

桑沟湾多元养殖生态模型研究： II 生态环境模拟与生源要素循环

史 洁^{1,2} 魏 皓^{2,3} 赵 亮² 方建光⁴ 张继红⁴

(¹中国海洋大学海洋环境与生态教育部重点实验室, 青岛 266100)

(²中国海洋大学物理海洋实验室, 青岛 266100)

(³天津科技大学海洋科学与工程学院, 300222)

(⁴农业部海洋渔业资源可持续利用重点开放实验室, 中国水产科学研究院黄海水产研究所, 青岛 266071)

摘 要 运用桑沟湾多元养殖生态模型, 模拟得到了桑沟湾浮游植物和无机氮营养盐的年变化规律、水平分布的季节变化。结果表明, 浮游植物生物量和无机氮营养盐浓度存在明显的季节变化, 养殖活动的季节性增大了二者的季节变化幅度; 桑沟湾浮游植物和无机氮营养盐的分布受大面积海带和贝类养殖的影响; 外海营养盐补充是桑沟湾内无机氮营养盐的主要来源。

关键词 桑沟湾 海带 浮游植物 无机氮 模型

中图分类号 P734.44 **文献标识码** A **文章编号** 1000-7075(2010)04-0036-07

Study on ecosystem model of multi-species culture in Sanggou Bay: II Simulation of ecosystem and the circulation of nutrients

SHI Jie^{1,2} WEI Hao^{2,3} ZHAO Liang² FANG Jian-guang⁴ ZHANG Ji-hong⁴

(¹Key Laboratory of Marine Environment & Ecology, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100)

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

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

(⁴Key Laboratory for Sustainable Utilization of Marine Fishery Resources, Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071)

ABSTRACT Based on the multi-species culture ecosystem model in Sanggou Bay, the annual variation cycles and seasonal distributions of phytoplankton biomass and dissolved inorganic nitrogen (DIN) concentration were simulated. Model results indicated that the seasonal aquaculture activities made seasonal variations of DIN concentration and biomass of phytoplankton more prominent. The distributions of DIN and phytoplankton biomass were mainly influenced by the aquaculture scenarios. During the period of kelp culture, DIN from the open sea is an important source of nutrient supporting the growth of kelp, due to the exchange of water.

KEY WORDS Sanggou Bay Kelp Phytoplankton Dissolved inorganic nitrogen Model

国家基础研究规划重点项目(2006CB4006)和国家重点基金(40830854)共同资助

收稿日期:2009-08-25;接受日期:2009-12-17

作者简介:史 洁(1982-),女,博士,主要从事浅海动力学研究。E-mail: shijie@ouc.edu.cn, Tel: (0532)66786568

海水中的营养元素是构成海洋生态系统中物质循环的重要环节,且海水中营养元素的多寡,能促进或限制海洋生态系统的能量转化。在桑沟湾养殖海域,无机氮营养盐是浮游植物和主要养殖生物——海带生长繁殖所必需的营养成分。生源要素的循环和更新速度是决定海带养殖容量的基本因素。初级生产力在海洋物质循环和能量流动中起着重要的作用,是海洋食物链中最基础的部分。初级生产力和营养盐是海洋水产养殖容纳量研究的重要指标,很多基于物质能量平衡的养殖容量模型都是基于浮游植物生物量或营养盐的更新和消耗平衡(方建光等 1996a,b)。在桑沟湾这样一个多元综合养殖海域,海带生长过程中与浮游植物建立的竞争营养盐的关系也是影响海带养殖容量的因素。

水产养殖对桑沟湾的生态环境产生反作用。近年来,由于大面积高密度养殖,阻碍了海水流动的顺畅,影响了生源要素的运输和补充,造成了局部海域营养盐严重缺乏。这样,不但限制了养殖生物自身的生长,也大大抑制了浮游植物的繁殖与生长速率,加之贝类的大量摄食,导致湾内浮游植物量低下,从而因饵料不足引起湾内养殖贝类生长速率及肥满度低等现象(孙 耀等 1998)。

对于桑沟湾营养盐及浮游植物水平的研究,一些学者采用观测的手段,分析了营养状况的季节变化、营养盐限制因素、沉积物-水界面营养盐通量以及初级生产力水平等(孙 耀等 1996a,b;刘 慧等 2003;蔡立胜等 2004;武晋宣等 2005)。本文则是运用生态动力学模型的手段,研究生态环境和生源要素循环与养殖之间的内在联系。

1 模型简介

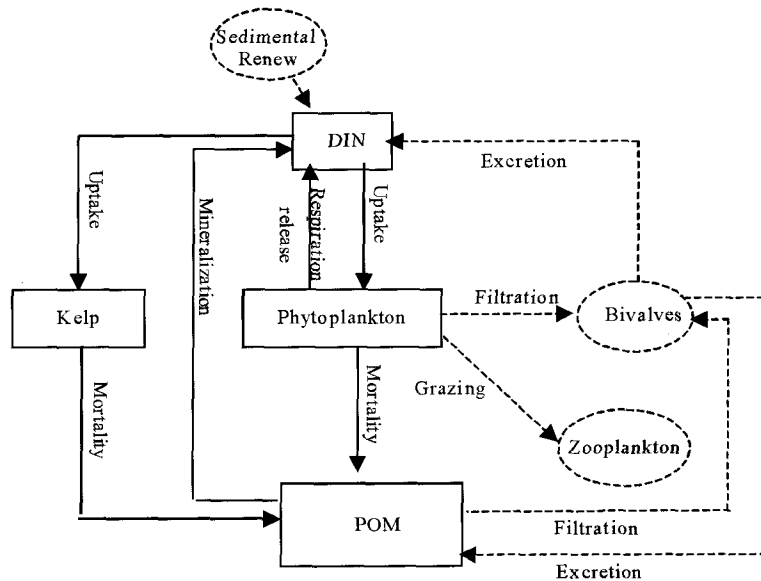
作者已建立水动力和养殖生态模型耦合的桑沟湾多元养殖模型(史 洁等 2010),并对模型的参数进行了敏感性分析。模型水动力部分是在被广泛应用于陆架海的水动力模型 POM(Princeton Ocean Model)的基础,加入了养殖活动的影响,对海表养殖设施和水体中海带的阻力分别进行参数化,模拟得到桑沟湾作为典型养殖海域真实的流场(史 洁等 2009)。多元养殖模型包含 4 个状态变量:海带、浮游植物、无机氮营养盐和悬浮有机颗粒物。概念模型如图 1 (史 洁等 2010)。

模型运行 1 年后的结果作为最终模式的初始场,继续运行 1 年的结果用来分析营养盐和浮游植物的周年变化。

2 营养盐周年变化及收支

2.1 营养盐周年变化

桑沟湾作为高密度筏式养殖海域,大面积的海带和扇贝养殖对于无机氮营养盐的消耗和补充有很大的影响。图 3 同时给出了模式模拟得到的海带单养区、海带-贝类混养区和贝类单养区平均无机氮的年变化曲线。可以看出,桑沟湾营养盐状况具有明显的季节变化。一般规律为,11 月到次年 5 月为主要养殖品种——海带的生长时期,由于海带生长的消耗,无机氮迅速降低。5 月底,海带开始收获,其对无机氮的消耗也减少,但是由于此时的光照和温度适合浮游植物的生长,浮游植物成为无机氮的主要消费者,到 8 月,桑沟湾的无机氮一直维持在很低的水平。9~11 月海带再次播苗之前,既不存在海带对无机氮的吸收,浮游植物生长也



注:方实框内为模型变量,椭圆虚框作为强迫项考虑
 Note: Variables in the model are in the solid-lined rectangles, and the forcing data are in the dashed ellipses

图 1 桑沟湾养殖生态概念模型

Fig. 1 Schematic diagram of the multi-species culture ecosystem model in Sanggou Bay

受到限制,故这段时间是无机氮的累积期。

在不同养殖区,营养盐浓度的变化明显受养殖品种的影响。由图2所示的养殖布局可以看出,从湾口到湾顶依次是海带单养区、海带-贝类混养区和贝类单养区。11月到次年3月,在贝类单养区,由于温度和光照限制了浮游植物的生长,使得此区域不存在海带和浮游植物对无机氮的消耗,而贝类的排泄却持续补充,无机氮浓度逐渐升高;海带单养区内,缺少了贝类对营养盐的贡献,而海带生长的消耗是无机氮的主要汇,无机氮浓度持续降低,且为3个区域最低;海带-贝类混养区,贝类的排泄补充和海带生长消耗并存,此区营养盐水平介于另外两个养殖区之间。3月以后,温度和光照对浮游植物生长的限制减弱,浮游植物生长的消耗是无机氮浓度降低的主要原因。营养盐初始浓度较大的贝类单养区,由于浮游植物的大量生长,营养盐浓度迅速降到3个区的最低;此时海带单养区的营养盐由于冬、春海带养殖的消耗而处于比较低的水平,浮游植物生长受到一定抑制,消耗的营养盐也相对较少,加之此时湾内营养盐浓度低于外海,海带单养区位置相对靠近湾口,外海的营养盐补充使得此区的营养盐浓度大于另外两个养殖区。9月以后,浮游植物生长受到光照限制,3个区的营养盐浓度都升高,10月开始养殖贝类,使得贝类养殖区无机氮浓度升高明显。

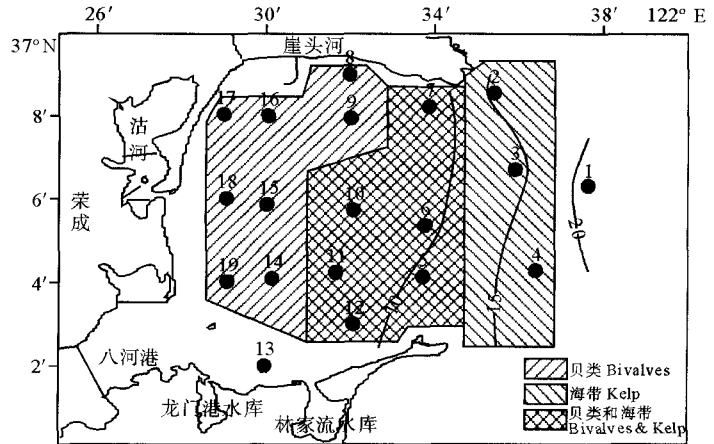


图2 桑沟湾养殖布局

Fig. 2 Aquaculture scenarios in Sanggou Bay

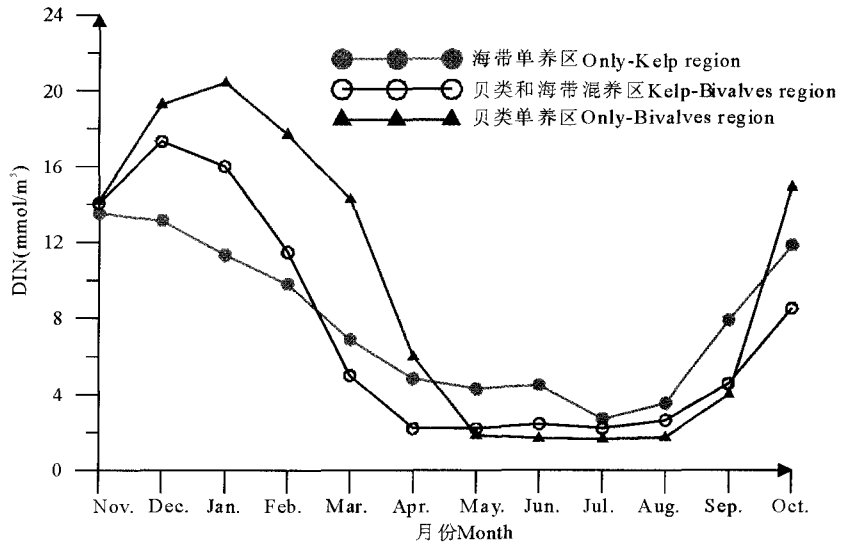


图3 不同养殖区域无机氮的年变化曲线

Fig. 3 Annual cycles of DIN in different culture regions

2.2 营养盐的水平分布

桑沟湾无机氮水平分布具有明显的季节变化,同时又受到大面积的海带和贝类养殖的影响。在不同的养殖区,营养盐水平随养殖品种的不同而变化。

11月到次年1月为海带养殖前期(图4a、d),在此期间浮游植物生长受到低温和光照的限制,海带是无机氮的主要消耗者,由于生物量小,消耗量也较小,桑沟湾的无机氮浓度维持在比较高的水平,大于 $10.0 \mu\text{mol/L}$ 。此时,无机氮的大面分布受养殖布局的影响,在靠近湾口的海带养殖区,由于海带生长的消耗,无机氮浓度较低,而靠近湾顶的贝类养殖区,由于多源少汇,无机氮浓度相对较高。

4月份(图4b),水温升高且光照限制减弱,桑沟湾内浮游植物生长大量消耗无机氮,且此时海带生物量增大,对无机氮的需求增强,使得桑沟湾内无机氮浓度明显低于冬季,湾内大部分区域浓度低于 $4.0 \mu\text{mol/L}$ 。由

大面分布可以看出,桑沟湾湾内营养盐低于外海,湾口处出现无机氮的高值(5.0 $\mu\text{mol/L}$ 等值线)伸向湾内的情况。但是由于此时海带生长接近其最大长度(5m 左右),对海水流动的阻碍作用非常显著,限制了海水交换和无机氮的外海补充。图 4b 中无机氮高浓度等值线仅伸入湾口附近区域,且湾口北部比南部无机氮浓度高,说明北部海水交换优于南部。

7 月份(图 4c),海带基本收割完毕,贝类也已于 5 月收获,但由于之前海带和浮游植物对无机氮的消耗,使得此时桑沟湾营养盐水平很低,无机氮浓度为全年最低,小于 2.0 $\mu\text{mol/L}$ 。大面分布主要受与外海水的交换控制,无机氮浓度从湾口到湾顶逐渐减小,此时由于海带已经收割,海水流动畅通,与 4 月份相比,外海对桑沟湾无机氮的补充也可达到较靠近湾内区域,图 4c 上表现为营养盐的锋区位置(2.3 $\mu\text{mol/L}$ 等值线)比 4 月份(5.0 $\mu\text{mol/L}$ 等值线)更加靠近湾内。

2.3 营养盐收支

图 5 为桑沟湾全年无机氮收支情况的模拟结果,用来分析各个过程对桑沟湾无机氮营养盐收支的贡献。浮游植物在营养盐更新中起了重要的作用,浮游植物光合作用吸收(UPTA)和呼吸作用释放(RESPI)是营养盐重要的汇和源,全年浮游植物对营养盐的净贡献使无机氮输出 1 013.1 t。海带生长在其养殖期内吸收无机氮

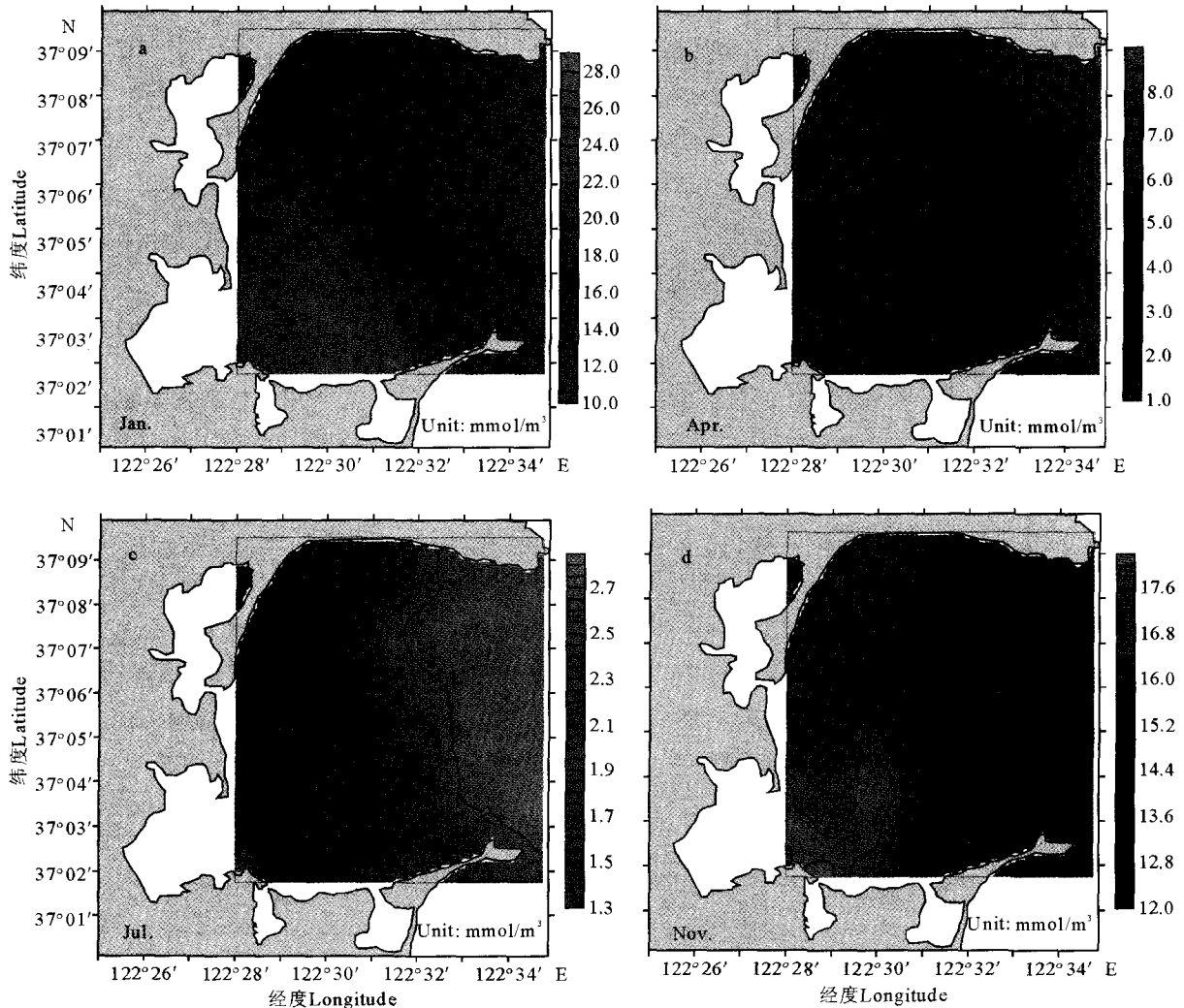


图 4 无机氮四季(1、4、7、11 月)大面分布

Fig. 4 Seasonal distributions of DIN

981.4 t。悬浮有机颗粒物的矿化(MINER)对营养盐的补充为 786.5 t N, 占营养盐输入总量 37.7%。外海输入(Open sea input)是营养盐的另外一个重要的来源, 桑沟湾全年通过与黄海的水交换获得的营养盐输入为 699.7 t N, 占总收入量的 33.6%。此外, 底沉积物释放(Benthic release)和贝类贡献(Bivalves excretion)分别为 319.1 和 278.5 t N, 占总营养盐总收入的 15.3%和 13.4%。在整个海带生长期间(图 6), 外海对桑沟湾无机氮的补充为 589.2 t, 占全年外海补充的 84.2%, 占海带养殖期内无机氮各种来源总量的 40.2%, 可见外海的补充主要在海带养殖期内, 是海带生长所需无机氮的主要来源。210d 的海带养殖期内, 浮游植物对无机氮的吸收为 420.4 t, 仅占全年浮游植物吸收总量的 41.5%, 这是海带生长与浮游植物竞争营养盐的结果。

3 浮游植物周年变化及季节分布

3.1 浮游植物周年变化

图 7 为桑沟湾的浮游植物生长年循环的模拟结果, 整体来说不同养殖区浮游植物呈现相似的变化规律。由于营养盐经历了夏季的减少、秋季的回升和冬季的积累, 浮游植物生物量在春季随着温度的升高和光照的增强而不断增加, 到 6~7 月达到一年中的最大值, 随后由于营养盐的过度消耗, 限制了浮游植物生长, 浮游植物生物量降低。春季生物量增加消耗营养盐, 使营养盐浓度降低; 秋季生物量减少, 消耗减少, 营养盐积累, 这个循环规律与观测相符, 说明模式可以反映营养盐-浮游植物系统的基本年循环规律。比较不同养殖区域的浮游植物年变化, 在海带养殖区, 海带的生长与浮游植物竞争营养盐; 贝类养殖区, 贝类在生长过程中释放无机氮, 可以促进海带和浮游植物的生长。因此, 一般规律为贝类单养区的浮游植物生物量要高于海带-贝类混养区, 而海带单养区最低。

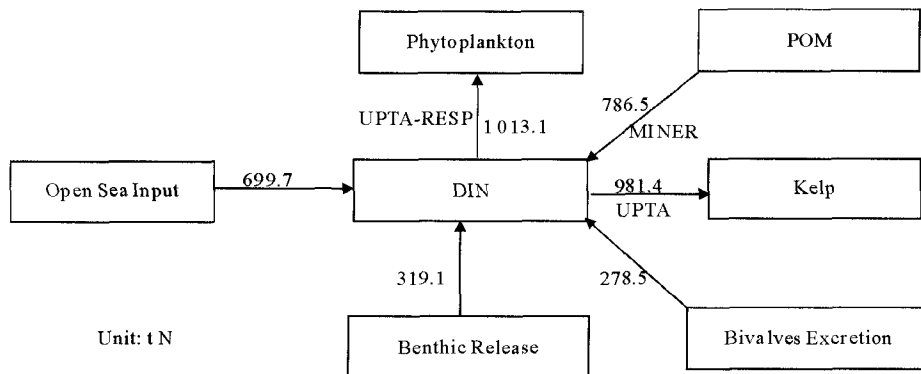


图 5 全年各个过程对桑沟湾营养盐收支的贡献

Fig. 5 Annual nutrient budgets

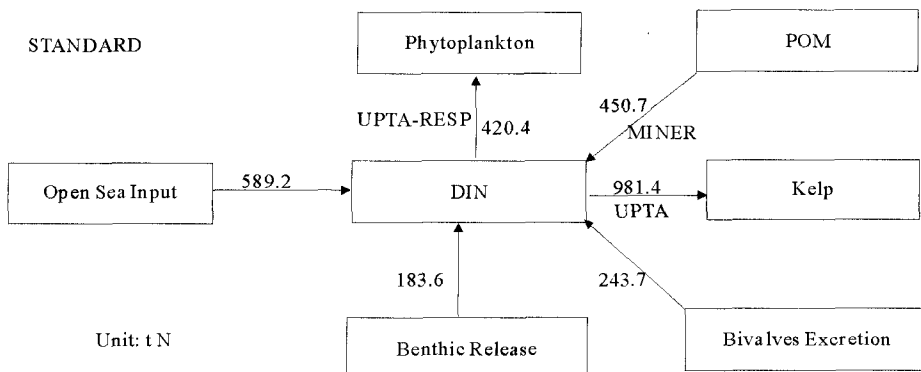


图 6 海带生长期(11月1日到次年5月31日)内各个过程对营养盐收支的贡献

Fig. 6 Nutrient budgets during the kelp culture period (from Nov. 1st to the next May 31st)

3.2 浮游植物水平分布

图 8 为模型模拟得到的桑沟湾浮游植物四季的大面分布图。

1 月份(图 8a),光照和温度都是一年中最低的时期,限制了浮游植物的生长,浮游植物死亡大于生长,浮游植物的生物量为全年最低。全湾最高浓度出现在湾顶贝类单养区,此区域水交换最弱,因此能保留相对较高的浓度,而其他海区交换强,浮游植物浓度受与外海水交换的控制。

4 月份(图 8b),随着光照的增强和温度的回升,浮游植物开始大量生长。同时,海带也接近收割季节,生物量很大,大量消耗无机氮营养盐。所以,在海

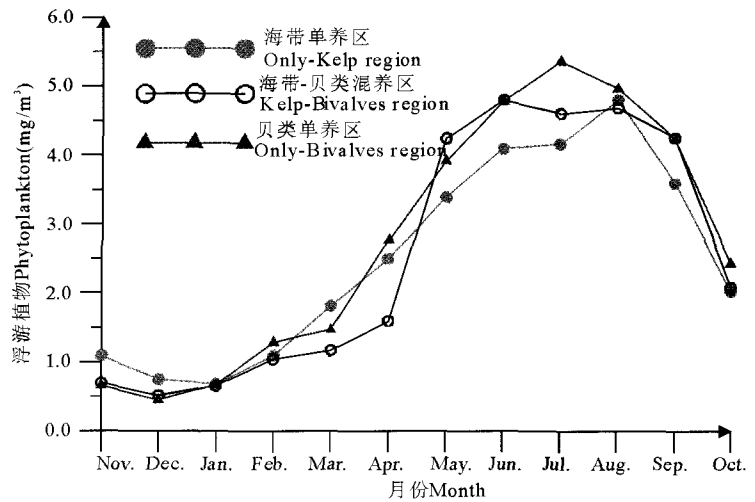


图 7 不同养殖区域浮游植物的年循环曲线

Fig. 7 Annual cycles of phytoplankton biomass in different culture regions

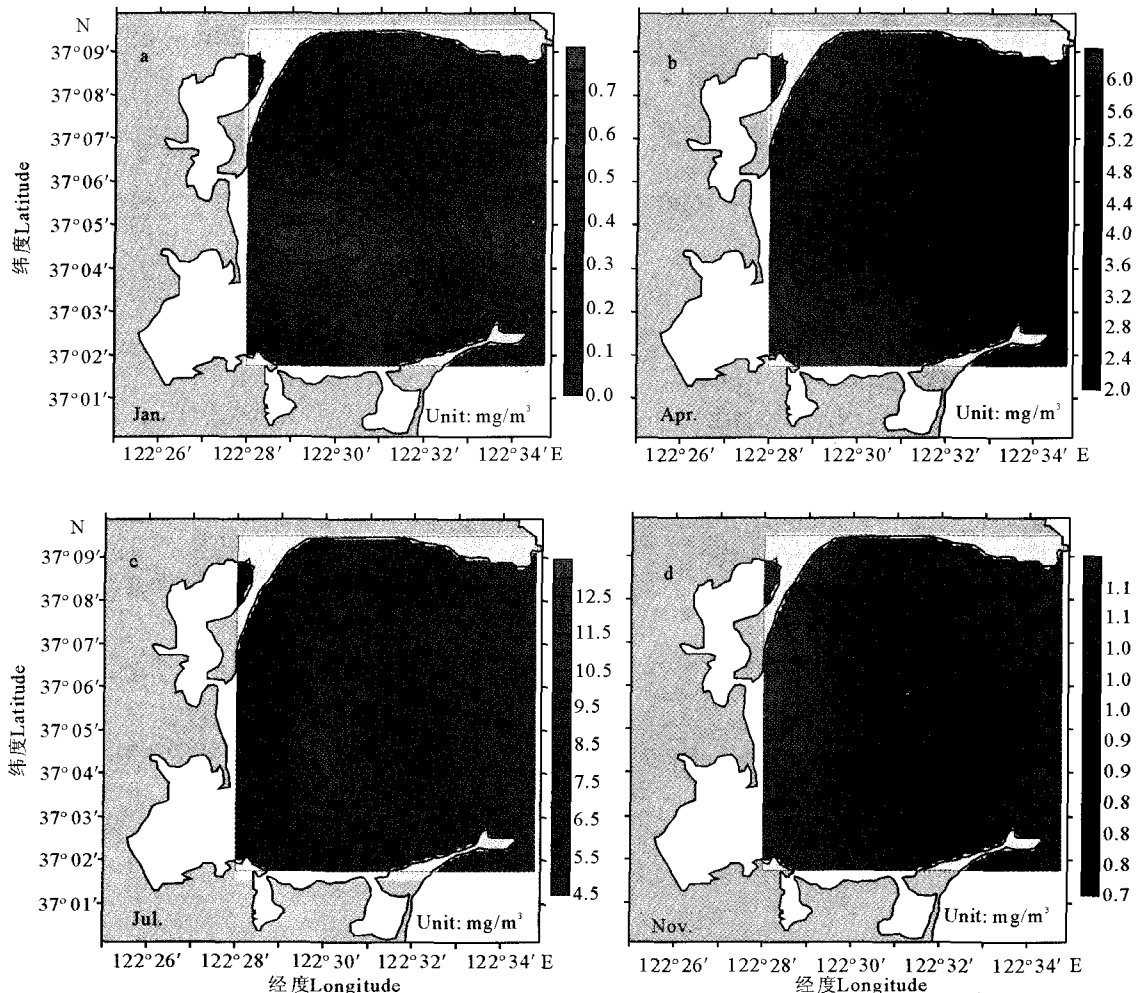


图 8 浮游植物生物量(chl-a)四季(1,4,7,11月)的大面分布

Fig. 8 Seasonal distributions of phytoplankton biomass

带养殖区,海带与浮游植物生长竞争营养盐。此外,海带生长接近其最大长度,对海水的阻力作用限制了外海对此区域的营养盐补充,无机氮缺乏更加严重,限制了浮游植物的生长。所以从湾口到湾顶,海带养殖区的浮游植物生物量小于贝类养殖区。

7月份(图8c),全湾的无机氮营养盐浓度较低,主要来源于外海的补充。浮游植物生物量达到全年最高,生长也受到营养盐的限制。

11月份(图8d),与外海相比,湾内水体透明度比较低,光照限制较强。湾内浮游植物浓度低于外海,靠近湾口的海带单养区受外海影响,浮游植物浓度较高。靠近湾顶的贝类单养区营养盐充足,也维持了相对较高的浮游植物生物量。湾中部海带-贝类混养区,浮游植物生物量是3个养殖区最低的。

桑沟湾浮游植物的季节变化与水产养殖状况相关,养殖种类不同造成浮游植物生物量的明显差异,在养殖期间,浮游植物生物量大小顺序一般为:贝类单养区>海带-贝类混养区>海带单养区。养殖活动增大了浮游植物生物量的区域变化幅度和季节变化幅度。

4 结论

模型模拟了桑沟湾无机氮营养盐和浮游植物的年循环,无机氮营养盐的收支情况。无机氮营养盐浓度和浮游植物生物量存在明显的季节变化,养殖活动的季节性增大了二者的季节变幅;受到大面积海带和贝类养殖的影响,不同养殖区,二者变化趋势不尽相同。在海带生长期间,外海补充是无机氮营养盐的最重要的来源,海带养殖对海水流动的阻碍,影响了外海营养盐的补充,进而制约海带的生长。

生态动力学模型的方法,其结果不仅可以给出浮游植物生物量和无机氮营养盐浓度的时空分布,优点还在于将不同变量各自的物理、生物及化学过程耦合在一起,研究生态环境内在的控制机制。生态环境和生源要素循环的模拟结果为下一步研究养殖生物的养殖容量提供了基础。

参 考 文 献

- 方建光,孙慧玲,匡世焕,孙耀,周诗贻,宋云利,崔毅,赵俊,杨琴芳,李锋. 1996a. 桑沟湾海带养殖容量的研究. 海洋水产研究, 17(2): 8~17
- 方建光,匡世焕,孙慧玲,孙耀,周诗贻,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
- 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, 39(6): 1181~1187
- 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
- 刘慧,方建光,董双林,王立超,连岩. 2003. 莱州湾和桑沟湾养殖海区主要营养盐的周年变动及其限制因子. 中国水产科学, 10(3): 227~234
- 孙耀,宋云利,崔毅,方建光. 1996a. 桑沟湾养殖海域无机氮营养盐的分布与行为. 海洋水产研究, 17(2): 52~59
- 孙耀,宋云利,崔毅,方建光,孙慧玲,杨琴芳,殷丽. 1996b. 桑沟湾养殖水域的初级生产力及其影响因素的研究. 海洋水产研究, 17(2): 32~40
- 孙耀,赵俊,周诗贻,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
- 武晋宜. 2005. 桑沟湾养殖海域氮、磷收支及环境容量模型. 见: 中国海洋大学硕士学位论文
- 蔡立胜,方建光,董双林. 2004. 桑沟湾养殖海区沉积物-海水界面氮、磷营养盐的通量. 海洋水产研究, 25(4): 57~64