

印度洋海水营养盐添加模拟实验中浮游植物生长的营养盐限制作用

唐松

(中国科学院 广州地球化学研究所, 广东 广州 510640)

摘要: 借助“中国首次环球科学考察航次”, 在印度洋海区进行了 N、Fe、N+Fe 以及 N+Fe+P 的营养盐添加模拟实验。通过对实验过程中水体营养盐浓度、叶绿素 a(Chl-a)浓度以及温度等参数进行分析, 探讨了添加不同营养盐对该实验海区浮游植物生长的影响。结果表明, N 的添加会引起浮游植物的快速爆发, 而单独添加 Fe 并不能刺激浮游植物快速生长, N、P 联合作用对浮游植物生长的影响远远大于单独 N 的作用。另外, 在实验海区浮游植物优先利用海水中的硝酸盐, 在硝酸根耗尽后, 海水中可被利用的 P 会促进浮游植物的生长。实验过程中水体 N/P 比值的变化同叶绿素 a 浓度以及浮游植物生长速度(R)没有可对比性, 而且 N/P 比值与后两者之间的相关性都差, 所以认为水体中 N/P 比值并不能单独决定浮游植物生长。此外, 实验水体温度同 Chl-a 浓度和 R 值之间相关性分析表明, 水体温度虽对浮游植物生长有重要作用, 但不能控制浮游植物生长。

关键词: 印度洋; 营养盐; 模拟实验; 限制作用

中图分类号: X171

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2010)07-0034-07

浮游植物生长是表层海水中营养物质消耗的第一步, 也是生物泵作用的基础, 可影响温室气体^[1]。因此, 它不但影响着局部的海水营养盐分布状态, 同时影响海洋乃至全球碳循环。海水中的营养盐既包括 N、P、Si 等常量营养盐, 也包含 Fe 等微量营养盐, 它们对浮游植物的生长有着明显的控制作用。长期以来, 海水中营养盐对浮游植物生长的影响一直是海洋生态学研究的重要领域。

目前针对不同海区的营养盐限制作用已经进行了大量研究工作, 开展营养盐添加模拟实验为确定不同海区营养盐对浮游植物生长的影响提供了直接证据。现在已经认识到, 在多数开放大洋, 浮游植物的生长主要受表层海水中可利用的 N 和 P 浓度限制。在东热带太平洋海区的贫营养区域^[2, 3], 贫营养的南太平洋亚热带海区^[4]以及太平洋^[5]的实验结果表明, N 是这些海区最重要的限制营养盐。同时, 也有关于 P 对浮游植物生长限制的报道^[6, 7]。中国的大亚湾海域^[8, 9]、台湾海域上升流区^[10]以及东、黄海典型海区^[11]的营养盐添加模拟实验表明, N 和 P 对该海区浮游植物生长都有限制作用。在胶州湾中央海水中同时添加 N 和 P 时, 浮游植物生长最显著^[12, 13]。此外, 海水中营养盐对浮游植物生长的限制作用表现出明显的季节性变化。例如, 在切萨皮克湾的实验证实, 在春季为 P 或者 Si 限制, 而在夏季为 N 限制^[14, 15]。

作为硅藻生长必需的元素, Si 元素的限制作用也被多次报道^[16, 17]。此外, 关于 Fe 对浮游植物生长限制作用的研究也取得了瞩目的成果。在赤道太平洋^[18], 南大洋^[19]以及亚北极北太平洋^[20]这三大高营养盐叶绿素带进行的 Fe 添加实验, 都证实了在这些海区的 Fe 限制假说。

根据已有研究可以看出, 有关印度洋海区的营养盐添加模拟实验报道较少, 而且对于 Fe 影响浮游植物生长的研究多集中在 3 个 HNLC 地区, 很少见到其他海区的现场报道。作者借助 2005 年中国首次环球航次, 在印度洋现场进行了 N、Fe、N+Fe、N+Fe+P 的营养盐添加模拟实验, 获得了浮游植物生长过程中营养盐浓度、叶绿素 a 浓度、温度等参数的数据, 为研究印度洋实验过程中营养盐添加对浮游植物生长的影响提供了宝贵的现场材料。

1 材料和方法

1.1 材料来源及实验装置

2005 年 12 月, 借助“中国首次环球科学考察”航

收稿日期: 2008-09-04; 修回日期: 2008-12-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40903033, 40403004)

作者简介: 唐松(1979-), 男, 陕西渭南人, 博士, 主要从事海洋地球化学研究, 电话: 020-85290123, 15800222986, E-mail: tangsong@gig.ac.cn

次, 在印度洋海区 69.80°E, 24.29°S 采取表层海水, 进行了现场营养盐添加模拟实验。表层海水背景值见表 1。营养盐添加模拟实验采用的装置主要由 4 个培养桶、一套冷却装置和一个温度控制器组成(图 1)。

培养桶体积为 500 L, 桶壁透明, 且没有封盖。冷却装置和温控器用来调节实验水体温度。该装置的设计尽可能地避免了人为因素对实验过程的干扰, 使实验条件尽量接近现场环境。

表 1 印度洋实验海水背景值

Tab. 1 Background values of the experimental water in Indian Ocean

NO ₃ -N (μmol/L)	NH ₄ -N (μmol/L)	NO ₂ -N (μmol/L)	PO ₄ ³⁻ 浓度 (μmol/L)	SiO ₃ -Si (μmol/L)	叶绿素 a 质量浓度 (mg/m ³)
0.25	0.67	0.05	0.07	-	0.03

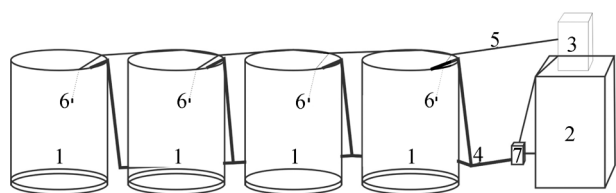


图 1 营养盐添加实验装置示意图

Fig. 1 The diagrammatic sketch of the experimental equipment

1. 培养桶; 2. 冷却机; 3. 温控器; 4. 水循环管; 5. 导线; 6. 温度探头; 7. 水管分支及阀门

1. incubation barrel; 2. cooler; 3. temperature controller; 4. water tubing; 5. conducting wire; 6. temperature detector; 7. tubing branch and water valve

为突出研究不同营养盐添加对浮游植物生长的影响, 营养盐添加的浓度比现场海水高出两个数量级, 4 个培养桶海水中具体添加营养盐信息见表 2。其中, N、P 和 Fe 的原始赋存态分别为 N (KNO₃)、P(KH₂PO₄)和 FeSO₄ · 7H₂O。

表 2 印度洋实验添加营养盐信息

Tab. 2 Information about nutrient addition in the seawater from Indian Ocean

桶号	N (mol)	P (mol)	Fe (mol)
1 号	0.005	-	-
2 号	-	-	0.001
3 号	0.005	-	0.001
4 号	0.005	0.0007	0.001

表 3 水体营养盐浓度分析条件

Tab. 3 Analytical methods for the nutrient content in the experimental water

分析内容	分析方法	检测下限	准确度
NO ₃ -N	铈-镉还原法	0.05 μmol/L	浓度为 2.0 μmol/L 时, 相对误差: ± 7%; 浓度为 10.0 μmol/L 时, 相对误差: ± 4%
PO ₄ -P	磷钼蓝法	0.02 μmol/L	浓度为 0.2 μmol/L 时, 相对误差: ± 15%; 浓度为 2.0 μmol/L 时, 相对误差: ± 3.5%;

1.2 分析方法

在进行营养盐添加模拟实验之前, 都先用采样位置海水将培养桶清洗干净。待所添加营养盐溶解并混合均匀后, 所测参数值作为模拟实验的初始值。营养盐和叶绿素 a 浓度在采样后现场分析, 整个实验过程共取样 16 次, 64 个。在多数培养桶水体中叶绿素 a 浓度出现峰值后降低到接近初始值时结束实验, 此次实验持续了 19 d。

水体营养盐分析先用 0.45 μm 醋酸滤膜过滤, 然后使用 7230G 分光光度计检测。测定方法、检测限及准确度见表 3。叶绿素 a 浓度采用荧光法进行分析, Turner 10-000R 荧光仪测量范围为 0~40 mg/L, 灵敏度 5×10⁻¹², 精度可达±0.5%。

2 结果及讨论

2.1 浮游植物生长

叶绿素 a 浓度可以代表浮游植物的生长量, 其变化速度则反映了浮游植物的生长速度。因此, 叶绿素 a 浓度是反映浮游植物生长情况最直接而且准确的参数。

图 2 显示了模拟实验中叶绿素 a 质量浓度的变化。可以看出, 4 号加 N+P+Fe 培养桶中叶绿素 a 浓度增幅最大, 1 号桶(加 N)和 3 号桶(加 N+Fe)次之, 加 Fe 的 2 号培养桶中叶绿素 a 浓度变化并不明显。1 号桶中叶绿素 a 质量浓度从第 6 天开始明显增大, 至

第 9 天达到最大值 1.01 mg/m³。之后到实验结束, 总体保持较高值, 平均值为 0.77 mg/m³。加 Fe 的 2 号培养桶中, 叶绿素 a 浓度最低且变化较小, 平均质量浓度为 0.04 mg/m³, 波动范围为 0.01~0.17 mg/m³。3 号桶中叶绿素 a 质量浓度变化在实验前 12 天与 1 号桶基本一致, 而在第 12 天后一直下降, 直至第 17 天降至 0.16 mg/m³。在 4 号培养桶中, 叶绿素 a 浓度在第 7 天突然升高, 第 8 天升至最大值 4.11 mg/m³, 随后快速下降, 直至第 17 天, 降至 0.08 mg/m³。因此, 对比各培养桶中叶绿素 a 质量浓度的变化可初步认为, 此次营养盐添加模拟实验中, Fe 对浮游植物生长影响较小, 添加 N 或者 N + P 都可快速刺激浮游植物爆发, 而且, 后者作用明显大于前者。

除了浮游植物生长量, 其生长速率的变化也是判断浮游植物生长状态的重要参数。本文根据下面的公式计算浮游植物生长速度(R):

$$R = \ln([\text{Chl-a}]_t / [\text{Chl-a}]_0) / t$$

式中, t 代表实验时间; $[\text{Chl-a}]_t$ 和 $[\text{Chl-a}]_0$ 分别代表在实验期间 t 时和初始时的叶绿素 a 浓度。

在印度洋模拟实验中, 各桶浮游植物生长速度变化(图 3)趋势基本一致, 整个实验过程可以分为 R 值升高和降低的两个阶段。1 号、3 号以及 4 号桶中浮游植物生长速度在前 8 天一直升高, 至第 8 天, R 值分别增至 0.45、0.43、0.62/d。第 8 天后, 这 3 个培养桶中浮游植物生长速度均保持下降趋势。实验结束时, 3 个培养桶中的 R 值分别为 0.21、0.08、0.10/d。4 个培养桶中的平均 R 值分别为 0.26、0.06、0.24、0.23/d, 可见, 2 号桶中浮游植物生长速度明显比其他 3 个桶中慢, 而 4 号桶中则最快。在实验过程中, 2 号桶 R 值在第 9 天最大, 为 0.20/d。各桶浮游植物生长速度的变化也显示, 4 号桶中营养盐添加对浮游植物生长影响最明显, 1 号和 3 号桶次之, Fe 的添加对浮游植物生长影响最弱。

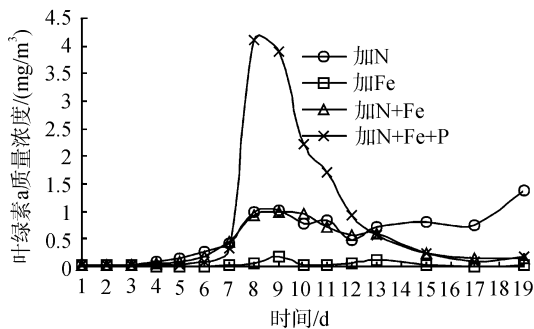


图 2 实验水体中叶绿素 a 质量浓度变化

Fig. 2 Variations of Chl-a concentration in the experimental water

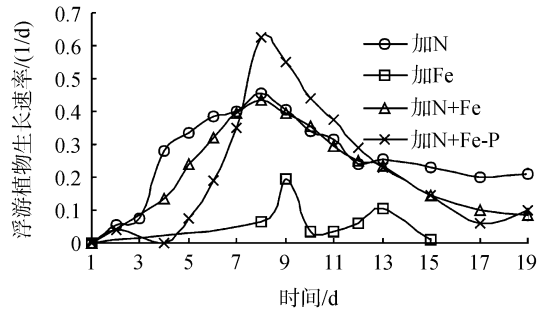


图 3 实验水体中浮游植物生长速度变化

Fig. 3 Variations of phytoplankton growth rate in the experimental water

2.2 温度对浮游植物生长的影响

图 4 显示了印度洋营养盐添加模拟实验中水体温度的变化。从图中可以看出, 此次实验过程水体温度变化明显可以分为 3 个阶段。前 7 天, 水体温度在 22.5~23.3 间波动, 第 9 天以后, 温度在 26~27 间变化。而在第 7 天至第 9 天, 温度陡然升高, 由 23.3 升至 27。因此, 实验中过程中水体温度变化可以分为两个平稳期和一个陡升期。在温度陡升期, 1 号、3 号和 4 号桶中浮游植物生长量和生长速度都发生了明显的增大。因此认为, 温度的升高对浮游植物生长有一定的促进作用。

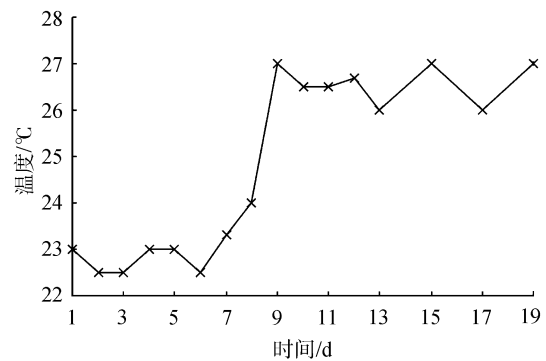


图 4 实验水体中温度的变化

Fig. 4 Variation of temperature in experimental water

实验过程中水体温度和 Chl-a 质量浓度以及温度和 R 值的相关性分析(表 4)表明: 在 1 号和 3 号桶中, 水体温度与叶绿素 a 浓度表现出较强的相关性, 而在 4 号桶中, 二者并不相关; 水体温度与浮游植物生长速度间无明显相关性。

因此认为, 实验过程中水体温度变化对浮游植物生长有重要影响, 但它不能完全控制浮游植物的生长。

表 4 温度与 Chl-a 质量浓度以及 R 值的相关性分析结果
Tab. 4 Correlations between temperature and Chl-a or the R value

参数	1号桶		3号桶		4号桶	
	C	P	C	P	C	P
温度-[Chl-a]	0.823	0.000	0.550	0.027	-	0.156
温度-R 值	-	0.770	-	0.958	-	0.311

注: C 为相关系数; P 代表显著性水平

2.3 营养盐添加对浮游植物生长的影响

2.3.1 营养盐添加对浮游植物生长量的影响

由于本文主要讨论印度洋实验海区 N 和 P 对浮游植物生长的影响, 因此仅列出 NO₃-N 和 PO₄-P 浓度进行分析(图 5)。

在印度洋营养盐添加实验过程中, 2 号桶中叶绿素 a 质量浓度并没有出现明显增大。虽然在第 9 天

其质量浓度值为 0.17 mg/m³, 高出初始值 4 倍多, 但仍处于比较低的水平, 整个实验过程中平均值为 0.04 mg/m³。另外, 对比 1 号桶和 3 号桶可以发现, 在浮游植物爆发期 3 号桶中的叶绿素 a 浓度和 1 号桶相当。因此可以认为, Fe 对于该海区海水中浮游植物的生长并无明显作用。

在 1 号桶中, 伴随叶绿素 a 质量浓度在第 9 天升至最高值, 水体中的硝酸根浓度由初始值 12.14 μmol/L 下降至 6.86 μmol/L。3 号和 4 号桶中, 叶绿素 a 质量浓度分别在第 9 天和第 8 天达到最大值, 与此同时, 水体硝酸根浓度分别由初始的 12.14 μmol/L 和 10.90 μmol/L 下降至 7.89 μmol/L 和 0.21 μmol/L。很明显, 浮游植物的生长与水体中硝酸根的消耗存在密切联系。可见, 在该实验海区 N 的添加对浮游植物生长有明显的促进作用。

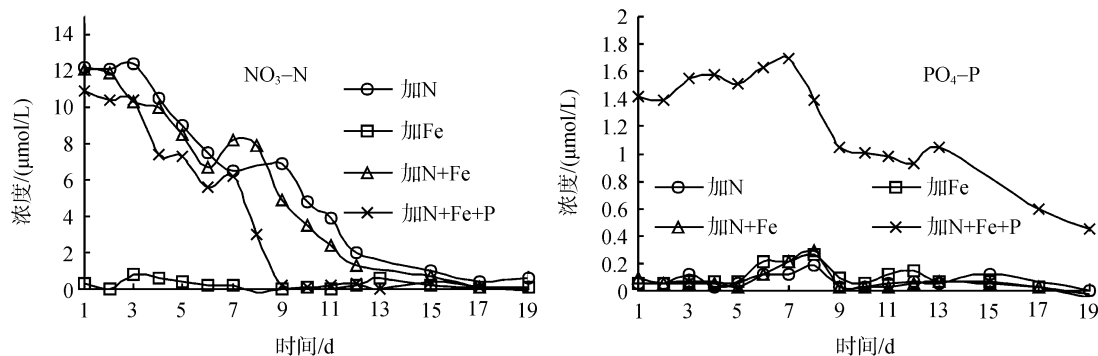


图 5 实验水体中营养盐浓度变化

Fig. 5 Variations of nutrient concentration in experimental water

对比 4 号桶和 3 号桶中的叶绿素 a 质量浓度变化可以看出, 前者叶绿素 a 质量浓度增幅明显大于后者, 4 号桶的峰值为 4.11 mg/m³, 而 3 号桶中叶绿素 a 的最大值仅为 0.98 mg/m³。如果忽略 Fe 对 3 号和 4 号两个培养桶中浮游植物生长的影响, 可以认为, 在该实验海区, 同时添加 N 和 P 对浮游植物生长的影响要强于单独添加 N。

此外, 在该海区实验过程中, 3 号桶和 4 号桶水体叶绿素 a 浓度在浮游植物爆发期后虽然一直下降, 但并没有快速降低至接近初始值。这两个培养桶中的叶绿素 a 浓度在浮游植物爆发后的下降过程都可以以实验第 13 天为界分为两个阶段。3 号桶中第 13 天后叶绿素 a 浓度降低速度明显比第 13 天前快, 而 4 号桶中叶绿素 a 浓度在后段的降低速度较前段慢。3 号桶中, 浮游植物爆发并没有完全消耗水体中的 NO₃-N, 在第 8 天, 其中硝酸根浓度仍高达

7.89 μmol/L。这为浮游植物的生存提供了需要的营养盐。事实上, 在实验第 8 天到第 13 天, 水体中硝酸盐浓度快速降低的趋势以及较高的叶绿素 a 浓度(平均值为 0.79 mg/m³)也说明了这一点。而在第 13 天后, 由于营养盐缺乏(NO₃-N 平均浓度为 0.26 μmol/L), 叶绿素 a 质量浓度由 0.60 mg/m³ 快速降至第 19 天的 0.14 mg/m³。这也进一步说明, 在该实验海区, N 是浮游植物生长重要的限制营养盐。在 4 号桶中, 浮游植物爆发已将水体中的硝酸根消耗至该海区表层水的水平, 但其中磷酸根浓度仍保持较高值。在实验第 9 天, 水体中的 NO₃-N 浓度为 0.211 μmol/L, PO₄-P 浓度为 1.05 μmol/L。在实验的第 13 天之后, 该桶水体中的叶绿素 a 平均质量浓度为 0.87 mg/m³, 比空白海水高出 10 多倍, 这说明其中还存在大量浮游植物。而水体中磷酸根浓度在第 13 天之后的明显降低, 反应了爆发期后浮游植物生长

对水体中 P 的利用。据此可以认为, 在实验海区, 浮游植物会优先吸收海水中的 $\text{NO}_3\text{-N}$, 在硝酸根耗尽时, 浮游植物的生长会受海水中 P 的影响。

2.3.2 营养盐添加对浮游植物生长速度的影响

在印度洋营养盐添加模拟实验中, 1 号、3 号和 4 号桶中浮游植物生长速度变化趋势基本一致, 都是在前 8 天快速增大, 而在第 8 天以后快速减小。在这 3 个培养桶中, 浮游植物生长速度增大的同时, 硝酸根浓度都有明显降低, 说明 N 的添加对于浮游植物生长有明显的促进作用。因为在该海区没有进行单独添加 P 的模拟实验, 所以不能确定 P 能不能独自刺激浮游植物的爆发。但在 4 号桶中, 水体叶绿素 a 浓度增大时, 伴随着硝酸根浓度的快速降低, 磷酸根浓度也在第 7~9 天从 $1.69 \mu\text{mol/L}$ 降至 $1.05 \mu\text{mol/L}$ 。可见, 实验海区浮游植物生长时, 在利用硝酸根的同时, 也会吸收磷酸盐。同时, 4 号桶中 R 值增幅大于 3 号桶。这至少说明同时添加 N 和 P 对浮游植物生长的促进作用要大于单独添加 N。对比 1 号桶和 3 号桶中浮游植物生长速度的变化可以发现, R 值的变化趋势和绝对值都非常接近。因此认为, 在印度洋营

养盐添加模拟实验中, Fe 对浮游植物生长没有明显的促进作用。

2.4 N/P 比值对浮游植物生长的影响

海洋中的浮游植物是按 Redfield 比例系数吸收海水中的营养盐促进自身生长。其中, 对 N 和 P 的吸收比例为 16 : 1。对比浮游植物生长过程中水体 N/P 值和 Chl-a 值的变化, 可以了解海水中 N/P 比值和浮游植物生长之间的关系。

图 6 显示了实验水体 N/P 值的变化特征。2 号桶中的平均 N/P 比值为 19, 浮游植物生长最不明显; 浮游植物爆发最显著的 4 号桶海水的 N/P 平均值为 4; 1 号和 3 号桶中 N/P 平均值分别为 166 和 140, 这两个桶中也出现明显的叶绿素 a 增大现象。另外, 在 1~4 号桶水体中叶绿素 a 浓度的最高值与对应时期的 N/P 比值(分别是 12、10、35 和 3)无线性相关关系, 也与水体中 N/P 比值接近 16 的程度无关。作者认为, 水体中 N/P 比值大小与浮游植物生长之间并没有密切的对应关系, 水体中营养盐绝对浓度对浮游植物生长的影响更大。

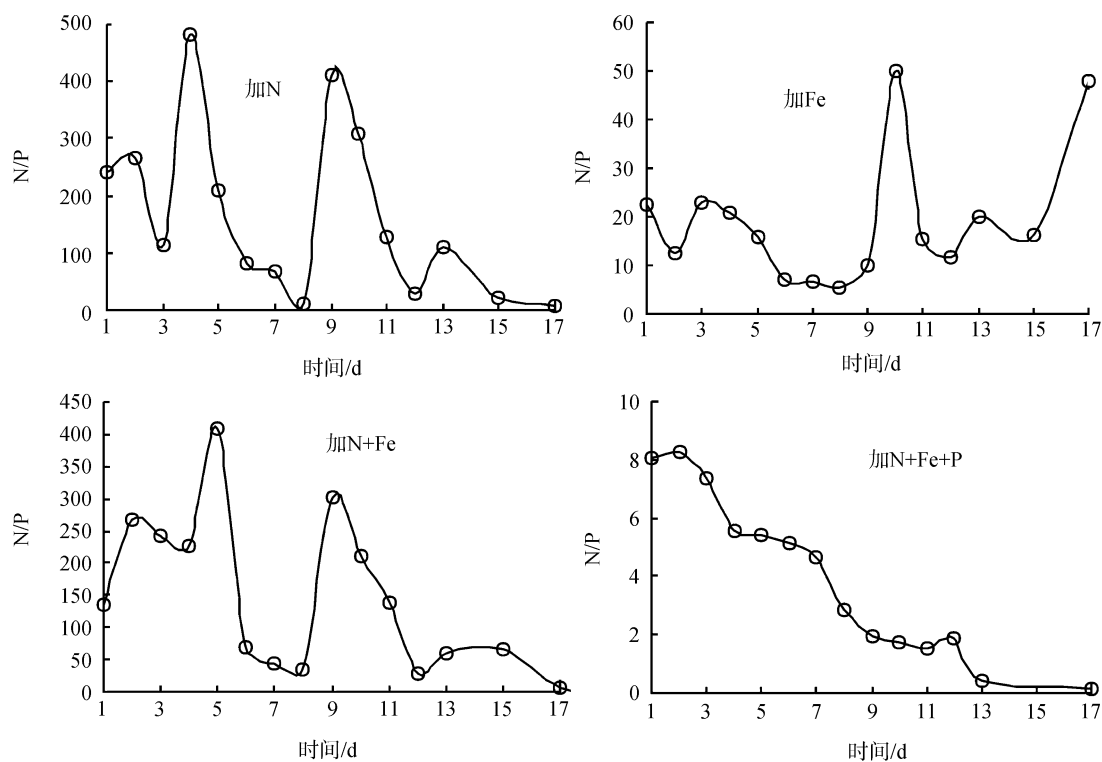


图 6 实验水体中 N/P 值变化

Fig. 6 Variations of the N/P value in experimental water

在实验的第 7~8 天, 叶绿素 a 浓度快速增大, 而 各培养桶水体中的 N/P 比值并没有规律性变化。1

号和 3 号桶中该值发生明显升高, 而 4 号桶中 N/P 比值却减小。可以看出, 在浮游植物生长过程中, 各培养桶水体中 N/P 比值的变化并没有统一规律, 而且它的变化不能单独影响浮游植物生长。

另外, 对实验过程中 1 号、3 号和 4 号桶水体中 N/P 比值和 Chl-a 浓度以及 *R* 值进行相关性分析的结果(表 5)表明, 水体中的 N/P 比值与浮游植物生长量和生长速度之间无明显相关性。因此认为, 在印度洋实验海区, 水体中的 N/P 比值不能单独决定浮游植物的生长。

表 5 N/P 比值与 Chl-a 质量浓度以及 *R* 值的相关性分析结果

Tab. 5 Correlation between the N/P value and Chl-a or the *R* value

参数	<i>P</i> (1 号桶)	<i>P</i> (3 号桶)	<i>P</i> (4 号桶)
N/P 值-Chl-a	0.363	0.722	0.090
N/P 值- <i>R</i> 值	0.875	0.616	0.061

注: *P* 代表显著性水平

3 结论

根据对印度洋营养盐添加模拟实验的水体温度、营养盐浓度和叶绿素 a 浓度等参数分析, 可以得出以下结论:

(1)至少在营养盐添加模拟实验期间, N 对印度洋实验海区浮游植物生长的影响最为明显; Fe 的添加对于浮游植物生长没有明显作用; 同时添加 N 和 P 对促进浮游植物生长的作用要远远大于单独添加 N。

(2)N/P 比值的变化不能决定浮游植物生长过程。而且, 印度洋实验海区浮游植物会优先吸收海水中的硝酸盐促进自身生长, 在硝酸根耗尽后, 海水中可被利用的 P 会促进浮游植物的生长。

(3)在印度洋实验海区, 水体温度虽对浮游植物生长有重要影响, 但它并不能主控光合作用过程。

致谢: 感谢彭晓彤老师、林荣澄老师以及蒋磊和吴自军博士在实验过程中给予的大力帮助; 感谢“大洋一号”所有船员。

参考文献:

[1] Toggweiler J R, Sarmiento J L. Glacial to interglacial changes in atmospheric carbon dioxide: the critical role of ocean surface water at high latitudes [A]. Sundquist E T, Broecker W S. The Carbon Cycle and Atmos-

pheric CO₂: Natural Variations Archaen to Present [C]. America: American Geophysical Union, 1985. 163-184.

[2] Thomas W H. Surface nitrogenous and phytoplankton in the northeastern tropical Pacific Ocean [J]. *Limnol Oceanogr*, 1966, 11: 393-400.

[3] Thomas E. Effect of ammonium and nitrate concentration on chlorophyll increases in natural tropical pacific phytoplankton populations [J]. *Limnol Oceanogr*, 1970, 15: 386-394.

[4] Dufour P, Charpy L, Bonnet S, *et al.* Phytoplankton nutrient control in the oligotrophic South Pacific subtropical gyre [J]. *Mar Ecol Prog Ser*, 1999, 179: 285-290.

[5] Dufour P, Berland B. Nrtrient control of phytoplankton biomass in atollagoons and Pacific ocean waters: Studies with factorial enrichment bioassays [J]. *J Exp Mar Bio Ecol*, 1999, 234: 147-166.

[6] Myers V B, Iverson R I. Phosphorus and nitrogen limited phytoplankton productivity in northeastern Gulf of Mexico coastal estuaries [A]. Neilson B J, Cronin L E. Estuaries and Nutrients [C]. Totowa: Humana Press, 1981. 569-582.

[7] Martinez L A, Silver M W, King J M, *et al.* Nitrogen fixation by floating diatom mats: A source of new nitrogen to oligotrophic ocean waters [J]. *Science*, 1983, 221: 152-154.

[8] 王晓伟, 李纯厚, 李占东, 等. 大亚湾海域春季浮游植物生长的限制性营养元素[J]. *中国水产科学*, 2007, 14(5): 836-842 .

[9] 朱艾嘉, 黄良民, 许战洲. 氮、磷对大亚湾大鹏澳海区浮游植物群落的影响[J]. *热带海洋学报*, 2008, 27(1): 38-45 .

[10] 王玉珏, 洪华生, 王大志, 等. 台湾海峡上升流区浮游植物对营养盐添加的响应[J]. *生态学报*, 2008, 28(3): 1321-1327 .

[11] 刘媛, 曹振锐, 黄邦钦, 等. 东、黄海典型海区浮游植物对营养盐添加的响应[J]. *厦门大学学报(自然科学版)*, 2004, 43(增刊): 147-152 .

[12] 王勇, 焦念志. 胶州湾浮游植物对营养盐添加的响应关系[J]. *海洋科学*, 2002, 26(4): 8-12 .

[13] 王勇, 赵澎, 单宝田. 胶州湾营养盐限制浮游植物生长的初步模拟现场实验研究[J]. *海洋科学*, 2002, 26(10): 55-59 .

[14] D'Elia C F, Sanders J G, Boynton W R. Nutrient enrichment studies in a coastal plain estuary: Phytoplankton growth in large-scale continuous culture [J]. *Can J Fish Aquat Sci*, 1986, 43: 397-406.

[15] Fisher T R, Peele E R, Ammeman J W, *et al.* Nutrient

- limitation of phytoplankton in Chesapeake Bay [J]. *Mar Ecol Prog Ser*, 1992, 82: 51-63.
- [16] Dugdale R C, Wilkerson F P. Silicate regulation of new production in the equatorial Pacific upwelling [J]. *Nature*, 1998, 391: 270-273.
- [17] Smayda T J. Novel and nuisance phytoplankton blooms in the sea: evidence for a global epidemic [A]. Graneli E, Sundstrom B, Edler L, *et al.* Toxic marine phytoplankton [C]. New York: Elsevier Science Publishing Co, 1990. 29-40.
- [18] Coale K H, Johnson K S, Fitzwater S E, *et al.* A massive phytoplankton bloom induced by an ecosystem-scale iron fertilization experiment in the equatorial Pacific Ocean [J]. *Nature*, 1996, 383: 495-501.
- [19] Boyd P W, Watson A J, Law C S, *et al.* A mesoscale phytoplankton bloom in the polar Southern Ocean stimulated by iron fertilization [J]. *Nature*, 2000, 407: 695-702.
- [20] Tsuda A, Takeda S, Saito H, *et al.* A mesoscale iron enrichment in the Western Subarctic Pacific Induces a Large Centric Diatom Bloom [J]. *Science*, 2003, 300: 958-961.

Nutrient limits phytoplankton growth in nutrient enrichment experiments with seawater from the Indian Ocean

TANG Song

(Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China)

Received: Sep., 4, 2008

Key words: the Indian Ocean; nutrient; model experiment; limitation

Abstract: Nutrient enrichment experiments were carried out in the Indian Ocean during the Chinese First Around-world Researching Cruise, with N, Fe, N+Fe and N+Fe+P being added in the collected surface sea water separately. Varying some parameters in the experimental water, we studied the factors that limited phytoplankton growth, such as the concentration of nutriment, chlorophyll a, temperature, and etc. The addition of nitrogen resulted in phytoplankton blooming, but the addition of iron did not stimulate the growth of phytoplankton. The combined effect of nitrogen and phosphorus to phytoplankton growth was much stronger than that of nitrogen alone. Furthermore, the utilization of nitrogen proceeded that of phosphorus; and the available phosphorus could be utilized by phytoplankton after nitrogen was exhausted. Variation of the ratios of nitrogen to phosphorus in the experimental water did not match that of chlorophyll a concentration and phytoplankton growing rate (R). The correlation between them was weak. So it was considered that the ratio of nitrogen to phosphorus cannot determine the growth of phytoplankton. In addition, water temperature played an important but not a limiting role in the phytoplankton growth in these experiments, as was shown by the correlation between the temperature of experimental water and chlorophyll a concentration or the value of R .

(本文编辑: 张培新)