

河口海岸带地区营养盐收支及模型研究

Budget of nutrients and model in estuaries and coastal zone

柴超¹, 俞志明², 葛蔚³

(1. 青岛农业大学 资源与环境学院, 山东 青岛 266109; 2. 中国科学院 海洋研究所 海洋生态与环境科学重点实验室, 山东 青岛 266071; 3. 青岛农业大学 生命科学学院, 山东 青岛 266109)

中图分类号: X55

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2008)01-0065-05

据统计,现代海岸带虽然只占世界海洋表面的15%,水体积的0.5%,但目前世界上大约50%~60%的人口集中在距离海岸60 km的狭长地带^[1]。随着人口增长、工农业和市政建设的发展,近几十年间河口及近岸地区的营养盐浓度不断增加,全球范围内氮、磷向海岸带的输送量分别增加2.5和2倍^[2]。营养盐含量的增加及营养盐比例(如N:P、Si:N和Si:P)^[3,4]的变化,引起河口海岸带地区的富营养化加剧,导致浮游植物群落结构的变化并且伴随着有害藻华的出现和持续。为更好地了解并控制河口海岸带地区的富营养化过程,研究营养盐的收支是极为必要的。为描述河口海岸带这一复杂的生态系统的变化规律,关于营养盐的生物地球化学研究已从过去以定性研究为主逐渐向以定量研究为主的方向发展,特别是对氮、磷等营养盐的收支与循环,除了现场调查和模拟实验之外,模型被认为是研究生态系统的另一种有效的方法^[5]。目前模型研究已成为海洋科学的研究前沿和国际间区域合作和全球性研究的热门课题。作者全面分析了影响河口海岸带地区营养盐收支的物理、生物和化学过程,并介绍了LOICZ营养盐箱式收支模型和物理化学生物耦合模型的研究方法。

1 影响营养盐收支的物理过程

1.1 大气沉降

大气中的无机盐可以通过干、湿沉降的方式输入海洋,是营养盐的来源之一^[6]。干沉降是指颗粒物物质和气体,湿沉降主要指雨、雪、冰雹等降水过程。干、湿沉降中含有多种形态的有机、无机氮化合物,如NO₃⁻、NO₂⁻、NH₄⁺、氨基酸、尿素等。对Neuse河口全年氮收支的研究表明,大气湿沉降中的氮化合物占全部外部输入的50%,说明大气沉降氮是该河口氮营养盐的一个重要来源^[7]。对美国东部河口海

岸带的研究也表明,湿沉降氮是该区域新氮的重要来源,促进近岸的生产力并加速对氮较敏感的近岸生态系统的富营养化^[8,9]。对中国长江口海区的研究表明,直接降至河口水域的降水所输入营养盐的年通量较小^[10],营养盐主要是通过流域降水后随河流进入河口^[11]。这与德国湾的分析结果相似,德国湾大气沉降的氮营养盐仅占30%左右,而河流输入则占70%^[12]。大气沉降所占营养盐输入通量的比例不同,可能与沿岸化肥使用状况等多种因素有关。

1.2 水平输送

在河口及近岸地区,河流输入、沿岸污水排放(包括直排口、混排口和排污河)占营养盐输入的绝大部分。在Narragasset湾,大约99.5%的氮和99.7%的磷来自于河流输入及污水排放;在Arcachon湾,河流输入的溶解无机氮(DIN)占全年输入量的90%以上^[13]。对中国珠江口的研究也发现,磷和氮营养盐主要来自于河口4条河流的输入^[14],表明河流输入是河口营养盐的重要来源。

此外,地下水也是营养盐的一个来源,但相对于河流输入,所占比例较小,如Arcachon湾,地下水输入的DIN仅占1%^[13]。

进入到河口海岸带的营养盐中的一部分被利用,发生转化,还有相当一部分营养盐被输送到邻近海域,例如,在英国Humber河口区,河流输入的71%的DIN被输出到北海^[15];波兰的Oder河口,有80%左右的总氮、总磷被输出到北海^[16]。

收稿日期:2007-05-20;修回日期:2007-11-10

基金项目:国家自然科学基金重点项目(50339040);中国科学院知识创新项目(KZCX3-SW-232);青岛农业大学高层次人才启动基金项目(630642)

作者简介:柴超(1974-),女,黑龙江哈尔滨人,博士,主要从事环境科学研究,E-mail:chaichao1999@126.com

2 影响营养盐收支的生物过程

2.1 生物吸收

浮游植物通过光合作用把海水中的无机离子转化为初级生产力,形成海洋生态系统中食物链和能量流的基础。在英国 Humber 河口,浮游植物是 DIN 最大的汇,占 DIN 被生物利用量的 80%^[15]。关于浮游植物对营养盐吸收的研究,Dugdale 等^[17,18]首先利用米氏方程来描述浮游植物对氮营养盐的吸收,随着对细胞生长研究的深入,研究者认为浮游植物对营养盐的吸收,除了与周围环境的营养盐浓度有关外,还与植物细胞内的营养盐含量有关^[15,19]。此外,光照、温度和微量元素对浮游植物吸收营养盐也有很大影响。

2.2 营养盐的再生

营养盐再生过程主要包括:浮游植物的呼吸释放和胞外溶出、浮游动物的溶出和排泄以及有机碎屑的分解。浮游植物溶出产物包括氨氮、蛋白质及少量的亚硝酸盐等^[20];浮游动物溶出和排泄的主要产物是氨氮,还包括脲、氨基酸等^[21,22];有机碎屑来源于生物的排泄物和死亡后的组织和个体等,它们可以被细菌分解成氨等溶解态营养盐,这些过程产生的氮可以被浮游植物再次利用,构成再生生产力。研究者发现浮游植物呼吸释放对营养盐的再生起着重要作用,可以补偿光合作用消耗的营养盐的 62%,是营养盐收支中最大的源^[23,24]。Wollast^[25]的研究发现,在河口和沿岸区域,大约 30%的净初级生产力被浮游植物溶出,可见该过程也是不容忽视的。

3 营养盐不同化学形态之间的转化对收支的影响

由于氮元素的价态较多,在海洋中的形态也较多,除了常见的 NO_3^- 、 NO_2^- 、 NH_4^+ 之外,还存在着气态的 N_2 、 N_2O 和 NH_3 及有机态的脲、氨基酸等形态,而且不同形态氮化合物之间可以发生相互转化。

固氮作用是海洋中气态氮在细菌和蓝绿藻的作用下转化成有机氮,被生物利用的过程,是新氮的来源之一,也是氮形态发生转化的一个主要过程。海洋中每年固氮通量大约有 20 Tg,但在某些河口,氮的固定通量很小,可以忽略^[26]。

反硝化过程是硝酸盐还原成亚硝酸盐,然后转化成氧化氮和氧化亚氮,最后转化成氮气离开水体的过程。对北大西洋沿岸区域的研究表明,通过反硝化过程作用去除氮的通量比河流和大气提供的总通量还要多^[27]。但在其他区域,反硝化过程作用去

除的氮在输入总氮量中的比例有所不同,从 7.5% 变化到 50%,这可能由于水体在不同河口的滞留时间不同等多种原因而造成的^[27,28]。

硝化作用是在细菌的作用下,氨首先氧化成亚硝酸盐,进一步氧化成硝酸盐的过程。硝酸盐的氨化作用是硝酸盐还原成氨氮的过程。硝化作用和氨化作用虽然是氮营养盐不同形态之间的转化,但仍然是生物可以利用的无机营养盐形态,因此关于它们对营养盐收支的贡献的研究相对较少。任玲^[29]在胶州湾的研究中发现硝化过程转化的硝酸盐比河流输入的年通量高,表明在研究不同形态的氮营养盐的收支时,需注意硝化与氨化作用的影响。

4 吸附过程对营养盐收支的影响

氮、磷营养盐可以被吸附而离开水体^[30],其中关于磷酸盐的吸附研究较多。磷酸盐容易被铁和铝的氧化物或氢氧化物、悬浮颗粒物、有机质、底层沉积物所吸附,并可以与一些金属离子形成难溶的化合物而脱离水体^[31]。此外,河流中的颗粒物上吸附着大量磷酸盐,当进入河口与盐水混合时,磷酸盐可以从颗粒物上解吸,从而满足生产力需求^[32]。磷酸盐的吸附和解吸与盐度、pH、离子强度等多种因素有关^[32,33]。由于吸附和解吸等过程,使得关于磷营养盐收支的研究较为复杂。然而,也有研究表明:尽管整个 Szczecin 泻湖的盐度和 pH 分布不同,使得磷酸盐的去除在空间上也存在着很大差异,但这种去除过程对泻湖磷的输出量不存在影响。

5 沉积物与水界面交换对营养盐收支的影响

沉积物中有机物的分解使营养盐得以再生,并释出于间隙水中,因此沉积物中发生的过程对营养盐的收支起着重要作用^[34,35]。研究发现 Chesapeake 湾沉积物释放氮的年平均速率是该湾其他两个主要氮源(市政污水和河流输入)输入速率的 5~10 倍。从沉积物释放的营养盐可以在外部输入的营养盐减少时,满足生产力需求,在 Chesapeake 湾,沉积物中再生的氮可提供浮游植物需求氮的 27%~54%^[16]。对中国黄渤海无机氮的收支研究表明,海底输入通量所占比例比大气沉降通量与陆源输入通量之和还多^[36]。

发生在沉积物-水界面之间的过程还包括浮游植物和碎屑的沉积过程,该过程使得部分营养盐永久地脱离水体。Howarth 等^[37]研究了河流输入的磷酸盐进入河口后转化成沉积相的比例,发现比例变化较大,从 10% 到 <100%,并且随着河口富营养化

程度的增加,沉积物中磷积累的比例有所下降,说明不同环境下沉积过程对营养盐收支的贡献有所不同。

6 营养盐收支的模型研究

关于营养盐的收支,可以从观测数据出发分析研究^[38,39],也可以利用模型研究^[40]。由于模型中不仅包含了各种通量,而且考虑了物理、化学、生物过程的相互作用和时空变化,因此可以更加全面地研究营养盐的收支,并讨论各过程对营养盐收支的贡献。

6.1 营养盐箱式收支模型

营养盐箱式收支模型是海岸带陆海相互作用计划(LOICZ)研究河口与近岸碳、氮、磷通量的一种方法,它与过程模型、系统模型和预测模型等数学模型组合在一起构成 LOICZ 执行计划中一个由简单到复杂,不断细化的综合整体。

该收支模型是在一定的时空范围内,水、盐和生源要素的质量平衡计算模式,描述了物质的输入和输出,以及系统内部物质的总交换率(图 1)^[41],

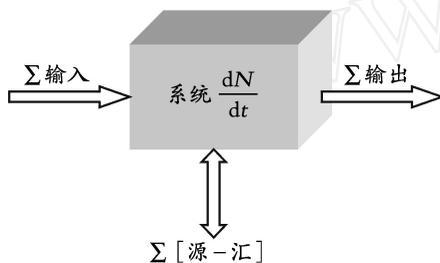


图 1 系统物质收支平衡模型

所以,对于系统中的某一物质: $\frac{dN}{dt} = \text{输入} -$

输出 + [源 - 汇]。式中, N 为水、盐和生源要素的质量或物质的量; t 为时间。

该模型的原理是以水和盐这两类保守物质作为基础,计算营养盐的收支^[42]。对于水和盐,系统内部没有它们的源和汇,且假定河口系统处于稳态,所以 $0 = \text{输入} - \text{输出}$ 。

但对于营养盐,由于在系统内部发生生物、化学等转变,存在着内部的源和汇,因此 $N = [\text{源} - \text{汇}]$ 。同样假定系统为稳态,可得 $N = \text{输出} - \text{输入}$,利用水和盐的各输入、输出项,可求出 N 。如果 $N > 0$,表明河口系统对该物质起源的作用;反之,表明该系统对该物质起汇的作用。

该模式在时空上的简化给营养盐的收支计算带来了一定的误差^[43],此外,该模式并不能具体说明系统内的源和汇究竟来源于哪些过程,不能说明物理、

化学、生物各过程对营养盐收支的贡献。尽管如此,该模型可以使全球不同区域的营养盐收支具有可比性,因此应用较为广泛^[44,45]。沈焕庭等^[1]利用该模型对中国长江口的 DIN、DIP 进行了计算,认为整个长江口对于 DIN 和 DIP 来说,无论是枯季还是洪季,总体上表现出“源”的作用。

6.2 物理化学生物耦合模型

若要详细研究系统内部营养盐的“源”和“汇”,必须分析物理、化学、生物各过程对营养盐收支的影响,这不但与营养盐的输入、输出有关,还与系统内部营养盐的循环和转变有关,因此物理化学生物耦合的生态动力学模型可以更好地说明各过程对营养盐收支的贡献,及系统内部的“源”和“汇”。

物理过程与生物地球化学过程导致系统中营养盐浓度的变化率可用下式表示:

$$\frac{dC}{dt} = -U \frac{dC}{dt} - V \frac{dC}{dt} - W \frac{dC}{dt} + K_x \frac{dC}{d^2 x} + K_y \frac{dC}{d^2 y} + K_z \frac{dC}{d^2 z} + S$$

式中, C 为营养盐的浓度; t 为时间; x, y, z 为坐标轴; U, V, W 分别为对应于 x, y, z 轴的余速; K_x, K_y, K_z 为 x, y, z 轴的水平垂直扩散系数; S 代表了生物地球化学过程导致系统中营养盐浓度增加或减少,即系统的“源”和“汇”,其余各项代表水动力平流扩散运输的物理模式。

与物理过程相比,海洋中的生物地球化学过程更为复杂。物理海洋模型虽然还无法精确地描述海水湍流混合过程,但控制海水运动和温度变化的方程却可以适用于任何海区,而控制生态系统的生物地球化学过程在不同海区存在明显的差异。欲了解营养盐的收支,正确的方法是首先模拟物理环境场,在物理模型较完善的基础上,从动力学角度过滤各生物、化学过程,找出控制该生态系统的关键过程,建立一个尽可能简单、又能充分描述系统营养盐“源”和“汇”的物理化学生物耦合模型,探讨各过程对营养盐收支的贡献。

海洋生态系统数值模型在国外已有 40 多年的历史。20 世纪 80 年代以来,围绕着大西洋北海,建立了很多生源要素流动与循环的概念模型^[45]。然而除了 ERSEM 模型和 ECOHAM 模型外^[46],很少有人用三维生态模型来计算北海营养盐的收支。中国利用三维生态模型研究营养盐的收支还处于初级阶段,赵亮等^[23]建立了一个基于氮磷循环与物理模型(HAMSOM)耦合的三维生态动力学模型,估算了渤海营养盐的收支与季节变化。

7 总结

由于河口海岸带是陆地、海洋和大气相互作用的区域,导致该生态系统相对复杂。人口的增长、工农业的快速发展使得河口海岸带的富营养化日趋严重,有害藻华频发。了解营养盐的生物地球化学行为,认识生物、化学与物理过程对河口海岸带营养盐收支的贡献,对于环境治理有重要意义。随着对物理海洋学、生物学、化学过程的了解与深入,利用物理化学生物耦合模型来研究营养盐的收支必将成为重要的手段,从而为控制河口海岸带的富营养化打下理论基础。

参考文献:

- [1] 沈焕庭. 长江河口物质通量[M]. 北京: 海洋出版社, 2001.
- [2] Meybeck M. The IGBP water group: a response to a growing global concern[J]. **Global Change Newsletters**, 1998, 36: 8-12.
- [3] Justic D, Rabalais N N, Turner R E, *et al.* Change in nutrient structure of river-dominated coastal water: stoichiometric nutrient balance and its consequences[J]. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, 1995, 40: 339-356.
- [4] Shen Z L. Historical change in nutrient structure and its influence on phytoplankton composition in Jiaozhou Bay[J]. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, 2001, 52: 211-224.
- [5] 任玲, 杨军. 海洋中氮营养盐循环及其模型研究[J]. 地球科学进展, 2000, 15(1): 58-64.
- [6] Liu S M, Zhang J, Chen S Z, *et al.* Inventory of nutrient compounds in the Yellow Sea[J]. **Continental Shelf Research**, 2003, 23: 1 161-1 174.
- [7] Whitall D, Hendrickson B, Paerl H. Importance of atmospherically deposited nitrogen to the annual nitrogen budget of the Neuse River estuary, North Carolina[J]. **Environment International**, 2003, 29:393-399.
- [8] Paerl H W. Enhancement of marine primary production by nitrogen-enriched acid rain[J]. **Nature**, 1985, 316: 747-749.
- [9] Paerl H W. Coastal eutrophication in relation to atmospheric nitrogen deposition: current perspectives[J]. **Ophelia**, 1995, 41: 237-259.
- [10] 张国森, 陈洪涛, 张经, 等. 长江口地区大气湿沉降中营养盐的初步研究[J]. 应用生态学报, 2003, 14(7): 1 107-1 111.
- [11] 沈志良, 刘群, 张淑美, 等. 长江和长江口高含量无机氮的主要控制因素[J]. 海洋与湖沼, 2001, 32(5): 465-473.
- [12] Beddig S, Brockmann U H, Dannecker W. Nitrogen fluxes in the German Bight[J]. **Marine Pollution Bulletin**, 1997, 34(6): 382-394.
- [13] Rimmelin P, Dumon J C, Maneux E, *et al.* Study of annual and seasonal dissolved inorganic nitrogen inputs into the Arcachon Lagoon, Atlantic Coast (France) [J]. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, 1998, 47: 649-659.
- [14] Huang X P, Huang L M, Yue W Z. The characteristics of nutrients and eutrophication in the Pearl River estuary, South China[J]. **Marine Pollution Bulletin**, 2003, 47: 30-36.
- [15] Allen J I. A modelling study of ecosystem dynamics and nutrient cycling in the Humber plume, U K[J]. **Journal of Sea Research**, 1997, 38: 333-359.
- [16] Grelowski A, Pastuszek M, Sitek S, *et al.* Budget calculations of nitrogen, phosphorus and BOD₅ passing through the Oder estuary[J]. **Journal of Marine Systems**, 2000, 25: 221-237.
- [17] Dugdale R C, Gøring J J. Uptake of new and regenerated forms of nitrogen in primary productivity[J]. **Limnology and Oceanography**, 1967, 12: 196-206.
- [18] Eppley R W, Coatsworth J L. Nitrate and nitrite uptake by *Ditylum brightwellii* Kinetics and mechanisms [J]. **Journal of Phycology**, 1968, 4: 151-156.
- [19] Droop M R. 25 years of algal growth kinetics, a personal review[J]. **Botanic Marine**, 1983, : 99-112.
- [20] Meffert M E, Zimmermann T H. Net release of nitrogenous compounds by axenic and bacteria containing cultures of *Oscillatoria redekei* (Cyanophyta) [J]. **Archiv Fur Hydrobiologie**, 1979, 87(2): 125-138.
- [21] Schaus M H, Vanni M J, Wissing T E. Nitrogen and phosphorus excretion by detritivorous gizzard shad in a reservoir system [J]. **Limnology and Oceanography**, 1997, 42(6): 1 386-1 397.
- [22] Vidal M, Morgui J A, Latasa M, *et al.* Factors controlling seasonal variability of benthic ammonium release and oxygen uptake in Alfacs Bay Elbro Delta, NW. Mediterranean [J]. **Hydrobiologia**, 1997, 350: 169-178.
- [23] 赵亮, 魏皓, 冯士笈. 渤海氮磷营养盐的循环和收支 [J]. 环境科学, 2002, 1: 78-81.
- [24] Wei H, Sun J, Moll A, *et al.* Phytoplankton dynamics in the Bohai Sea —observations and modelling[J]. **Journal of Marine System**, 2004, 44(3/4): 233-251.
- [25] Wollast R. Behaviour of organic carbon, nitrogen and phosphorous in the Scheldt estuary[J]. **Thalassia Jugoslavica**, 1982, 18:11-34.
- [26] Neumann T. Towards a 3D-ecosystem model of the Baltic Sea[J]. **Journal of Marine Systems**, 2000, 25: 405-419.

- [27] Nixon S W, Ammerman J W, Atkinson L P, *et al.* The fate of nitrogen and phosphorus at the land sea margin of the North Atlantic Ocean[J]. **Biogeochemistry**, 1996, 35: 141-180.
- [28] Law C S, Owens N J P. Denitrification and nitrous oxide in the North Sea[J]. **Netherlands Journal of Sea Research**, 1990, 25(1/2): 65-74.
- [29] 任玲. 胶州湾生态系统中浮游体系氮循环模型的研究[D]. 青岛海洋大学博士学位论文, 1999.
- [30] Wattakorn G, Prapong P, Noichareon D. Biogeochemical budgets and processes in Bandon Bay[J]. **Journal of Sea Research**, 2001, 46: 133-142.
- [31] Eyre B. Nutrient biogeochemistry in the tropical Morresby River Estuary system North Queensland, Australia[J]. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, 1994, 39: 15-31.
- [32] Froelich P N. Kinetic control of dissolved phosphate in natural rivers and estuaries: a primer on the phosphate buffer mechanism[J]. **Limnology and Oceanography**, 1988, 33(4): 649-668.
- [33] Lebo M E, Sharp J H. Modelling phosphorus cycling in a well-mixed coastal plain estuary[J]. **Estuarine, Coastal Shelf and Science**, 1992, 35: 235-252.
- [34] Cowan J L W, Boynton W R. Sediment water oxygen and nutrient exchanges along longitudinal axis of Chesapeake Bay: seasonal patterns controlling factors and ecological significance[J]. **Estuaries**, 1996, 19(3): 562-580.
- [35] Conley D J, Stockenberg A, Carman R, *et al.* Sediment-water nutrient fluxes in the Gulf of Finland, Baltic Sea[J]. **Estuarine, Coastal Shelf and Science**, 1997, 45: 591-598.
- [36] 王保栋, 单宝田, 战闰, 等. 黄、渤海无机氮的收支模式初探[J]. **海洋科学**, 2002, 26(2): 33-36.
- [37] Howarth R W, Billen G, Swaney D, *et al.* Regional nitrogen budgets and riverine N and P fluxes for the drainages to the North Atlantic Ocean: natural and human influence[J]. **Biogeochemistry**, 1996, 35: 75-139.
- [38] Brockmann U H, Laane R W, Postma H. Cycling of nutrients in the North Sea[J]. **Netherlands Journal of Sea Research**, 1990, 26: 239-264.
- [39] Yurkovskis A, Wulff F, Rahm L, *et al.* A nutrient budget of the Gulf of Riga, Baltic Sea[J]. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, 1993, 37: 113-127.
- [40] Radach G, Lenhart H. Nutrient dynamics in the North Sea: fluxes and budgets in the water column derived from ERSEM[J]. **Netherlands Journal of Sea Research**, 1995, 33(3/4): 301-335.
- [41] Gordon Jr D C, Boudreau P R, Mann K H, *et al.* LOICZ biogeochemistry modelling guidelines [A]. LOICZ Reports & Studies No. 5, LOICZ [C]. Texel: The Netherlands, 1996. 1-96.
- [42] Talaue-McManusa L, Smith S V, Buddemeier R W. Biophysical and socio-economic assessments of the coastal zone: the LOICZ approach[J]. **Ocean & Coastal Management**, 2003, 46: 323-333.
- [43] Webster I T, Parslow J S, Smith S V. Implications of spatial and temporal variation for biogeochemistry budgets of estuaries[J]. **Estuaries**, 2000, 23(3): 341-350.
- [44] Durrieu de M X, Denis L, Diaz F, *et al.* Nutrients and carbon budgets for the Gulf of Lion during the Moogli cruises[J]. **Oceanologica Acta**, 2003, 26: 421-433.
- [45] Joiris C. A budget of carbon cycling in the Belgian coastal zone: relative roles of zooplankton, bacterioplankton and benthos in the utilization of primary production [J]. **Netherlands Journal of Sea Research**, 1982, 16: 260-275.
- [46] Moll A. Phosphorus budget of the North Sea from the three-dimensional Model ECOHAM1[J]. **LOICZ Reports**, 1997, 29: 126-127.

(本文编辑:张培新)