

南黄海辐射沙脊群潮汐通道水流输运示踪模拟

姚 静¹, 陶建峰^{2,3}, 杨 洁³, 李云良¹

(1. 中国科学院流域地理学重点实验室 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 江苏 南京 210008; 2. 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; 3. 河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098)

摘 要: 将三维水力模型 MIKE3 耦合粒子追踪模型 模拟辐射沙脊群海域西洋、陈家坞槽、苦水洋、黄沙洋四个主要潮汐通道和沙脊群顶点处的粒子运动轨迹, 探讨潮汐通道间的水流运动、物质输运及交换特性。结果表明: 潮汐通道内涨潮期表层粒子净位移大于落潮期; 小潮期间, 表、底层粒子运动轨迹相似, 主要为潮汐通道内的往复运动; 大潮期间, 各通道粒子轨迹主要为往复运动和顺时针螺旋状横向运动两种形式, 不同通道或同一通道的表、底层轨迹均不同, 且不同的释放时刻粒子越出通道的程度也不同, 表层粒子的运动范围更大, 而底层相对集中。粒子运动轨迹由西洋通道的往复流和其余区域不同程度的旋转流所控制。与小潮相比, 大潮期间潮汐通道的水体垂向环流及水体交换更为明显。通道内的水流横向输运能力主要取决于横向环流流速与纵向主流流速的相对强弱, 同时也受局部地形影响。辐射沙脊群顶点处粒子大多数向岸, 少量向南、北沿岸运动, 表明近岸水流和物质迁移的主要向岸趋势。本研究结果可为辐射沙脊群海域水环境的管理提供理论支撑。

关键词: 辐射沙脊群; 潮汐通道; MIKE 3 模型; 拉格朗日粒子示踪

中图分类号: X143 文献标识码: A 文章编号: 1007-6336(2017)03-0406-10

DOI:10.13634/j.cnki.mes.2017.03.014

Modelling flow transport based on the particle tracking in tidal channels of radial sand ridges in south Yellow Sea

YAO Jing¹, TAO Jian-feng^{2,3}, YANG Jie³, LI Yun-liang¹

(1. Key Laboratory of Watershed Geographic Sciences, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: A three-dimensional hydrodynamic model coupled with a Lagrangian particle tracking model was applied at the Xiyang, Chenjiawucao, Kushuiyang, and Huangshayang tidal channels in the radial sand ridges area of the South Yellow Sea, in order to investigate the flow and mass exchange characteristics between different channels. Results showed that net displacements of surface particles in the flood tide were larger than that in the ebb tide. During the neap tides, the particles in both the surface and bottom of four channels were limited in respective channels characterized by similar reciprocating trajectories. During the spring tides, the particles moved along reciprocating straight lines or in a clockwise spiral. The trajectories of particles changed across different channels, layers and at different releasing time. The particle movement range of the surface layer was larger than that at the bottom layer. The hydrodynam-

收稿日期: 2016-06-03, 修订日期: 2016-08-22

基金项目: 国家自然科学基金 (51409093); 江苏省自然科学基金 (BK20131057, BK20150818)

作者简介: 姚 静 (1980-), 女, 山东龙口人, 博士, 主要研究方向为水动力及物质输运数值模拟, E-mail: jyao@niglas.ac.cn

通讯作者: 陶建峰, E-mail: aoetao@hhu.edu.cn

ic characteristics of the radial sand ridges are responsible for the significant differences of transport characteristics in different channels. The Xiyang channel is controlled by the reciprocating flow while other regions are dominated by the swirl flow of the different degree. The vertical circulation and water exchange in tidal channels were more obvious in spring tides compared to those in neap tides. The crosswise transport of the particle depended on the relative flow velocity of the vertical circulation. The special geomorphology also played an important role. Most particles of the vertex of sand ridges were shoreward, only a few were along the south and north shore, indicating the shoreward tendency of the water movement and mass transport. The outcomes of this study may provide theoretical support for environment management regarding radial sand ridges.

Key words: radial sand ridges; tidal channel; MIKE 3 FM; Lagrangian particle tracking

南黄海辐射沙脊群分布于江苏北部海岸带北侧、黄海南部陆架海域,南北长约 200 km,东西宽约 140 km。大体上以弶港与洋口港之间的黄沙洋为主轴,向北、东北、东和东南方向呈褶皱状向海辐射,由 70 余条大小、形状不等的沙脊和潮流通道组成,水深介于 0 ~ 25 m 之间^[1]。水深超过 10 m 的大型潮汐通道有 11 条,自北向南依次为:西洋、小夹槽、小北槽、大北槽、陈家坞槽、草米树洋、苦水洋、黄沙洋、烂沙洋、网仓洪和小庙洪(图 1)。其中,西洋、黄沙洋、烂沙洋和小庙洪为近岸深水通道^[2]。南黄海辐射沙脊群海域为正规半日潮^[3],受东海前进潮波和南黄海旋转潮波控制而形成的辐射状潮流场,是形成和维持辐射沙脊群的主要动力^[4-5]。据实测资料显示,该海域为强潮区,潮差大、潮流急,潮流场基本以弶港为中心,经由潮汐通道辐聚辐散。

近年来,随着沿海地区的经济发展和人口增长,工农业污水向海排放日益增加,对海洋环境造成一定的影响。据报道^[6],三、四类水质的海域占江苏省海域面积的 27.7%,劣于四类水质的海水占到了全省总海域面积的 9.4%,主要超标物为无机氮。同时围垦、建港等大工程的实施,引起的泥沙或污染物输移问题尚需论证,这些物质在潮动力和滩槽相间的复杂地形共同作用下如何输移、扩散,依赖于水流空间输运及交换特性的准确模拟及评估。

受复杂地形和潮波的影响,各潮汐通道的水动力条件不尽相同。针对某个特定潮汐通道的水流输运特性研究已屡见不鲜。西洋作为辐射沙脊群北部最大的靠岸深水潮汐通道,其复杂的地貌特征和水流运动特性已引起许多学者关注。刘运令^[7]等通过实测资料分析了西洋 2008 年春季的水体分层情况及与悬沙通量的关系,指出西洋水

道内悬沙以欧拉余流向岸输运为主。徐凡^[8]等通过二维水动力模拟和粒子追踪模型,计算了西洋水域的质点运动轨迹。结果显示,水质点主要沿主槽方向运动,当到达沙脊区域,会发生偏移,拉格朗日余流方向指向南面。倪文斐^[9]等通过水文资料和底质样品,分析了辐射沙脊群中部离岸型潮流通道的苦水洋的沉积动力特征,指出该潮汐通道潮流作用较强,水道内沉积物在近岸段以悬移质形式向岸净输移,但离岸段以向海输运为主。董佳^[10]等对黄沙洋末端进行潮流数值模拟与泥沙淤积计算,分析此处建港条件。

尽管辐射沙脊群海域潮汐通道的水流输运特性研究并不少见,但大多是关于单个通道的特性模拟。关于水流及所携带的泥沙或污染物如何在各个通道之间输运或交换,以怎样的方式迁移,各通道之间及通道内表、底层迁移路径的差异等问题涉及的还较少。本文基于三维潮流数值模拟结果,结合粒子示踪方法,选取辐射沙脊群海域四个潮汐通道及沙脊顶点,模拟了各处粒子释放后的运动轨迹,对比大、小潮期间不同区域表、底层粒子运动轨迹的差异,分析可能的原因。取得的成果可为研究潮汐通道中泥沙、污染物等的迁移提供理论参考,对海洋环境的保护具有一定的指导意义。

1 材料与方法

1.1 模型描述

三维水动力模块采用基于有限体积法的 MIKE 3 模型。MIKE 3 模型是丹麦水力研究所(Danish Hydraulic Institute, DHI)开发的系列水动力学软件之一,该模型可用于模拟河流、湖泊、河口、海湾、海岸等大型水体流场特征^[11]。模型建立在静压假定和 Boussinesq 近似的 N-S 方程基础

上,水平方向采用三角形网格、垂向采用 σ 坐标系。水平扩散系数使用 Smagorinsky 公式^[12]进行计算,垂向紊动系数采用标准的 κ - ε 紊流闭合模型。因其具有灵活的网格剖分及加密特点,能够很好适应辐射沙脊群海域复杂的水下地形特点。该模型已成功应于不同国家及地区的水流数值模拟中^[13-15]。

在三维水动力模块的基础上,耦合了基于拉格朗日的粒子追踪模块。粒子追踪模块可模拟粒子在水体对流、扩散作用下随时间运动过程和整个模拟时段内的运动轨迹。其中,对流项由流场确定,根据拉格朗日原理对时间和空间内插,生成网格节点间的流速矢量,而扩散项是一系列随机过程的结果。具体的粒子传输方程为:

$$\bar{x}_{i+1} = \bar{x}_i + \bar{V} \cdot \Delta t + D \cdot \bar{V} + \bar{\gamma} \quad (1)$$

$$\text{其中 } \bar{V} = \begin{pmatrix} u_x \\ u_y \\ -V_{setl} \end{pmatrix}, \bar{\gamma} = \begin{pmatrix} \Delta D_0 \\ \Delta D_0 \\ \Delta D_{0w} \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$D = \frac{1}{|U|} \begin{pmatrix} \Delta D_L & -\Delta D_T & 0 \\ \Delta D_L & \Delta D_T & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, |\bar{U}| = \sqrt{u_x^2 + u_y^2} \quad (3)$$

式(1)~式(3)中 \bar{x}_i 为粒子在第*i*时间步时的三维坐标(m); Δt 为时间步长(s); u_x 、 u_y 为水平流速(m/s); V_{setl} 为沉降速度(m/s); D 为扩散位移,由以下几个参数体现; ΔD_L 为紊流引起的纵向扩散; ΔD_T 为横向扩散; ΔD_0 为分子扩散; ΔD_{0w} 为表面风引起的扩散,表达式如下:

$$\Delta D_L = \sqrt{6 \cdot D_L \cdot \Delta t} \cdot \left([RND_1]_0^1 - \frac{1}{2} \right) \cdot 2 \quad (4)$$

$$\Delta D_T = \sqrt{6 \cdot D_T \cdot \Delta t} \cdot \left([RND_2]_0^1 - \frac{1}{2} \right) \cdot 2 \quad (5)$$

$$\Delta D_0 = \sqrt{6 \cdot D_0 \cdot \Delta t} \cdot \left([RND_3]_0^1 - \frac{1}{2} \right) \cdot 2 \quad (6)$$

$$\Delta D_{0w} = \sqrt{6 \cdot D_0 + D_w \cdot \Delta t} \cdot \left([RND_4]_0^1 - \frac{1}{2} \right) \cdot 2 \quad (7)$$

式中: D_L 、 D_T 、 D_0 分别为纵向扩散系数、横向扩散系数和分子扩散系数(m^2/s); D_w 为风引起的扩散系数(m^2/s); $[RND]$ 为均匀分布的随机数,取值[0;1]。

1.2 模型配置

模型计算范围以辐射沙脊群海域为中心,南

北长195 km,东西120 km(图1)。模型采用三角形网格,水平网格数为8637,节点数为4446,网格分辨率从近岸区的800 m过渡至离岸区2000 m;垂向均匀分为10层。为满足稳定性要求,时间步长设为10 s。底摩阻通过底床粗糙高度反映^[11],根据不同的海底地形设定不同的粗糙高度,潮汐通道或深槽处为0.02 m,沙脊处为0.1 m。考虑到低潮位时沙脊可能出露,采用干湿判别法处理动边界,即当网格水深小于一定值时(0.1 m),设动量为零,只考虑物质通量;当网格水深小于一个极小值时(0.005 m),该网格不参与计算^[11]。初始条件以零启动形式给出,闭边界采用不可入条件,外海边界给定潮位,由一个更大范围的模型提供,大模型范围及构建详见文献[16]。风作为一个外部驱动,对表层粒子的传输也有一定的影响^[17]。表层风的驱动,使得水体垂向传输差异的不确定性更大,难以区分地形和潮动力自身的影响,因此本文模拟方案未考虑风场作用。模型在运行流场稳定后,计算了2006年8月15日至9月15日一个月的潮流场。

为了分析潮汐通道中的水流特性及各通道间的水流及物质交换情况,分别选择西洋、黄沙洋、陈家坞槽和苦水洋四条潮汐通道,在每个通道的水体表层、底层释放单个示踪粒子及粒子群(图1中“▲”所示),模拟其涨、落潮及大、小潮期间运动轨迹。设定粒子为保守物质,不考虑其沉积和降解作用。同时,为研究近岸沙脊中的物质如何运动,以及如何被带入潮汐通道中,在沙脊群顶点弥港岸外(图1中“□”所示),连续释放粒子,模拟2006年9月1日至9月15日粒子群的迁移动态过程。

1.3 辐射沙脊群海域潮波潮流特性

根据大范围模型^[16]可得到南黄海海域M2同潮时线分布图(图2)和潮流椭圆图(图3,负值代表顺时针,正值代表逆时针)。从M2同潮时线来看,无潮点位于苏北废黄河口以外。江苏沿海南部受东海前进潮波控制,北部受南黄海旋转潮波控制,辐射沙脊群中心区处于旋转潮波和前进潮波辐聚区。从振幅来看,整个南黄海海域中,辐射沙脊群海域振幅最大,可达2 m。从潮流椭圆图来看(图3),南黄海南部海域以顺指针旋转流为主,北部沿海为往复流,向外海及南部逐渐过渡

至旋转流。对照本文的研究区域,西洋通道为典型的往复流,辐射沙脊群东部及南部虽为旋转流,但是椭圆率较小,也呈一定的往复流特性。越往西北靠近西洋方向,椭圆率越小,往复流特征越明显。

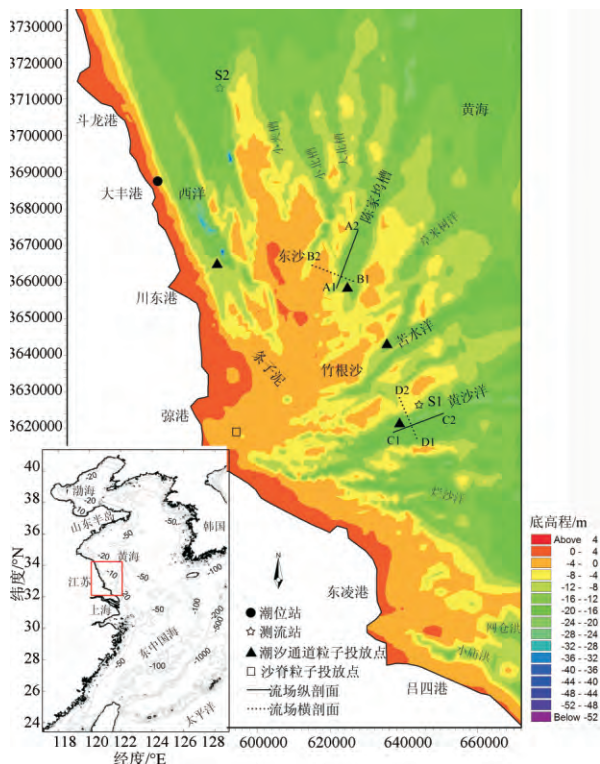


图1 模型区域及点位

Fig.1 Bathymetry of the simulation area and locations of hydrological gauging stations

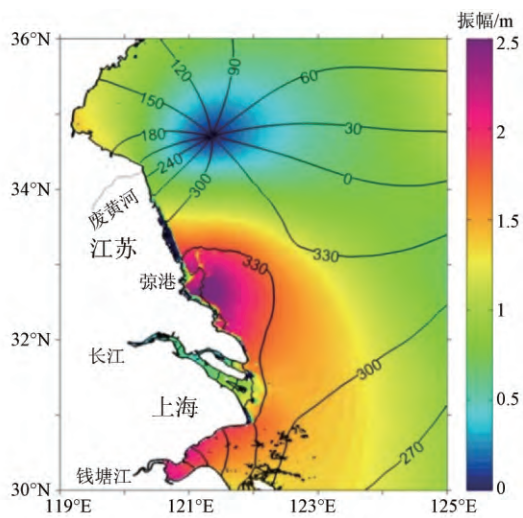


图2 南黄海海域 M2 同潮时线分布

Fig.2 Co-tidal charts of the M2 constituent for the southern Yellow Sea

1.4 模型验证

从江苏近海海洋综合调查与评价专项实测资

料中选取大丰港(图1中“●”所示)潮位过程以及黄沙洋通道 S1 站和西洋通道 S2 站(图1中“☆”所示)的大小潮实测流速过程作为验证(图4和图5)。限于篇幅,流速验证仅给出 S1 站的小潮、S2 站的大潮流速验证过程。由图4可知,水位模拟值和实测值吻合良好,平均误差(AE)为0.22 m,均方根误差(RMSE)为0.4 m。流速方面, S1 的流速除了模拟的峰值比实测值略低外,整体流速大小相当,流向基本一致,流速 AE 为-0.02 m/s, RMSE 为0.14 m/s,流向 AE 为-6.2°, RMSE 为45.5°; S2 的流速验证略差,流速 AE 为-0.01 m/s, RMSE 为0.20 m/s,流向 AE 为-6.13°, RMSE 为80.8°,主要是该测站位于东沙沙脊前沿,流场特征还受局部地形的影响,兼具往复流和旋转流特性(图3)。整体而言,模型基本能反映潮汐通道的复杂流态。

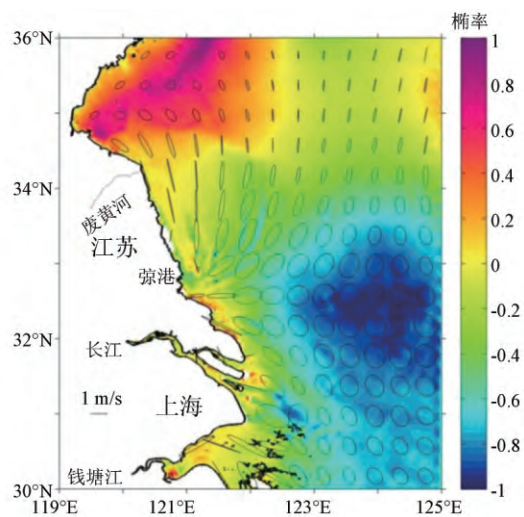


图3 南黄海海域 M2 潮流椭圆图

Fig.3 Distributions of tidal current vector ellipses of the M2 constituent on the southern Yellow Sea

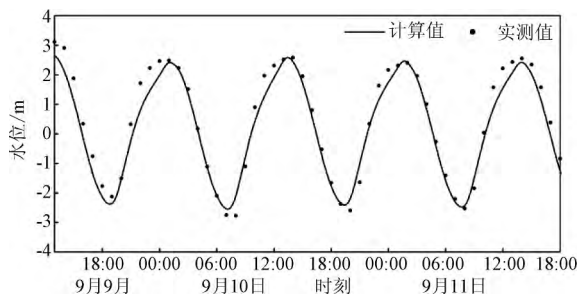


图4 大丰潮位验证

Fig.4 Validation of tidal levels at Dafeng station

图6为模拟的大潮表层和底层涨、落急流场。由图可知,流场以弶港为顶点呈辐射状分布。涨

急时表层平均流速 0.7 m/s ,底层平均流速 0.5 m/s ,落潮时表层平均流速 0.8 m/s ,底层平均流速 0.5 m/s 。最大涨、落潮流速超过 2 m/s ,位于外海 20 m 水深处。这种表层流速大于底层流速且呈辐射状分布的流场特征与以往研究结论^[18-19]相符合。

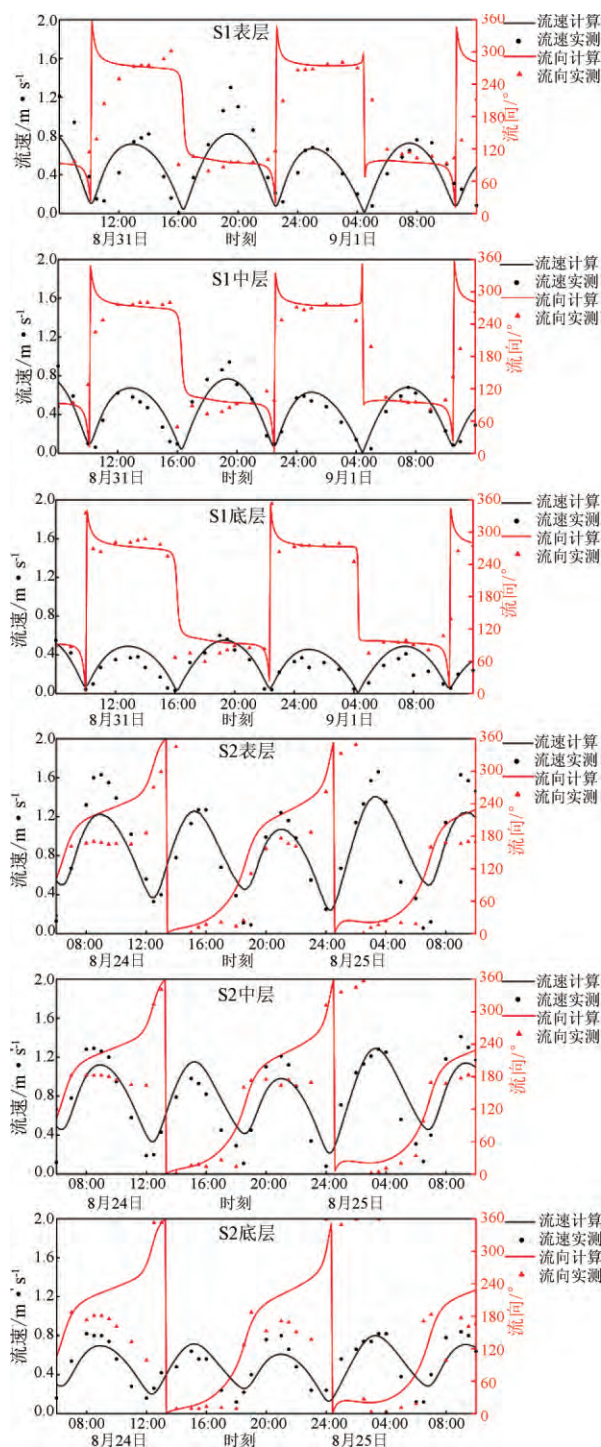


图5 流速验证

Fig. 5 Validation of tidal currents

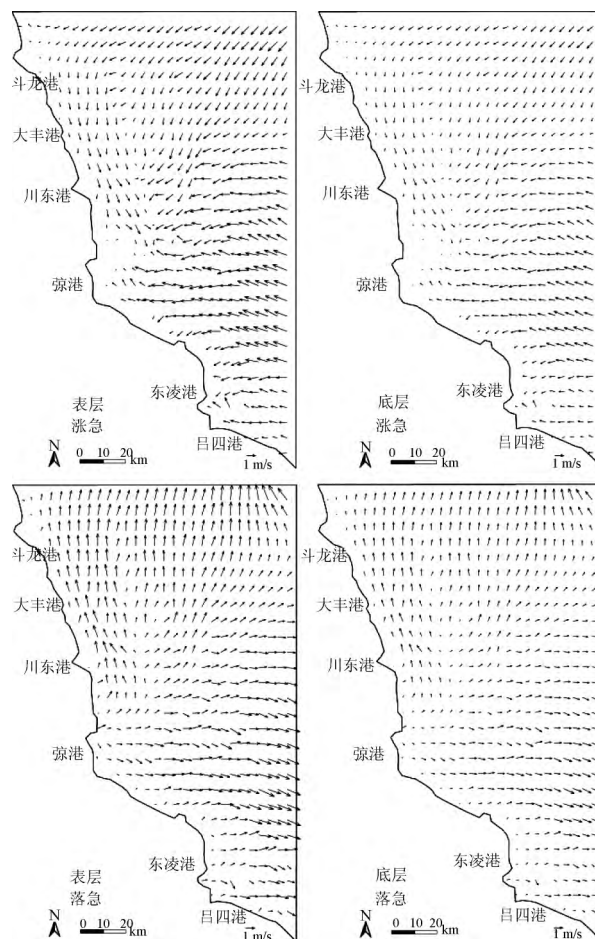


图6 大潮涨、落急流场

Fig. 6 Maximum flood and ebb flow fields during spring tides

2 结果与讨论

2.1 潮汐通道粒子释放

以大潮为例,分别模拟4个潮汐通道内单个粒子表层涨潮(9月9日6时40分释放)和落潮(9月9日13时释放)过程6h的运动轨迹(图7)。由图可知,涨潮时,各通道轨迹均指向弥港,落潮均指向外海。而且,涨潮净位移明显大于落潮,说明潮汐通道潮流净输移方向指向沙脊群中心,这也解释了辐射沙脊群之所以形成并能维持的动力机制。

为对比不同通道、不同深度的粒子运动差异,分别模拟4个潮汐通道内小潮(9月2日0时~4日0时)和大潮(9月9日0时~11日0时)连续2d、共计4个潮周期的表、底层单个粒子运动轨迹(图8)。小潮时,各潮汐通道的粒子主要以潮汐通道内的往复运动为主,表、底层运动轨迹十分接近。大潮时,随着水位的抬升、流速增大,粒子运动范围扩大,在陈家坞槽和苦水洋表层,粒子遵循

着深槽往复流-沙脊横流-深槽往复流-沙脊横流的形态,以顺时针螺旋状形式,越过数个潮汐通道及沙脊,向西北方向运动(图8a)。说明在不考虑风及波浪的条件下,余流主要指向北部深水通道方向,这与 Xing^[20] 等的结论一致;同时这种往复流和横流交错进行的运动形式,有利于深槽水深及周围沙脊的维持^[19]。陈家坞槽的底层粒子运动形式与表层类似,但终点相差了 10 km 以上;苦水洋的底层运动轨迹则与表层完全不同,呈往复运动(图8b)。对于西洋通道,无论表层还是底层,粒子始终于通道内往复运动;而黄沙洋内表层粒子运动形态介于苦水洋和西洋之间,即整体沿主槽方向往复运动,同时也存在越过沙脊的现象,底层粒子则为明显的往复运动。

为量化粒子运动轨迹,将平行潮汐通道方向的粒子运动最大范围定义为粒子轨迹长度,垂直潮汐通道方向的粒子运动最大范围定义为粒子轨迹宽度。由各个潮汐通道表层的粒子轨迹长度和宽度可知(表1),西洋通道粒子运动长度和苦水洋粒子运动宽度接近 30 km,陈家坞槽的粒子运动长度和宽度均小于 20 km。大潮期间粒子运动范围约为小潮的两倍。

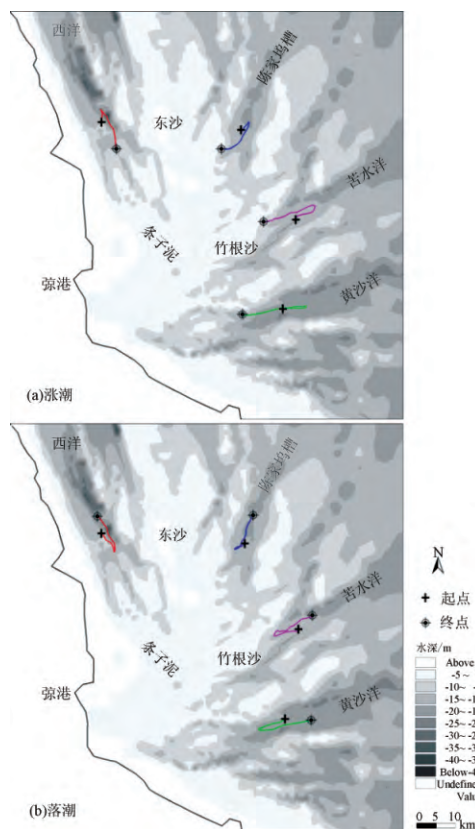


图7 大潮涨、落潮期间潮汐通道内表层粒子运动轨迹
Fig. 7 Trajectories of surface particles in tidal channels during spring flood and ebb tides

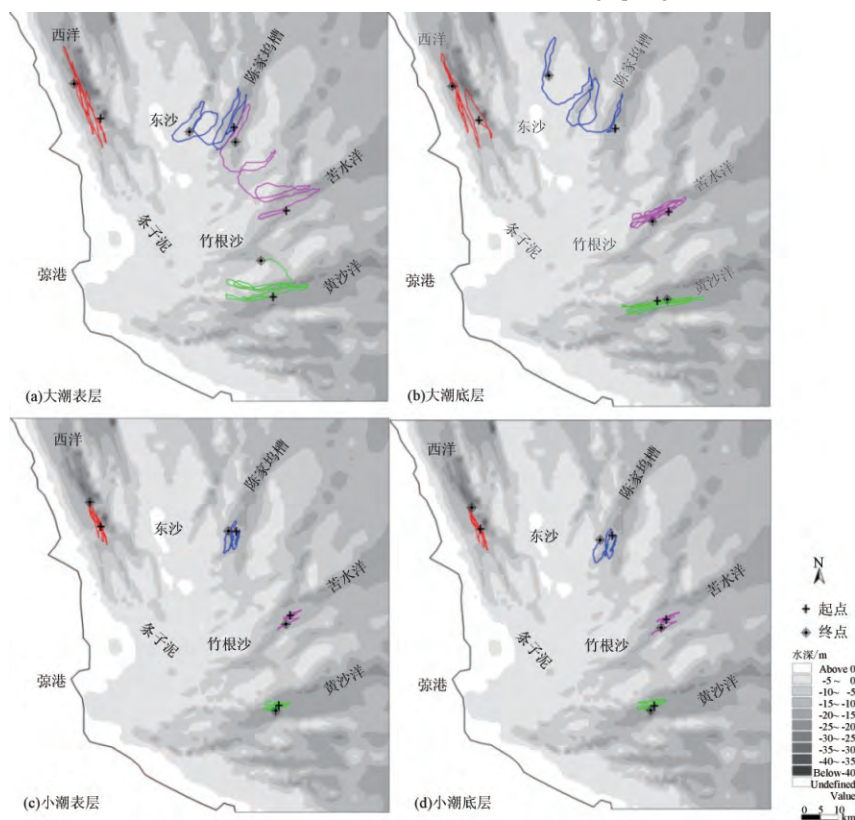


图8 潮汐通道内粒子运动轨迹
Fig. 8 Trajectories of particles in tidal channels

以西洋大丰港为例,大、小潮潮差最大可相差 3.5 m,造成大、小潮期间粒子运动半径的显著差异。相较于同时期其他通道,西洋的粒子运动轨迹长度最长,宽度最小,长宽比超过 10。由于西洋地形深、窄,以往复流运动为主,因此粒子轨迹主要沿平行深槽方向。而苦水洋的粒子运动宽度最大,超过了长度,说明此处旋转横流对粒子的净输移作用大于往复流。

单个粒子运动轨迹与释放时刻相关,不同的释放时刻受不同潮时的潮动力影响,运动轨迹不尽相同。持续释放则可以得到不同时刻的粒子运动轨迹。为了排除单个粒子受释放时刻的影响,探明不同时刻的粒子运动差异及可能到达的范围,于 4 个潮汐通道的释放位置,相同的大小潮时段,每一时间步长释放一个粒子。持续释放 2 d

后各通道的粒子位置分布见图 9。由图可知,粒子群的分布与单个粒子类似,即小潮期间,表、底层粒子主要集中在潮汐通道内;大潮期间,西洋大多数粒子仍局限于通道内,其余 3 个通道表、底层均有大量粒子不同程度地越出通道,表层粒子的运动范围更大,分布更分散,而底层相对集中。

表 1 粒子轨迹的长度和宽度(km)
Tab. 1 Length and width of trajectories of particles

潮汐通道	小潮		大潮	
	长度	宽度	长度	宽度
西洋	12.14	1.59	29.10	2.67
陈家坞槽	10.04	5.25	17.70	12.03
苦水洋	9.16	2.86	18.35	29.84
黄沙洋	8.10	2.32	22.37	9.97

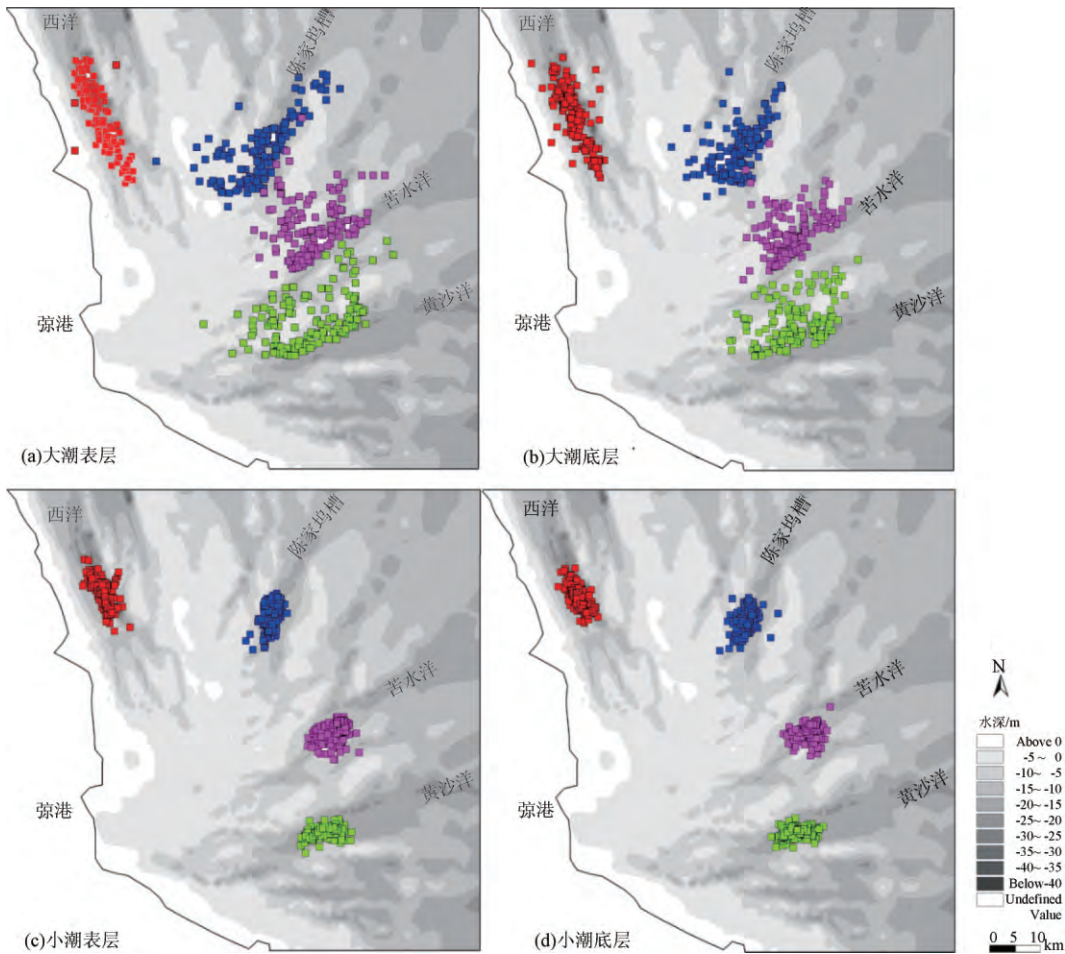


图 9 持续释放的粒子群 2d 后到达的位置分布
Fig. 9 Location of the particles after two days

2.2 沙脊粒子释放

为研究沙脊中的水流及物质如何被带入潮汐通道,经由哪些通道被带离,于弥港外沙脊顶点水

深 2.8 m 的水体表层(图 1),自 9 月 1 日 0 时起,持续 15 d 释放粒子。从粒子随时间迁移过程可知(图 10)粒子逐渐向岸,并向南、北沿岸迁移。

以第一个释放的粒子(图 10f)为例,其轨迹呈“8”字形来回摆动,且大多为右侧逆时针、左侧顺时针方向,经过 4 d 13 h 后,搁浅于近岸浅滩。随后释放的粒子大多遵循类似的运动方式,最终堆积于排放点以南近岸区。这也解释了沙脊顶点大量沙

子聚集并能维持的原因。经过 15 d,才有少量粒子经由大的流速进入西洋通道。极少粒子会进入南部通道(图 10e)。受沙脊阻隔,在模拟时段内,并未有粒子进入中部通道。

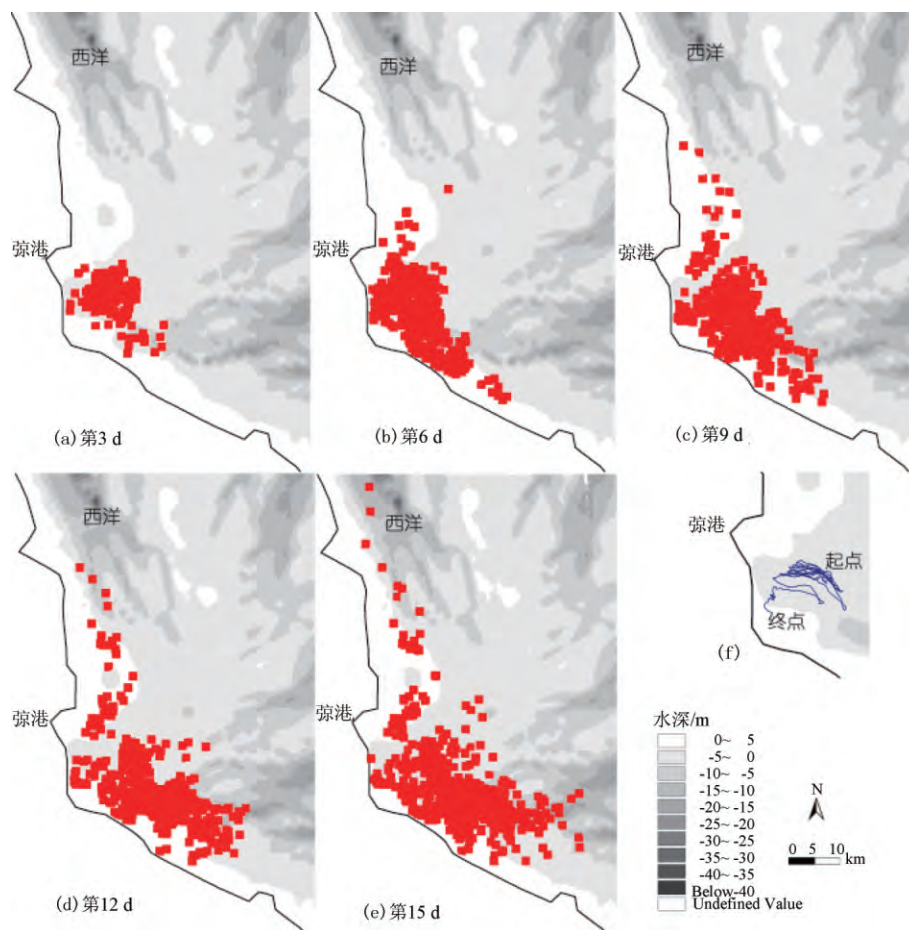


图 10 辐射沙脊群顶点处表层持续释放粒子运动轨迹

Fig. 10 Trajectories of particles in surface water in the vertex of radial sand ridges

综上所述,各潮汐通道粒子运动轨迹的差异,除受制于通道的形态和水深之外,主要取决于水流运动形态及其引起的水体输运和交换的差异。由小潮单个粒子运动轨迹(图 8c, d)和粒子群的分布范围(图 9c, d)可知,由于潮差小、流速低,表、底层粒子于潮汐通道内往复运动,表明通道内部水体环流较弱,与外部水体交换较少。相比小潮,大潮期间表、底层粒子的运动轨迹差异更为明显。结合流场空间分布可以进一步解释运动轨迹差异的原因。以陈家坞槽、苦水洋为例,分别取横、纵剖面(见图 1),选取环流明显的时刻 9 月 10 日 12 点,分析大潮期间断面流场。从陈家坞槽的横断面流场来看(图 11, B1-B2 断面),垂向环流

明显,环流尺度可从底层穿直至上层,暗示了垂向水体交换能力较强,底部的粒子随环流运移至水体上层,得以穿过沙脊群横向运动;而纵断面没有明显的环流(图 11, A1-A2 断面)。相比陈家坞槽,黄沙洋水深更深,沿槽方向的流速更大(图 11, C1-C2 断面),其横断面也存在明显的垂向环流(图 11, D1-D2 断面),虽然单个粒子横向运动并不剧烈(图 8a, b),但从不同时刻的粒子群来看,仍有不少粒子存在横向运动(图 9a, b)。

大潮期苦水洋表层单个粒子穿过深槽和沙脊进入陈家坞槽,底层的始终局限于深槽内(图 8b),说明潮汐通道表层的粒子运移受沙脊影响较少,而底层粒子受沙脊的阻隔影响较大,当横向

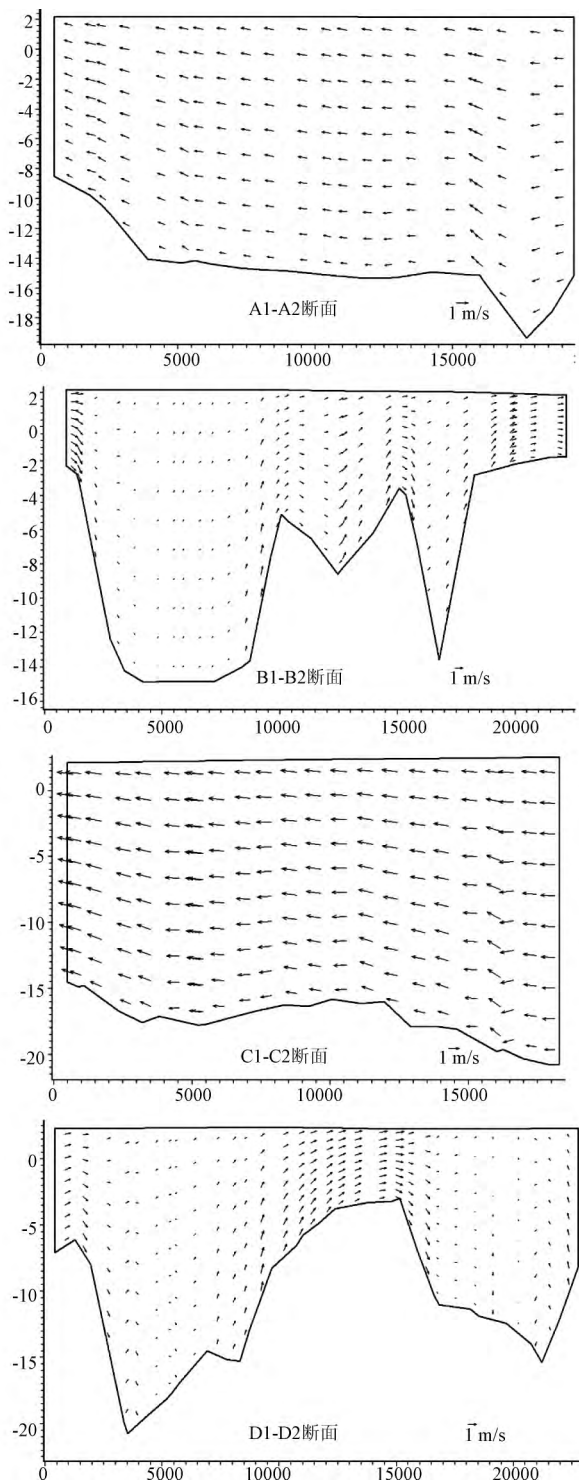


图 11 大潮期间垂向断面流场图

Fig. 11 Flow fields during spring tides in vertical sections

环流流速足够大时才能将其带出。两个横断面流场的环流分布特征也显示(图 11, B1-B2, D1-D2 断面)深槽表层环流并不明显,越靠近不平坦的底部越明显,而沙脊表、底层流态相对均一。因此深槽底部粒子易被横向带出,进入水体上层,而沙脊处的上层粒子也可能被带入深槽,潜入底层。

说明潮汐通道的物质输运特性是水流运动特性和地形共同作用的结果。

本文仅给出某段时间内定点粒子释放的模拟结果,至于不同地点、不同时期的水流运动特性可能不尽相同,需要进一步研究。

3 结 论

(1) 小潮时,表、底层粒子运动轨迹相似,主要以潮汐通道内的往复运动为主。大潮时,涨潮净位移大于落潮;粒子运动范围均明显大于小潮时;其中,西洋通道内表、底层粒子均呈往复运动形式;其余三个通道在不同时刻表、底层粒子轨迹不尽相同,且均有粒子不同程度地以顺时针螺旋状方式越出通道;表层粒子的运动范围更大,分布更分散,而底层相对集中。粒子运动主要受西洋通道的往复流和其余区域不同程度的旋转流所控制。

(2) 相比小潮期,大潮潮汐通道的水体垂向环流及与通道外的水体交换更为明显。不同的潮汐通道,水体输运和交换程度也有所不同。槽滩相间的地形特点使得潮汐通道的横断面方向均存在不同程度的环流,水流横向输运能力主要取决于横向环流流速与纵向主流流速的相对强弱,同时也受局部地形影响。

(3) 弥港沙脊顶点粒子主要向岸运动,少量向南、北沿岸运动并最终进入近岸西洋和南部潮汐通道,而中部的潮汐通道,由于受沙脊阻隔,在短时间内并无粒子进入。表明了近岸水流和物质迁移的主要向岸趋势。

参考文献:

- [1] 王颖. 南黄海辐射沙脊群环境与资源[M]. 北京: 海洋出版社, 2014.
- [2] 陈橙, 王义刚, 黄惠明, 等. 潮动力影响下辐射沙脊群的研究进展[J]. 水运工程, 2013(8): 17-24.
- [3] 张长宽. 江苏省近海海洋环境资源基本现状[M]. 北京: 海洋出版社, 2013.
- [4] 张东生, 张君伦. 黄海海底辐射沙洲区的 M_2 潮波[J]. 河海大学学报, 1996, 24(5): 35-40.
- [5] ZHANG C K, ZHANG D S, ZHANG J L, et al. Tidal current-induced formation—storm-induced change—tidal current-induced recovery. Interpretation of depositional dynamics of formation and evolution of radial sand ridges on the Yellow Sea seafloor[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 1999, 42(1): 1-12.
- [6] 江苏省海洋与渔业局. 2015 江苏省海洋环境质量公报[R].

- 南京: 江苏省海洋与渔业局, 2016.
- [7] 刘运令, 汪亚平, 吴祥柏, 等. 南黄海苏北近岸西洋水道水沙输运机制分析[J]. 海洋科学, 2011, 35(11): 120-127.
- [8] 徐 凡, 陶建峰, 张长宽, 等. 南黄海辐射沙脊群西洋水道质点示踪数值模拟[J]. 水道港口, 2013, 34(2): 93-98.
- [9] 倪文斐, 汪亚平, 邹欣庆, 等. 南黄海辐射沙脊群苦水洋海域的沉积动力特征及稳定性研究[J]. 海洋通报, 2013, 32(6): 668-677.
- [10] 董 佳, 马洪亮, 熊 伟. 黄沙洋水道末梢浅水槽建港工程潮流数值模拟与泥沙淤积计算[J]. 水运工程, 2013(8): 73-79.
- [11] DHI. Mike 21 & Mike 3 flow model, hydrodynamic and transport module, scientific documentation [R]. Hørsholm: Danish Hydraulic Institute (DHI), 2007.
- [12] SMAGORINSKY J. General circulation experiments with the primitive equations I. The basic experiment[J]. Monthly Weather Review, 1963, 91(3): 99-164.
- [13] LUMBORG U. Modelling the deposition, erosion and flux of cohesive sediment through Øresund [J]. Journal of Marine Systems, 2005, 56(1/2): 179-193.
- [14] FOURNIOTIS N T, HORSCH G M. Three-dimensional numerical simulation of wind-induced barotropic circulation in the Gulf of Patras [J]. Ocean Engineering, 2010, 37(4): 355-364.
- [15] GIANNI A, ZACHARIAS I. Modeling the hydrodynamic interactions of deep anoxic lagoons with their source basins [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2012, 110: 157-167.
- [16] TAO J F, ZHANG C K, YAO J, et al. Numerical simulation of tides and tidal currents in Jiangsu offshore areas, China [C] // Proceedings of 19th International Offshore and Polar Engineering Conference. Osaka: ISOPE, 2009: 1243-1247.
- [17] 李曰嵩, 潘灵芝, 肖文军, 等. 风对黄海绿潮藻漂移的影响[J]. 海洋环境科学, 2014, 33(5): 772-776.
- [18] 周智鹏, 陶建峰, 张长宽, 等. 南黄海辐射沙脊群西洋水道污水输移扩散研究[J]. 海洋通报, 2015, 34(1): 65-71.
- [19] XU F, TAO J F, ZHOU Z, et al. Mechanisms underlying the regional morphological differences between the northern and southern radial sand ridges along the Jiangsu Coast, China [J]. Marine Geology, 2016, 371: 1-17.
- [20] XING F, WANG Y P, WANG H V. Tidal hydrodynamics and fine-grained sediment transport on the radial sand ridge system in the southern Yellow Sea [J]. Marine Geology, 2012, 291/292/293/294: 192-210.
- (上接第391页)
- [21] 李 芸, 石彭灵, 沈 宏, 等. 梁塘河浮游动物的空间分布及其与环境因子的关系 [J]. 环境科学研究, 2015, 28(10): 1531-1537.
- [22] WANG R, ZUO T, WANG K. The yellow sea cold bottom water—an overwintering site for *Calanus sinicus* (Copepoda, Crustacea) [J]. Journal of Plankton Research, 2003, 25(2): 169-183.
- [23] 陈清潮. 中华哲水蚤的繁殖、性比率 and 个体大小的研究[J]. 海洋与湖沼, 1964, 6(3): 272-288.
- [24] 徐兆礼, 李 云. 长江口中华哲水蚤对不同温度和盐度的适应 [C] // 2008 年中国水产学会学术年会论文摘要集. 昆明: 中国水产学会, 2008.
- [25] 霍元子, 孙 松, 杨 波. 南黄海强壮箭虫 (*Sagitta crassa*) 的生活史特征[J]. 海洋与湖沼, 2010, 41(2): 180-185.
- [26] 刘 青, 曲 晗, 张 硕. 强壮箭虫对温度、盐度的耐受性研究 [J]. 海洋湖沼通报, 2007(1): 111-116.
- [27] 武文魁. 墨氏胸刺水蚤在黄海的生态特点 [J]. 动物学杂志, 1991, 26(3): 1-5.
- [28] 林 霞, 朱芝峰, 赵 崖. 几种环境因子对墨氏胸刺水蚤摄食的影响[J]. 海洋湖沼通报, 2002(4): 38-45.
- [29] 王真良, 林凤翔, 冯志权, 等. 河北沿岸春季和夏季的浮游动物[J]. 海洋环境科学, 2006, 25(3): 41-45.
- [30] 赵 文, 宋青春, 高 放. 大连近海两种桡足类摄食生态的初步研究[J]. 大连水产学院学报, 2002, 17(1): 8-14.
- [31] 陶振铨. 可见光和紫外线对中华哲水蚤 (*Calanus sinicus*) 几种行为的影响研究 [D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2005.
- [32] 刘 青, 曲 晗, 张 硕, 等. 强壮箭虫摄食生态的实验研究[J]. 水产学报, 2006, 30(6): 767-772.
- [33] TANG Q. Ocean ecosystem dynamics [J]. Globec International Newsletter, 1999, 1(5): 7-8.
- [34] 杨纪明, 李 军. 渤海强壮箭虫摄食的初步研究 [J]. 海洋科学, 1995(6): 38-42.
- [35] 王 倩, 孙 松, 霍元子, 等. 胶州湾毛颚类生态学研究 [J]. 海洋与湖沼, 2010, 41(4): 639-644.