

# 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

史 洁<sup>1,2</sup> 魏 皓<sup>2,3</sup> 赵 亮<sup>2</sup> 方建光<sup>4</sup> 张继红<sup>4</sup>

(<sup>1</sup>中国海洋大学海洋环境与生态教育部重点实验室, 青岛 266100)

(<sup>2</sup>中国海洋大学物理海洋实验室, 青岛 266100)

(<sup>3</sup>天津科技大学海洋科学与工程学院, 300222)

(<sup>4</sup>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** 建立了一个与考虑养殖阻力的水动力模型耦合的、以浮游植物生物量、无机氮浓度、悬浮有机颗粒物浓度、海带生物量为变量的桑沟湾三维多元养殖生态模型。模型考虑了养殖生物海带对海水流动的阻碍作用随其生长的动态变化, 以及养殖生物和浮游植物之间对无机氮营养盐的竞争。最后, 分别以浮游植物生物量和海带产量为目标变量, 对参数的敏感性进行了分析。

**关键词** 桑沟湾 浮游植物 无机氮 悬浮有机颗粒物 海带 模型

**中图分类号** P731.2 **文献标识码** A **文章编号** 1000-7075(2010)04-0026-10

## Study on ecosystem model for multi-species culture in Sanggou Bay: I Establishment of the culture ecosystem model and sensitivity analyses of the parameters

SHI Jie<sup>1,2</sup> WEI Hao<sup>2,3</sup> ZHAO Liang<sup>2</sup>

FANG Jian-guang<sup>4</sup> ZHANG Ji-hong<sup>4</sup>

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

(<sup>2</sup>Laboratory of Physical Oceanography, Ocean University of China, Qingdao 266100)

(<sup>3</sup>College of Marine Science and Engineering, Tianjin University of Science & Technology, 300222)

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

**ABSTRACT** A multi-species culture ecosystem model coupled with a dynamic model that takes the culture drag into consideration was established. This three-dimensional model involved four variables: phytoplankton biomass, dissolved inorganic nitrogen (DIN), particulate organic matter (POM) and kelp biomass. The model focused on the variation of the drag caused by kelp growth, and the competition of nutrients between kelp and phytoplankton. Finally, sensitivity of the parameters were analyzed.

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:2009-08-24; 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

**KEY WORDS** Sanggou Bay Phytoplankton Particulate organic matter  
Dissolved inorganic nitrogen Kelp Model

浅海筏式养殖是直接将养殖生物(如海带)或通过笼内养殖(如滤食性贝类)吊挂在浮筏和长绳上来养殖,是一种悬浮式养殖方式,养殖生物直接或间接利用周围水域中的营养物质来生长。筏式养殖能充分利用海域的空间资源,适合大面积高密度养殖,是目前应用范围最广泛的养殖方式。海带吸收海水中的溶解态无机氮,而滤食性贝类则以悬浮有机颗粒物为食。这样,营养盐和食物的循环与更新就决定了某种养殖生物的生长情况和产量(方建光等 1996a,b; Grant 1996; Wildish *et al.* 1997)。

桑沟湾养殖业十分发达,养殖面积已经超过全湾的 50%(图 1)。该湾的两种主要养殖生物为海带 *Laminaria japonica* 和长牡蛎 *Crassostrea gigas*; 主要养殖类型为:在湾口外或水深较大、水流较急处以海带养殖为主,湾内水深较浅处以海带和贝类(长牡蛎、栉孔扇贝、贻贝等)兼养或以贝类养殖为主,这种多元养殖模式为提高该湾养殖效率和效益起到了良好作用。海带年产量约为  $8 \times 10^4$  t(淡干),成为桑沟湾海水养殖支柱产业之一。近年来,由于受国内外水产品市场需求量日益增长刺激,桑沟湾海水养殖在大量扩展养殖面积的同时,亦提高了养殖密度。但并没有得到预期的结果,而是出现了由于营养盐缺乏导致的藻体收获前就开始腐烂的现象(方建光等 1996a)。分析产生这一现象的原因为,过高密度的养殖,阻碍了水体流动,进而影响海带生长所需的无机氮的供应。最终,在营养盐缺乏的情况下,海带非但不能增产,反而减产。

桑沟湾整个养殖环境是一个复杂的系统。海带的生长取决于无机氮营养盐的输运和补充,无机氮浓度同时又是浮游植物生物量和海水交换速度的函数;双壳贝类滤食浮游植物、海带碎屑等颗粒有机物,同时其代谢物又是无机氮营养盐的来源之一。所以,如果将海带作为目标变量研究其生长情况和最终产量,必须将不同养殖生物、非养殖生物及非生物环境之间的相互作用考虑在内,考虑整个养殖生态系统。数值模型就是解决这一问题的有效手段。为了解桑沟湾海带养殖情况、探寻得到最大海带产出的途径,本文建立了三维养殖生态模型,将物理、生态和养殖过程耦合起来,并分别以浮游植物生物量和海带产量为目标变量,对参数敏感性进行了分析。

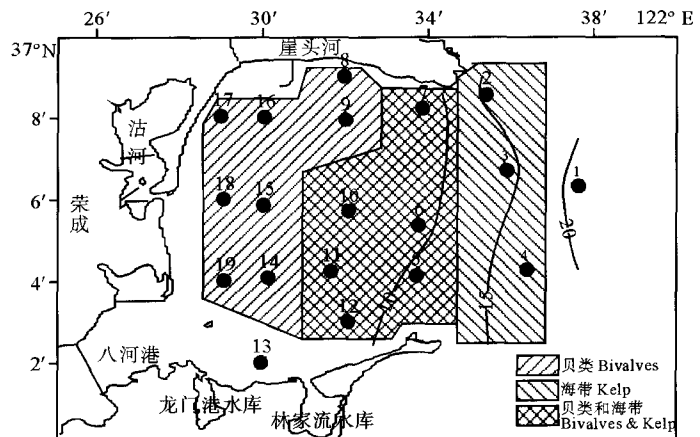


图 1 桑沟湾养殖布局

Fig. 1 Aquaculture scenarios in Sanggou Bay

## 1 模型的建立

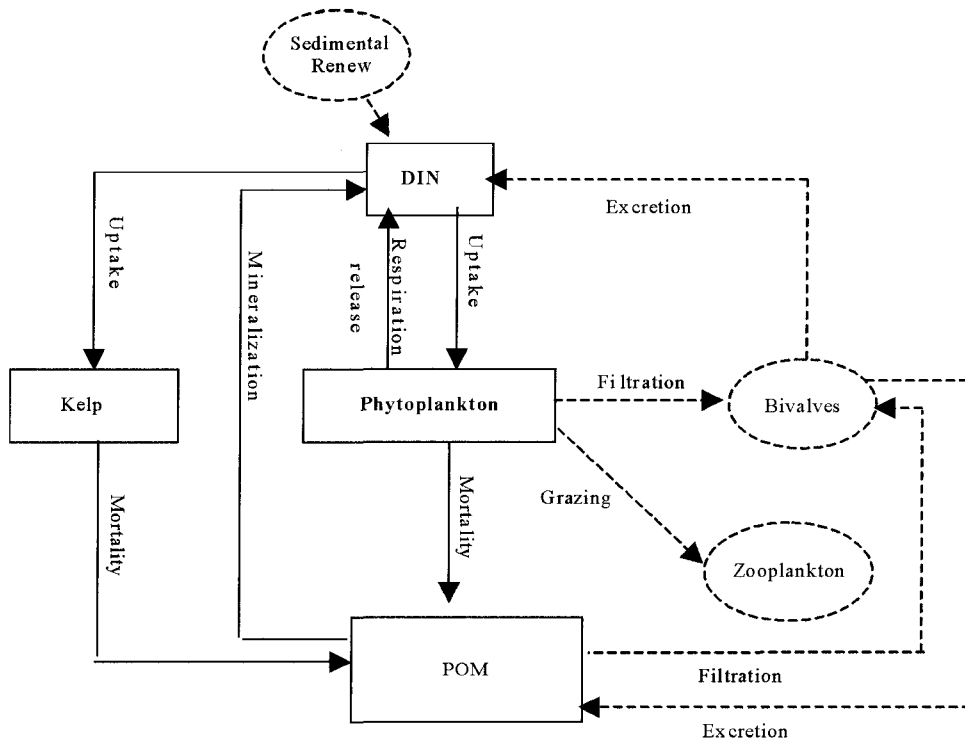
### 1.1 水动力模型

桑沟湾作为典型筏式养殖海域,养殖设施和养殖生物对海水流动的阻碍作用不容忽视。通过 2006 年 4 月和 7 月在桑沟湾的流速现场观测发现,养殖海域潮流的垂直结构存在不同于非养殖海域的特殊现象。由于筏式养殖带来的水体上层阻力大于底应力,形成了潮流流速剖面“向后倾斜”,最大流速出现在中、下层,而非表层水体,上层海水相对于下层先涨先落等现象(樊星等 2009)。因此,在对桑沟湾水动力场进行模拟时,必须将养殖活动本身对水动力场的反作用考虑在内。作者将养殖活动的影响划分为海表养殖设施的阻力和水体中海带的阻力,分别对这两种阻力进行参数化后加入到水动力模型 POM(Princeton Ocean Model)中。海表养殖设施的阻力系数  $C_d$  是基于 2006 年 7 月观测得到的流速剖面计算得到,此阻力依照与底应力相同的形式以面

力的形式  $r_c = \rho C_{ds} |U_s| U_s^1$  加到模型中; 对于整个海湾养殖区内都施加。水体中海带的阻力是根据 Jackson 等 (1983) 在加利福尼亚的圣地亚哥湾底播海带养殖区提出的公式, 并结合桑沟湾海带养殖的密度、海带的生长情况, 以体力的形式施加到桑沟湾海带养殖区、海带生长所及水层。水动力模型模拟得到了养殖影响下桑沟湾真实的流场(史洁等 2009)。

## 1.2 养殖生态模型

以浮游植物生物量(phyt)、溶解无机氮浓度(DIN)、悬浮有机物(POM)浓度和主要养殖生物海带(kelp)湿干重为生态变量, 海水温度、太阳辐射等作为强迫输入, 建立了三维桑沟湾养殖生态模型。基于桑沟湾 1983 年到 1994 年的观测, N/P 平均值为 4.1, 小于 Redfield 比 16:1, 故桑沟湾是无机氮缺乏的水域(Duarte *et al.* 2003)。本项目的观测也证实了这一点。因此, DIN 为浮游植物和海带生长的限制营养盐。概念模型如图 2 所示。



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 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

浮游植物(phyt)利用太阳能吸收营养盐进行光合作用(phyt\_gprod)合成有机物, 同时通过呼吸作用(phyt\_resp)释放营养盐, 死亡的浮游植物(phyt\_mort)成为水体中悬浮有机颗粒物(POM); 水体中的悬浮有机颗粒物一部分再矿化被分解为无机态营养盐(DIN); 主要养殖生物海带(kelp)从 11 月份夹苗开始吸收水体中的营养盐生长, 与同水域中的浮游植物存在营养盐竞争关系, 到次年 5 月份长到最长收获, 期间死亡的海带碎屑变成水体中悬浮有机颗粒物; 水体中溶解无机营养盐一方面被浮游植物和海带吸收, 同时通过浮游植物呼吸代谢释放, 另一方面营养盐通过水体中悬浮有机颗粒物的分解矿化得到补充, 贝类的排泄和底沉积物输入对营养盐的补充也有重要作用。各生态变量满足的控制方程如下。

## 1.2.1 浮游植物(phyt)

$$\frac{\partial phyt}{\partial t} + adv(phyt) = diff(phyt) + phyt\_gprod - phyt\_resp - phyt\_mort$$

$\frac{\partial phyt}{\partial t}$  为浮游植物随时间的变化,  $adv(phyt)$  为流动造成的浮游植物的水平和垂直输运,  $diff(phyt)$  为湍流运动引起的浮游植物分布的变化。

$phyt\_gprod$  为浮游植物通过光合作用生长项:

$$phyt\_gprod = pmax\_phyt \times dpratio \times temp\_lim \times \min(rad\_lim, din\_lim) \times phyt$$

式中,  $pmax\_phyt$  为浮游植物最大生长率;  $temp\_lim$  为浮游植物生长的温度限制函数,  $temp\_lim = \exp[al\_temp \times (t - temp\_0)]$ , 式中,  $al\_temp$  为限制光合作用的温度系数,  $temp\_0$  为  $10^{\circ}\text{C}$ ;  $rad\_lim$ : 浮游植物生长的光限制因子,  $rad\_lim = \frac{I}{I_{opt}} \times \exp\left[1 - \frac{I}{I_{opt}}\right]$  (Radach *et al.* 1993; Aksnes *et al.* 1990),  $I = I_0 \times \exp(-kz)$ ,  $k = k_0 + k_1 \times TSP$  (Stigebrandt *et al.* 1988), 式中,  $I_{opt}$  为最优光强,  $I$  是水下光强,  $I_0$  为到达海面的太阳辐射,  $k$  为消光系数,  $TSP$  为海水中悬浮物浓度,  $k_0$  和  $k_1$  为系数;  $DIN\_lim$  为浮游植物生长的营养盐限制因子  $DIN\_lim = \frac{DIN}{DIN + k\_DIN}$ , 式中,  $k\_DIN$  为浮游植物生长吸收无机氮的半饱和常数。

$phyt\_resp$  为浮游植物呼吸项:

$$phyt\_resp = pmax\_phyt \times dpratio$$

$$\times [phyt\_respbas + phyt\_resppho \times \min(rad\_lim, din\_lim)] \times resp\_temp\_lim \times phyt$$

式中,  $resp\_temp\_lim = \exp[al\_temp2 \times (t - temp\_0)]$ ,  $phyt\_respbas$  为浮游植物基础呼吸率,  $phyt\_resppho$  为浮游植物光呼吸率,  $resp\_temp\_lim$  为浮游植物呼吸的温度系数。

$phyt\_mort$  为浮游植物死亡项:

$$phyt\_mort = phyt\_mortrate \times dpratio \times phyt$$

式中,  $phyt\_mortrate$  为浮游植物死亡率。

## 1.2.2 无机氮(DIN)

$$\frac{\partial DIN}{\partial t} + adv(DIN) = diff(DIN) + (phyt\_resp - phyt\_gprod) - kelp\_gprod + pom\_mine + bethic + biv$$

式中,  $\frac{\partial DIN}{\partial t}$  为溶解无机氮随时间的变化;  $adv(DIN)$  为流动造成的溶解无机氮的水平和垂直输运;  $diff(DIN)$  为湍流运动引起的溶解无机氮分布的变化;  $phyt\_gprod$  为浮游植物生长吸收对溶解无机氮的消耗,  $kelp\_gprod$  为海带生长吸收对溶解无机氮的消耗;  $pom\_mine$  为悬浮有机颗粒物矿化对溶解无机氮的补充;  $biv$  和  $bethic$  分别为贝类排泄和底输入对溶解无机氮的补充。

## 1.2.3 悬浮有机颗粒物(POM)

$$\frac{\partial POM}{\partial t} + adv(POM) = diff(POM) + phyt\_mort + kelp\_mort - pom\_minerade \times POM$$

式中,  $POM$  为悬浮有机颗粒物的现存量;  $\frac{\partial POM}{\partial t}$  为悬浮有机颗粒物随时间的变化;  $adv(POM)$  为流动造成的悬浮有机颗粒物的水平和垂直输运;  $diff(POM)$  为湍流运动引起的悬浮有机颗粒物分布的变化;  $phyt\_mort$  为浮游植物死亡项对悬浮有机颗粒物的贡献;  $kelp\_mort$  为海带死亡对悬浮有机颗粒物的贡献;  $pom\_minerade$  为矿化率。

1.2.4 海带(kelp) (Duarte *et al.* 2003)

$$\frac{\partial kelp}{\partial t} = kelp\_gprod - kelp\_mort$$

$kelp\_gprod$  为海带总生长项:

$$kelp\_gprod = pmax\_kelp \times dpratio \times temp\_lim \times DIN\_lim \times rad\_lim \times kelp$$

式中,  $p_{\max\_kelp}$  为海带最大生长率;  $rad\_lim$  为海带生长的光限制因子, 在海带生长过程中, 可以通过向上或向下调整筏绳而使光照不成为海带生长的限制因子, 故  $rad\_lim = 1$ ;  $temp\_lim = \frac{2.0 \times (1 + \beta) \times X_t}{X_t^2 + 2.0 \times \beta \times X_t + 1.0}$ , 为海带生长的温度限制函数 (Duarte *et al.* 2003),  $\beta = 3.0$ , 为海带生长的温度调节参数,  $X_t = \frac{t - T_{leth}}{T_{opt} - T_{leth}}$ ,  $T_{opt}$  为海带生长最适温度,  $T_{leth}$  为海带生长的致命温度;  $DIN\_lim = \frac{DIN}{DIN + k\_DIN\_kelp}$ , 为营养盐限制因子,  $k\_DIN\_kelp$  为海带生长吸收无机氮的半饱和常数。

$kelp\_mort$  为海带死亡项:

$$kelp\_mort = kelp\_mortality \times kelp$$

式中,  $kelp\_mortality$  为海带的死亡率。

在模型中, 设定海带自 11 月 1 日播苗, 到次年 5 月 31 日收获。期间海带养殖区内海带长度从 0 m 线性生长至收获时的最大长度 5 m。因此, 在海带生长过程中, 水体中由于海带的存在对海水流动产生阻碍深度也不断变化, 即水体内部阻力 (史洁等 2009) 施加水层也从水下 0 m 线性增加到 5 m, 说明养殖生物对水动力场的影响是动态变化的。

## 2 强迫条件

浮游植物、无机氮和悬浮有机颗粒物的初始场资料来自 2006 年 11 月桑沟湾的观测资料。将观测值插值到实际计算网格上。由于缺乏浮游植物生物量观测资料, 模式中浮游植物生物量主要是利用叶绿素 *a* 资料计算。将此初始场驱动模式运行 1 年后的结果作为最终模式的初始场, 这样模式达到一个相对稳定的状态, 可以消除人为影响。

海带通常从 11 月初开始育苗, 养殖到次年的 4~5 月开始收获, 养殖面积为  $3.4 \times 10^7 \text{ m}^2$ 。海带苗的初始重量为 1.2 g (Nunes *et al.* 2003)。在桑沟湾养殖布局 (图 1) 所示的海带养殖区内, 图 3 为海带筏式养殖示意图, 12 棵苗/ $\text{m}^2$  (李长青, 个人交流), 则海带养殖区内海带的初始值为  $14.4 \text{ g}/\text{m}^2$ 。

太阳辐射 ( $Rad$ ;  $\text{w}/\text{m}^2$ ) 和水温 ( $Temp$ ;  $^{\circ}\text{C}$ ) 年循环采用余弦函数形式强迫, 分别为  $Rad = 200.38 - 116.47 \times \cos[2\pi \times (t-1)/365]$  (任玲 2000) 和  $Temp = 13.1 - 9.2 \times \cos\left[2\pi \times \frac{t-53}{365}\right]$  (Kremer *et al.* 1978), 其中,  $t$  为天。

蔡立胜等 (2004) 对桑沟湾养殖海区海底沉积物进行了底质与间隙水营养盐的分析, 用 Fick 第一定律对海区沉积物-海水界面营养盐的通量进行了估算。结果表明, 全年由沉积物向上覆水扩散的  $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{NO}_2^-$ 、 $\text{PO}_4^{3-}$  的通量分别为 376.33、33.02、6.41、10.08  $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ 。本文将其中各种形式的无机氮营养盐相加, 得到桑沟湾沉积物释放 DIN 速率为  $415.76 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ , 作为营养盐的稳定的源加入模型中。贝类的排泄释放是在贝类养殖区内 (图 1), 在贝类养殖时期 (2006 年 10 月 1 日~2007 年 5 月 31 日) 持续贡献无机氮, 总量为 278.46 t。

由于 2006 年只有 1、4、7、11 月 4 个月的观测, 代表 4 个季节, 其分辨率不能用为开边界的强迫。文中所用的开边界条件时间分辨率为 1 个月, 是结合桑沟湾外测站的资料以及前人研究结果 (Duarte *et al.* 2003; 武晋宣 2005; 张继红 2008), 得到开边界各生态变量的开边界强迫 (图 4)。

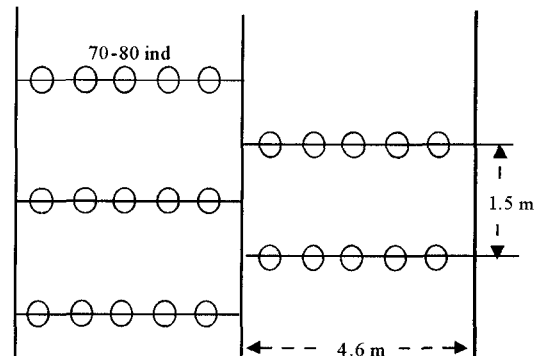


图 3 海带筏式养殖示意

Fig. 3 Sketch map of the kelp culture

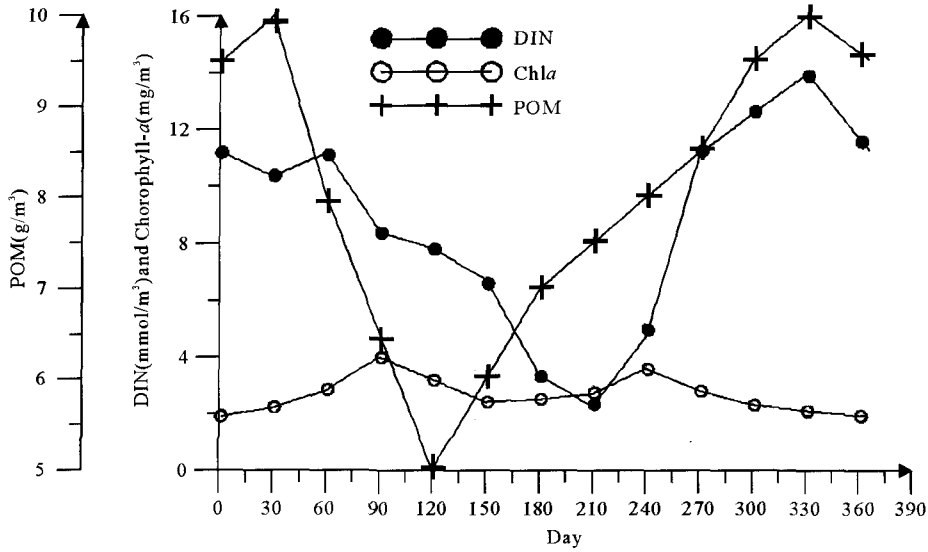


图 4 模型的边界条件

Fig. 4 Open boundary conditions of the model

### 3 参数选择和模型配置

模型参数(表 1)一部分来自桑沟湾实验和研究结果,其余来自中国近海以及纬度相当海区的相关文献取值(Eppley *et al.* 1970; Eppley 1972; Parsons *et al.* 1984; 赵亮 2002; 周毅等 2002; 田恬等 2003; Duarte *et al.* 2003; 武晋宣 2005; 张继红 2008)。

表 1 桑沟湾养殖模型的参数取值

Table 1 Parameters of the culture ecosystem model

参数 Parameter	取值 Number	单位 Unit	参数描述 Parameter description
pmax_phyt	1.2	day <sup>-1</sup>	浮游植物最大生长率
al_temp	0.055	(°C) <sup>-1</sup>	限制光合作用的温度系数
Iopt	150	W/m <sup>2</sup>	浮游植物生长的最优光强
k_DIN	2.0	μmol/L	浮游植物吸收 DIN 的半饱和常数
phyt_respbas	0.138	/	浮游植物基础呼吸率
phyt_resppho	0.05	/	浮游植物光呼吸率
resp_temp_lim	0.054	(°C) <sup>-1</sup>	浮游植物呼吸的温度系数
k <sub>0</sub>	0.04	/	光衰减系数 1
k <sub>1</sub>	0.01	/	光衰减系数 2
phyt_mortrate	0.05	day <sup>-1</sup>	浮游植物死亡率
k_NC	12.277	mmolN/gC	浮游植物中 N 与 C 的比值
k_C	50	mgC/mgChl-a	浮游植物细胞中 C 与叶绿素 a 含量之比
pom_minerate	0.003	day <sup>-1</sup>	POM 矿化率
POM2N	5.714	mmol/gPOM	POM 的含 N 量
pmax_kelp	0.031	day <sup>-1</sup>	海带的最大生长率
k_DIN_kelp	1.0	μmol/L	海带吸收 DIN 的半饱和和常数
β	3.0	/	海带生长的温度调节参数
T <sub>opt</sub>	13	°C	海带生长的最适温度
T <sub>leth</sub>	25	°C	海带生长的致命温度
kelp_mortrate	5.0 × 10 <sup>-5</sup>	day <sup>-1</sup>	海带的死亡率
kelp2N	1.4%	/	海带的干重含 N 量

生态变量同 POM 水动力模型中的温度和盐度,水动力部分与生态部分耦合,均离散于桑沟湾  $\frac{1}{4}' \times \frac{1}{4}'$  水平网格上,垂向分为 11 层。

水动力模型部分外模时间步长为 1s,内模时间步长为 30s,开边界采用  $M_2$  和  $K_1$  分潮潮位作为强迫。水动力模型每进行一步内模运算,养殖生态模型同步计算一次。

#### 4 参数的敏感性分析

由于本文桑沟湾养殖模型包括浮游植物(phyt)和海带(kelp)两个目标变量,浮游植物生物量与营养盐、光和温度的变化和自身的一些生物过程有关;海带的产量与营养盐、温度变化和自身生物过程有关。以下主要讨论这两个目标变量的生物量对不同生物过程参数的敏感性。

敏感度  $S = \text{浮游植物生物量或海带产量变化率} / \text{参数变化率}$ 。

##### 4.1 浮游植物生物量有关参数敏感性分析

表 2 为桑沟湾年平均浮游植物生物量对各参数变化的敏感性分析。可以看出,浮游植物最大生长率、浮游植物基础呼吸、浮游植物死亡率、浮游植物吸收无机氮营养盐的半饱和常数等参数对应的敏感度数值较大,说明浮游植物生物量对这些参数比较敏感,而对悬浮有机颗粒物(POM)矿化率等参数相对不敏感。

表 2 年平均浮游植物生物量对各参数变化的敏感度  
Table 2 Sensitivities of the phytoplankton biomass to different parameters

参数 Parameters	参数描述 Parameter description	参数变化率(%) Parameter variation	浮游植物生物量变化率(%) Phytoplankton biomass variation	敏感度 Sensitivity
pmax_phyt	浮游植物最大生长率	+50	+15.34	0.33
		-50	-25.59	0.54
phyt_mortrate	浮游植物死亡率	+50	-11.54	0.23
		-50	+40.52	0.81
k_DIN	浮游植物吸收 DIN 的半饱和常数	+50	-6.34	0.13
		-50	+4.83	0.10
k_NC	浮游植物中 N 与 C 的比值	+40	-11.30	0.23
		-50	+17.13	0.34
$I_{opt}$	浮游植物生长的最优光强	+50	-18.80	0.37
		-50	+20.42	0.41
phyt_respbas	浮游植物基础呼吸率	+40	-36.80	0.92
		-40	+27.60	0.69
pom_minerate	POM 矿化率	+50	+6.70	0.13
		-50	-6.77	0.14
pmax_kelp	海带的最大生长率	+5	-13.20	0.26
		-5	+13.20	0.26
k_DIN_kelp	海带吸收 DIN 的半饱和常数	+50	+12.56	0.25
		-50	-13.42	0.26
kelp_mortrate	海带的死亡率	+50	+1.12	0.02
		-50	-2.29	0.05

浮游植物氮碳比从 12.277 mmolN/gC 降为 6.138 mmolN/gC, 减小 50%, 引起浮游植物生物量增加 17.13%。氮碳比减小, 使得浮游植物对无机氮的消耗减小, 削弱了无机氮营养盐限制, 从而带来了浮游植物生物量的增加。如果增加 50%, 增加了无机氮的消耗, 使浮游植物一年生长周期内受无机氮限制时间增长, 生物量则减小了 11.3%。

浮游植物生长的最优光强增加 50%, 引起浮游植物生物量减小 18.8%, 敏感度为 0.37。光合作用可获光强(PAR)越接近最优光强, 光限制越弱, 大于或小于最优光强都会限制浮游植物生长。最优光强增加, 则越接近于 PAR 的上限, 光限制加强, 导致浮游植物生物量整体下降。

表 2 还给出了浮游植物生物量对跟海带生物过程有关的 3 个参数(海带的最大生长率、海带的死亡率和海带生长吸收 DIN 的半饱和常数)的敏感度。比较而言, 浮游植物生物量对海带的最大生长率较为敏感, 敏感度为 0.26, 而且变化趋势相反。由于每年 11 月到次年 5 月为海带的生长期, 海带生长大量消耗无机氮营养盐。而此期间, 尤其是海带生长的前期, 水温较低, 太阳辐射较弱, 浮游植物生长受到二者的限制, 营养盐的主要消耗者为海带, 而非浮游植物。所以冬季到早春, 海带的生长情况, 直接影响对水体中营养盐的消耗情况, 进而影响此后浮游植物生长的营养盐环境。

海带生长吸收无机氮营养盐的半饱和常数与浮游植物生物量的变化趋势是一致的。一方面, 由于减小海带生长吸收无机氮的半饱和常数, 削弱了海带生长的氮限制, 使得海带生长增加, 从而消耗更多的营养盐, 继而影响浮游植物的生长; 另一方面, 从生物学的角度看, 在海带和浮游植物共同生长的阶段, 半饱和常数小的种类具有更强的竞争性, 生物量更容易增加, 减小海带生长吸收无机氮的半饱和常数, 就是增加了海带与浮游植物竞争营养盐的能力, 从而一定程度上抑制了浮游植物的生长。反之亦然。

## 4.2 海带产量有关参数敏感性分析

表 3 为海带最终产量对各个参数变化的敏感性分析。可以看出, 海带产量对其自身的最大生长率非常敏感, 最大生长率仅增大 5%, 海带产量却增加 17.3%。相反, 海带死亡率对应的敏感度较低, 小于 5%, 主要原因是死亡率值很小,  $10^{-5}$  量级, 相对于生长微不足道, 所以死亡率上下变化 50%, 海带产量变化仅约为 1%。

对于跟浮游植物本身生物过程有关的参数, 海带的产量对浮游植物最大生长率、浮游植物死亡率等不敏感, 敏感度基本低于 10%; 而海带产量对浮游植物的基础呼吸率相对较敏感, 敏感度为 30% 左右, 且二者的变化趋势相同。由于海带生长期, 尤其是中前期, 浮游植物生长受温度和光照限制较强, 生长非常缓慢, 故在这段时期, 最大生长率的变化引起的浮游植物的变化不显著, 即不会增大与海带生长对营养盐的竞争, 不会带来海带产量的很大变化; 而浮游植物呼吸作为营养盐的源, 其大小会较显著影响海带的产量。

浮游植物吸收无机氮的半饱和常数的变化与海带产量的变化一致, 半饱和常数减小 50%, 海带产量相应减小 7.6%, 敏感度为 15%。浮游植物吸收无机氮的半饱和常数减小, 使得浮游植物生长需要的无机氮减少, 在与海带共生的阶段, 浮游植物竞争营养盐的能力增强, 使得海带产量减小。相反地, 海带吸收无机氮的半饱和常数减小, 增大了海带与浮游植物竞争营养盐的能力, 使得海带产量增大。海带吸收无机氮的半饱和常数减小 50%, 引起海带产量增加 13.48%, 敏感度为 27%。

浮游植物氮碳比的变化与海带产量变化相反, 氮碳比由 12.277 mmolN/gC 降为 6.138 mmolN/gC, 下降 50%。相应的, 海带产量增加 12.65%, 海带产量对此参数的敏感度为 32%。氮碳比减小使得浮游植物消耗无机氮减少, 在海带与浮游植物共生阶段, 就会有更多的无机氮营养盐供给海带生长所需, 使得海带产量增加。

## 5 结论与展望

数值模型可以将复杂的海湾养殖生态系统中的各个变量及各个过程联系起来, 是量化营养盐、浮游植物以及养殖生物各自变化情况和相互之间制约关系的有效手段。由于不同区域养殖生物的品种不同, 所以模型必须是具有空间分辨能力的。以往的模型大多为箱式模型(Raillard *et al.* 1994; Ferreira *et al.* 1998), 将整



个生态系统看作是垂直方向上均匀分布的,把研究区域划分为若干个箱,考虑不同箱之间的物质交换。但是,箱式模型的不足是往往过于简化了水动力场的输运过程。Duarte 等(2003)在桑沟湾建立了一个物理-生化耦合的二维模型,来模拟海带和贝类的生长情况,并讨论了其养殖容纳量,弥补了以往模型中物理过程过于简化的不足。

表 3 海带产量对各参数变化的敏感度

Table 3 Sensitivity of the kelp production to different parameters

参数 Parameter	参数描述 Parameter description	参数变化率(%) Parameter variation	海带产量的变化率(%) Kelp production variation	敏感度 Sensitivity
pmax_phyt	浮游植物最大生长率	+50	-3.48	0.07
		-50	+6.91	0.14
phyt_mortrate	浮游植物死亡率	+50	+2.60	0.05
		-50	-2.01	0.04
k_DIN	浮游植物吸收 DIN 的半饱和常数	+50	+5.20	0.11
		-50	-7.60	0.15
k_NC	浮游植物中 N 与 C 的比值	+50	-20.65	0.41
		-50	+12.65	0.32
I <sub>opt</sub>	浮游植物生长的最优光强	+50	+8.26	0.17
		-50	-13.40	0.27
phyt_respbas	浮游植物基础呼吸率	+40	+12.87	0.32
		-40	-8.62	0.22
pom_minerate	POM 矿化率	+50	-2.21	0.04
		-50	+1.74	0.03
pmax_kelp	海带的最大生长率	+5	+17.32	3.46
		-5	-15.61	3.12
k_DIN_kelp	海带吸收 DIN 的半饱和常数	+50	-16.54	0.33
		-50	+13.48	0.27
kelp_mortrate	海带的死亡率	+50	-2.28	0.05
		-50	+3.79	0.08

然而,海带的长度随着生长的变化决定了其对海水流动阻碍作用的深度也是变化的,进而影响到无机氮营养盐的输运和补充,反过来又制约了海带本身的生长。所以,在这样一个动态变化的系统中,本文建立的三维海带养殖模型能够更加真实的模拟海带与水动力场之间的相互作用。

通过参数敏感性分析,可以看出浮游植物年平均生物量对其自身最大生长率、基础呼吸、死亡率、吸收无机氮营养盐的半饱和常数等参数比较敏感,而对悬浮有机颗粒物(POM)矿化率等参数相对不敏感;对于与海带生物过程有关的 3 个参数中,浮游植物年平均生物量对海带的最大生长率和海带生长吸收 DIN 的半饱和常数比较敏感,而对海带的死亡率不敏感。海带的产量对其自身的最大生长率比较敏感,而对自身的死亡率不敏感;在跟浮游植物生物过程有关的参数中,对浮游植物死亡率比较敏感。

桑沟湾多元养殖生态模型的建立,为模拟桑沟湾生态环境和生源要素的循环,以及进而用数值实验的方法分析桑沟湾海带养殖容量提供了前提。

## 参 考 文 献

- 方建光,孙慧玲,匡世焕,孙 耀,周诗贵,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,周诗贵,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): 1 181~1 187
- 田 恬,魏 皓,苏 建,郑昌硕,孙文心. 2003. 黄海氮磷营养盐的循环和收支研究. 海洋科学进展, 21(1): 1~11
- 任 玲. 2000. 胶州湾生态系统中浮游体系氮循环模型研究. 见: 青岛海洋大学博士学位论文
- 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
- 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
- 周 毅,杨红生,何义朝,张福绥. 2002. 四十里湾浅海养殖生物即附着生物的化学组成、有机净产量及其生态效应. 水产学报, 26(1): 21~27
- 赵 亮. 2002. 渤海浮游植物生态动力学模型研究. 见: 中国海洋大学博士学位论文
- 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
- 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
- Aksnes, D. L., and Lie, U. 1990. A coupled physical-biological pelagic model of a shallow sill Fjord. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 31: 459~486
- 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
- Eppley, R. W., Reid, F. M. H., and Strickland, J. D. H. 1970. Estimates of phytoplankton crop size, growth rate and primary production. In: Strickland, J. D. H., *The ecology of plankton off La Jolla, California, in the period April through September 1967*, *Bull. Scripps Inst. Oceanogr.* 17: 33~42
- Eppley, R. W. 1972. Temperature and phytoplankton growth in the sea. *Fish. Bull.* 70: 1 063~1 085
- Ferreira, J. G., Duarte, P., and Ball, B. 1998. Trophic capacity of Carlingford Lough for oyster culture—analysis by ecological modeling. *Aqua. Ecol.* 31: 361~378
- Grant, J. 1996. The relationship of bioenergetics and the environment to the field growth of cultured bivalves. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 200(1-2): 239~256
- Kremer, J. N., and Nixon, S. W. 1978. *A coastal marine ecosystem*. Springer-Verlag, Berlin; New York
- Nunes, J. P., Ferreira, J. G., Gazeau, F., Lencart-Silva, J., Zhang, X. L., Zhu, M. Y., and Fang, J. G. 2003. A model for sustainable management of shellfish polyculture in coastal bays. *Aquaculture*, 219: 257~277
- Parsons, T., Takahashi, M., and Hargrave, B. 1984. *Biological oceanographic processes*. UK: Pergamon Press, 330
- Radach, G., and Moll, A. 1993. Estimation of the variability of production by simulating annual cycles of phytoplankton in the central North Sea. *Prog. Oceanog.* 31: 339~419
- Raillard, O., and Ménesguen, A. 1994. An ecosystem box model for estimating the carrying capacity of a macrotidal shellfish system. *Marine Ecology Progress Series*, 115: 117~130
- Stigebrandt, A., and Wulff, F. 1988. A model for the dynamics of nutrients and oxygen in the Baltic Proper. *J. Mar. Res.* 45: 729~759
- Wildish, D., and Kristmanson, D. 1997. *Benthic suspension feeders and flow*. Cambridge University Press, New York