

营养盐负荷对浮游植物水华影响的模型研究

刘 浩^{1,2}, 潘伟然²

(1. 中国科学院烟台海岸带可持续发展研究所, 山东 烟台 264003; 2. 厦门大学海洋系, 福建 厦门 361005)

摘要: 运用一个耦合的生物物理模型模拟了渤海初级生产力, 浮游植物生物量和氮磷含量的季节变化特征, 模拟结果与实测值吻合较好。在模型验证的基础上, 进一步考察了两种营养盐负荷——河流和沉积物对渤海生态系统动力过程的影响, 发现河载营养盐对渤海生态体系的影响主要集中在河口水域, 而限制沉积物中的营养盐进入水体则能显著抑制渤海范围内藻类水华的爆发。

关键词: 生态模型; 浮游植物; 营养盐负荷; 水华; 渤海

中图分类号: P222.4; P714.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-6791(2008)03-0345-07

作为中国唯一的内海, 渤海生态系统的好坏直接关系到环渤海区域经济的可持续发展, 因此, 人们对渤海生态系统的关注日益显著^[1~6]。大规模的现场观测无疑可以增加对渤海生态系统动力过程的基本认识, 但是现场调查需要动用大量的人力物力资源, 因此不可能长期持续进行。所幸的是, 近年来由于计算手段的不断提高, 得以用数值模型再现渤海生态系统长期连续的变化过程^[3~6]。之前的数值研究已经显示营养盐负荷是造成浮游植物水华的重要原因, 但是对于营养盐负荷怎样影响渤海生态系统的水华过程迄今尚未给出明确的结论。鉴于目前渤海生态系统日益恶化的严峻态势, 对于这一问题的认识就显得迫在眉睫。本文的目的就是借助数值模拟的方法探讨河流和沉积物中营养盐对渤海浮游植物生长的影响, 从而找出主要影响因素, 这对预防赤潮等灾害性和突发性藻类水华的爆发有着重要的研究价值。

1 模型描述

1.1 控制方程及生物参数

本文使用的是一个耦合的生物物理模型, 生物模块包含 6 种生物变量, 即硝酸盐、铵盐、磷酸盐、浮游植物、浮游动物以及生物碎屑。控制方程如下:

$$\frac{d(C_1)}{dt} = - P_n + Nitri + diff(C_1) + S_1 \quad (1)$$

$$\frac{d(C_2)}{dt} = - R_f + Nitri + \mu Z + \epsilon P + n D + diff(C_2) + S_2 \quad (2)$$

$$\frac{d(C_3)}{dt} = - \min\{PN, PP\} + \mu Z + \epsilon P + p D + diff(C_3) + S_3 \quad (3)$$

$$\frac{d(P)}{dt} = \min\{PN, PP\} - G - \epsilon P - m_p P + diff(P) \quad (4)$$

$$\frac{d(Z)}{dt} = G - \mu Z - m_z Z + diff(Z) \quad (5)$$

收稿日期: 2007-06-05

基金项目: 中国科学院海洋环境与波动重点实验室开放课题 (KLOCAW0804); 中国博士后科学基金资助项目 (20060400737)

作者简介: 刘 浩(1972-), 男, 天津塘沽人, 副研究员, 博士, 主要从事近岸海域生态系统动力过程的研究。

E-mail: lhao-tj@163.com

$$\frac{d(D)}{dt} = (1 -)G + m_p P + m_z Z - \frac{1}{L} \frac{\partial(w_D D)}{\partial z} - nD + \text{diff}(D) \quad (6)$$

式中 C_1 、 C_2 、 C_3 分别表示硝酸盐、铵盐和磷酸盐的浓度； P 、 Z 、 D 分别表示浮游植物、浮游动物和生物碎屑的生物量；算子 $\frac{d}{dt}$ 、 diff 分别用来计算上述变量的对流和扩散，根据三维水动力模型 POM 自身的特点，两个算子分别为

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{\partial C_i}{\partial t} + \frac{\partial UC_i}{\partial x} + \frac{\partial VC_i}{\partial y} + \frac{1}{L} \frac{\partial C_i}{\partial z} \quad (7)$$

$$\text{diff}(C_i) = \frac{\partial}{\partial x} \left(A_H \frac{\partial C_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_H \frac{\partial C_i}{\partial y} \right) + \frac{1}{L} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{K_H}{L} \frac{\partial C_i}{\partial z} \right) \quad (8)$$

式中 C_i ($i=1, \dots, 6$) 分别对应着 C_1 、 C_2 、 C_3 、 P 、 Z 、 D ； U 、 V 、 W 分别表示沿 x 、 y 、 z 的流速分量； A_H 、 K_H 分别表示水平和垂直扩散系数； $L = H + z_0$ ，其中 H 、 z_0 分别表示水深和水位。

式(3)、式(4)中的 $\min\{PN, PP\}$ 项用以反映浮游植物的营养盐限制特性，即浮游植物的生长总是由生态系统中存量相对匮乏的那种营养盐所限制。 PN 、 PP 又分别表示为

$$PN = V_p \exp(0.0633 T) \frac{I}{I_{opt}} \exp \left[1 - \frac{I}{I_{opt}} \right] \frac{C_1 / K_{NO_3} + C_2 / K_{NH_4}}{1 + C_1 / K_{NO_3} + C_2 / K_{NH_4}} P \quad (9)$$

$$PP = V_p \exp(0.0633 T) \frac{I}{I_{opt}} \exp \left[1 - \frac{I}{I_{opt}} \right] \frac{C_3}{K_{PO_4} + C_3} P \quad (10)$$

式中 T 为水温； K_{PO_4} 、 K_{NO_3} 和 K_{NH_4} 分别为浮游植物吸收磷酸盐、硝酸盐和铵盐的半饱和常数，数值越小意味着越优先被浮游植物吸收； I_{opt} 为浮游植物生长所需的最佳光强； I 为水体中的实际太阳辐射强度，表示为

$$I = \text{par} I_0 \exp(-k_w z - k_{chl} P dz) \quad (11)$$

式中 I_0 为海水表面的太阳辐射强度，由一个实时的太阳辐射模型^[7]计算得到； z 是水体中一点到海面的垂直距离。

式(1)、式(2)中的 R_n 、 R_r 分别表示新生产力和再生产力^[8]，由以下公式求得：

$$R_n = \frac{C_1 / K_{NO_3}}{C_1 / K_{NO_3} + C_2 / K_{NH_4}} \min\{PN, PP\} \quad R_r = \frac{C_2 / K_{NH_4}}{C_1 / K_{NO_3} + C_2 / K_{NH_4}} \min\{PN, PP\} \quad (12)$$

铵盐的硝化过程 $Nitri$ 以及浮游动物的摄食过程 G 也都可以看成温度的函数，可分别表示为

$$Nitri = C_2 \exp(0.0633 T) \quad (13)$$

$$G = \frac{ZP}{K_{phy} + P} \exp(0.0633 T) \quad (14)$$

式中 K_{phy} 为浮游动物摄食浮游植物的半饱和常数。

本文模型所使用的各种生物参数及其数值列于表1。一般认为，海水中最适于浮游植物生长的 C N P(原子比)为 106 16 1，该数值就是所谓的 Redfield 数^[9]，通常被看作三种元素被浮游植物吸收的比例。根据现场试验，渤海浮游植物中碳元素与叶绿素 a 的比值约为 38 g/g，该关系式可用来计算浮游植物生物量，因为浮游植物生物量通常是以叶绿素 a 来度量的。

表1 生物参数

Table 1 Biological parameters

参 数	符号	数值	单位	数据来源
海水自身的光衰减特性(含泥沙)	k_w	0.15	m^{-1}	本文
叶绿素 a 导致的光衰减系数	k_{chl}	0.025	$(mg \cdot Chl)^{-1} \cdot m^{-2}$	文献[5]
浮游植物 0 时最大生长率	V_p	1.0	d^{-1}	文献[3]

续表 1

参 数	符号	数值	单位	数据来源
浮游植物吸收铵盐的半饱和常数	K_{NH_4}	0.5	$mmol\ N\ m^{-3}$	文献[10]
浮游植物吸收硝酸盐的半饱和常数	K_{NO_3}	1.0	$mmol\ N\ m^{-3}$	文献[10]
浮游植物死亡率	m_p	0.05	d^{-1}	文献[14]
浮游植物呼吸率	r_c	0.1	d^{-1}	文献[3]
光合作用的最佳光强	I_{opt}	100	$W\ m^{-2}$	文献[3]
短波中可用于光合作用的部分	par	0.43		文献[11]
铵盐 0 时的硝化率		0.005	d^{-1}	文献[5]
浮游植物吸收磷酸盐的半饱和常数	k_{PO_4}	0.1	$mmol\ P\ m^{-3}$	文献[12]
生物碎屑的矿化率(氮)	n	0.03	d^{-1}	本文
浮游动物摄食的半饱和常数	K_{phy}	1.0	$mmol\ N\ m^{-3}$	文献[5]
浮游动物的吸收效率		0.6		文献[14]
浮游动物 0 时最大摄食率	g	1.0	d^{-1}	文献[13]
浮游动物的排泄率	μ	0.1	d^{-1}	文献[10]
浮游动物的死亡率	m_z	0.025	d^{-1}	文献[3]
生物碎屑时的矿化率(磷)	p	0.06	d^{-1}	本文
碎屑的沉降速率	w_D	0.5	$m\ d^{-1}$	文献[10]

1.2 模型安排

在耦合的生物物理模型中, 经度和纬度方向均采用 5 min 的计算网格, 垂直方向取 10 个 sigma 层。物理模型的内、外模态分别设定 450 s 和 15 s 的时间步长, 生物化学过程则每 30 min 更新一次。

模型由实际作用力所驱动, 主要考虑了潮汐、风场和河流径流。

8 个主要分潮 - $K_1, O_1, P_1, Q_1, M_2, S_2, N_2$ 和 K_2 被叠加在 122°10' E 的侧边界上, 从而引起水位的上下变化:

$$= \sum_i f_i H_i \cos[\omega_i t + (v + u)_i - g_i] \tag{15}$$

式中 f_i 为节点订正因子; t 为时间; $(v + u)_i$ 为潮汐初始相位; ω_i 为潮汐的角频率; g_i 和 H_i 分别为迟角和振幅; 下标 i 指示不同分潮。

海面动量通量主要由风应力 s 引起, 而 s 可表示为

$$s = \rho_a C_D / U_{10} | U_{10} \tag{16}$$

式中 ρ_a 为空气密度; U_{10} 为海面 10 m 高的风速, 每小时输入一次的风场是从 4 个沿岸气象站内插外插得到; C_D 为海面风应力的拖拽系数, 根据 Large 和 Pond 的经验公式^[15]估算

$$C_D = 1.4 \times 10^{-3} \quad 4 \leq U_{10} < 10; \quad C_D = (0.49 + 0.065 U_{10}) \times 10^{-3} \quad 10 \leq U_{10} < 26 \tag{17}$$

海底的动量通量由底摩擦应力 b 引起, 可表示为

$$b = C_z | u_b / u_b \tag{18}$$

式中 u_b 是海底摩擦速度; C_z 是海底摩擦系数, 又可以表示为

$$C_z = \max \left[\frac{k^2}{[\ln\{ (1 + kb^{-1}) H / z_o \}]^2}, 0.0025 \right] \tag{19}$$

式中 von Karmon 常数 $k = 0.4$; z_o 为海底粗糙度, m; kb^{-1} 为靠近海底 sigma 层的厚度。

河载营养盐在海水中的输送过程通过一个河流输入模型来实现^[16], 可表示为

$$\frac{d}{dt} = \frac{Q(t)}{x y} \tag{20}$$

式中 x 和 y 为河流入海口位置网格的长度和宽度; h 为 sigma 顶层的厚度; $Q(t)$ 为随时间变化的河流径流

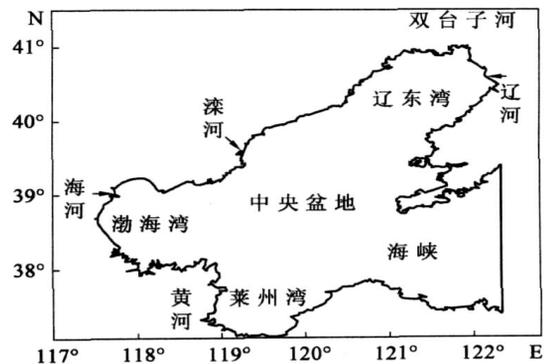


图 1 渤海及 5 条主要入海河流
Fig. 1 Bohai sea and five major rivers

量。简便起见,本文只考虑了环渤海5条最大的河流(见图1),并且认为流量主要集中在丰水期(6~9月),这意味着在本文模型中河载营养盐不会对浮游植物的春季水华造成直接影响。河流径流及氮磷含量数据来源于文献[17,18]。关于营养盐的海底与水体之间交换通量,借鉴Zhang等的研究成果^[17]。

硝酸盐、铵盐、磷酸盐、浮游动物和生物碎屑的初始浓度分别设为3.55、0.71、0.5、0.2、0.2 mmol/m³,而浮游植物的初始浓度则被设为1 mg/m³,上述数值被认为是渤海的年平均值。硝酸盐、磷酸盐和叶绿素a的开边界条件是从渤海、黄海和东海地图集^[19]插值得到;另外3种变量则采取零梯度边界条件。模型开始运转时间为1982年1月1日,总共积分2年,第2年的计算结果用以比较分析。

2 模拟结果及分析

2.1 结果验证

图2给出了初级生产力和海水表层叶绿素a年度循环的模拟和观测结果,可以看出:两项指标都具有相似的双峰结构,分别对应浮游植物的春季和夏季水华;不同的是,浮游植物的生物量在春季达到最大值而初级生产力则在夏季达到最大值。海洋初级生产力反映的是浮游植物固定营养盐和太阳辐射能并将其转化为自身生命物质的能力,主要受营养盐、光强、海水温度等因素的影响。其中,海水温度对藻类生长速度的影响极为显著。Fasham等^[10]认为浮游植物在温暖海水中的生长速度远快于在低温海水中的情形,根据式(9)、式(10),当海水温度达到25℃时,藻类的生长速度约为0℃时的5倍,这也部分解释了为什么对浮游植物来说,最大的初级生产力发生在夏季而非春季。另一方面,夏季出现相对较低的浮游植物生物量,除了受到营养盐相对缺乏的限制外,更主要的原因还是来自浮游动物强大的摄食压力,毕竟夏季也是浮游动物最活跃,数量也最多的季节^[20]。另一个可能导致上述差异的原因,来自于光强对浮游植物生长的限制。浮游植物一般只是在最佳光强下取得最快的生长速度,当光线大于或小于最佳光强时,浮游植物的生长都会受到不同程度限制。对于渤海来说,夏季是一年当中太阳辐射最强的季节,表层海水受到的太阳辐射远大于适于藻类生长的最佳光强。由于硅藻能够在水中自由上下运动以适应最佳的光强,这就导致了在夏季,最大叶绿素a浓度往往出现在次表层或更深层的水体中而不是表层水体中^[1]。另外,夏季的强辐射能够使真光层向下延伸,同时较长的日照时间也有利于浮游植物进行光合生产。因此,夏季太阳辐射对浮游植物生长的综合作用就是提高初级生产力,同时又限制表层叶绿素a浓度的增加。

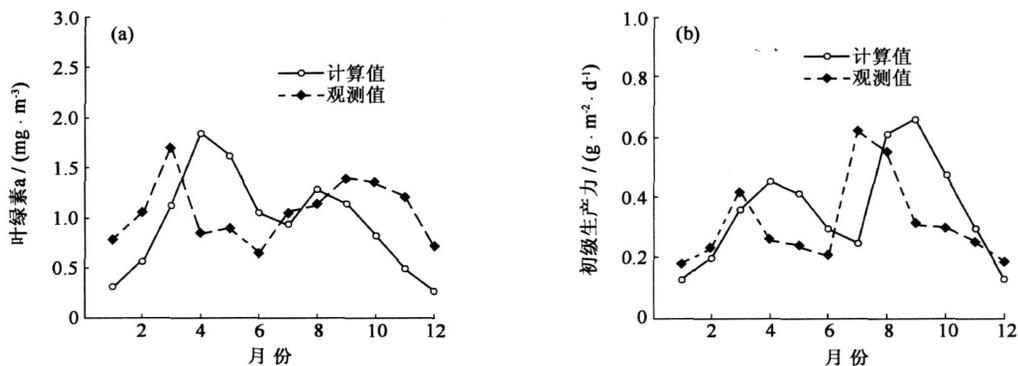


图2 渤海(a)表层海水叶绿素a和(b)初级生产力的计算值和观测值的比较

Fig. 2 Comparison of simulated and observed surface chlorophyll-a (a) and primary production (b) in the whole Bohai sea

图3给出了3种营养盐即硝酸盐、铵盐和磷酸盐年度循环的观测和模拟结果,可以发现:渤海无机氮(无论是硝酸盐还是铵盐)的含量在春季水华过后降到一年当中的最低值,意味着无机氮是藻类春季水华的主要限制营养盐;而磷酸盐则在夏季水华过程中降到一年当中的最低值,意味着无机磷限制在藻类夏季水华中扮演重要角色。模拟结果显示:在春季水华爆发之前渤海水体中的N/P比不超过10,而在水华过程中,由于磷在水体中

具有较快的再生速度^[21],而无机氮又缺乏足够的补充机制,这就导致水体中的N/P比进一步降低,远小于适于浮游植物正常生长所需要的N/P比,即 Redfield 数(16)^[9];当丰水期来临,由于几条河流所携带的营养盐的N/P普遍高于 Redfield 数^[17],以黄河为例,其N/P比高达350.7,于是主要河口水域浮游植物动力特性由无机氮限制向无机磷限制转变,另外,通过沉积物释放到水体的硝酸盐加剧了这一转变趋势。

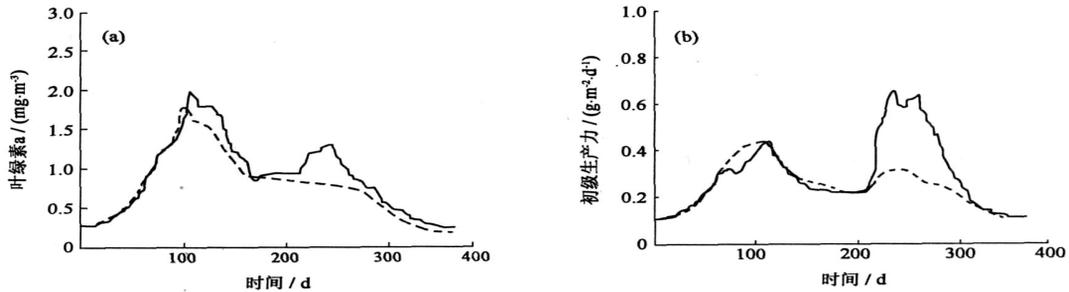


图3 渤海表层 (a)硝酸盐 (b)铵盐和 (c)磷酸盐的观测及模拟结果比较

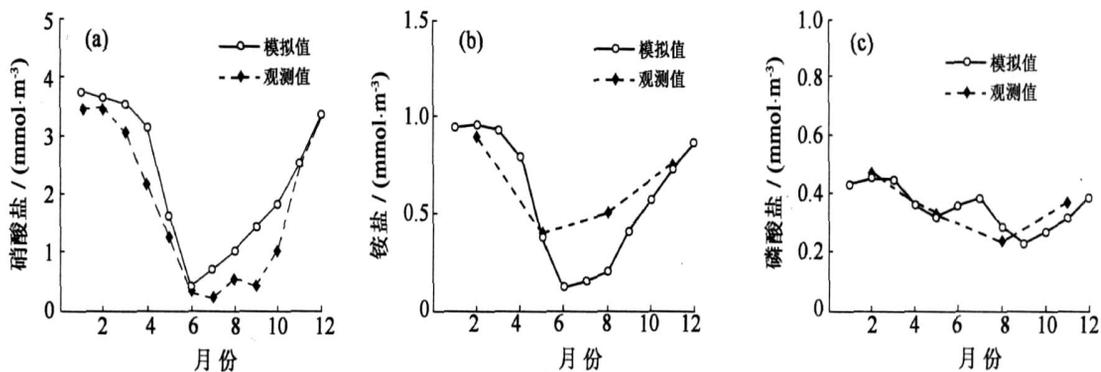
Fig. 3 Comparison of Simulated and observed surface nitrate (a), ammonium (b) and phosphate (c) in over the whole Bohai sea

根据上述分析可知,数值模拟的营养盐-浮游植物动力特性很大程度上取决于对营养盐负荷的处理方式。中国北方属典型的温带大陆性气候,干旱少雨是其显著特征;此外,伴随经济的快速发展,工农业对淡水的需求量也急剧增加,在上游建坝截流进一步削弱了入海径流,因此只是在丰水期将5条主要河流加入到模型的做法是合理的。根据张经等的研究^[17],渤海无机磷在沉积物和水体之间的交换通量为负值,意味着沉积物是磷的汇而不是源,如果确实如此,无机磷相对匮乏的情况对浮游植物夏季水华产生的影响更加突出。从这个意义上讲,本文模型的处理方式还相对保守。

从图2和图3可以看出:本文模拟的初级生产力和表层叶绿素a的年度循环特征与观测吻合较好,模拟的3种营养盐也与实测定性吻合,最重要的是本文的模拟结果能够正确揭示渤海营养盐和浮游植物之间的动力特性。考虑到本文模型结果能够与多种实测资料吻合,证明模型是可靠的。

2.2 两种营养盐负荷对浮游植物生长的影响

鉴于渤海的河载营养盐和沉积物营养盐在浮游植物生长过程中所起的重要作用,通过数值实验来考察两种营养盐负荷对渤海藻类水华的影响,分别断绝河载营养盐和沉积物营养盐的供应,观察只有一种营养盐负荷存在的情况下浮游植物生物量以及初级生产力的年度变化特征,并与图2显示的标准结果进行对比。图4给出了两种情形下表层叶绿素a和初级生产力的模拟结果。与图2相比可以看到:在没有河载营养盐供应情况下的数



实线表示停止河载营养盐供应的结果,虚线表示停止沉积物营养盐供应的结果

图4 渤海(a)表层叶绿素a和(b)初级生产力模拟值

Fig. 4 Simulated annual cycle of surface Chlorophyll a (a) and primary production (b) in the Bohai sea

值模拟结果与标准结果没有本质差别,双峰结构依然可见,只是强度有所减弱,尤其是在河口表现得更为明显(没有显示),因为那里是受河载营养盐影响最为显著的水域。另一方面,如果沉积物营养盐的供应被掐断,则模拟的初级生产力和表层叶绿素 a 的年度循环特征都发生显著变化,与标准结果对比最明显的差别在于藻类夏季水华被有效的抑制,从中也可推断:渤海的夏季水华主要是由沉积物营养盐所引起的。需要指出的是,图 4 显示的模拟结果是在营养盐负荷的供应被断绝的当年所得到的结果,即第一年的结果。如果保持沉积物营养盐的供应处于持续被断绝的状态,那么模拟的第二年的结果显示:不仅第二次水华不会发生,即便第一次水华的发生时间也被显著推迟,而且强度进一步减弱。由此可以设想,如果能够有效控制渤海沉积物中营养盐释放到水体,那无疑可以缓解日益严重的有害藻华的发生,这也为我们治理赤潮和改善海水水质提供了新的思路。

3 结 论

本文通过数值模拟的方法再现了渤海浮游植物与营养盐之间生态动力特性的季节变化过程。受海水温度、光照、浮游植物摄食以及营养盐供应等因素的制约,渤海浮游植物的水华主要发生在春季和夏季。藻类的水华是以消耗水体中的营养盐为代价的,因此藻类水华的爆发通常伴随着水体中营养盐浓度的显著减小。模型结果显示:经过一冬贮存在水体的营养盐可以为春季水华提供必要的营养物质,而河流与沉积物是引起夏季水华的两种主要营养盐负荷。进一步数值实验证明:河载营养盐对渤海生态体系的影响主要集中在河口水域,而限制沉积物中的营养盐进入水体可以显著抑制渤海范围内藻类水华的爆发。

参考文献:

- [1] 费尊乐,毛兴华,朱明远,等.渤海生产力研究:叶绿素 a,初级生产力与渔业资源开发潜力[J].海洋水产研究,1991,12:55-69. (FEI Zun-le, MAO Xing-hua, ZHU Ming-yuan, *et al.* The study on the primary productivity in the Bohai sea-chlorophyll a, primary productivity and potential fisheries resources[J]. Marine Fisheries Research, 1991, 12: 55 - 69. (in Chinese))
- [2] 苏纪兰,唐启升.中国海洋生态系统动力学研究:渤海生态系统的动力学过程[M].北京:科学出版社,2002. (SU Ji-lan, TANG Qi-sheng. Study on ecosystem dynamics in coastal ocean: process of the Bohai Sea ecosystem dynamics[M]. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese))
- [3] WEI Hao, SUN Jun, MOLL A, *et al.* Plankton dynamics in the Bohai Sea-observations and modeling[J]. Journal of Marine System, 2004, 44: 233 - 251.
- [4] ZHAO Liang, WEI Hao. The influence of physical factors on the variation of phytoplankton and nutrients in the Bohai Sea[J]. Journal of Oceanography, 2005, 61: 335 - 342.
- [5] LIU Hao, YIN Bao-shu. Model study on Bohai Ecosystem: 1. Model description and primary production[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2006, 25(4): 77 - 90.
- [6] LIU Hao, YIN Bao-shu. Model study on Bohai Ecosystem: 2. Annual cycle of nutrient-phytoplankton dynamics[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2006, 25(5): 74 - 91.
- [7] 刘浩,尹宝树.一个可用于实时计算的太阳辐射模型[J].海洋与湖沼,2006,37(6):493-497. (LIU Hao, YIN Bao-shu. A real-time irradiation model[J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 2006, 37(6): 493 - 497. (in Chinese))
- [8] DUGDALE R C, GOERING J J. Uptake of new and regenerated forms of nitrogen in primary productivity[J]. Limnology and Oceanography, 1967, 12: 196 - 206.
- [9] REDFIELD A C, KETCHUM B, RICHARDS F A. The influence of organisms on the composition of seawater[A]. Hill M N in the Sea[C]. New York: Wiley Interscience, 1963. 26 - 77.
- [10] FASHAM M J R. Variations in the seasonal cycle of biological production in subarctic oceans: a model sensitivity analysis[J]. Deep-Sea Research I, 1995, 42(7): 1111 - 1149.
- [11] ANDERSON T R. A spectrally averaged model of light penetration and photosynthesis[J]. Limnology and Oceanography, 1993, 38:1403 - 1419.

- [12] FENNEL K, Emmanuel B. Subsurface maximum of phytoplankton and chlorophyll: Steady-state solutions from a simple model[J]. *Limnology and Oceanography*, 2003, 48(4): 1521 - 1534.
- [13] CHAI F. Origin and maintenance of high nitrate condition in the Equatorial Pacific: a biological-physical model study[D]. Durham: Duke University, 1995.
- [14] HAUPT O J, WOLF U, BODUNGEN B V. Modeling the pelagic nitrogen cycle and vertical particle flux in the Norwegian Sea[J]. *Journal of Marine System*, 1999, 19: 173 - 199.
- [15] LARGE W G, POND S. Open ocean momentum flux measurements in moderate to strong winds[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1981, 11: 324 - 336.
- [16] 刘浩. 风、潮对河流羽流发展影响的模型研究[J]. *中国科学院研究生院学报*, 2006, 23(6): 744 - 751. (LIU Hao. Model study on the influence of wind and tide on the evolution of river plumes[J]. *Journal of Graduate School of Chinese Academy of Sciences*, 2006, 23(6): 744 - 751. (in Chinese))
- [17] ZHANG J, YU Z G, RABBITT T, *et al.* Dynamics of inorganic nutrient in the Bohai seawaters[J]. *Journal of Marine System*, 2004, 44: 189 - 212.
- [18] 张士锋, 贾绍凤. 海河流域水量平衡与水资源安全问题研究[J]. *自然资源学报*, 2003, 18(6): 684 - 691. (ZHANG Shi-feng, JIA Shao-feng. Water balance and water security in the Haihe basin[J]. *Journal of Natural Resources*, 2003, 18(6): 684 - 691. (in Chinese))
- [19] 海洋图集编委会. 渤海、黄海、东海地图集——海洋化学、生物分册[M]. 北京:海洋出版社, 1992. (Marine Atlas Committee. Marine atlas of Bohai sea, Huanghai sea, East China sea-chemistry, biology[M]. Beijing: Ocean Press, 1992. (in Chinese))
- [20] 白雪娥, 庄志猛. 渤海浮游动物生物量及其主要种类数量变动的研究[J]. *海洋水产研究*, 1991, 12: 71 - 92. (BAI Xue-e, ZHUANG Zhi-meng. Studies on the fluctuation of zooplankton biomass and its main species number in the Bohai Sea[J]. *Marine Fisheries Research*, 1991, 12: 71 - 92. (in Chinese))
- [21] RYTHER J H, DUNSTAN W M. Nitrogen, phosphorous, and eutrophication in the coastal marine environment[J]. *Science*, 1971, 171: 1008 - 1013.

Model for study on impact of external nutrient sources on the algalbloom*

LIU Hao^{1,2}, PAN Wei-ran²

(1. Yantai Institute of Coastal Zone Research for Sustainable Development, CAS, Yantai 264003, China;

2. Department of Oceanography, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: A coupled bio-physical model is used to simulate the seasonal variation of primary production, chlorophyll a, nitrogen and phosphorus in the Bohai sea, and the modeled results agree with the observations reasonably. Based on the validated simulations, the impact of two external nutrient sources on the Bohai ecosystem is further examined. It is found that the influence of river-borne nutrients mainly concentrate on estuaries, whereas the reduction of sediment-borne nutrients may seriously inhibit the onset of algalbloom in the whole Bohai sea.

Key words: ecological model; phytoplankton; nutrient load; algalbloom; Bohai sea

* The study is financially supported by the Open Fund (KLOCAW0804) and China Postdoc Foundation (20060400737).