

# 胶州湾营养盐结构变化的研究\*

张均顺 沈志良

(中国科学院海洋研究所, 青岛 266071)

**提要** 于1985年8月—1986年12月和1991年5月—1993年11月通过对胶州湾表层海水营养盐的调查, 根据 Justic 等(1995)建立的浮游植物生长的化学计量及可能营养盐限制因素标准, 并结合海洋硅藻正常所需的 Si、N、P 之间的原子比, 用数学统计的方法研究了胶州湾表层海水营养盐结构。结果表明, 含有丰富溶解无机氮和磷的胶州湾, Si:P 的值有了显著的下降, 同时 Si:DIN 和 DIN:P 的值也表现出下降的趋势, 使胶州湾水域营养盐结构发生了明显的变化。胶州湾由于受人类活动的影响, 近年来浮游植物生长受溶解无机硅制约的可能性显著增大。

**关键词** 胶州湾 营养盐 富营养化

关于胶州湾营养盐的动态变化及营养盐与湾内浮游植物总量之间的相关性的研究已有不少文献(沈志良, 1994; 董金海等, 1995; 顾宏堪, 1991)。基于以上研究工作, 本文利用数学统计的方法对胶州湾 1985—1986 年和 1991—1993 年两段时间内营养盐结构的变化进行了全面的分析和总结, 以便能为建立胶州湾营养盐结构变化对浮游植物生态体系影响的模式打下一定的基础。

## 1 研究海区概况及采样分析方法

### 1.1 研究海区概况

胶州湾位于北纬  $35^{\circ}55'$ — $36^{\circ}18'$ , 东经  $120^{\circ}04'$ — $120^{\circ}23'$  之间, 面积为  $390\text{km}^2$ , 平均水深为 7m, 是一个半封闭型海湾, 周边为青岛市区, 工农业生产、水产养殖及城市生活污水的排放每年向湾内输入大量的营养物质。

### 1.2 采样和分析方法

1985年8月—1986年12月对胶州湾内12个站位的表层海水进行16个航次现场采样; 1991年5月—1993年11月对胶州湾内9个站位的表层海水进行11个航次现场采样。水样用不锈钢颠倒采水器采集, 加0.3%氯仿保存于聚乙烯瓶内, 于 $-25^{\circ}\text{C}$ 冰箱内速冻, 在实验室解冻后取上层清液测定。硝酸盐( $\text{NO}_3^- - \text{N}$ )用镉铜还原法和 BSPB 法(刁焕祥等, 1985), 亚硝酸盐( $\text{NO}_2^- - \text{N}$ )用重氮偶氮法, 铵氮( $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ )用次溴酸钠氧化法, 磷酸盐( $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ )用磷钼蓝法, 硅酸盐( $\text{SiO}_3^{2-} - \text{Si}$ )用硅钼蓝法。全部营养盐要素均用营养盐自动分析仪(Technicon AA-II型)测定。

\* 中国科学院重大项目资助, KY85-08号。张均顺, 男, 出生于1963年4月, 助理研究员。

收稿日期: 1996年5月3日, 接受日期: 1997年1月20日。

## 2 化学计量及实际可能的营养盐限制标准

化学计量的营养盐限制标准是根据硅藻对营养盐的需求而制定的。当营养盐总水平足够浮游植物生长时,海洋硅藻的 Si:N:P 的原子比为 16:16:1。Hecky 等(1988)和 Dortch 等(1992)根据吸收的营养盐各成分比率及海水可利用营养盐的溶解形态,提出浮游植物生长中可能的 Si, N, P 的限制条件。通过对营养盐的动力学吸收的研究,许多学者提出大致相同的浮游植物生长所需环境溶解营养盐的原子比(Levasseur et al., 1987; Harrison et al., 1977; Goldman et al., 1979)。在总结前人结果的基础上,Justic 等(1995)和 Dortch 等(1992)提出一个系统评估每一种营养盐化学计量限制的标准:(1)若 Si:P > 22 和 DIN:P > 22 则磷酸盐为限制因素;(2)若 DIN:P < 10 和 Si:DIN > 1 则溶解无机氮为限制因素;(3)若 Si:P < 10 和 Si:DIN < 1 则溶解无机硅为限制因素。每一种营养盐的化学计量限制因素的成立,不一定实际限制因素就成立,可能的限制因素只有通过比较环境营养盐的浓度和可能限制营养盐吸收的浓度之后才能确定。基于对营养盐吸收动力学研究, Si = 2 μmol / L, DIN = 1 μmol / L, P = 0.1 μmol / L 可作为浮游植物生长的最低阈值(Brown et al., 1979; Nelson et al., 1990)。

## 3 结果和讨论

根据化学计量及实际可能营养盐限制标准,将 1985—1986 年及 1991—1993 年胶州湾海水中溶解无机氮、溶解无机磷和溶解无机硅的数据进行统计分析,结果列于表 1。将 Si:P, Si:DIN 和 DIN:P 之间相互作用散点图(图 1,其中 a, c, e 为 1985—1986 年结果; b, d, f 为 1991—1993 年结果),从中可以看出不同时间的各种营养盐之间比值的变化。

从表 1 的计算结果可以看出,当仅考虑化学计量限制标准时,80 年代中期胶州湾浮游植物生长受控于各种单一营养盐限制因子的出现率分别为:溶解磷酸盐为 6.7%;溶解无机总氮为 3.0%;溶解无机硅为 63.4%。当考虑到各种无机营养盐的阈值时,只有 1% 的为溶解无机磷控制;受溶解无机氮控制的为 0%;而受溶解无机硅控制的为 36.6%。从这两年的数据可以看出,氮、磷的总体水平都显著高于浮游植物生长的最低需要,因此氮、磷不成为浮游植物生长的限制因素。

90 年代初期胶州湾浮游植物生长受控于单一营养盐限制因子的出现率分别为:溶解无机磷为 3.9%;溶解无机氮为 0%;溶解无机硅为 84.3%。当考虑到浮游植物生长所需各种营养盐的阈值时,受氮、磷控制的出现率均为 0%;而受溶解无机硅控制的出现率高达 69.6%。

比较以上结果很容易看出,从 80 年代中期到 90 年代初期,胶州湾海水中营养盐结构既有相似的特征又发生了显著的变化,相似性表现为胶州湾溶解无机氮和磷十分丰富,大部分表层水域溶解无机氮和磷不成为浮游植物生长的限制因素;不同之处在于胶州湾溶解无机硅总体水平的显著下降,从 80 年代中期到 90 年代初期胶州湾浮游植物生长受可溶解无机硅限制的出現率从 36.6% 迅速增长到 69.6%,几乎增长了近 1 倍,如果仅从化学计量学角度来考虑出现率也提高了 20 个百分点。

此外,从图 2 中可以看出,在 80 年代中期,各月份胶州湾水域浮游植物以溶解无机氮和溶解无机磷为限制因子的出现率很低,在 12 个航次中以溶解无机磷为限制因子的有 2 次,出现率为 8% 左右;以溶解无机氮为限制因子的有 1 次,出现率为 25% 左右。而溶解无

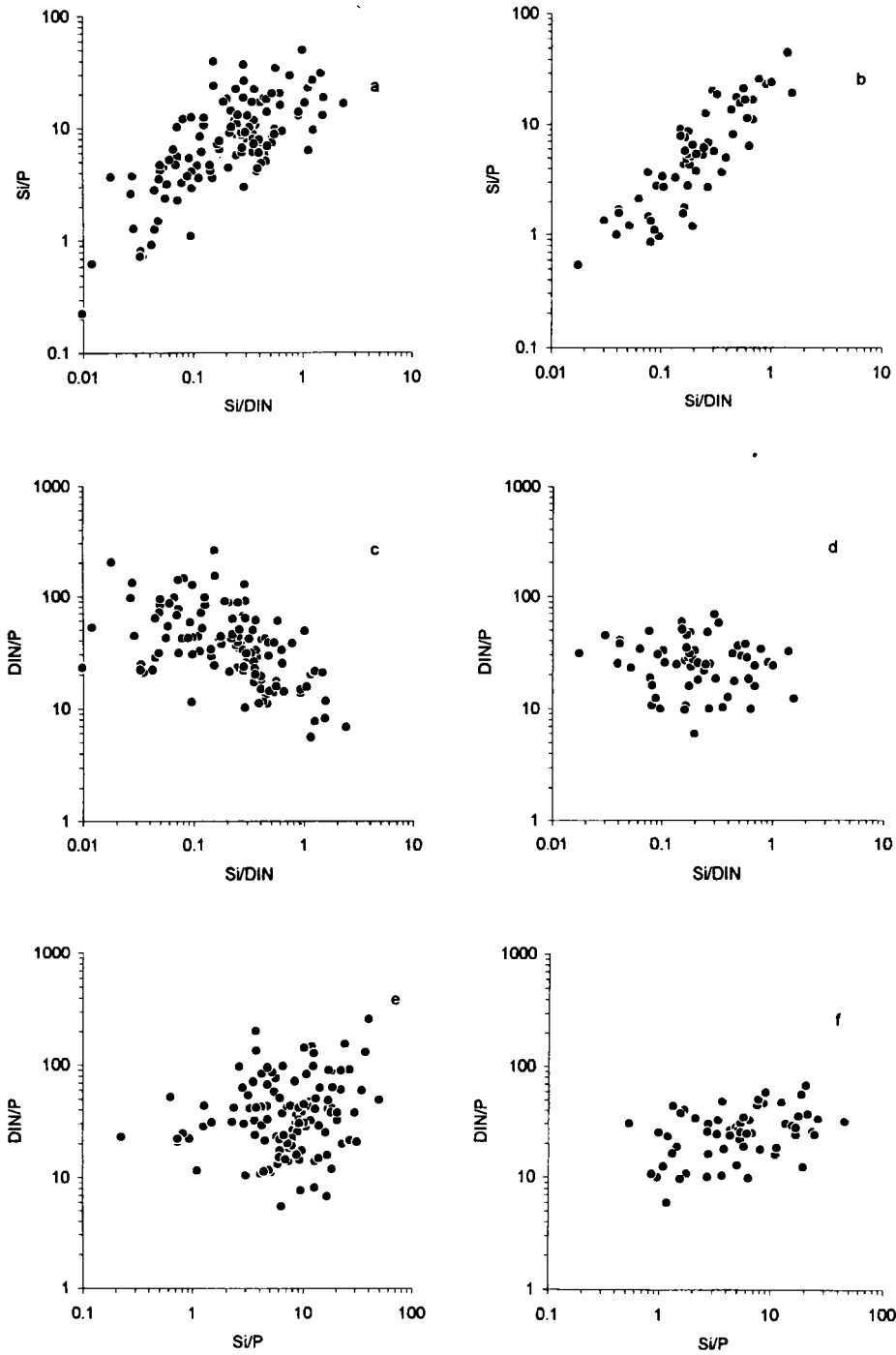


图1 胶州湾表层水域营养盐原子比散点图

Fig.1 Scatter diagrams of atomic nutrient ratios in surface waters of the Jiaozhou Bay

表1 胶州湾表层海水中溶解无机氮(DIN)、磷(P)和硅(Si)营养盐作为单一营养盐限制因子的出现率(%)

Tab.1 Historical changes in relative frequency (%) of phosphorus, nitrogen and Silicon limitation in surface waters of the Jiaozhou Bay

	1985—1986	1991—1993
P为限制因子		
DIN:P>22, Si:P>22	6.7(n=134) <sup>1)</sup>	3.9(n=102)
P<0.1μmol/L, DIN:P>22, Si:P>22	0.8(n=134)	0.0(n=102)
N为限制因子		
DIN:P<10, Si:DIN>1	3.0(n=134)	0.0(n=102)
DIN<1μmol/L, DIN:P<10, Si:DIN>1	0.0(n=134)	0.0(n=102)
Si为限制因子		
(Si:P<10, Si:DIN<1)	63.4(n=134)	84.3(n=102)
Si<2μmol/L, DIN:P<10, Si:DIN<1	36.6(n=134)	69.6(n=102)
$\chi^2=107.98$		
$\chi^2$ 检验	d. f.=5	
	P<0.001	
Si:P<10	64.9(n=134)	84.3(n=102)
10<Si:P<22	25.4(n=134)	11.8(n=102)
Si:P>22	9.7(n=134)	3.9(n=102)
DIN:P<10	3.0(n=134)	6.9(n=102)
10<DIN:P<22	23.1(n=134)	29.4(n=102)
DIN:P>22	73.9(n=134)	63.7(n=102)
Si:DIN<1	91.8(n=134)	97.0(n=102)
Si:DIN>1	8.2(n=134)	3.0(n=102)
$\chi^2=15.57$		
$\chi^2$ 检验	d. f.=7	
	0.025<P<0.05	

1) n为数据个数。

机硅为限制因子在胶州湾水域中对浮游植物生长始终起着十分重要的影响。从图3可以看到,进入90年代胶州湾水域由于营养盐结构变化,使得该水域浮游植物以溶解无机氮、磷、硅为限制因子的出现率发生了显著的变化,其中以溶解无机氮和磷为限制因子的出现率几乎为零,而溶解无机硅为限制因子的出现率明显增高。

Brzezinski (1985)分别提出硅藻生长对硅、氮、磷营养盐的需求大约为Si:N:P≈16:16:1。从图1可以看出,80年代中期和90年代初期胶州湾Si, N, P之间的原子比有相似分布规律,然而,各种营养盐之间的原子比有所升降。10 < DIN:P < 22和10 < Si:P < 22在80年代中期的出现率分别为23.1%和25.4%,而在90年代初期的出现率分别为29.4%

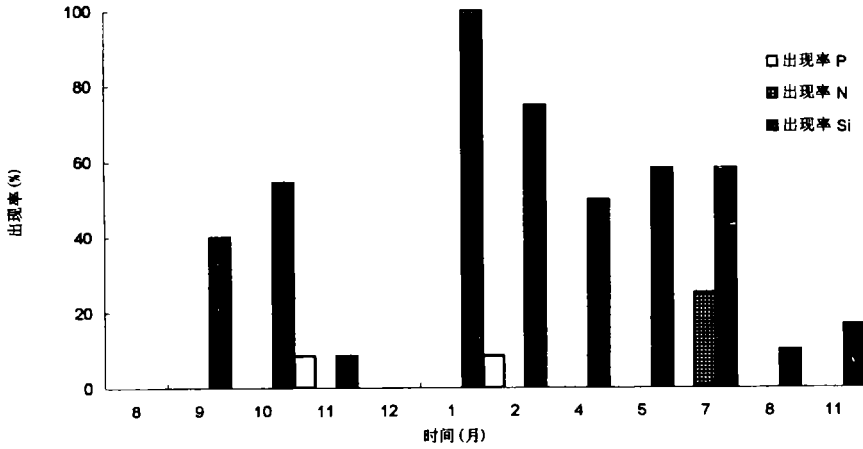


图2 1985—1986年某些月份以磷、氮、硅为限制因子的出现率

Fig.2 Changes in relative frequency of phosphorus, nitrogen and silicon limitation in some months from 1985 to 1986

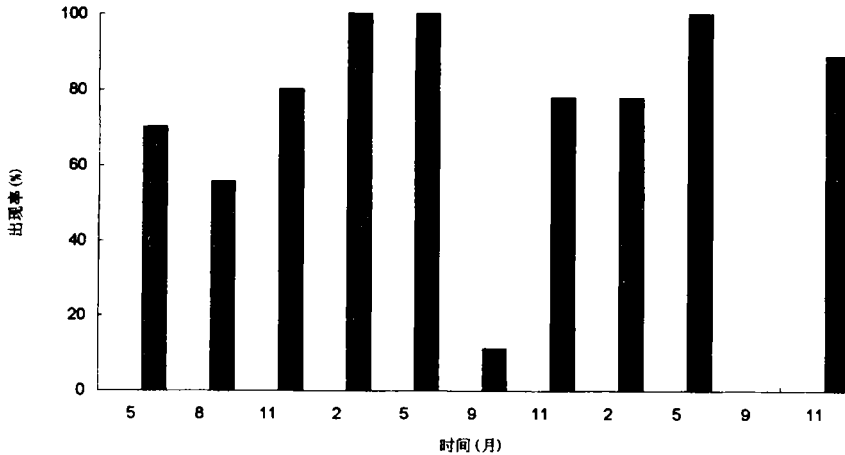


图3 1991—1993年某些月份以磷、氮、硅为限制因子的出现率

Fig.3 Changes in relative frequency of phosphorus, nitrogen and silicon limitation in some months from 1991 to 1993

和 11.8%。以上结果说明,  $10 < \text{DIN:P} < 22$  在胶州湾表层水域的出现率 90 年代比 80 年代有所上升, 而  $10 < \text{Si:P} < 22$  的出现率则发生了显著的下降。由此, 从化学计量学角度, 可以看出, 自 80 年代中期到 90 年代初期, 胶州湾表层水域溶解无机氮和溶解无机磷更能符合硅藻生长的需要; 然而溶解无机硅浓度的显著下降, 使其能与溶解无机氮平衡地满足硅藻生长的出现率迅速降低。胶州湾的总溶解无机氮和磷的浓度大大超过硅藻生长所需氮、磷的阈值, 因此, 胶州湾的总无机氮和磷能够满足硅藻生长的需要。从图 1 还可以看出另一个显著的结果, 即 80 年代中期至 90 年代初期胶州湾表层水域中  $\text{Si:DIN}$  的比值大部

分都小于 0.6, 但  $Si:DIN < 1$  的出现率 90 年代初期比 80 年代中期有显著上升, 由此得到这样一个事实,  $Si:DIN < 1$  的出现率在上升, 对于硅藻生长来说溶解无机硅相对于溶解无机氮就更加贫乏。当硅藻大量繁殖期出现时溶解无机硅大量消耗, 更加促使湾内营养盐硅、氮、磷之间的比例失调, 其结果将影响硅藻的生长, 硅藻生长的抑制又必将促进其他非硅藻藻类的生长, 使整个胶州湾水域藻类生态系统发生变化, 这样也就增加了发生富营养化的可能性。Conley 等(1992)在研究营养盐富集的切斯皮克湾(Chesapeake)时发现, 湾内水花的频频出现是由于溶解无机硅所造成的, 其结果导致湾内藻类群落发生了变化。虽说以前胶州湾没有报道发生过大面积的富营养化现象, 但周围养殖水域发生水花的现象却是很普遍的。胶州湾近年来硅、氮、磷营养盐结构发生的显著变化, 是否正在促使湾内藻类群落发生变化值得深入探讨。

#### 4 结语

4.1 不论是考虑化学计量学限制因素, 还是考虑浮游植物生长所需溶解无机氮和溶解无机磷的阈值, 80 年代中期和 90 年代初期, 胶州湾表层海水溶解无机氮和溶解无机磷作为浮游植物限制因子的出现率都很小或接近于零。

4.2 当考虑溶解无机硅的阈值时, 化学计量值的结果表明, 80 年代中期以溶解无机硅为限制因子的出现率为 36.6%, 而 90 年代初期为 69.6%。由此作者认为胶州湾表层水域浮游植物生长受控于溶解无机硅的出现率在迅速增长。

4.3 胶州湾营养盐结构的变异, 必将导致胶州湾浮游植物生态系统发生重大变化。笔者认为有必要开展胶州湾营养盐结构与藻类结构之间关系的研究, 建立营养盐结构与藻类生态系统的数学模式, 为将来预测胶州湾富营养化提供理论基础。

#### 参 考 文 献

- 刁焕祥等, 1985, 海洋学报, 7: 374—377。  
沈志良等, 1994, 海洋科学集刊, 35: 115—129。  
董金海等主编, 1995, 胶州湾生态学研究, 科学出版社(北京), 38—45。  
顾宏堪主编, 1991, 渤海东海海洋化学, 科学出版社(北京), 438—442。  
Brown, E. J. et al., 1979, *J. phyco.*, 15: 305—311。  
Brzezinski, M. A. et al., 1985, *J. Phyco.*, 21: 347—357。  
Conley, D. J. et al., 1992, *Mari. Ecol. Prog. Seri.*, 81: 121—128。  
Dortch, Q. et al., 1992, *Contin. Shelf Res.*, 12: 1 293—1 309。  
Goldman, J. C. et al., 1979, *Nature*, 279: 210—215。  
Harrison, P. J. et al., 1977, *Mari. Biol.*, 43: 19—31。  
Hecky, R. E. et al., 1988, *Limnol. Oceanog.*, 33: 796—822。  
Justic, D. et al., 1995, *Coast. Shelf Sci.*, 40: 339—356。  
Levasseur, M. E. et al., 1987, *Mari. Ecol. Prog. Seri.*, 39: 87—97。  
Nelson, D. M. et al., 1990, *Mari. Ecol. Prog. Seri.*, 62: 283—292。

## A STUDY OF CHANGES IN NUTRIENT STRUCTURE OF JIAOZHOU BAY

Zhang Junshun, Shen Zhiliang

(*Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071*)

**Abstract** Some months' nutrients in Jiaozhou Bay in the mid-1980s and early 1990s were determined. According to Justic's criteria for stoichiometric and probable nutrient limitations, and the atomic Si:N:P ratios of marine diatoms, we analysed extensive nutrient data sets from Jiaozhou Bay. The main results were as follows: First, silicon: phosphorus ratios in surface waters of Jiaozhou Bay decreased significantly from the mid-1980s to the early 1990s, while silicon: nitrogen and nitrogen: phosphorus ratios also decreased. Secondly, the relative frequency of probable silicon limitation in the mid-1980s was about 36.6%, but increased to about 69.6% in the early 1990s. On the other hand, because dissolved inorganic nitrogen and phosphorus concentrations were higher, relative frequency of nitrogen and phosphorus limitations in Jiaozhou bay was zero or nearly zero from the mid-1980s to the early 1990s. Consequently, we believed that the nutrient structure in Jiaozhou Bay surface waters underwent significant changes, and the potential for silicon limitation in Jiaozhou Bay increased.

**Key words** Jiaozhou Bay    Nutrients    Eutrophication