

围隔藻类水华演替过程中二甲基硫化物的含量动态

李 猛, 袁东星*, 汤坤贤

(近海海洋环境科学国家重点实验室, 厦门大学环境科学研究中心, 厦门 361005)

摘要: 于 2005 年 6 月至 7 月, 研究了海洋围隔不同藻类水华演替过程中二甲基硫化物的含量动态, 并考察了相关环境参数对二甲基硫化物含量的影响。2 个围隔实验组均出现未知藻水华-硅藻水华-甲藻水华的演替过程, 这 3 次不同藻类水华分别对应了二甲基硫化物含量的 3 次高峰, 表明藻类水华对二甲基硫化物含量有重要贡献。不同藻类水华的贡献有较大差异, 甲藻水华的贡献最大, 硅藻次之, 未知藻类水华的贡献最小。实验结果还表明 PO_4^{3-} 、 NO_2^- 和 NH_4^+ 主要通过影响藻类生长状态, 进而影响 DMSP 和 DMSO 的含量; NO_2^- 和 NH_4^+ 亦可能通过调节 DMSP 和 DMSO 在藻细胞内的生理功能, 影响 DMSP 和 DMSO 的含量; PO_4^{3-} 、 NO_2^- 和 NH_4^+ 与 DMS 含量无显著相关。

关键词: 二甲基硫(DMS); 二甲基巯基丙酸内盐(DMSP); 二甲亚砜(DMSO); 水华; 正磷酸盐(PO_4^{3-}); 亚硝酸盐(NO_2^-); 铵盐(NH_4^+)

文章编号: 1000-0933(2007)12-5308-10 中图分类号: Q178.53 文献标识码: A

Variations of the concentration of dimethyl sulfur compounds during three algal blooms in a mesocosm experiment

LI Meng, YUAN Dong-Xing, TANG Kun-Xian

State Key Lab of Marine Environmental Science, Environmental Science Research Centre of Xiamen University, Xiamen 361005, China
Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(12): 5308 ~ 5317.

Abstract: Variations of the concentration of dimethyl sulfur compounds (DMSCs) and the effects of environmental factors on the concentrations of DMSCs were investigated in a seawater mesocosm experiment from June to July 2005. Three large algal blooms, an unknown algal bloom, a diatom bloom, and a dinoflagellate bloom, respectively, were developed in the experimental enclosures. Three peak concentrations of DMSCs, corresponding to three algal blooms, indicated that algal blooms played an important role in the production of DMSCs. This study also showed that dinoflagellate bloom contributed the most to DMSCs, unknown algal bloom the least, and diatom bloom was intermediate. PO_4^{3-} , NO_2^- and NH_4^+ affected the productions of dimethylsulphoniopropionate (DMSP) and dimethylsulfoxide (DMSO) through the influence on the growth of algae, and NO_2^- and NH_4^+ might even affect the productions of DMSP and DMSO through the control of their physiological roles in the algal cell. However, no significant effects of PO_4^{3-} , NO_2^- and NH_4^+ on the production of dimethylsulfide (DMS) were evident.

Key Words: dimethylsulfide (DMS); dimethylsulphoniopropionate (DMSP); dimethylsulfoxide (DMSO); algal bloom;

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(200077022)

收稿日期: 2006-10-26; 修订日期: 2007-04-29

作者简介: 李猛(1980~), 男, 广东湛江人, 硕士, 主要从事海洋环境分析化学研究. E-mail: h0792024@hkusua.hku.hk

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yuandx@xmu.edu.cn

致谢: 香港大学生态与多样性学系顾继东和厦门大学环境科学研究中心马剑对论文修改给予帮助, 在此一并致谢。

Foundation item: The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 200077022)

Received date: 2006-10-26; **Accepted date:** 2007-04-29

Biography: LI Meng, Master, mainly engaged in marine environment analytical chemistry. E-mail: h0792024@hkusua.hku.hk

phosphate (PO_4^{3-}); nitrite (NO_2^-); ammonium (NH_4^+)

二甲基硫(DMS)是海水中最丰富的挥发性有机硫化物,直接参与全球的气候变化和酸雨的形成过程,在大气化学和生物地球化学循环中起着重要作用^[1]。二甲基巯基丙酸内盐(DMSP)是DMS的主要前体化合物,在DMSP裂解酶的作用下分解为DMS和丙烯酸^[2],藻体自身的衰老、浮游动物的摄食和病毒侵染等因素都会影响DMS的产量^[3,4]。二甲亚砜(DMSO)是海洋中又一重要的二甲基硫化物,长期以来被认为是DMS的光化学氧化或者细菌氧化的氧化产物^[5,6]。此外,DMSO还可由浮游植物在体内合成^[7]。海洋围隔生态实验(mesocosm)是20世纪60年代发展起来的一种海洋学实验方法^[8],被广泛应用于水体富营养化引起的水华或赤潮研究中。各国科学家利用海洋围隔生态系实验,研究了海水中病毒和细菌的感染、浮游动物的捕食以及磷酸盐等因素对DMSP和DMS的产量变化的影响^[9~11]。但是以往二甲基硫化物的海洋围隔生态系实验研究集中于环境因子如营养盐、浮游动物等与DMSP和DMS产量的关系上,尚未有关于围隔实验不同水华演替过程中3种二甲基硫化物的含量变化的研究报道。

本研究采用海洋围隔生态实验方法,将采自养殖区域的营养盐丰富的底泥投入围隔,诱发水华,监测DMSPd(溶解态DMSP),DMSPp(颗粒态DMSP),DMS,DMSOd(溶解态DMSO)和DMSOp(颗粒态DMSO)在水华过程不同时间里的含量动态,探讨各种环境参数,如 PO_4^{3-} 、 NO_2^- 和 NH_4^+ 等对二甲基硫化物含量的影响。

1 材料与方法

1.1 海洋围隔生态实验

海洋围隔生态实验于2005年6月17日至2005年7月17日在国家海洋局第三海洋研究所的陆基围隔水池中进行,历时30d。围隔池距海岸约8m。围隔池长8m,宽5m,深5m。围隔袋用聚乙烯塑料膜缝制而成,固定在竹竿上,并置于围隔池内,如图1所示。实验设4个围隔袋,分别标为A、B、C和D,其中A和D为对照组,B和C为实验组。实验开始时,用泵抽取堤外海水注入围隔池和各个围隔袋中,保持围隔池内海水一定水位。每个围隔袋约装有 10m^3 实验海水,其中B和C袋

分别加入1t采自福建省东山县海水养殖区的底泥,于每日23:00对4个袋内的海水分别进行充分搅拌,使B袋和C袋底泥中的营养盐释放入水体。每天12:00采取各围隔袋表层海水进行分析测试,所有样品均取2个平行样,结果取平均值。

1.2 样品分析

1.2.1 二甲基硫化物的测定

(1) 仪器与试剂

Varian CP-3800 GC-PFPD(美国Varian公司);ENCON吹扫-捕集系统(美国EST公司),VOCARB 3000吸附管(美国Supelco公司,管内的吸附剂为Carbopack B/CarboxenTM1000 & Carboxen 1001);松下NN-8552WF变频微波炉(上海松下微波炉有限公司)。

取 $1\mu\text{l}$ DMS(美国Supelco公司,分析纯)溶解在1ml甲醇(美国TEDIA公司,色谱纯)中,配成 $845\mu\text{g}/\text{ml}$ 的储备液;取 $1\mu\text{l}$ DMSO(美国Supelco公司,分析纯)溶解在1ml纯净水中,配成 $1100\mu\text{g}/\text{ml}$ 的储备液。 NaBH_4 (分析纯,进口分装)购自上海化学试剂公司;1:1 HCl(上海化学试剂公司,优级纯);NaOH(上海化学试剂公司,优级纯);ADVANTEC GB50玻璃纤维滤膜(日本东京Kaisha公司)。

(2) 仪器参数

气相色谱参数:色谱柱为 $70\text{m} \times 0.53\text{mm}$ DB-624毛细管柱(美国J&W公司),涂层厚 $3\mu\text{m}$,进样口(型号

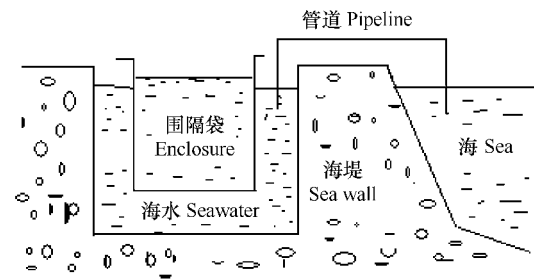


图1 围隔实验装置示意图

Fig. 1 The design of the mesocosm experiment

1061) 温度 200℃, PFPD 温度 220℃, 氢气流量 17ml/min, 空气 1 流量 21ml/min, 空气 2 流量 10ml/min。载气为高纯氮气, 流量 5.0ml/min; 柱箱温度恒定为 100℃。

吹扫捕集系统参数: 吹扫气体为高纯氮气, 吹扫时间 18min, 吹扫流量 55ml/min; 捕集管吸附温度 30℃, 脱附温度 250℃, 脱附时间 2min; 传输线温度 60℃。

(3) 二甲基硫化物的顺序分析步骤

用针筒过滤器将一定体积的水样缓慢滤过 GB50 玻璃纤维滤膜, 保存滤膜待测 DMSP_p 和 DMSO_p。滤液送入吹扫-捕集系统中, 测定 DMS。取出测定过 DMS 的水样置于玻璃瓶中, 加入 0.1gNaOH, 密封摇匀, 在功率 200W 下微波辐射 6min, 使水样中 DMSP_d 碱解成 DMS。样品迅速冷却至室温, 加入一定量的 1:1 HCl 中和, 使溶液呈微酸性(pH 约为 5), 然后送入吹扫管中, 测定 DMS, 求出水样中 DMSP_d 的含量。DMSP_d 测定结束后, 样品保留在吹扫管中, 加入溶有 0.04g NaBH₄ 的水溶液 2ml, 固定反应时间为 2min。样品中 DMSO_d 在吹扫管中被 1:1 还原成 DMS, 测定还原生成的 DMS, 可求出 DMSO_d 含量。

将上述过滤得到的 DMSP_p 和 DMSO_p 滤膜置于玻璃瓶中, 加入 20ml 纯净水, 重复测定 DMSP_d 和 DMSO_d 的步骤, 分别测定 DMSP_p 和 DMSO_p。

1.2.2 现场环境参数的测定

现场光照条件采用 LX101 型照度计(上海仪器仪表有限公司)测量, 盐度、水温、pH 值、溶解氧和饱和度用 0555A1 精密型 pH/MV/电导/盐度/TDS/ORP/T 多参数测量仪(上海精密仪器仪表有限公司)测定。

1.2.3 其他环境参数的测定

按照《海洋监测规范》^[12] 中的规定, 叶绿素 a 用 90% 丙酮萃取后在荧光计上测定; 活性磷酸盐采用磷钼蓝分光光度法测定; 亚硝酸盐采用盐酸萘乙二胺分光光度法测定; 硝酸盐采用锌镉还原-盐酸萘乙二胺分光光度法测定; 氨氮采用次溴酸盐氧化法测定; 活性硅酸盐采用硅钼蓝分光光度法测定; 浮游植物水样经鲁格试剂固定后在显微镜下进行鉴定并计数。

2 结果与讨论

2.1 围隔生态实验中对照组和实验组之间的环境参数比较

实验测定了实验组和对照组中的温度、盐度、pH、光照强度、溶解氧以及营养盐等环境参数。采用 SPSS 统计软件对实验组和对照组的各环境参数进行显著性差异分析, 结果列于表 1。实验组(B 袋和 C 袋)和对照组(A 袋和 D 袋)的各环境参数中, 温度、盐度、pH、光照强度和溶解氧等无明显差异; PO_4^{3-} 、 NO_2^- 和 NH_4^+ 则有显著性差异。图 2 显示了 4 个围隔袋中 PO_4^{3-} 、 NO_2^- 和 NH_4^+ 的含量变化曲线, 由图中可以看出, 实验组的 PO_4^{3-} 、 NO_2^- 和 NH_4^+ 含量明显高于对照组。此外, 比较实验组中的 PO_4^{3-} 的含量与无机氮盐的含量可以发现, 在围隔实验前 5d, 水体中的 N:P 摩尔比接近 Redfield 比值(16:1), 符合藻类生长对氮磷营养盐比的需求^[13]; 第 6 天后, 水体中的 N:P 摩尔比远高于 16:1, 表明 PO_4^{3-} 含量成为限制藻类生长的主要营养盐因子。

2.2 围隔生态实验中浮游植物生物量的变化以及种群的演替

围隔生态系统中浮游植物生物量的变化用叶绿素 a 的浓度变化描述, 4 个围隔袋的叶绿素 a 含量变化曲线如图 3 所示。从图 3 可以看出, 对照组的 A 袋和 D 袋的叶绿素 a 含量在整个实验过程中均保持较低水

表 1 各围隔袋间环境参数的相关性

Table 1 Correlation of environmental factors between enclosures

因素 Factors	A-B	A-C	A-D	B-C	B-D	C-D
S	n	n	n	n	n	n
T	n	n	n	n	n	n
光 Light	n	n	n	n	n	n
DO	n	n	n	n	n	n
pH	n	n	n	n	n	n
SiO_4^{4-}	n	n	n	n	n	n
NO_3^-	n	n	n	n	n	n
PO_4^{3-}	y	y	n	y	y	y
NO_2^-	y	y	y	y	y	y
NH_4^+	y	y	n	n	y	y

$N = 27, P < 0.05$; n = 无显著性差异; y = 显著性差异; A, B, C, D 分别代表围隔袋 A, B, C, D; “A-B”表示 A 袋与 B 袋之间, 余按此类推 $N = 27, P < 0.05$; n: no significant difference; y: significant difference; A, B, C and D represents 4 enclosures, respectively; “A-B” means between A and B, and others can be deduced

平,实验组的 B 袋和 C 袋在第 11 天和第 15 天前分别出现两次含量高峰,说明此时实验组的浮游植物生物量达到高值。

2 个实验组的围隔袋在第 7 天左右即出现一次未知藻水华。该藻的个体较微小,叶绿素 a 含量较低,初步认为是微鞭毛藻(*Microflagellates*)或微囊藻(*Microcystis*),但藻种的确认还有待进一步验证。第 12 天左右,2 个实验组的围隔袋均出现硅藻水华,并在第 17 天左右演替为甲藻水华,这两次水华分别对应叶绿素 a 的两次含量峰值。硅藻水华主要以角毛藻(*Chaetoceros*)、菱形藻(*Nitzschia*)和中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*)为优势种,其中菱形藻和中肋骨条藻在高峰期时的藻密度分别达到 2.29×10^6 cell/L 和 3.61×10^6 cell/L;而甲藻水华中出现了包括裸甲藻(*Gymnodinium*)、多甲藻(*Ceratium*)、卵甲藻(*Exuviaella*)和海洋原甲藻(*Prorocentrum micans*)等赤潮藻,以海洋原甲藻为主,最高密度为 1.29×10^7 cell/L,达到赤潮爆发时的藻密度。围隔实验所出现的硅藻水华和甲藻水华的演替过程与 1986 年厦门西海域赤潮发展的过程相似^[14],也与林昱等人^[15,16]在不同年份和季节、不同环境条件下所发现的围隔生态实验的藻类演替过程相似。科学家推测围隔生态系与半封闭的港湾、水产养殖区的藻类演替规律相似,因为这三者的水体相似,较为稳定,浮游植物可能出现相似的演替过程。

2.3 围隔生态实验中二甲基硫化物的含量动态

2.3.1 围隔生态实验中 DMSP 的含量动态

围隔生态实验过程中的 DMSP 含量动态如图 4 所示。由图 4 可见,对照组 A 袋和 D 袋的 DMSPd 含量在整个过程中一直维持在较低水平,与叶绿素 a 的含量变化相似。实验组 B 袋和 C 袋分别出现 3 次峰值,分别对应所出现的 3 次水华。两个实验组 DMSPd 的第一次峰值出现在实验的第 7 天和第 8 天,对应未知藻水华的出现。B 袋出现硅藻和甲藻水华的时间比 C 袋的早,其 DMSPd 含量的峰值时间也比 C 袋的早。DMSPp 的含量动态与 DMSPd 的含量动态相似。

比较叶绿素 a 和 DMSP 的变化(图 3 和图 4)可以看出,DMSP 的峰值含量与叶绿素 a 的峰值含量并非完全对应,DMSP 的含量变化略滞后于叶绿素 a 的。一方面,DMSP 和叶绿素 a 的含量与藻种有关,有些藻的叶绿素 a 含量虽低,却能合成较多的 DMSP,如第一次水华的未知藻;另一方面,可能与藻细胞内 DMSP 的合成、释放需要一定时间有关。

2.3.2 围隔生态实验中 DMS 的含量动态

围隔生态实验中 4 个围隔袋的 DMS 含量动态如图 5 所示。DMS 的含量动态与 DMSP 的含量动态有较大区别。在实验开始的前 10d,对照组和实验组的 DMS 基本保持相似的含量水平,在第 7 天出现未知藻水华时

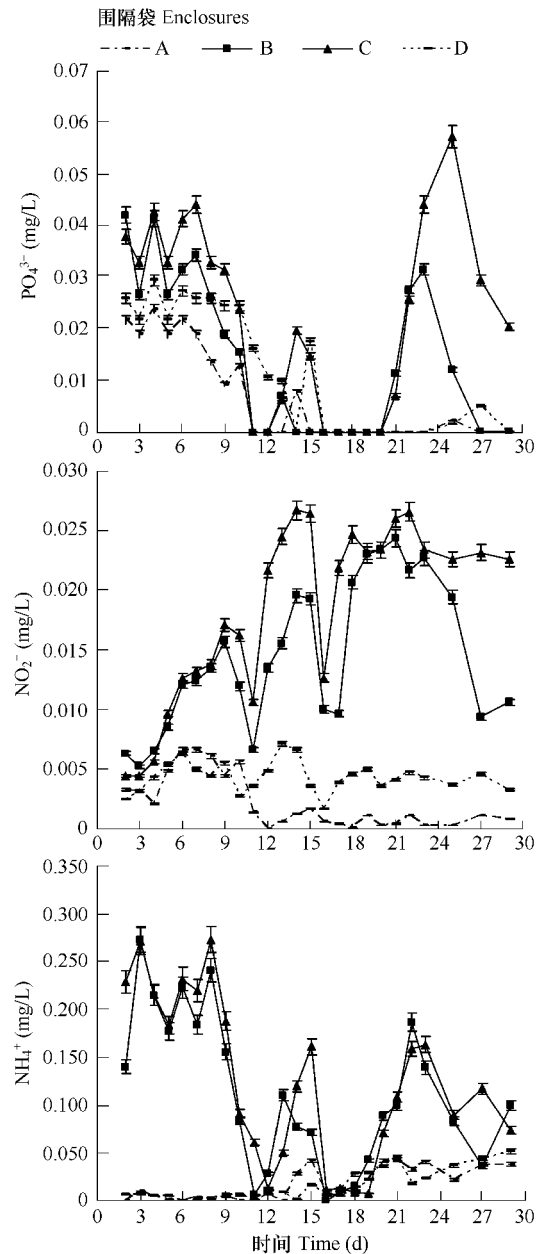


图 2 围隔生态实验中 PO_4^{3-} 、 NO_2^- 和 NH_4^+ 随时间变化曲线

Fig. 2 The variation of PO_4^{3-} , NO_2^- and NH_4^+ in the mesocosm experiment

并未出现 DMS 含量峰值,表明未知藻水华对 DMS 的含量没有明显贡献。在第 13 天前,两个实验组的 DMS 含量均呈现一个小峰值,对应硅藻水华的发生;而在第 18 天和第 21 天,实验组的 B 袋和 C 袋分别出现较大的 DMS 含量峰值,分别对应其所发生的甲藻水华。比较两个 DMS 峰值含量的大小可以发现,甲藻的水华对 DMS 的贡献要大于硅藻水华,这与文献^[17]所报道甲藻属于 DMS 高产种,硅藻是 DMS 低产种的结果相一致。

围隔生态实验中 DMS 含量与 DMSP 含量的变化规律不相似,可以从 DMSP 和 DMS 的产生与消耗途径解释。DMSP 由藻类通过一系列的生化反应产生,藻细胞经分泌或破裂,将 DMSP_p 释放入水体中形成 DMSP_d;因此 DMSP_p 和 DMSP_d 的含量主要由藻的生长状况决定。DMS 则由 DMSP 在 DMSP 裂解酶的作用下分解而成,因此其含量不但受 DMSP 含量影响,还受到水体中

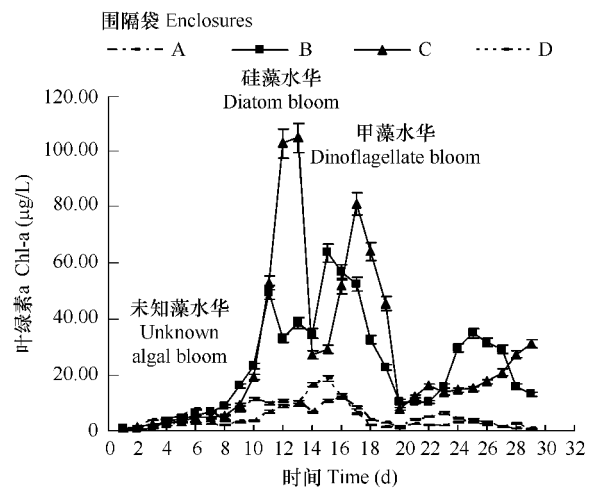


图3 围隔生态实验中叶绿素 a 随时间变化曲线

Fig. 3 The variation of Chl-a during the mesocosm experiment

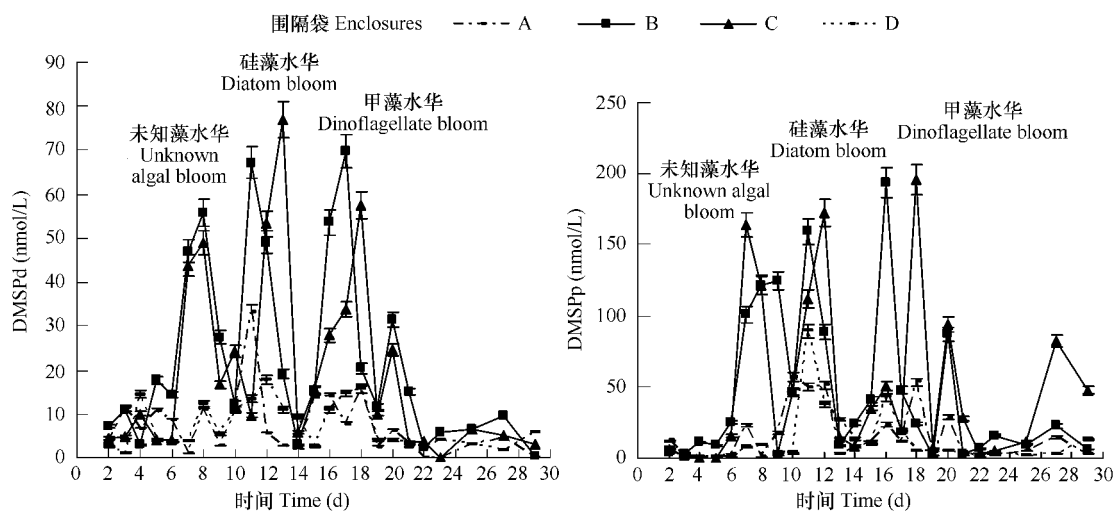


图4 围隔生态实验中 DMSP_d 和 DMSP_p 的含量动态

Fig. 4 The variation of DMSP_d and DMSP_p during the mesocosm experiment

DMSP 裂解酶的含量及其活性的控制。只有在 DMSP 裂解酶活性较高的水体中,DMSP 才能更快地分解生成 DMS。DMSP 裂解酶广泛存在于水体中不同的细菌、真菌中,也存在于一些藻体内,属于藻细胞的胞外膜结合物,不同藻种的 DMSP 裂解酶活性相差较大,其中大部分硅藻的 DMSP 裂解酶的活性低于甲藻的 DMSP 裂解酶^[18]。因此尽管在实验组出现硅藻和甲藻水华时 DMSP 含量相当,但是 DMS 的含量相差较大,推测其原因是 DMSP 裂解酶活性的影响。此外,温度也会影响 DMSP 裂解酶的活性,文献报道水体中 DMSP 裂解酶在 30℃ 左右具有最高的活性^[19],本实验的前一周天气条件较差,水体温度只保持在 26℃ 左右;直到第 8 天后天气转好,水体温度回升;实验后期,水体温度基本保持在 31℃ 左右。因此,第一次未知水华中虽出现了较高含量 DMSP,但是可能由于该种藻的 DMSP 裂解酶含量较少,且水温未达到 DMSP 裂解酶最佳活性的温度,大量 DMSP 未能分解产生 DMS,故 DMS 的含量变化较小。此外,DMS 出现含量峰值的时间比 DMSP 峰值时间要迟些,这可能与藻的生长状态有关。文献^[20]报道藻类细胞在进入衰老期后才会大量释放 DMS,DMS 的释放往往要滞后于 DMSP 的产生,而且释放持续时间较短。

2.3.3 围隔生态实验中 DMSO 的含量动态

4 个围隔袋的 DMSOd 和 DMSOp 含量动态如图 6 所示。由图可以看出,两个实验组的 DMSOd 在实验过程中均出现 3 个明显峰值,分别对应 3 次水华;第 3 次的峰值较大,表明甲藻水华比未知藻和硅藻水华对 DMSOd 的贡献更大。DMSOp 含量动态与 DMSOd 含量动态相似。

通常认为水体中的 DMSOd 是 DMS 光化学氧化和细菌氧化的产物,但是比较两个实验组的 DMS 含量动态(图 5)与 DMSOd 含量动态(图 6),可以看出两者的变化趋势不相似。DMSOd 的含量峰值时间比 DMS 的含量峰值时间更早,说明水体 DMS 含量不是决定 DMSOd 含量的唯一因素。实验结果发现,DMSOp 和 DMSOd 所出现的 3 次含量峰值时间与水华时间相应,

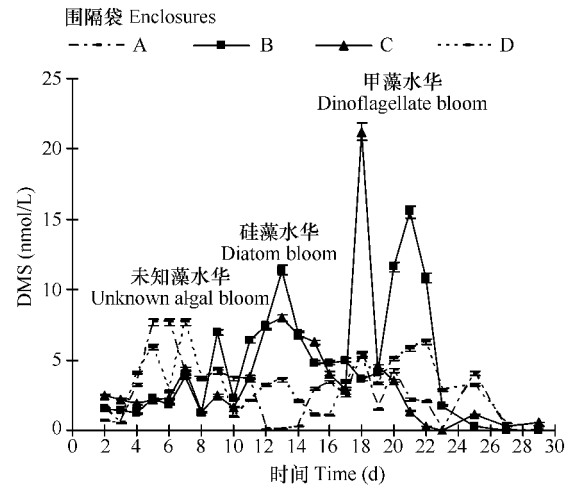


图 5 围隔生态实验中 DMS 的含量动态
Fig. 5 The variation of DMS during the mesocosm experiment

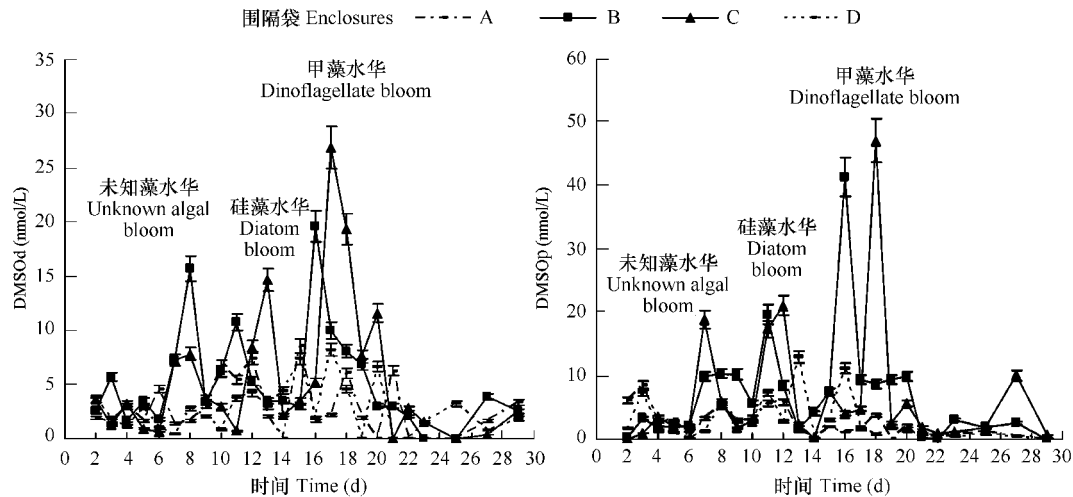


图 6 围隔生态实验中 DMSOd 和 DMSOp 的含量动态
Fig. 6 The variation of DMSOd and DMSOp during the mesocosm experiment

提示这些藻可能是 DMSO 的直接生产者。

2.4 磷酸盐(PO_4^{3-})对实验组二甲基硫化物含量的影响

PO_4^{3-} 在围隔实验中后期作为藻类生长的限制因子,其含量间接影响 DMSPp 和 DMSOp 含量。图 7 分别显示了围隔实验组中 B 袋和 C 袋的二甲基硫化物含量与 PO_4^{3-} 的含量变化。由图可以看出,在 B 袋和 C 袋出现水华时,DMSPp 和 DMSOp 含量都出现较为明显的峰值,且对应于 PO_4^{3-} 被大量消耗的阶段。其中第二个和第三个 DMSPp 和 DMSOp 含量峰值均处于 PO_4^{3-} 被完全消耗阶段,表明 PO_4^{3-} 含量与 DMSPp 和 DMSOp 含量呈负相关。相关性分析表明,其属于非显著性相关。1998 年, Wilson 等人^[21]通过围隔实验研究了磷限制条件下的藻类种群的动态变化及其对 DMSP 和 DMS 的产量影响。实验结果表明, $\text{N:P} > 16:1$ 时,即磷限制条件下,水体出现水华,DMSP 含量同时迅速增加,但是 PO_4^{3-} 含量与 DMSPp 含量为非显著性相关。该结果与本研究的一致。到目前为止,有关 PO_4^{3-} 对 DMSOp 含量影响的研究尚未有报道,但根据 DMSOp 在藻细胞中的生理功能,推测 PO_4^{3-} 含量对 DMSOp 含量的影响与 DMSPp 的情况类似。因此认为 PO_4^{3-} 通过对藻生长状况的限制,间接影响 DMSPp 和 DMSOp 的含量;由于不同藻的 DMSPp 和 DMSOp 含量有较大差异,使 PO_4^{3-} 与总

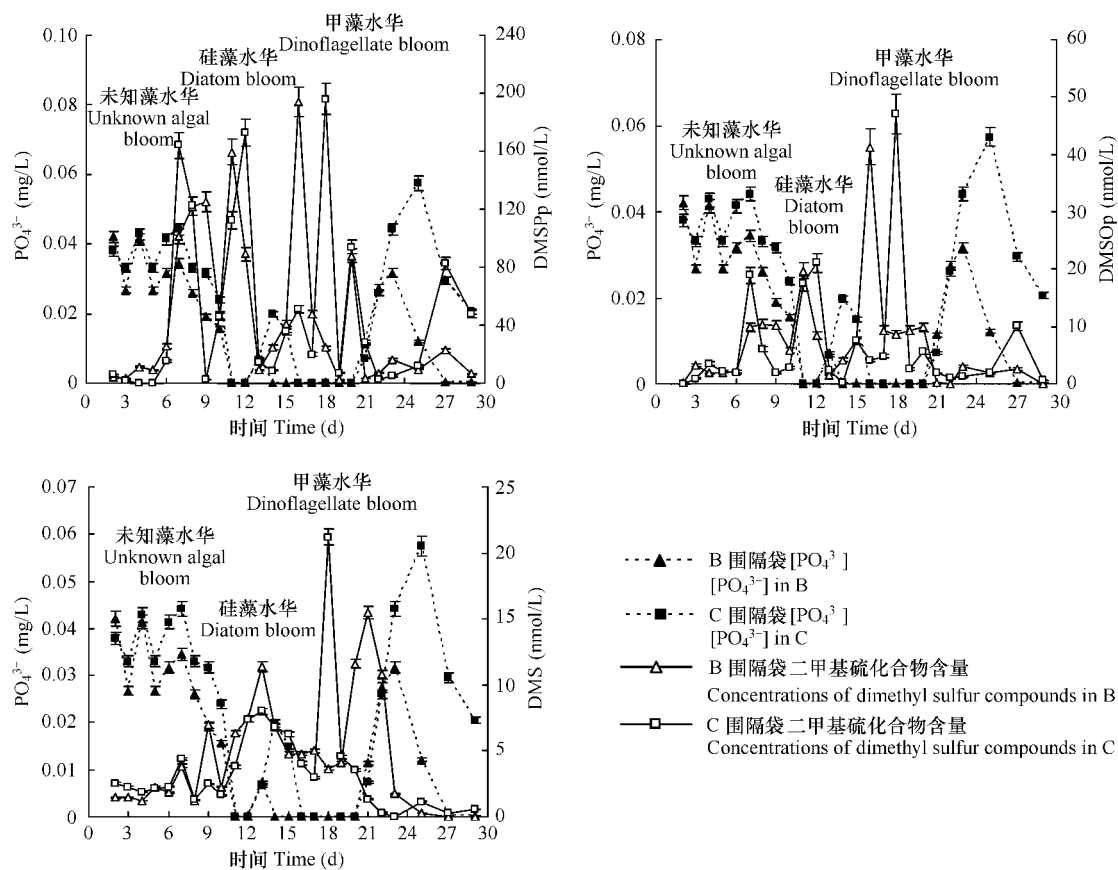


图7 实验组的 PO_4^{3-} 含量与二甲基硫化物含量

Fig. 7 The concentrations of PO_4^{3-} and dimethyl sulfur compounds in the experiment groups

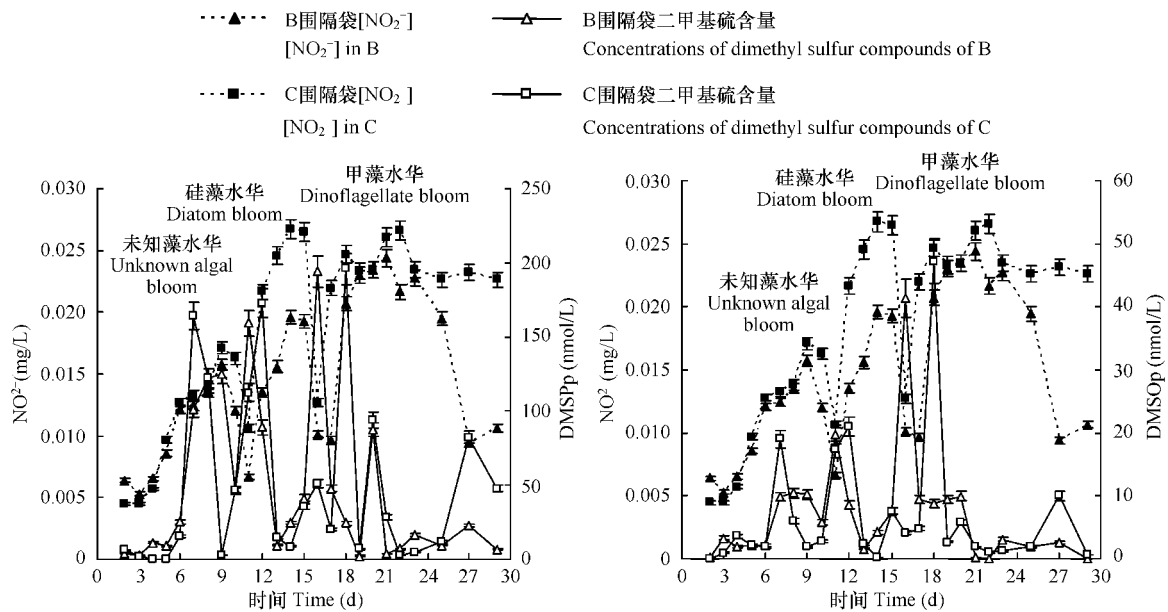
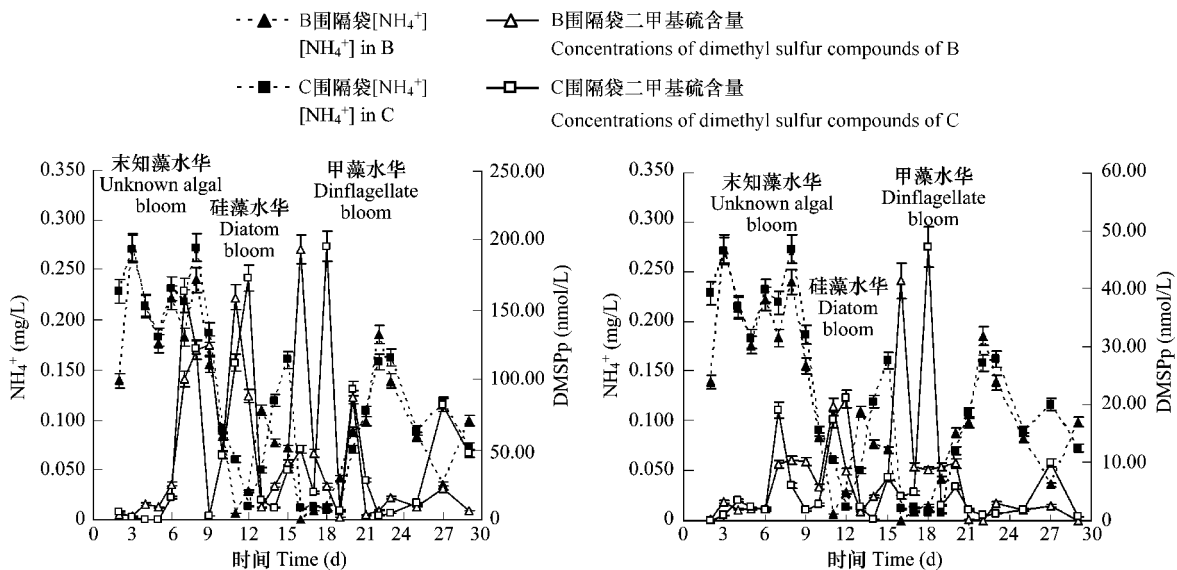
体 DMSPp 和 DMSOp 之间的相关关系不显著。

图7还示出了围隔实验中B袋和C袋的 PO_4^{3-} 与DMS的含量变化趋势,从图中可以发现,出现硅藻水华和甲藻水华时,水体中的DMS有较大增长,而在未知藻水华时期,DMS含量只有轻微升高; PO_4^{3-} 含量与DMS含量的相关性分析发现, PO_4^{3-} 含量与DMS含量不存在显著相关性。国内外关于 PO_4^{3-} 含量变化对DMS的影响研究较为深入,Wilson等人^[21]的实验结果表明,硅藻和甲藻水华快速消退时会产生大量DMS,但是 PO_4^{3-} 含量与DMS的含量不存在显著相关。杨桂朋等^[22, 23]在中国东海和南海研究DMS与营养盐关系时也发现, PO_4^{3-} 含量与DMS的含量无显著相关。胡敏等人^[24, 25]在九龙江河口以及青岛附近海域也发现了相似的结果。水体中的DMS由DMSP在DMSP裂解酶作用下分解产生,因此DMS含量与DMSP含量以及DMSP裂解酶有关,而DMSP含量大小取决于藻的种类及其生理状态。DMSP裂解酶的含量与活性除了与藻的种类及其生理状态有关外,水体中的细菌、病毒的含量也会对其产生影响。

DMSPd和DMSOd分别由藻细胞内的DMSPp和DMSOp释放到水体中形成,DMSPd和DMSOd的含量主要受控于DMSPp和DMSOp,与 PO_4^{3-} 含量无关。

2.5 亚硝酸盐(NO_2^-)和铵盐(NH_4^+)对实验组二甲基硫化物含量的影响

实验组的二甲基硫化物与 NO_2^- 和 NH_4^+ 的含量变化分别见图8和图9。 NO_2^- 和 NH_4^+ 作为藻类生长的必需营养盐,其含量高低直接影响藻类的生长状态,从而间接影响DMSPp和DMSOp的含量。但从图中也可以看出, NO_2^- 和 NH_4^+ 含量在未知藻水华期间的变化较小。实验组藻类生长的主要营养盐限制因子是 PO_4^{3-} , 氮营养盐相对于 PO_4^{3-} 处于富余的状态,因此 NO_2^- 和 NH_4^+ 对DMSPp和DMSOp含量的影响,除了从 NO_2^- 和 NH_4^+ 对藻类生长的直接影响考虑之外,还应从其他方面探讨,如氮盐对DMSPp和DMSOp在藻细胞中的生理

图 8 实验组的 NO_2^- 含量与二甲基硫化物含量比较Fig. 8 The concentrations of NO_2^- and dimethyl sulfur compounds in the experiment groups图 9 实验组的 NH_4^+ 含量与二甲基硫化物含量比较Fig. 9 The comparison of NH_4^+ and dimethyl sulfur compounds of experiment groups

功能的影响。

前人的研究表明,DMSP 在藻细胞内一般以两性离子形式存在,不易透过细胞膜,可以在细胞内充分积累,起到调节渗透压的作用^[26]。海洋很多藻类以 DMSP 作为渗透压调节物质^[26]。当水体环境缺乏硝酸盐,藻细胞无法合成足够的含氮有机调节剂时,藻细胞会大量合成 DMSP 作为渗透压调节剂。也有研究认为,自然海区的 DMSP 与氮盐的关系是两段式的^[27],当氮盐浓度低于某一阈值时,DMSP 的含量与氮盐的浓度正相关,高于此阈值时则为负相关;理由是氮盐浓度较低时,浮游植物的生长处于氮限制,氮盐与 DMSP 浓度之间表现为正相关;当环境中氮盐比较充足时,藻细胞对 DMSP 作为渗透压调节物质的需求随氮盐浓度升高而下降,这时氮盐与 DMSP 的浓度表现为负相关。本研究发现,本围隔实验的氮盐相对丰富,藻类生长的营养盐

限制因子是 PO_4^{3-} , B 袋和 C 袋的 DMSPp 含量与氮盐含量成负相关关系。图 8 和图 9 中显示, 在 NO_2^- 和 NH_4^+ 被大量消耗时所出现 DMSPp 含量的极大值, 一方面由于水华所引起, 另一方面也可能是基于氮盐与 DMSPp 含量的负相关关系。对藻细胞内 DMSOp 的生理功能研究较少, Lee 和 de Mora^[7] 根据文献资料, 推测出 DMSO 在藻细胞中的 3 种生理作用, 包括抗冷冻作用、清除自由基作用和细胞内电解液改性作用。但是氮盐对 DMSOp 生理功能的影响尚未清楚, 有待进一步研究。

DMS 是 DMSP 在 DMSP 裂解酶作用下分解产生, 含量大小与 DMSP 含量及 DMSP 裂解酶有关。藻的种类和生长状态会直接影响 DMSP 以及 DMSP 裂解酶, 因而决定水体中的 DMS 含量。实验组中的藻类的生长状态主要受控于 PO_4^{3-} 含量, 因此 NO_2^- 和 NH_4^+ 不是藻类的生长限制因素, 对水体中 DMS 含量的影响相对较小。 NO_2^- 和 NH_4^+ 对 DMSPd 和 DMSOd 含量的影响, 与 PO_4^{3-} 对 DMSPd 和 DMSOd 含量的影响相似, 主要是通过对 DMSPp 和 DMSOp 的作用, 间接影响水体中的 DMSPd 和 DMSOd 含量。

3 结论

(1) 在海洋围隔生态实验中, 两个实验组均出现了 3 次不同藻类的水华演替, 其中第一次水华来自未知藻, 第二次和第三次的水华分别为硅藻和甲藻引起。

(2) 实验组的 DMSP 和 DMSO 含量动态基本相似, 均出现了 3 个含量高峰, 分别对应于围隔实验组所出现的 3 次水华, 表明水华对 DMSP 和 DMSO 的含量有重要贡献; DMS 含量动态不同于 DMSP 和 DMSO, 在实验过程中只出现两个含量高峰, 分别对应硅藻和甲藻水华, 说明不同藻类水华在 DMS 产量上有较大区别。

(3) PO_4^{3-} 、 NO_2^- 和 NH_4^+ 等环境参数主要通过对藻类生长的影响而间接影响 DMSP 和 DMSO 的含量; NO_2^- 和 NH_4^+ 也可能通过影响 DMSP 和 DMSO 的生理功能, 进而影响 DMSP 和 DMSO 的含量; 研究结果还表明, PO_4^{3-} 、 NO_2^- 和 NH_4^+ 等环境因子与 DMS 含量无显著相关。

References:

- [1] Charlson R J, Lovelock J E, Andreae M O. Oceanic phytoplankton, atmospheric sulphur, cloud albedo and climate. *Nature*, 1987 (326): 655—661.
- [2] Visscher P T, Taylor B F. Demethylation of dimethylsulfoniopropionate to 3-mecaptopropionate by an aerobic marine bacterium. *Applied and Environmental Microbiology*, 1994 (60): 4617—4619.
- [3] Kieber D J, Jiao J. Impact of dimethylsulfide photochemistry on methyl sulfur cycling in the equatorial Pacific Ocean. *Journal of Geophysical Research*, 1996 (101): 3715—3722.
- [4] Stefels J. Physiological aspects of the production and conversion of DMSP in marine algae and higher plants. *Journal of Sea Research*, 2000 (43): 183—197.
- [5] Zinder S H, Brock T D. Dimethylsulphoxide reduction by micro-organisms. *Journal of General Microbiology*, 1978 (105): 335—342.
- [6] Zeyer J, Eicher P, Wakeham S G, *et al.* Oxidation of dimethylsulfoxide by phototrophic purple bacteria. *Applied and Environmental Microbiology*, 1987 (53): 2026—2032.
- [7] Lee P A, de Mora S J. Intracellular dimethylsulfoxide (DMSO) in unicellular marine algae: speculations on its origin and possible biological role. *Journal of Phycology*, 1999 (35): 8—18.
- [8] Strickland J D H, Terhune L D B. The study of in situ marine photosynthesis using a large plastic bag. *Limnology and Oceanography*, 1961 (6): 93—96.
- [9] Bratbak G, Levasseur M, Michaud S, *et al.* Viral activity in relation to *Emiliania huxleyi* blooms: a mechanism of DMSP release? *Marine Ecology Progress Series*, 1995 (128): 133—142.
- [10] Levasseur M, Michaud S, Egge J, *et al.* Production of DMSP and DMS during a mesocosm study of an *Emiliania huxleyi* bloom: influence of bacteria and *Calanus finmarchicus* grazing. *Marine Biology*, 1996 (126): 609—618.
- [11] Kwint R L J, Quist P, Hansen T A, *et al.* Turnover of dimethylsulfoniopropionate and dimethylsulfide in the marine environment: A mesocosm experiment. *Marine Ecology Progress Series*, 1996 (145): 223—232.
- [12] China State Bureau of Technical Supervision. The specification for oceanographic survey. Beijing: China Ocean Press, 1991.
- [13] Kilham P, Hecky R. E. Comparative ecology of marine and freshwater phytoplankton. *Limnology and Oceanography*, 1988, 33 (4): 776—795.
- [14] Du Q. The Research of red tide in Xiamen western sea area. *Journal of Jinan University*, 1989, 10 (1): 57—67.

- [15] Lin Y, Chen X L, Zhuang F D, *et al.* Preliminary analysis for the structures phytoplankton community in a marine enclosed ecosystem before and after a red tide process. *Acta Ecologica Sinica*, 1992, 12 (3): 213 — 218.
- [16] Lin Y, Chen X L, Zhuang F D, *et al.* Preliminary study on red tide formation based on results from enclosed experimental ecosystems- the relationship between diatom red tide with some physical and chemical factors. *Oceanologia Et Limnologia Sinica*, 1994, 25 (2): 139 — 146.
- [17] Keller M D. Dimethyl sulfide production and marine phytoplankton: the important of species composition and cell size. *Biological Oceanography*, 1988 (6): 375 — 382.
- [18] Taylor B F. Bacterial transformations of organic sulfur compounds in marine environments. in: Oremland R., eds. *Biogeochemistry of Global Change-Radioactively Active Trace Gases*. Chapman & Hall, New York, 1993. 745 — 781.
- [19] Stefels J, Dijkhuizen L. Characteristics of DMSP-lyase in *Phaeocystis* sp. (Prymnesiophyceae). *Marine Ecology Progress Series*, 1996 (131): 307 — 313.
- [20] Jin X Y, Yuan D X, Wang D Z, *et al.* Microwave assisted alkaline hydrolysis of dimethylsulfoniopropionate in algae of laboratory batch cultures and determination with gas chromatography. *Chemical Journal on Internet*, 2003, 15 (5) 12: 94 — 99
- [21] Wilson W H, Turner S, Mann N H. Population dynamics of phytoplankton and viruses in a phosphate limited mesocosm and their effect on DMSP production. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1998(46): 49 — 59.
- [22] Yang G P. Spatial distributions of DMS in the South China Sea. *Deep-Sea Research I*, 2000 (42): 177 — 192.
- [23] Yang G P, Zhang J W, Li L, *et al.* Dimethylsulfide in the surface water of the East China Sea. *Continental Shelf Research*, 2000 (20): 69 — 82.
- [24] Ma Q J, Hu M, Liu L L, *et al.* Spatial Distribution of Seawater Dimethylsulfide in Winter of Jiulong Jiang Estuary. *Environmental Science*, 2004, 23(5): 47 — 51.
- [25] Liu L L, Hu M, Ma Q J, *et al.* Influence of Terrestrial Nutrient Input on Biogenic Production of Dimethylsulfide in Qingdao Coastal Water. *Environmental Science*, 2004, 23(2): 57 — 60.
- [26] Groene T, Kirst G O. The effect of nitrogen deficiency, methionine and inhibitors of methionine metabolism on the DMSP contents of *Tetraselmis subcordiformis* (Stein). *Marine Biology*, 1992 (112): 497 — 503.
- [27] Jiao N Z, Liu C Z, Chen N H. Distribution of Dimethylsulphoniopropionate and its controlling Mechanism in the East China Sea. *Oceanologia Et Limnologia Sinica*, 1999, 30 (5): 525 — 531.

参考文献:

- [12] 国家海洋局. 海洋监测规范. 北京: 海洋出版社, 1991.
- [14] 杜琦. 厦门西海域赤潮的研究. 暨南大学学报, 1989, 10 (1): 57 ~ 67.
- [15] 林昱, 陈孝麟, 庄栋法, 等. 海洋围隔生态系中赤潮发生前后浮游植物群落结构的初步分析. 生态学报, 1992, 12 (3): 213 ~ 218.
- [16] 林昱, 庄栋法, 陈孝麟. 初析赤潮成因研究的围隔实验结果——几个理化因子与硅藻赤潮的关系. 海洋与湖沼, 1994, 25 (2): 139 ~ 146.
- [24] 马奇菊, 胡敏, 刘玲莉, 等. 九龙江河口湾区冬季海水二甲基硫浓度的分布特征. 环境科学, 2004, 23(5): 47 ~ 51.
- [25] 刘玲莉, 胡敏, 马奇菊, 等. 陆源营养盐输入对青岛近岸海域 DMS 生物生产的响应. 环境科学, 2004, 23(2): 57 ~ 60.
- [27] 焦念志, 柳承璋, 陈念红. 东海二甲基硫丙酸的分布及其制约因素的初步研究. 海洋与湖沼, 1999, 30 (5): 525 ~ 531.