

渤海氮磷营养盐的循环和收支

赵亮¹, 魏皓^{1,2}, 冯士筌^{1,2} (1. 青岛海洋大学物理海洋研究所, 青岛 266003, E-mail: zhaol99@mail.ouqd.edu.cn; 2. 青岛海洋大学物理海洋实验室)

摘要:近年来无机氮与活性磷酸盐已成为渤海主要的污染物质. 为了解氮、磷营养盐的循环规律, 建立了一个生物、物理耦合的三维生态模型, 模拟了渤海氮磷营养盐循环, 估算了它们的收支情况. 渤海营养盐浓度从春季到夏季下降, 秋季到冬季上升, 4~9 月为消耗期, 10~3 月为补充期. 磷酸盐冬季最高值位于渤海湾, 辽东湾西北部全年都维持了比较高的浓度; 无机氮的高值区始终位于莱州湾黄河口附近. 光合作用和呼吸作用是营养盐最大的源和汇, 碎屑的矿化可以补充光合作用消耗的营养盐的 30%. 河流输入每年可以补充 $P\ 0.55 \times 10^3 t$ 和 $N\ 52.7 \times 10^3 t$.

关键词:渤海; 生态模型; 年循环; 营养盐收支

中图分类号: P731.2 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2002)01-04-0078

Annual Cycle and Budgets of Nutrients in the Bohai Sea

Zhao Liang¹, Wei Hao^{1,2}, Feng Shizuo^{1,2} (1. Institute of Physical Oceanography, Ocean University of Qingdao, Qingdao 266003, China E-mail: zhaol99@mail.ouqd.edu.cn; 2. Physical Oceanography Lab)

Abstract: High concentrations of dissolved inorganic nitrogen and phosphate contributed much to the environmental problems in the Bohai Sea in the last decade. It is important to understand the cycle and the budget of nutrients for the environmental management. A three-dimensional ecosystem model, coupled with a physical transport model, was adopted in this study. The simulation of the year 1982 was validated by data in 1982/1983. There were depletion from spring to summer and elevation from autumn to winter for nutrients. The higher concentration of phosphate was found at the Bohai Bay and the concentration of phosphate maintained higher level in the whole year. The higher concentration of dissolved inorganic nitrogen located near the Huanghe Estuary. Production and respiration were the most important sink and source of nutrients. The remineralization of the detritus pool can compensate 30 percent of the consumption of nutrient by the production process. The inputs of phosphates and nitrogen from river were $P\ 0.55 \times 10^3 t$ and $N\ 52.7 \times 10^3 t$.

Key words: Bohai Sea; ecosystem model; annual cycle; nutrient budget

渤海地处温带, 平均水深 18 m, 面积约 $7.7 \times 10^4 km^2$, 是我国最大的内海, 近年来渤海营养盐结构发生了很大变化. 无机氮含量增加, 而无机磷含量却降低了^[1], 营养盐比例的改变引起浮游植物群落结构的变化. 渤海初级生产力下降^[2], 但是局部海域富营养化加重, 有害藻华频发. 了解氮、磷营养盐的循环规律, 认识生物过程与物理过程对海域营养盐收支的贡献, 对于环境治理有重要的意义.

对于营养盐循环与收支, 可以从观测数据出发分析研究^[3,4], 也可用模型研究^[5,6]. 然而以生态模型研究营养盐循环收支可以更加全面, 因为模型中不仅包含了各种通量, 而且考虑了各种过程的相互作用和时空变化. 本文建立

一个基于氮、磷循环与物理模型(HAMSOM)^[7]耦合的三维生态动力学模型, 用于考察渤海无机氮、活性磷酸盐的年循环规律, 估算渤海营养盐的收支和季节变化.

1 模式简介

根据 1998 年中德渤海生态系统综合调查, 渤海不同区域的氮磷比各不相同*. 近岸区域和黄河口附近氮磷比大于 16 (Redfield 数), 其他区域氮磷比则小于 16. 不同区域氮磷限制关系

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (497901001, 49576298)

作者简介: 赵亮 (1975~), 男, 博士研究生, 主要从事生态系统动力学模型研究.

收稿日期: 2001-01-20; 修订日期: 2001-03-06

* 魏皓, Hainbucher D. 渤海生态系统综合调查 1998 年秋季航次报告. 青岛海洋大学, 青岛, 1998, 54.

不同,因而在 1998 年 Moll 建立的磷循环模型 (ECOHAM1) 的基础上^[8],笔者加入了一个简单的氮循环模型.模型包含浮游植物生物量 (A)、磷酸盐浓度 (PHO)、无机氮浓度 (DIN) 和沉积物中的碎屑浓度 (D) 4 个生态变量,物理场 (余流场和湍粘性系数)、海水透明度、水温、浮游动物生物量 (Z)、水下光强 (I) 等作为强迫输入.营养盐循环概念模型为:营养盐为浮游植物所吸收,又通过浮游植物的呼吸释放,死亡的浮游植物一部分沉降到水底构成水底碎屑,另一部分成为水体颗粒物的一部分;浮游动物摄食浮游植物同化为自身生物量,通过死亡和排粪也成为水体颗粒物的一部分,通过排泄形成溶解有机物;水体有机物和水底碎屑,通过矿化过程使水体营养盐得到补充,未及矿化的水体颗粒物也沉到水底成为水底碎屑.

$$\frac{d \text{Nutrient}}{dt} = \text{水平对流 (ADVE)} + \text{垂直扩散} + \text{浮游植物摄食 (UPTA)} + \text{浮游植物代谢 (RELE)} + \text{浮游动物排泄 (EXCR)} + \text{水体再生 (REMW)} + \text{水底再生 (REMD)} + \text{河流输入 (RIVR)} \quad (1)$$

生态模式与物理输运模式均离散于 $5' \times 5'$ 的水平网格上,垂直分为 10 层,其层厚分别为 $3 \text{ m} \times 6, 5 \text{ m} \times 2, 10 \text{ m}$ 和 27 m ,较细的上层划分使模式可以分辨季节跃层的变化.由分层平均的三维斜压模式 HAMSOM,在 1982 年每天 4 次的气象条件和开边界 5 个分潮强迫下,以 360s 时间步长计算瞬时流动,进行天平均获取生态模型中的对流与湍流扩散数据.将渤海分为 6 个初始箱,根据 1982-05 ~ 1983-05 调查资料,给出各箱浮游植物生物量、磷酸盐浓度、无机氮浓度初始值^[9,10],给定 1982 年 12 个月各箱的浮游动物生物量、透明度和水温作为强迫,再将箱内值插值到网格上.模式中仅考虑黄河的输入,根据 1982 年每天的径流量和平均营养盐浓度^[11]计算黄河对营养盐的输入.太阳辐射根据纬度和沿岸台站云量等每 30 min 计算一次.生态模型的时间步长为 900s.

2 结果与讨论

2.1 渤海氮磷营养盐浓度的年循环

模拟的渤海及 4 个区域年平均营养盐浓度与 1982 年 ~ 1983 年观测^[1]基本吻合,仅中央海区无机氮浓度偏大(表 1).莱州湾无机氮偏高而无机磷偏低,主要是由于黄河的影响,黄河输入大量的无机氮,一方面使得无机氮的浓度升高,另一方面氮的大量输入使得磷被大量地消耗.

表 1 观测与模拟的年平均营养盐浓度的比较/ $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-3}$
Table 1 Annual mean nutrient concentrations
(observed and simulated)

营养盐		渤海	辽东湾	渤海湾	莱州湾	中央海区
无机氮 (DIN)	观测	2.53	2.45	2.18	4.23	1.94
	模拟	2.70	2.02	1.92	3.94	3.21
无机磷 (PHO)	观测	0.94	0.97	1.17	0.68	1.00
	模拟	0.91	0.91	1.04	0.73	1.02

由各海区营养盐年循环可见(图 1),无机氮和活性磷酸盐都经历了春夏的减少和秋冬的补充,但磷酸盐的再生和补充非常弱,年底并没有恢复到年初水平,磷酸盐的再生弱是该模式固有的缺陷^[8].无机氮的浓度除渤海湾外基本恢复到年初水平,很大程度上是由于黄河的补充,其中莱州湾和中央海区受影响最大,8 月后浓度很快增加.营养盐的消耗期从 4 月到 9 月,莱州湾由于黄河的输入,氮的消耗期从 4 月到 8 月,9 月到来年的 3 月为积累期.

通过计算结果可看出,光和营养盐限制在 1982 年的变化规律,冬季由于光照不足,呈现光限制,随着光照增强,营养盐限制变强,在渤海湾表现为 N 限制.而在莱州湾,营养盐限制首先表现为氮限制,9 月份后,随着 P 的大量消耗和黄河补充了大量的无机 N,呈现 P 限制.辽东湾和渤海中部情况和渤海湾基本相同.

2.2 营养盐分布的变化

模拟的营养盐水平分布与观测符合较好.氮的分布见图 2a,2 月莱州湾、渤海湾西岸和辽东湾北岸氮含量比较高,其中莱州湾最高(平均 $> 7 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-3}$), $5 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-3}$ 等值线北推到 38.5°N ,中央海区大部分为 $3 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-3}$ (中部平均含量为 $3.2 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-3}$),整个海区营养盐都比较高.到 5 月由于浮游植物的生长,营养盐

浓度下降,近岸地区下降很快,渤海中部变化比较平稳,下降比较慢.中部靠近莱州湾比较高,主要是水平运输的影响,根据计算结果,4月莱州湾对流是向外运输的.8月随着浮游植物的消耗利用,营养盐含量进一步降低,达到了一年的最低点,渤海中部仅为 $1\text{ mmol}\cdot\text{m}^{-3}$ 左右,由

于黄河的输入(1982-08 流量占全年的 $1/3$),河口区无机氮浓度 $> 7\text{ mmol}\cdot\text{m}^{-3}$.随着矿化过程的进行,河流输入和层化的消失,10月营养盐回升,莱州湾西岸浓度 $> 5\text{ mmol}\cdot\text{m}^{-3}$,渤海中部相比最低,但也为 $1.5\sim 2.5\text{ mmol}\cdot\text{m}^{-3}$.

p 的分布见图2b,2月莱州湾、渤海湾北、

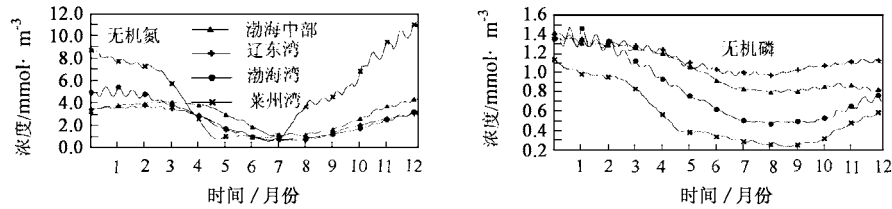


图 1 渤海 N、P 年循环

Fig.1 The annual cycles of nutrients in different areas of Bohai Sea

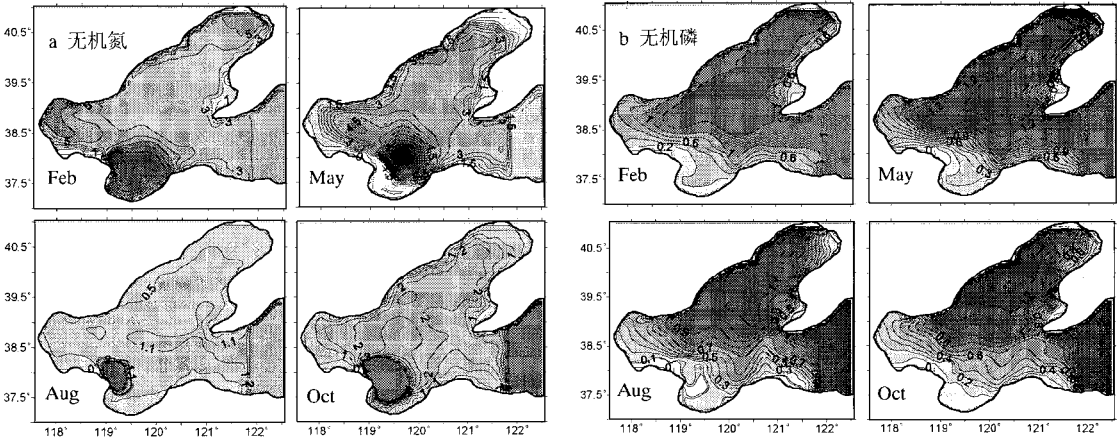


图 2 模拟营养盐水平分布 ($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-3}$)

Fig.2 Simulated horizontal distributions of nutrients at surface layer ($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-3}$)

辽东湾北岸和秦皇岛外海 P 浓度比较高.莱州湾东部比较低,仅为 $1\text{ mmol}\cdot\text{m}^{-3}$ 左右.中央海区 $1.2\sim 1.4\text{ mmol}\cdot\text{m}^{-3}$.与浮游植物生长相对应,5月沿岸磷浓度下降很快,中部变化平缓,降低很少,在整个渤海中是最高的.莱州湾的磷浓度最低.8月营养盐浓度继续下降,此时辽东湾 P 浓度是最高的,莱州湾最低.到10月营养盐开始回升,但回升幅度不大.与1982~1983年观测资料^[10]所做分布比较,无机 N 模拟结果比较好,无机磷8月、10月值偏低.除了因为磷的再生比较弱,另一个原因就是没有考虑陆地面源的影响.

由于渤海平均水深浅,垂直混合比较好,营

养盐垂向分布,除了8月份层化较强时,存在底层值大于表层的情况,其余季节垂向分布基本均匀.

2.3 渤海营养盐收支

由于本研究只考虑了黄河的营养盐输入,没有其他源的资料(如大气、其他点源、面源等),无法使模拟的年循环和水平分布与观测完全相符,但可在现有条件下,尝试分析 N、P 营养盐的收支情况.通过积分公式(1)右端各项可得出各个过程对渤海营养盐收支的贡献(表2).

由表2可看出,浮游植物光合作用吸收和通过呼吸作用释放是营养盐最大的源和汇.光合作用每年消耗 $\text{P } 152 \times 10^3\text{ t}$ 和 $\text{N } 831.1$

表 2 物理过程和生物过程对渤海营养盐收支的贡献 $\times 10^3 / t \cdot a^{-1}$

Table 2 Contribution of physical and biochemical processes to the budgets of nutrients in different regions of the Bohai Sea		光合作用 用吸收	吸收作 用释放	浮游动 物排泄	水体 矿化	水底 矿化	河流 输入	对流 输运
无机氮	辽东湾	- 233 .1	151 .6	16 .4	14 .4	55 .8		- 6 .9
	渤海湾	- 68 .9	42 .8	5 .76	4 .6	18 .2		- 5 .5
	莱州湾	- 200 .4	117 .5	18 .3	13 .5	48 .9	26 .8	- 7 .1
	中央海区	- 328 .7	204 .7	28 .3	20 .4	76 .5	32 .0	- 13 .7
	渤海	831 .1	516 .6	68 .8	52 .9	199 .4	52 .7	- 13 .7
无机磷	辽东湾	- 42 .6	27 .7	3 .0	2 .6	10 .2		- 5 .0
	渤海湾	- 12 .6	7 .8	1 .1	0 .84	3 .3		- 2 .9
	莱州湾	- 36 .6	21 .4	3 .3	2 .5	8 .9	0 .25	- 2 .4
	中央海区	- 60 .1	37 .4	5 .2	3 .7	14 .0	0 .30	- 4 .9
	渤海	152 .0	94 .5	12 .6	9 .7	36 .5	0 .55	- 4 .9

$\times 10^3 t$,同时呼吸作用又可以补充 $P\ 94.5 \times 10^3 t$ 和 $N\ 516.6 \times 10^3 t$.呼吸作用对于营养盐的再生有着重要作用,可以补偿光合作用消耗的营养盐的 62 %.水底的矿化输入是营养盐的另外一个重要来源,可以补偿浮游植物生产过程消耗的营养盐的 30 %.浮游动物排泄和水体再生占 N 的总输入的 17.6 %,P 的 14.5 %.河流 1 年输入 $N\ 52.7 \times 10^3 t$ 和 $P\ 0.55 \times 10^3 t$,仅占营养盐输入总量的 6 %和 0.4 %.河流输入的绝对量不大,但是对于营养盐的长期收支有着重要的作用,因为河流是一个源源不断的输入源.经过一年的循环,净营养盐收支 P 减少了 $3.05 \times 10^3 t$, N 则增加了 $31.6 \times 10^3 t$.

3 结论

营养盐是浮游植物生长的基础,无机氮和活性磷酸盐都经历了春夏的减少和秋冬的补充.春季由于水华的发生,营养盐被大量消耗,随着河流的输入和秋季层化的消失,秋季营养盐水平逐步回升.4~9 月为营养盐消耗期,10 月到来年 3 月为营养盐补充期.

营养盐水平分布的季节变化特点是渤海中部比较平稳,而其他 3 个湾变化波动大,尤其是莱州湾冬季最高,春秋水华时则最低.磷酸盐冬季最高值位于渤海湾,辽东湾西北部全年都维持了比较高的浓度;无机氮的高值区始终位于莱州湾黄河口附近,莱州湾氮的水平分布受黄河影响最大.

浮游植物吸收和通过呼吸作用释放是营养盐的最大的源和汇,水体矿化是营养盐的另外

一个重要的源.河流的输入对于营养盐的长期变化,尤其是无机氮的变化有着重要的作用.渤海净营养盐收支为 P 减少而 N 增加,从长远看,渤海 N 含量越来越高,P 则越来越低.几年来渤海的营养盐状况变化也说明了这点.

模型只是包括黄河的输入,没有考虑其他的点源和面源对营养盐的输入,对于营养盐的输入过程应该进一步细化.边界过程需要进一步研究.

参考文献:

1 崔毅,宋云利.渤海海域营养现状研究.海洋水产研究,1996,17(1):57~62.

2 吕瑞华,夏滨,李宝华,费尊乐.渤海水域初级生产力 10 年间的变化.黄渤海海洋,1999,17(3):80~86.

3 Brockmann U H, Laane R W P M, Postma H. Cycling of nutrients in the North Sea. Neth. J. Sea Res., 1990, 26: 239~264.

4 Chen C T A, Wang S L. Carbon and nutrient budget on the East China Sea continental shelf. In: Biological process in the north pacific. Shizuo Tsunogai (ed.). Tokyo: Japan marine science foundation, 1997, 169~186.

5 Kuehn W, Radach G A. One-dimensional physical-biological model study of the pelagic nitrogen cycling during the spring bloom in the northern North Sea (FLEX '76). J. Mar. Res., 1997, 55(4):687~734.

6 Radach G, Lenhart H. Nutrient dynamics in the North Sea: fluxes and budgets in the water column derived from ERSEM. Neth. J. Sea Res., 1995, 33(3/4):301~335.

7 Backhaus J O. A three-dimensional model for the simulation of shelf sea dynamics. Deutsche Hydrographische Zeitschrift, 1985, 38:165~178.

8 Moll A. Regional distribution of primary production in the North Sea. Journal of marine system, 1998, 16:151~170.

9 唐启升,孟田湘.渤海生态环境和生物资源分布图集.青岛:青岛出版社,1997.242.

10 林庆礼,宋云力,杨琴芳.渤海增值水化学环境.海洋水产研究,1991,12:11~30.

11 Zhang J, Huang W, Liu M. Geochemistry of major Chinese riverestuary systems. In: Oceanology of China Sea. Zhou D, Liang Y, Tseng C (ed.). Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1994.179~188.