

秦皇岛筏式养殖对水动力和污染物输运的影响

匡翠萍¹, 董智超¹, 顾杰², 单云驰³

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 上海海洋大学 海洋生态与环境学院, 上海 201306;
3. 华东电力设计院有限公司, 上海 200063)

摘要: 随着秦皇岛近海筏式养殖产量增加和养殖规模的扩大,大量养殖网笼的布置改变了近岸海洋动力环境特性。结合筏式养殖物理模型试验和实测资料对水动力和水质数学模型进行率定和验证,运用验证好的数学模型,模拟秦皇岛有无养殖区条件下近岸海域水动力和污染物输运过程,探究筏式养殖区对海域水动力和污染物输运的影响机制。结果表明:养殖区对海域水流有明显的阻碍作用,区内流速明显减小;高密度养殖区较低密度养殖区流速减小幅度大;养殖区阻碍了污染物的输运,对污染输运的影响集中在养殖区内部,且影响程度向外海递减。

关键词: 筏式养殖; 水动力; 污染物输运

中图分类号: TV148

文献标志码: A

Impact of Raft-culture on Hydrodynamic and Pollutant Transport in Qinhuangdao Coastal Water

KUANG Cuiping¹, DONG Zhichao¹, GU Jie², SHAN Yunchi³

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Marine Ecology and Environment, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 3. East China Electric Power Design Institute Co. Ltd., Shanghai 200063, China)

Abstract: With the increasing of the production and scale of raft-culture in Qinhuangdao coastal water, the characteristics of hydrodynamic and environment were changed by layout of a large number of breeding cage. A hydrodynamic and water quality model was calibrated and validated by the physical experiment of raft-culture and observation data. The validated model was used to simulate the hydrodynamic and pollutant transport process respectively with or without the raft-culture. The influence mechanism of the raft-culture on hydrodynamic and the pollutant transport was studied. It reveals that flow in the culture zone can be obstructed where

the velocity decreases obviously; the velocity reduction in a higher density raft-culture zone is larger than that in a lower density zone; pollutant transport is obstructed by raft-culture, which leads the impact of obstruction concentrates inside raft-culture zone and the impact degree decreases progressively toward the sea from the raft-culture zone.

Key words: raft-culture; hydrodynamic; pollutant transport

随着海洋经济的快速发展,水产养殖产品和新食品供应的需求不断增加^[1],海产养殖规模不断扩大,我国海水养殖规模从 1978 年至 2014 年 30 余年间增长了 22 倍^[2],总产量占全球海水养殖的 61.2%^[3],近岸海域水体富营养化程度不断加剧^[4],近海养殖已经成为海洋水环境污染的主要原因之一^[5]。随着近海筏式扇贝养殖产量增加和养殖面积扩大,大面积海水养殖网笼的布置,对海域水动力条件产生了一定的阻碍作用,改变了养殖区及邻近海域的水动力特性,由于浅海养殖阻碍了海水的正常运动,减弱了水动力强度,水体交换能力下降,交换周期增长,极大改变了区域的污染物扩散和水环境质量^[6],2011 年 5 月桑沟湾爆发了大规模的赤潮^[7],2016 年 7 月和 8 月秦皇岛发生了两次赤潮现象^[8],可见筏式养殖带来的生物沉积和对水体交换能力的减弱在一定程度上成为了赤潮爆发的诱因^[9]。因此,筏式养殖对区域水动力和污染物输运影响关系的研究显得极其重要。

通过对养殖区流场的观测,可以发现海水养殖活动对养殖海域动力环境有显著的影响。Boyd 和 Heasman^[10]测量了南非 Saldanha 湾贝类养殖区内外的流速,养殖区外的流速是养殖区内的 6 倍。李铁军等^[11]对浙江三门湾筏式养殖区前后进行观测,并

收稿日期: 2018-06-28

基金项目: 海洋公益性行业科研专项(201305003-5)

第一作者: 匡翠萍(1966—),女,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为海岸工程。

E-mail: cpkuang@tongji.edu.cn

通信作者: 顾杰(1961—),男,教授,工学博士,主要研究方向为海洋环境。E-mail: jgu@shou.edu.cn



扫码
查看
作者
扩展
介绍

使用潮汐观测资料进行调和与分析,养殖区前后减少的流速变化率约为 6%~22%。项福亭等^[12]对蓬莱湾扇贝养殖区流速调查发现 1975 年至 1990 年 15 年间养殖中心区的最大流速减少了近 75%,最小流速减少了近 90%。陈清满^[13]发现枸杞岛海域紫贻贝养殖设施对养殖海域水交换产生严重阻滞作用。赵东波等^[14]研究了罗源湾养殖区内潮动力结构的特征及其对养殖活动的响应,高密度的养殖设施和生物的存在,阻碍了海湾水体的流动,产生了双边层结构并减弱了潮汐不对称效应。张泽华等^[15]以黑泥湾为研究对象,分析了浅海海带筏式养殖对周边海域悬浮体动力特征的影响作用,表明筏式养殖改变了潮流流速和悬浮体质量浓度的垂向分布特征,抑制了海底泥沙的再悬浮作用。季如宝等^[16]在对贝类养殖的海湾生态系统研究中指出,贝类密集区生物的沉降作用非常明显。Hatcher 等^[17]在加拿大 Upper South Cove 贻贝养殖区进行了测定,养殖区的沉降量往往是非养殖区的 2 倍以上。Bouchet 和 Sauriau^[18]对太平洋贝类养殖区使用生态质量评估发现,悬吊养殖系统比底播养殖有机物富集量更高。

随着计算机技术的发展,数学模型在海水养殖数值模拟研究上得到了广泛应用。Panchang 等^[19]认为水动力和粒子追踪数学模型,是研究养殖区污染物的扩散和运移规律及其物质归宿是较为有效的手段。Fan 等^[20]运用水动力模型研究养殖区对水流的垂向结构的分布的影响,流速垂向结构分布主要由养殖区拖曳力和底摩擦共同控制。Durate 等^[21]基于三维模型计算加利西亚河口湾的水动力特性,通过对余流场进行分析发现筏式养殖可减少近 40%的余流流速,这将有助于有害藻华的发生。樊星等^[22-23]基于水动力模型和现场观测,研究养殖密度对潮流垂直结构的影响机制,提出潮流上边界层的概念,通过建立双阻力模型得到养殖区潮流上边界层平均阻力系数,边界层的厚度受到养殖密度影响。史洁和魏浩^[24]使用优化的 POM 模型对桑沟湾养殖区进行模拟,发现桑沟湾高密度的养殖使流速平均减小 40%,平均半交换时间增长 71%。

秦皇岛养殖功能用海分布在洋河口渔港航道以南至滦河口唐山分界以北的海域,区域内底栖生物丰富,水体透明度高,水质良好,符合渔业水质标准^[25-26]。秦皇岛海域海湾扇贝养殖业快速发展^[27],为了降低筏式养殖对近岸海域环境的污染,需要对筏式养殖对动力环境的影响机理进行综合分析。国内外的研究学者关于筏式养殖对水平和垂向的水流

结构的影响已经有了诸多研究,但对养殖区周边海域动力和水质的综合性影响分析较少。针对秦皇岛筏式养殖区,课题组已经通过物理模型试验,研究了筏式养殖区垂向流速分布特征,探究了养殖区内外流速在不同水深、来流速度、养殖密度条件下的变化情况^[28],并利用明渠流理论,以对数函数曲线与抛物线曲线对流速垂向分布进行了拟合和分析,指出养殖密度对流速垂向分布公式的影响特性^[29]。本文基于物理模型试验对筏式养殖垂向流速分布的研究成果,建立秦皇岛海域水动力和水质模型,研究筏式养殖区对海域的水动力和污染物输运的影响机制,为海水养殖的规划和布局及海洋环境评价提供一定的理论依据。

1 数学模型的建立和验证

1.1 控制方程

基于物理模型试验的成果对动力垂向结构进行概化,采用二维数学模型研究筏式养殖区对秦皇岛海域的动力环境水平结构的影响。水动力模型的控制方程是建立在二维浅水方程的基础上,在笛卡尔坐标系下,通过对三维水平动量方程和连续方程沿深度进行积分,得到二维浅水方程如下:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = hS \quad (1)$$

$$\frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial hu^2}{\partial x} + \frac{\partial hvu}{\partial y} = fvh - gh \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\tau_{sx} - \tau_{bx}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y}(hT_{xy}) + hu_s S \quad (2)$$

$$\frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial hv^2}{\partial y} + \frac{\partial hvu}{\partial x} = -fuh - gh \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\tau_{sy} - \tau_{by}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y}(hT_{yy}) + hv_s S \quad (3)$$

式中: η 表示水位, $h=\eta+d$, h 为总水深, d 为静止水深; S 为源流量, u_s 和 v_s 表示源流入在 x 和 y 方向上的速度; t 为时间; u 与 v 表示 x 和 y 方向上的水深平均流速; g 为重力加速度; f 为柯氏力系数; ρ 为水体密度, τ_{sx} 和 τ_{sy} 表示 x 和 y 方向上的风应力; τ_{bx} 和 τ_{by} 表示 x 和 y 方向上的底部摩擦力;侧应力 T_{ij} 包括黏性摩擦和紊动摩擦等。通过对涡黏方程沿水深平均流速梯度方向计算如下:

$$T_{xx} = 2A \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) \quad T_{xy} = A \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad T_{yy} = 2A \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (4)$$

水质模型的基本控制方程为

$$\frac{\partial hC}{\partial t} + \frac{\partial huC}{\partial x} + \frac{\partial hvC}{\partial y} = hF_C - hk_p C + hC_S S \quad (5)$$

式中: C 为浓度标量; k_p 表示污染物的衰减率; C_S 为源处浓度标量; F_C 为水平扩散项; A 为水平涡黏系数.

$$F_C = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_h \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_h \frac{\partial C}{\partial y} \right) \right] \quad (6)$$

式中: D_h 为水平扩散系数.

对于营养盐等非保守物质,在随流平流、扩散迁移的同时,由于大气挥发作用、微生物降解作用、浮游生物的富集作用以及悬浮颗粒的吸附作用等,其本身的性质和质量也在发生变化.其中的生物化学作用一般与温度、盐度等条件有关,本文以 COD(化学需氧量)为例,污染物降解考虑一级衰减过程,满足一级反应方程,即

$$\frac{dC_{\text{COD}}}{dt} = -K(T, S)_{\text{COD}} \times C_{\text{COD}} \quad (7)$$

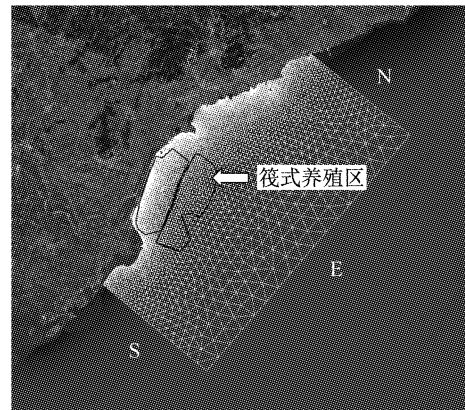
式中: $K(T, S)_{\text{COD}}$ 为降解速率,若 $K(T, S)_{\text{COD}} = 0$, 为保守物质.

1.2 模型区域和网格

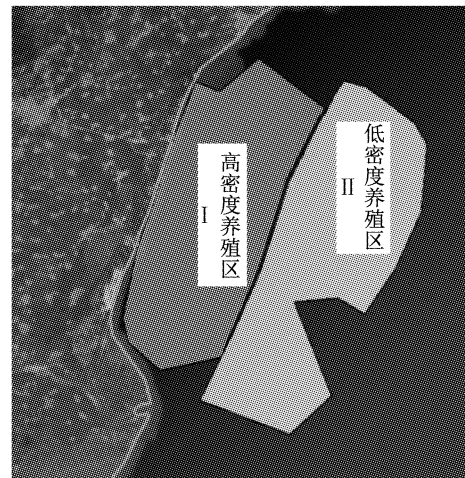
为保证模型计算的合理性和准确性,本文采取大小模型嵌套模式进行计算,使用验证过的大区域模型为小区域模型提供计算边界.大区域模型为渤海模型^[30],使用大连老虎滩至烟台两个潮位站连线作为开边界^[31].小区域模型包含整个养殖区和邻近海域,小区域模型沿岸南起滦河以南 20 km,北至山海关以北约 25 km,向外海延伸约 60 km,东北和西南侧外海开边界长约 50 km,东南侧外海开边界长约 115 km,区域范围为 $119^{\circ} 7' 53.93'' \text{E} \sim 120^{\circ} 29' 29.83'' \text{E}, 39^{\circ} 1' 32.43'' \text{N} \sim 40^{\circ} 5' 55.45'' \text{N}$.秦皇岛计算网格和养殖区位置如图 1 所示,数学模型采用非结构三角网格,网格东西跨度约 110 km,南北跨度约 120 km,网格共计 9 442 个节点,三角形单元共计 17 973 个.网格分辨率按研究需要对近岸区域网格进行加密处理,外海网格则相对稀疏.网格最高分辨率约为 15 m,最低分辨率约为 7 km.近岸区域较高分辨率有利于合理表现近岸地形的变化和曲折岸线的处理,远海区较低分辨率有利于合理概化外海地形并减少模型计算时间.筏式养殖区主要集中于洋河和滦河之间,老虎石以北有少量分布.本文根据卫星遥感资料显示的养殖区密度,将养殖区概化成高密度区(I)和低密度区(II).

1.3 边界条件和参数设定

模型外海开边界 N、E、S 使用潮位过程和流速过程的复合边界条件来驱动.其中,潮位和流速过程



a 研究区域网格



b 筏式养殖区范围

图 1 小模型计算网格及筏式养殖区范围

Fig.1 Computational mesh of small region model and raft-culture zone

由渤海潮流模型计算提供.模型陆向开边界为 11 个河口,河流边界通过河流实测月平均流量控制. COD 是表征有机污染的一个综合因子,也是海域定量描述受污染程度的重要指标之一.很多研究将 COD 与赤潮的爆发直接联系起来,甚至将其作为海域富营养化的重要指标之一,而且 COD 受生物活动的影响相对来说比营养盐小,它的生化降解作用也较容易确定^[31].因而本文选取 COD 作为计算边界.污染物 COD 浓度根据外海污染物平均浓度取值, N、S 边界 COD 浓度取 $1.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, E 边界 COD 浓度取 $1.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 河流入海条件,见表 1,由 7、8 月实测月平均流量及入海污染物浓度提供.

模型计算参数主要包括时间步长、CFL 数、干湿边界判定参数、水平涡黏系数、底床摩擦力、科氏力等.模型的时间步长设置为 0.01~1 s 的变化步长,使 CFL 数小于 1,可以有效地解决模型不稳定的问题;干湿边界判定参数中,干水深 h_{dry} 取值 0.005 m,淹没水深 h_{flood} 取值 0.05 m,湿水深 h_{wet} 取值 0.1 m;

表 1 秦皇岛入海河流 2013 年 7、8 月平均流量(m³ · s⁻¹)及 COD 浓度(mg · L⁻¹)

Tab.1 Mean flux and COD concentration of seagoing rivers in Qinhuangdao in July and August, 2013

月份	条件	石河	新开河	汤河	新河	戴河	洋河	人造河	东沙河	大蒲河	七里海	滦河
7 月	流量	8.0	15.8	20.4	0.1	7.1	2.9	5.8	1.0	10.1	2.2	115.3
	COD	33.6	1.6	28.8	27.2	20.8	28.8	36.8	32.0	33.6	32.0	35.2
8 月	流量	13.3	42.0	21.9	1.2	5.4	17.6	6.3	0.5	5.5	1.9	160.0
	COD	36.8	1.8	31.2	28.8	27.2	36.8	52.8	36.8	49.6	30.4	27.2

水平涡黏系数设定采用 Smagorinsky 亚网格尺度模型计算, Smagorinsky 系数 c_s 取常数 0.28; 科氏力由模型所在区域的纬度确定。

底床摩擦力是二维水动力模拟中的一个重要参数, 本文采用曼宁数作为衡量底床摩擦力的指标。养殖区以外海域曼宁数 M 根据以往该区域的研究^[32] 取均值为 $74 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$ 。秦皇岛海域筏式养殖区由多个子养殖区构成, 各子养殖区间隔大于 2 km 定义为低密度养殖区, 间隔小于 2 km 定义为高密度养殖区。基于物理模型试验养殖区曼宁数参考物模试验的率定结果取值^[33], 相应高密度养殖区曼宁数取值为 $20 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$, 低密度养殖区曼宁数取值为 $30 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

水温根据秦皇岛近岸海域实测资料, 因 7、8 月份水温较接近, 取实测平均值为 $25.8 \text{ }^\circ\text{C}$; 海区初始 COD 浓度设为 $1.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; COD 的阿伦尼乌斯温度系数 θ_{COD} 取 1.02。根据秦皇岛近岸海域污染物分

布规律, 本文取 COD 在 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 时的降解系数 $K_{20} = 0.001 \sim 0.0325$ ^[33]。

1.4 模型验证

采用养殖区海域实测潮位、潮流和 COD 浓度资料对水动力模型和水质模型进行验证, 验证点位如图 2a 所示。潮位验证(WL1 点)采用 2013 年 5 月 10 日 8:00 至 2013 年 5 月 12 日 8:00 秦皇岛潮位站点的实测潮位资料, 流速和流向验证(SDL07 及 SDL09 点)采用 2013 年 5 月 11 日 8:00 至 2013 年 5 月 12 日 8:00 秦皇岛海域潮流站点实测流速和流向资料, 污染物 COD 的验证使用 2013 年秦皇岛 8 月期间 28 个实测站(Q01-Q28)所测 COD 浓度进行验证。潮位、流速、流向及 COD 浓度的验证结果如图 2 所示。潮位、流速和流向的模型计算值与实测值相位一致、数值基本吻合, 拟合较好。COD 计算值取测量日期 COD 浓度日平均值, 28 个验证点位计算结果与实测值误差较小, 除 Q21 点外, 绝对误差均在 ± 0.45

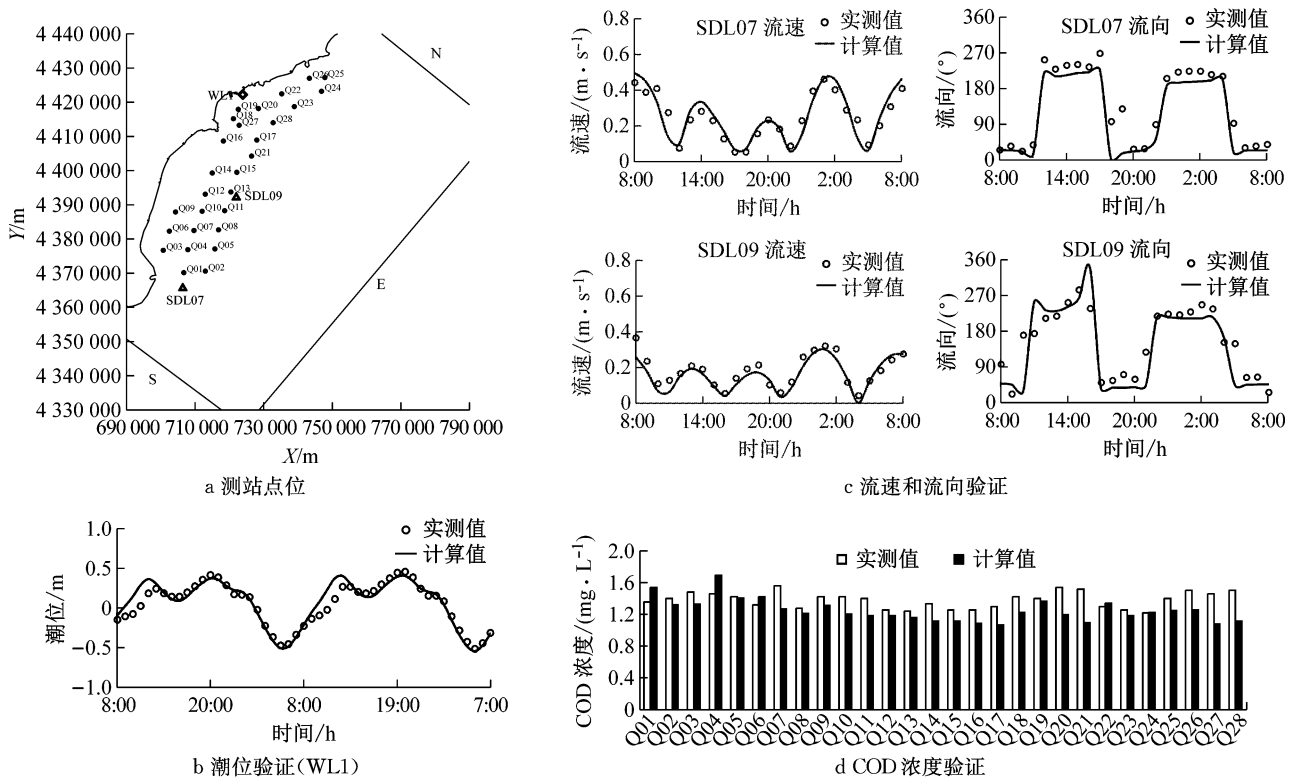


图 2 验证点位, 潮位、流速、流向及 COD 浓度验证

Fig.2 Location of verified stations, verification of tidal level, velocity magnitude, current direction and COD.

$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以内,相对误差均在 30% 以内。

为了评价模型计算结果的优劣,比较计算值和实测值之间的差异程度,本文采用数学模型中常使用的模型评价方法进行模型计算评价. 百分比模型偏差法^[34]用来计算模型的模型计算值 M 和相应实测值 D 之间的百分比偏差率,计算方法如下:

$$P = \frac{\sum_{i=1}^N |D - M|}{\sum_{i=1}^N |D|} \quad (8)$$

当 $P \leq 10$,拟合结果极好;当 $10 < P \leq 20$,拟合结果非常好;当 $20 < P \leq 40$,拟合结果好;当 $P > 40$,拟合结果差. 使用百分比模型偏差法对秦皇岛水动力和水质模型计算效率进行评价,计算得到潮位百分比偏差为 29、流速、流向百分比偏差均小于 20, COD 浓度 28 个站点总评价百分比偏差为 12.5,所有站点评价均为好或非常好,该模型可以用于计算分析养殖区对海域水动力和污染物运输的影响。

2 筏式养殖对水动力的影响

为了与养殖区存在情况下的近岸海域水动力进行对比,模拟无养殖区情况作为模型的对照组. 采用有养殖区流场与无养殖区流场流速相减,得到流速差值,如图 3 所示. I 为高密度养殖区,II 为低密度养殖区. 高密度养殖区流速有明显减小;低密度养殖区流速也有所减小,但减小程度比低密度养殖区小;滦河口外由于岸线走向改变沿岸流的方向,流速减小;其他区域减小幅度自近岸向外海递减. 有养殖区情况下养殖区 I 内流速明显减小, I 区近岸处流速减少幅度约为 20%~50%, I 区向海侧流速减少幅度为 10%~20%; II 区流速变化较小,减少幅度小于 10%;因涨落潮流方向为 NE-SW 向,非养殖区的沿

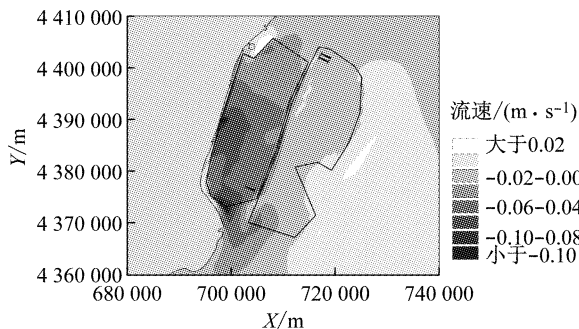


图 3 平均流速变化场(有养殖区-无养殖区)

Fig. 3 Distribution of mean flow velocity change caused by the scenarios with and without culture zone

岸区域也有一定流速减小,减小幅度小于 10%;受养殖区布置及走向影响,养殖区外侧向外海延伸区域,流速增加,增加幅度小于 10%。

随着人们对海产品的需求不断增加,养殖面积和养殖密度都在逐步加大,养殖密度增加使养殖区对水流的阻碍更加显著. 为探究养殖区密度的变化对秦皇岛近岸海域水动力影响程度和影响范围,通过改变模型区域的曼宁数场来实现养殖密度的增加. 由于高密度养殖区阻水能力更强,养殖区密度越高,曼宁数越小. 在模型地形区域、边界条件不变的条件下,将高密度养殖区曼宁数较初始值由 $20 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$ 更改为 $10 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$,低密度养殖区曼宁数较初始值由 $30 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$ 更改为 $20 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[33] 形成更高密度养殖区。

更高密度养殖区与无养殖区流速场进行差值的结果如图 4 所示. 更高密度养殖区条件下养殖区 (I、II) 内流速明显减小,对流速的削减量较正常养殖情况下更大,影响范围增加,养殖区外侧出现大范围流速增大的现象. 经计算, I 区近岸处流速减少幅度约为 40%~80%, I 区向海侧流速减少幅度为 20%~40%; II 区流速变化较小,减少幅度为 10%~30%;因涨落潮流方向为 NE-SW 向,沿岸区域也有一定流速减小,减小幅度小于 20%;向外海延伸区域,流速增加,增加幅度小于 10%. 当养殖密度增加时,高密度养殖区流速减少更加明显,而其外部部分海域流速增加也更明显。

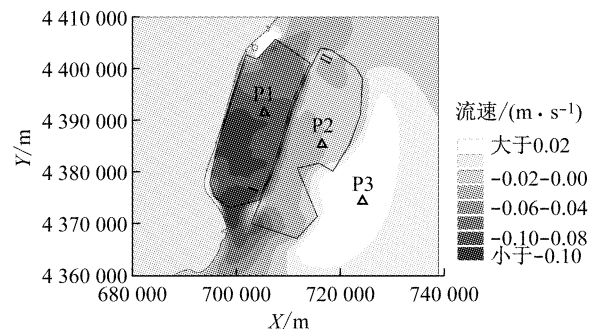


图 4 平均流速变化场(更高密度养殖区-无养殖区)

Fig. 4 Distribution of mean flow velocity change caused by the scenario with higher density culture zone and without culture zone

P1、P2、P3 分别为 I 区、II 区、外海区点位,分别提取在无养殖区、有养殖区及更高密度养殖区三种情况下流速变化过程进行比较(图 5). P1 和 P2 点在没有养殖区情况下流速最大,有养殖区次之,提高养殖密度后流速进一步下降,当流速值达到极大值时,以 20:00—24:00 为例,三种情况下流速极大值有明显

区别, P1 点有养殖区情况比无养殖区情况流速减少约 40%, 高密度养殖比无养殖情况流速减少约 70%; P2 点相应变化量分别为 15% 和 30%; P3 点位于养殖区外, 养殖区密度越高, 导流作用越强, 流速增大, 但流速变化幅度较小. 调整相位一致后, 比较养殖区内测点流速变化发现, 平均整个潮周期, P1 点在正常密度养殖区和高密度养殖情况下, 流速分别减少 18% 和 42%, P2 点流速分别减少 10% 和 18%, 可见养殖区密度提高, 对流速影响越大. 同时, 三种情况涨落潮过程有一定相位差, P1 点有养殖区条件下流速过程较无养殖区条件平均滞后 1 h, 高密度养殖区条件下流速过程较有养殖区条件平均滞后 0.5 h, 而 P2 点在有养殖区条件下流速过程较无养殖区条件平均滞后 0.25 h, 高密度养殖区条件下流速过程较有养殖区条件平均滞后 0.5 h, 产生相位差的原因主要是由于养殖区对水流的阻碍作用, P1 点由于位于近岸水域, 水流受到 I 区和 II 区养殖区的共同阻碍, 而 P2 点位于 II 区, 处于 P1 点外侧, 受近岸养殖区阻碍的影响较小, 且 P2 点的养殖区密度低于 P1 点的养殖区密度, 所以 P2 点流速过程的滞后性弱于 P1 点. P3 点由于位于养殖区外, 受到养殖取得阻碍作用较小, 流速过程的相位没有明显改变.

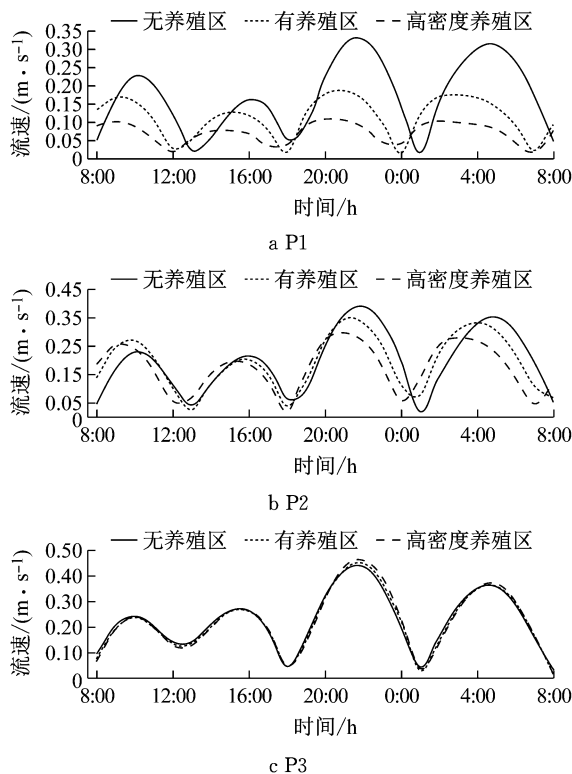


图 5 典型点流速过程对比

Fig. 5 Comparison of time history velocity magnitude at three typical points in three scenarios

3 筏式养殖对污染物输运的影响

养殖区除影响区域水动力、水质分布外, 自身也可成为污染源, 尤其在风暴潮等情况下, 底质污染物易随水体扰动释放, 造成区域污染. 假定养殖区污染物初始浓度为单位浓度 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 其他海域初始浓度为 0, 海区边界及陆地边界条件污染物浓度均设置为 0. 根据验证率定参数, 污染物水平扩散系数取 $40 \sim 120 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. 模型不指定污染物种类, 也不考虑生化降解过程, 即降解系数为 0. 设置了有无养殖区两种工况进行模拟和对比.

将有养殖区浓度场与无养殖区浓度场进行差值, 得到浓度变化场如图 6 所示, 图中深色区域表示养殖区导致污染物浓度增高, 浅色表示养殖区导致污染物浓度降低. 从有无养殖区的平均流速变化场(图 3)可以看出, 有养殖区条件下, 养殖区内的流速明显降低, 直接阻碍了养殖区内部污染物的对流扩散能力, 所以较无养殖区条件下, 养殖区内污染物对流扩散缓慢, 污染物浓度增高的区域主要集中在养殖区内. 污染物浓度降低的区域主要位于养殖区的南北两侧, 这是由于秦皇岛近岸海域潮流总体特征为顺岸往复流, 涨潮流为 SW 向, 落潮流为 NE 向, 潮流的方向决定了污染物对流扩散的方向, 而养殖区的存在直接降低了污染物向养殖区的 SW 和 NE 向扩散的能力, 所以有养殖区条件下养殖区南北两侧的浓度较无养殖区条件下有所降低. 同时, 养殖区作为污染源, 本身结构影响了污染物分配, 污染物浓度的差值的体现为近海大、远海小, 养殖区附近大、其他区域小的特点, 导致海域污染物浓度差值由养殖区向外逐渐减小, 随着扩散时间的增加, 有无养殖区情况污染物浓度差逐渐降低.

根据典型点 P1、P2、P3 的进行对比有无养殖区污染物浓度变化过程(图 7). 有无养殖区对污染物对流和扩散有一定的影响, 影响程度由近岸到远岸逐渐减小. P1 点位因在高密度养殖区内部, 有养殖区存在, 污染物浓度高于无养殖区情况, 有无养殖区污染物浓度差较大, 最高达 $0.14 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 差值先增大后减小; P2 点位同样受养殖区影响, 有养殖区情况污染物浓度高于无养殖区情况, 二者差值最高 $0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 差值也是先增大后减小; P3 点位在养殖区外, 前期污染物浓度基本一致, 后期有养殖区情况污染物浓度略高, 差值最高 $0.005 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 呈波动性增加. 可见养殖区的存在对养殖区内部污染

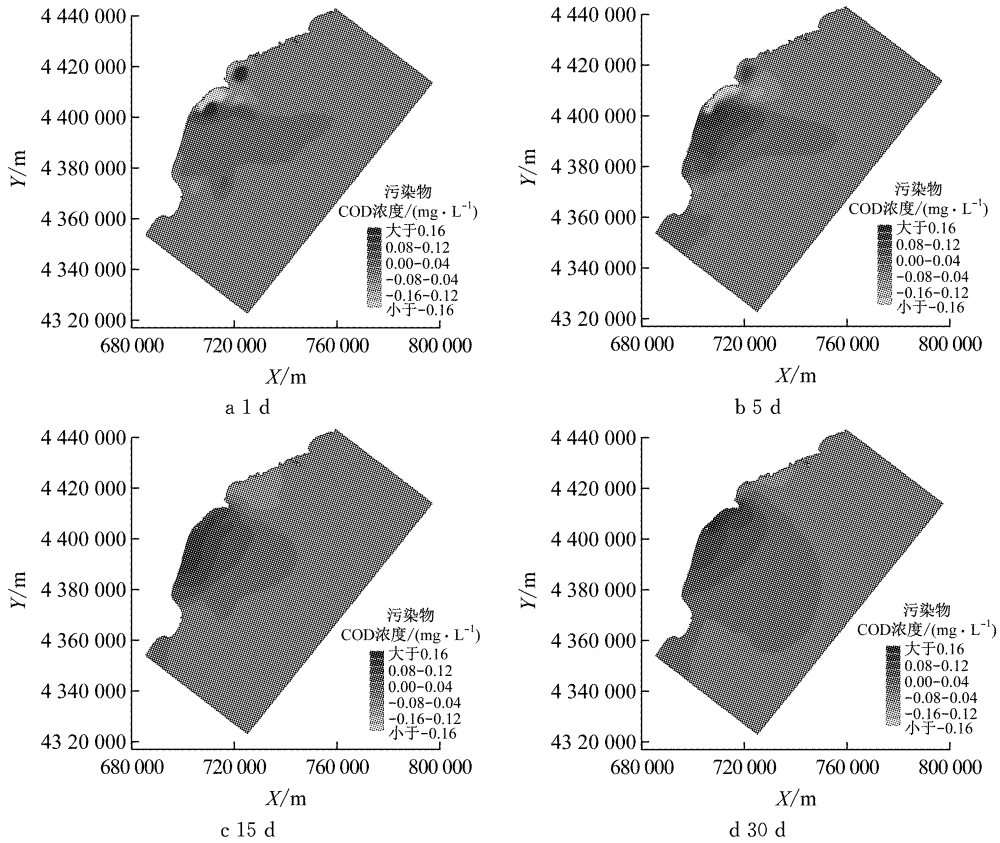


图 6 污染物浓度分布变化过程(养殖区-无养殖区)

Fig. 6 Evolutional process of pollutant concentration distribution (with culture zone minus no culture zone)

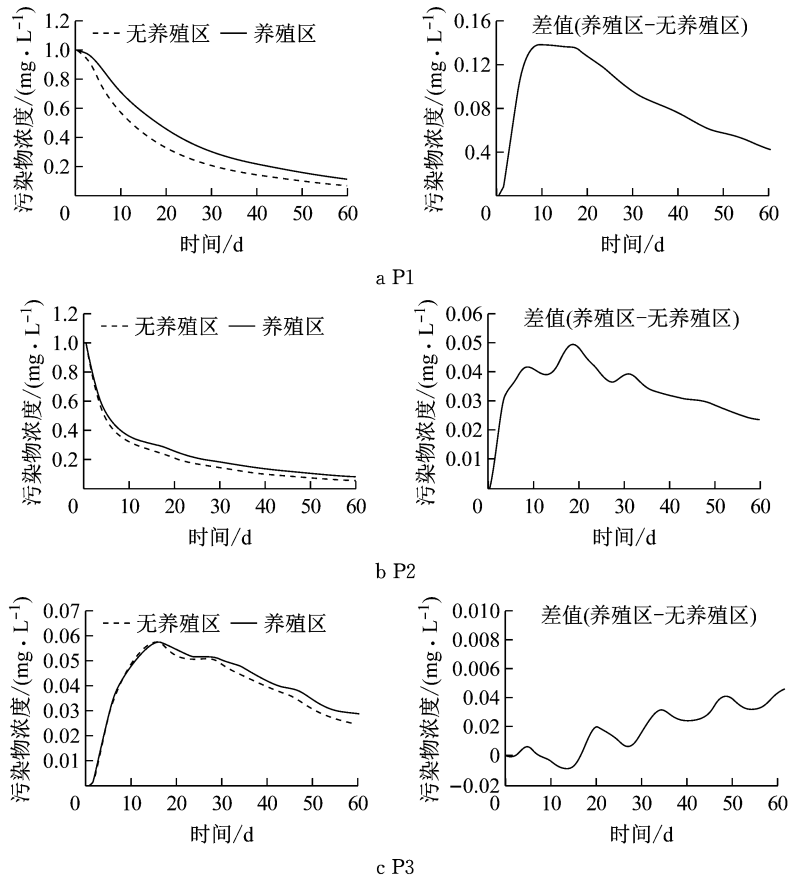


图 7 典型点污染物浓度及浓度差变化过程对比

Fig. 7 Comparison of pollutant concentration and concentration change at typical points

物对流和扩散影响较大,养殖区密度越高,污染物对流扩散越慢。

4 结论

基于二维秦皇岛海域水动力和水质模型,模拟和对比了秦皇岛有无养殖区条件下近岸海域水动力和污染物输运情景,探究养殖区与海域水动力和污染物输运的响应关系,得到如下结论:

(1) 养殖区的存在对海域水动力条件有明显的阻碍作用,养殖区内流速明显减小,养殖区外向外海延伸区域流速略有增大,增加幅度小于 10%。

(2) 当养殖密度增加时,高密度养殖区流速减少更加明显,而其外部部分海域流速增加也更明显。高密度养殖区近岸处流速减少幅度约为 20%~50%,向海侧流速减少幅度为 10%~20%;低密度养殖区流速减少幅度小于 10%;向外海延伸区域,流速略增加,增加幅度小于 10%。其他区域流速几乎不变。

(3) 养殖区对污染输运有一定影响,养殖区内部影响大,逐渐向外海影响减小。养殖区存在时,污染物对流和扩散较慢,养殖区内浓度高于无养殖区工况,外海区浓度变化不大。

致谢:感谢国家海洋局秦皇岛海洋环境监测中心站为本文的研究提供了充足的实测资料。

参考文献:

- [1] DEMIRAK A, BALCI A, TÜFEKÇI M. Environmental impact of the marine aquaculture in Güllük Bay, Turkey [J]. Environmental monitoring and assessment, 2006, 123 (1/3): 1.
- [2] 高晶晶, 史清华, 卢昆. 中国海水养殖技术效率测评[J]. 农业技术经济, 2018(1): 132.
- GAO Jingjing, SHI Qinghua, LU Kun. Study on technical efficiency evaluation of Chinese marine aquaculture [J]. Journal of Agrotechnical Economics, 2018(1): 132.
- [3] FAD. Fishstat plus database: fisheries and aquaculture information and statistics service [R]. Rome: Fisheries and Aquaculture Department, 2012.
- [4] XIE Biao, QIN Jun, YANG Hao, *et al.* Organic aquaculture in China: a review from a global perspective [J]. Aquaculture, 2013, 414/415(11): 243.
- [5] 舒廷飞, 罗琳, 温琰茂. 海水养殖对近岸生态环境的影响[J]. 海洋环境科学, 2002, 21(2): 74.
- SHU Tingfei, LUO Lin, WEN Yanmin. Effects of mariculture on coastal ecological environment [J]. Marine Environmental Science, 2002, 21(2): 74.
- [6] 史洁. 物理过程对半封闭海湾养殖容量影响的数值研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.
- SHI Jie. Numerical study on the influences of physical processes on the aquaculture carrying capacity in a semi-enclosed bay [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2009.
- [7] 张继红, 王巍, 韩婷婷, 等. 桑沟湾春季营养盐分布特征及赤潮暴发诱因[J]. 水产学报, 2012, 36(1): 132.
- ZHANG Jihong, WANG Wei, HAN Tingting, *et al.* The distributions of dissolved nutrients in spring of Sungan Bay and potential reason of outbreak of red tide [J]. Journal of Fisheries of China, 2012, 36(1): 132.
- [8] 周秋伶, 马方方, 张永丰, 等. 风暴潮过后秦皇岛海域两次赤潮过程浮标数据变化[J]. 海洋技术学报, 2018, 37(1): 68.
- ZHOU Qiuling, MA Fangfang, ZHANG Yongfeng, *et al.* Data changes of buoys during two red tides in Qinhuangdao coastal area after a storm surge [J]. Journal of Ocean Technology, 2018, 37(1): 68.
- [9] PETERSEN J K, NIELSEN T G, DUREN L V, *et al.* Depletion of plankton in a raft culture of *Mytilus galloprovincialis* in Ría de Vigo, NW Spain. I. Phytoplankton [J]. Aquatic Biology, 2015, 4(2): 113.
- [10] BOYD A J, HEASMAN K G. Shellfish mariculture in the Benguela system: water flow patterns within a mussel farm in Saldanha Bay, South Africa [J]. Journal of Shellfish Research, 1998, 17(1): 25.
- [11] 李铁军, 郭远明, 徐汉祥, 等. 近海筏式养殖造成的水文动力条件变化分析[J]. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 2012, 31(4): 329.
- LI Tiejun, GUO Yuanming, XU Hanxiang, *et al.* Analysing the change of the hydrodynamic condition by suspension aquaculture in shore sea [J]. Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science), 2012, 31(4): 329.
- [12] 项福亭, 曲维功, 张益额, 等. 庙岛海峡以东浅海养殖结构调整的研究[J]. 齐鲁渔业, 1996, 13(2): 1.
- XIANG Futing, QU Weigong, ZHANG Yi'e, *et al.* On aquaculture structure adjustment in shallow sea east to Miaodao Strait [J]. Shandong Fisheries, 1996, 13(2): 1.
- [13] 陈清满. 枸杞岛海域养殖紫贻贝生长与生态因子关系初步研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2012.
- CHEN Qingman. Preliminary research on the relationship between growth conditions of *mytilus edulis linnaeus* and ecological factors in Gouqi Island [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2012.
- [14] 赵东波, 史经昊, 姬厚德, 等. 大规模养殖活动对罗源湾潮流动力的影响[J]. 渔业研究, 2015, 37(2): 107.
- ZHAO Dongbo, SHI Jinghao, JI Houde, *et al.* The influence of large scale aquaculture activities on tidal dynamics of Luoyuan Bay [J]. Journal of Fujian Fisheries, 2015, 37(2): 107.
- [15] 张泽华, 黄海军, 刘艳霞, 等. 浅海筏式养殖对周边海域潮流和悬浮体特征影响研究[J]. 海洋科学进展, 2016, 34(1): 37.
- ZHANG Zehua, HUANG Haijun, LIU Yanxia, *et al.* Effects of suspended culture of the seaweed *laminaria japonica* aresch on the flow structure and sedimentation processes [J]. Journal of Ocean University of China, 2016, 34(1): 37.
- [16] 季如宝, 毛兴华. 贝类养殖对海湾生态系统的影响[J]. 黄渤海海洋, 1998, 16(1): 21.
- JI Rubao, MAO Xinghua. Impacts of ccoastal shellfish aquaculture on bay ecosystem [J]. Journal of Oceanography of

- Huanghai & Bohai Seas, 1998, 16(1): 21.
- [17] HATCHER A, GEN J, SSHIELD B. Effects of suspended mussel culture on sedimentation, benthic respiration and sediment nutrient dynamics in a coastal bay [J]. *Marine Ecology Progress Series*. 1994, 115(1): 219.
- [18] BOUCHET V M P, SAURIAU P. Influence of oyster culture practices and environmental conditions on the ecological status of intertidal mudflats in the Pertuis Charentais (SW France): a multi-index approach[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2008, 56(11): 1898.
- [19] PANCHANG V, CHENG G, NEWELL C. Modeling hydrodynamics and aquaculture waste transport in coastal Maine[J]. *Estuaries*, 1997, 20(1): 14.
- [20] FAN X, WEI H, YUAN Y, *et al.* Vertical structure of tidal current in a typically coastal raft-culture area[J]. *Continental Shelf Research*, 2009, 29(20): 2345.
- [21] DUARTE P, ALVAREZ-SALGADO X A, FERNÁNDEZ-REIRIZ M J, *et al.* A modeling study on the hydrodynamics of a coastal embayment occupied by mussel farms (Ria de Ares-Betanzos, NW Iberian Peninsula)[J]. *Estuarine Coastal & Shelf Science*, 2014, 147(2): 42.
- [22] 樊星. 典型养殖海区潮动力结构特征的初步研究—观测与数值模拟[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008.
FAN Xing. Preliminary studies on the features of tidal-dynamic structure in a typically high density mariculture coastal bay-observation and simulations[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2008.
- [23] 樊星, 魏皓, 原野, 等. 近岸典型养殖海区的潮流垂直结构特征[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2009, 39(2): 181.
FAN Xing, WEI Hao, YUAN Yie, *et al.* The features of vertical structures of tidal current in a typical coastal mariculture area of China[J]. *Periodical of Ocean University of China (Natural Science)*, 2009, 39(2): 181.
- [24] 史洁, 魏皓. 半封闭高密度筏式养殖海域水动力场的数值模拟[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2009, 39(6): 1181.
SHI Jie, WEI Hao. Simulation of hydrodynamic structures in a semi-enclosed bay with dense raft-culture [J]. *Periodical of Ocean University of China (Natural Science)*, 2009, 39(6): 1181.
- [25] 鞠长城. 海洋生物资源及对秦皇岛海水增养殖开发的探讨[J]. *河北渔业*, 2007(7): 1.
JU Changcheng. Discussion of marine biological resources and development of marine aquaculture in Qinhuangdao[J]. *Hebei Fisheries*, 2007(7): 1.
- [26] 秦皇岛市农业局. 秦皇岛市近岸海域环境大幅改善渔业生产保持稳定增长态势[J]. *河北渔业*, 2014(7): 5.
Qinhuangdao Agricultural Bureau. Qinhuangdao coastal water environment has great improvement and fishery production maintains a steady growth[J]. *Hebei Fisheries*, 2014(7): 5.
- [27] 张福崇, 王六顺, 肖秋立, 等. 2010年河北省海湾扇贝养殖业调查报告[J]. *河北渔业*, 2011(5): 30.
ZHANG Fuchong, WANG Liushun, XIAO Qiuli, *et al.* Investigation report on bay scallop aquaculture of Hebei Province in 2010[J]. *Hebei Fisheries*, 2011(5): 30.
- [28] 顾杰, 单云驰, 李文斌, 等. 筏式养殖区垂向流速分布特征试验研究[J]. *水动力学研究与进展*, 2016, 31(6): 721.
GU Jie, SHAN Yunchi, LI Wenbin, *et al.* Physical experiments on vertical velocity distribution of raft-culture area [J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2016, 31(6): 721.
- [29] 匡翠萍, 李文斌, 单云驰, 等. 筏式养殖区流速垂向分布公式的试验研究[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2018, 46(1): 40.
KUANG Cuiping, LI Wenbin, SHAN Yunchi, *et al.* Experimental research on formulas of velocity distribution in vertical direction in raft-culture zones [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2018, 46(1): 40.
- [30] 匡翠萍, 刘鹏晨, 姚凯华, 等. 渤海新区近岸海洋水动力环境数值模拟研究报告[R]. 上海: 同济大学, 2012.
KUANG Cuiping, LIU Pengchen, YAO Kaihua, *et al.* Numerical simulation of offshore marine hydrodynamic environment in Bohai New District [R]. Shanghai: Tongji University, 2012.
- [31] 余兴光, 陈彬, 王金坑. 海湾环境容量与生态环境保护研究: 以罗源湾为例[M]. 北京: 海军出版社, 2010.
YU Xingguang, CHEN Bin, WANG Jinkeng. Study on environmental capacity and ecological environment protection in the gulf: taking Luoyuan Bay as a case[M]. Beijing: Naval Press, 2010.
- [32] 匡翠萍, 胡成飞, 冒小丹, 等. 秦皇岛海域洪季水动力及污染物扩散数值模拟[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2015, 43(9): 1355.
KUANG Cuiping, HU Chengfei, MAO Xiaodan, *et al.* Numerical simulation of hydrodynamics and pollutant transport in Qinhuangdao coastal water in the flood season[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2015, 43(9): 1355.
- [33] 单云驰. 近海筏式养殖与水动力及水环境响应关系研究[D]. 上海: 同济大学, 2016.
SHAN Yunchi. A study on the hydrodynamic and environmental implications of raft-culture in coastal area [D]. Shanghai: Tongji University, 2016.
- [34] ALLEN J I, SOMERFIELD P J, GILBERT F J. Quantifying uncertainty in high-resolution coupled hydrodynamic-ecosystem models[J]. *Journal of Marine Systems*. 2007, 64(1/4): 3.