

烟台四十里湾养殖水域营养盐的分布及动态变化^{*}

赵卫红 焦念志 赵增霞

(中国科学院海洋研究所 青岛 266071)

摘要 1997年5、8、11月及1998年3月对烟台四十里湾养殖水域营养盐的四个航次季节调查显示该水域营养盐的时空分布主要受陆源输入、养殖和自然生物活动及海流状况的影响。氮磷硅无机营养盐结构分析表明,烟台四十里湾春夏季硅限制了硅藻的生长;秋季氮为硅藻的相对限制因子,冬末春初硅是相对限制因子。

关键词 烟台四十里湾, 养殖水域, 营养盐, 分布, 动态变化

烟台四十里湾是我国北方的一个重要浅海养殖海区,它三面邻陆,一面向海,为一耳状半封闭式海湾。主要养殖对象有贻贝、栉孔扇贝、海湾扇贝和海带。浮游植物及大型海藻可直接吸收海水中的无机营养盐来合成自身所必需的成分,另外扇贝等养殖生物本身代谢也会产生大量的营养盐,因而在养殖区营养盐的含量分布和变化与自然生物和养殖生物均有着密切的关系。为了能更好的了解养殖水域营养盐的循环,确定合理的养殖容量,建立优化的养殖模式,从1997年5月开始,作者对烟台四十里湾浅海养殖区的氨盐、硝酸盐、亚硝酸盐及磷酸盐、硅酸盐的分布变化进行了1 a 4个航次的调查。

1 材料与方法

1.1 采样时间、站位及方法

1997年5、8、11月及1998年3月对烟台四十里湾12个站位进行了调查,站位布置见图1,其中1、4、6、8、9和10号站处于养殖区内。水样用颠倒采水器采集,过滤后,滤液贮存于120 ml聚乙烯瓶中,加入200 μ l 氯仿-20℃下冷冻保存。

1.2 分析方法

$\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、 $\text{SiO}_4\text{-Si}$ 用Skalar San & plus微量自动分析系统(Skalar, 荷兰)分析, $\text{NH}_4\text{-N}$ 采用酚-次氯酸钠法, $\text{NO}_3\text{-N}$ 采用Cd-Cu还原后重氮偶氮法、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 采用重氮偶氮法, $\text{PO}_4\text{-P}$ 采用抗坏血酸-磷钼蓝法, $\text{SiO}_4\text{-Si}$ 采用硅钼蓝法测定。溶解无机氮为 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 之和。

2 结果与讨论

2.1 营养盐的平面分布

调查结果显示,1997年5月份表层溶解无机氮变

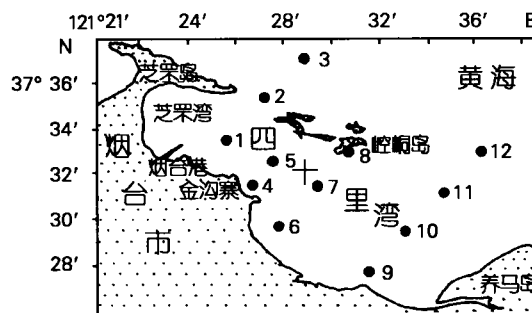


图1 烟台四十里湾采样站位

Fig. 1 The sampling stations in Yantai Sishili Bay

化范围在 $0.80 \mu\text{mol/L} \sim 1.49 \mu\text{mol/L}$, 平均 $1.07 \mu\text{mol/L}$ 。表层磷酸盐的浓度范围在 $0.12 \mu\text{mol/L} \sim 0.18 \mu\text{mol/L}$, 平均为 $0.15 \mu\text{mol/L}$, 表层硅酸盐的浓度范围在 $0 \sim 2.99 \mu\text{mol/L}$, 平均为 $0.94 \mu\text{mol/L}$ 。海湾东南部10号站的无机氮最高, 浓度为 $1.49 \mu\text{mol/L}$, 东南部要高于西北部。在无机氮中氨氮占了82%, 其浓度范围在 $0.56 \mu\text{mol/L} \sim 1.29 \mu\text{mol/L}$, 平均 $0.85 \mu\text{mol/L}$ 。表层硝酸氮的浓度范围在 $0.03 \mu\text{mol/L} \sim 0.27 \mu\text{mol/L}$, 平均 $0.15 \mu\text{mol/L}$, 占无机氮的13%, 亚硝酸氮只占6%, 平均只有 $0.07 \mu\text{mol/L}$ 。无机氮绝大部分是由氨氮组成, 表层无机氮与氨氮的平面分布

^{*} 国家科委“九五”攻关计划资助项目 96-922-02-04 号, 国家自然科学基金资助项目 39625008, 39630060 号, 中国科学院特别支持项目 KZ95T-04-04 号及中国科学院重大项目 KZ951-A1-301 号。

收稿日期: 1999-03-20; 修回日期: 1999-12-20

是一致的。硝酸氮分布则与氨氮相反,西南沿岸较高,主要来自港口附近的排污输入,亚硝酸氮是氨氮和硝酸氮的中间产物,在湾东南部及金沟寨附近具有高值。整个海区的磷酸盐表层水平梯度较小,相对来说金沟寨附近的4号站及东南部的10号站略高,东部的分布与氨氮的分布有些相似。整个海区硅酸盐浓度相对较低,有些站位甚至检测不出来,如1号、6号、7号及12号站,北部湾口及崧嵎岛附近海域相对较高。

调查海区西部烟台港附近有主要的工业及生活排污口,成为该调查海区的主要营养盐输入点源,另外养殖区沿岸带人工作业等也会不断为沿岸海水输送营养盐。Richard等1988年报道,扇贝等养殖滤食生物本身代谢可以释放营养盐,释放的无机氮主要以氨氮为主,因而养殖水域的营养盐结构及分布特征除受陆源输入影响外,与扇贝养殖区域分布、养殖状况及海流状况都有着直接关系。烟台四十里湾由月亮湾至养马岛沿岸及崧嵎岛沿岸均为养殖区,主要是贝类与海带等混养。西北部的芝罘湾及其东南侧受潮流影响较大,水交换相对较好,港区附近排放的污水可以向东南输送,对4号、5号站附近水域的营养盐有一定影响;而四十里湾东南部受潮流影响相对较弱,由生物产生的营养盐水平输运较差,这可能是东南部无机氮和磷酸盐较高的一个原因。春季是浮游植物大量繁殖期,而且养殖海带还未收获,它们对营养盐的吸收,使整个海区营养盐水平很低。

8月份表层溶解无机氮浓度范围在 $0.73 \mu\text{mol/L}$ ~ $5.12 \mu\text{mol/L}$ 。沿岸1、4、5、6号站略高,9号站极高,其中硝酸盐占了87%,其来源不太清楚。除9号站外,其他站位表层氨氮占无机氮的67%,硝酸氮占28%,亚硝酸氮只占5%,仍以氨氮为主,但硝酸氮的比例有所升高。表层磷酸盐浓度范围在 $0.11 \mu\text{mol/L}$ ~ $0.26 \mu\text{mol/L}$,平均为 $0.16 \mu\text{mol/L}$,它的分布以金沟寨附近的4号站为中心,由沿岸向外递减。表层硅酸盐浓度范围在 $0 \sim 1.10 \mu\text{mol/L}$,平均为 $0.47 \mu\text{mol/L}$,比5月份略低,西南沿岸港口外1号站含量较高。1998年夏季扇贝由东向西大量死亡,而金沟寨附近养殖区扇贝长势略好,溶解无机氮和磷酸盐的分布与扇贝长势状况分布较为一致。相关性分析表明无机氮和磷酸盐与叶绿素a有较好的正相关,相关方程为

$$\text{DIN} = 0.1 \text{ Chl-a} + 0.80 \quad r = 0.716 \quad (1)$$

$$\text{PO}_4\text{-P} = 0.025 \text{ Chl-a} + 0.11 \quad r = 0.826 \quad (2)$$

夏季海带等大型藻类已经收获,海水中的营养盐主要由浮游植物吸收。

11月份表层溶解无机氮浓度范围在 $3.13 \mu\text{mol/L}$ ~ $13.24 \mu\text{mol/L}$,平均 $6.61 \mu\text{mol/L}$,由沿岸向外递减。氨氮浓度范围在 $0.64 \mu\text{mol/L}$ ~ $9.41 \mu\text{mol/L}$,平均 $3.37 \mu\text{mol/L}$,最低值主要出现在湾外的3号站和12号站,而在沿岸养殖区的1、4、6、9号站氨氮均很高。硝酸氮浓度范围在 $1.07 \mu\text{mol/L}$ ~ $2.93 \mu\text{mol/L}$,平均 $1.66 \mu\text{mol/L}$,由东部沿岸向外递减分布。亚硝酸氮浓度范围在 $1.15 \mu\text{mol/L}$ ~ $2.03 \mu\text{mol/L}$,平均 $1.58 \mu\text{mol/L}$,其分布与硝酸氮相似。该季节氨氮占总溶解无机氮的43%,硝酸氮占了28%,亚硝酸氮占了29%,硝酸氮与亚硝酸氮浓度及比例均有所增高。表层磷酸盐浓度范围在 $0.60 \mu\text{mol/L}$ ~ $1.06 \mu\text{mol/L}$,平均为 $0.78 \mu\text{mol/L}$,其分布沿岸向外海递减。表层硅酸盐浓度范围在 $8.77 \mu\text{mol/L}$ ~ $21.36 \mu\text{mol/L}$,平均为 $12.77 \mu\text{mol/L}$,以4号为中心由沿岸向外递减。由于养殖区大部分集中在沿岸带,底层有机质含量较高,经矿化分解所释放的无机营养盐较高,受强烈的风浪流的作用,底部沉积物中的营养盐被输送到上层,而使水体中营养盐浓度增加。相关性分析显示,硝酸氮、亚硝酸氮、氨氮和磷酸盐与盐度和温度呈负相关,

$$\text{NO}_3\text{-N} = -5.01 S + 161.5 \quad r = 0.897 \quad (3)$$

$$\text{NO}_3\text{-N} = -1.15 T + 14.0 \quad r = 0.845 \quad (4)$$

$$\text{NO}_2\text{-N} = -2.06 S + 67.3 \quad r = 0.879 \quad (5)$$

$$\text{NO}_2\text{-N} = -0.43 T + 6.17 \quad r = 0.750 \quad (6)$$

$$\text{NH}_4\text{-N} = -22.3 S + 715 \quad r = 0.683 \quad (7)$$

$$\text{NH}_4\text{-N} = -7.24 T + 81.1 \quad r = 0.912 \quad (8)$$

$$\text{PO}_4 = -1.17 S + 37.92 \quad r = 0.701 \quad (9)$$

$$\text{PO}_4 = -0.37 T + 4.67 \quad r = 0.956 \quad (10)$$

这说明秋季营养盐分布受物理混合作用影响较大。

1998年3月,营养盐仍保持较高浓度水平,表层溶解无机氮浓度范围在 $6.96 \mu\text{mol/L}$ ~ $32.12 \mu\text{mol/L}$,平均 $12.12 \mu\text{mol/L}$ 。平均氨氮占55%,硝酸氮占了42%,亚硝酸氮占了3%,仍以氨氮为主。表层磷酸盐浓度范围在 $0.47 \mu\text{mol/L}$ ~ $1.06 \mu\text{mol/L}$,平均为 $0.68 \mu\text{mol/L}$ 。表层硅酸盐浓度范围在 $3.54 \mu\text{mol/L}$ ~ $11.97 \mu\text{mol/L}$,平均为 $8.15 \mu\text{mol/L}$ 。无机氮、磷酸盐及硅酸盐的分布由西北向东南递减,1号站的三氮、磷酸盐及硅酸盐浓度均为最高值,氨氮为 $23.56 \mu\text{mol/L}$,硝酸氮为 $7.57 \mu\text{mol/L}$,亚硝酸氮为 $0.98 \mu\text{mol/L}$,磷酸盐为

1.06 $\mu\text{mol/L}$, 硅酸盐为 11.97 $\mu\text{mol/L}$ 。同期表层盐度调查显示 1 号站盐度最低, 比邻近站位低 0.2~0.4, 这说明港口附近大量排入的污水还没有很好地疏散, 从而造成该站位较高的营养盐浓度。

吴耀泉等 1994 年报道, 1993 年 8 月烟台芝罘湾的无机氮浓度范围在 0.14 $\mu\text{mol/L}$ ~4.86 $\mu\text{mol/L}$, 磷酸盐浓度范围在 0.13 $\mu\text{mol/L}$ ~0.35 $\mu\text{mol/L}$; 李妍^[1]报道, 1994 年 8 月无机氮浓度范围在 3.93 $\mu\text{mol/L}$ ~13.79 $\mu\text{mol/L}$, 磷酸盐浓度范围在 0.16 $\mu\text{mol/L}$ ~5.26 $\mu\text{mol/L}$ 。相比之下 1997 年夏季的无机氮和磷酸盐含量要低。这可能由于调查海区位于芝罘湾东侧, 排污口相对芝罘湾要少, 另外该年为旱年, 由径流输入的营养盐相对较少的原故。与同期的胶州湾营养盐相比, 在春、夏季, 溶解无机氮比胶州湾低 6~8 倍, 磷酸盐低 3~5 倍, 硅酸盐低 2 倍; 秋季溶解无机氮比胶州湾低 2 倍, 但冬季则高两倍; 秋、冬季磷酸盐和硅酸盐均比胶州湾高。四十里湾的叶绿素 *a* 的含量比胶州湾要低 2~3 倍, 在山东沿海属中等水平。目前四十里湾扇贝、贻贝和海带养殖面积比 1993 年和 1994 年增加了两倍多, 如此大面积的养殖, 当外源输入的营养盐满足不了养殖生态系中生物所需时, 必然会影响养

殖生物的生长, 造成减产。

2.2 营养盐的垂直分布

烟台四十里湾是一个浅水湾, 除湾口附近超过 10 m, 最深达 20 m 以上外, 其余海区水深均在 10 m 以内。从表 1 不同深度间营养盐浓度标准偏差来看, 4 个航次磷酸盐垂直分布相对较为均匀。溶解无机氮和硅酸盐的垂直分布春、夏季相对秋、冬季垂直浓度标准偏差要低, 这可能是春、夏季浮游植物及大型养殖藻类大量吸收营养盐, 使整个水体的营养盐处于低水平的原故。秋季溶解无机氮多数站位底层要高于表层, 硅酸盐各站位表底高低不一, 而冬末春初时节溶解无机氮和硅酸盐多数站位表层反而高于底层, 这两个航次的盐度垂直分布与溶解无机氮正好相反, 秋季表层高于底层, 冬末春初底层高于表层, 由此看来溶解无机氮和硅酸盐垂直分布除生物活动影响外, 与海流运动及混合程度有密切关系。

2.3 营养盐的季节变化

溶解无机氮由春季至次年的冬末春初季节不断升高, 其变化趋势与叶绿素 *a* 变化正相反, 而磷酸盐和硅酸盐与溶解无机氮变化略有不同, 冬末春初季节比秋季有所降低, 如表 2 所示。

表 1 不同深度间营养盐浓度标准偏差

Tab. 1 The standard deviation of nutrients in different depth

时间 (年、月)	DIN($\mu\text{mol/L}$)		DIN($\mu\text{mol/L}$)		DIN($\mu\text{mol/L}$)	
	范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值
1997.5	0.020.55	0.23	00.03	0.02	02.72	0.92
1997.8	0.042.92	0.48	00.08	0.02	0.141.29	0.62
1997.11	0.033.61	1.05	00.52	0.06	0.185.85	2.00
1998.3	014.67	2.15	00.31	0.06	0.143.31	1.13

2.4 N、P、Si 原子比值

烟台四十里湾浮游植物主要种群为硅藻。当营养盐总水平足以满足浮游植物生长时, 海洋硅藻的

Si : N : P 的原子比为 16 : 16 : 1。Justic 等^[2]和 Dortch 等 1992 年在总结前人工作的基础上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 N/P > 22 则磷酸盐限制; (2) 若 N/P < 10 和 Si/N > 1 则溶解无机氮限制; (3) 若 Si/P < 10 和 Si/N < 1 则溶解无机硅限制。但化学计量限制因素成立, 不一定实际限制因素就成立, 还要通过比较环境营养盐浓度与可能限制营养盐吸收的浓度后才能确定。根据 Brown 等 1979 年和 Nelson 等 1990 年的营养盐吸收动力学研究,

表 2 DIN、PO₄-P、SiO₄-Si 平均浓度及 N/P、Si/N、Si/P 平均原子比值

Tab. 2 The average concentration of DIN, phosphate, silicate and the average atomic ratios of N/P, Si/N, Si/P

时间 (年、月)	DIN ($\mu\text{mol/L}$)	PO ₄ -P ($\mu\text{mol/L}$)	SiO ₄ -Si ($\mu\text{mol/L}$)	N/P	Si/N	Si/P
1997.5	1.05	0.15	0.82	7.1	0.9	5.2
1997.8	1.22	0.16	0.86	7.5	0.8	5.2
1997.11	6.87	0.77	12.49	8.7	2.1	16.6
1997.3	10.36	0.65	7.79	15.5	0.8	11.9

Si = 2 $\mu\text{mol/L}$, DIN = 1 $\mu\text{mol/L}$, P = 0.1 $\mu\text{mol/L}$ 可作为浮游硅藻生长的最低阈值。表 2 显示出烟台四十里湾无机氮、磷酸盐及硅酸盐的浓度及 N/P、Si/N、Si/P 比值。从 4 个航次的 N/P 和 Si/P 比值来看,该海域相对来说不缺磷,氮和硅相对磷是不足的。在春、夏季无机氮、磷酸盐接近硅藻的生长的最低阈值,而硅酸盐小于最低阈值, Si/N 及 Si/P 均符合硅限制条件,这说明春、夏季硅藻的生长受硅限制。秋季及冬末春初季节,

各种营养盐浓度均高于最低阈值,从三种比例来看,秋季氮是硅藻的相对限制性因子,而冬末春初时硅是相对限制性因子。🌊

参考文献

- 1 李妍、林影. 海洋环境科学, 1997, 16(2): 60~66
- 2 Justic, D., Rabalais, N. N., et al. . *Estuarine Coastal Shelf Sci.*, 1995, 40: 339~356

DISTRIBUTION AND VARIATION OF NUTRIENTS IN THE YANTAI SISHILI BAY CULTIVATED WATER

ZHAO Wei-hong JIAO Nian-zhi ZHAO Zeng-xia

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

Received: Mar., 20, 1999

Key Words: Yantai Sishili Bay, Cultivated water, Nutrients, Distribution, Variation

Abstract

Four seasonal investigations of nutrients carried out in May, August, November of 1997 and March of 1998 in Yantai Sishili Bay cultivated water showed that the spacial and temporal distributions of nutrients were influenced by the continental input, activities of cultivated and natural organism etc. The analysis of inorganic nutrients structure indicated silicon limited the phytoplankton growth in spring and summer. The relative limiting factor to phytoplankton growth was nitrogen in autumn, but silicon in end of winter.

(本文编辑:张培新)