

近岸典型养殖海区潮流垂直结构的数值研究

樊 星^{1,2} 魏 皓^{1,3}

(¹中国海洋大学教育部物理海洋重点实验室, 青岛 266100)

(²中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

(³天津科技大学海洋科学与工程学院, 300222)

摘 要 采用改进的一维水动力模型对我国近岸典型筏式养殖海区的潮流垂直结构进行了数值研究。模型通过增加潮流上边界层来描述养殖活动与潮流垂直分布的关系。数值实验结果表明, 高密度养殖对潮流的阻碍作用很强, 使得海水表层流速显著减缓; 当养殖密度达到临界值后, 流速剖面出现变形, 流速迅速减小。流速剖面随底应力的变化也会出现同样的变形。潮流流速及其垂直分布情况均受到上层养殖阻力和海底应力的共同作用, 呈非线性变化趋势。潮流垂直结构就是对在外海传入潮波的驱动下, 海水对上层养殖阻力和海底应力的适应与调整。这为进一步优化养殖设施布放、养殖品种安排等奠定了理论基础。生物生长与吊笼等因素对海水运动的阻力效应是需要进一步考虑的问题。

关键词 潮流垂直结构 海水养殖 数值研究 桑沟湾

中图分类号 P731.2 **文献标识码** A **文章编号** 1000-7075(2010)04-0078-07

Modeling studies on vertical structure of tidal current in a typically coastal raft-culture area

FAN Xing^{1,2} WEI Hao^{1,3}

(¹Key Laboratory of Physical Oceanography, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100)

(²Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Science, Beijing 100101)

(³College of Marine Science and Engineering, Tianjin University of Science and Technology, 300222)

ABSTRACT Vertical structure of tidal current in a typically coastal raft-culture area is discussed by a numerical model. A one-dimensional hydrodynamic model was modified to include the tidal surface boundary layer for describing the interaction between aquaculture and tidal flow and parameterized with the field data. It replicated the observed velocity profile and was then used to investigate the impacts of varying culture densities and bottom frictions on the vertical tidal current structure. Modeling results indicate that the surface current velocity was largely damped because culture activities enhanced the frictional effects on flow intensively. The magnitude and vertical structure of tidal current are determined by aquaculture drag and bottom friction. The magnitude damps so rapidly that the vertical double-log profile is distorted within a

国家重点基础研究发展计划项目(2006CB400602)资助

收稿日期:2009-08-23;接受日期:2009-11-30

作者简介:樊 星(1978-),女,在读博士生,主要从事浅海环境动力学研究。E-mail: fanx@lreis.ac.cn, (010)64889054

water column when the frictional effect of culture density increases to a certain threshold value. The vertical structure is remarkably deformed by the varying magnitude of bottom friction. In addition, the vertical velocity structure has a nonlinear trend along with culture density and bottom friction. The variation of the vertical structure is a kind of adaptation/adjustment to both surface friction (aquaculture drag) and bottom shear stress under the tidal forcing. This study is a theoretical foundation for optimizing aquaculture configuration through regulating culture density and species distribution. The frictional effect of culture-organisms-growth and suspended cage on the flow should be considered in further studies.

KEY WORDS Vertical structure of tidal current Aquaculture Modeling study
Sanggou Bay

潮流和水交换能力是近岸养殖水域水动力环境的两个重要要素。特别是对半封闭的养殖海湾,潮流带来的营养物质和浮游生物是养殖生物的主要食物来源,而水交换能力决定了营养物收支的平衡,二者是养殖容量模型研究的基础(Grant 1996; Wildish *et al.* 1997)。对吊放养殖而言,高密度的养殖使潮流流速显著减缓,从而影响了营养物质的更新和海区的水交换能力(Grant *et al.* 2001)。因此,研究养殖活动对海区潮流流速的作用是一个十分重要的研究领域,它是研究养殖容量与海区环境之间关系的基础。

迄今为止,利用数值模型在养殖海域研究养殖活动对潮流流速的作用已经取得了一些成果。Jackson 等(1983)通过现场观测,发现海带养殖区内的潮流流速仅为外部流速的1/3,并在此基础上采用模型进行模拟。结果显示,养殖区内的流速减小了42%~68%。Grant 等(1998)接下来估算了贻贝筏式养殖区内养殖阻力为底应力的30倍。该结论得到了Boyd 等(1998)采用流速变化量平方的估算结果的验证。在吊放养殖海区,流速的衰减程度与筏绳的几何形状、养殖种类、养殖周期及收获情况等因素密切相关。特别是在贝类和海带混养区,海带吊放在贝类养成笼之间,对流速的阻碍作用更为显著(Grant *et al.* 2001)。Boyd 等(1998)首次在模型中考虑了养殖活动的阻力效应,通过计算经过每个养殖筏后流体的分离程度来估算养殖活动对流速的影响。其模拟结果显示,在经过30个养殖筏后,流速减小了28%。Fréchette 等(1989)在野生贻贝养殖区发现贻贝的消耗率与流速变化有关,并模拟了海底粗糙度的变化对流速的影响效果。结果显示,海底粗糙度的增长明显提高了湍流的输运。Grant 等(2001)通过建立一个考虑全部养殖活动的二维有限元环流模型研究养殖活动引起的摩擦效应对颗粒物交换的作用,发现养殖阻力随海底粗糙度的增加而增加。该模型首次考虑了潮流的垂直分量,故与之前的模型相比更为先进。

潮流垂直结构作为近岸海域及河口水动力研究的基本问题,对环流、营养物质输运和悬浮物动力学的研究起到重要作用。在近岸筏式养殖海区,表层海水被吊放的养殖设施阻挡(赵俊等 1996),潮流流速明显减缓。潮流垂直结构就是对外海传入潮波的驱动下,海水对上层养殖阻力和海底应力的适应与调整,因此研究养殖活动对潮流垂直结构的影响是当务之急,但至今尚未开展相关的研究工作。一维水动力模型是研究该问题的有效途径,在自然海区已被广泛使用(Fang *et al.* 1983; Chen *et al.* 1988; Li *et al.* 1993; Elliott 2002),但是在养殖海域尚未开展相关的研究。本文采用一维水动力模型来研究近岸典型筏式养殖海区的潮流垂直结构,模型通过引入潮流上边界层来描述养殖活动对潮流流速的作用。这为进一步优化养殖设施布放、养殖品种安排等奠定了理论基础。

1 海区介绍

桑沟湾位于山东半岛东端(37°01'~37°09'N, 122°24'~122°35'E),三面被陆地包围(威海荣成市),东面与黄海相连(图1)。水域面积133 km²,平均水深7~8 m,最深处达18 m,是我国北方典型的半封闭筏式养殖海区。该湾是不正规半日潮海区,潮汐日不等现象十分明显,潮差不超过2 m。潮流类型为正规半日潮,属往复流。涨潮时,湾口中、北部海水朝西南流入湾内,南部海水朝南偏东流出湾外;落潮时相反,湾口中、北部海水朝

东北流出湾外,南部海水朝西北偏北流入湾内(王丽霞等 1994)。桑沟湾地势平坦,自然地理环境优越,是黄海沿岸重要的水产增养殖水域。主要养殖类型为:在湾口外或水深较大、流急处以海带 *Laminaria japonica* 养殖为主,湾中部海带和贝类(长牡蛎、栉孔扇贝和贻贝等)兼养,湾内水深较浅处以贝类养殖为主(方建光等 1996)。

近年来该湾出现养殖密度过大、养殖生物生长所需营养物质供应不足的问题,这与养殖设施过密,减缓海湾水动力和水交换有直接的关系。1994年调查数据显示,湾口的最大流速为 24 cm/s,湾中部最大流速为 10 cm/s,与 1985 年相比,分别减少了 36 和 14 cm/s(孙耀等 1998),水交换周期大大延长,营养物质的运输和供应也显著减少。受养殖活动的影响,该海区的水平流速梯度很大。王丽霞等(1994)采用二维水动力模型,以实测水位值作为开边界模拟了当地的潮流场,指出该海区是一个水交换滞缓、物理自净能力较弱的海区。Grant 等(2001)计算结果显示,该海区的主航道流速减慢 20%,养殖中心区流速减慢 54%。史洁等(2009)采用改进的 POM 模型,加入养殖阻力和海带生长模型对,对该海域的流场进行模拟。结果显示,高密度筏式养殖使流速平均减小 40%;受养殖活动影响,全湾流速衰减最大达 80%。

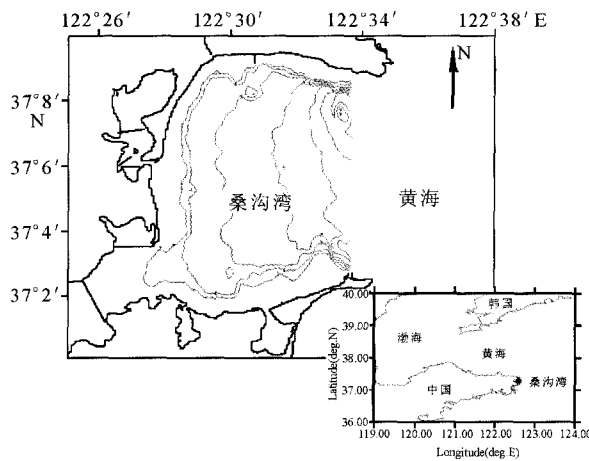


图1 研究海区

Fig. 1 Sampling stations in this study

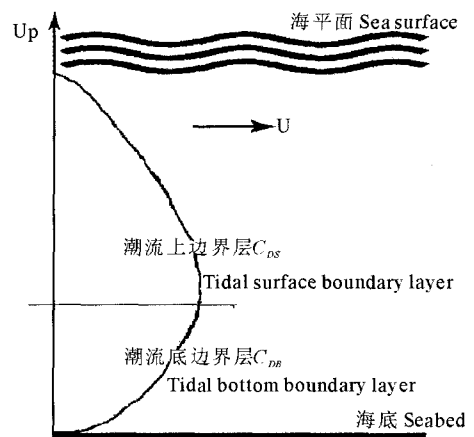


图2 模型示意

Fig. 2 Sketch map of the model

2 模型介绍

通过现场观测的潮流剖面可知,该筏式养殖海区特有的潮流上边界层的出现使得原有水动力模型不再适用,必须加以改进,增加对上边界层的描述(樊星等 2009),如图 2 所示。用阻力系数 C_{DS} 来描述养殖阻力的变化,用 C_{DB} 来描述海底应力的变化。 C_{DS} 和 C_{DB} 均来自现场观测数据的计算所得的平均值 $\overline{C_{DS}}$ 、 $\overline{C_{DB}}$ (樊星等 2009)。

$$\text{Rossby 数为:} \quad R_0 = \frac{U}{fL} \approx 0.43 \quad (1)$$

科氏力参数 f 为 10^{-4} s^{-1} , 水平特征长度 L 取为湾口宽度 11.5 km, 水平特征速度 U 取为 0.5 m/s。该海区水平方向为大尺度运动,因此动量方程中的对流项可以略去不计。

Rossby 变形半径为:

$$L_D = \frac{\sqrt{gD}}{2f} \approx 44.7 \text{ km} \quad (2)$$

垂向特征长度 D 取为平均水深 8 m。可知该湾海水的垂向运动为小尺度运动,科氏力可略去不计。因此,模型控制方程为:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -g \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} (-\overline{u'w'}) \quad (3)$$

式中, u' 和 w' 分别为 x 方向、 z 方向的脉动流速。

在该模型中,假设水平压强梯度力由正压潮波驱动(Chen *et al.*, 1988; Li *et al.*, 1993),如式(3)所示。在此我们假设水平压强梯度力是由 Laplace 波引起,于是有:

$$-g \frac{\partial \xi}{\partial x} = \frac{\partial \overline{u_T}}{\partial t} \quad (4)$$

式中, $\overline{u_T}$ 为潮波传播方向上垂向平均的潮流流速分量。由观测结果可知,在桑沟湾海区 M_2 分潮明显占优,因此潮流流速分量可表示为:

$$\overline{u_T} = U_{M_2} \cos(\omega_{M_2} t - \eta_{M_2}) \quad (5)$$

式中, U_{M_2} 和 η_{M_2} 为 M_2 分潮的调和常数,由实测数据得到。 ω_{M_2} 为 M_2 分潮的角速度,下标 M_2 代表 M_2 分潮。

根据 Boussinesq 涡粘模型假设(1877),雷诺应力(Reynolds stress)为:

$$-\overline{u'w'} = \nu_T \frac{\partial u}{\partial z} \quad (6)$$

因此,式(3)可改写为:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial \overline{u_T}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_T \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (7)$$

其边界条件为:

$$z = \xi: \overline{\tau_s} = \nu_T \frac{\partial u}{\partial z} = \overline{C_{DS} u_s} |u_s|$$

$$z = -h: \overline{\tau_B} = \nu_T \frac{\partial u}{\partial z} = \overline{C_{DB} u_B} |u_B|$$

式中, t 为时间; x, y, z 分别代表东、北、上方向; $z=0$ 在平均海平面,向上为正; u 为 x 向潮流分量, ν_T 为涡粘系数, u_s 和 u_B 分别表示潮流上边界层和底边界层内垂向平均的潮流流速, ξ 为水位值, h 为平均海平面。

本模型的湍流封闭形式采用 K 方程。假设潮流为充分发展的稳定流动,且为局部均匀各向同性湍流,在惯性子区内湍动能(TKE)的生成与耗散达到局部平衡。因此 K 方程可简化为:

$$\frac{\partial k}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\nu_T}{\sigma} \frac{\partial k}{\partial z} \right) \quad (8)$$

边界条件为:

$$z = \xi \text{ 时, } k_s = \frac{|u_{*s}|^2}{\sqrt{C_\mu}} \quad z = -h \text{ 时, } k_B = \frac{|u_{*B}|^2}{\sqrt{C_\mu}}$$

式中, k 代表 TKE, Prandtl/Schmidt 数 $\sigma=1$, C_μ 为经验常数。

根据 Komogorov-Prandtl 混合长公式(5)(Rodi 1980), ν_T 可写为:

$$\nu_T = C_\mu \sqrt{k} l_m \quad (9)$$

式中, l_m 为混合长,采用 GOTM 提供的抛物形剖面形式(Umlauf *et al.*, 2007)

$$l_m = \frac{\kappa(d_s + \overline{z_{0S}})(d_B + \overline{z_{0B}})}{d_s + \overline{z_{0S}} + d_B + \overline{z_{0B}}} \quad (10)$$

该式在近表层和近底层收敛于 $\kappa(z + z_0)$ 。 d_B 和 d_s 分别定义为从海底和海表到 z 处的距离,因此有水深 $H = d_B + d_s$ 。 $\overline{z_{0B}}$ 和 $\overline{z_{0S}}$ 分别为海底和海表面的粗糙长度。

3 计算方案

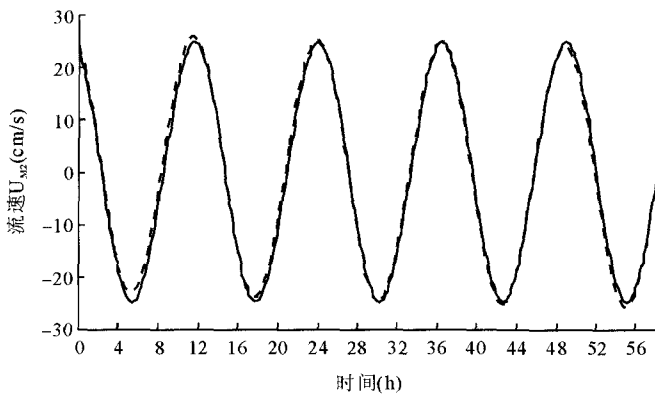
求解模型控制方程式(7)的数值解时,空间网格划分采用 Arakawa C 网格。对时间的导数采用前插(Forward difference)格式,对空间二阶导数选用 Crank-Nicolson (1947) 半隐差分格式。时间步长取为 $\Delta t = 300$ s, 较之 Chen 等(1988)的 0.5 h 和 Elliott (2002)的 1 h 而言更为精细。水深 H 取为现场观测期间的平均水深

12.7 m,空间步长取为 $\Delta z=0.1$ m,因此将空间均匀地分为 127 层。

4 数值实验与分析

在自然海区,垂向平均的潮流流速要经过 4~6 个潮周期后才会稳定下来,成为纯振荡流(Li *et al.* 1993; Chen *et al.* 1988)。本文只对 M_2 分潮的东分量进行模拟。经计算,模拟流速在经过 6 个潮周期后达到稳定状态。图 3 给出了模型模拟得到的东分量平均流速与实测平均流速的比较结果。可见,模拟结果在流速最大时刻与实测结果有所偏差,而在其他时刻与实测结果吻合较好,这是由于本模型将海水的流动假定为 Laplace 波引起的。

图 4 给出了 1 个潮周期内潮流流速东分量的剖面,时间间隔为 1 h。每一时刻的最大流速出现在平均海面以下的 9~11 m 处。模拟结果显示,在平均海平面上出现了流速为 0 的现象,这与实际观测结果不符。流速为 0 使得水柱上层的速度梯度 $\partial u/\partial z$ 高于实测结果,故表层应力要高于观测结果,上层的摩擦速度 u_{*s} 、阻力系数 C_{DS} 和平均粗糙长度 $\overline{Z_{0s}}$ 的值也偏高。式(8)中的经验常数 C_μ 在此取为 0.5。

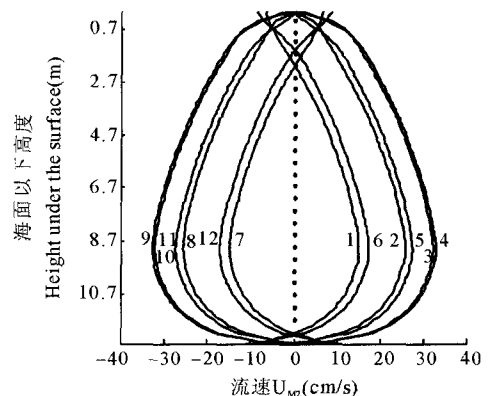


注:实线为模拟结果,折线为观测结果

Note: Solid line for model result, dashed line for observation result

图 3 垂向平均的 M_2 分潮流速东分量时间序列

Fig. 3 Time series of depth-averaged east component of M_2 current



注:时间间隔为 1 h,数字代表时间序号

Note: Time interval is 1h and the numbers refer to hours

图 4 M_2 分潮东分量在 1 个潮周期内的剖面变化情况

Fig. 4 Vertical structure of the east M_2 -component of tidal currents at hourly intervals over a tide cycle

本文设计了 6 组实验来探讨养殖活动与潮流流速剖面的相互作用。将模型中 3 个参数(C_{DS} , C_{DB} 和 C_μ)分别取为各自观测值的 10 倍、1 倍和 1/10 来表示不同的现场情况(表 1)。在 Case A 中 C_{DS} 为 10 倍观测值 $\overline{C_{DS}}$,表示其养殖阻力(Aquaculture drag)大大强于现有阻力;在 Case B 中 C_{DS} 为 1/10 $\overline{C_{DS}}$,表示其养殖阻力远小于现有阻力。这两组中 C_{DB} 和 C_μ 均保持观测值不变。在 Case C 中 C_{DB} 取为 10 倍观测值 $\overline{C_{DB}}$;在 Case D 中取为 1/10 $\overline{C_{DB}}$ 。这两组中 C_{DS} 和 C_μ 均保持不变。在 Case E 中 C_μ 取为 10 倍模拟值;在 Case F 中 C_μ 取为 1/10 模拟值。这两组中 C_{DS} 和 C_{DB} 均保持观测值不变。 C_{DS} 在本模型中反映的是养殖阻力的变化,因此假设其随养殖生物及设施数量的增加而增加。 C_{DB} 表示海底摩擦(Bottom friction)的变化,受底质类型和湍流耗散程度的影响。Case A 和 Case B 探讨的是养殖密度的变化对潮流流速剖面的影响;Case C 和 Case D 探讨的是不同底质类型对潮流剖面的影响;Case E 和 Case F 探讨不同程度的湍流耗散对潮流剖面的影响。

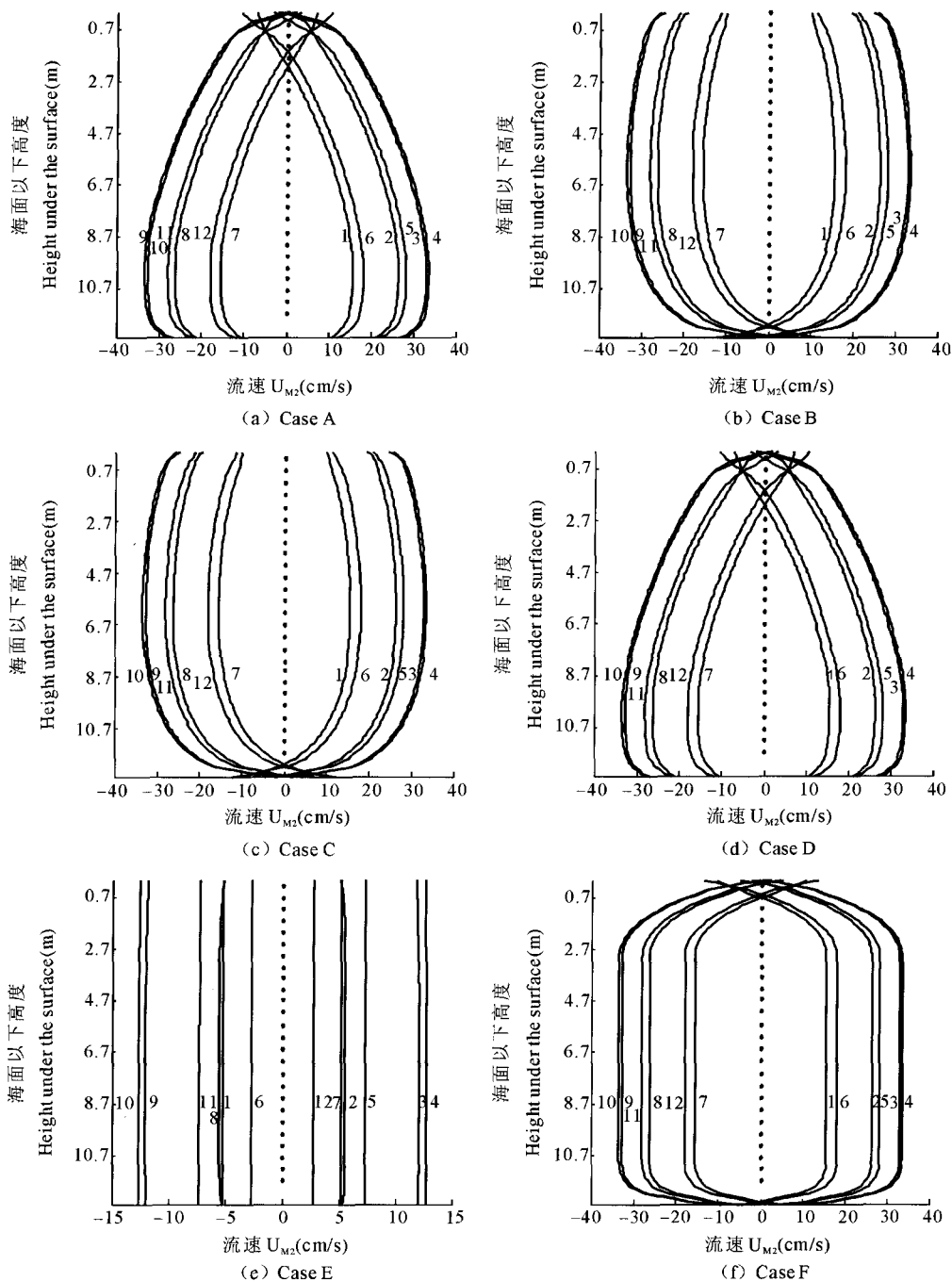
图 5 所示的各组流速剖面时间间隔均为 1 h,时间长度为 1 个潮周期。在图 5(a)~(b) 中,当 $C_{DS} > \overline{C_{DS}}$ 时,虽然表层流速减小,但速度梯度 $\partial u/\partial z$ 增加,因此养殖阻力随养殖密度的增加而增加,潮流上边界层变厚,

表 1 数值实验参数

Table 1 Experimental parameters

Case	C_{DS}	C_{DB}	C_μ
A	0.54	0.015	
B	0.0054		0.5
C	0.054	0.15	
D		0.0015	
E	0.054	0.015	5
F			0.05

底边界层变薄,如图 5(a)所示。当 $C_{DS} < \overline{C_{DS}}$ 时恰好相反,养殖阻力减弱,潮流上边界层变薄,底边界层变厚,如图 5(b)所示。图 5(c)~(d)中,当 $C_{DB} > \overline{C_{DB}}$ 时底边界层随着底应力的增加而变厚。当 $C_{DB} < \overline{C_{DB}}$ 时底边界层随着底应力的减小而变薄。图 5(e)~(f)中,当水体耗散达到 10 倍值时,潮流流速迅速减小,速度梯度 $\partial u / \partial z$ 消失,水体中没有边界层存在,整个水柱呈刚体状,随潮周期变化。如果水体的耗散减弱,由海面 and 海底向水体传输的湍流动量减弱,故上、下两个边界层逐渐变薄,如图 5(e)所示。当 v_T 为 1/10 模拟值时,湍流动量传输不足,因此在两个边界层之外已没有速度梯度存在,如图 5(f)所示。



注:时间间隔为 1 h,数字代表时间序号

Note: Time interval is 1 h and the numbers refer to hours

图 5 数值实验各组所得 1 个潮周期内的潮流流速剖面

Fig. 5 Experimental vertical structure of current at hourly intervals in a tide cycle

5 结论

本文采用一维水动力模型对我国近岸典型养殖海区桑沟湾的潮流垂直结构进行研究。将原有模型加以改进,增加对潮流上边界层的描述,通过改变不同的参数来研究养殖活动与潮流垂直结构之间的相互作用。所得结论为:高密度筏式养殖对潮流的阻碍作用很强,使得表层流速显著减缓;潮流流速及其垂直剖面均受到上层养殖阻力和海底应力的共同作用。当养殖密度达到临界值后,流速剖面出现变形,流速迅速减小。同时,流速剖面随底应力的变化也会出现同样变形的情况。因此潮流剖面随养殖密度的变化呈非线性变化趋势。

本文所建立的模型具有一定的适用度。除可在近岸正压的潮流占优养殖海区研究筏式养殖与潮流的相互作用之外,还适用于正压的潮流占优自然海区(将上边界条件视为0)。本模型模拟得出的潮流剖面在平均海平面出现了零流速现象,这显然与实际情况不符。因此,还需进一步对模型加以改进。生物生长与吊笼等因素对海水运动的阻力效应是需要进一步考虑的问题,为预测养殖容量与环境的关系提供科学依据。这为进一步优化养殖设施布放、养殖品种安排等奠定了理论基础。

参 考 文 献

- 王丽霞,石磊,孙长青. 1994. 桑沟湾海域的潮流数值计算. 青岛:中国海洋大学学报专辑,8: 77~83
- 史洁,魏皓. 2009. 半封闭高密度筏式养殖海域水动力场的数值模拟. 中国海洋大学学报(自然科学版), 39(6): 1181~1187
- 孙耀,赵俊,周诗贻,宋云利,崔毅,陈聚法,方建光,孙慧玲,匡世煊. 1998. 桑沟湾养殖海域的水环境特征. 中国水产科学, 5(3): 69~75
- 赵俊,周诗贻,孙耀,方建光. 1996. 桑沟湾增养殖水文环境研究. 海洋水产研究, 17(2): 68~79
- 樊星,魏皓,原野,赵亮. 2009. 近岸典型养殖海区的潮流垂直结构特征. 中国海洋大学学报(自然科学版), 39(2): 181~186
- Boyd, A. J., and Heasman, K. G. 1998. Shellfish mariculture in the Benguela System; water flow patterns within a mussel farm in Saldanha Bay, South Africa. J. Shellfish Res. 17: 25~32
- Chen, D., Horrigan, S. G., and Wang, D. P. 1988. The late summer vertical nutrient mixing in Long Island Sound. J. Mar. Res. 46: 753~770
- Elliott, A. J. 2002. The boundary layer character of tidal currents in the eastern Irish Sea. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 55: 465~480
- Fang, G., and Ichiye, T. 1983. On the vertical structure of tidal currents in a homogeneous sea. Geophys. J. Intern. 73(1): 65~82
- Fang, J., Sun, H., Yan, J., Kuang, S., Li, F., Newkirk, G. F., and Grant, J. 1996. Polyculture of scallop *Chlamys farreri* and kelp *Laminaria japonica* in Sungo Bay. Chin. J. Oceanogr. Limnol. 14: 322~329
- Fréchette, M., Butman, C. A., and Geyer, W. R. 1989. The importance of boundary layer flows in supplying phytoplankton to the suspension feeder, *Mytilus edulis* L. Limnol. Oceanogr. 34: 19~36
- Grant, J. 1996. The relationship of bioenergetics and the environment to the field growth of cultured bivalves. J. Exp. Mar. Biol. Ecol. 200: 239~256
- Grant, J., Stenton-Dozey, J., Monteiro, P., Pitcher, G., and Heasman, K. 1998. Shellfish culture in the Benguela system; a carbon budget of Saldanha Bay for raft culture of *Mytilus galloprovincialis*. J. Shellfish Res. 17: 41~49
- Grant, J., and Bacher, C. 2001. A numerical model of flow modification induced by suspended aquaculture in a Chinese bay. Can. J. Fish. Aqua. Sci. 58: 1003~1011
- Jackson, G. A., and Winant, C. D. 1983. Effect of a kelp forest on coastal currents. Continental Shelf Research, 2: 75~80
- Li, Z., and Elliott, A. J. 1993. Modeling the vertical structure of tidal currents and temperatures in the UK shelf seas. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 36: 549~564
- Rodi, W. 1980. Turbulence models and their application in hydraulics-A state of the art review. Netherlands: Book Pub of IAHR
- Wildish, D., and Kristmanson, D. 1997. Benthic suspension feeders and flow. Cambridge University Press, New York
- Umlauf, L., Burchard, H., and Bolding, K. 2007. GOTM source-code and test case documentation (Version 4.0)