

胶州湾营养盐浓度与结构的长期变化*

孙晓霞¹ 孙松^{1,2} 赵增霞¹ 沈志良²

(1. 山东胶州湾海洋生态系统国家野外科学观测研究站 青岛 266071; 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 青岛 266071)

提要 依据自 20 世纪 60 年代以来胶州湾营养盐调查与研究资料, 系统分析了近 40 余年来胶州湾营养盐浓度与结构的长期变化规律, 以及 2000 年以后胶州湾营养盐浓度与结构的变化特征。结果表明, 近几十年来胶州湾各项营养盐浓度都呈现增加趋势, 但不同种类营养盐浓度变化的时期并不相同。氨氮浓度到 2001 年达到顶峰, 随后呈现下降趋势。而亚硝酸盐和硝酸盐含量的上升趋势在 2000 年之后尤为显著。磷酸盐和硅酸盐浓度的变化主要体现在 20 世纪 90 年代后期。与此同时, 胶州湾营养盐的结构也发生了很大变化。总溶解无机氮中不同氮源的组成比例发生改变, 2000 年后氨氮在总溶解无机氮中所占的比例逐渐降低, 硝酸盐所占比例逐渐增加。不同营养盐之间的比例亦发生变化, 2000 年以后氮磷比值开始下降, 氮磷比严重失衡的状态得到缓解, 硅氮比有所上升, 但仍然低于 Redfield 比值。

关键词 营养盐, 结构, 长期变化, 胶州湾

中图分类号 P71

受人类活动的影响, 近几十年来近海水体中的营养盐浓度和结构发生了巨大变化, 据估计全球范围内因人类活动而引起的近海氮含量增加了 2—3 倍 (Jickells, 1998)。在营养盐浓度大幅增加的同时, 营养盐结构也发生了很大变化, 氮、磷、硅之间的比例失衡, 成为全球很多沿海地区普遍存在的问题 (吕华庆等, 2009)。调查资料显示, 近海主要河口、海湾水体中氮磷比几乎都偏离 Redfield 值, 低者可至 1—2 左右, 高者可达数百甚至上千 (郭卫东等, 1998)。营养盐浓度与结构的变化首先会对海洋浮游植物群落产生影响。作为海洋中低营养阶层的主体, 浮游植物和浮游动物种类与数量的变动会进一步导致整个海洋生态系统结构与功能的改变。因此, 营养盐的供应、浓度和比例, 不仅决定着海区的初级生产力, 而且也决定了海洋生物群落的粒径谱、组成与结构, 进而通过食物网影响渔业产量和地球化学通量。

胶州湾是一个受人类活动影响非常显著的海湾, 近几十年来, 随着青岛市城市化进程的加快, 胶州湾

生态系统发生了很大变化 (叶思源等, 2009; 张洪海等, 2010), 胶州湾营养盐浓度与结构的改变是引起这些变化的重要原因之一。关于胶州湾营养盐结构的长期变化, 迄今为止已有一些研究 (沈志良, 2002; Shen, 2001), 这些研究主要针对 2000 年之前胶州湾营养盐的变化情况。进入 21 世纪以来, 随着青岛市经济的发展、海洋环境保护政策的推进, 胶州湾的营养盐结构出现若干新的变化特征。本文重点分析了不同时期胶州湾营养盐结构变化的特点与规律, 探讨了影响胶州湾营养盐浓度与结构变化的影响要素, 以期为胶州湾及近海生态系统的长期变化与可持续发展研究提供重要的科学依据。

1 材料与方法

本研究所用数据资料主要来自三个时期, 即 1962 年 3 月—1963 年 5 月胶州湾及近海化学要素调查, 1981 年 2 月—1986 年 11 月胶州湾及近海营养盐调查, 1991 年至今胶州湾海洋生态系统观测站长期观

* 中国科学院知识创新工程重要方向项目群项目, KZCX2-YW-Q07-01 号; 国家“973”项目, 2011CB403603 号; 国家自然科学基金项目, 40876083 号; 海洋公益性行业科研专项, 201005014 号。孙晓霞, 博士, 研究员, E-mail: xsun@qdio.ac.cn

收稿日期: 2011-01-21, 收修改稿日期: 2011-06-26

测研究。 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 的数据始于 1962 年, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 和 DIN 的数据始于 1981 年, $\text{SiO}_3^{2-} - \text{Si}$ 的数据始于 1985 年。废水排放量及化肥施用量等数据引自青岛统计信息网(<http://www.stats-qd.gov.cn>)各年度青岛统计年鉴。降雨量的数据来自胶州湾海洋生态系统观测站。不同时期的调查站位如图 1 所示。

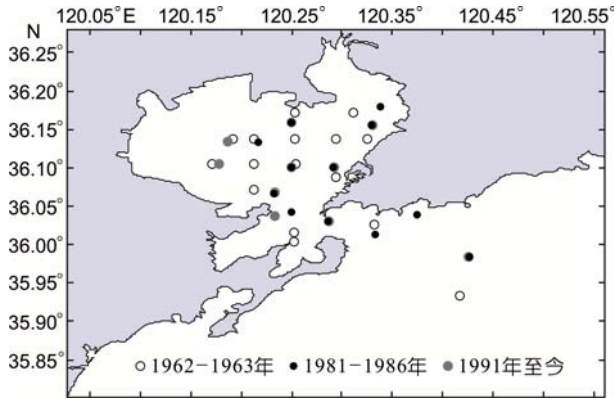


图 1 胶州湾不同时期营养盐调查站位

Fig.1 Sampling stations in different periods in the Jiaozhou Bay

$\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的测定在 1962—1963 年使用钠氏比色法, 1981 年之后使用次溴酸钠氧化法和靛酚兰法, 亚硝酸盐的测定使用重氮偶氮法, 硝酸盐的测定使用二苯基联苯胺二磺酸钠法和镉-铜还原法, $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 和 $\text{SiO}_3^{2-} - \text{Si}$ 的测定分别利用磷钼兰和硅钼兰法(沈志良, 2002)。1962—1963 年的样品利用国产比色计分析, 1981 年以后的样品分别使用 Technicon AA-II 型自动分析仪(美国)、SKALAR 流动分析仪(荷兰)和 QuAatro 连续流动分析仪分析(德国)。

为了保持数据的可比性, 长期变化分析采用整个胶州湾不同时期各站位的季度月平均值, 回归分析确定不同营养盐的年增加变率, 采用 SPSS 11.0 进行统计分析。

2 结果

2.1 胶州湾营养盐浓度的长期变化

1962—2008 年胶州湾营养盐含量的长期变化规律如图 2 所示。从总体变化规律看, 近几十年来氨氮、亚硝酸盐、硝酸盐、磷酸盐、硅酸盐浓度均呈现显著

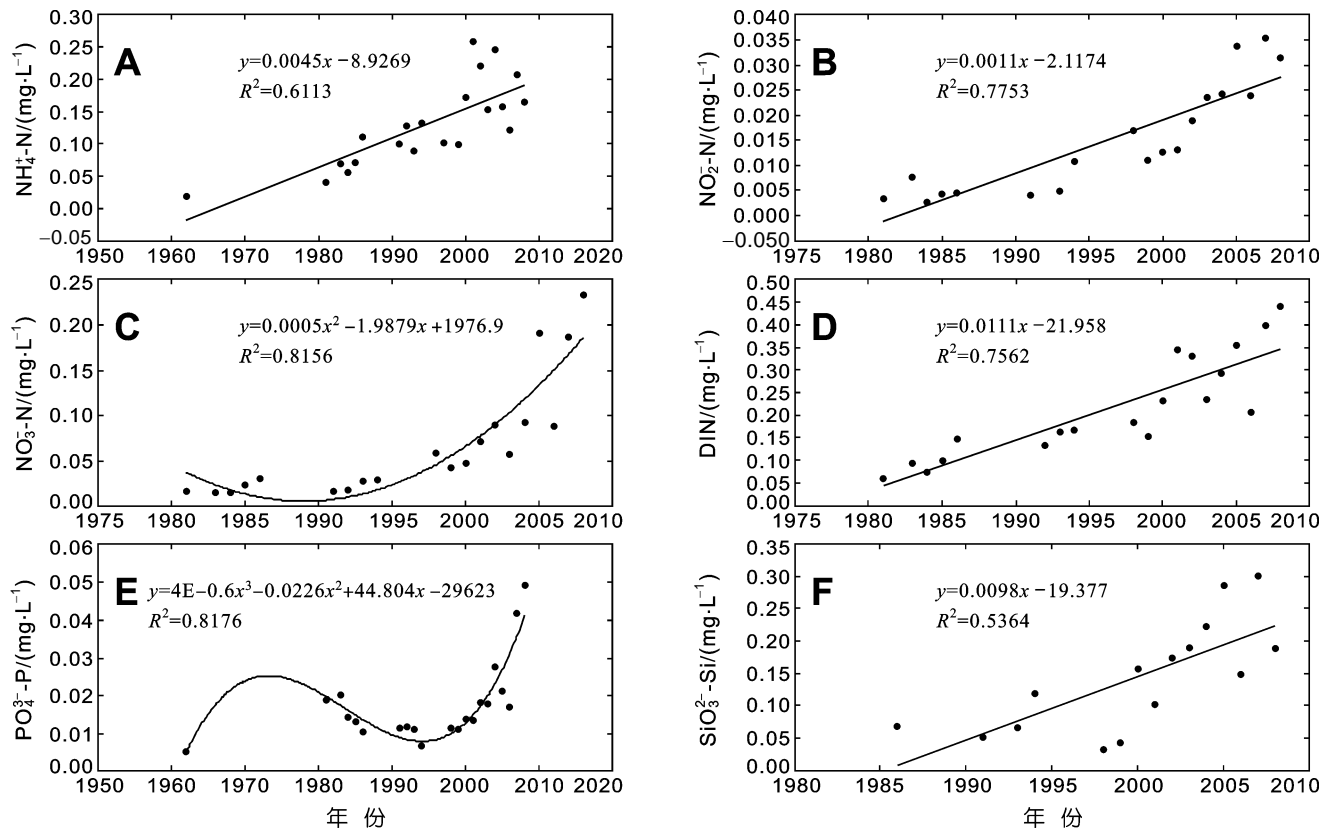


图 2 胶州湾营养盐浓度的长期变化

Fig.2 Long-term changes in nutrient concentrations in the Jiaozhou Bay

升高的趋势,但不同种类营养盐浓度变化的具体时间与规律不同。氨氮浓度从 20 世纪 80 年代起逐渐升高,到 2001 年达到顶峰,季度月平均浓度高达 0.26mg/L,随后几年氨氮含量呈现下降趋势。亚硝酸盐和硝酸盐含量从 20 世纪 90 年代之后上升比较明显,尤其是 2000 年之后,升高幅度非常显著。与此相对应,总溶解无机氮浓度从 20 世纪 80 年代起逐渐升高,呈现较好的线性回归关系。磷酸盐和硅酸盐浓度在 20 世纪 80 年代至 90 年代中期是下降的,从 90 年代中后期开始,二者皆表现出显著升高的趋势。以上结

果表明,自 2000 年以来,除了氨氮含量出现下降趋势外,其它营养盐浓度增加的幅度进一步提高。

综合比较不同时期胶州湾营养盐含量的变化(表 1),与 20 世纪 60 年代、80 年代和 90 年代相比,2000 年后氨氮含量分别增加了 9.21、1.72、0.75 倍,磷酸盐含量分别增加了 3.54、0.59、1.33 倍。与 80 年代和 90 年代相比,2000 年后硝酸盐含量分别增加了 4.76 和 2.65 倍,亚硝酸盐含量分别增加 4.35 和 1.53 倍,总无机氮含量分别增加 2.50 和 1.21 倍,硅酸盐含量分别增加 1.88 和 2.16 倍。

表 1 不同时期胶州湾营养盐含量比较

Tab.1 Comparison on the nutrient concentrations in different periods in the Jiaozhou Bay

营养盐	1960's(mg/L)	1980's(mg/L)	1990's(mg/L)	2000's(mg/L)	2000's 比 1960's 增加的倍数	2000's 比 1980's 增加的倍数	2000's 比 1990's 增加的倍数
NH ₄ ⁺ -N	0.0185	0.0694	0.1078	0.1888	9.21	1.72	0.75
NO ₂ ⁻ -N	—	0.0045	0.0095	0.0241	—	4.35	1.53
NO ₃ ⁻ -N	—	0.0204	0.0322	0.1176	—	4.76	2.65
DIN	—	0.0943	0.1495	0.3305	—	2.50	1.21
PO ₄ ³⁻ -P	0.0054	0.0154	0.0105	0.0245	3.54	0.59	1.33
SiO ₃ ²⁻ -Si	—	0.0681	0.0621	0.1962	—	1.88	2.16

采用回归分析进一步研究胶州湾季度月和年平均营养盐含量的年增加率,结果如表 2 所示。氨氮、亚硝酸盐、硝酸盐、磷酸盐、硅酸盐浓度的年变率分别为 0.0045、0.0011、0.0057、0.0005、0.0098mg/L,总溶解无机氮含量的年变率为 0.0111mg/L。不同季节营养盐含量增加的幅度不同。其中,氨氮和磷酸盐含量增加较显著的季节为 5 月和 11 月,两个月份氨氮含量的增加率分别为 0.0054 和 0.0052mg/L,磷酸盐含量的增加率分别为 0.0007 和 0.0005mg/L。亚硝酸盐、硝酸盐和硅酸盐浓度的增加幅度主要体现在 8 月份和 11 月份,尤其是 8 月份,分别可达 0.0015、0.0106、0.0168mg/L。

表 2 近几十年胶州湾营养盐含量增加的年变率(mg/L)

Tab.2 Annual ratio of the increasing of nutrient concentrations in recent decades in the Jiaozhou Bay (mg/L)

营养盐	2 月	5 月	8 月	11 月	年平均
NH ₄ ⁺ -N (1962—)	0.0033	0.0054	0.004	0.0052	0.0045
NO ₂ -N (1981—)	0.0004	0.0007	0.0015	0.0016	0.0011
NO ₃ ⁻ -N (1981—)	0.0031	0.0026	0.0106	0.0075	0.0057
DIN (1981—)	0.0062	0.0087	0.0148	0.0226	0.0111
PO ₄ ³⁻ -P (1962—)	0.0002	0.0007	0.0004	0.0005	0.0005
SiO ₃ ²⁻ -Si (1985—)	0.0004	0.0082	0.0168	0.0131	0.0098

图 3 表示胶州湾各项营养盐浓度的周年变化规律,各个季节营养盐的含量都有增加,其中氨氮浓度在各个月份的增加比较均衡,硝酸盐和亚硝酸盐浓度的增加主要体现在夏季和秋季,磷酸盐浓度的增加在春季较为显著,硅酸盐浓度在春季、夏季和秋季的增加均比较显著。

2.2 胶州湾营养盐结构的长期变化

在营养盐浓度升高的基础上,胶州湾的营养盐结构也发生了很大变化。首先,总溶解无机氮(DIN)中不同氮源的组成比例发生改变。图 4 表示 1981—2000 年胶州湾 DIN 组成比例的变化。在 2001 年之前,氨氮为 DIN 的主要组成部分,所占比例可以达到 60%—80%。这一比例与 Shen 等(2006)、Liu 等(2005)的结果一致。从 2001 年开始,氨氮所占比例开始下降,硝酸盐所占比例上升,到 2005 年,硝酸盐含量超过氨氮含量,与氨氮一起在 DIN 组成中联合占据优势。亚硝酸盐含量占 DIN 总量的 10%左右,在整个过程中变化不大。

其次,不同营养盐之间的比例也在发生变化。图 5 分别列出了胶州湾氮磷比、硅磷比和硅氮比的长期变化情况。1981—1984 年氮磷比的变化范围为 9—18,保持在 Redfield 比值附近波动。从 1984—2001 年,胶

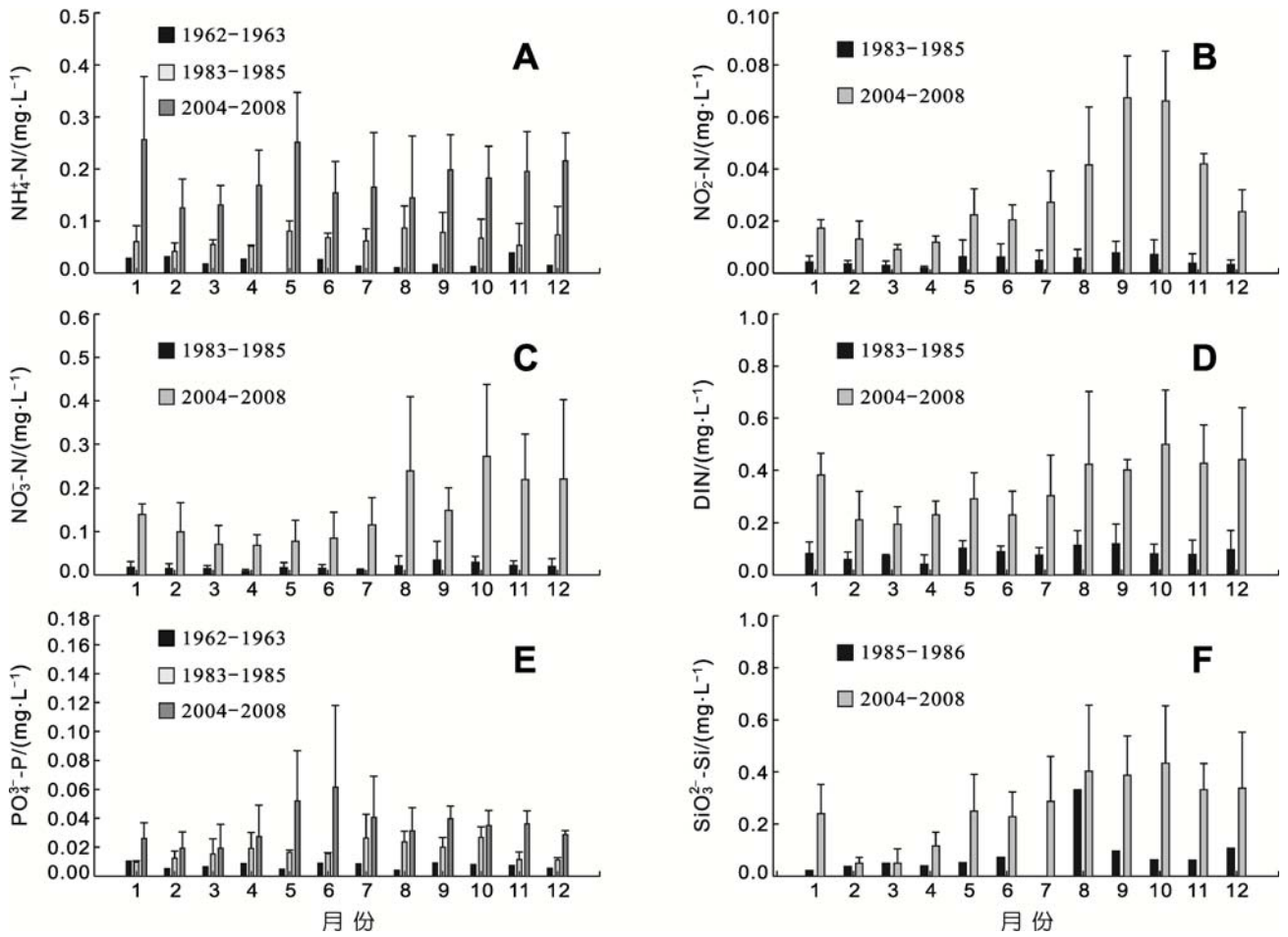


图 3 不同时期胶州湾营养盐含量的周年变化

Fig.3 Annual changes in nutrient concentrations in the Jiaozhou Bay

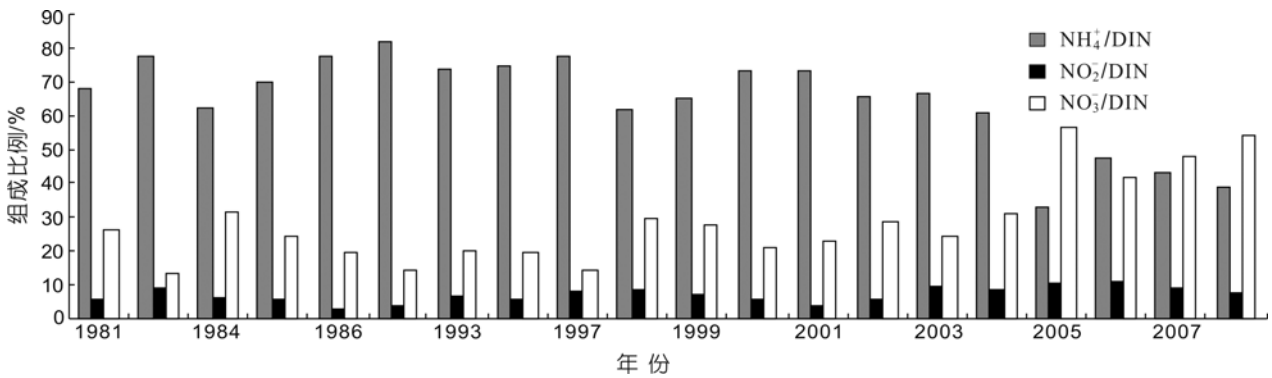


图 4 胶州湾总溶解无机氮组成比例的变化

Fig.4 Changes in the compositions of dissolved inorganic nitrogen (DIN) in the Jiaozhou Bay

州湾氮磷比的年平均值呈显著上升趋势, 最高值出现在 1994 年, 达到 64.49, 其次是 2001 年, 达到 57, 严重偏离 Redfield 比值, 造成胶州湾氮磷比例的严重失衡状态。从 2001 年之后, 随着氮氮排放的降低, 总溶解无机氮含量增加的幅度变缓, 氮磷比值开始下降, 2007—2008 年已降至 20.1, N/P 比严重失衡的状

态得到缓解。Si/P 比的变化呈现一种波动状态, 90 年代中期, 由于硅酸盐的含量很低, Si/P 比值处于较低的状态, 2000 年之后, 随着硅酸盐含量的增加, Si/P 比值逐渐升高, 但 2005 年之后有所下降。Si/N 比从 80 年代至今一直低于 Redfield 比值 1, 尤其是 1998—1999 年, 仅为 0.08 和 0.14, 2004 年之后, Si/N 比值

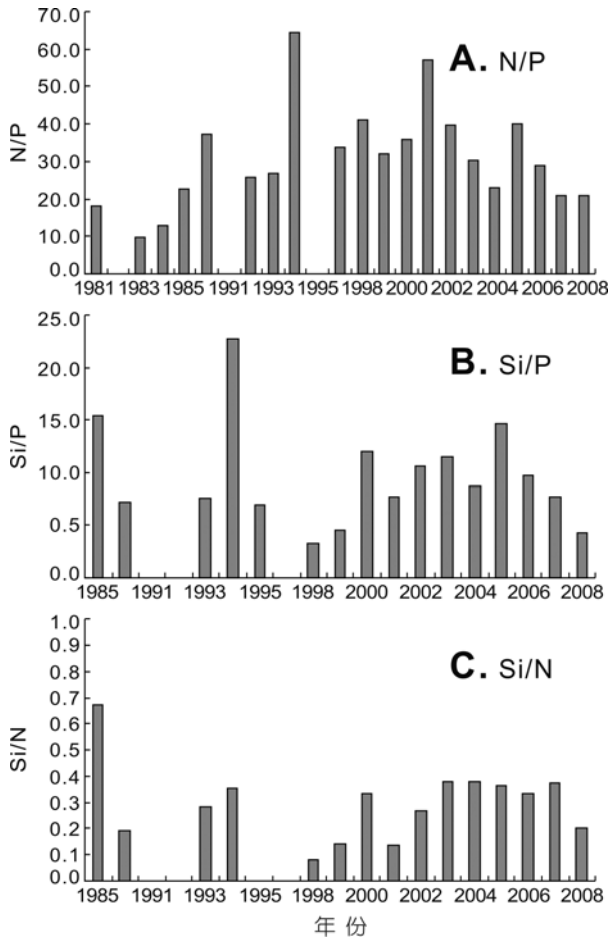


图5 胶州湾营养盐比例长期变化

Fig.5 Long-term changes in nutrient ratios in the Jiaozhou Bay

上升,基本保持在 0.4 左右。相对于总溶解无机氮含量,硅酸盐所占比例仍然较低。

胶州湾不同时期营养盐比例的周年变化规律如图 6 所示。与 1983—1985 年相比,20 世纪 90 年代氮磷比在冬季和夏季的升高较为显著;但与 20 世纪 90 年代相比,2004—2008 年氮磷比在春、夏和秋季均出现下降的特征。与 20 世纪 90 年代相比,硅氮比在春季、夏季和秋季均表现出显著的升高。硅磷比则呈现春、夏季升高,秋、冬季节降低的变化规律。

3 讨论

以上研究表明,随着胶州湾海域受人类活动影响程度的增加,营养盐的浓度和结构均发生了很大变化,主要表现为两个方面:一是胶州湾总溶解无机氮、磷酸盐和硅酸盐的含量持续上升,但 2001 年后

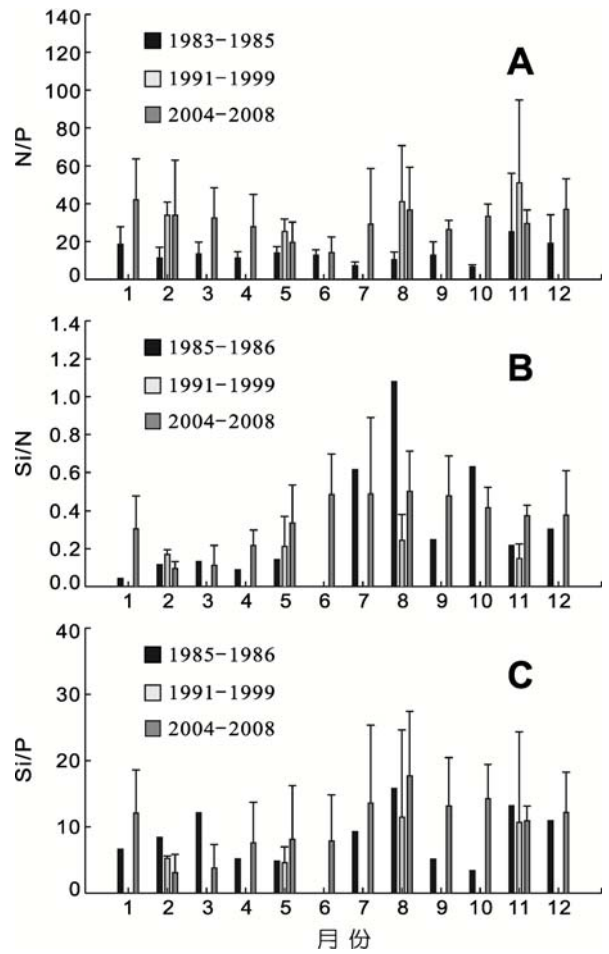


图6 胶州湾不同时期营养盐比例周年变化

Fig.6 Annual changes in nutrient ratios in the Jiaozhou Bay

氮氮含量开始下降,硝酸盐、磷酸盐和硅酸盐含量升高幅度加大。二是营养盐结构的改变,20 世纪 90 年代营养盐比例严重失衡、硅限制的状况有所缓解。

根据营养盐输入的途径,胶州湾营养盐的来源主要包括陆源排放、大气沉降和海水养殖三个方面。关于胶州湾沉积物-海水界面营养盐的物理化学过程研究相对较少,对于氮磷营养盐的交换方向尚存在争议。根据王修林等(2006)的综合分析,胶州湾 DIN 和 TDP 排海总量以陆源为主,平均可高达 93%和 98%,大气沉降分别占 6%和 1%,沿海海水养殖仅为 1%—2%。根据王刚(2009)¹⁾对胶州湾入海点源及海水养殖污染物通量研究,2008 年胶州湾主要点源的入海通量为 DIN 11219t/年, DIP 677t/年;海水养殖 DIN、DIP 年入海通量分别为 206t/年和 36t/年,结合毕言峰(2006)²⁾对胶州湾海区大气干湿沉降年通量的研究,

1) 王 刚,2009. 胶州湾入海点源、海水养殖污染物通量研究. 青岛: 中国海洋大学硕士学位论文,1—63

2) 毕言峰,2006. 中国东部沿海的大气营养盐干、湿沉降及其对海洋初级生产力的影响. 青岛: 中国海洋大学硕士学位论文,1—98

估算 DIN 和 DIP 的大气沉降通量分别为 1261t/年和 18t/年。由此可见, 胶州湾氮、磷营养盐的来源以陆源为主。在陆源排放中, 胶州湾排海工业废水平均约占污水排海总量的 10%, 城市生活污水约占 15%, 农业污水约占 75%, 农业废水所占比例最高。

根据青岛市统计年鉴, 随着青岛市城市化进程的加快, 近 20 年来废水排放总量一直呈增加趋势(图 7A), 由 1988 年的 14628 万 t 增加到 2007 年的 31611 万 t, 增加了 1 倍以上。但是氨氮的排放总量从 2001 年开始下降, 从 2001 年的 8000t 降低到 2007 年的 6000t, 降低了 25%(图 7B)。由于胶州湾氨氮含量的变化主要受废水排放中氨氮排放量变化的影响, 与此相对应, 2001 年后胶州湾氨氮含量出现下降的趋势。另外, 根据青岛市对农业化肥的施用量统计, 近年来无论是化肥施用总量还是单位面积的化肥用量都在上升, 同时化肥使用的结构也发生了改变, 尽管氮肥和磷肥的施用量有所降低, 但复合肥的用量显著升高, 与 2000 年相比, 2007 年复合肥的用量增加了 32%, 成为近年来胶州湾硝酸盐、磷酸盐浓度持续升高的主要原因之一(图 8、图 9)。与此相对应, 氨氮在总溶解无机氮中所占的比例下降, 硝酸盐的比例提高, 原来所认为的胶州湾无机氮处于热力学不平衡的状态得到缓解。

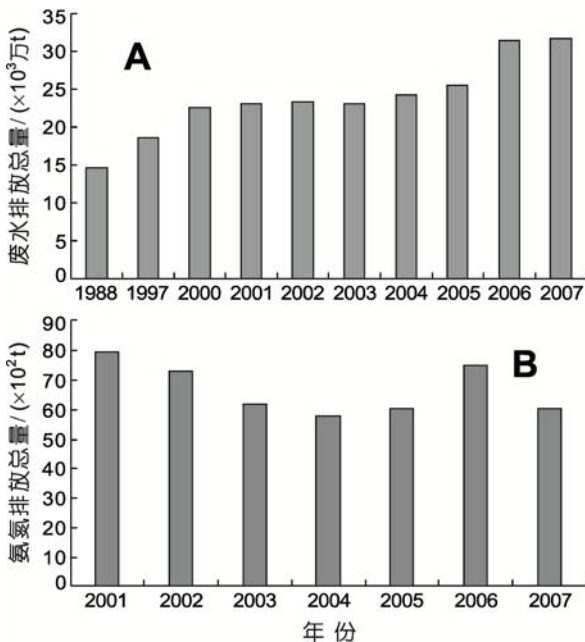


图 7 青岛市废水(A)和氨氮(B)排放总量变化

Fig.7 A record of wastewater (A) and ammonium (B) discharge by the Qingdao City

数据来源: 青岛统计年鉴, 青岛统计信息网

http://www.stats-qd.gov.cn

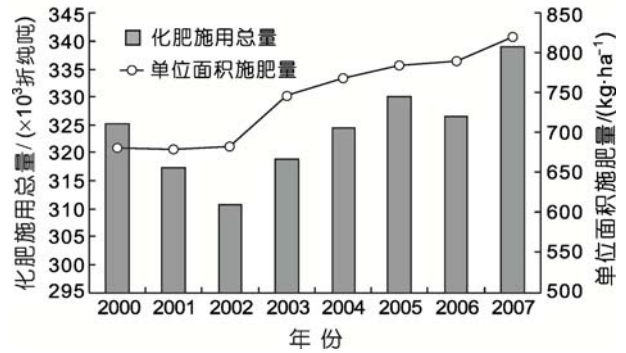


图 8 青岛地区化肥施用量

Fig.8 Chemical fertilizer consumption in Qingdao

数据来源: 青岛统计年鉴, 青岛统计信息网

http://www.stats-qd.gov.cn

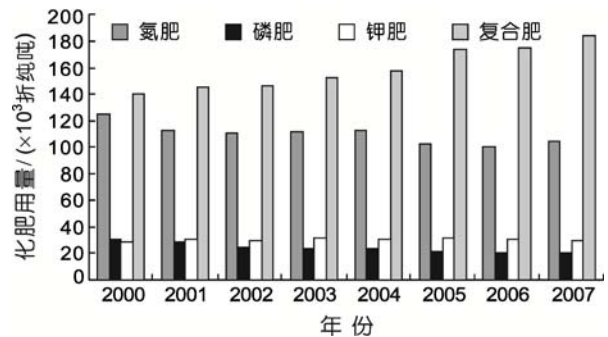


图 9 青岛地区不同类型的化肥用量

Fig.9 Consumption of different types of chemical fertilizers in Qingdao

数据来源: 青岛统计年鉴, 青岛统计信息网

http://www.stats-qd.gov.cn

近年来, 胶州湾营养盐浓度变化的另一个重要特征是硅酸盐的浓度及所占比例开始上升。自 20 世纪 90 年代中期以来, 胶州湾硅酸盐的浓度一直呈现升高的趋势, 硅氮比和硅磷比均有明显升高。由于海洋中的硅酸盐主要来自河流, 硅酸盐浓度的变化主要受降雨量和河流径流量的影响。据报道, 胶州湾的硅酸盐 80% 来自河流(Liu *et al*, 2005)。胶州湾的降水量与硅酸盐浓度之间呈现很好的相关性(Shen, 2001)。从 20 世纪 80 年代以来, 胶州湾地区的降水呈现增加的趋势, 是引起胶州湾硅酸盐浓度增加的原因之一。随着青岛城市建设的加快, 混凝土用量的增加也被认为是引起胶州湾硅酸盐含量增加的一个因素。另外, 胶州湾是重要的菲律宾蛤仔养殖区, 蛤仔的生物扰动在硅酸盐从沉积物向水体转移的过程中发挥很大作用。根据蒋凤华等(2002)对于胶州湾沉积物-海水界面硅酸盐的交换速率和通量研究, 硅酸盐在胶州湾沉积物-海水界面上的交换表现为由沉积物向水体的

释放, 交换速率一般在 $1-5\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 范围内, 平均为 $3.3\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$, 同时发现生物扰动作用可以大大增大 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 交换速率。已有研究证明大西洋舟螺 (*Crepidula fornicata*) 对于法国布雷斯特湾硅酸盐由沉积物向水体的迁移起到关键的作用, 在大西洋舟螺生物量高的区域比没有大西洋舟螺存在的区域硅酸盐由沉积物向水体转移的通量高一个数量级 (Ragueneau *et al.*, 2002)。由于菲律宾蛤仔是胶州湾底栖贝类养殖的关键种, 养殖产量自 20 世纪 90 年代中期以来持续增加, 菲律宾蛤仔的生物扰动作用对于促进胶州湾硅酸盐含量升高具有重要意义。

关于胶州湾营养盐比例的改变, 已有很多研究表明, 胶州湾营养盐结构严重失衡, 逐渐由原来的氮限制转变为磷限制, 后又转变为硅限制。这种现象主要是由于不同时期营养盐浓度增加的速率不一致造成。表 2 的数据表明, DIN 增加的幅度在 20 世纪 80—90 年代之间要远远高于磷酸盐和硅酸盐的增加幅度, 但进入 2000 年之后, DIN 的增加幅度逐渐变缓, 磷酸盐和硅酸盐的增加更为显著, 这就使得胶州湾营养盐比例严重失衡的问题在 2000 年之后得到一定缓解, N/P 比在 2007 年和 2008 年降低到 20, 接近于 Redfield 比值, 但硅氮比偏离的幅度依然较大。相对于磷酸盐和硅酸盐的浓度, DIN 所占比例仍然较高, 因此, 胶州湾营养盐控制的重点仍然是降低总溶解无机氮的增加幅度, 同时须关注化肥使用量增加所可能引起的硝酸盐及磷酸盐浓度显著升高的问题。

胶州湾营养盐的结构特征与全球很多近海区域是相似的。关于当前近海营养盐结构变化的特点, 通常认为氮输入的增加要高于磷, 导致许多近海区域 N/P 比失衡 (Mas ó *et al.*, 2007)。因溶解性硅酸盐所占比例降低而引起的硅限制也逐渐成为许多近海区域的变化趋势。20 世纪后半期波罗的海的氮增加了 4 倍, 磷增加了 8 倍, 在 1970—2000 年间, DSi/DIN 、 DSi/DIP 浓度呈持续下降趋势, 在不久的将来, 波罗的海海湾将有可能成为硅限制 (Danielsson *et al.*, 2008)。在黑海, 人类活动也显著改变了氮、磷、硅向近海生态系统的输入通量, 氮磷含量增加, 溶解性硅含量降低, 因此也出现了硅限制的情况。近 20 年来, 渤海中部营养盐的浓度和结构均发生了显著变化, 表现为硝酸盐、亚硝酸盐、总无机氮持续增加, 活性磷和硅显著降低, N/P 值升高, Si/N 值下降 (于志刚等, 2000)。郑炳辉等 (2007) 发现受渤海湾天津近岸海域无机氮含量持续增长的影响, 1985—2003 年间, 渤海湾

天津近岸海域氮磷营养盐结构发生了很大变化, 从 1985 年的氮限制状态转变为磷限制状态, 对这一海域浮游植物群落结构的变化造成重要影响。大亚湾近 20 年来由贫营养状态发展到中营养状态, 局部海域已出现富营养化的趋势, N/P 比的平均值由 20 世纪 80 年代的 1/1.5 上升到近年的大于 50, 营养盐限制因子由氮限制过渡到目前的磷限制; 生物群落组成明显小型化, 生物多样性降低, 生物资源衰退 (Wang *et al.*, 2006, 2008)。受营养盐浓度与结构变化的影响, 自 20 世纪 90 年代以来, 胶州湾浮游植物群落结构及优势种亦发生改变, 如甲藻的种类与数量增加、嗜氮性硅藻数量的增加等 (王修林等, 2006)。受陆源污染通量的不断增加、胶州湾水域面积的不断减少、海湾大桥等大型工程的修建所引起的水动力环境的改变等因素的影响, 胶州湾营养盐浓度与结构的变动规律与趋势需要引起高度关注。由于营养盐结构的变化会直接影响海洋浮游植物群落结构的变化 (Cadee, 1986), 并进而引起整个生态系统结构与功能的改变, 因此, 控制胶州湾营养盐增加速率, 尤其是总溶解无机氮含量的增加, 对于维持胶州湾生态系统的健康至关重要。

4 小结

通过对胶州湾营养盐浓度和结构长期变化的分析, 可以得出如下结论:

(1) 近几十年来胶州湾各项营养盐浓度都呈现增加趋势, 但不同营养盐种类浓度变化的时期不同。氨氮浓度从 20 世纪 80 年代起逐渐升高, 到 2001 年达到顶峰, 随后几年氨氮含量开始呈现下降趋势。亚硝酸盐和硝酸盐含量从 20 世纪 90 年代之后上升比较明显, 2000 年之后尤为显著。磷酸盐和硅酸盐浓度的升高主要体现在 20 世纪 90 年代后期。

(2) 胶州湾各项营养盐增加的速率发生了改变, 2000 年后磷酸盐和硅酸盐增加的幅度加大, 总溶解无机氮增加的幅度变缓。

(3) 总溶解无机氮中不同氮源的组成比例发生改变, 2000 年后氨氮在总溶解无机氮中所占的比例逐渐降低, 硝酸盐所占比例逐渐增加, 热力学不平衡的状态得到缓解。

(4) 胶州湾不同营养盐之间的比例发生变化, 2000 年以后氮磷比值开始下降, 氮磷比严重失衡的状态得到缓解, 硅氮比有所上升, 但仍然低于 Redfield 比值, 应重点控制总溶解无机氮的增加幅度。

参 考 文 献

- 于志刚, 米铁柱, 谢保东等, 2000. 二十年来渤海生态环境参数的演化与相互关系. *海洋环境科学*, 19(1): 15—19
- 王修林, 李克强, 石晓勇, 2006. 胶州湾主要化学污染物海洋环境容量. 北京: 科学出版社, 1—22
- 叶思源, 原晓军, 丁喜桂等, 2009. 胶州湾水生系统中 Pb、Zn 的分布特征及其在生物体中的浓缩. *海洋与湖沼*, 40(4): 400—406
- 吕华庆, 常抗美, 石钢德, 2009. 象山港氮、磷营养盐环流和分布规律的研究. *海洋与湖沼*, 40(2): 138—144
- 沈志良, 2002. 胶州湾营养盐结构的长期变化及其对生态环境的影响. *海洋与湖沼*, 33(3): 322—331
- 张洪海, 杨桂朋, 2010. 胶州湾及青岛近海微表层与次表层中二甲基硫(DMS)与二甲巯基丙酸(DMSP)的浓度分布. *海洋与湖沼*, 41(5): 683—691
- 郑炳辉, 秦延文, 孟伟等, 2007. 1985—2003年渤海湾水质氮磷生源要素的历史演变趋势分析. *环境科学*, 28(3): 494—499
- 郭卫东, 章小明, 杨逸萍等, 1998. 中国近岸海域潜在性富营养化程度的评价. *台湾海峡*, 17(1): 64—70
- 蒋凤华, 王修林, 石晓勇等, 2002. 硅在胶州湾沉积物-海水界面上的交换速率和通量研究. *青岛海洋大学学报*, 32(6): 1012—1018
- Cadee G C, 1986. Recurrent and changing seasonal patterns in phytoplankton of the westernmost inlet of the Dutch Wadden Sea from 1969 to 1985. *Mar Biol*, 93: 281—289
- Danielsson A, Papush L, Rahm L, 2008. Alterations in nutrient limitations-scenarios of a changing Baltic Sea. *Journal of Marine Systems*, 73: 263—283
- Jickells T D, 1998. Nutrient biogeochemistry of the coastal zone. *Science*, 281: 217—222
- Liu S M, Zhang J, Chen H T *et al*, 2005. Factors influencing nutrient dynamics in the eutrophic Jiaozhou Bay, North China. *Progress in Oceanography*, 66: 66—85
- Masó M, Garcés E, 2007. Harmful microalgae blooms (HAB); problematic and conditions that induce them. *Mar Pollut Bull*, 53: 620—630
- Ragueneau O, Chauvaud L, Leynaert A *et al*, 2002. Direct evidence of a biologically active coastal silicate pump: Ecological implications. *Limnol Oceanogr*, 47(6): 1849—1854
- Shen Z L, 2001. Historical changes in nutrient structure and its influences on phytoplankton composition in Jiaozhou Bay. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 52: 211—224
- Shen Z L, Liu Q, Wu Y L *et al*, 2006. Nutrient structure of seawater and ecological responses in Jiaozhou Bay, China. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 69: 299—307
- Wang Y S, Lou Z P, Sun C C *et al*, 2006. Multivariate statistical analysis of water quality and phytoplankton characteristics in Daya Bay, China, from 1999 to 2002. *Oceanologia*, 48(2): 193—211
- Wang Y S, Lou Z P, Sun C C *et al*, 2008. Ecological environment changes in Daya Bay, China, from 1982 to 2004. *Marine Pollution Bulletin*, 56(11): 1871—1879

LONG-TERM CHANGES IN NUTRIENT CONCENTRATION AND STRUCTURE IN THE JIAOZHOU BAY

SUN Xiao-Xia¹, SUN Song^{1,2}, ZHAO Zeng-Xia¹, SHEN Zhi-Liang²

(1. Jiaozhou Bay Marine Ecosystem Research Station, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao, 266071; 2. Key Laboratory of Marine Ecology and Environmental Sciences, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao, 266071)

Abstract Based on data obtained from the Jiaozhou Bay ecosystem monitoring since the 1960's, long-term changes in nutrient concentrations and structures were investigated in this paper. Our results indicated that the concentrations of all five nutrients showed increasing trends during the last several decades. Among these nutrients, ammonium concentration increased gradually from the 1980's and reached a peak in 2001, then it decreased afterward. The increasing trends of nitrite and nitrate concentrations were significant from the 1990's, especially after 2000. Phosphate and silicate concentrations began to increase after 1998. Beside concentration, nutrient structures also changed dramatically. In dissolved inorganic nitrogen (DIN), the proportion of ammonium decreased gradually after 2000, and that of nitrate increased accordingly. The N/P ratio began to decrease since 2000 from the previously high N/P ratio; at the same time, the Si/N ratio began to increase, although it was still lower than the Redfield value. The imbalance in nutrient structure was alleviated compared to the 1990's, however, it is still necessary to control the increase in DIN based on this study.

Key words Nutrients, Structure, Long-term changes, Jiaozhou Bay