

南黄海辐射沙洲形成发育水动力机制研究*

—— II. 潮流运动立面特征

宋志尧 严以新 薛鸿超 茅丽华

(河海大学海岸及海洋工程研究所, 南京 210098)

摘要 从研究潮流脊的水动力学问题着手, 首次以三维潮流数值模拟为研究手段, 应用 Houbolt 的螺旋流假说, 对南黄海辐射沙洲的水动力环境进行了分析和探讨, 成功揭示了该沙洲由强往复潮流塑造形成、次生横向环流影响其演变发育、并共同作用维系其动态平衡的内在机制. 研究中还发现潮流脊间实际存在的次生横向环流并非总是成对出现的, 丰富和发展了潮流脊水动力学研究的理论成果.

关键词 辐射沙洲 潮流脊 三维数学模型 往复潮流 次生横向环流

对南黄海辐射沙洲形成发育, 诸裕良等人(见本期)从潮流运动的平面特征已作了深入的分析 and 讨论. 根据 Houbolt^[1]提出的螺旋流假说, 必须全面研究潮流运动的立面特征, 需要对这一问题再作进一步的探讨. 本文在现场实测资料的基础上, 建立了三维潮流数学模型, 对该沙洲形成演变的水动力机制进行数值研究, 对其潮流脊的面目进一步证实, 参照潮流脊水动力学的理论, 发现潮流脊间实际的次生横向环流并非总是成对出现的, 这一发现丰富和发展了潮流脊水动力学的研究成果.

1 数值研究的目的

60 年代以来的观察和研究结果表明, 特殊的水动力环境、丰富的物质基础和独特的地貌部位是潮流脊形成和发育的必要条件. 具体地说, 特殊的水动力环境是指存在往复潮流和相伴而生的横向环流的共同作用, 即 Houbolt 提出的螺旋流; 丰富的物质基础是指海底存在有充足的松散沉积, 极利于潮流的侵蚀-堆积作用; 而海湾、河口、海峡出口及潮差较大和强潮流作用的近岸地区是形成和发育潮流脊的理想场所.

在南黄海辐射沙洲海域, 是否存在形成和发育潮流脊的必要条件, 这正是国家自然科学基金重点项目“黄海海底辐射沙洲形成演变研究”的主要内容. 南京大学王颖教授等的研究成果已证实辐射沙洲形成演变的物质基础和地貌特征; 而河海大学张东生教授等从模拟东中国海的潮波系统出发, 进一步确认琼港岸外形成辐射状潮流运动, 并具强往复流特征; 诸裕良等人从平面二维数值模拟和分析着手, 通过潮波与潮流的特征值来研究辐射沙洲的形成与发育

的过程. 但次生横向环流是否存在, 仅靠现场观测、资料分析和二维潮流运动数值研究是无法得到准确回答的. 迄今为止, 国内外对潮流脊形成、发育的动力机制的研究仍停留在现场观测、理论实验和平面二维数值的试验阶段^[2-6], 有必要建立该海域的三维潮流数学模型. 通过流场的时空分布和变化情况, 反映出潮流在沟槽和滩脊间的纵、横向运动规律, 对辐射沙洲形成发育的水动力机制进行数值研究.

2 三维潮流数学模型

2.1 基本方程

对于宽浅的近岸海域, 静压假设下三维潮流运动的基本方程为连续方程

$$\nabla \cdot \mathbf{U} + \frac{\partial W}{\partial Z} = 0 \quad (1)$$

或

$$\nabla \cdot (\bar{\mathbf{U}}D) + \frac{\partial \eta}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

和运动方程

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} (\mathbf{U} \cdot \nabla) \mathbf{U} + W \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial Z} = \mathbf{f} \times \mathbf{U} - g \nabla \eta + A_H [\nabla^2 \mathbf{U} + \nabla (\nabla \cdot \mathbf{U})] + \frac{\partial}{\partial z} \left(A_V \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial Z} \right), \quad (3)$$

式中 $\mathbf{U} = (U, V)$ 为水平流速, W 为垂向流速; $\bar{\mathbf{U}} = (\bar{U}, \bar{V})$ 为水深平均流速; $D = h + \eta$ 为总水深, h 为静水深, η 为表面波动值(水位); $\mathbf{f} = f\mathbf{k}$, f 为柯氏力系数, $\mathbf{k}$ 为垂向单位矢量; g 为重力加速度; A_H 为水平涡粘系数, A_V 为垂向涡粘系数; $\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right)$ 为水平梯度算子.

2.2 初边值条件

方程(1)~(3)的求解是一个混合问题, 需给定初边值条件.

由于考虑是摩阻流动, 初值一般给定为常数, 其误差在计算中可逐步消失.

水平向的开边界给定流速和水位过程线及其垂向分布情况; 闭边界采用不可入条件, 即流速的边界法向分量为零.

垂直向的自由表面边界需给定风作用产生的切应力; 而海底则采用无滑动和不可入条件.

2.3 求解过程

对于上述混合问题的方程求解方法, 在相关文献中多有详述. 概括地说, 由如下处理过程逐步完成.

(1) 为克服复杂地形和自由表面给计算带来的困难, 引入 Phillips (1957) 提出的 σ 坐标进行垂向坐标的伸缩变换, 同时变换方程(1)和(3).

(2) 对运动方程沿水深积分, 获得全流运动方程. 该全流运动方程取消了一般平面二维方程采用的对流项和底摩擦近似, 是真正水深平均意义上的全流方程.

(3) 利用已有的数值方法求解连续方程(2)和全流运动方程, 可得水位 η 值和水深平均流速 $\bar{\mathbf{U}}$.

(4) 确定垂向涡粘系数 A_V 沿深分布形式, 一般取为常数、线性分布和二次分布, 特殊的用求解紊流模型得到.

(5) 由垂向离散方程(3), 利用表面和海底边界条件, 用追赶法隐式求解各层上的水平流速 U , 尔后由方程(1)显式得到垂向流速 W .

2.4 模型计算

三维潮流运动模拟的关键是确定 A_v , 本研究采用 Noye^[7]等所提出的公式, 即

$$A_v = a_1 + a_2(0.5 - \sigma)(1 + \sigma) |U| \quad (-1 \leq \sigma \leq 0), \quad (4)$$

式中 σ 为 σ 坐标变量, a_1 和 a_2 为经验常数, 在模型调试时选取.

模型计算参数为: 空间变步长网格为 1 和 2 km; 垂向分七层; 时间步长取 300 s; $A_H = 200 \text{ m}^2/\text{s}$, $a_1 = 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$, $a_2 = 0.006 \text{ m}$.

模型计算范围南抵启东塘芦港, 北至大丰斗龙港, 外海距离琼港 75 km, 包括辐射沙洲的西洋、黄沙洋、烂沙洋和小庙洪等主要潮汐通道以及东沙、毛竹沙、蒋家沙、太阳沙、冷家沙等主要浅滩(参见本期诸裕良等图 1 中点画线框定部分).

模型计算利用 1992 年 9 月份对辐射沙洲两条主要潮汐通道烂沙洋、西洋的现场实测资料和东中国海复合潮波模拟系统.

模型计算考虑到两地实测资料相差近半个月, 并为较深入地了解该区潮流运动规律, 采取长周期共 18 d 连续模拟获取大、中、小潮的有关潮流场信息, 其中实测资料列入计算过程进行验证.

3 结果分析和水动力机制初探

潮流脊水动力机制的研究主要应着眼于沟槽潮流的运动特征. 模拟海域内包括了辐射沙洲的四条潮流作用的主要通道, 其地貌特征较为相似, 潮流运动特征也大抵相似. 考虑到沟槽的代表性, 选择西洋深槽作为对象进行研究较为合适.

西洋位于辐射沙洲北部, 由北向南略偏东(图 1, 参见本期诸裕良等图 1 中实线框定部分), 主槽宽直, 潮差大, 潮流强. 其西侧邻岸, 东侧为辐射沙洲最大最高的东沙浅滩, 槽中发育有小阴沙, 因此该主槽受相邻深槽影响较小, 而且受东沙掩护风浪甚小, 加之积累有较完整的多点实测资料, 是研究潮流脊水动力机制的理想海域.

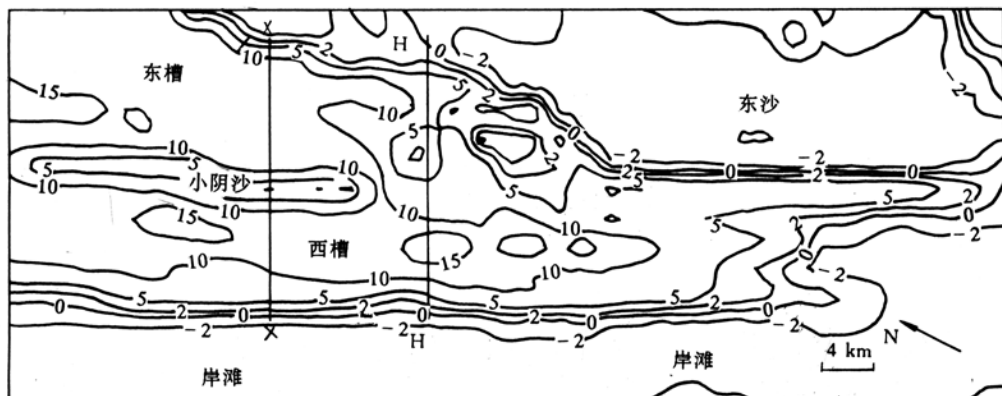


图 1 西洋海域地形图

3.1 潮流场主要特征

实测资料分析和已有的研究成果均表明, 该海域的潮流属正规半日潮流. 为较全面地反映潮流的运动特征, 我们根据计算结果绘制了该海域大潮过程的潮流椭圆, 还绘制了小阴沙断

面次生横向环流的消长过程,另外又绘制了半个月的潮余流场,通过分析得出以下结论.

(1) 由图 2 可见,西洋深槽表层潮流的椭圆率接近 0,潮流大而集中,明显呈往复流运动形式;而底层潮流的椭圆率变大,潮流小而分散,具有旋转流特征;涨落潮的主流方向基本上与沙脊的走向平行. 沙脊上的流矢受地形影响较大,流速小于深槽而流向无规律.

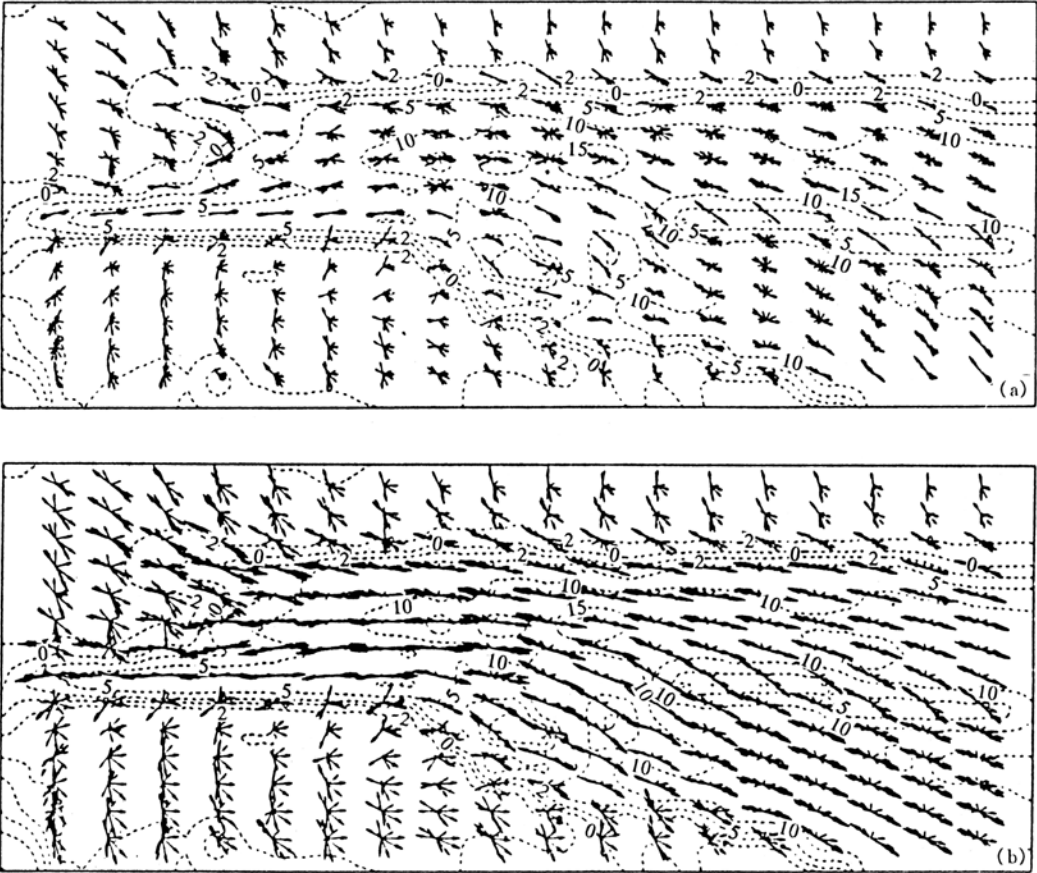


图 2 西洋海域潮流椭圆分布图
(a) 底层, (b) 表层

(2) 西洋主槽以小阴沙为界的東西深槽潮流的側向运动均具有旋转流特征,在深槽底部这种特征更为明显;而沙脊上无此现象(见图 3).

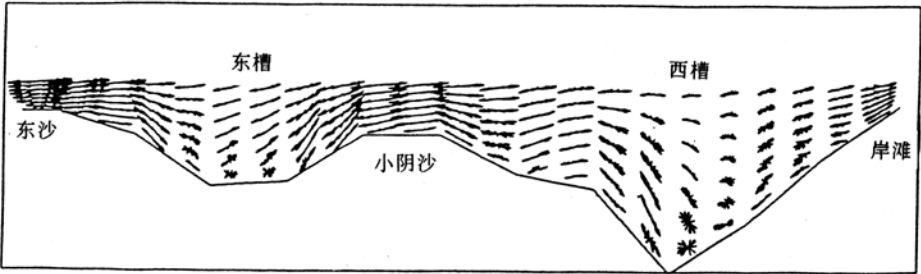


图 3 西洋深槽 H-H 潮流椭圆分布图

图4为小阴沙横断面X-X在一个大潮的前半个周期内次生横向环流的消长过程。图中等值线为断面流速, 负值代表涨潮, 正值即落潮。环流出现在涨急或落急后1 h左右, 先产生于底部, 尔后随着底部流速的增大, 环流加大且中心不断上升, 4 h左右即落急或涨急前约1 h, 环流在表面消失, 而此时底部流速至最大。而在后半周期内, 则出现一个相反方向的环流, 其消长过程相似、持续时间也相当。

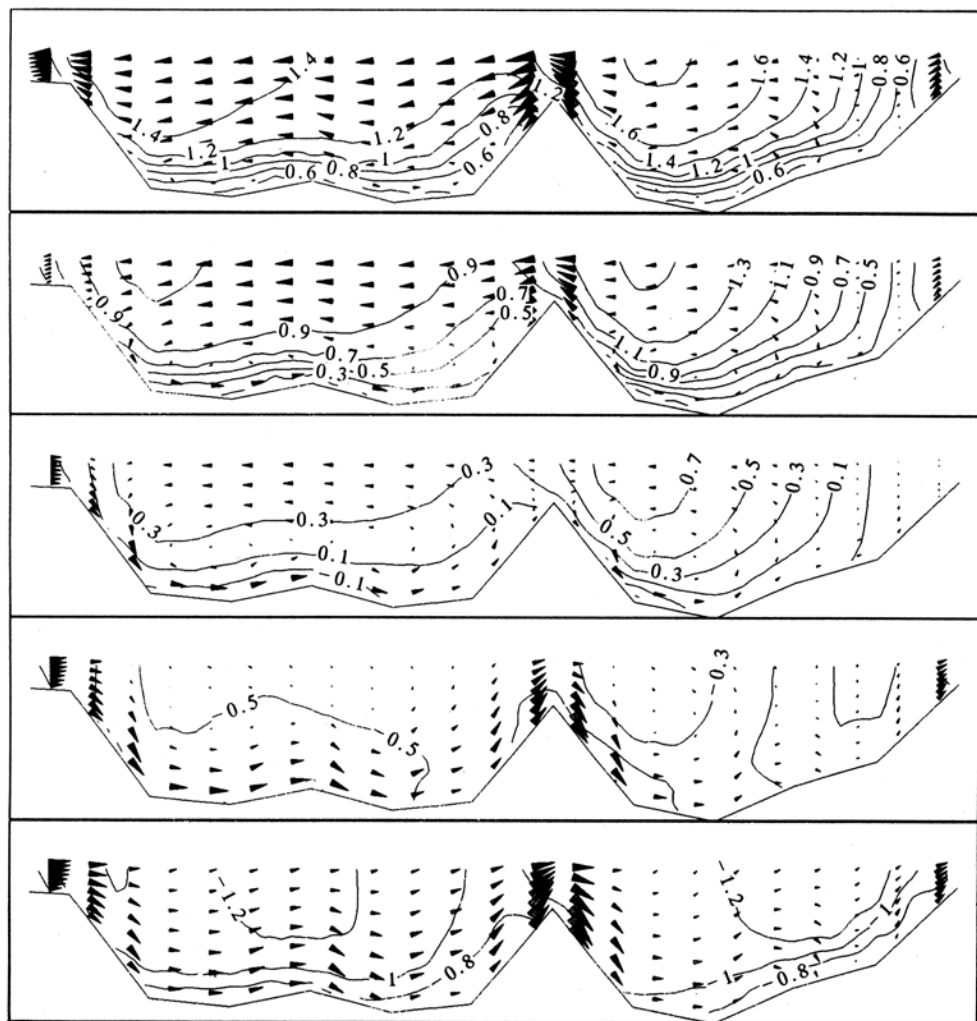


图4 西洋深槽小阴沙横断面X-X环流消长过程图(间隔:1 h)

(3) 由图5可见, 表层深槽的余流沿岸滩一侧(即西侧, 参见图1)向内, 而东侧则向外海; 小阴沙浅滩西侧余流向外, 东侧基本向内形成一个封闭圈。底层的余流在主槽与岸滩的坡折处向槽底, 而深槽余流则向内, 东侧坡折处向滩脊处运动, 但量值相对较小。

3.2 潮流运动与沙脊形成演变关系初探

首先, 西洋海域流场的主要特征是定向往复流形式, 而且随深度增加更加明显, 潮流椭圆的长轴基本与两侧的沙脊走向一致。事实上, 正是这种具有定向运动特征的往复潮流, 成为塑造沙脊的主要营造力。

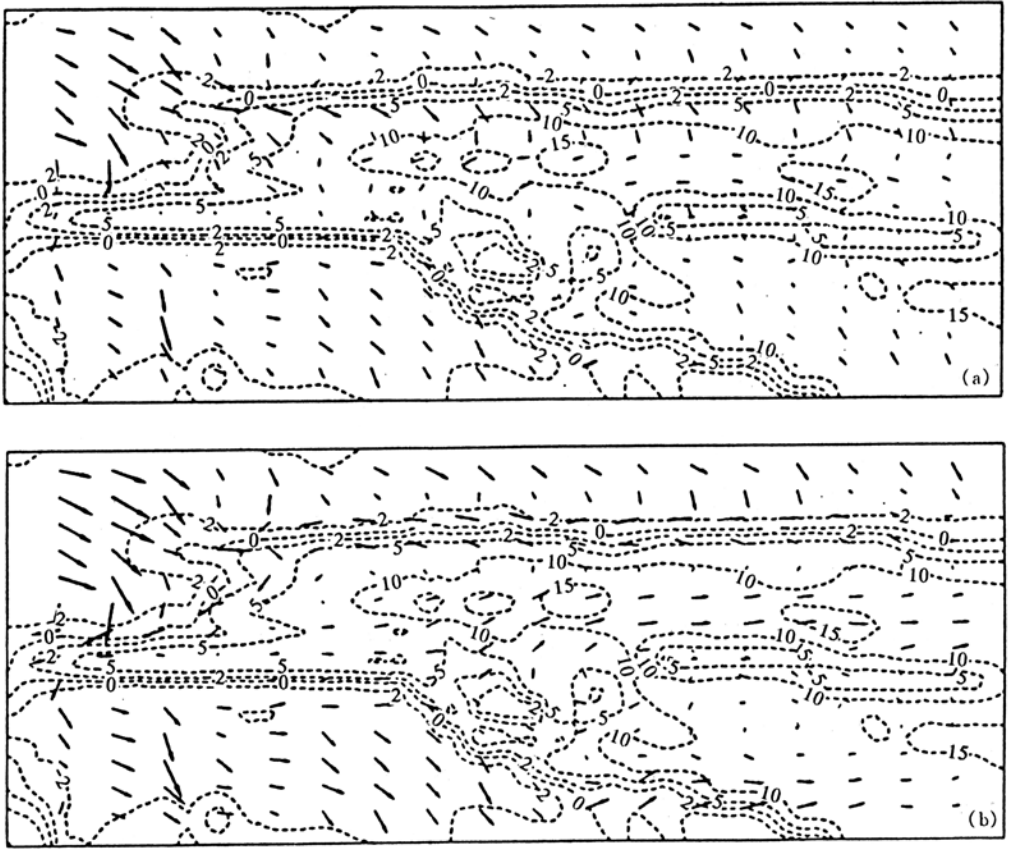


图 5 表底层半个月的潮余流场图

(a) 底层, (b) 表层

然而, 往复流要塑造沙脊, 还必须达到一定的强度. Off^[8] 的统计表明, 流速约在 0.5~2.5 m/s 最有利于沙脊的发育. 计算结果表明, 西洋主槽的流速普遍在 0.5 m/s 以上, 最大达到 2.51 m/s; 流速受海床摩阻作用明显, 由于水深相差悬殊导致流速分布的不均匀性; 深槽两侧地形的坡折处也存在着近 0.5 m/s 上升流和下切流. 这些极有利于沙脊的发育.

根据现场观测资料分析, 辐射沙洲的滩面处于淤涨发育过程中, 但近深槽底部坡面则相对较为稳定, 这可从上升流和下切流的作用得到较为合理的解释.

其次, 主槽中确实存在着次生横向环流, 与纵轴的往复流迭加使潮流运动具有螺旋流性质, 但存在的螺旋流并非理想模式中两个同时发生的螺旋流, 而是随着主槽流速的改变而交替出现的单个螺旋流, 而且作用方向相反. 这种动力过程, 具有某种动态平衡性质. 计算结果证实, 底部侧向潮流速最大可超过 0.5 m/s, 这速度足以起动并搬移泥沙. 另外, 在数值结果中还发现在与较平坦的滩脊相连的主槽断面内存在滚流, 这是一种比次生横向环流更具掘蚀力的副流.

最后, 西洋主槽的中层余流分布与表层十分一致, 量值略小, 表层最大可达 40 cm/s 以上, 而中层仅 30 cm/s 左右, 但中层余流与水深平均余流十分接近. 这表明西洋深槽的西侧以涨潮流为主, 在头部与沙脊上向深槽的余流碰撞, 形成一个淤积区, 这与现场观测结果基本相符;

而东侧则以落潮流为主, 再将西侧涨潮流带来的部分泥沙搬移出深槽, 使深槽内的泥沙运动处于一种半封闭状态。单独的沙脊体小阴沙, 其周围的余流首尾相随, 而相应的泥沙运动则是一个封闭系统。从底层余流看, 量值一般在 $10 \sim 20 \text{ cm/s}$, 主槽西侧底部可能发生一定的冲刷, 大部分由深槽余流带入槽内, 少部分会搬移到东侧, 可能淤积下来, 也可能带出深槽。无论是深槽的半封闭状态还是沙脊的这种封闭系统, 只是一种准平衡过程。

4 结论

首次应用三维潮流数学模型进行潮流脊水动力问题的分析和探讨, 对辐射沙洲形成发育的研究取得初步成果。辐射沙洲各深槽受定向往复潮流作用, 流速普遍在 $0.5 \sim 2.5 \text{ m/s}$ 之间, 其底层流速具有旋转流特征, 其横断面在潮流运动中大都会出现次生横向环流或滚流, 其地形坡折处也存在着近 0.5 m/s 的上升流和下切流, 这些不仅有利于沙脊的塑造, 也极利于沙脊的发育。

参 考 文 献

- 1 Houbolt J J H C. Recent sediments in the Southern Bight of the North Sea. *Geologie en Mijnbouw*, 1968, 47: 245~273
- 2 夏东兴, 刘振夏. 潮流脊的形成机制和发育条件. *海洋学报*, 1984, 6(3): 361~367
- 3 刘振夏, 夏东兴. 潮流脊的初步研究. *海洋与湖沼*, 1983, 14(3): 286~296
- 4 刘振夏. 江苏潮流砂的粒度特征及其沉积环境的研究. *海洋地质与第四纪地质*, 1983, 3(4): 25~33
- 5 汤毓祥, 姚兰芳, 刘振夏. 辽东浅滩海域潮流运动特征及其与潮流脊发育的关系. *黄渤海海洋*, 1993, 11(4): 9~18
- 6 刘振夏, 夏东兴. 潮流沙脊的水力学问题探讨. *黄渤海海洋*, 1995, 13(4): 23~291
- 7 Noye J, Stevens M. A three-dimensional coastal model of tidal propagation using transformations and variable grids. In: Heaps N S ed. *Three-dimensional Coastal Ocean Models*, American Geophysical Union Washington DC, 1987, 41~69
- 8 Off T. Rhythmic linear sand bodies caused by tidal current. *Am Assoc Pet Gool Bull*, 1963, 47(2): 324~337