

胶州湾北部水层-底栖耦合生态系统的 动力数值模拟分析*

吴增茂 翟雪梅 张志南[†] 俞光耀 张新玲 高山红

(青岛海洋大学海洋环境学院 青岛 266003)

[†](青岛海洋大学海洋生命学院 青岛 266003)

提要 基于胶州湾 1995 年 5 航次的生态动力学综合实验观测, 建立了一个水层-底栖生态系统耦合的动力学箱式模型, 其中水层亚模型包括浮游植物、浮游动物、无机氮、无机磷以及 DOC、POC 和溶解氧 7 变量, 底栖部分包括大型、小型底栖生物、细菌、碎屑及无机氮和磷 6 变量。模型考虑了海面太阳辐射度变化、海水及底泥温度变化, 以及营养盐与 DOC 陆源流入的影响, 利用该模型成功地模拟了胶州湾北部各生态变量的季节变化特征。同吴增茂等(1999)水层模型模拟结果相比可以看出, 耦合模型的结果更加合理。

关键词 浅海生态动力学模型, 胶州湾, 水层-底栖耦合生态系统, 季节变化模拟

中图分类号 X171

近年来随着我国经济的发展和沿海资源的开发利用, 我国北方沿海水域生态环境不断恶化, 胶州湾的生态环境变化尤为恶劣, 已引起广泛的重视。为了能比较全面地研究胶州湾生态系统动力学的演变特征, 青岛海洋大学通过多学科交叉与联合, 在 1995 年 3 月到 11 月组织了 5 次关于胶州湾生态动力学的综合调查实验。俞光耀等(1999)、吴增茂等(1999)在收集分析历史资料掌握胶州湾生态要素季节变化基础上, 建立了包括浮游植物(P)、浮游动物(Z)、悬浮态与溶解态有机碳(POC, DOC)、总无机氮(TIN)、无机磷(TIP)及溶解氧(DO), 共有 7 个状态变量的水层生态箱式动力学模型。最近在已有水层生态模型基础上, 又建立了一个水层-底栖生态耦合模型, 其中底栖亚模型包括了大型及小型底栖生物(MacroB, MeioB)、细菌(Bbac)以及碎屑(Det)和沉积物间隙水中的总无机氮、磷(BTIN, BTIP) 6 个变量, 成功地模拟了 1995 年 3 月至 11 月水层-底栖耦合生态系统演变的基本特征, 并将模拟实验延伸到了翌年的 10 月。对浅海生态进行这样的水层-底栖生态系动力耦合研究在国内尚属首次。本文比较详细地分析讨论了数值模拟的结果, 为深入理解胶州湾水层-底栖耦合生态系统的动力学特征与演变机制提供了科学基础和分析方法。

1 胶州湾浮游生物及营养盐年循环的基本特征

1.1 胶州湾生态动力学综合实验简述

本实验的实测调查和模拟分析区域南北向为 $36^{\circ}7' - 10'N$, 东西向为 $120^{\circ}11' - 19'E$, 水

* 国家教委关于海洋生态动力学预研究专项基金; 国家自然科学基金资助项目, 49790010 号。吴增茂, 男, 出生于 1940 年 11 月, 教授, 博士生导师, E-mail: zmwu@mail.ouql.edu.cn

收稿日期: 2000-10-08, 收修改稿日期: 2001-08-30

深约为 5m 的软底水域。观测分为 A、B、C 三个断面, 共设 8 个站点(吴增茂等, 1999)。其中 B₂ 站为连续观测站, 每次实验都要进行 25h 的连续观测。其他站为大面测站, 每次实验都是巡测两次。5 次实测分别于 1995 年的 3 月 29 日、6 月 1 日、8 月 4 日、9 月 23 日和 11 月 23 日进行的。为了动力数值模拟初始值及模拟结果的对比分析需要, 给出各次实验的一些平均值。大型、小型底栖动物生物量为各站平均值见表 1, 表 1 其他量为 B₂ 站每次实验中 25h 连续观测的平均值。

表 1 胶州湾 1995 年生态动力学综合实验 B₂ 站各次实验各项的平均值

Tab 1 The mean values of TIN, TIP, P, Z, POC, DOC and DO and their time series at station B₂ in Jiaozhou Bay in 1995

观测日期 (年中天数)	3月29日 (88d)	6月1日 (152d)	8月4日 (216d)	9月23日 (266d)	11月23日 (327d)
TIN	186.2	393.4	100.8	394.8	175.0
TIP	5.43	19.28	22.97	23.65	11.78
P	139.4	90.6	108.6	205.8	69.4
Z	21.5	18.6	19.9	10.61	7.4
POC	192.1	490.3	238.3	330.1	386.0
DOC	1.52 × 10 ³				2.002 × 10 ³
DO	5.73 × 10 ³	6.99 × 10 ³	6.37 × 10 ³	5.90 × 10 ³	9.36 × 10 ³
MacroB	3.937 × 10 ³	3.858 × 10 ³	7.954 × 10 ³	3.296 × 10 ³	3.261 × 10 ³
MeioB	409.4	452.4	270.0	441.2	394.0

注: 在该模型体系及本文中, 生态变量 P、Z、POC、DOC 以 Cmg/m³ 计量, 而 MacroB、MeioB、Bbac 和有机碎屑 Det 都是以 Cmg/m² 计量, DO 以 Omg/m³ 计量。TIN、TIP 及 BTIN 和 BTIP 分别以 Nmg/m³、Pmg/m³ 及 Nmg/m² 和 Pmg/m² 计量

1.2 胶州湾浮游生态系年循环基本特征分析

1.2.1 N/P 由表 1 的实验分析结果得知, 除 8 月份调查结果外, 其他时次的结果都显示出胶州湾的 N/P (原子数) 远大于 16 □ 1。所以可以认为, 除夏季(可能是受陆源径流输入影响)外, 胶州湾浮游植物生产力主要受磷盐控制。N/P 的这一结果同 60 年代及 80 年代初的观测结果(刁焕祥等, 1992) 差异比较大。

1.2.2 浮游植物 根据表 1 结果及文献(潘友联等, 1995a、b; 郭玉洁等, 1992; 沈志良等, 1994) 得知, 胶州湾浮游植物生物量年变化中一般是有两个高值和两个低值期。主要高值期是在 3、4 月份; 另一高值期一般出现在 7—9 月份。自 5 月至 6 月及 10 月下旬以后常为浮游植物生物量的低值期。但必须指出的是, 每年生物量变化的波形及高峰出现的时间和振幅都可能有很大差异。

1.2.3 营养盐输入 胶州湾北部和东北部(本实验模拟区) 无机氮、磷营养盐浓度, 12 月到翌年的 2 月为高值时段。另外, 因夏季降雨陆源径流输入使每年 9 月前后出现另一高值期, 该值大小各年的差异很大(刁焕祥等, 1992; 沈志良等, 1994)。

1.2.4 DOC、POC DOC 呈现了夏季高、冬季低的基本特征。根据 1980 年 7 月至 1981 年 6 月的胶州湾 14 测站的平均结果得知, 6 至 8 月份可高达 1800—2000, 冬季最低只有 800—1000(纪明侯等, 1992)。应注意的是, 11 月 23 日的实验结果得到 DOC 为 2002 的高值, 这可能是受到沿岸排污的影响。POC 的观测分析资料比较少。根据 1981—1982 年的

观测分析得知的基本特征为: 6—9 月份 POC 保持较高值 210—250, 11 月份下降, 在冬季保持较低值, 3 月份达到高值。然而实验资料(表 1) 呈现出的 11 月份高值(386) 和 3 月份的低值(192), 可能是由于年际差异以及受人工养殖活动影响的结果。

1.2.5 底栖生物量 胶州湾底栖生物数量丰富, 生产力很高。由于大型底栖生物量测量的随机性很大, 因此测量结果往往差异很大。据刘瑞玉(1992) 及本文所列实验结果看, 似乎有夏半年生物量大, 冬半年低的特征。孙道元等(1995) 给出的 1991 年 5 月—1994 年 2 月的胶州湾 10 个站的逐个站各季平均值的对比可以发现, 多数站是秋季生物量最高。小型底栖生物量分析的资料极少, 本文所列胶州湾小型底栖生物量显示出春秋高、夏季低的特征。

2 胶州湾水层- 底栖生态耦合模型和方程组

模型的能流、物流结构框图示于图 1。

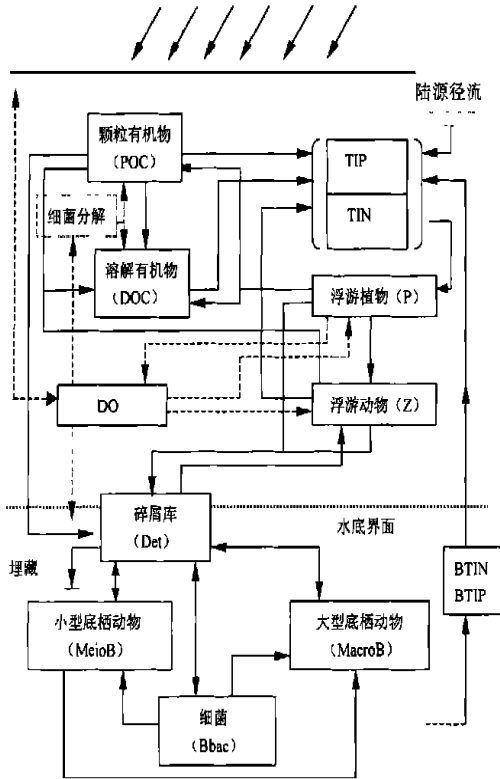


图 1 胶州湾水层- 底栖耦合生态模型能流结构框图

Fig. 1 Diagram of energy flow of the pelagic-lentic coupling ecosystem of Jiaozhou Bay

2.1 水层浮游生态亚模型

水层浮游生态亚模型变量(P, Z, TIN, TIP, POC, DOC, DO) 的方程详见文献(俞光耀等, 1999; 吴增茂等, 1999)。与底栖亚系统耦合后主要改变在于 TIN, TIP 的海底溶出部分直接由底栖亚系统中的无机氮、磷浓度(BTIN, BTIP) 的预报量计算得出, 浮游植物及 POC 沉入

碎屑库(Det)。DOC及DO的海底溶出仍采用参数化方法估计。

2.2 底栖生态亚模型方程组

在底栖生态亚模型中,在大型、小型底栖生物及细菌分析中分别引进标准生物的概念(Ebenhoh *et al.*, 1995)。根据观测资料,大型底栖生物不再分类。以下方程中参数主要参考ERSEM模型(Ebenhoh *et al.*, 1995)及Ems河口模型(Baretta *et al.*, 1988),并依据研究水域生态及环境特征确定。

2.2.1 大型底栖动物方程

$$\frac{dMacroB}{dt} = (\alpha_{Det} + \alpha_{Meio} + \alpha_{Bac} - Maresp - Madea) \cdot MacroB \quad (1)$$

摄食碎屑
摄食小型底栖
摄食细菌
呼吸
死亡与排泄

其中, α_{Det} 、 α_{Meio} 、 α_{Bac} 分别为大型底栖动物对有机碎屑、小型底栖动物及细菌的摄食速率。

$$\alpha_{Det} = a_1 \left[Det \setminus \left(Det + K_{d_1} \right) \right], \alpha_{Meio} = a_2 \left[\frac{MeioB}{(MeioB + K_{Mei})} \right], \alpha_{Bac} = a_3 \left[\frac{Bbac}{(Bbac + K_{B_1})} \right].$$

模型中取 $\alpha_1 = 0.02 \times t_q^{1.15} (d^{-1})$, $\alpha_2 = 0.075 (d^{-1})$, $\alpha_3 = 0.075 (d^{-1})$ 。 K_{d_1} 、 K_{Mei} 、 K_{B_1} 分别为大型底栖动物对碎屑、小型底栖动物及细菌的摄食半饱和数,分别取为 6400、1300、1100Cmg/m²。对小型底栖及细菌摄食的最低阈值分别是 400 和 300Cmg/m²。呼吸耗能速率(包括基本呼吸、活动呼吸及各类压力呼吸)为: $Maresp = a_4 t_q^{1.05} (\alpha_{Det} + \alpha_{Meio} + \alpha_{Bac})$, 其中, a_4 取为 0.238(d⁻¹); 排泄及死亡(包括被捕食)的耗能速率为: $Madea = \left(a_5 \times t_q^{1.05} + a_6 \right)$, a_5 、 a_6 取值为 0.008(d⁻¹) 和 0.012(d⁻¹)。

该底栖生态亚模型方程中多处使用 t_q , $t_q = \exp\left((T_b - 10) \setminus 10 \times \ln 2\right)$, 其中, T_b 表示海底水温(°C)。

2.2.2 小型底栖动物方程

$$\frac{dMeioB}{dt} = (\beta_{Det} + \beta_{Bac} - Meiresp - Meidea) \cdot MeioB - \alpha_{Meio} \cdot MacroB \quad (2)$$

其中, $\beta_{Det} = \beta_1 \left[\frac{Det}{(Det + K_{d_2})} \right]$; $\beta_{Bac} = \beta_2 \left[\frac{Bbac}{(Bbac + K_{B_2})} \right]$ 。模型中取 $\beta_1 = 0.01 t_q^{1.05} (d^{-1})$ 、 $\beta_2 = 0.075 (d^{-1})$ 。 K_{d_2} 、 K_{B_2} 分别为其摄食半饱和值,取值为 6800 和 1000(Cmg/m²)。 $Meiresp = \beta_3 \cdot t_q^{1.05} \cdot (\beta_{Det} + \beta_{Bac})$, $\beta_3 = 0.21$ 。 $Meidea$ 取值为 0.05(d⁻¹)。

其中, $\beta_{Det} = \beta_1 \left[\frac{Det}{(Det + K_{d_2})} \right]$; $\beta_{Bac} = \beta_2 \left[\frac{Bbac}{(Bbac + K_{B_2})} \right]$ 。模型中取 $\beta_1 = 0.01 t_q^{1.05} (d^{-1})$ 、 $\beta_2 = 0.075 (d^{-1})$ 。 K_{d_2} 、 K_{B_2} 分别为其摄食半饱和值,取值为 6800 和 1000(Cmg/m²)。 $Meiresp = \beta_3 \cdot t_q^{1.05} \cdot (\beta_{Det} + \beta_{Bac})$, $\beta_3 = 0.21$ 。 $Meidea$ 取值为 0.05(d⁻¹)。

2.2.3 底栖细菌生物量方程

$$\frac{dBbac}{dt} = \gamma_{Det} - Bacresp - Bacdea - \alpha_{Bac} \cdot MacroB - \beta_{Bac} \cdot MeioB \quad (3)$$

其中, 取食碎屑纳能速率 $\gamma_{Det} = \gamma_1 \cdot t_q^{1.05} \cdot Det$, 取 γ_1 为 0.03(d⁻¹)。细菌呼吸耗能速率 $Bacresp = \gamma_2 \cdot t_q^{1.05} \cdot \gamma_{Det}$, 模型中取 $\gamma_2 = 0.3$ 。细菌死亡和排泄失能速率: $Bacdea = \gamma_3 \cdot Bbac$, 取 $\gamma_3 = 0.05 (d^{-1})$ 。

2.2.4 有机碎屑方程

$$\frac{dDet}{dt} = POC \cdot W_{pom} + P \cdot W_p + Madea + Meideia - \alpha_{Det} \cdot MacroB - \beta_{Det} \cdot MeioB - \gamma_{Det}$$

POC沉降
浮游植物沉降

方程(4)反映出了水层-底栖耦合的一种事实,即水层中颗粒有机碳及浮游植物沉积到海底进入碎屑库,两者的沉降速率分别为 W_{pom} 和 W_p 已在水层生态亚模型中给出。

2.2.5 底栖亚模型中的总无机氮、磷方程(参考 Ruardij *et al*, 1995)

$$\frac{dB_{TIN}}{dt} = \underset{\text{总无机氮再生}}{\text{reg}TIN} - \underset{\text{运输到水层}}{\text{up}TIN} \tag{5}$$

$$\frac{dB_{TIP}}{dt} = \underset{\text{总无机磷再生}}{\text{reg}TIP} - \underset{\text{运输到水层}}{\text{up}TIP} \tag{6}$$

其中,前缀“*reg*”意指“再生”,“*up*”意指通过水-底界面由沉积层向水层的垂直输送。

参照文献(Ebenhoh *et al*, 1995)给出的有关资料,在上(5)、(6)方程中取大型、小型底栖生物及其呼吸排出物的 C □ N □ P 的原子数之比为 1000 □ 143 □ 9.5;底栖细菌为 1000 □ 200 □ 15。据此得出:

$$\text{reg}TIN = \alpha_N [0.167(M_{aresp} \cdot MacroB + Meiresp \cdot MeioB) + 0.233B_{acresp}]$$

$$\text{reg}TIP = \alpha_P [0.025(M_{aresp} \cdot MacroB + Meiresp \cdot MeioB) + 0.039B_{acresp}]$$

α_N 、 α_P 为经验系数,取 $\alpha_N = 0.1$, $\alpha_P = 0.28$ 。

依据物理分析知从底层向水层生态子系统的总无机氮、磷输运速率同底层与水层间的浓度差直接相关(这里 TIN、TIP 可视为底上水层的对应面浓度值)。于是有:

$$\text{up}TIN = \beta_N \cdot t_q \cdot (BTIN - TIN), \text{up}TIP = \beta_P \cdot t_q \cdot (BTIP - TIP)$$

式中, β_N 、 β_P 为经验参数,取 $\beta_N = 0.025$, $\beta_P = 0.048$ 。

3 数值模拟实验初值及物理环境

3.1 初始值确定

数值模拟是从 1995 年 3 月 29 日起始的,积分中的 P、DIP、DIN、DO 是以该日在 B₂ 站上的 25h 连续观测的平均值为初值。浮游动物生物量(*Z*)所用的初值是将 13 个记录中去掉两个最高值和两个最低值,剩下的 9 个值的平均值为积分初值(同表 1)。POC 和 DOC 因分析样品少,都是两个样品分析量的平均值。底栖子系统方程初始值中,大、小型底栖生物(MacroB, MeiB)的初值为各测站的总平均,其他变量的初值因缺实测,参考刘瑞玉(1992)、孙道元等(1995)、Ebenhoh 等(1995)及综合分析胶州湾水层和底栖生态资料诊断得出。

3.2 数值实验物理环境

3.2.1 海水温度 根据胶州湾 1995 年各月平均表层水温线性内插得到逐日水温值的。越冬后进入 1996 年的模拟,所用水温以 1995 年对应日的水温代替。夏半年底层水温取为表层水温的 94%。

3.2.2 日平均有效光照强度 根据本文实验结果及翁学传等(1992)的观测结果得知,胶州湾北部海水冬季至夏初(1—6月)透明度不足 1m,7—9月透明度往往会加深达 1.5—2.0m。10月以后海面风力加大,胶州湾北部透明度多为不足 1m。对浮游植物光合作用的有效光强 *I* 模拟中一般取为 $I = 0.24I_0$, I_0 为胶州湾日平均海面太阳辐照强度,参照 Radach 等(1993)计算。但考虑到 7月中至 9月海水透明度加深,真光层加厚,相应的有效光强 *I* 亦作了相应的修正。

3.2.3 DIP、DIN 及 DOC 的陆源输入 对应于 7 月下旬至 9 月上旬青岛雨季, 考虑了陆源径流对营养盐浓度显著的季节性影响, 在 DIP 和 DIN 日变化率方程中分别加入 0.12 和 1.2 的径流输入项。DOC 的外源输入项 Q_{DOC} , 它包括海底溶出及沿岸污水输入的影响。考虑到不论海底溶出还是城市污水的输入影响都是随着温度的升高而增加的, 为此引进海水温度 t_s 的线性函数来描述此项, $Q_{DOC} = 1.5 + 0.12t_s$ ($^{\circ}\text{C}$)。

4 模拟实验结果分析

4.1 浮游植物与浮游动物

浮游植物、动物的生物量随季节变化的模拟结果见图 2。

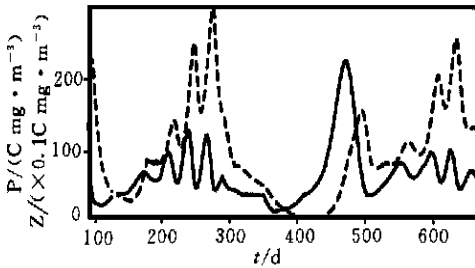


图 2 浮游植物生物量(实线)和浮游动物生物量(虚线)季节变化的数值模拟结果

Fig. 2 The simulated seasonal variations in phytoplankton biomass (solid line) and zooplankton biomass (dashed line)

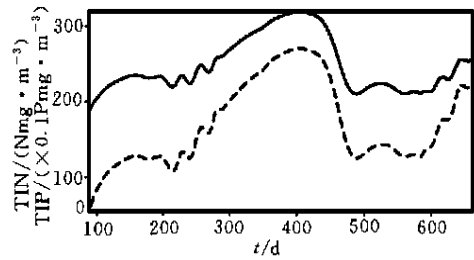


图 3 TIN 浓度(实线)和 TIP 浓度(虚线)季节变化的数值模拟结果

Fig. 3 The simulated seasonal variations in TIN (solid line) and TIP (dashed line)

4.1.1 浮游植物 从图 2 数值分析结果可以看到, 1995 年 4 月中旬到 6 月上旬浮游植物浓度比较低, 最低值约为 $30\text{Cmg}/\text{m}^3$, 6 月下旬开始上升。从 7 月中旬至 10 月中旬处于第二高值期, 但有波动。到 11 月份浮游植物浓度明显下降, 上述特征同表 1 中所列实验观测结果吻合得比较好。另外, 从模拟结果看越冬后形成的春季初级生产高峰期出现在 3—5 月份, 这同胶州湾的大多数观测事实十分一致。

4.1.2 浮游动物 从图 2 还可以发现: 浮游动物生物量季节变化图形同浮游植物相似, 但从图 2 中对应于 1996 年春季的浮游植物生产力的高值期的结果很容易发现, 紧随浮游植物春华后的浮游动物生物量峰值相当低, 即生产效率比较低。浮游动物的真正高峰是出现在 7—9 月份, 这一结果同胶州湾的大多数观测事实十分一致(肖贻昌等, 1992)。然而值得注意的是, 不同年份的同期生物量可差别极大(张武昌等, 2001)。模拟结果同表 1 中实验结果相比较发现, 除 6 月 1 日观测值明显高于计算值外, 其他计算值同实测值都拟合得比较好。另外, 从观测与模拟结果分析大体可以得知, 胶州湾初级生产的转换效率 (Z/P) 大约在 0.1 至 0.2 间。敏感性实验结果证明, 浮游动物生产力是制约浮游生态系的关键性因子。

4.2 营养盐无机氮与无机磷

从图 3 看出, 营养盐 DIN 和 DIP 的变化趋势十分相似。同观测结果相比较发现, 模拟出的季节变化所呈现的波形是合理的, 并且多数情况下量值大小也是十分合理的(刁焕祥

等, 1992; 沈志良等, 1994)。但应该指出的是, 同本文的实验观测结果相比, 文中 8 月份 DIN 的模拟结果偏高, 这可能是由于模拟出的该时段的浮游植物生产力偏低所致。

另外从溶解氧浓度年变化特征可知(图略), 本研究模拟结果是合理的。8 月份达到的最低值和 2 月份达到的最高值不仅时间上同胶州湾的多年观测结果相一致, 而且浓度值同大多数观测结果相吻合(刁焕祥等, 1992)。

4.3 溶解有机碳与颗粒有机碳

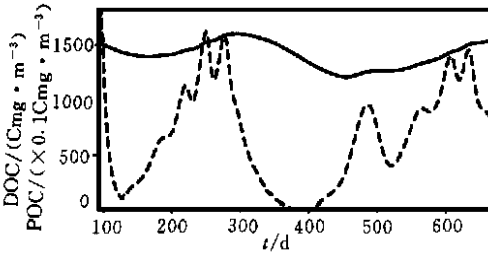


图 4 DOC(实线)与 POC(虚线)季节变化的数值模拟结果

Fig. 4 The simulated seasonal variations in DOC (solid line) and POC (dashed line)

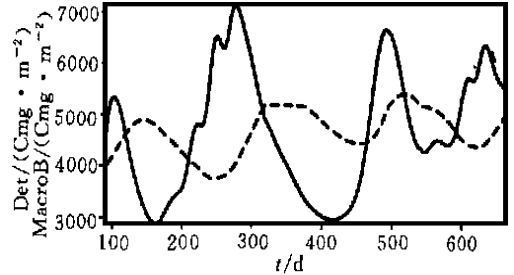


图 5 海底沉积层中 Det(实线)及 MacroB(虚线)生物量季节变化的模拟结果

Fig. 5 The simulated seasonal variations in Det (solid line) and MacroB (dashed line) in the bottom sediment

图 4 示出的 DOC 模拟结果, 同纪明侯等(1992)中给出 1980 年 7 月至 1981 年 6 月的胶州湾观测结果相比较发现, 模拟得到的 DOC 年变化波形是合理的。但应该注意的是: 该文献中给出的冬季 DOC 最低值约为 800, 夏季(6—9 月)达到全年的最高值, 可达 2000 或更高一些。然而本模型模拟出的年变化高、低值分别约为 1620 和 1230, 变化幅度似乎偏小了些。

图 4 中示出的 POC 模拟结果显示出的 9、10 月份的高值、12 至 2 月间的低值、以及跟随浮游植物春季生产高峰之后的高值的基本特征都是十分合理的, 为许多观测事实所证实(纪明侯等, 1992)。

4.4 有机碎屑及大型底栖生物

有机碎屑主要来源于水体中颗粒有机物与浮游植物沉降以及底栖生物碎屑。POC 的年变化图形同浮游植物的十分相似, 只是位相略滞后。因此 Det 的高低值变化也主要受控于浮游植物, 呈现出分别于 4 月和 10 月前后的高值时段。大型底栖生物的模拟结果同孙道元等(1995)中多数观测站的结果是一致的, 呈现出秋季生物量高的特征。模拟结果显示的 6、7 月较高值, 7 月下旬及 8 月由于消耗量大于补充量, 生物量迅速下降而呈现低值。这同纪明侯等(1992)中揭示的现象一致。调查及模拟结果也是同刘瑞玉等(2001)分析所得近年变化趋势一致。

4.5 小型底栖生物及细菌生物量

胶州湾小型底栖生物量的分析研究比较少。图 6 模拟结果显示出的年变化特征同表 1 中的观测结果以及张志南等(2001)的分析比较一致, 4 月及 10 月前后为高值期, 7 月及 8 月上旬由于消耗量大于补充量, 使生物量出现了低值, 冬末春初形成了生物量的年最低

值。研究结果说明它同 EMS 等欧洲河口的小型底栖生物量年变化规律差异明显 (Baretta *et al.*, 1998)。底栖细菌生物量呈现了春、秋两高峰, 其量值略高于小型底栖生物。这同 (Ebenhoh *et al.*, 1995) 的预期结果是一致的。

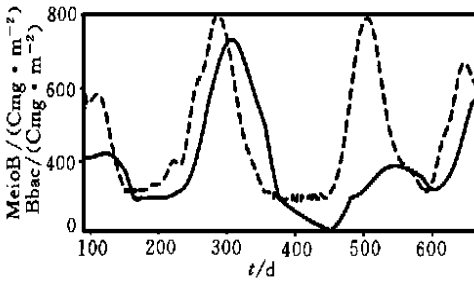


图 6 海底沉积层中 MeioB(实线) 和 Bbac 生物量(虚线) 季节变化的模拟结果

Fig. 6 The simulated seasonal variations in MeioB (solid line) and Bbac (dashed line) in the bottom sediment

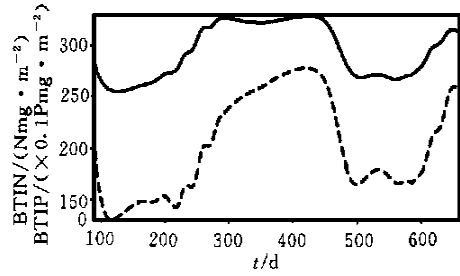


图 7 海底间隙水中 TIN(实线) 和 TIP (虚线) 季节变化模拟结果

Fig. 7 The simulated seasonal variations in TIN (solid line) and TIP (dashed line) in the bottom porewater

4.6 海底沉积物间隙水无机氮和磷季节变化

对比图 7 和图 3 水层总无机氮和无机磷的季节变化模拟结果发现, 水体中的无机氮及磷同底栖沉积物间隙水中的对应成分的年变化曲线形状基本相似, 多数情况下位相也对应, 且底栖间隙水中的营养盐浓度总是大于水层中的浓度。因此可以认为, 对于胶州湾这一超浅海生态系统而言, 间隙水的营养盐溶出是水体营养盐的重要来源。由文献 (俞光耀等, 1999) 表 1 得知, 浮游植物呼吸排泄与 DOC 的分解是水层营养盐的最重要来源。从表 2 可以看出模型计算的来自浮游植物呼吸所致营养物排泄、DOC 分解以及海底间隙水溶出营养盐贡献的大小。

表 2 耦合生态模型计算的夏、秋、冬及春季对于 TIN, TIP 日变化海底溶出与浮游植物呼吸排泄(B₃) 及 DOC 分解(B₁₅)贡献的比较

Tab. 2 Comparison of contribution to TIN and TIP for Summer, Autumn, Winter and Spring among the parts, respectively, from respiration and excreta of phytoplankton (B₃), resolution of DOC (B₁₅), and from benthic domain

季 节	TIN(N mg/ m ³ · d) 来源强度比较			TIP(P mg/ m ³ · d) 来源强度比较		
	B ₃	B ₁₅	海底溶出	B ₃	B ₁₅	海底溶出
夏(210d)	0.778	1.81	0.606	0.106	0.247	0.085
秋(310d)	0.259	1.90	0.366	0.035	0.162	0.047
冬(420d)	0.161	0.521	0.042	0.022	0.071	0.007
春(480d)	1.126	0.737	0.398	0.154	0.101	0.064

5 结语

通过建立的浅海水层-底栖耦合生态动力学模型, 改进了原有水层浮游生态模型的模拟结果, 加深了对于水层-底栖耦合生态系统各生态变量间动力学联系的理解, 以及各

变量年循环规律的了解。但由于至今我国对于底栖亚系统的定量研究还相当少,远不能适应动力学模型研究的需要,因此动力模型中使用的参数值以及它同环境变量间的函数关系还需要深入研究和进一步验证。

致谢 文圣常、冯士 院士对本文研究给予支持,参加海上实验工作及资料分析工作的还有于子山、刘光兴、柴心玉、张伟、任玲、赵建中、孙军等同志,一并致谢。

参 考 文 献

- 刁焕祥,李国基,姜传贤,1992. 海水化学要素的分布与变化. 胶州湾生态学和生物资源. 北京:科学出版社,73—92
- 孙道元,张宝琳,吴耀泉,1995. 胶州湾底栖生物的数量研究. 胶州湾生态学研究. 北京:科学出版社,159—166
- 纪明侯,杨鹤鸣,孙作庆,1992. 海水中的溶解有机碳和颗粒有机碳. 胶州湾生态学和生物资源. 北京:科学出版社,93—98
- 刘瑞玉,1992. 底栖生物群落. 胶州湾生态学和生物资源. 北京:科学出版社,229—237
- 刘瑞玉,黄 勃,徐凤山等,2001. 胶州湾大型无脊椎动物数量的多年变化与趋势预测. 海洋与湖沼,32(3):28—33
- 沈志良,陆家平,刘光俊等,1994. 胶州湾水域的营养盐. 海洋科学集刊,35:115—129
- 肖贻昌,高尚武,张河清,1992. 浮游动物. 胶州湾生态学和生物资源. 北京:科学出版社,170—202
- 张志南,周 红,于子山等,2001. 胶州湾小型底栖生物的丰度和生物量. 海洋与湖沼,32(2):139—147
- 张武昌,王 荣,2001. 胶州湾桡足类幼虫和浮游生纤毛虫的丰度与生物量. 海洋与湖沼,32(3):1—7
- 吴增茂,俞光耀,张志南等,1999. 胶州湾北部水层生态动力学模型与模拟(II)水层生态动力学的模拟研究. 青岛海洋大学学报,29(3):429—435
- 俞光耀,吴增茂,张志南等,1999. 胶州湾北部水层生态动力学模型与模拟(I)胶州湾北部水层生态动力学模型. 青岛海洋大学学报,29(3):421—428
- 郭玉洁,杨则禹,1992. 浮游植物. 胶州湾生态学和生物资源. 北京:科学出版社,136—169
- 翁学传,朱兰部,王一飞,1992. 水文要素的结构和变化. 胶州湾生态学和生物资源. 北京:科学出版社,20—38
- 潘友联,郭玉洁,曾呈奎,1995a. 胶州湾口内海水中叶绿素浓度的周年变化和垂直分布. 海洋与湖沼,26(1):21—27
- 潘友联,郭玉洁,曾呈奎,1995b. 胶州湾口内初级生产力的周年定点观测. 海洋与湖沼,26(3):309—316
- Baratta J, Ruudij P, 1988. Tidal flat estuaries. Spring-Verlag, 105—170
- Eberhoh W, Kohlmeier C, Radford P J, 1995. The benthic biological submodel in the European regional Seas ecosystem model. NJSR, 33(3/4):423—452
- Radach G, 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
- Ruudij R, Roaphorst W V, 1995. Benthic nutrient regeneration in the ERSEM ecosystem of the North Sea. Netherlands J Sea Res, 33(3/4):453—483

SIMULATION ANALYSES ON THE PELAGIC-BENTHIC COUPLING ECOSYSTEM, NORTHERN JIAOZHOU BAY

WU Zeng-Mao, ZHAI Xue-Mei, ZHANG Zhi-Nan¹, YU Guang-Yao,

ZHANG Xin-Ling, GAO Shan-Hong

(*College of Physical and Environmental Oceanography, Ocean University of Qingdao, Qingdao, 266003*)

¹(*College of Marine Biology Science, Ocean University of Qingdao, Qingdao, 266003*)

Abstract Based on the 5 cruises experiment data of the ecosystem dynamics of Jiaozhou Bay in 1995, a pelagic-benthic coupling ecosystem model is built. The pelagic submodel consists of seven state variables: Phytoplankton, Zooplankton, TIN, TIP, DOC, POC and dissolved oxygen (DO). The benthic submodel includes macro-benthos, meio-benthos, bacteria, detritus and TIN and TIP in the sediment. The effects of solar radiation, water temperature and bottom temperature, nutrient exudation from sea bottom and inflow from land are considered. The model results show that there is a good consistence in annual variation of phytoplankton concentration with the observations. The variation phase of zooplankton concentration is reasonable, and the peak value which happens within July to September is consistent with the observations in recent years. The annual variation of TIN, TIP, DOC, POC, DO, macro-benthos and meio-benthos are also reasonable. In general, seasonal variations of the ecosystem state variables of Jiaozhou Bay are successfully simulated by the model. Comparing the simulated results with the pelagic ecosystem model of Jiaozhou Bay (Wu *et al.*, 1999), it is found that the results of the coupling model represent a significant improvement.

Key words Shallow sea ecosystem model, Jiaozhou Bay, Pelagic-benthic coupling ecosystem, Seasonal variation simulation