 h、5 h 波动是深槽含沙量变化的主要模式。边滩含沙量波动振幅与周期比深槽更大，边滩的含沙量主要波动周期大约是深槽的两倍，边滩的含沙量波动规律性相对更弱，主要原因是边滩的水流与泥沙运动更加剧烈与复杂，深槽则相对平稳。

6) 本次研究采用的是徐六泾一次水文测验的结果，对于潮汐河口是否有上述类似的规律还需要利用在不同潮汐河口洪枯季、丰枯平水年等不同水情下多次水文测验的结果进行验证。

基金项目

本研究依托上海市水务局科研项目“长江口徐六泾断面输沙量观测精度提升关键技术”，项目编号为“沪水科 2020-02”。

参考文献

- [1] 柴朝晖, 王茜, 渠庚, 等. 长江口徐六泾节点段河槽稳定性及其影响因素[J]. 长江科学院院报, 2022, 39(1): 10-15+22.

- CHAI Zhaohui, WANG Qian, QU Geng, et al. Channel stability and its influencing factors at Xuliujing node section of the Changjiang Estuary. *Journal of the Yangtze River Academy of Sciences*, 2022, 39(1): 10-15+22. (in Chinese)
- [2] 陈志高, 陈小叶, 王胜平, 等. 长江口徐六泾水域余流及潮流垂直结构变化规律研究[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 2020, 43(3): 288-294.
- CHEN Zhigao, CHEN Xiaoye, WANG Shengping, et al. Study on the change law of residual current and tidal vertical structure in Xuliujing waters of the Changjiang Estuary. *Journal of Donghua University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2020, 43(3): 288-294. (in Chinese)
- [3] 朱庆元, 杜德军, 夏云峰, 等. 长江徐六泾河段白茆小沙近期演变特征分析[J]. 水运工程, 2015(12): 80-85.
- ZHU Qingyuan, DU Dejun, XIA Yunfeng, et al. Analysis on the recent evolution characteristics of Baimao Xiaosha in the Xuliujing reach of the Yangtze River. *Water Transport Engineering*, 2015(12): 80-85. (in Chinese)
- [4] 郑树伟, 程和琴, 石盛玉, 等. 长江大通至徐六泾水下地形演变的人为驱动效应[J]. 中国科学: 地球科学, 2018, 48(5): 628-638.
- ZHENG Shuwei, CHENG Heqin, SHI Shengyu, et al. Human-driven effects of underwater terrain evolution from Datong to Xuliujing in the Yangtze River. *Science in China: Earth Science*, 2018, 48(5): 628-638. (in Chinese)
- [5] 张志林, 王珏, 张东锋, 等. 长江口徐六泾节点整治工程的影响分析[J]. 人民长江, 2022, 53(1): 1-6+12.
- ZHANG Zhilin, WANG Jue, ZHANG Dongfeng, et al. Analysis of the impact of the Xuliujing node renovation project at the Changjiang Estuary. *People's Yangtze River*, 2022, 53(1): 1-6+12. (in Chinese)
- [6] 唐敏炯, 闻卫东, 潘新杰. 新型悬沙采集仪器在长江徐六泾断面的现场测试研究[J]. 中国水运(下半月), 2021, 21(11): 69-70+154.
- TANG Minjiong, WEN Weidong and PAN Xinjie. On-site test research of a new type of suspended sediment collection instrument at Xuliujing section of the Yangtze River. *China Water Transport (Second Half Month)*, 2021, 21(11): 69-70+154. (in Chinese)
- [7] 胡春宏, 张晓明. 黄河泥沙百年演变特征与近期波动变化成因解析[J]. 水科学进展, 2020, 31(5): 725-733.
- HU Chunhong, ZHANG Xiaoming and ZHAO Yang. Centennial evolution characteristics of Yellow River sediment and analysis of the causes of recent fluctuations. *Advances in Water Science*, 2020, 31(5): 725-733. (in Chinese)
- [8] 边淑华, 胡泽建, 曾明, 等. 砂质海岸风浪作用下水体含沙量变化及其影响因素分析[C]//第十五届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集. 北京: 海洋出版社, 2011: 310-314.
- BIAN Shuhua, HU Zejian, ZENG Ming, et al. Analysis of changes in water sediment content and its influencing factors under the action of wind and waves on sandy coasts. In *Proceedings of the 15th China Ocean (Shore) Engineering Symposium*. Beijing: Ocean Press, 2011: 310-314. (in Chinese)
- [9] HUANG, N. E., SHEN, Z., LONG, S. R., et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A*, 1998, 454: 899-955.
<https://doi.org/10.1098/rspa.1998.0193>
- [10] CUMMINGS, D. A., IRIZARRY, R. A., HUANG, N. E., et al. Travelling waves in the occurrence of dengue hemorrhagic fever in Thailand. *Nature*, 2004, 427: 344-347. <https://doi.org/10.1038/nature02225>
- [11] VELTCHEVA, A. D., SOARES, C. G. Identification the components of wave spectra by the Hilbert Huang transform method. *Applied Ocean Research*, 2004, 26: 1-2. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2004.08.004>
- [12] LIANG, H. L., BRESSLER, S. L., et al. Empirical mode decomposition: A method for analyzing neural data. *Neurocomputing*, 2005, 65-66: 801-807. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2004.10.077>
- [13] ZHANG, R., WANG, Y. P. and PAN, S. M. Variations of suspended sediment concentrations and loads into the estuary area from Yangtze River in recent 50 years. *Marine Science Bulletin*, 2008(2): 1-9.
- [14] COLOMINAS, M. A., SCHLÖTTHAUER, G. and TORRES, M. E. Improved complete ensemble EMD: A suitable tool for biomedical signal processing. *Biomedical Signal Processing and Control*, 2014, 14: 19-29.
<https://doi.org/10.1016/j.bspc.2014.06.009>
- [15] MANDIC, D. P., REHMAN, N. U., WU, Z. H., et al. Empirical mode decomposition-based time-frequency analysis of multivariate signals. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2013, 30(6): 74-86. <https://doi.org/10.1109/MSP.2013.2267931>
- [16] GILLES, J. Empirical wavelet transform. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2013, 61(16): 3999-4010.
<https://doi.org/10.1109/TSP.2013.2267931>
- [17] ZHOU, Z. S., LUO, Y. T. Research on Hilbert Huang transform in time-frequency analysis of seismic signals. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2016, 38(1): 59-66.
- [18] LIU, L. B., LUO, M. K. and LAI, L. A new Hilbert-Huang transform associated with linear canonical transform. *Journal of Sichuan University. Natural Science Edition*, 2016, 53(5): 980-982.
- [19] CHEN, G., WANG, P. B., BAO, Y. J., et al. Research on the detection of weak transient passive fish acoustic signals based on Hilbert-Huang transform. *Marine Sciences*, 2016, 40(10): 91-96.