



巢湖风浪特征及泥沙运动对口门航道淤积的影响^{*}

徐 华¹, 薛 伟¹, 闫杰超², 汪 昊³, 沈保根⁴

(1. 南京水利科学研究院, 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029;
2. 中铁大桥勘测设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430050; 3. 安徽省引江济淮集团有限公司, 安徽 合肥 230041;
4. 安徽省交通勘察设计院有限公司, 安徽 合肥 230011)

摘要: 针对引江济淮工程巢湖口门航道的整治工程问题, 通过 MIKE3 软件建立巢湖波浪泥沙三维数值模型, 结合巢湖湖流、波浪及泥沙的现场观测资料, 对巢湖风浪特征及泥沙运动对口门航道淤积的影响进行研究。着重分析巢湖湖区的风浪特性及白石天河口门与马尾河航道风速与波高的响应关系、有效波高与底部剪切应力的响应关系, 并探讨与分析波浪湖流作用下巢湖泥沙输移对湖区口门航道的影响。结果表明, 巢湖波浪特性与其风况条件密切相关, 其近岸泥沙主要以“波浪掀沙、水流输沙”的形式运动, 将对巢湖口门航道的淤积产生直接影响。

关键词: 波浪; 泥沙; 现场观测; 剪切应力; 航道; 淤积

中文分类号: U 656.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)06-0115-06

Influence of wind and wave characteristics and sediment movement on sediment deposition of entrance waterway in Chaohu Lake

XU Hua¹, XUE Wei¹, YAN Jie-chao², WANG Hao³, SHEN Bao-gen⁴

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, The State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources & Hydraulic Engineering, Nanjing 210029, China; 2. China Railway Major Bridge Reconnaissance & Design Institute Co., Ltd., Wuhan 430050, China; 3. Anhui Provincial Group Limited for Yangtze-to-Huaihe Water Diversion, Hefei 230041, China; 4. Anhui Transport Survey & Design Institute Co., Ltd., Hefei 230011, China)

Abstract: Aiming at the problem of the regulation project of estuary channel of Chaohu Lake in the Yangtze River to Huaihe River project, we adopt the software of MIKE3 to establish a three-dimensional numerical model of the wave and sediment in Chaohu Lake, and study the effects of wave characteristics and sediment movement on the sedimentation of estuary channel in Chaohu Lake combining with the on-site observation data of the lake flow, wave and sediment. We analyze the wave characteristics of Chaohu Lake and the response relationship between wind speed and wave height of Baishitian River and Mawei River estuary channel, the response relationship between effective wave height and bottom shear stress, and discuss and analyze the influence of Chaohu Lake sediment transport on the estuary channel under wave and lake flow. The results show that the wave characteristics of Chaohu Lake are closely related to its wind conditions, and the nearshore sediment mainly moves in the form of “lifting the sand by waves and transporting the sand by lake flow”, which will have a direct influence on the deposition of Chaohu Lake estuary channel.

Keywords: wave; sediment; field measurement; shear stress; channel; deposition

收稿日期: 2020-08-24

^{*}基金项目: 国家重点研发计划项目(2016FYC0402307); 国家自然科学基金项目(51779149); 引江济淮工程科研项目(YJJH-YJJC-ZX-20191106220)

作者简介: 徐华(1980—), 博士, 教授级高级工程师, 从事河口海岸泥沙工程研究。

风浪作为湖流运动、泥沙起动及输运的主要动力，一直是浅水湖泊研究的重点。国内对湖泊研究主要集中在富营养化对湖泊环境造成的水质问题，对湖泊风浪作用下的波浪特征及泥沙特性研究较少。对于浅水湖泊波浪特性研究，许遐祯等^[1]分析太湖均匀风场作用下的频谱特性；赵津京等^[2]通过 MIKE21 SW 模型研究不同风速条件下太湖波浪场的波浪要素变化特性；孙卫红等^[3]通过三维水动力数学模型模拟不同风向下太湖风生流及其运动特性；王震等^[4]通过 SWAN 模型模拟不同季节特征风向下太湖湖区的风浪要素特征；李一平等^[5]研究太湖湖流对波浪的影响机制。从上述湖泊波浪研究可知，浅水湖泊主要受波浪动力影响，且主要与风速、风向、水深及湖流有关。对于浅水湖泊泥沙特性研究，邵宇阳等^[6]研究太湖梅梁湾口波浪作用下的近底部湍流特性及剪切应力特性，为底泥再悬浮与絮凝扩散提供研究基础；王良华^[7]则对巢湖杭埠河口门航道淤积特性展开研究，认为湖区水体悬沙含量直接与风况相关，尤其对近岸浅水区的泥沙掀动起到关键作用；周益人等^[8]研究认为，太湖航道发生淤积的泥沙主要来自周围滩地在风成波和风成流作用下的搬

运，属于典型的“波浪掀沙、水流输沙”状况。目前，国内浅水湖泊波浪泥沙特性研究主要集中于太湖及其他湖泊，而对巢湖波浪特性研究较少，且对巢湖波浪作用下泥沙运动研究也较少。巢湖作为串联长江与淮河的重要枢纽，随着“引江济淮”工程的批准，其湖区航道等级亟待升级，开展巢湖波浪泥沙特性研究已迫在眉睫。因此，为配合巢湖湖区航道工程可行性研究，本文通过 MIKE3 软件建立的三维波浪泥沙数值模型分析实测风速条件下巢湖波浪特性，并探讨分析其对湖区口门航道的淤积影响。

1 现场观测概况

现场观测时间为 2016-10-21T12:00—2016-10-23T12:00，主要对巢湖马尾河口附近的湖流流速、波浪、水体含沙量、底质进行了 2 d 的现场连续观测工作。其中，测站处波浪、垂向分层水流流速、水体含沙量分别采用波高仪、声学多普勒流速剖面测量仪、浊度仪等进行测量。现场观测期间，巢湖平均水位约 7.3 m，略高于正常蓄水位。通过坐底系统抛投点位，分别位于派河口、白石天河口与马尾河口，如图 1 所示。

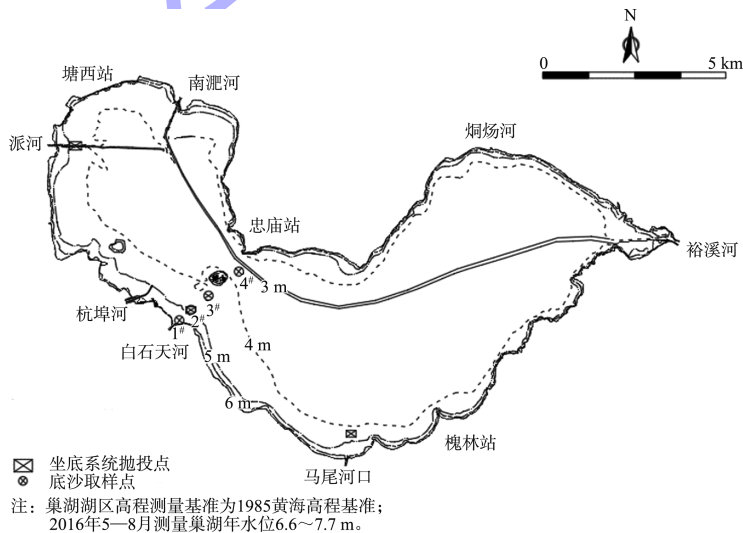


图 1 现场测点布置

通过巢湖庐江气象站得到测验期间实测风速及风向资料。由于气象站所获得的风速资料为陆

地数据，因此需要进行风速的高度和陆-水订正，根据《堤防防浪护坡设计》^[9] 换算到湖面以上 10 m

高度的风速如图 2 所示。

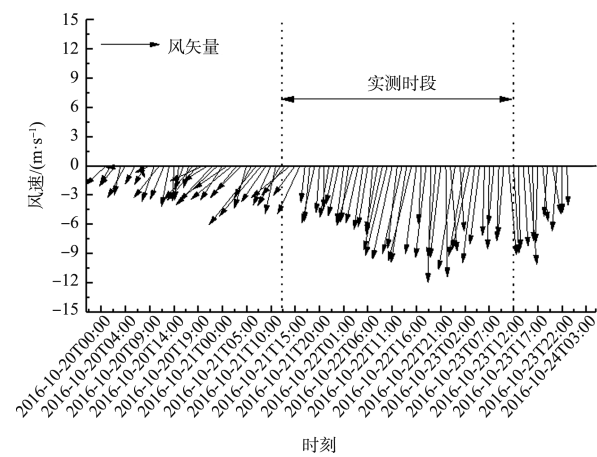


图 2 实测期间风速风向

2 模型构建及验证

2.1 模型构建

本文采用垂向分为 5 层的三维数值模型研究巢湖风浪作用下的马尾河口区域的水沙特性，模型包含 MIKE3 中的水动力子模块、波浪子模块及泥沙子模块，其中水动力模块(HDM)主要设置风速与水位，其中湖底粗糙度 k_s 取 0.5 mm；波浪模块(SWM)采用第三代全谱模型，谱分布方向 θ 空间的谱方向步长取为 22.5° ，谱频率 σ 最小值为 0.055 Hz，频率因子取 1.1，主要考虑辐射应力对湖流水沙动力产生影响；泥沙模块(MTM)主要考虑波流作用下泥沙的运动，其中泥沙沉降速度根据实测底沙中值粒径与 Stokes 公式计算，取 0.4 mm/s。其基本控制方程见相关文献[10-11]。

2.2 模型验证

通过实测期间坐底系统抛投位置的有效波高数据，对逐时有效波高进行验证，结果见图 3。可以看出，派河坐底位置有效波高较白石天河与马尾河坐底位置的有效波高小很多，最大值约 0.1 m，而白石天河与马尾河坐底位置有效波高达 0.4~0.5 m，这与风向、吹程以及水域条件等密切相关。白石天河与马尾河吹程较长，且水域开阔，有利于波浪的发展，因此有效波高较大；相反，派河坐底位置有效波高则较低。根据验证结果可

知，除个别时刻误差较大外，模拟结果与实测结果符合良好。

同时，在 2016-10-20T20:00—2016-10-23T12:00 对巢湖马尾河口、白石天河河口及兆河河口的含沙量进行逐时观测。派河、白石天河、兆河实测平均含沙量分别为 0.45、0.90、1.40 kg/m³；数值模型计算平均含沙量分别为 0.33、0.75、1.32 kg/m³。模拟结果总体验证良好。

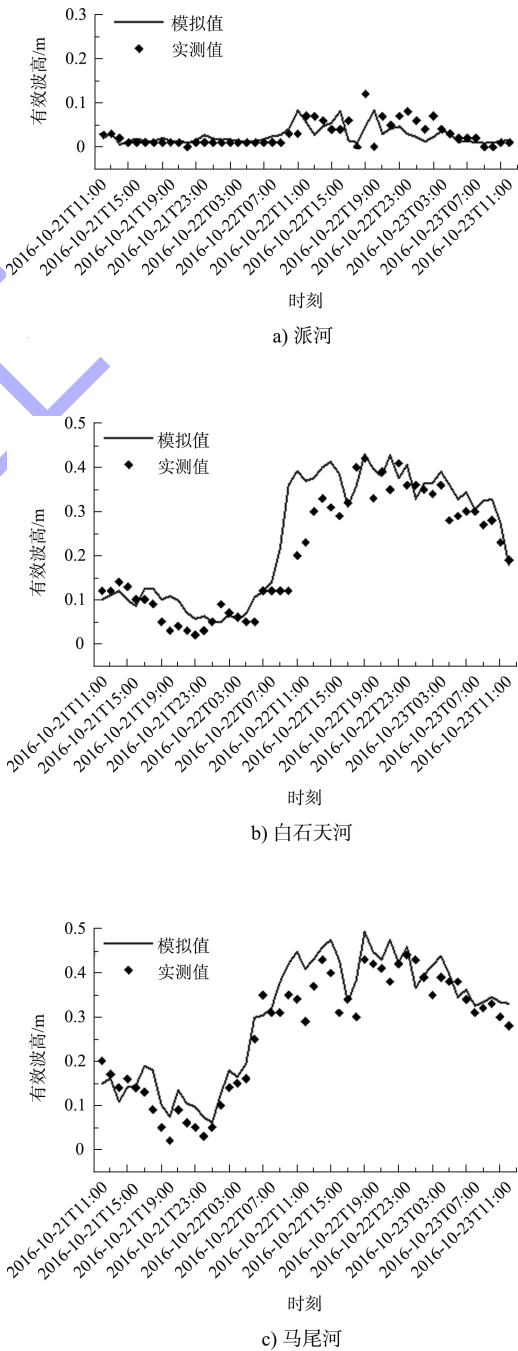


图 3 坐底位置有效波高验证

3 模拟结果及分析

3.1 巢湖波浪特性

由图 2 可知，在 2016-10-21T12:00—2016-10-22T06:00 现场观测期间风速及风向变化不大，风速平均值约 5.9 m/s，风向基本在 N 偏 E 向 20°左右。在 2016-10-22T07:00—2016-10-23T12:00 现场观测期间风速及风向也变化不大，风速平均值约 9.1 m/s，风向基本也在 N 偏 E 向 20°左右。因此，可将现场观测期间的 2016-10-21T22:00、2016-10-22T18:00 分别作为 2016-10-21T12:00—2016-10-22T06:00、2016-10-22T07:00—2016-10-23T12:00 的典型风况，研究巢湖湖区波浪有效波高分布特性。典型风速风向的巢湖有效波高分布见图 4。

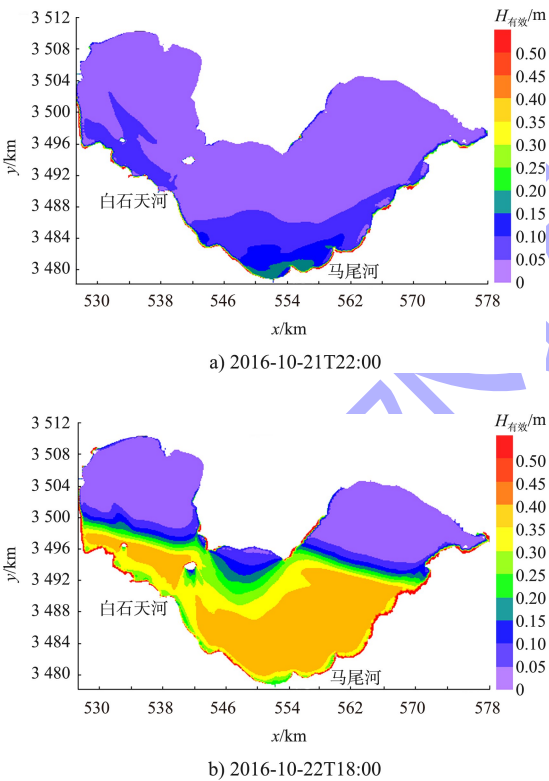


图 4 典型风速风向巢湖有效波高分布

巢湖湖区有效波高的分布与风速、风距、风向及水深等因素有关。现场观测期间风速、风向可被简化为两个区间。由上述可知，两个区间风向基本一致，风速不同。由图 4 可知，在 N 偏 E 向 20°风向作用下，巢湖波浪分布呈上风区有效波高小于下风区的分布规律。当风速从 5.9 m/s 增大至 9.1 m/s 时，有效波高在下风区明显增大。同

时，以白石天河航道 1#~4#特征点有效波高随风速变化为例(图 5)，随着风速的增大，特征点有效波高相应增大。由于 1#特征点位于近岸处，可能存在波浪破碎造成波高衰减，2#~4#特征点处有效波高随着风距的增加相应增大。

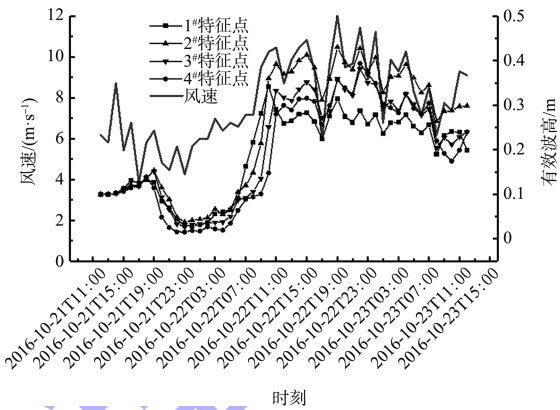


图 5 白石天河航道特征点有效波高与风速响应关系

3.2 口门航道特征位置底部切应力特性

由上述可知，白石天河与马尾河口门坐底位置有效波高明显大于派河口门坐底位置有效波高。通过太湖波浪对湖泥沙悬浮及输移规律研究发现，其底部切应力与有效波高有着密切的响应关系，而底部切应力的大小与泥沙的起动及落淤有直接的关系^[12]。白石天河与马尾河口门作为巢湖关键的通航节点，其口门航道的淤积情况关系到整个航道工程的正常运行。

以白石天河与马尾河为例，其口门航道附近泥沙起动将可能主要受波浪与湖流共同作用，其波流作用下的底部切应力 τ_{wc} 可借鉴 Grant Madsen 波浪边界层模型来简化求得^[13]：

$$\tau_{wc} = \tau_w + \tau_c \tag{1}$$

式中： τ_{wc} 为波流作用下的底部切应力； τ_w 为波浪扰动作用下的底部切应力； τ_c 为湖流作用下的底部切应力。

对于波浪扰动产生的底部切应力可采用如下方法进行计算^[14]：

$$\tau_w = \rho f_w u_m^2 \cos^2(2\pi t/T_s) \tag{2}$$

式中： τ_w 为波浪扰动产生的底部切应力； ρ 为湖水密度； f_w 为波浪底摩阻系数，本文参照文献[12]取

0.004; t 与 T_s 分别为时间、有效周期, 其中本文时间以观测开始作为 $t=0$; u_m 为因波扰动产生的底部最大水平速度, 通常采用下式计算:

$$u_m = \pi H_s / [T_s \sinh(2\pi h / L_h)] \tag{3}$$

式中: H_s 为有效波高; h 为水深; L_h 为水深 h 处的波长, 其可通过下式迭代得到:

$$L_h = g T_s^2 \tanh(2\pi h / L_h) / 2\pi \tag{4}$$

对于湖流产生的底部切应力可采用如下方法进行计算^[15-16]:

$$\tau_c = \rho f_c u_b^{*2} \tag{5}$$

式中: τ_c 为湖流产生的底部切应力; ρ 为湖水密度; f_c 为底摩阻系数, 为简化计算, 本文参照文献[12]也取 0.004; u_b^* 为摩阻流速, 可采用下式计算所得:

$$u_b^* = \kappa u_z / [\ln(30z / \Delta)] \tag{6}$$

式中: κ 为卡曼常数, 通常取 0.4; u_z 为湖底以上 z 高度处的参考流速, 本文以水下 0.8h 水深位置作为参考流速(距离湖底高度为 0.2h); Δ 为湖底粗糙高度, 通常可取床底沙质中值粒径, 则 $\Delta = 0.02 \text{ mm}$ ^[17]。本文采用 $\Delta = k_s / 30$ 方法计算, 得 $\Delta = 0.017 \text{ mm}$, 并忽略波浪的影响作用。

白石天河与马尾河口门有效波高明显大于派河河口, 故以白石天河与马尾河口门底座位置为例, 分析巢湖湖底切应力特性。由上述理论计算分析可知, 由于底座位置距离口门仍有一定距离, 且其底层流速(0.8h 水深位置)仍较小, 因此底部切应力主要以波浪作用为主, 且湖流引起切应力与波浪扰动引起切应力相比相差 2~4 个量级。两个口门坐底位置有效波高与底部切应力的响应关系见图 6。可以看出, 白石天河口门与马尾河坐底位置有效波高与底部切应力之间有着较为密切的响应关系。同时, 白石天河与马尾河口门坐底处底部切应力随着有效波高的增大而增大, 除了后续风速增大时间段, 个别时刻底部切应力变化较大外, 其他时刻之间响应关系良好, 且主要由于波浪扰动造成的底部切应力量级基本在 $10^{-2} \sim 10^{-1}$ 范围内。

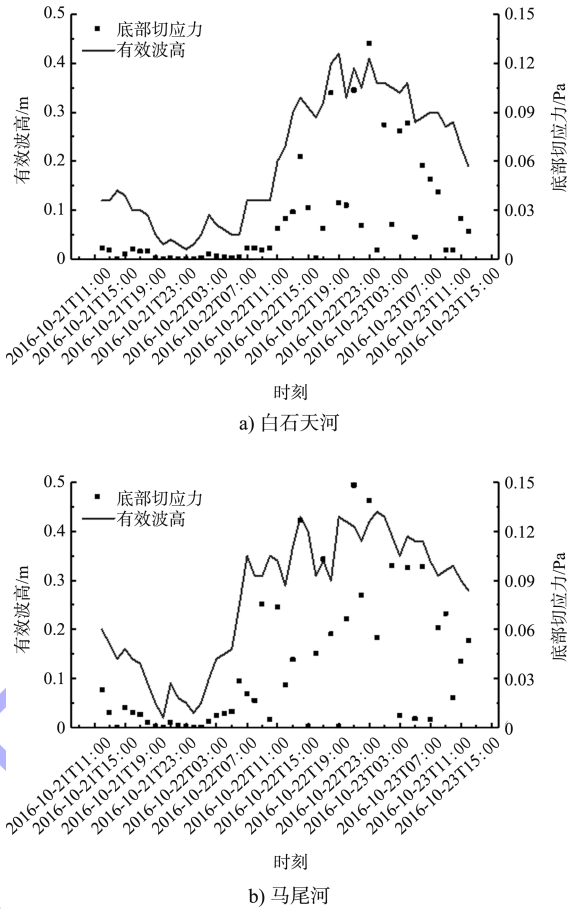


图 6 两口门坐底有效波高与底部切应力的响应关系

3.3 口门航道泥沙运动特性

以 2016-10-22T18:00 的数值模拟结果分析巢湖口门悬沙及泥沙输移规律。如图 7a) 所示, 白石天河口门坐底位置悬沙浓度在 $0.4 \sim 0.8 \text{ kg/m}^3$, 马尾河口门坐底位置悬沙浓度在 $1.6 \sim 2.8 \text{ kg/m}^3$ 。根据现场观测悬沙浓度可知, 白石天河口门底座位置底层泥沙浓度均值约为 0.8 kg/m^3 , 马尾河口门底座位置底层泥沙浓度均值约为 1.5 kg/m^3 , 说明泥沙模型计算结果良好。巢湖悬沙浓度较大值主要分布在南侧沿岸, 其主要原因是波浪在下风区近岸区破碎造成的泥沙掀动, 同时, 马尾河口门悬沙浓度及悬沙区的范围大于白石天河口门, 这与沿岸湖流输沙有关。如图 7b) 巢湖底层流速矢量可知, 当波浪行至近岸, 波浪产生破碎, 造成泥沙掀动, 其沿岸流将泥沙从白石天河口门输移至马尾河口门。因此, 在引江济淮口门航道开挖过程中不仅关注波浪在近岸破碎的泥沙掀动, 也应关注沿岸流对泥沙的输移问题, 以减少泥沙对航道淤积的影响。

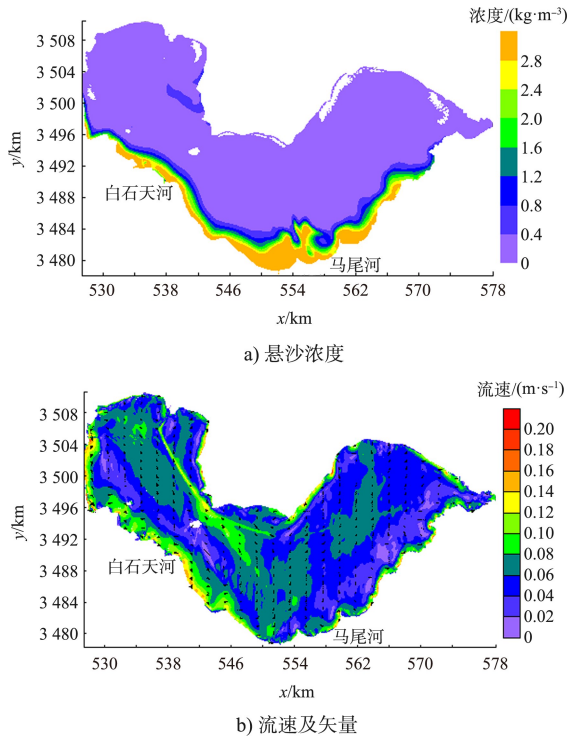


图 7 巢湖悬沙浓度、流速及矢量分布

4 结论

1) 通过模拟现场观测期间风况条件下巢湖湖区波浪特性发现, 在两个典型时段风向变化不大, 风速变化较大情况下, 巢湖有效波高呈上风区较小、下风区较大的分布规律, 且随着风速的增大, 有效波高也相应增大。

2) 通过对白石天河与马尾河口门航道坐底处波浪要素的分析可知, 巢湖泥沙运动主要受波浪作用, 同时发现有效波高与底部剪切应力有着密切的响应关系, 且底部切应力数量级基本在 $10^{-2} \sim 10^{-1}$ 范围内。

3) 通过对巢湖湖区实测风向下波浪场、湖流场及含沙量场综合分析可知, 巢湖泥沙悬浮区主要分布在湖南侧近岸区, 其主要原因是波浪在近岸区变形破碎, 造成近岸区泥沙快速扰动, 泥沙浓度急剧增加。同时, 根据湖流运动特征可知, 风生湖流在沿岸增大明显, 引起近岸泥沙输移, 其泥沙输运过程中可能对白石天河及马尾河口门疏浚航槽造成的淤积影响, 须引起密切关注。

参考文献:

[1] 许遐祯, 陶蓉茵, 赵巧华, 等. 大型浅水湖泊太湖波浪特征及其对风场的敏感性分析[J]. 湖泊科学, 2013, 25(1): 55-64.

[2] 赵津京, 李继选. 定常风作用下太湖波浪场数值模拟[J]. 水利与建筑工程学报, 2017, 15(1): 204-209.

[3] 孙卫红, 逢勇, 姚琪. 三维水动力学方程模拟太湖风生流[J]. 水资源保护, 2003, 19(3): 27-30.

[4] 王震, 吴挺峰, 邹华, 等. 太湖不同湖区风浪的季节变化特征[J]. 湖泊科学, 2016, 28(1): 217-224.

[5] 李一平, 逢勇, 刘兴平. 太湖湖流对波浪的影响机制研究[J]. 水利学报, 2007(S1): 303-308.

[6] 邵宇阳, 朱正雷, 张健玮, 等. 波浪作用下太湖梅梁湾口近底部湍流特征[J]. 南京大学学报(自然科学), 2016, 52(1): 125-132.

[7] 王良华. 巢湖支流口门区湖滩段航道整治工程[J]. 水运工程, 1998(1): 32-35.

[8] 周益人, 肖惠兴, 潘军宁, 等. 波浪作用下太湖底泥试验及航道回淤分析[J]. 湖泊科学, 2003, 15(4): 305-312.

[9] 余广明. 堤坝防浪护坡设计[M]. 北京: 水利电力出版社, 1987.

[10] 周杰, 周锋, 江兴南, 等. 太湖风生环流及黏性泥沙输运的三维数值模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2010, 38(5): 489-494.

[11] DHI Water & Environment. MIKE21 & MIKE3 FLOW MODEL FM hydrodynamic and transport module scientific documentation[R]. Denmark: DHI Water & Environment, 2013.

[12] 罗淑葱, 秦伯强. 太湖波浪与湖流对沉积物再悬浮不同影响的研究[J]. 水文, 2003, 23(3): 1-4.

[13] GRANT W D, MADSEN O S. Combined wave and current interaction with a rough bottom[J]. Journal of geophysical research atmospheres, 1979, 84(4): 1797-1808.

[14] SHENG Y P, LICK W. The transport and resuspension of sediments in a shallow lake[J]. Journal of geophysical research atmospheres, 1979, 84(4): 1809-1826.

[15] HAWLEY N. Sediment resuspension near the Keweenaw Peninsula, Lake Superior during the fall and winter 1990-1991[J]. Journal of great lakes research, 2000, 26(4): 495-505.

[16] GLENN S M, GRANT W D. A suspended sediment stratification correction for combined wave and current flows[J]. Journal of geophysical research atmospheres, 1987, 92(8): 8244-8264.

[17] 沈保根, 徐华, 肖子平, 等. 风浪对引江济淮工程马尾河口航道影响研究初探[J]. 水道港口, 2018, 39(4): 451-457.

(本文编辑 王璁)