

夏季黄渤海表层海水中二甲亚砷(DMSO)的浓度分布

王敏,张洪海,杨桂朋*

(中国海洋大学化学化工学院,海洋化学理论与工程技术教育部重点实验室,青岛 266100)

摘要: 根据2011年6月对黄渤海进行的大面调查,分析研究了夏季表层海水中颗粒态和溶解态二甲亚砷(DMSOp、DMSOd)的水平分布及其周日变化特征。海水中DMSO首先采用 NaBH_4 将其还原为二甲基硫(DMS),再利用冷阱吹扫-捕集气相色谱法进行间接测定。结果表明,表层海水中DMSOp浓度的变化范围是 $5.43 \sim 18.35 \text{ nmol} \cdot \text{L}^{-1}$,平均值为 $(11.47 \pm 0.25) \text{ nmol} \cdot \text{L}^{-1}$;DMSOd浓度的变化范围是 $4.75 \sim 43.80 \text{ nmol} \cdot \text{L}^{-1}$,平均值为 $(13.42 \pm 0.58) \text{ nmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 。相关性分析显示:DMSOp与叶绿素a(Chl-a)、温度、盐度等不存在相关性,而DMSOp/Chl-a比值与盐度存在一定的正相关,表明DMSO在藻细胞内具有渗透压调节功能;DMSOd与细菌、DMSOp浓度不存在相关性,而与DMS浓度存在一定的正相关,表明表层海水中DMSOd的主要来源是DMS的光化学氧化。另外,DMSOp与DMSOd均呈现出明显的周日变化规律,白天时段浓度明显高于夜间时段。

关键词: 二甲亚砷;浓度分布;周日变化;黄海;渤海

中图分类号: X145 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)01-0045-06

Distribution of Dimethylsulfoxide (DMSO) in the Surface Water of the Yellow Sea and the Bohai Sea

WANG Min, ZHANG Hong-hai, YANG Gui-peng

(Key Laboratory of Marine Chemistry Theory and Technology, Ministry of Education, College of Chemistry and Chemical Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: The horizontal distributions and diurnal variations of particulate and dissolved dimethylsulfoxide (DMSOp, DMSOd) were studied in the surface water of the Yellow Sea and the Bohai Sea in June, 2011. The determination of DMSO was based on the DMS produced by NaBH_4 reduction, which was analyzed using the purge-and-trap technique coupled with gas chromatographic separation and flame photometric detection. The concentrations of DMSOp and DMSOd ranged from 5.43 to $18.35 \text{ nmol} \cdot \text{L}^{-1}$ and from 4.75 to $43.80 \text{ nmol} \cdot \text{L}^{-1}$, respectively, with average values of $(11.47 \pm 0.25) \text{ nmol} \cdot \text{L}^{-1}$ and $(13.42 \pm 0.58) \text{ nmol} \cdot \text{L}^{-1}$. The results showed that no relationship was found between DMSOp and environmental factors such as chlorophyll a (Chl-a), temperature and salinity, whereas a positive correlation was observed between DMSOp/Chl-a and salinity, indicating that intracellular DMSO could act as a cryo-osmoregulator. A significant relationship was also found between DMSOd and dimethylsulfide (DMS), whereas there was no relationship between DMSOd and DMSOp or DMSOd and bacteria, implying that DMSOd in the surface water was produced mainly through the photochemical oxidation of DMS. In addition, both the DMSOp and DMSOd concentrations exhibited obvious diurnal variations with the higher values in the day time.

Key words: dimethylsulfoxide; concentration distribution; diurnal variation; Yellow Sea; Bohai Sea

二甲亚砷(dimethylsulfoxide, DMSO)是亚砷分子中最具有代表性的化合物,不具有挥发性,它在自然水体中的含量较低,一般仅为 nmol 级。DMSO之所以受到越来越多的海洋工作者的关注,主要是由于它在海洋活性气体二甲基硫(dimethylsulfide, DMS)的生物地球化学循环中起着重要的作用。DMS是大气硫化物最主要的天然来源之一,是海水中最重要的挥发性生源有机硫化物^[1~5]。通过海-气交换进入大气中的DMS除参与全球硫循环外,还对区域或全球的气候变化和酸雨的形成产生重要的影响^[6,7]。海水中的DMS通过光化学氧化^[8]和细菌氧化^[9]可以生成DMSO,而DMSO又能被一些细菌^[10]和真核藻类生物^[11]降解还原为DMS,虽然DMSO不能直接影响气候变化,但通过与DMS的相

互转化,也能对全球气候造成间接的影响。

海洋中DMSO的研究与其相关硫化物DMS和 β -二甲基巯基丙酸内盐(dimethylsulfoniopropionate, DMSP)相比起步较晚。海洋中DMSO循环是个极为复杂的生态学、生物学和化学过程,其来源与转化的复杂程度也大大地增加了研究的难度。目前国际上已对海水中DMSO的浓度分布、迁移转化及其与各种生物因素和非生物因素的关系等方面进行了研究,并取得了一定的研究成果^[12~14]。然而国内对于

收稿日期: 2012-03-30; 修订日期: 2012-05-08

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41030858); 教育部博士点新教师基金项目(20110132120010); 教育部“长江学者”奖励计划项目; 山东省“泰山学者”建设工程项目

作者简介: 王敏(1988~),女,硕士研究生,主要研究方向为生源硫的生物地球化学, E-mail: wangmin9320@163.com

* 通讯联系人, E-mail: gpyang@mail.ouc.edu.cn

DMSO 的研究较少,尚处于起步阶段. Li 等^[15]对 DMSO 的测定方法、DMSO 在围隔实验中藻类水华演替过程中的变化等进行了初步研究^[16]; Yang 等^[17]对中国冬季东海海域 DMSO 的分布特征进行了研究. 然而目前关于中国黄渤海海域中 DMSO 的浓度分布尚未见文献报道. 本实验选择生态环境受人为干扰较为严重的黄渤海为研究海域,对夏季 DMSO 在表层海水中的分布特征及其主要影响因素进行了分析,以丰富我国在海洋生源硫循环方面的研究内容,以期为更加清楚地认识我国近海 DMSO 在 DMS 生物地球化学循环中的作用提供一定的科学依据.

1 水样采集及分析方法

1.1 样品采集

于 2011 年 6 月 13 日到 28 日随“东方红 2 号”科学考察船对黄渤海海域进行调查取样(如图 1),共包括 78 个大面站和 1 个 25 h 连续站(B65). 水样用 12 L Niskin Rosette 采水器采集后,立即取 40 mL 海水样品用内置 Whatman GF/F 玻璃纤维滤膜(直径 47 mm)的 Nalgene 过滤器低压过滤[不大于 666.6 Pa(5 mm Hg)],滤液装入盛有 0.2 mL 25% HCl 的 42 mL 样品瓶中,在 4℃ 下避光保存,滤膜折叠用锡纸包裹后于 -20℃ 冷冻保存.

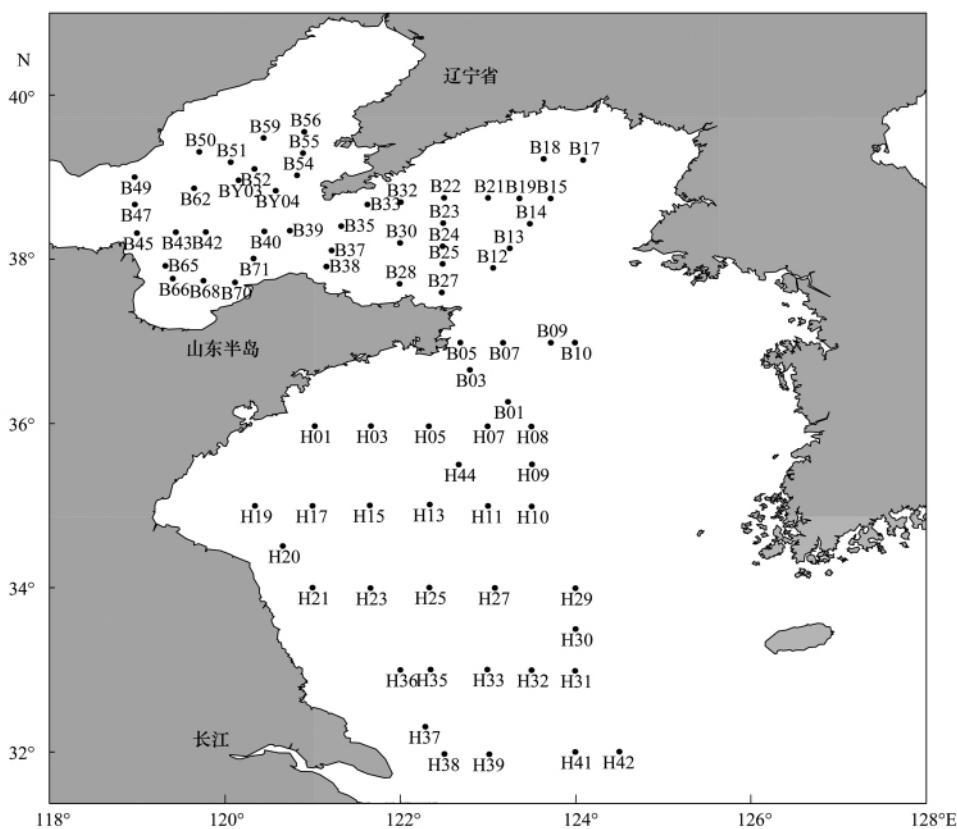


图 1 2011 年 6 月黄海和渤海调查站位示意

Fig. 1 Locations of sampling stations in the Yellow Sea and the Bohai Sea in June 2011

1.2 分析方法

1.2.1 DMSO 的分析

本实验中采用 NaBH_4 还原法测定海水中的 DMSO^[18],即用 NaBH_4 将 DMSO 还原为 DMS 后再进行测定. 此种方法的缺点是海水中自身存在的 DMS 会对 DMSO 的测定产生干扰,另外海水样品中的 DMSP 也能被 NaBH_4 还原为 DMS. 因此在测定 DMSO 之前先将海水样品调至 $\text{pH} \approx 13$,DMSP 在室温下放置 24 h 能完全定量转化为 DMS^[19];然后取

出样品用高纯氮气吹扫 30 min,去除海水里固有的 DMS 及由 DMSP 碱化生成的 DMS,再进行 DMSO 的还原测定. 首先是将海水样品 pH 调节为 4,加入 0.12 g NaBH_4 ,静置 10 min; 然后加入 5% HCl 1 mL,静置 4 min,再按照海水 DMS 的冷阱吹扫-捕集气相色谱法进行测定^[20].

1.2.2 叶绿素 a(chlorophyll a, Chl-a) 的分析

取 250 mL 海水样品用 Whatman GF/F 玻璃纤维滤膜低压(<15 kPa)过滤,滤膜用锡纸包裹后于

-20℃ 冷冻保存. 分析时采用荧光光度法, 先将滤膜用 10 mL 90% (体积分数) 的丙酮水溶液避光浸取 24 h, 后用 F-4500 分子荧光仪(日本日立) 进行测定^[21].

2 结果与讨论

2.1 DMSOp 和 DMSOd 的水平分布

夏季表层海水中 DMSOp、DMSOd、盐度和 Chl-a 的水平分布如图 2 所示. DMSOp 的浓度范围介于 5.43 ~ 18.35 nmol·L⁻¹ 之间, 平均值为(11.47

±0.25) nmol·L⁻¹. 浓度的最高值出现在烟台北部近岸海域 B39 站位. 另外, 在南黄海南部海域 H25、H30 和 H33 站位也有 DMSOp 浓度的高值出现. 总体来说, DMSOp 在北黄海中心及南黄海的近岸海域出现低值区, 而在渤海及南黄海南部海域出现高值区, 且渤海海域中的 DMSOp 浓度 [(13.37 ± 0.20) nmol·L⁻¹] 高于黄海海域 [(10.69 ± 0.25) nmol·L⁻¹]. 从盐度分布上可以看出(图 2), 夏季长江冲淡水北流, 造成长江口北部近岸海域中的盐度较低, 而随着近岸向外海的方向盐度逐渐增加.

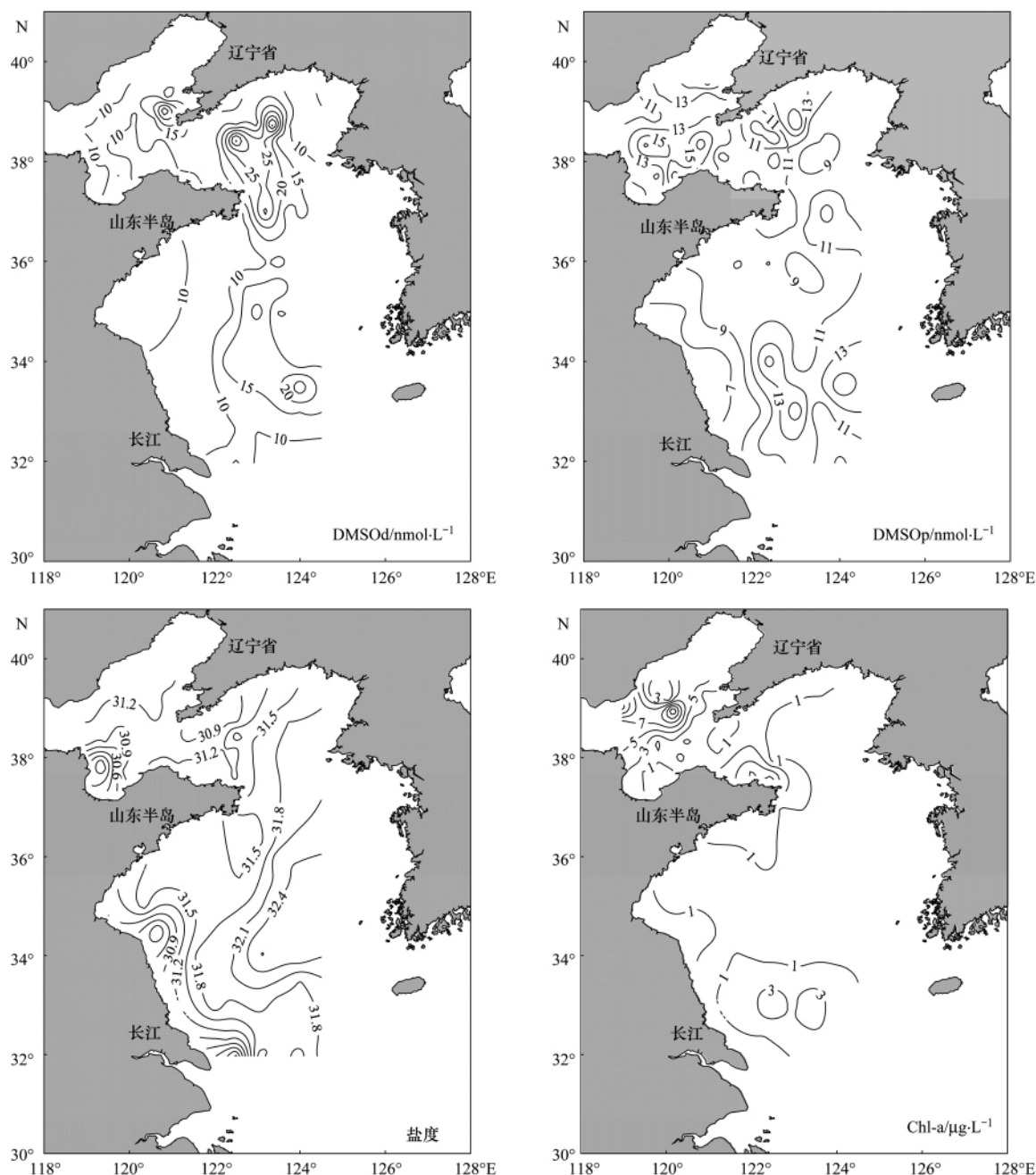


图 2 黄渤海表层海水中 DMSOd、DMSOp、盐度和 Chl-a 的水平分布

Fig. 2 Horizontal distributions of DMSOd, DMSOp, Chl-a and salinity in the surface water of the Yellow Sea and the Bohai Sea

DMSOp 在南黄海南部海域出现高值区的原因可能是由于该海域的盐度较高,藻体细胞需要合成更多的 DMSO 来维持渗透压。

与 DMSOp 相比,DMSOd 在表层海水中的浓度变化范围较大,介于 $4.75 \sim 43.80 \text{ nmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,平均值为 $(13.42 \pm 0.58) \text{ nmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 。DMSOd 浓度的最高值和最低值分别出现在北黄海中心海域 B19 站位和南黄海西部海域 H23 站位。水平分布上,低值区出现在山东半岛近岸海域,高值区出现在北黄海的中心海域及南海海的东部海域,没有呈现出由近岸向远海逐渐递减的趋势,表明调查区域内 DMSOd 的浓度受人为活动及河流输入影响较小。

2.2 DMSO 的周日变化

黄海、渤海调查中,在连续站 B65 对表层海水中 DMSO 浓度进行了 25 h 的连续观测,每隔 3 h 取海水样品进行分析,并同步测定了 Chl-a、温度、盐度等相关参数。DMSOd、DMSOp 及 Chl-a 的周日变化特征如图 3 所示。

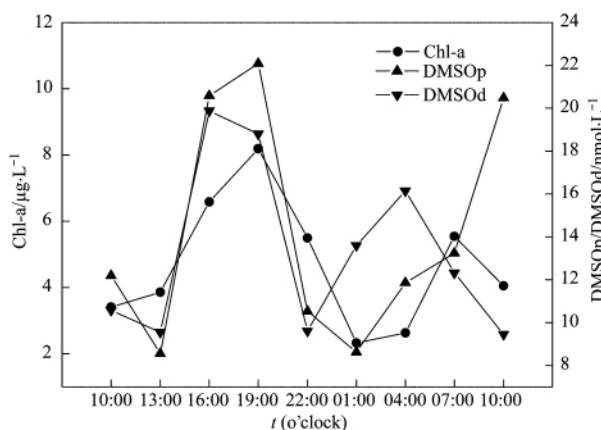


图3 表层海水中 DMSOd、DMSOp 和 Chl-a 的周日变化

Fig. 3 Diurnal variations of DMSOd, DMSOp and Chl-a in the surface water

调查结果表明,DMSOp 的浓度从 $8.56 \text{ nmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 变化到 $22.08 \text{ nmol} \cdot \text{L}^{-1}$,呈现出明显的周日变化。白天时段(10:00 ~ 19:00)的平均浓度为 $(16.78 \pm 0.32) \text{ nmol} \cdot \text{L}^{-1}$,夜间时段(22:00 ~ 次日 07:00)的平均浓度为 $(11.06 \pm 0.18) \text{ nmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 。从图 3 可以看出,DMSOp 与 Chl-a 的变化趋势相同,均在 19:00 达到了浓度的最高值,在凌晨 1:00 出现浓度的较低值。Sunda 等^[22]指出,在过度的紫外光照射下,细胞内的 DMSP 会裂解成丙烯酸和 DMS,而后者能跟活性氧自由基反应生成 DMSO,进而来抵抗细胞内氧化,这可能是导致白天 DMSOp 较高的一个重要原因。

DMSOd 的浓度变化范围为 $9.45 \sim 19.88 \text{ nmol} \cdot \text{L}^{-1}$,最高值出现在 16:00,较低值出现在 22:00 和 10:00。白天 DMSOd 的产生过程主要有 DMS 的光化学氧化、细菌氧化以及细胞内 DMSOp 的外渗透,而在夜晚 DMSO 常被细菌作为碳源或终端电子受体被消耗还原为 $\text{DMS}^{[23]}$ 。虽然白天 DMSO 的消耗同样存在,但生产量远远大于转化量,使得 DMSOd 浓度在白天达到了最高值。另外,从图 3 可以看出,DMSOd 的浓度在 22:00 ~ 次日 01:00 时段急剧升高,同时伴随着 DMSOp 的浓度下降,可能是由于细胞内的 DMSOp 外渗透到海水中所引起的。

2.3 DMSO 与环境因素的相关性研究

2.3.1 DMSOp 与环境因素之间的相关性

DMSOp 主要来源于浮游植物的自身合成^[24, 25],而 Chl-a 常被用来作为浮游生物量的指标,因此两者之间的相互关系是人们的研究热点。从 Chl-a 的水平分布(图 2)可看出,Chl-a 的高值区与 DMSOp 类似,同样分布在渤海及南海黄海南部海域。然而将整个研究海域内的 DMSOp 与 Chl-a 进行线性拟合,发现二者并不存在相关性(表 1)。Bouillon 等^[12]在北极巴芬湾北部海域中发现 DMSOp 与 Chl-a 之间存在着明显的正相关,而 Lee 等^[26]在冰藻中却发现 DMSOp 与 Chl-a 之间没有明显的相关性。造成这种不一致的原因可能在于不同海域中浮游植物的组成和生物量存在很大不同,而不同浮游植物对 DMSOp 生产能力差异较大^[27],从而使 DMSOp 与 Chl-a 之间的相关性也存在着较大的差别。

DMSOp/Chl-a 比值常被用来估算不同海区浮游植物生产 DMSO 的能力或反映浮游植物组成中 DMSO 生产者所占比例的高低,它主要消除了海区生物量的影响,其比值的大小往往取决于该海区优势藻种的种类。渤海海域中 DMSOp/Chl-a 比值的平均值为 $(8.16 \pm 1.13) \text{ mmol} \cdot \text{g}^{-1}$,而黄海海域中该值为 $(21.19 \pm 0.94) \text{ mmol} \cdot \text{g}^{-1}$,表明黄海海域优势藻种生产 DMSO 的能力明显高于渤海。同一水平面上,盐度随着近岸向外海的方向逐渐升高(图 2),适于在低盐条件下生长的硅藻(DMSO 低产藻种)的种类和所占比例逐渐减少,而耐高盐的甲藻类(DMSO 高产藻种)的比例却逐渐增加^[21],因此导致黄海 DMSOp/Chl-a 比值较高,尽管渤海海域的生物量 $[(4.42 \pm 0.93) \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}]$ 明显大于黄海海域 $[(1.25 \pm 1.27) \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}]$ 。

藻细胞内的 DMSO 具有调节渗透压和抗氧化

功能,在较高的盐度和温度下,细胞会合成更多的 DMSO 来抵抗外界压力的改变^[28 29],因此温度、盐度等环境因素对 DMSOp 的产生也有一定的影响.将 DMSOp 分别与温度和盐度进行线性拟合,发现 DMSOp 与温度、盐度之间并不存在相关关系(表 1);然而将 DMSOp/Chl-a 与温度和盐度进行线性

拟合时,却发现存在一定的线性相关性,而且 DMSOp/Chl-a 与盐度的相关性($r = 0.436$ $n = 70$ $P < 0.001$)好于与温度的相关性($r = 0.326$ $n = 70$ $P = 0.006$),表明研究海域内藻类细胞内合成的 DMSO 主要作用可能更倾向于作为渗透压调节剂,而非活性氧自由基的清除者.

表 1 表层海水中 DMSOp、DMSOp/Chl-a 与 Chl-a、温度及盐度之间的相互关系

Table 1 Relationships between DMSOp, DMSOp/Chl-a and Chl-a, temperature (T), salinity (S) in the surface water

参数	研究海域			渤海			黄海		
	r	n	P	r	n	P	r	n	P
DMSOp vs Chl-a	0.064	76	0.579	-0.418	22	0.053	0.040	54	0.776
DMSOp vs T	-0.044	70	0.717	-0.110	20	0.466	0.646	50	0.922
DMSOp vs S	-0.102	70	0.400	0.037	20	0.876	0.064	50	0.661
DMSOp/Chl-a vs T	0.326	70	0.006	0.376	20	0.102	0.382	50	0.006
DMSOp/Chl-a vs S	0.436	70	<0.001	-0.345	20	0.136	0.434	50	0.002

2.3.2 DMSOd 与环境因素之间的相关性

研究资料表明,马尾藻海域表层海水中 DMSOd 主要来源于 DMS 光化学氧化(占 40.1%),其次是颗粒态的 DMSOp(占 31.4%),最后是微生物氧化(占 28.5%)^[9].将本航次中将测得的 DMSOd 浓度分别与 DMSOp、细菌和 DMS 进行线性拟合,发现 DMSOd 与 DMSOp、细菌之间不存在相关性(表 2),而与 DMS 之间存在一定的正相关($r = 0.458$ $n = 65$ $P < 0.001$).此结果也表明调查海域内表层海水中 DMSOd 的主要来源不是藻类释放的颗粒态 DMSOp 和细菌氧化,而是来自于 DMS 的光化学氧化.

DMS 的光化学氧化受到诸多因素的影响,将 DMSOd 分别与溶解有机碳(dissolved organic

carbon, DOC)、 NO_3^- 和温度分别进行线性拟合,发现 DMSOd 与 DOC、 NO_3^- 之间不存在显著的相关性(表 2),但与温度呈现出一定的正相关($r = 0.374$ $n = 68$ $P = 0.002$).这主要是因为 DMS 的光化学反应速率随温度的升高呈指数增加^[30],另外,DMSOp 的细胞膜渗透过程也受温度的影响,温度越高,DMSO 的渗透能力越强^[28].尽管研究表明 DOC 和 NO_3^- 也能促进 DMS 的光化学反应速率^[31 32],但本航次调查中较高的 DOC [154.11 ± 1.13] $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$]和 NO_3^- [0.34 ± 1.13] $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$]浓度在促进 DMS 光化学反应的同时,也可能通过增加光的衰减抑制了 DMS 光化学反应的进行,因此导致二者之间无相关性存在.

表 2 表层海水中 DMSOd 与 DMS、DMSOp、细菌、温度、DOC 及 NO_3^- 之间的相互关系

Table 2 Relationships between DMSOd and DMS, DMSOp, bacteria, temperature (T), DOC, NO_3^- in the surface water

参数	研究海域			渤海			黄海		
	r	n	P	r	n	P	r	n	P
DMSOd vs DMS	0.458	65	<0.001	0.563	18	0.015	0.421	47	0.003
DMSOd vs DMSOp	-0.111	75	0.341	-0.151	22	0.503	-0.019	53	0.890
DMSOd vs bacteria	-0.132	72	0.267	0.038	21	0.869	-0.136	51	0.340
DMSOd vs T	0.374	68	0.002	0.289	18	0.244	0.423	50	0.002
DMSOd vs DOC	-0.039	77	0.733	-0.075	22	0.741	0.177	55	0.196
DMSOd vs NO_3^-	-0.234	74	0.044	-0.222	22	0.320	-0.230	52	0.100

3 结论

(1) 黄渤海表层海水中 DMSOd 的浓度大于 DMSOp,二者的水平分布也不尽相同,DMSOp 浓度的高值区出现在渤海及南黄海东南部海域,DMSOd 浓度的高值区出现在北黄海中心海域.

(2) DMSOp 与 DMSOd 均呈现出明显的周日变化,由于受到光照强度的影响,白天时段浓度明显高

于夜间时段,二者浓度的最高值分别出现在 19:00 和 16:00.

(3) 黄海海域中 DMSOp/Chl-a 比值明显高于渤海,表明黄海海域中浮游植物生产 DMSO 的能力要大于渤海.DMSOp/Chl-a 比值与盐度存在一定的正相关,进一步说明 DMSO 在藻细胞内具有渗透压调节功能.

(4) DMSOd 与细菌、DMSOp 不存在相关性,但

与 DMS 存在一定的正相关,表明夏季黄渤海表层海水中 DMSOd 的主要来源是 DMS 的光化学氧化。

参考文献:

- [1] Lovelock J E, Maggs R J, Rasmussen R A. Atmospheric dimethyl sulphide and the natural sulphur cycle [J]. *Nature*, 1972, **237**(5356): 452-453.
- [2] Yang G P. Dimethylsulphide enrichment in the surface microlayer of the South China Sea [J]. *Marine Chemistry*, 1999, **66**(3-4): 215-224.
- [3] Yang G P. Spatial distributions of dimethylsulphide in the South China Sea [J]. *Deep-Sea Research I: Oceanographic Research Papers*, 2000, **47**: 177-192.
- [4] Yang G P, Zhang Z B, Liu L S, *et al.* Study on the analysis and distribution of dimethyl sulfide in the East China Sea [J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 1996, **14**(2): 141-147.
- [5] Andreae M O, Barnard W R. The marine chemistry of dimethylsulphide [J]. *Marine Chemistry*, 1984, **14**(3): 267-279.
- [6] 马奇菊,胡敏,田旭东,等. 青岛近岸海域二甲基硫排放和大气中二甲基硫浓度变化[J]. *环境科学*, 2004, **25**(1): 20-24.
- [7] 杨桂朋,景伟文,陆小兰. 海洋中 DMSP 的研究进展[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2004, **34**(5): 854-860.
- [8] Brimblecombe P, Shooter D. Photo-oxidation of dimethylsulphide in aqueous solution [J]. *Marine Chemistry*, 1986, **19**(4): 343-353.
- [9] Del Valle D A, Kieber D J, Kiene R P. Depth-dependent fate of biologically-consumed dimethylsulphide in the Sargasso Sea [J]. *Marine Chemistry*, 2007, **103**(1-2): 197-208.
- [10] Hatton A D, Darroch L, Malin G. The role of dimethylsulphoxide in the marine biogeochemical cycle of dimethylsulphide [J]. *Oceanography and Marine Biology*, 2004, **42**: 29-56.
- [11] Spiese C E, Kieber D J, Nomura C T. Reduction of dimethylsulfoxide to dimethylsulfide by marine phytoplankton [J]. *Limnology and Oceanography*, 2009, **54**(2): 560-570.
- [12] Bouillon R C, Lee P A, De Mora S J, *et al.* Vernal distribution of dimethylsulphide, dimethylsulphoniopropionate, and dimethylsulphoxide in the North Water in 1998 [J]. *Deep-Sea Research II: Topical Studies in Oceanography*, 2002, **49**(22-23): 5171-5189.
- [13] Simó R, Grimalt J O, Albaigés J. Dissolved dimethylsulphide, dimethylsulphoniopropionate and dimethylsulphoxide in western Mediterranean waters [J]. *Deep-Sea Research II: Topical Studies in Oceanography*, 1997, **44**(3-4): 929-950.
- [14] Galí M, Simó R. Occurrence and cycling of dimethylated sulfur compounds in the Arctic during summer receding of the ice edge [J]. *Marine Chemistry*, 2010, **122**(1-4): 105-117.
- [15] Li M, Yuan D X, Li Q L, *et al.* Sequential analysis of dimethyl sulfur compounds in seawater [J]. *Chinese Chemical Letters*, 2007, **18**(1): 99-102.
- [16] 李猛,袁东星,汤坤贤. 围隔藻类水华演替过程中二甲基硫化合物的含量动态 [J]. *生态学报*, 2007, **27**(12): 5308-5317.
- [17] Yang J, Yang G P. Distribution of dissolved and particulate dimethylsulfoxide in the East China Sea in winter [J]. *Marine Chemistry*, 2011, **127**(1-4): 199-209.
- [18] Yang J, Yang G P, Yang J. Study on the analysis and distribution of dimethylsulfoxide in the Jiaozhou Bay [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2011, **30**(6): 36-45.
- [19] Dacey J W H, Blough N V. Hydroxide decomposition of dimethylsulphoniopropionate to form dimethylsulphide [J]. *Geophysical Research Letters*, 1987, **14**(12): 1246-1249.
- [20] 杨桂朋,康志强,景伟文,等. 海水中痕量 DMS 和 DMSP 的分析方法研究[J]. *海洋与湖沼*, 2007, **38**(4): 322-328.
- [21] 张洪海. 中国东海、黄海中 DMS 和 DMSP 的生物地球化学研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009. 54-56.
- [22] Sunda W, Kieber D J, Kiene R P, *et al.* An antioxidant function for DMSP and DMS in marine algae [J]. *Nature*, 2002, **418**(6895): 317-320.
- [23] Zinder S H, Brock T D. Dimethyl sulphoxide reduction by microorganisms [J]. *Journal of General Microbiology*, 1978, **105**(2): 335-342.
- [24] Simó R, Hatton A D, Malin G, *et al.* Particulate dimethyl sulphoxide in seawater: production by microplankton [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1998, **167**: 291-295.
- [25] Andreae M O. Dimethylsulfoxide in marine and freshwaters [J]. *Limnology and Oceanography*, 1980, **25**(6): 1054-1063.
- [26] Lee P A, De Mora S J, Gosselin M, *et al.* Particulate dimethylsulfoxide in Arctic sea-ice algal communities: the cryoprotectant hypothesis revisited [J]. *Journal of Phycology*, 2001, **37**(4): 488-499.
- [27] Hatton A D, Wilson S T. Particulate dimethylsulphoxide and dimethylsulphoniopropionate in phytoplankton cultures and Scottish coastal waters [J]. *Aquatic Science*, 2007, **69**(3): 330-340.
- [28] Lee P A, De Mora S J. Intracellular dimethylsulfoxide (DMSO) in unicellular marine algae: speculations on its origin and possible biological role [J]. *Journal of Phycology*, 1999, **35**(1): 8-18.
- [29] Simó R, Vila-Costa M. Ubiquity of algal dimethylsulfoxide in the surface ocean: Geographic and temporal distribution patterns [J]. *Marine Chemistry*, 2006, **100**(1-2): 136-146.
- [30] Toole D A, Kieber D J, Kiene R P, *et al.* Photolysis and the dimethylsulfide (DMS) summer paradox in the Sargasso Sea [J]. *Limnology and Oceanography*, 2003, **48**(3): 1088-1100.
- [31] Brugger A, Slezak D, Obernosterer I, *et al.* Photolysis of dimethylsulfide in the northern Adriatic Sea: Dependence on substrate concentration, irradiance and DOC concentration [J]. *Marine Chemistry*, 1998, **59**(3-4): 321-331.
- [32] Deal C D, Kieber D J, Toole D A, *et al.* Dimethylsulfide photolysis rates and apparent quantum yields in Bering Sea seawater [J]. *Continental Shelf Research*, 2005, **25**(15): 1825-1835.