

# 象山港多品种养殖与富营养化状况的数值模拟

付 翔 郝 铨 刘诚刚 宁修仁

(国家海洋局第二海洋研究所, 杭州 310012)

**摘 要** 建立了基于氮通量物质平衡的象山港海湾养殖生态系统箱式模型。模型模拟的象山港主要生态变量的变化动态与实测数据资料相吻合。模型计算结果表明,生物生产过程的季节变化导致了营养要素(如氮)在可溶性无机状态和有机碎屑状态中的相互转化并呈现周年振荡。象山港总氮输入约 2 182 tonN/a,其中养殖输入和排污输入约各占一半;氮输出途径按比例依次为水交换扩散、养殖业收获和渔业捕捞收获。目前象山港氮输入大于氮输出(约 11%),造成海湾无机氮浓度年均升高约 42 $\mu$ gN/L。利用模型对不同多品种养殖模式下无机氮浓度的长期变化趋势进行了预测。当前养殖模式下,象山港内无机氮浓度增长幅度较小且逐渐趋于输入输出平衡,而要使象山港海水水质达到国家Ⅲ类标准则需要减少鱼类养殖规模至当前规模的约 40%或增加藻类养殖规模至当前养殖规模的 20 倍。

**关键词** 箱式模型 象山港 多品种养殖 养殖容量

**中图分类号** S968 **文献标识码** A **文章编号** 1000-7075(2012)01-0001-09

## Simulation for polyculture and eutrophication in Xiangshan Harbor

FU Xiang HAO Qiang LIU Cheng-gang NING Xiu-ren

(The Second Institute of Oceanography, SOA, Hangzhou 310012)

**ABSTRACT** A box model based on nitrogen balance for fish-shellfish-macrophytes polyculture in coastal embayment was developed, and applied for Xiangshan Harbor, China. Simulated phytoplankton, zooplankton and nitrogen concentration were consistent with the measured data of Xiangshan Harbor. The results showed that the seasonal variation of biological production rate led to the mutual transformation of nutrients (such as nitrogen) between dissolved inorganic form and detritus form, and the transformation showed an obvious annual oscillation. The phytoplankton reached the peak amount in summer and showed the lowest amount in winter, while the DIN exhibited an opposite variation pattern. Total nitrogen input into Xiangshan Harbor was about 2 182 tonN/a, coming equally from aquaculture and sewage. The nitrogen output from the bay was, by decreasing order, water exchange with ambient water, aquaculture harvest and fishing. At present, the nitrogen input is larger than the output (about 11%), causing the DIN concentration increase of about 42 $\mu$ gN/L per year in the bay. The model was used to ana-

国家海洋局第二海洋研究所基本科研业务费专项(JB0902)和浙江省海洋公益性行业专项(200705024)共同资助

收稿日期:2011-05-14;接受日期:2011-09-22

作者简介:付翔(1976-),男,博士,主要从事海洋生态学研究。E-mail:fuxiangde@hotmail.com, Tel:(0571)81963322

lyze long-term (20 years) influence of different polyculture modes on the DIN concentration in the bay. It shows that DIN concentration in Xiangshan Harbor will slowly increase and the input of nitrogen tends to be balanced with output for the coming several years under current aquaculture mode. If the fish culture is reduced to 40% of the current scale or the macrophytes culture is increased about 20 times of the current scale, the DIN concentration in the bay would gradually decrease and fit the national Grade III water quality standard in about 14 years.

**KEY WORDS** Box model Xiangshan Harbor Polyculture  
Carrying capacity of aquaculture

20 世纪末,象山港投饵网箱养鱼迅猛发展,2001 年海湾网箱数量曾达 6.4 万余只。近几年来,由于政策调控,网箱数量有所减少,但仍在 5 万只左右,养殖面积达 833 hm<sup>2</sup>,年产量约 1 万 t 鲜鱼(宁修仁等 2002)。象山港是一个半封闭的狭长海湾,水交换不通畅,湾顶水域 90% 水交换周期约 80d 左右(董礼先等 1999)。由于海水养殖密度高,鱼类残饵与排泄物大量进入海湾,造成水质的富营养化和底质的恶化。以可溶性无机氮(DIN)为例,近 20 年来象山港水域的 DIN 逐年上升(张丽旭等 2010),2001 年象山港年平均 DIN 浓度已达 590 μgN/L,超过国家 IV 类水质标准(500 μgN/L),至 2006 年已增至 750 μgN/L,夏季 DIN 高值接近 1 000 μgN/L。水体严重富营养化带来一系列环境问题,如赤潮频发、养殖鱼类病害增加等,海湾生态系统健康状况也逐渐恶化。因此,确定合理的养殖容量,在此基础上对海湾养殖规模进行科学的规划和管理,是实现象山港网箱养鱼产业持续健康发展的关键所在。

养殖容量是指对海湾生态系统不造成明显影响时的可持续养殖产量。对于自养型养殖类型(如贝类、藻类养殖),通常是通过计算生态系统的自然供饵力的角度来确定养殖容量,相关方法包括营养级计算(Parsons *et al.* 1973;方建光等 1996a)和数学模型法(Nunes *et al.* 2003;Jiang *et al.* 2005;史洁等 2010a、b、c)等;而对于异养型养殖类型(如鱼类养殖),则通常是通过计算养殖活动的环境压力的角度来确定养殖容量,以水动力模型为基础的营养物扩散模型是其主要方法(蔡惠文等 2006)。

由于自养型和异养型养殖容量的确定方法不同,如何确定多品种养殖模式下的养殖容量目前尚少见报道。本研究建立了基于象山港实际养殖现状和实测生态学数据的鱼-贝-藻多品种养殖箱式数学模型。通过这一模型,对象山港海湾养殖生态系统进行了模拟,分析了生态系统内营养物质的流动过程,对海湾富营养化水平的发展趋势进行了预测。

## 1 模型的构建

### 1.1 模型公式

海湾鱼-贝-藻养殖生态系统动力学箱式模型将整个海湾作为一个整体看待,以养殖海域水体中的生态系统各生态变量为组分,主要包括无机氮、浮游植物、浮游动物、有机碎屑、高级捕食者以及养殖鱼、贝、藻,以海水温度和太阳辐射的变化为强迫输入。由于氮是联系无机营养物与有机物之间的关键物质,模型中以氮的质量作为物质现存量以及物质变化量的基本表示者。生态系统与外界的输入输出以及生态系统内部的过程见图 3。描述各生态变量的控制方程见表 1,其中各参数的说明见表 2。

### 1.2 模型参数

模型中所涉及参数的取值来源三部分。一是 908 数据及历史资料计算得出(如浮游植物最大生长率、浮游植物最大环境承载浓度),二是来自于文献(宁修仁等 2002;方建光等 1996b;卢振彬等 2007;柴雪良等 2006;樊安德等 2008;张武昌等 2002;Mao *et al.* 1993;Duarte *et al.* 2003;Fujii *et al.* 2003;Frost *et al.* 1972),三是通过模型校正得出(如海湾与外海间表观物质交换系数、有机碎屑矿化速率等)。各参数的取值见表 2。

表 1 模型公式及说明  
Table 1 Equations of the model

公式 Equations	说明 Discription
1)网箱养鱼 Fish culture	
$\frac{dFISH}{dt} = FISH_{feed} - FISH_{fece} - FISH_{resp} + FISH_{seed} - FISH_{harv}$	网箱养鱼日投饵量 (ton/d)
$FISH_{feed} = FISH \times R_{feed\_fish}$	
$FISH_{fece} = FISH_{feed} \times (1 - FISH_{assi})$	网箱养鱼日残饵与粪便量 (ton/d)
$FISH_{resp} = FISH \times R_{resp\_fish}$	鱼类日呼吸消耗量 (ton/d)
$FISH_{seed}$	鱼苗播种量 (ton/d)
$FISH_{harv}$	鱼收获量 (ton/d)
2)大型藻类养殖 Macrophyte culture	
$\frac{dKELP}{dt} = KELP_{grow} + KELP_{seed} - KELP_{harv}$	海带日生长量 (ton/d)
$KELP_{grow} = KELP \times R_{grow\_kelp}$	
$KELP_{seed}$	海带播种量 (ton/d)
$KELP_{harv}$	海带收获量 (ton/d)
3)贝类养殖 Shellfish culture	
$\frac{dSHEL}{dt} = SHEL_{graze} - SHEL_{resp} - SHEL_{fece} + SHEL_{seed} - SHEL_{harv}$	贝类日摄食量 (ton/d)
$SHEL_{graze} = SHEL \times R_{graze\_shell} \times \left( \frac{PD}{PD + K_{PD}} \right)$	
$PD = PHYTO + DET$	贝类饵料浓度 ( $\mu\text{gN/L}$ )
$SHEL_{resp} = SHEL_{graz} \times P_{rg\_shel}$	贝类日呼吸量 (ton/d)
$SHEL_{fece} = SHEL_{graz} \times P_{fg\_shel}$	贝类日排粪量 (ton/d)
$SHEL_{seed}$	贝类播种量 (ton/d)
$SHEL_{harv}$	贝类收获量 (ton/d)
象山港主要贝类养殖品种包括牡蛎、蛏子和泥蚶,不同的养殖品种具有不同的生长模型参数,见表 2	
4)浮游植物 Phytoplankton	
$\frac{dPHYTO}{dt} = PHYTO_{grow} - PHYTO_{death} - PHYTO_{ex} - ZOO_{graze} - SHEL_{graze\_phyto}$	浮游植物日生长量 ( $\mu\text{gN/L} \cdot \text{d}$ )
$PHYTO_{grow} = f(I) \times f(DIN)$	
$f(I) = R_{gmax\_phyto} \times ED \times (I / (I + I_k))$	浮游植物生长光强响应函数 ( $\mu\text{gN/L} \cdot \text{d}$ )
$ED = 0.15 + 0.2 \times (I - 200) / 1600$	真光层深度变化函数 (m)
$f(DIN) = 1 - \frac{PHYTO}{PHYTO_{max} \times (DIN / (DIN + K_{DIN}))}$	浮游植物生长 DIN 浓度响应函数 ( $\mu\text{gN/L} \cdot \text{d}$ )
$PHYTO_{death} = PHYTO \times R_{death\_phyto}$	浮游植物日死亡率 ( $\mu\text{gN/L} \cdot \text{d}$ )
$PHYTO_{ex} = PHYTO \times R_{ex}$	浮游植物水交换损失量 ( $\mu\text{gN/L} \cdot \text{d}$ )
$ZOO_{graze} = \begin{cases} ZOO \times R_{gmax\_zoo} & (PHYTO > PHYTO_{satu}) \\ ZOO \times R_{gmax\_zoo} \times \frac{PHYTO}{PHYTO_{satu}} & (PHYTO < PHYTO_{satu}) \end{cases}$	浮游动物对浮游植物日摄食量 ( $\mu\text{gN/L} \cdot \text{d}$ )
$SHEL_{graze\_phyto} = SHEL_{graze} \times (PHYTO / PD) \times STN / V$	贝类对浮游植物日摄食量 ( $\mu\text{gN/L} \cdot \text{d}$ )
$STN = P_{carb\_shell} \times P_{NC\_shell} \times 10^{12}$	贝类干组织重 (ton) 换算为氮 ( $\mu\text{gN}$ ) 的系数
5)浮游动物 Zooplankton	
$\frac{dZOO}{dt} = ZOO_{graze} - ZOO_{death} - ZOO_{resp} - ZOO_{fece} - ZOO_{ex} - PRED_{graz}$	浮游动物日死亡率 ( $\mu\text{gN/L} \cdot \text{d}$ )
$ZOO_{death} = ZOO \times (0.025 + 0.025 \times TEMP / 29)$	

续表 1

公式 Equations	说明 Discription
$ZOO_{resp} = \frac{0.8 \times 12 \times 24 \times 10^{0.02538 \times TEMP - 0.1259} \times 0.2^{0.8918 - 0.01089 \times TEMP}}{22.4 \times 80}$	浮游动物日呼吸量 ( $\mu\text{gN/L} \cdot \text{d}$ )
$ZOO_{feca} = ZOO_{graz} (1 - P_{assi\_zoo})$	浮游动物日排粪量 ( $\mu\text{gN/L} \cdot \text{d}$ )
$ZOO_{ex} = ZOO \times R_{ex}$	浮游动物水交换损失量 ( $\mu\text{gN/L} \cdot \text{d}$ )
$PRED_{graz} = ZOO \times R_{graz\_pred}$	浮游动物被高级捕食者摄食量 ( $\mu\text{gN/L} \cdot \text{d}$ )
6) 有机碎屑 Detritus	
$\frac{dDET}{dt} = PHYTO_{death} + ZOO_{death} + ZOO_{feca} + FISH_{feca} \times FIN/V$ $+ SHELL_{feca} \times STN/V - SHELL_{graz\_det} - DET_{ex} - DET_{remine}$	鱼鲜重 (ton) 换算为氮 ( $\mu\text{gN}$ ) 的系数
$FTN = P_{dw\_fish} \times P_{carb\_fish} \times P_{NC\_fish} \times 10^{12}$	
$SHELL_{graz\_det} = SHELL_{graze} \times (DET/PD) \times STN/V$	贝类对有机碎屑日摄食量 ( $\mu\text{gN/L} \cdot \text{d}$ )
$DET_{ex} = DET \times R_{ex}$	有机碎屑水交换损失量 ( $\mu\text{gN/L} \cdot \text{d}$ )
$DET_{remine} = DET \times R_{remine}$	有机碎屑每日矿化为无机氮的量 ( $\mu\text{gN/L} \cdot \text{d}$ )
7) 非养殖鱼类 Wild fish	
$\frac{dPRED}{dt} = PRED_{graz} - PRED_{harv} - PRED_{resp}$	海湾渔业对非养殖鱼类的捕捞 ( $\mu\text{gN/L} \cdot \text{d}$ )
$PRED_{harv} = PRED \times R_{fishing}$	
$PRED_{resp} = PRED \times (1 - R_{fishing})$	非养殖鱼类呼吸消耗 ( $\mu\text{gN/L} \cdot \text{d}$ )
8) 可溶性无机氮 Dissolved inorganic nitrogen	
$\frac{dDIN}{dt} = FISH_{resp} \cdot FTN/V + SHELL_{resp} \cdot STN/V + ZOO_{resp} + PRED_{resp}$ $+ DET_{remine} + DIN_{load} - PHYTO_{grow} - KELP_{grow} \times KTN/V - DIN_{ex}$	海带淡干重 (ton) 换算为氮 ( $\mu\text{gN}$ ) 的系数
$KTN = P_{carb\_kelp} \times P_{NC\_kelp} \times 10^{12}$	
$DIN_{ex} = DIN \times R_{ex}$	海水无机氮水交换损失量 ( $\mu\text{gN/L} \cdot \text{d}$ )

### 1.3 初始设置与强迫函数

象山港是一个介于穿山半岛与象山半岛之间的狭长型半封闭港湾,由东北向西南伸入内陆,长约 61 km,宽约 5~10 km,总面积约 563.5 km<sup>2</sup>。象山港的平均潮差 2.7~3.3 m,最大潮差 5.65 m。最大流速 1.61 m/s (冬季表层水),年平均水温约 18℃,变化幅度为 10~29℃。盐度为 21.37~28.4, pH 为 7.53~8.62,属正规半日潮(沈庞幼 2002)。湾口区换水 90%约需 15 d,湾底区换水 90%约需 80d(董礼先等 1999a、b; 娄海峰等 2005)。

象山港 DIN 呈现冬季高而夏季低的季节变化特征。近 20 年来,湾内 DIN 浓度呈逐年上升的趋势,1984 年象山港 DIN 年平均浓度约 280  $\mu\text{g/L}$ ,而到 2006 年已增至 750  $\mu\text{g/L}$ ;而 DIP 浓度则没有明显的增长,基本维持在 40  $\mu\text{g/L}$ (张丽旭等 2008、2010)。N:P 比春季为 1:40,冬季为 1:20,呈较高程度的富营养化水平。

计算程序由 Fortran 语言编译,模型中关于养殖活动的变量依照象山港 2006 年各养殖品种的养殖规模进行设置,数据主要来源于《象山港养殖生态和网箱养鱼的养殖容量研究与评价》及《宁海县水务集团有限公司宁海县西店污水处理厂工程项目排污工程环境影响报告书》。为便于描述,这一设置本研究称为标准设置。模型中关于水化学、生物部分的数据和初始设置则主要来自于 908 象山港调查数据及《象山港养殖生态和网箱养鱼的养殖容量研究与评价》。

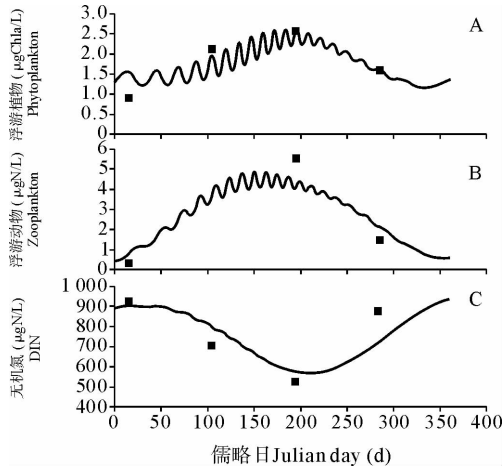
模型的强迫函数为温度和太阳辐射,分别用余弦函数表示为:  $TEMP(^\circ\text{C}) = 19.5 + 9.5 \times \text{COS}[2\pi \times (t + 81)/365]$ ;  $I(\mu\text{mol/m}^2 \cdot \text{s}) = 1000 + 800 \times \text{COS}[2\pi \times (t + 105)/365]$ 。模型模拟的步长  $t$  为天。

表 2 模型中涉及的参数  
Table 2 Parameters of the model

参数 Parameters	说明 Discription	条件 Condition	取值 Value	单位 Unit
$R_{feed\_fish}$	鱼类养殖投饵率	1~3 月	0.017 56	/d
		4~6 月	0.027 52	/d
		7~9 月	0.015 7	/d
		9~12 月	0.018 48	/d
$FISH_{assi}$	鱼类饵料同化率		0.7	无量纲
$R_{resp\_fish}$	鱼类呼吸率	1~3 月	0.008 843	/d
		4~6 月	0.014 5	/d
		7~9 月	0.011 25	/d
		9~12 月	0.007 684	/d
$P_{dw\_fish}$	鱼类干/湿重比		0.2	无量纲
$P_{carb\_fish}$	鱼类干组织中碳含量		0.4	无量纲
$P_{NC\_fish}$	鱼类干组织 N/C 比		0.25	无量纲
$R_{grow\_kelp}$	海带日增长率		0.04	/d
$P_{carb\_kelp}$	海带淡干产品中碳含量比重		0.4	无量纲
$P_{NC\_fish}$	海带淡干产品 N/C 比		0.031	无量纲
$R_{graze\_shell}$	贝类最大摄食率	牡蛎	0.084	/d
		蛭子	0.027 4	/d
		泥蚶	0.031 5	/d
$P_{rg\_shell}$	贝类呼吸消耗占摄食量的比例	牡蛎	0.34	无量纲
		蛭子	0.46	无量纲
		泥蚶	0.24	无量纲
$P_{fg\_shell}$	贝类排粪消耗占摄食量的比例	牡蛎	0.23	无量纲
		蛭子	0.33	无量纲
		泥蚶	0.4	无量纲
$P_{carb\_shell}$	贝类干组织中碳含量比重		0.4	无量纲
$P_{NC\_shell}$	贝类干组织 N/C 比		0.25	无量纲
$K_{PD}$	贝类摄食半饱和和浓度		40	$\mu\text{gN/L}$
$R_{gmax\_phyto}$	浮游植物最大增长率		4	/d
$I_k$	浮游植物生长的半饱和和光强		500	$\mu\text{E/m}^2 \cdot \text{s}$
$PHYTO_{max}$	浮游植物环境最大承载浓度		90	$\mu\text{gN/L}$
$K_{DIN}$	浮游植物生长无机氮半饱和和浓度		40	$\mu\text{gN/L}$
$R_{death\_phyto}$	浮游植物死亡率		0.05	/d
$R_{ex}$	海湾与外海间表观物质交换系数		0.000 6	/d
$R_{remine}$	有机碎屑的表观矿化速率		0.02	/d
$DIN_{load}$	排污无机氮负荷		0.536	$\mu\text{gN/L} \cdot \text{d}$
$R_{gmax\_zoo}$	浮游动物的最大日摄食率		1.2	/d
$PHYTO_{satu}$	浮游动物的饱和摄食浓度		35	$\mu\text{gN/L}$
$P_{assi\_zoo}$	浮游动物同化率		0.5	无量纲
$V$	象山港水体体积		$5.6 \times 10^{12}$	L
$R_{graz\_pred}$	野生鱼类摄食率		0.1	/d
$R_{fishing}$	渔业对非养殖鱼类的捕捞系数		0.1	/d

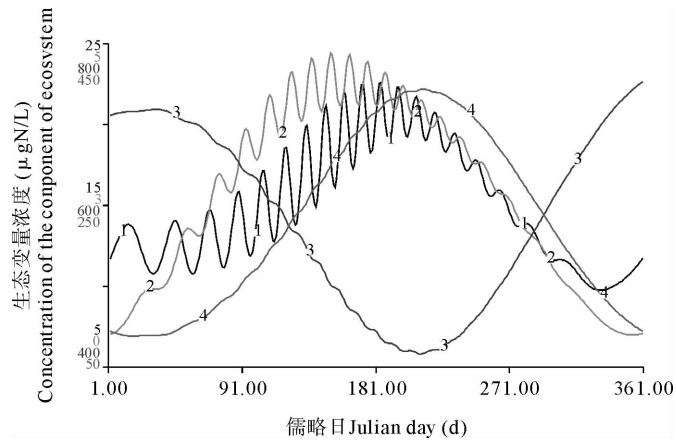
## 2 结果与讨论

通过调整海湾与外海表面物质交换系数以及有机碎屑矿化系数等关键参数,以使模型计算得出的象山港水体中主要生态变量(叶绿素、浮游动物生物量、营养盐)水体平均浓度的年变化曲线与2006年908调查的实测数据相符合(图1)。作者认为在此参数配置下该模型可较好地描述象山港水域养殖生态系统的实际过程。通过本模型进行生态系统的过程分析和趋势预测可得到较合理的符合真实状况的结果。



A. 浮游植物; B. 浮游动物; C. 无机氮  
A. Phytoplankton; B. Zooplankton; C. DIN  
图1 模型计算象山港主要生态变量的年变化与实测数据(n)的比较

Fig. 1 Comparison between the model-calculated and the measured data of annual variation of the main component in the ecosystem of Xiangshan Harbor



1. 浮游植物; 2. 浮游动物; 3. 有机碎屑; 4. 无机氮  
1. Phytoplankton; 2. Zooplankton;  
3. Detritus; 4. Inorganic nitrogen

图2 象山港主要生态变量的年变化  
Fig. 2 Model-calculated annual variation of the main component in the ecosystem of Xiangshan Harbor

### 2.1 海湾生态系统物质转化过程分析

图2显示了模型计算的标准设置下象山港水域水体中主要生态变量(浮游植物生物量、浮游动物生物量、有机碎屑、无机氮)在一周年内的浓度变化过程。由图2可以看出,浮游动物、浮游植物以及有机碎屑的数量高峰出现在夏季6~8月,而冬季为低值期。营养盐浓度的变化趋势与之刚好相反,在夏季处于一年当中的最低值而在冬季则处于高峰。其中浮游动物高峰出现的时间最早而有机碎屑高峰出现的时间最迟,浮游植物高峰则位于二者之间。

初级生产将海水中的无机营养盐(以无机氮为代表)转化为颗粒态有机物,之后经过死亡、被摄食等过程转化为有机碎屑,另一方面,有机碎屑又通过矿化作用等过程转化为无机营养盐,这是海湾生态系统中的基本物质循环过程。通过数学模型对其中的物质通量进行分析,结果表明象山港海湾生态系统的动态变化过程分为两个阶段。

第一阶段从冬季到夏季。冬至后光照强度和日照时长逐渐增加,水温也逐渐升高,浮游植物初级生产力随之增加,并导致其生物量的升高,浮游动物生物量也相应升高。此时,旺盛的初级生产导致由无机营养盐生成有机碎屑的速率大于有机碎屑转化为无机营养盐的速率,结果表现为有机碎屑浓度的持续上升和无机营养盐浓度的持续下降。直到夏季初级生产力达到最大值,此时由于有机碎屑的浓度升高,其转化为无机营养盐的速率也增大,二者达到平衡,有机碎屑数量达到一年中的最大值(约400 µgN/L),而无机营养盐则为一年中的最低值(约400 µgN/L)。

第二阶段从夏季到冬季。夏至过后光照强度和日照时长逐渐减小,浮游植物初级生产力下降,浮游植物与浮

游动物生物量也逐渐降低。此时由于初级生产所支持的无机营养盐向有机碎屑的转化速率开始减小,小于有机碎屑向无机营养盐转化的速率,结果表现为有机碎屑浓度的持续下降和无机营养盐浓度的持续上升。在冬季二者达到平衡,无机氮达到一年中的最高值(约 700  $\mu\text{gN/L}$ ),而有机碎屑则为一年中的最低值(约 100  $\mu\text{gN/L}$ )。

总而言之,象山港海湾生态系统在一年当中的最根本的变化过程就是生物活动所导致的营养要素(如氮)在可溶性无机状态和有机碎屑状态中相互转化的过程,其驱动因子是光照和温度的变化。

中国近海研究较多的其他海湾如桑沟湾(Duarte *et al.* 2003;史 洁等 2010b)和乐清湾(宁修仁 2005)也都呈现与象山港相似的周年变化过程,其中乐清湾与象山港同处浙江省,而桑沟湾则位于山东省。这可能是由于海湾地区水深较浅、营养盐较为丰富,而光照成为浮游植物生长的主要限制因子,从而呈现浮游植物生物量夏季高而冬季低、营养盐浓度则夏季低而冬季高的周年变化规律。

图 3 给出了象山港海湾养殖生态系统在标准设置下运行第一年各生态变量之间的物质流动通量( $\text{tonN/a}$ )。可以看到,海水中可溶性无机氮是海湾养殖生态系统物质转化的核心。无机氮转化为有机颗粒形态的主要途径是浮游植物的初级生产过程,其规模  $1.68 \times 10^4 \text{ tonN/a}$ ,大型海藻养殖虽然也固定无机氮,但目前象山港大型海藻养殖规模较低,这一过程固定的无机氮远低于浮游植物,仅有 28.9  $\text{tonN/a}$ 。在大型海藻养殖规模较大的海湾(如桑沟湾)则大型海藻对无机氮固定的贡献比例非常明显。尽管数量较少,但大型海藻固定的无机氮最终将离开海湾生态系统,对于降低海湾富营养化程度有一定贡献,而浮游植物固定的无机氮虽然量大但基本仍在海湾内部循环。有机态氮转化为无机氮的主要途径包括有机碎屑的矿化和海洋生物的呼吸过程,其中矿化是主要过程,其规模达 9 221.6  $\text{tonN/a}$ ,占有有机氮向无机氮转化通量的 55%,呼吸作用的规模达 7 539.8  $\text{tonN/a}$ ,占 45%。

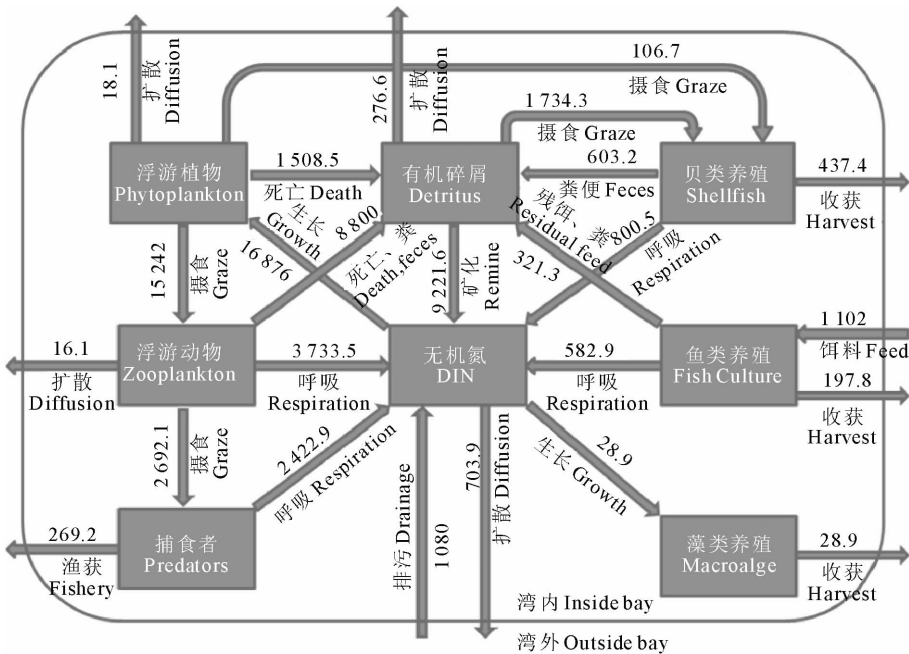


图 3 标准设置下象山港海湾生态系统的物质通量( $\text{tonN/a}$ )

Fig. 3 Mass flux ( $\text{tonN/a}$ ) in the ecosystem of Xiangshan Harbor under standard model presets

进入海湾生态系统的外源性氮总量约 2 182  $\text{tonN/a}$ ,主要包括污水排放和鱼类养殖饵料两部分,二者规模相近,分别为 1 080(49.5%)和 1 102  $\text{tonN/a}$ (50.5%)。鱼饵投入鲜重约为 55 000  $\text{ton/a}$ (合 1 100  $\text{tonN/a}$ ),其中一部分饵料通过养殖鱼类呼吸转化为无机氮(583  $\text{tonN/a}$ ,占总投饵量的 53%),残饵和粪便形成有机碎屑(321  $\text{tonN/a}$ ,占总投饵量的 29%),另一部分饵料则转化为养殖鱼类收获而离开生态系统,产量鲜重约 1 万  $\text{ton/a}$ (合 198  $\text{tonN/a}$ ,占总投饵量的 18%)。海湾内氮的净输出总量为 1 948  $\text{tonN/a}$ ,主要输出途径为:1)通过水交换扩散,总量约 1 015  $\text{tonN/a}$ ,占总氮输出的 52%。其中无机氮扩散量最大,为 704  $\text{tonN/a}$ (占总氮输

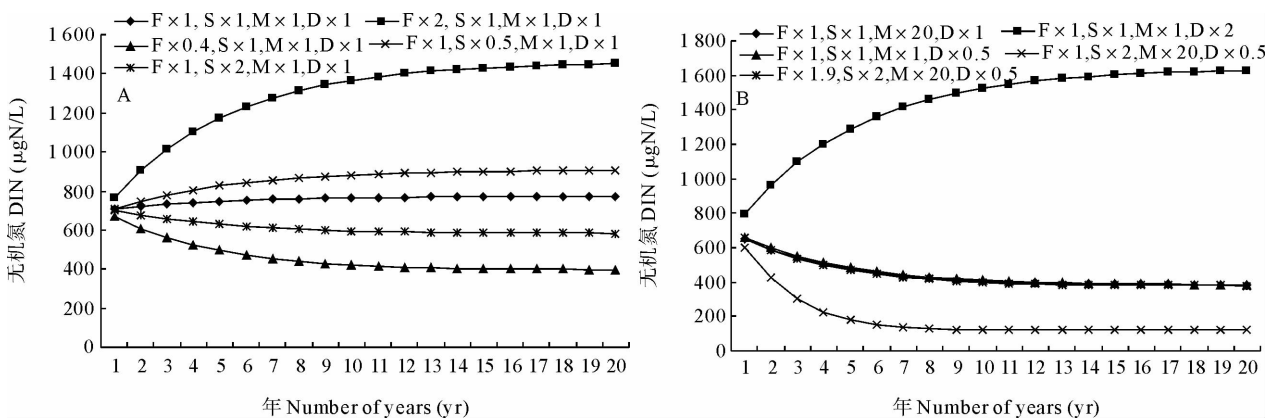
出的36%),有机碎屑扩散量为277 tonN/a(14%),浮游植物扩散量约18 tonN/a(0.91%),浮游动物扩散量约16 tonN/a(0.83%);2)养殖业收获,总量约664 tonN/a,占总无机氮输出的34%。其中,贝类养殖收获量为437 tonN/a(占总无机氮输出的22.4%),鱼类养殖收获量为198 tonN/a(10.2%),藻类养殖收获量29 tonN/a(1.4%);3)渔业捕捞,海湾内野生鱼类的年捕捞量约13 500 ton鲜重,合269 tonN/a,占总无机氮输出的13.8%。收支相抵,残留在海湾中的氮约234 tonN/a,占总外源氮输入的10.7%,这部分氮主要以无机氮的形式存在,造成海湾内无机氮年平均浓度升高41.8  $\mu\text{gN/L}$ 。

## 2.2 多品种养殖与养殖容量

根据生态养殖容量的定义,即在维持生态系统健康和可持续发展的前提下的最大养殖产量,在确定海湾养殖容量时需要先明确生态系统健康和可持续发展的判别标准。对于象山港以网箱养鱼为主的营养输入型的养殖模式,通常来说营养盐水平是最重要的判别标准。但是评价生态系统的可持续性不能仅仅依靠水质标准,同时还应该考察当前养殖活动压力下海湾营养盐水平的发展趋势,而生态系统数学模型则为趋势分析提供了有力工具。

以下假设的多品种养殖模式中,各养殖品种的养殖规模都以2006年养殖规模的倍数来进行讨论,象山港2006年各养殖品种的养殖规模与排污规模(标准设置):鱼类833hm<sup>2</sup>,年产鱼鲜重约1万t;贝类1万hm<sup>2</sup>,年产贝带壳鲜重约8.2万t;藻类约200hm<sup>2</sup>,年产海带淡干重约0.23万t;陆源污染物排放规模约每年0.11万t氮。

图4给出了模型对一些有代表性的多品种养殖模式下象山港海湾无机氮浓度长期变化趋势的计算结果。可见:1)2006年养殖规模下海湾营养盐水平已基本趋于输入输出平衡状态,在未来几年中仅有较小幅度的上升(图4A- $\blacklozenge$ );2)若将鱼类养殖规模扩大一倍,海湾营养盐水平将长时间明显上升,水体富营养化水平加重(图4A- $\blacksquare$ );鱼类养殖规模若减少至2006年规模的0.4倍时,则经过一段较长的时间(14年)后,象山港水域可稳定在Ⅲ类水质(图4A- $\blacktriangle$ );3)减少贝类养殖(0.5倍)将导致水体富营养化水平上升,但幅度不如提高鱼类养殖规模(图4A- $\times$ );提高贝类养殖规模(2倍)可使海湾水体富营养化水平下降,但幅度有限,平衡后水体无机氮浓度仍在劣Ⅳ类水平(图4A- $\ast$ );4)大幅提高大型海藻养殖规模(20倍)可使海湾富营养化水平明显下降,14年后水质可达Ⅲ类水质标准(图4B- $\blacklozenge$ );5)扩大陆源排污规模(2倍)后海水营养盐水平上升的趋势与增加鱼类养殖规模相似,但上升的幅度更大(图4B- $\blacksquare$ );减小排污规模(0.5倍)将使海湾营养盐水平明显降低,效果与减少鱼类养殖规模相似,经过一段较长的时间后可达Ⅲ类水质标准(图4B- $\blacktriangle$ );6)多种增加海湾氮输出(增加贝、藻的养殖规模)和减少氮输入(减少污水排放)手段的协同作用下,若网箱养鱼的规模不变,海湾无机氮浓度水平将明显下降,在较短的时间(5年)达到Ⅰ类水质标准(图4B- $\times$ );即使网箱养鱼规模扩大1.9倍,水质仍可维持在Ⅲ类水标准(图4B- $\ast$ )。



F、S、M、D 分别表示 2006 年象山港鱼类养殖、贝类养殖、大型海藻养殖和污水排放的规模

F, S, M, D represents the scale of fish culture, shellfish culture, macroalgae culture and drainage, respectively, in Xiangshan Harbour, 2006

图4 模型预测的多品种养殖模式下象山港海湾无机氮浓度的长期变化趋势

Fig. 4 Model-predicted long-term variation of inorganic nitrogen concentration for various polyculture modes in Xiangshan Harbour



### 3 结论

目前象山港水域无机氮浓度处于高度富营养化水平,但在现有养殖规模下,海湾营养盐浓度的增长已经过了高速增长期,目前输入输出处于接近平衡的状态,维持现状,则富营养化水平不会进一步加剧。鱼类养殖是导致海湾富营养化的主要原因之一,而贝类和藻类养殖可使海湾富营养化水平降低。要使生态系统向更健康的方向发展,可减少鱼类养殖规模或增加大型海藻养殖规模,由于当前象山港大型藻类产量较低,大幅提高其养殖规模是可能实现的,这也是当前改善象山港海水水质最有可能的途径。

### 参 考 文 献

- 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,张爱君,王兴章,汤庭耀. 1996a. 桑沟湾栉孔扇贝养殖容量的研究. 海洋水产研究, 17(2):18~31
- 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,王兴章,汤庭耀. 1996b. 桑沟湾海带养殖容量的研究. 海洋水产研究, 17(2):7~17
- 史 洁,魏 皓,赵 亮,方建光,张继红. 2010a. 桑沟湾多元养殖生态模型研究:I 养殖生态模型的建立与参数敏感性分析. 渔业科学进展, 31(4):26~35
- 史 洁,魏 皓,赵 亮,方建光,张继红. 2010b. 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. 渔业科学进展, 31(4):36~42
- 史 洁,魏 皓,赵 亮,方建光,张继红. 2010c. 桑沟湾多元养殖生态模型研究:III 海带养殖容量的数值研究. 渔业科学进展, 31(4):43~52
- 宁修仁,胡锡刚. 2002. 象山港养殖区生态和网箱养鱼的养殖容量研究与评价. 北京:海洋出版社, 1~132
- 宁修仁. 2005. 乐清湾、三门湾养殖生态和养殖容量研究与评价. 北京:海洋出版社, 1~275
- 卢振彬,方民杰,杜 琦. 2007. 厦门大嶼岛海域紫菜、海带养殖容量研究. 南方水产, 3(4):52~59
- 张丽旭,蒋晓山,蔡燕红. 2008. 象山港海水中营养盐分布与富营养化特征分析. 海洋环境科学, 27(5):487~491
- 张丽旭,赵 敏,付旭强,蔡燕红. 2010. 近 22 年来象山港海域水环境变化趋势及 R/S 预测研究. 海洋湖沼通报, (1):115~120
- 张武昌,王 克,肖 天. 2002. 海洋浮游动物的同化率. 海洋科学, 26(7):21~23
- 沈庞幼. 2002. 浙江象山港的养殖容量研究和水产养殖的可持续发展. 现代渔业信息, 17(7):22~24
- 娄海峰,黄世昌,谢亚力. 2005. 象山港内水体交换数值研究. 浙江水利科技, 140(4):8~12
- 柴雪良,张炯明,方 军,陆荣茂,谢起浪,林志华,宁修仁. 2006. 乐清湾、三门湾主要滤食性养殖贝类碳收支的研究. 上海水产大学学报, 15(1):52~58
- 董礼先,苏纪兰. 1999a. 象山港水体交换数值研究: I 对流-扩散型的水交换模式. 海洋与湖沼, 30(4):410~415
- 董礼先,苏纪兰. 1999b. 象山港水体交换数值研究: II 模型应用和水交换研究. 海洋与湖沼, 30(5):465~470
- 樊安德. 2008. 宁海县水务集团有限公司宁海县西店污水处理厂工程项目排污工程环境影响报告书. (非正式出版文献)
- 蔡惠文,孙英兰,张学庆. 2006. 象山港网箱养殖对海域环境的影响及其养殖环境容量研究. 环境污染治理技术与设备, 7(11):71~76
- Duarte, P., Meneses, R., Hawkins, A. J. S., Zhu, M., Fang, J., and Grant, J. 2003. Mathematical modelling to assess the carrying capacity for multi-species culture within coastal waters. Ecol. Mol. 168(1-2): 109~143
- Frost, B. W. 1972. Effect of size and concentration of food particles on the feeding behavior of the marine planktonic copepod *Calanus pacificus*. Limno. Oceanogr. 17(6):805~815
- Fujii, M., Yoshie, N., Yamanaka, Y., and Chai, F. 2005. Simulated biogeochemical responses to iron enrichments in three high nutrient, low chlorophyll (HNLC) regions. Progress in Oceanography, 64(2-4):307~324
- Jiang, W., and Gibbs, M. T. 2005. Predicting the carrying capacity of bivalve shellfish culture using a steady, linear food web model. Aquaculture, 244(1-4): 171~185
- Mao, X., Zhu, M., and Yang, X. 1993. The photosynthesis and productivity of benthic macrophytes in Sanggou Bay. Acta Ecologica Sinica, 13(1): 25~29
- 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(1-4): 257~277
- Parsons, T. R., and Takahashii, M. 1973. Biological Oceanography Processes. New York: Pergamon
- Uye, S., and Yashiro, M. 1988. Respiration rates of planktonic crustaceans from the Inland Sea of Japan with special reference to the effects of body weight and temperature. Journal of the Oceanographical Society of Japan, 44(2):47~51