

桑沟湾水动力特征及其对养殖容量影响的研究——观测与模型

魏皓^{1,2} 赵亮² 原野^{2,3} 史洁^{2,4} 樊星^{2,5}
刘志宇^{2,6} 王鲁宁² 袁承仪² 王玉衡² 魏莱^{2,7}

(¹ 天津科技大学海洋科学与工程学院, 300222)

(² 中国海洋大学物理海洋实验室, 青岛 266100)

(³ 国家海洋局国家海洋环境预报中心, 北京 100080)

(⁴ 中国海洋大学海洋环境与生态教育部重点实验室, 青岛 266100)

(⁵ 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

(⁶ 厦门大学近海海洋环境科学国家重点实验室, 361005)

(⁷ 国家海洋局国家海洋信息中心, 天津 300022)

摘要 主要介绍了从动力学研究桑沟湾养殖容量的主要思路、方法及结果。研究以精细过程观测为基础,以数值模型为手段,从物理海洋学角度考察养殖海区水动力特征,研究水动力对物质循环的影响、对颗粒态/溶解态营养物质的补充和对养殖生物量的影响,探寻不同养殖模式效果的技术路线;介绍了两个航次设计方案与目的。通过观测发现养殖对水动力垂直结构有很大影响,底层流速最大并滞后表层,发现弱动力条件下海底颗粒物和营养盐无法进入水体上层的事实。据此提出双边界层动力模型,建立一维数值模型进行机制探讨,将养殖阻力三维化建立水动力数值模型,定量给出养殖对水动力和水交换的阻碍;以此驱动三维养殖生态模型,充分考虑养殖对水动力的影响、水动力对生源要素的输运。建立了一个真正的物理生物过程耦合模型。利用该模型进行的数值模拟和实验表明,贝藻兼养多元养殖是健康、高效养殖的有利措施;桑沟湾在现有养殖模式下,目前已基本达到了它的养殖容量,养殖品种分布不变,减少养殖密度至目前的0.9倍会略微提高产量,降低成本;减少湾口海带养殖密度,会大幅度提高贝藻兼养区的营养盐总量和养殖生物产量,从海带与贝类经济价值对比会有更高的效益。人为提高水动力混合或许是解决湾内营养盐缺乏的途径。

关键词 养殖容量 水动力影响 精细过程观测 双阻力边界层
物理生物耦合的养殖生态模型 桑沟湾

中图分类号 P731 文献标识码 A 文章编号 1000-7075(2010)04-0065-07

Study of hydrodynamics and its impact on mariculture carrying capacity of Sanggou Bay: observation and modeling

WEI Hao^{1,2} ZHAO Liang² YUAN Ye^{2,3} SHI Jie^{2,4}
FAN Xing^{2,5} LIU Zhi-yu^{2,6} WANG Lu-ning²
YUAN Cheng-yi² WANG Yu-heng² WEI Lai^{2,7}

(¹ College of Marine Science and Engineering, Tianjin University of Science and Technology, 300222)

国家基础研究规划重点项目(2006CB400602)和国家重点基金项目(40830854)共同资助

收稿日期: 2009-08-23; 接受日期: 2009-10-06

作者简介: 魏皓(1964-),女,博士,教授,主要从事浅海动力学研究。E-mail: weihao@ouc.edu.cn, Tel: (022) 60602926

(² Laboratory of Physical Oceanography, Ocean University of China, Qingdao 266100)

(³ National Marine Environmental Forecasting Center, State Oceanic Administration, Beijing 100080)

(⁴ Laboratory of Marine Environment & Ecology, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100)

(⁵ Institute of Geography and Resources, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101)

(⁶ State Key Laboratory of Coastal Marine Environmental Science, Xiamen University, 361005)

(⁷ National Ocean Data & Information Service, State Oceanic Administration, Tianjin 300022)

ABSTRACT The background and themes of dynamic study on mariculture carrying capacity of Sanggou Bay were described. The method used for this study was based on the fine processes observation, using physical oceanography theory and numerical model to examine the interaction between mariculture and hydrodynamics in Sanggou Bay. Design proposal and purposes for two cruises were introduced. Based on the observation we found that the kelp and the raft influenced the current vertical structure greatly, and the maximum velocity was at the lower layer with strong phase delay. It was also found that the damped current was too weak to mix the sediment detritus and nutrients into the upper layer. Based on these discoveries a double drag-boundary hydrodynamic model was proposed by adding the aquaculture drag at surface. The mechanism of kelp influence on the current profile was studied numerically by a one-dimension model. Considering the kelp drag in the water column besides the boundary drag, a three-dimension hydrodynamic model was adopted to quantify the influence of the aquaculture on hydrodynamics and water exchange of Sanggou Bay. A physical-biological coupled aquaculture ecosystem model was established using DIN, POM concentration and phytoplankton with kelp biomass as variable. The simulation and numerical experiments showed that polyculture was a useful method for healthy and high-efficiency aquaculture. Sanggou Bay has nearly reached its capacity under present aquaculture mode. By cutting down aquaculture density to 0.9 fold of the present density, the total production of kelp will slightly increase and the cost will be reduced. Cutting down the kelp density at the mouth of the bay could greatly enhance the amount of nutrients and biomass in the kelp-bivalve-culture area in the inner side. Artificial mixing might bring more nutrients from seabed in the bay.

KEY WORDS Aquaculture capacity Hydrodynamic effects
Fine processes observation Double drag-boundary model
Physical-biological coupled aquaculture ecosystem model Sanggou Bay

桑沟湾是我国北方典型的养殖海区, 20 多年来已成为养殖模式、养殖生态和养殖容量等研究的主要实验基地, 新的品系从这里中试和推广, 新的养殖模式和概念在这里产生和实践, 健康养殖、多营养层次养殖等先进理念领导了海洋养殖的潮流, 科技向产业的转化在这里得到充分实现。国家科技支撑、863、973、攀登计划、行业专项等十几个科研项目, 欧盟支持的多国合作项目, 持续十几年的与不同国家的合作交流, 使这里的养殖产业科技含量最高, 海洋养殖研究最为深入(张为先 1992; 王丽霞等 1994; 方建光等 1996a、b、c; 赵俊等 1996; 孙耀等 1998; Duarte *et al.* 2003; 张继红 2008)。

面对国家对蓝色食物需求的增加与捕捞产量的下降, 如何提高养殖产量, 使海洋养殖健康可持续发展, 已不仅是品种、品系的开发, 增加养殖面积、加大养殖密度也已面临困境, 必须从整个生态系统能量流动、物质循环角度, 找出不同养殖品种、不同养殖模式(单养、混养、兼养、吊养、底播等)的最优组合, 在保证海湾生态系统

健康的前提下,提高海洋养殖效率和产量,以满足国家需求,这需要多学科参与才能完成。

与河口区域普遍的富营养化不同,桑沟湾养殖海区面临的是营养盐缺乏。据荣成科技局有关领导介绍,这里的贝类普遍较瘦,需要拿到其他海湾再次育肥才能符合市场要求;该湾主要养殖产品——海带则出现成熟期营养盐缺乏造成的根部溃烂;间苗密度加大没有带来成比例的产量增加,养殖生物产量的提高遇到瓶颈。关键症结是什么?如何对症下药?各个学科应从不同侧面进行会诊,综合考虑,找到突破的良方。

以精细过程观测为基础,以数值模型为手段,从物理海洋学角度考察养殖海区水动力特征,研究水动力对物质循环的影响、对颗粒态/溶解态营养物质的补充、对养殖生物量的影响,探寻不同养殖模式的效果,是本研究的主要内容。

1 桑沟湾水动力特征的观测和模型研究

1984年和1992年,有两次规模较大的水动力观测(赵俊等 1996;孙耀等 1998),对该湾的水动力背景给出了初步结论: M_2 潮汐、潮流占优的半封闭海湾,养殖使水动力减弱了(Gibbs *et al.* 1991)。或许当时的养殖密度还不足以引起水动力的削弱和营养盐补充的减少,因此没有更为精细的观测,也没有在观测基础上针对养殖海区的水动力研究。虽然目前仍不断有关于桑沟湾水动力数值模拟的研究报道(王丽霞等 1994),但都是已有动力学模型在桑沟湾地形条件下的应用,并非桑沟湾的真实情况,对于解决桑沟湾的问题、找到关键所在没有帮助。Grant等(2001)建立了一个二维有限元环流模型模拟桑沟湾的水动力场。在模型中加入了摩擦力的参数化,考虑了养殖区和非养殖区的区别,对模拟考虑养殖影响下的水动力场方面有非常大的进步。但是模型是二维的,无法模拟养殖活动对潮流垂直结构的改变。

养殖怎样改变了水动力结构?与之前的观测相比水动力有哪些变化?水动力的变化怎样反过来影响了水交换?为什么底部大量有机碎屑无法进入水体被贝类滤食?为什么当春季大风频繁的时候养殖生物收成就好?为回答这些问题,我们设计了如下的观测策略:在养殖生物海带最长和收获后分别在湾口南北、中部和湾底做流速剖面的连续观测,在湾口南北两侧各做30 d的潮汐观测,有条件的站位做颗粒物动力学观测。两个航次均选取与营养盐、浮游生物等大范围观测嵌套进行,并取相同站位编号(图1)。

1.1 海带最长时的观测方案

2006年4月17日~5月17日在湾口北侧寻山7号站(水深约12 m)使用1台Aanderra水位仪进行30 d的水位观测,水位仪放置在养殖筏底部,每10 min记录1次水位。在水位仪投放点放置1台SonTek 1.5 MHz mini-ADP(吊放在看护船),于4月27日~5月7日进行为期10 d的流速剖面连续观测;采样设置为0.5 m×30层,时间间隔为300 s。4月30日~5月7日使用海床基平台进行座底观测,观测内容同湾中央10号连续站。NorTek 6 MHz ADV设置为Burst采样方式256 s/900 s, RBR XR 620 CTD每1 min采样1次。

2006年4月17日~5月17日在湾口南侧楮岛12号站(水深约8 m)也同样使用1台Aanderra水位仪进行30 d水位观测,水位仪放置在鱼排上,每10 min记录1次水位。在水位仪投放点放置1台NorTek 2.0 MHz Aquadropp Profiler(吊放于鱼排上),于4月27日~5月7日进行为期10 d的流速剖面连续观测,采样设置为0.5 m×25层,时间间隔为300 s。

本航次在湾中央的10号连续站(水深约9.5 m)分别于天文大潮日和天文小潮日各进行了7 d(25 h)的连续观测。大潮日(4月28~29日)观测期间使用1台RDI 1200 kHz Workhorse Sentinel ADP以船基吊放的方式进行流速剖面的连续观测,采样设置为0.5 m×25层,时间间隔为60 s。除流速观测外还使用RBR XR 620 CTD每小时观测1次剖面,同时每小时采水3 L,用于抽滤测量悬浮物浓度和测量盐度校正CTD用。此外,在该处还使用海床基平台进行座底观测,平台上配置1个RBR XR 620 浊度梯度仪和1台NorTek 6 MHz ADV进行近底层的浊度剖面和流速观测。ADV采样频率16 Hz,采样体积距底0.35 m, RBR XR 620 CTD采样频率为0.2 Hz,同ADV观测点位于同一高度。整个观测过程中自动气象站进行同步气象观测。5月4~5日进行小潮日的一周日(25 h)连续观测,使用的仪器设备同前。根据自动气象站观测,观测期间的风速达到了8~9级。

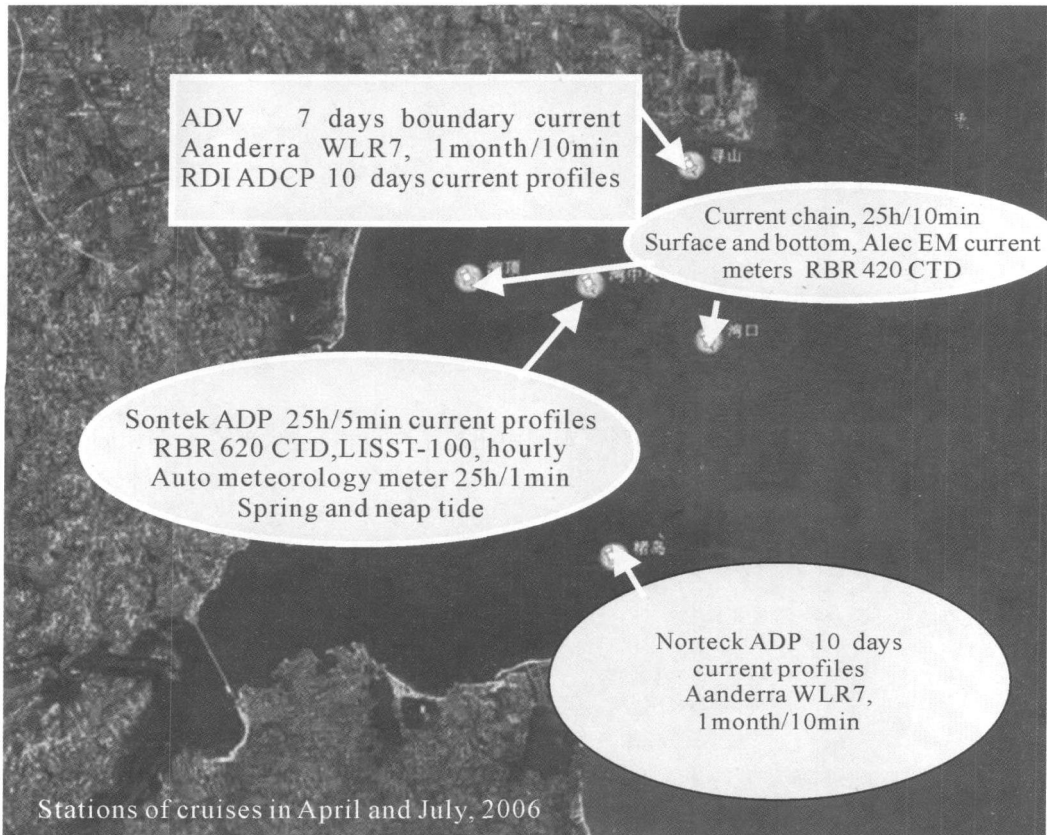


图1 桑沟湾水动力特征观测站位与观测内容

Fig. 1 Locations of survey stations and observations made in Sanggou Bay

4月28~29日天文大潮期间在湾口6号站和湾顶15号站各设1个流速链对表、底层流速和中层温度、盐度进行7d(25h)的连续观测。湾口投放点(6号站)使用两台Alex电磁海流计和1台RBR420CTD。两台电磁海流计分别置于水下1m和水下7m的位置,每10min记录1次数据;RBR420CTD每5min工作1次,置于两台海流计中间。在湾内投放点(15号站)也使用同样的仪器,两台电磁海流计分别置于水下1m和距底3m的位置,仪器的设置同上;RBR420CTD每5min工作1次,置于两台海流计中间,但是由于电池的原因,15号站底层的Alex电磁海流计下水后没有正常工作。

这种设计使我们能够了解海流垂直变化、湾口至湾底的变化,以及潮周期、大小潮内水动力的变化规律。

1.2 海带收获后的观测方案

2006年6月20日~7月20日在湾口北侧寻山站和褚岛站各使用1台Aanderra水位仪进行30d水位观测。7月11~20日寻山站放置1台SonTek1.5MHz min^{\pm} ADP进行为期10d的流速剖面连续观测,褚岛站于7月13~20日使用1台RDI1200kHzWorkhorseSentinelADP进行7d的流速剖面连续观测。与北侧寻山站不同的是褚岛站将ADP固定于海床基平台上进行座底观测(Up looking的工作方式),采样设置为0.5m \times 32层,时间间隔2s。海床基平台上还放置1台NorTek6MHzADV同步进行近底层流速连续观测。ADV采样体积距海底0.35m,采样间隔(Burst interval)为900s。

此航次在湾中央10号连续站(水深10m)只在天文大潮日(7月12~13日)进行了7d(25h)的流速剖面连续观测,其温盐资料配合湾口和湾顶的流速链的温盐资料一同分析使用。使用1台NorTek2.0MHzAquadroppProfiler以船基吊放的方式进行流速观测,采样设置为0.5m \times 25层,采样间隔300s。使用RBR-XR420CTD对该站的温度、盐度和叶绿素分布状况进行观测,每1h下放1次,做深度剖面测量。除水文观测之

外还要每 2 h 采水样 1 次, 采样层次为表、中、底 3 层, 用于实验室盐度校正。观测期间使用手持风速仪进行常规气象观测, 但由于仪器出现故障, 观测期间的风速由经验得出。

7 月 12~13 日天文大潮日期间, 在湾口 6 号站和湾内 15 号站各设 1 个流速链对表、底层流速和中层温度、盐度进行 7 d (25 h) 的连续观测。湾口投放点(6 号站)使用两台 Alex 电磁海流计和 1 台 RBR 420 CTD。

本次观测南部有所加强, 底动力变化有了连续声学记录, 为此我们用声学反演研究颗粒物动力学提供了很好的基础。

1.3 水动力特征与双边界层阻力模型

对湾口水位观测进行的调和与分析得到结论, 桑沟湾仍具有不规则半日潮的潮汐类型, 调和常数与之前的研究相比有很大差异。这主要是由于湾外有大量养殖设施, 同样与没有养殖相比阻力增大, 黄海传来的潮波受阻变形, 调和常数会有所变化。

观测表明, 从湾口到湾底的流速衰减近 70%。观测中出现了与以往经验、理论大不相同的流速剖面, 靠近底部流速最大, 海表流速相位超前, 似乎将以往观测的流速剖面倒了过来, 这是通过观测本研究的主要发现。经反复研究, 我们认为这恰是海表摩擦大于海底应力的表现, 是养殖生物和养殖设施对水体运动的阻碍, 因此提出了双边界层阻力模型, 这在樊星(2008)的博士论文《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》中已有详细论述。其中, 从观测资料分析到双边界层阻力概念模型建立和阻力系数分析内容, 已发表在《近岸典型养殖海区的潮流垂直结构特征》中(樊星等 2009), 在此基础上建立了一维水动力数值模型, 模拟不同养殖密度条件下潮流的垂直结构(樊星等 2010), 这是将养殖密度与水动力联系起来的第一步。

1.4 养殖海区三维水动力模型与水交换研究

一维模型是对养殖阻力影响的理论研究, 无法与真实流场对比, 无法用于物质运输。于是我们在 Princeton Ocean Model 基础上, 建立了考虑养殖阻力的水动力数值模型, 既考虑海表养殖筏球设施的阻力作用, 也借鉴柱体扰流将海带对水体的阻力置于海带生长的水层, 即阻力三维化, 不仅有面力, 而且有体力, 随海带生长而变, 这是该研究中最主要的创新。

养殖海区三维水动力模型已在史洁(2009)博士论文《物理过程对半封闭海湾养殖容量影响的数值研究》中初步实现, 结果发表在《半封闭高密度筏式养殖海域水动力场的数值模拟》中。不仅模拟出与观测一致的水动力结构, 定量给出了养殖对流速的衰减(流速衰减 10%~80%), 而且讨论了养殖阻力对水交换的影响(交换时间延长 2 倍)。模型研究表明, 养殖没有改变潮波在湾内的传播特征, 也没有改变该湾潮汐类型, 水平方向的潮流流速被衰减, 但没有改变分布状况, 仅垂直水动力结构发生了很大变化。

1.5 湾内颗粒物动力过程的观测

通过前面设置的声学海流剖面仪反演的悬浮颗粒物浓度、浊度梯度、高频流速仪分析的湍流耗散等, 作者进行了湾内颗粒物动力过程研究。观测现场, 25m/s 的风竟然无法掀起波浪, 只有在外海气旋过境时传来的涌浪, 这给我们留下深刻印象。养殖设施和养殖生物是巨大的消浪器, 起掀沙作用的风浪缺乏, 颗粒物、底层营养盐都很难进入上层, 湾内水动力弱, 平静似湖面, 颗粒物很快沉降到海底, 因而湾内水色(8)好于湾外(11), 高浊度水随涨落潮从湾外进入湾内成为该湾水体颗粒物补充的主要来源, 但进入湾内的颗粒物大都很快沉降。由于缺乏颗粒物和河流径流, 推断湾内水体上层硅营养盐难以补充, 化学组的观测证实了这个推断。

关于颗粒物浓度声学反演和颗粒物动力学已在原野(2009)博士论文《基于声学方法的中国近海沉积物和悬浮颗粒物动力过程观测研究》中详细论述, 再悬浮是湍流混合的结果, 桑沟湾涌浪对再悬浮的影响研究也已发表(Yuan *et al.* 2009)。从坐底平台没入底泥的深度看, 生物碎屑造成的沉积层厚至少 20cm, 这些碎屑矿化、再悬浮带来的营养物质应该是可观的, 但弱的动力只能使其混合到距底 1m 之内的范围, 频繁的风才能稍将向上通量加大; 贝类养殖区矿物碎屑重, 其再悬浮更困难, 湾口海带阻挡水交换, 并将营养盐消耗, 贝类

养殖区更加缺乏营养。因而桑沟湾缺的是动力,如果能够如犁田那样耕海(可能是异想天开),增加人工动力使海底营养物质进入上层,可能会增加养殖生物产量。

2 水动力对养殖生态影响的数值模型研究

将耦合海带生长的水动力模型驱动含海带生物量、浮游植物生物量、溶解无机盐浓度、颗粒有机物浓度等变量的生态模型,建立了桑沟湾养殖生态模型(图2)(史洁 2010),探讨了生源要素循环、收支和季节变化,海带生物量年变化和空间分布,以数值实验找出水动力改变影响养殖容量的机制和优化方案。并在本研究专题以3篇论文介绍模型建立、敏感性分析、模型校验、数值模拟和数值实验结果(史洁 2009)。三维养殖生态模型、充分考虑养殖对水动力的影响、水动力对生源要素的运输,一个真正的物理-生物过程耦合模型的建立是本研究的重要创新,虽然初步,还有许多工作待完善,但在国际上第1次实现。

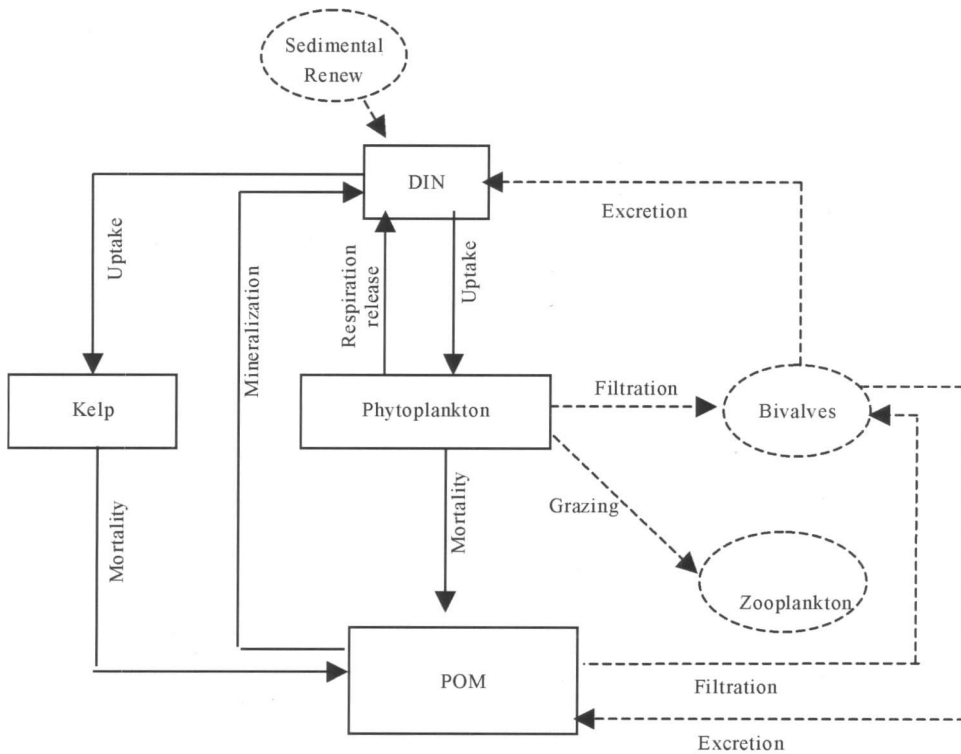


图2 桑沟湾养殖生态概念模型

Fig. 2 Schematic diagram of the multi-species culture ecosystem model in Sanggou Bay

具体内容在此不详细介绍,我们得到的一个重要结论是:贝藻兼养多元养殖是健康、高效养殖的有利措施;桑沟湾在现有养殖模式下目前已基本达到了它的养殖容量,养殖品种分布不变,减少养殖密度至目前的0.9倍会略微提高产量,降低成本;减少湾口海带养殖密度,会大幅度提高贝藻兼养区的营养盐总量和养殖生物产量,从海带与贝类经济价值对比会有更高的效益。

3 结束语

桑沟湾的水动力特征及其对养殖容量的影响方面的研究工作还需不断深入和完善,如目前养殖已扩大到湾外国际航道旁,网箱在湾口也有一定数量,南部鱼排阻力要大于海带阻力,贝类养殖笼阻力也需进一步确定,这些在模型中没有考虑;数排海带之间阻力的测定由于流速变化过小、仪器测量精度的限制而失败;桑沟湾径流量过小几乎是倒灌,但从盐度分布看,它还是有影响的,对河口通量虽然在暴雨、严寒、大风中进行了3次观测,到目前为止还没有令人满意的通量结果。我们正在进行室内实验,在中国海洋大学物理海洋实验室水槽中

以PIV、ADV等精确测流装置,测定单个海带和吊笼阻力,以细化桑沟湾养殖阻力分布。得到单根海带生物量与长度、宽度的函数关系是模型研究的急需,将贝类作为变量的生态模型需了解贝类生活史发育过程,搞清其营养需求。养殖生态模型还有很大空间进行改进,当概念框图(图2)内所有强迫成为变量、所有虚线成为实线,模型再现客观实际的能力就会提高。当然,更小尺度物理过程的影响(海带飘舞、筏绳间微流场等)可能难以在大面积海域模拟中实现。

参 考 文 献

- 方建光,孙慧玲,匡世焕,孙耀,周诗贲,宋云利,崔毅,赵俊,杨琴芳,李锋. 1996a. 桑沟湾海水养殖现状评估及优化措施. 海洋水产研究, 17(2): 95~102
- 方建光,匡世焕,孙慧玲,孙耀,周诗贲,宋云利,崔毅,赵俊,杨琴芳,李锋. 1996b. 桑沟湾栉孔扇贝养殖容量的研究. 海洋水产研究, 17(2): 18~30
- 方建光,孙慧玲,匡世焕,孙耀,周诗贲,宋云利,崔毅,赵俊,杨琴芳,李锋. 1996c. 桑沟湾海带养殖容量的研究. 海洋水产研究, 17(2): 8~17
- 毛兴华,朱明远,杨小龙. 1993. 桑沟湾大型底栖植物的光合作用和生产力的初步研究. 生态学报, 13(1): 25~29
- 王丽霞,石磊,孙长青. 1994. 桑沟湾海域的潮流数值计算. 中国海洋大学学报, 24(增刊): 77~83
- 史洁. 2009. 物理过程对半封闭海湾养殖容量影响的数值研究. 见: 中国海洋大学博士学位论文
- 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. 中国海洋大学学报, 39(6): 1181~1188
- 史洁,魏皓,赵亮,方建光,张继红. 2010. 桑沟湾多元养殖生态模型研究: I 养殖生态模型的建立和参数敏感性分析. 渔业科学进展, 31(4): 26~35
- 孙耀,赵俊,周诗贲,宋云利,崔毅,陈聚法,方建光,孙慧玲,匡世焕. 1998. 桑沟湾养殖海域的水环境特征. 中国水产科学, 5(3): 69~75
- 张为先. 1992. 桑沟湾增养殖. 北京: 海洋出版社, 6
- 张继红. 2008. 滤食性贝类养殖活动对海域生态系统的影响及生态容量评估. 见: 中国科学院研究生院博士学位论文
- 赵俊,周诗贲,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
- 原野. 2009. 基于声学方法的中国近海沉积物和悬浮颗粒物动力过程观测研究. 见: 中国海洋大学博士学位论文
- 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, 39(2): 181~186
- 樊星. 2008. 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. 见: 中国海洋大学博士学位论文
- Duarte, P., Meneses, R., Hawkins, A. J. S. *et al.* 2003. Mathematical modeling to assess the carrying capacity for multi-species culture within coastal waters. *Ecol. Modeling*, 168(2): 132~147
- Gibbs, M. M., James, M. R., Pickmere, S. E., Woods, P. H., Shakespear, B. S., Hickman, R. W., and Illingworth, J. 1991. Hydrodynamics and water column properties at six stations associated with mussel farming in Pelorus Sound, 1984-85. *N. Z. J. Mar. Freshwater Res.* 25: 239~254
- Yuan, Y., Wei, H., and Zhao, L. 2009. Implications of intermittent turbulent bursts for sediment resuspension in a coastal bottom boundary layer: A field study in the western Yellow Sea, China. *Mar. Geol.* 263: 87~96