胶州湾浮游植物对营养盐添加的响应关系*

王 勇[1] 焦念志[2]

([1]青岛市环保局 266003)
([2]厦门大学 361005)

提要 于1998年8月、11月、1999年2月,在胶州湾采用现场实验的方法初步研究了浮游植物对营养盐添加的时间响应效果。分级叶绿素a的结果显示,网采浮游植物(netphytoplankton,简称net-,20~200 μm)对同时添加氮(N)与磷(P)营养盐有最明显的响应;1998年8月微型浮游植物(nanophytoplankton,简称nano-,2~20 μm)对铁(Fe)或N+P的添加有比较明显的响应,在1998年11月与1999年2月则几乎无营养盐限制nano-的生长;1998年8月与1999年2月超微型浮游植物(picophytoplankton,简称pico-,<2 μm)对N+P或N的添加有较明显的响应。

关键词 胶州湾,浮游植物,营养盐限制

在大多数水体生态系统中限制浮游植物生长的主要营养元素是N或P,而且N,P营养盐对浮游植物的限制也是海洋生态学研究的一个主要方面[2]。在真光层由于浮游植物生长的消耗,N,P营养盐含量经常检测不出。Harrison等[3]1990年的现场实验结果证实,在中国的厦门湾,有比较显著的P限制作用,而由于中国的主要河流输入营养盐比例不均衡(N/P达到150∶1),所以他推测,P限制着中国沿海海区的初级生产力。在早期的马尾藻海区添加Fe的富营养实验中浮游植物生物量显著增加[3]。近期的研究证实Fe的可利用性,可能控制着海洋中浮游植物的生产力与种类组成[5,6]。沿岸海水中微量元素对浮游植物的限制研究很少开展,这主要是因为靠近陆地,来源相对较多。少数微量元素现场实验也只是为了证实大量营养盐的限制。Rudek等[7]1991年在北卡罗来纳Lower Neuse River Estuary(LNRE)的现场实验中证实,微量元素,无论是单独添加还是与N,P同时添加,都对浮游植物的生长无促进作用。

1 材料与方法

1.1 采样站点描述

胶州湾位于黄海中部沿岸,属暖温带季风性气候,又兼海洋气候特点,温和湿润,四季分明,代表着太平洋西岸北温带海湾生态系统的主要类型。胶州湾自然条件优越,水域生产力高,生物繁茂,具有黄、渤海沿岸水域环境特征和生物区系类型特点,是一个典型的温带半封闭、中型、浅海湾,是一个相对独立的海湾生态系统。青岛市环胶州湾而建,青岛市工农业的高速发展给胶州湾的生态环境带来巨大的冲击,使其生态环境受损,诱发生态环境发生了局部退化。因此,胶州湾不仅是进行海湾生态系统结构与功能研究的理想水域,而且也是探讨人类活动的影响,进行受损或退化生态系的恢复和重建研究及生态工程建设优化模式示范的优良场所。

每季度进行的胶州湾生态调查共设10个站点,其中1个位于湾外,1个位于湾口,其余8个在湾内。添加营养盐的现场实验研究开展于湾中央的5号站(120°15′E,36°6′N)。

1.2 采样与分析

1.2.1 叶绿素a的测定 水样用塑料桶采集,每粒级(<2 μm、2~20 μm、20~200 μm)取300~500 ml水样。先用20 μm的筛绢,2 μm的Poretics公司聚碳酸脂膜对水样进行分级,每粒级取250 ml水样在小于13 332 Pa的压力下过滤(用25 mm Whatman GF/F玻

* 中国科学院知识创新工程项目:典型湖泊与海湾富营养化机理及生态系统响应的研究 KZCX2-403号。
第一作者:王勇,出生于1973年,博士。研究方向为海洋生态学。E-mail:wangyong@ms.qdio.ac.cn
收稿日期:2001-11-26;修回日期:2002-01-07

璃纤维滤膜收集叶绿素 a), 滤液在 - 20°C 黑暗保存。叶绿素 a 含量采用 Welschmeyer[8] 1994 年的方法测定。先用 90%的丙酮在冰箱的黑暗条件下提取色素 24 ~ 30 h, 然后用岛津公司的 RF-5301 型荧光分光光度计测定, 标准曲线用 Sigma 公司的标准叶绿素 a 样品制作, 在这之前, 该标准样品用三波长法标定。

1.2.2 生物实验设计 采集表层水 30 ~ 40 L, 这些现场海水先过 200 μm 筛绢, 以去除大型浮游动物的显著影响。采用 5 L 的玻璃瓶对 N, P, Fe 的上行效应进行研究。共分为 6 种实验处理: (1) 对照(C); (2) 低 N 添加组(LN: 10 μmol/L NO_3^-); (3) 高 N 添加组(HN: 20 μmol/L NO_3^-); (4) P 添加组(P: 2 μmol/L PO_4^{3-}); (5) N 与 P 同时添加组 (N+P: 10 μmol/L NO_3^- + 2 μmol/L PO_4^{3-}); (6) Fe 添加组(Fe: 7 nmol/L Fe)。将瓶置于流水控温槽中模拟现场培养 8 d, 每 2 d 取样测定叶绿素 a。

表 1 胶州湾出海期间 5 号站表层的营养盐、叶绿素 a 与水文状况(1998 年 8 月至 1999 年 2 月)

Tab.1 Status of nutrient, chlorophyll-a and hydrological factors in surface seawater at Sta. 5 during Jiaozhou Bay cruises (from August, 1998 to February, 1999)

采水时间 (年-月)	水深 (m)	温度 (℃)	盐度	水色	透明度 (m)	NH_4^+ (μmol/L)	NO_2^- (μmol/L)	NO_3^- (μmol/L)	PO_4^{3-} (μmol/L)	SiO_3^{2-} (μmol/L)
1998-08	15	27.20	31.65	13	3	4.49	1.67	7.88	0.20	4.03
1998-11	15	16.98	31.84	19	1	4.97	3.95	7.10	0.55	5.35
1999-02	14	5.20	31.89	16	1.4	5.66	0.45	1.74	0.41	2.71
平均值	14.7	16.46	31.79	16.0	1.8	5.04	2.02	5.57	0.39	4.03

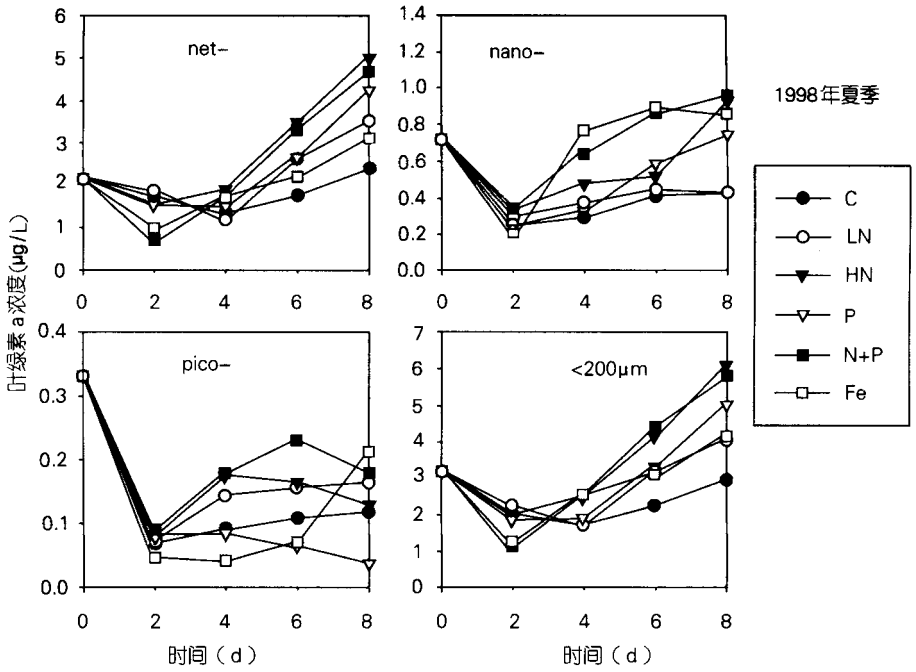

图 1 1998 年夏季胶州湾 net-, nano-, pico- 与浮游植物群落(<200 μm)对现场营养盐添加的响应

Fig.1 Responses of net-, nano-, pico- and phytoplankton community (<200 μm) to nutrient enrichment in *in-situ* experiments in Summer, 1998 in Jiaozhou Bay

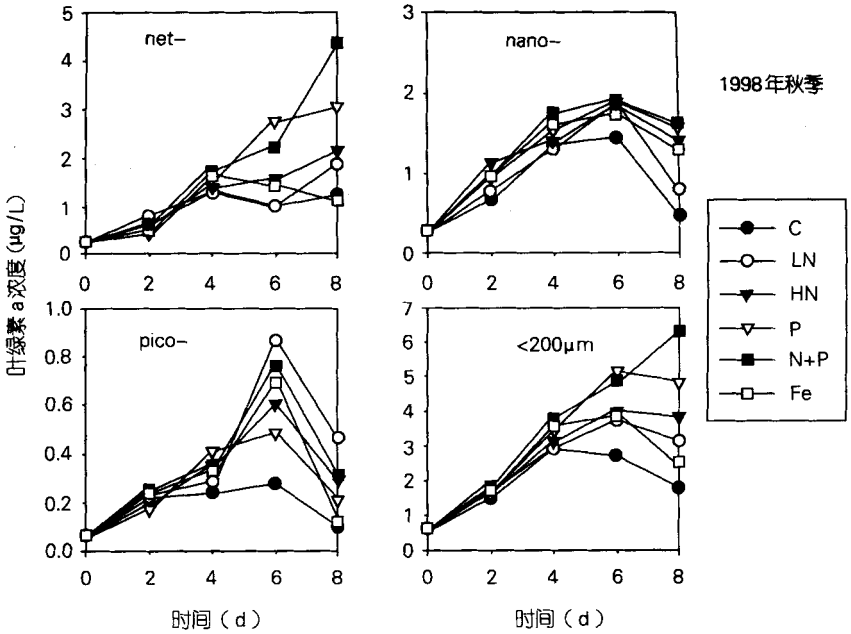

图 2　1998 年秋季胶州湾 net-,nano-,pico- 与浮游植物群落(< 200 μm)对现场营养盐添加的响应

Fig.2　Responses of net-,nano-,pico- and phytoplankton community (< 200 μm) to nutrient enrichment in *in-situ* experiments in Autumn, 1998 in Jiaozhou Bay

2　结果

2.1　采样站点理化条件

根据 1998 年 8 月、11 月、1999 年 2 月的调查结果, 5 号站平均水深 14.7 m, 表层平均的 NH_4^+ - N浓度为 5.04 μmol/L, NO_3^- - N浓度为 5.57 μmol/L, NO_2^- - N 浓度为 2.02 μmol/L, PO_4^{3-} - P 浓度 0.39 μmol/L, SiO_3^{2-} - Si 浓度为 4.03 μmol/L①。平均水色为 16,平均透明度为 1.8 m。表层平均温度为 16.46°C, 平均盐度为 31.79(表 1)。

2.2　浮游植物对营养盐添加的响应效果

1998 年夏季, 2 d 内各瓶中 net- 叶绿素 a 都下降, 第 2 至第 4 天 C, LN实验组与 P 实验组继续下降, 其他各组开始增加, 第 4 至第 8 天各组都增加; 2 d 内各组 nano- 叶绿素 a 都下降, 第 2 天至第 6 天内都增加, LN与 Fe 实验组中叶绿素 a 在第 6 至第 8 天下降, 其他各组继续增加; 2 d 内 pico- 叶绿素 a 都下降, 第 2 至第 4 天内, Fe 实验组叶绿素 a 继续下降, 其他各组开始增加, 第 4 至第 6 天内, P 与 HN实验组叶绿素 a 下降, 其他各组增加, 第 6 至第8 天内, P, N+ P 实验组与 HN实验组叶绿素 a 下降, 其他各组增加(图 1)。

1998 年秋季的实验结果显示, 4 d 内各瓶中 net- 叶绿素 a 都增加, 第 4 至第 8 天, N+ P, HN实验组与 P 实验组继续增加, Fe 实验组一直下降, 对照组与 LN 实验组先下降再上升; 6 d 内 nano- 各组叶绿素 a 都增加, 在第 6 至第 8 天都下降; pico- 与 nano- 的趋势一致(图 2)。

1999 年冬季, 2 d 内各瓶中 net- 叶绿素 a 都下降, 第 2 至第 8 天各组叶绿素 a 都增加, N+ P 与 HN实验组增加最显著; 4 d 内各组 nano- 叶绿素 a 都增加, 第 4 至第 8 天内对照与 Fe 组都下降, 其他各组继续增加; 2 d 内 pico- 叶绿素 a 都下降, 第 2 至第 8 天内, 各组都增加(图 3)。

2.3　培养前后各粒级浮游植物叶绿素 a 组成比例的变化

1998 年夏季, 初始时刻 net- 叶绿素 a 占总叶绿素 a 的比例最大, 达到 67.2%, pico- 最小, 仅为 10.4%; 与初始值比较, 各组 net- 叶绿素 a 占总叶绿素 a 的比例都增加, HN实验组增加最显著, 达到 83.5%; 除 Fe

① 数据来源于赵卫红。

表 2　1998 年夏季、秋季与 1999 年冬季胶州湾各粒级叶绿素 a 占总叶绿素 a 百分比的比较

Tab.2　Comparing of percentage of size-fractionated Chl a to bulk Chl a in Summer, Autumn, 1998 and Winter, 1999 in Jiaozhou Bay

采水日期(年-月)	处理	net-占总叶绿素 a 的百分比(%)	nano-占总叶绿素的百分比(%)	pico-占总叶绿素 a 的百分比(%)
1998-08	D_0	67.2	22.5	10.4
	C	77.0	18.2	4.8
	LN	81.3	13.8	4.9
	HN	83.5	12.5	4.0
	P	80.2	17.8	2.0
	N+P	74.9	19.9	5.2
	Fe	69.2	28.6	2.2
1998-11	D_0	43.2	46.4	10.4
	C	36.7	53.2	10.1
	LN	26.7	50.2	23.1
	HN	38.9	45.9	15.2
	P	53.5	37.0	9.5
	N+P	45.3	39.0	15.7
	Fe	37.1	45.0	17.9
1999-02	D_0	46.6	20.2	33.2
	C	26.5	50.2	23.3
	LN	28.1	56.4	15.5
	HN	33.2	49.4	17.5
	P	25.0	59.8	15.2
	N+P	32.2	50.5	17.3
	Fe	29.9	52.0	18.0

注：D_0：初始值；C，LN，HN，P，N+P，Fe：第 8 天叶绿素 a 浓度

实验组外，nano-叶绿素 a 占总叶绿素 a 的比例都下降；培养后期各组 pico-叶绿素 a 占总叶绿素 a 的比例都较初始值低；在培养后期，各组仍然是 net-占总叶绿素 a 的比例最大(表 2)。

1998 年秋季，初始时刻 nano-与 net-叶绿素 a 占总叶绿素 a 的比例最大，分别为 46.4%与 43.2%；与初始值比较，实验后期仅 P 与 N+P 实验组 net-叶绿素 a 占总叶绿素 a 的比例增加，P 实验组增加最显著，达到 53.2%；仅 C 与 LN 实验组 nano-叶绿素 a 占总叶绿素 a 的比例略有增加；除 C 与 P 实验组 pico-叶绿素 a 占总叶绿素 a 的比例下降外，其他各组均增加，LN 实验组增加

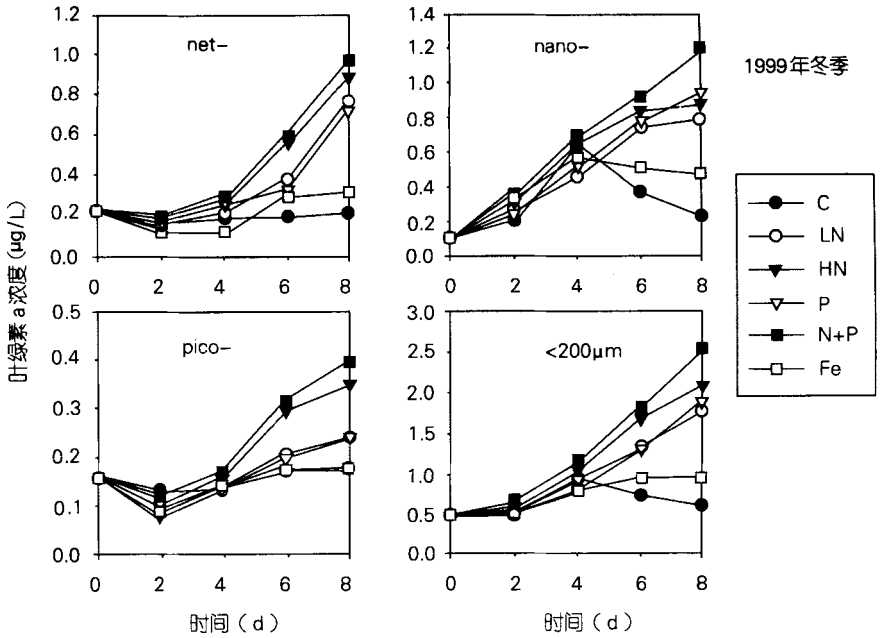

图 3　1999 年冬季胶州湾 net-，nano-，pico-与浮游植物群落(<200 μm)对现场营养盐添加的响应

Fig.3　Responses of net-, nano-, pico- and phytoplankton community (<200 μm) to nutrient enrichment in *in-situ* experiments in Winter, 1999 in Jiaozhou Bay

最显著,达到 23.1%;在培养后期,P与 N+P实验组已经是 net-占总叶绿素 a的比例最大(表 2)。

1999 年冬季,初始时刻 net-叶绿素 a 占总叶绿素 a的比例最大,为 46.6%,nano-占的比例最小,仅为 20.2 %;与初始值比较,培养后期各组 net-叶绿素 a 占总叶绿素 a的比例都下降,P实验组仅占 25.0%;各组 nano-叶绿素 a 占总叶绿素 a的比例都增加,P实验组增加最显著,达到 59.8%;各组 pico-叶绿素 a 占总叶绿素 a的比例都下降,P实验组下降最显著,仅为 15.2%;在培养后期,各组已经是 nano-叶绿素 a 占总叶绿素 a的比例最大(表 2)。

3 讨论

胶州湾主要的无机 N种类(硝酸盐与铵盐),从 60 年代到 80 年代增加了 2.4 倍,90 年代增加了 0.6 倍。P从 60 年代到 80 年代增加了 1.4 倍,到 90 年代早期增加了 2.7 倍,最近几年又降低到略高于 60 年代的水平。与 LNRE 等典型的河口湾比较,胶州湾属于营养盐含量较高的海区。

1998 年 8 月至 1999 年 2 月胶州湾常规采样结果进行分析发现:在胶州湾,各种营养盐的添加都对浮游植物的生长都有促进作用,但 Fe 的效果最不显著。对 net-生长促进作用最大的营养盐种类为 NO_3^--N与 P,这两种营养盐无论单独还是共同添加,都明显促进了 net-的生长;NO_3^--N与 P对 nano-生长都有促进作用,但作用不显著;同时添加 N+P对 pico-生长促进作用最明显,但单独添加 P对 pico-的促进作用远小于 N单独添加,这说明仅 N对 pico-的生长有限制作用;对小于 200 μmol/l 浮游植物生长促进作用最大的营养盐种类为 NO_3^--N与 P。

从叶绿素 a的结果来看,nano-与 net-是胶州湾浮游植物生物量的主要组成部分,这与吴玉霖[1]1995 年的结果相似。1998 年 8 月与 1999 年 2 月的航次中是 net-占浮游植物叶绿素的优势地位,在 1998 年 11 月的航次中 net-与 nano-占总叶绿素的比例接近。伴随着营养盐的添加,一些实验中浮游植物的群落结构组成发生了变化,但在 3 次现场实验中,培养后期仍然是 nano-或 net-占浮游植物生物量的比例最大。

一些实验中叶绿素 a的结果显示,可能在培养过程中有"瓶子效应"的影响,这一点在一些实验中比较明显。Rudek 等[7]1991 年指出,"瓶子效应"包括生物在瓶壁上的生长、自然食物网的变化以及封闭的生物群落与横向或纵向营养盐流通的隔离。这些情况都有可能发生在本实验中。

主要参考文献

1 吴玉霖、张永山。胶州湾叶绿素 a和初级生产力的分布特征,见:董金海。胶州湾生态学研究,北京:科学出版社,1995。137~149

2 Pedersen F.M., Borum J.. Nutrient control of algal growth in estuarine waters. Nutrient limitation and the importance of nitrogen requirements and nitrogen storage among phytoplankton and species of macroalgae, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 1996,142: 261~272

3 Harrison P.J., Hu M.H., Yang Y.P. *et.al.*. Phosphate limitation in estuarine and coastal waters of China, 1990, *J.Exp.Mar.Biol.Ecol.*, 140:79~87

4 Ryther J.H., Guillard R.R.L.. Enrichment experiments as a means of studying nutrients limiting to phytoplankton production, *Deep-Sea Res.*, 1959,6:65~69

5 Boyd P.W., Muggli D.E., Varela D.E. *et.al.*. *In vitro* iron enrichment experiments in the NE subarctic Pacific, *Mar.Ecol.Prog.Ser.*,1996, 136: 179~193

6 Hutchins D.A., Bruland K.W.. Iron-limited diatom growth and Si: N uptake ratios in a coastal upwelling regime, 1998, Nature, 393:561~564

7 Rudek J., Paerl H.W., Mallin M.A. *et.al.*. Seasonal and hydrological control of phytoplankton nutrient limitation in the Lower Neuse River Estuary, North Carolina, *Mar.Ecol.Prog.Ser.*, 1991, 73:133~142

8 Welschmeyer N.A.. Fluorometeric analysis of chlorophyll a in the presence of chl-b and phaeopigments, *Limnol. Oceanogr.*, 1994,39: 1985~1992

RESPONSE OF PHYTOPLANKTON TO NUTRIENT ADDITION IN JIAOZHOU BAY

WANG Yong[1] JIAO Nan-zhi[2]
([1] *Environmental Protection Bureau of Qingdao* 266003)
([2] *Xiamen University* 361000)

Received: Nov., 26, 2001
Key Words: Jiaozhou Bay, Phytoplankton, Nutrient limitation

Abstract

Preliminary *in-situ* experiments were conducted in August、November, 1998 and February, 1999 in Jiaozhou Bay to investigate phytoplankton time-course responses to nutrient addition. Size-fractionated chlorophyll-a results showed that net-phytoplankton(net-, 20 ~ 200 μmol/L) had most significant response to N+P addition; Nanophytoplantkon(nano-, 2 ~ 20 μm) has significant response to N+P or Fe addition in August, 1998, but no nutrient limited nano-growth in November, 1998 and Februray, 1999; Picophytoplankton showed a significant positive response to N+P addition in August, 1998 and Februray, 1999.

(本文编辑:张培新)