

大亚湾海域春季浮游植物生长的限制性营养元素

王晓伟^{1,2}, 李纯厚¹, 李占东¹, 林琳^{1,3}, 沈南南^{1,2}

(1. 中国水产科学研究院南海水产研究所, 农业部渔业生态环境重点开放实验室, 广东 广州 510300; 2. 广东海洋大学水产学院, 广东 湛江 524088; 3. 上海水产大学, 上海 200090)

摘要:2006年4月, 模拟现场条件对大亚湾浮游植物生长限制性营养元素进行了初步研究。整个海湾设置3个站点(S1, S2, S3), 每个站点设计7组实验, 实验周期3天。通过比较元素耗尽的先后顺序和显著性差异评估限制性营养元素。两种方法具有一定的互补性。湾中部(S2)和湾顶(S3)站水样添加的磷元素在48 h内被耗尽, 最大吸收速率达到 $0.83 \mu\text{mol}/(\text{L}\cdot\text{h})$, 先于其他两种元素而被耗尽, 显示出明显的磷限制; 湾口(S1)站氮元素的吸收速率高于其他各元素, 最大达到 $0.76 \mu\text{mol}/(\text{L}\cdot\text{h})$, 94 h内耗尽, 而磷和硅则分别需要107 h和114 h, 但是由于磷偏离Redfield比值10倍于氮、硅添加, 所以氮限制的结果并不确定。显著性分析结果显示, S1各添加氮的实验组生物量都有显著性增加, 氮限制是十分明显, S2站叶绿素a浓度差异性结果不明显。S3站叶绿素a的差异显著性结果与营养元素耗尽评估结果一致。两种方法研究结果表明, 大亚湾海域浮游植物限制性元素发生了转变, 湾中和湾顶为磷限制, 湾口为氮限制, 大亚湾海域流场的区域差异可能是造成这种现象的主要原因。[中国水产科学, 2007, 14(5): 836–842]

关键词:大亚湾; 浮游植物; 营养盐限制; 加富实验

中图分类号:S922.9

文献标识码:A

文章编号:1005–8737–(2007)05–0836–07

水体中的营养元素是浮游植物生长的物质基础, 其收支状况对浮游植物的生长产生明显影响。在大多数海域, 氮是限制浮游植物生长的主要营养元素, 在热带和亚热带海域氮限制尤其明显^[1]。大量的高含氮量污染物的输入会导致这些海区原有优势种发生演替, 种群结构发生变化, 并进而影响整个生态系统。

大亚湾位于珠江口东侧, 海域面积约600 km², 湾内岛屿众多, 平均水深11 m, 最深处达21 m^[2]。海域有机质含量较为丰富, 浮游生物与底栖生物的生物量都高于粤东沿海主要港湾, 初级生产力和次级生产力较高, 渔业资源丰富, 是中国重要的亚热带物种种质资源库, 1983年被国家列为广东省水产资源自然保护区。

近年来沿岸开发利用活跃, 导致水体富营养化现象日益加重。王友绍等^[3]在分析1984~2004年近20年的监测数据的基础上, 发现, 大亚湾已由贫营养状态发展到中营养状态, 局部海域出现富营养化趋势, N/P比平均值由20世纪80年代的1/1.5

上升到近年的50以上, 营养盐限制因子由20世纪80年代的N限制过渡到目前的P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。邱耀文等^[4]认为, 大亚湾海域水体的N/P比值为 21.69 ± 19.38 , 浮游植物的生长从过去的氮限制转变为现在的磷限制。这些结论都是基于自然水体中无机营养盐含量的变化得出的, 但是有关营养物质的输入和浮游植物生物量变化的实验室验证尚未见报道。为了从实验生态学角度阐明大亚湾水域浮游植物的营养元素限制状况, 2006年4月1~3日在大亚湾湾口、湾中及湾顶选点采取水样, 在实验室进行了营养元素加富实验, 以探究大亚湾海域春季浮游植物的营养限制元素, 旨在为大亚湾生物资源科学利用与生态环境保护提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 站位设置

根据大亚湾自然环境及周边人类活动影响状况, 在S1(114°44.4'E, 22°34.2'N)、S2(114°34.2'E,

收稿日期: 2006–09–04; 修订日期: 2007–03–03.

基金项目: 科技部科研院所社会公益研究专项(2005DIB3J020).

作者简介: 王晓伟(1981–), 男, 硕士生, 从事海洋生态环境保护研究. E-mail: wxiaowei2006@tom.com

通讯作者: 李纯厚. E-mail: scslch@163.com

22°40.2'N) 和 S3 (114°36'E, 22°40.8'N) 进行营养盐加富实验。站点分布见图 1。

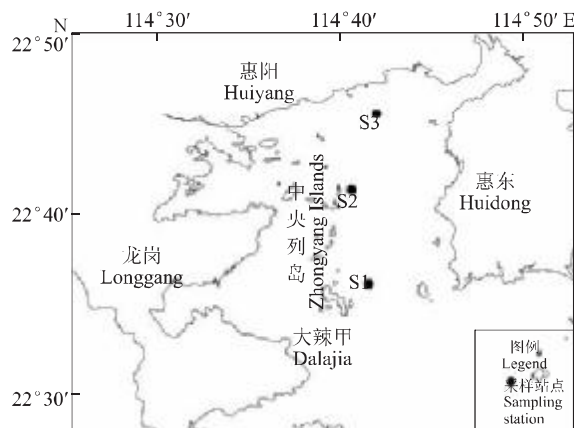


图 1 大亚湾采样站点示意图
Fig.1 Sampling Stations in the Daya Bay

1.2 采样方法

水样的采集在上午 9:00~10:00 进行, 每个站点采取表层水样(水深 0.5~1 m), 用 0.22 μm 滤膜过滤收集叶绿素, 过滤后的水样取 50 mL, 加入 1 mL 氯仿, 分成 3 份 0℃ 冷藏保存用于初始营养盐分析。并

现场测定 pH、水温、溶解氧等初始理化指标。同时, 每个采样站点另取加富实验用水, 用 200 μm 的绢筛过滤, 以除去大型浮游动物的干扰。用 20L 的 PE 塑料桶装取, 桶口敞开, 尽快运回到实验室分装到各培养瓶。

1.3 加富实验设计

将采集的水样分装到 150 mL 的 PE 瓶内, 以天然浮游植物群落为培养对象, 选取 N、P、Si、Fe 4 种添加元素, 营养盐的浓度在参照邱耀文等^[4]所测浓度基础上增加 10 倍, 其中 P 元素增加 100 倍, 目的是确定 N、P、Si 元素浓度的增加及其比例在偏离 Redfield 值的情况下, 对浮游植物生物量的影响, 及铁作为酶的辅助因子对硝酸盐和亚硝酸的促吸收作用。根据 All-But-One 方法^[5-6]设计 7 组实验(表 1), 每实验组设 3 组平行。用流动水控制水温在 (26 $\pm$ 1)℃, 光照和非光照时间比为 10 L:14 D, 实验持续 3 天, 以避免“瓶子效应”和固氮菌作用影响实验^[5-6], 期间每天测定水体的溶解氧、pH, 测定 9:00~18:00 中每个时段的光照度值。18:00~19:00 时段用孔径 0.22 μm 过滤收集 150 mL 水体的叶绿素, 0℃ 下保存。过滤后的水样取 10 mL 加入 0.1 mL 氯仿后 0℃ 冷冻保存用于营养盐分析。

表 1 大亚湾浮游植物生长限制营养元素加富实验设计

Tab.1 Design of enrichment experiment for growth limiting nutrients of phytoplankton in the Daya Bay

实验组 Treatments	添加元素 Additive elements	$\text{H}_2\text{PO}_4^- - \text{P}$ /($\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$ /($\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\text{SiO}_3^{2-} - \text{Si}$ /($\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)	Fe^{3+} /($\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)	EDTA /($\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)
NP	N, P	40	60	—	—	—
NSi	N, Si	—	60	60	—	—
PSi	P, Si	40	—	60	—	—
AF(全加富)	N, P, Si	40	60	60	—	—
AE	N, P, Si, Fe	40	60	60	0.8	—
All	N, P, Si, Fe, EDTA	40	60	60	0.8	0.8
对照组 Control	—	—	—	—	—	—

注: 表中数值为培养瓶中营养盐的最终浓度; “—”表示不添加。

Note: The data is the last concentration of experimental nutrients; “—” means no addition.

1.4 分析方法

溶解氧采用 YSI-55 型溶氧仪(美国)测定, pH 采用 PHB-1 型便携式 pH/ORP 计(上海三信仪表厂)测定, 照度用上海产 ZDS-10 型照度计测定; 培养结束后即进行叶绿素和营养盐样品的分析。分析工作在 4 d 内完成, 叶绿素 a 采用 98 国标分光光度法测定^[7], 仪器为 HITACHI F-4500, 营养盐水样

解冻后, 直接上机检测, 分析项目包括溶解无机氮(DIN)、溶解无机磷(DIP)和溶解无机硅(DSi), 仪器采用美国 LACHA QUICKCHEM8500 流动分析注射仪比色法分析。

1.5 实验条件

1.5.1 培养条件 培养条件参照采样时(4 月 1 日)状况设定如表 2 所示。

表2 各采样点理化环境因子初始值

Tab.2 Initial physicochemical and environmental factor values of the sampling stations

站点 Station	pH	DO/(mg·L ⁻¹)	温度/℃ Temperature	DIN/(μmol·L ⁻¹) $\bar{X} \pm SD$	DIP/(μmol·L ⁻¹) $\bar{X} \pm SD$	DSi/(μmol·L ⁻¹) $\bar{X} \pm SD$	Chla/(μg·L ⁻¹)
S1	8.08	6.59	26.70	9.11 ± 1.68	0.73 ± 0.05	8.47 ± 3.53	0.81
S2	7.97	6.25	27.23	14.72 ± 6.19	0.78 ± 0.07	7.84 ± 3.32	0.66
S3	8.02	6.26	27.03	19.31 ± 3.40	0.62 ± 0.05	10.61 ± 2.50	0.77

1.5.2 相关参数 实验期间光照度值变化见图2。从光照度平均值看,变化趋势为早晨和傍晚最低,平均光照度在1 100 lx左右,13:00~16:00时段光照度值较高,14:00达到最高值60 000 lx。实验期间的光照充足,可以满足浮游植物的生长需求。

各组初始pH值比较接近,实验期间的pH值总体呈增加趋势,以All实验组的pH值最高,由于浮

游植物量的增加,吸收了水体中的CO₂,而使水体的pH值增加,增值不超过0.06。DO值初始值为6.25~6.59 mg/L,组间无明显差异,实验期间DO值呈现先升后降的过程,各组均在第2天达到最大,从在第3天开始下降,与水体中叶绿素a浓度值的变化一致。

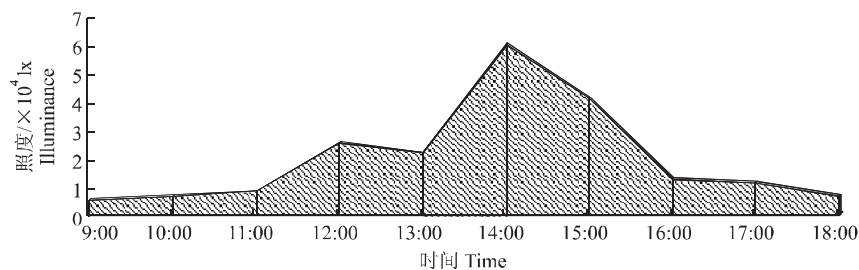


图2 实验期间平均光照度变化图

Fig.2 Variation of mean illuminance during experiment

1.6 限制性元素的判定

1.6.1 浮游植物的生长对照实验 将各组浮游植物的生长速率或生物量进行比较,如果全加富组(AE、All)较对照组有较快的生长速率或更高的生物量,则可以认定有一种或几种营养元素存在限制,如果全加富组和对照组之间差别不大,可以判定浮游植物并没有受到营养限制^[8-10]。

如果存在限制性元素,利用SPSS 12.0分析软件的One-way ANOVA法对叶绿素浓度数据进行差异显著性分析,采用Duncan's多重比较法对各实验组与对照组之间进行两两比较($P < 0.05$)。由于本实验采用的是All-But-One法,如果某实验组与对照组有显著差异,说明此组中所添加的营养元素至少有1种为限制性元素;如果差异不明显,则说明此组中缺失的元素为限制性元素。

1.6.2 最小限制律 根据Liebig最小法则,植物的生长取决于处在最小量状况的必需物质。Hecky等^[11]据此通过对营养的吸收速率比较来确定哪种

营养盐首先被耗尽而形成限制。本研究通过对营养的吸收速率比较来确定哪种营养盐首先被耗尽。最先被耗尽的元素即为限制元素^[11-12]。

吸收速率的计算时间按72 h (3 d)计,N、P、Si元素第1天浓度值=添加浓度+初始浓度平均值,最后1天的浓度按实际检测值计。营养元素的耗尽时间以第1天的浓度值除以吸收速率可得,同时为排除由于某种元素的缺失而对吸收速率造成的干扰,选取AF、AE和All 3组N、P、Si 3种元素都添加的实验组的吸收速率来确定最先耗尽的营养元素。

2 结果与分析

2.1 浮游植物生物量的变化及限制元素的判定

浮游植物的生物量变化以叶绿素a浓度值变化表示,其结果见图3。初始叶绿素浓度值以S1站最高,达到0.81 μg/L;S3站次之,为0.77 μg/L;S2站最低为0.66 μg/L。培养结束时,除S2站的PSi、AF组叶绿素a稍高于All组外,其余2个站点最高浓度均

出现在 All 组, S1 站为 $2.29 \mu\text{g/L}$, S3 站点为 $6.00 \mu\text{g/L}$ 。

S1 站 NP、NSi、AF、AE、All 5 个实验组叶绿素 a 浓度第 3 天均较对照组明显增加 ($P < 0.05$), 终浓度分别达到 $1.56 \mu\text{g/L}$ 、 $1.70 \mu\text{g/L}$ 、 $2.04 \mu\text{g/L}$ 、 $2.10 \mu\text{g/L}$ 和 $2.29 \mu\text{g/L}$, 较对照组 ($0.51 \mu\text{g/L}$) 高出 3~4 倍。PSi 组的叶绿素 a 浓度较对照增加并不明显, 仅为 $0.84 \mu\text{g/L}$ 。S3 站 NP、PSi、AF、All 4 个实验组叶绿素 a 浓度均有较大增加 ($P < 0.05$), 终质量浓度分别为 $5.53 \mu\text{g/L}$ 、 $5.41 \mu\text{g/L}$ 、 $5.39 \mu\text{g/L}$ 和 $6.00 \mu\text{g/L}$, 较对照组 ($1.01 \mu\text{g/L}$) 增加了 6 倍。S2 站 PSi、AF、All 3 个实验组叶绿素 a 的浓度虽有所增加, 分别达到 $5.29 \mu\text{g/L}$ 、 $4.42 \mu\text{g/L}$ 和 $3.75 \mu\text{g/L}$, 但与对照组比较, 无显著性差异 ($P < 0.05$)。

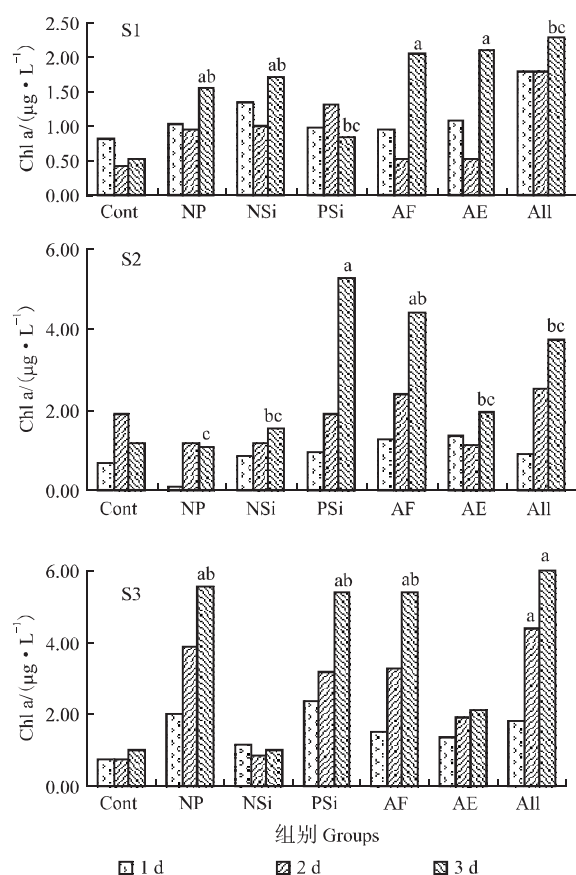


图3 各实验组叶绿素 a 浓度变化
字母不同表明有显著性差异 ($P < 0.05$)

Fig.3 Temporal variation of chlorophyll a in experimental groups

The different letters denote significant differences ($P < 0.05$)

由于各站 All 实验组相对对照组叶绿素浓度均有较大增加, 因此判定存在或潜在限制性元素, 以各站点每天的叶绿素 a 浓度值为基础, 对各实验组进行方差显著性分析 (图 3)。

各站点第 1 天的差异性并不明显, S2 站在第 3 天 PSi、AF 组的叶绿素浓度与对照组相比有显著性差异, S3 站在第 2 天仅 All 与对照组相比有显著差异, 第 3 天 NP、PSi、AE、All 4 组与对照组有显著性差异; S1 站第 2 天的叶绿素浓度仅与 All 实验组有显著性差异, 第 3 天与 NP、NSi、AF、AE 实验组与对照组有显著性差异。由于实验采用的是 All-But-One 法, 结合显著性分析结果, 可以分析 S2 站中氮元素不是限制元素, 因为 NP、NSi 等添加含氮元素组与对照组并无显著差异。这两组分别是无硅组或无磷组, 而 PSi 组是各实验组中与对照组差异最显著的一组。磷和硅可能是潜在的限制元素。S3 站磷元素的限制比较明显。所有磷元素的实验组相对对照组的差异性都很显著。AE 组中虽然也添加了磷元素, 但由于加入铁元素可以与磷酸生成沉淀, 所以一部分磷元素不能被植物吸收, 限制了浮游植物的生长。S1 站 All 组在第 2 天的就已经出现了显著性差异, 说明添加的元素至少有一种限制了浮游植物的生长, 结合第 3 天 NP、NSi、AF、AE 等添加了氮元素的实验组叶绿素浓度相对对照组都有显著性差异, 可以判定氮是 S1 站的限制元素。

2.2 营养元素的吸收率及限制元素判定

各站点对每一种营养元素吸收利用情况并不相同 (表 3)。S1 站 N 元素 72 h 内的吸收速率最大达到 $0.76 \mu\text{mol}/(\text{L} \cdot \text{h})$ [速率范围 $0.11 \sim 0.76 \mu\text{mol}/(\text{L} \cdot \text{h})$]; Si 元素吸收速率最大 $0.63 \mu\text{mol}/(\text{L} \cdot \text{h})$, 范围 $0.03 \sim 0.63 \mu\text{mol}/(\text{L} \cdot \text{h})$, 除 NP 组硅元素被耗尽外, 其他各组均有剩余, PSi 组剩余量最大为 $23.34 \mu\text{mol/L}$ 。本站点 P 元素在实验结束时仍有较大的剩余量, 其中 PSi 组最大剩余量达到 $25.07 \mu\text{mol/L}$, P 元素最大的吸收速率仅为 $0.50 \mu\text{mol}/(\text{L} \cdot \text{h})$ 。以 AF、AE、All 3 组的吸收速率计算元素最先耗尽的元素为 N, 约为 94 h; 其次是 P, 约为 107 h; 最后耗尽的是 Si, 约为 114 h。但是这个结果并不能说明 S1 站是由氮限制, 因为磷元素是偏离 Redfield 比值 10 倍于其元素的添加, 所以这个结果并不能作为判定的主要依据。还要结合生长实验的结果来分析。

表3 各站点不同元素的吸收速率

Tab.3 Nutrients depletion rate of the test stations

 $n = 2; \bar{X} \pm SD; \mu\text{mol}/(\text{L} \cdot \text{h})$

组别 Treatment	S1			S2			S3		
	N	P	Si	N	P*	Si	N	P*	Si
Cont	0.13±0.02	0.01±0.00	0.07±0.03	0.07±0.03	0.01±0.00	0.05±0.02	0.12±0.02	0.01±0.00	0.03±0.00
NP	0.74±0.04	0.33±0.10	0.04±0.02	0.77±0.19	0.83±0.00	0.05±0.01	0.59±0.06	0.83±0.00	0.06±0.01
NSi	0.44±0.02	0.01±0.00	0.53±0.11	0.32±0.14	0.01±0.00	0.50±0.03	0.23±0.06	0.01±0.00	0.51±0.07
PSi	0.16±0.08	0.50±0.13	0.51±0.10	0.02±0.00	0.83±0.00	0.59±0.04	0.11±0.02	0.83±0.00	0.69±0.13
AF	0.71±0.01	0.42±0.04	0.62±0.05	0.77±0.06	0.83±0.00	0.64±0.02	0.46±0.10	0.83±0.00	0.67±0.01
AE	0.75±0.03	0.38±0.01	0.54±0.12	0.76±0.03	0.83±0.00	0.55±0.05	0.24±0.01	0.83±0.00	0.61±0.06
All	0.76±0.03	0.35±0.04	0.63±0.07	0.77±0.04	0.83±0.00	0.73±0.02	0.48±0.02	0.83±0.00	0.62±0.04

注: * 表示在 48 h 内的吸收速率。

Note: * denote depletion rate in 48 h.

S2 站虽然相对于本底值添加了 100 倍的 P 元素,但是各实验内的磷元素均在 48 h 内耗尽,其吸收速率达到了 $0.83 \mu\text{mol}/(\text{L} \cdot \text{h})$, N、Si 元素也有较高的生物利用率, N 的最大吸收速率也达到了 $0.77 \mu\text{mol}/(\text{L} \cdot \text{h})$, 并且有 4 组 N 的吸收速率达到了 $0.76 \mu\text{mol}/(\text{L} \cdot \text{h})$ 以上。Si 元素的吸收速率就稍低些,最高的为 $0.7 \mu\text{mol}/(\text{L} \cdot \text{h})$ [速率范围 $0.01 \sim 0.73 \mu\text{mol}/(\text{L} \cdot \text{h})$]。各营养元素耗尽的先后顺序为 P (48 h)、N (96 h)、Si (105 h), 磷是本站的限制元素。

S3 站 P 元素也在 48 h 内被耗尽, P 的最大吸收速率为 $0.83 \mu\text{mol}/(\text{L} \cdot \text{h})$, 由于 P 元素高于 N、Si 元素 10 倍的添加量而被耗尽, 所以浮游植物有明显 P 元素的限制。由于磷元素耗尽, N、Si 元素都有剩余, N 元素剩余量最大达到了 $43.73 \mu\text{mol}/\text{L}$, 这与本站氮元素本底值较高有一定的关系。并且氮元素的吸收速率最高为 $0.59 \mu\text{mol}/(\text{L} \cdot \text{h})$, 其余各组均低于 $0.50 \mu\text{mol}/(\text{L} \cdot \text{h})$, 约需 176 h 耗尽。Si 元素吸收利用率最高为 $0.69 \mu\text{mol}/(\text{L} \cdot \text{h})$, 添加硅元素的实验组有 4 组的吸收速率达到了 $0.60 \mu\text{mol}/(\text{L} \cdot \text{h})$ 以上, 约需 111h 耗尽。

2.3 EDTA 与 Fe 在加富实验中的作用

实验中螯合剂 EDTA 的加入, 主要作用是螯合铁元素防止其与磷酸根生成沉淀, 在 S2 磷元素限制站点中, 第 3 天 AE、All 组叶绿素 a 的质量浓度值分别为 $1.94 \mu\text{g}/\text{L}$ 、 $3.75 \mu\text{g}/\text{L}$; 在 S3 站, 第 3 天上述值分别为 $2.13 \mu\text{g}/\text{L}$ 、 $6.00 \mu\text{g}/\text{L}$, 差别较大。在铁和磷酸盐同时加入的实验组中添加 EDTA 十分必要。在铁元素加入的条件下, S1、S2 和 S3 站 All 组较 AF 组叶绿素 a 浓度值都有了明显增加, 最大增加值为 $0.24 \mu\text{g}/\text{L}$, 而氮吸收速率分别增加了 $0.05 \mu\text{mol}/(\text{L} \cdot \text{h})$ 和 $0.02 \mu\text{mol}/(\text{L} \cdot \text{h})$ 。显示促生长、促吸收的作

用, 这与 Byod^[13]的研究结果一致。

3 讨论

3.1 利用营养元素最先被耗尽而限制与叶绿素 a 浓度判定限制性元素的差异

评估浮游植物营养限制有很多不同的方法, 外部营养盐浓度比值并不能反映实际的营养限制情况。一是因为矿化的营养元素的释放; 二是浮游植物可以吸收一部分营养物质保存在植物体内。因此, 限制性营养元素的评估主要是采用胞内营养物质的含量、营养元素的吸收速率、生理生化指标法或采用生长实验^[14]。本实验利用浮游植物的浓度变化和营养元素的耗尽时间的先后两种方法结合研究大亚湾的浮游植物营养盐限制。这两分析方法在结果上具有互补性。利用叶绿素 a 浓度代表浮游植物浓度变化进行限制性元素的分析得出, S1 站添加氮元素的实验组都有生物量明显增长, 氮限制的结果是比较确定的, 而利用营养元素的耗尽时间分析, 由于各元素在实验期间均有剩余和磷元素的过量添加, 分析结果并不十分确定。S3 站两种分析结果相一致。对于 S2 站, 通过比较各元素的耗尽先后顺序可知, 尽管磷元素高于氮、硅元素 10 倍的添加, 仍在 48 h 内被耗尽, 磷元素的限制比较明显; 而 S2 站叶绿素浓度的分析仅能判定氮不是限制元素, 磷、硅是可能的限制元素。这一结果可以通过比较各元素的吸收速率得到合理解释, 虽然磷元素在 48 h 内吸收速率达到了 $0.83 \mu\text{mol}/(\text{L} \cdot \text{h})$, 氮、硅元素的吸收利用率最高也分别达到了 $0.77 \mu\text{mol}/(\text{L} \cdot \text{h})$ 和 $0.73 \mu\text{mol}/(\text{L} \cdot \text{h})$, 反映在浮游植物的生长上, 其叶绿素 a 浓度的差异并不显著。在评估营养元素的限制两种方法可以互相补充, 而使分析结果更可靠。

3.2 限制性元素的时空分布差异成因探究

随着大亚湾周围的经济开发和沿岸养殖区的扩增,大亚湾海域的营养盐结构正在发生明显变化。陈金斯等^[15]的研究认为,大亚湾属于贫氮海区,适当的补充氮对提高大亚湾海区的生产力具有实际意义,当时氮是主要的限制元素,王小平^[16]、黄西能^[17]、彭云辉^[18]等的研究结果都支持氮限制这一观点。彭云辉^[19]、王朝晖^[20]、王友绍^[3]等人发表的最新文章都在表述另一观点,即大亚湾正在由“缺氮”转变为“缺磷”。

本次实验验证了大亚湾海域确实存在着磷元素的限制。不过磷限制只是在湾中和湾顶,湾口的限制性元素仍为氮元素,这可能与该海域水体与外海的交换程度和空间自净能力差异有关(图4)。外海水从大辣甲以西的水域进入湾内,并呈顺时针弯曲趋势向湾顶运动,经中央列岛后,沿东海岸流出^[21-22]。S3站位于大亚湾的内部,与外海水交流较差,所以S3站就积累较多的营养盐,富营养化水平较高,其限制性元素也发生转变,磷成为其主要限制元素。S2站位于内外海水的交汇处,磷是其主要限制元素,从氮的吸收速率看,氮是第二位限制元素,这可能与清洁的外海水冲释作用有关,N/P比值增加,减轻了P的限制。S1站位于湾口内外交换比较充分,其限制元素并未转变,仍为氮元素。

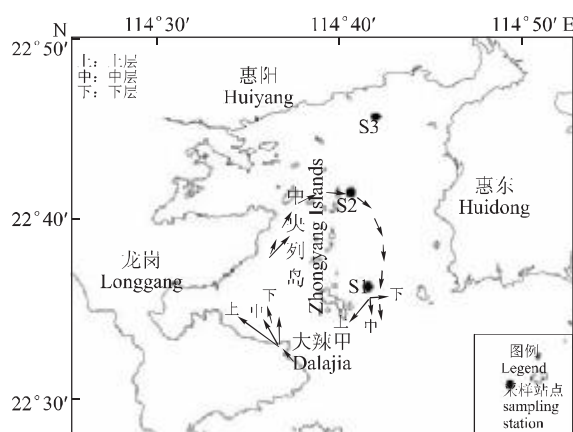


图4 大亚湾季节环流^[21]

Fig.4 Seasonal circumfluence of Daya Bay

参考文献:

- [1] Beman J M, Arrigo K R, Matson P A. Agriculture runoff fuels large phytoplankton blooms in vulnerable areas of the ocean[J]. *Nature*, 2005, 434 (10): 211–214.
- [2] 广东省海岸和海涂资源综合调查大队, 广东省海岸带和海涂资源综合调查领导小组办公室. 广东省海岸带和海涂资源综合调查报告[M]. 北京: 海洋出版社, 1987: 90–113.
- [3] 王友绍, 王肇鼎, 黄良民. 近20年来大亚湾生态环境的变化及其发展趋势[J]. 热带海洋学报, 2004, 23 (5): 85–95.
- [4] 邱耀文, 王肇鼎, 朱良生. 大亚湾海域营养盐与叶绿素含量的变化趋势及其对生态环境的影响[J]. 台湾海峡, 2005, 24 (2): 131–139.
- [5] Twomey L, Thompson P. Nutrient limitation of phytoplankton in a seasonally open bar-built estuary: Wilson Inlet, Western Australia[J]. *J Phycol*, 2001, 37: 16–29.
- [6] Piehler M F, Twomey L J, Hall N S, et al. Impacts of inorganic nutrient enrichment on phytoplankton community structure and function in Pamlico Sound, NC, USA[J]. *Estuar Coast and Shelf Sci*, 2004, 61: 197–209.
- [7] 国家海洋局. 海洋监测规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 1998.
- [8] Mallin M A, Parsons D C, Johnson V L, et al. Nutrient limitation and algal blooms in urbanizing tidal creeks[J]. *J Experiment Mar Biol Ecol*, 2004, 298: 211–231.
- [9] López E L, Lind L D. Algal growth potential and nutrient limitation in a tropical river-reservoir system of the Central Plateau, Mexico[J]. *Aqua Eco Health Manag*, 1998, 1: 345–351.
- [10] Vuorio K, Lagus A, Lehtimäki J M, et al. Phytoplankton community responses to nutrient and iron enrichment under different nitrogen to phosphorus ratios in the northern Baltic Sea[J]. *J Experiment Mar Biol Ecol*, 2005, 322: 39–52.
- [11] Hecky R E, Kilham P. Nutrient limitation of phytoplankton in freshwater and marine environments: a review of recent evidence on the effects of enrichment[J]. *Limnol Oceanogr*, 1988, 33: 796–822.
- [12] 杨东方, 李宏, 张越美, 等. 浅析浮游植物生长的营养盐限制及其判断方法[J]. 海洋科学, 2000, 24 (12): 47–50.
- [13] Byrd P W. The role of iron in the biogeochemistry of the Southern Ocean and equatorial Pacific: a comparison of in situ iron enrichments[J]. *Deep-sea Res*, 2002, 407: 730–733.
- [14] Seppälä J, Tamminen T, Kaitala S. Experimental evaluation of nutrient limitation of phytoplankton communities in the Gulf of Riga[J]. *J Mar Syst*, 1999, 23: 107–126.
- [15] 陈金斯, 李飞永. 大亚湾无机氮的分布特征[J]. 热带海洋, 1995, 15 (3): 92–98.
- [16] 王小平, 蔡文贵, 林钦, 等. 大亚湾水域营养盐的分布变化[J]. 海洋湖沼通报, 1996, (4): 20–27.
- [17] 黄西能, 徐梅春, 莫金垣, 等. 大亚湾西南面海区的氮循环 II. 水域的无机氮及其相互转化[M]//中国科学院大亚湾海洋生物综合实验站研究年报第2期(1994–1996). 北京: 科学出版社, 1998: 94–101.
- [18] 彭云辉, 王肇鼎. 大亚湾大鹏澳养殖海区水化学指标的变化及营养状况分析[J]. 台湾海峡, 1999, 18 (1): 26–32.
- [19] 彭云辉, 孙丽华, 陈浩如, 等. 大亚湾海区营养盐的变化及富

- 营养化研究[J]. 海洋通报, 2002, 21 (3): 44–49.
- [20] 王朝晖, 齐雨藻, 李锦蓉, 等. 大亚湾养殖区营养盐状况分析与评价[J]. 海洋环境科学, 2004, 23 (2): 25–28.
- [21] 李立, 张炳楷, 曾刚. 大亚湾的海流特征[M]//大亚湾海洋生态文集(II). 北京: 海洋出版社, 1990: 87–94.
- [22] 刘云旭, 温伟英, 王文介. 大亚湾海域物理自净能力的时空差异性研究[J]. 热带海洋, 1999, 18 (4): 61–68.

Nutrient factors limiting phytoplankton production of Daya Bay in spring

WANG Xiao-wei^{1,2}, LI Chun-hou¹, LI Zhan-dong¹, LIN Lin^{1,3}, SHEN Nan-nan^{1,2}

(1. South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences; Key Laboratory of Fishery Ecology Environment; Ministry of Agriculture, Guangzhou 510300, China; 2. Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China; 3. Shanghai Fisheries University, Shanghai 200090, China)

Abstract: Daya Bay, a rapidly urbanizing area, received anthropogenic nutrient loading. Some researches showed the primary limitation nutrient in Daya Bay was experiencing the transition from N-limit to P-limit. Changes in nutrient regime could have negative ecological effects on the bay. Phytoplankton nutrient limitation was studied during spring (April 2006). Seven factorial nutrient enrichment experiments were carried out in various locations in the bay, including outer middle inter of the bay. The experiments included additions of nitrogen (N), phosphorus (P) and silicate (Si) at a mole ratio of 16N:10P:16Si, additions of iron (Fe) and a synthetic chelator ethylenediaminetetraacetic acid (EDTA). The water was sampled from 3 stations and the experiment period was 3 days. To evaluate the nutrient limitation patterns, time series of chlorophyll a concentrations were analyzed using one-way ANOVA model and ranking method and the apparent nutrients depletion time were estimated. The two ways could explain each other. According to depletion time sequence results, phosphorus was running out in 48 h at St. 3 and St. 2, revealing that phytoplankton was limited by phosphorus at St. 2 and St. 3. At St. 1, nitrogen depletion time (94 h) was faster than the others (P depletion time 107 h and Si depletion time 114 h). As the phosphorus deviation the Redfield ratio by 10 times, the result showed that N-limitation was not so determinate. For the analysis results of chlorophyll a concentrations, St. 1 was N-limitation obviously. For St. 2, the chlorophyll a analysis results showed P and Si co-limited. Compared with the depletion time sequence, because each nutrient had a high bioavailability, the phytoplankton grew well in every experiment unit at the station. As for chlorophyll a concentration, the variance between experiment units and control unit was not so significant. The analysis results of chlorophyll a concentrations at St. 3 accorded with that of depletion time sequence. Iron had a positive effect on depletion rates of nitrogen. At St. 1 and St. 3, compared with AF and All units, the depletion rates increased by $0.05 \mu\text{mol N}/(\text{L}\cdot\text{h})$ and $0.02 \mu\text{mol N}/(\text{L}\cdot\text{h})$, respectively. And when iron and phosphate were added in at one time, it's necessary to add EDTA to prevent phosphate sedimentation from shaping. Our study showed that there exists a spatial variation in the phytoplankton limitation patterns, generally P-limited at the bottom and middle of the bay and N-limited outer of the bay. The tidal current of regional difference in Daya Bay may be the main cause. [Journal of Fishery Sciences of China, 2007, 14 (5): 836–842]

Key words: Daya bay; phytoplankton; nutrition limitation; nutrient enrichment experiment

Corresponding author: LI Chun-hou. E-mail: scslch@163.com