

# 冬季南海北部陆架锋区悬浮颗粒态硅的分析

鲁超<sup>1</sup>, 刘素美<sup>1\*</sup>, 任景玲<sup>1</sup>, 陈琪<sup>2</sup>, 罗忻<sup>1</sup>, 李建兵<sup>1</sup>, 张经<sup>1, 3</sup>

(1 中国海洋大学 海洋化学理论与工程技术教育部重点实验室, 山东 青岛 266100; 2 国家海洋局 第二海洋研究所 海洋动力和卫星遥感重点实验室, 浙江 杭州 310012; 3 华东师范大学 河口海岸动力沉积和动力地貌综合国家重点实验室, 上海 200062)

**摘要:** 对冬季南海北部陆架锋区的悬浮颗粒态生物硅 (Particulate Biogenic Silica, PBSi) 和成岩硅 (Lithogenic Silica, LSi) 含量进行了调查分析, 讨论了悬浮颗粒态生物硅分布及其影响因素。结果表明, 南海北部陆架区悬浮颗粒态生物硅和成岩硅平均含量分别为  $0.59$  和  $8.93 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$ 。生物硅分布与水团关系密切: 在营养盐充足的沿岸水生物硅含量高 ( $1.0 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$ ); 而在营养盐缺乏的陆架表层水生物硅含量低 ( $0.23 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$ ); 在两种水团过渡区生物硅含量居中 ( $0.65 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$ ) 并与溶解硅酸盐 (Dissolved Silicate, DSi) 成显著正相关 ( $R = 0.48, N = 44, P = 0.001, a = 0.01$ )。此外锋面位置也直接影响生物硅的含量与分布。大部分调查海区被高温高盐低营养盐海水占据, 因此导致了调查海区以低浓度的生物硅和成岩硅为特征, 且与世界其他海区相比, 生物硅含量处于低值区。

**关键词:** 生物硅; 成岩硅; 分布; 陆架锋; 南海北部

中图分类号: P736.4

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2009)05-0031-09

## 1 引言

溶解硅酸盐 (Dissolved Silicate, DSi), 海洋中的重要营养盐, 被硅藻吸收合成无定形的  $\text{SiO}_2$  细胞骨架<sup>[1]</sup>, 同时硅藻作为一种优势藻类占全球上层海洋 30%~40% 的初级生产力<sup>[2]</sup>, 在近岸和营养盐丰富的水体中则高达 75% 的初级生产力<sup>[3]</sup>。所以硅藻在有机碳向深海的输送<sup>[2, 4-6]</sup> 以及沿食物链的传递方面<sup>[7]</sup>, 扮演着重要的角色。在某些海域, 随着氮和磷输入的增加<sup>[8-9]</sup>, 与硅输入的减少<sup>[10-12]</sup>, 使得 Si:N 和 Si:P 比下降, 导致硅限制发生的可能性增加<sup>[2]</sup>。硅循环直接影响全球的 C 循环和海洋生态系统的可持续发展。由于成岩硅释放溶解态硅速率慢<sup>[15]</sup>, 主要来源于河流输送和沉积物再悬浮, 可被

作为颗粒物输送的指标<sup>[16]</sup>; 而生物硅在硅循环中扮演重要角色: 河流入海的溶解硅酸盐主要部分并非源自于岩石风化而是来自于颗粒态生物硅的溶解<sup>[17]</sup>, 在海洋上层 100 m 内的水体中平均 50% 的生物硅再溶解并重新回到水体中<sup>[6, 15-18]</sup>, 最终只有 3% 的生物硅埋藏在沉积物中<sup>[6, 15]</sup>。

海洋锋一般是指水平方向上毗邻的性质明显不同的两种或者集中水体之间的狭窄过渡带, 分隔不同的水团或者不同纵向结构 (层化) 的水体<sup>[19-22]</sup>。在冬季由于降温和东北季风的作用, 南海北部低温低盐的沿岸水和南海北部表层水在 40~50 m 等深线处形成了明显的沿岸锋<sup>[23-24]</sup>, 区域海洋学理论认为, 锋面不仅对营养盐还对浮游生物分布上有重大影响<sup>[20, 25-31]</sup>。南海北部生物硅的研究较少, 多数集

收稿日期: 2009-04-01; 修订日期: 2009-06-12。

基金项目: 国家自然科学基金与香港研究资助局联合资助项目 (40218001; N - HKUST 609/32); 科技部国际科技合作交流专项 (No. 2007DFB20380) 资助。

作者简介: 鲁超 (1985 - ), 男, 山东省临沂市人, 硕士研究生, 主要从事海洋生物地球化学研究。E-mail: Herrybond@qq.com

\* 通讯作者: 刘素美, 教授。E-mail: Sumeiliu@ouc.edu.cn

中在沉积物中生物硅、硅藻等研究<sup>[32-36]</sup>。本文采用改进的 Ragueneau 等<sup>[37]</sup> 的三步提取法测定了 2004 年 1-2 月南海北部陆架锋区悬浮颗粒态生物硅 (Particulate Biogenic Silica, PBSi) 及成岩硅 (Lithogenic Silica, LSi) 的含量, 初步探讨水体中生物硅和成岩硅的分布, 及水团与锋面对其影响。

## 2 采样及测定

### 2.1 样品的采集

2004 年 1 月 25 日—2 月 6 日乘“延平二号”科学考察船在南海北部陆架锋区进行了调查。调查区

域位于 21.9°~22.5°N, 114.4°~115°E 之间, 采样站位见图 1。采用 CTD 上的 Niskin 采水器采集海水, 用预先被 pH=2 的 HCl 清洗过且烘干称重的 0.45 μm 醋酸纤维膜过滤, 冷冻带回实验室, 烘干后称重待分析。

### 2.2 悬浮颗粒态生物硅和成岩硅的测定

本文在 Ragueneau 等<sup>[37]</sup> 三步提取法的基础上, 针对醋酸纤维膜的影响, 增加一步 NaOH 提取, 用第三步提取的 Si:Al 比校正硅铝酸盐释放的硅。改进的四步提取法与聚碳酸酯膜过滤样品的三步提取法相比无明显差异 (置信度 99%)<sup>[38]</sup>。

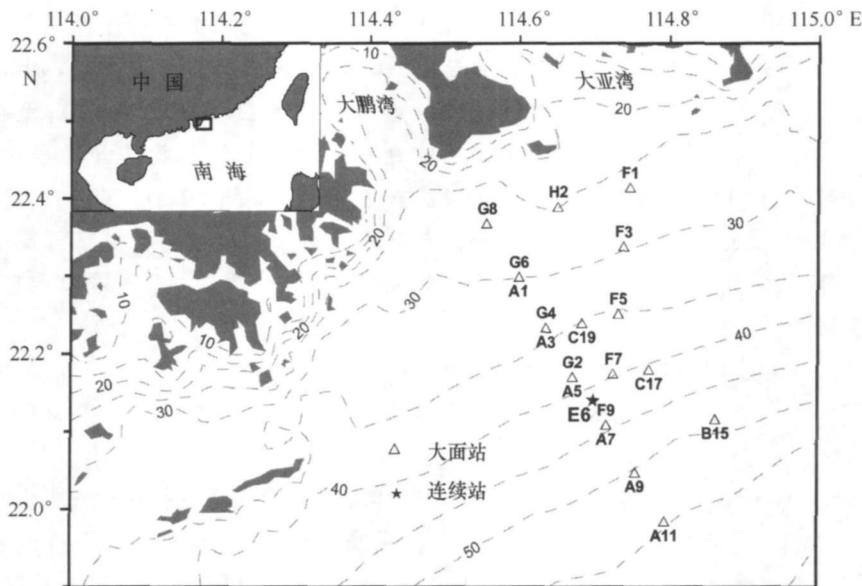


图 1 2004 年冬季南海北部陆架锋区采样站位 (等深线单位为 m)

首先将醋酸纤维膜对折放入 15 mL 塑料离心管中, 加入 4 mL 0.2 mol/dm<sup>3</sup> NaOH 溶液在 100 °C 条件下连续提取 40 min, 冷却至室温加入 1 mL 1 mol/dm<sup>3</sup> HCl 溶液终止提取, 然后在 4 000 r/min 下离心 10 min, 取上清液 2.5 mL, 余下加入 10.5 mL Milli-Q 水, 离心清洗三次, 干燥后再重复前述步骤两遍, 最后使用 0.2 mL 2.9 mol/dm<sup>3</sup> HF 室温提取 48 h 后加入 7 mL 饱和硼酸溶液, 在 4 000 r/min 下离心 10 min, 取上清液 2.5 mL。其中提取液中活性硅酸盐的测定采用硅钼蓝法<sup>[39]</sup>, 铝的测定采用 Ren 等<sup>[40]</sup> 改进的铝-荧光镓 (Al-LMG) 络合荧光光度法。

生物硅和成岩硅的计算公式分别如下:

$$[PBSi] = [Si]_{1+} + [Si]_{2-} - ([Al]_{1+} + [Al]_{2-}) \times$$

$$(Si:Al)_3 \quad (1)$$

$$[LSi] = [Si]_{1+} + [Si]_{2+} + [Si]_{3+} + [Si]_{4-} - [PBSi] \quad (2)$$

由于第 4 步 HF 提取矿物晶格中的硅铝<sup>[37-38,41]</sup>, 认为第 4 步的 Si:Al 比值揭示了矿物中硅铝组成, 因此可得到硅铝酸盐 (Alumosilicate, AlOSi) 的含量, 结合悬浮颗粒物浓度 (Suspended Particulate Material, SPM) 可计算出硅铝酸盐的百分含量 (AlOSi%), 公式如下:

$$AlOSi\% = \frac{[LSi]}{SPM} \times \left( M_{SiO_2} + \frac{M_{Al_2O_3}}{2 \times (Si:Al)_4} \right) \times 100\% \quad (3)$$

其中  $M_{SiO_2}$  和  $M_{Al_2O_3}$  分别代表  $SiO_2$  和  $Al_2O_3$  的摩尔质量。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 悬浮颗粒态生物硅和成岩硅的分布

A, C 断面上层的 PBSi 和 LSi 分布(A 断面见图 2, C 断面图略) 呈现远岸低 (PBSi < 0.4  $\mu\text{mol}/\text{dm}^3$ ; LSi < 2  $\mu\text{mol}/\text{dm}^3$ ); 近岸高 (PBSi > 0.6  $\mu\text{mol}/\text{dm}^3$ ; LSi > 4  $\mu\text{mol}/\text{dm}^3$ )。在远岸底层 PBSi 和 LSi 比表层浓度大, 而在近岸 LSi 垂直混合均匀; PBSi 则在 A3 站中层出现最大值 (1.4  $\mu\text{mol}/\text{dm}^3$ ), 认为与 A3 站底层有高盐海水入侵有关<sup>[42-43]</sup>, 在 C 断面 PBSi 表、底层浓度差向远岸降低。F, G 断面 PBSi 和 LSi 等值线与海底平行 (F 断面见图 3, G 断面图略), 且在 F 断面表、底浓度变化较 G 断面大。

在 A 断面 PBSi 最大值出现在 A3 站中层 (1.4  $\mu\text{mol}/\text{dm}^3$ ), LSi 的最大值出现在 A1 站的表层 (33.2  $\mu\text{mol}/\text{dm}^3$ ), PBSi 和 LSi 浓度沿水平和垂直方向出现三个不同浓度分布区: (1) A1- A3 站是近岸高 PBSi (0.96  $\mu\text{mol}/\text{dm}^3$ ) 和 LSi (25.9  $\mu\text{mol}/\text{dm}^3$ ) 浓度区, (2) A5- A11 站上层低 PBSi (0.24  $\mu\text{mol}/\text{dm}^3$ ) 和 LSi (3.23  $\mu\text{mol}/\text{dm}^3$ ) 浓度区, (3) A5- A11 站底层相对上层的 PBSi (0.61  $\mu\text{mol}/\text{dm}^3$ ) 和 LSi (15.6  $\mu\text{mol}/\text{dm}^3$ ) 高值区; 而在 F 断面中 PBSi 和 LSi 的最大值均出现在 F5 站的底层分别为 1.72, 28.7  $\mu\text{mol}/\text{dm}^3$ , PBSi 和 LSi 浓度仅沿垂直方向变化, 在上层 PBSi (0.21  $\mu\text{mol}/\text{dm}^3$ ) 和 LSi (2.01  $\mu\text{mol}/\text{dm}^3$ ) 浓度较低; 在底层 PBSi (1.20  $\mu\text{mol}/\text{dm}^3$ ) 和 LSi (18.0  $\mu\text{mol}/\text{dm}^3$ ) 浓度则是上层的 6~9 倍。PBSi 和 LSi 各断面的结果如表 1, PBSi 的平均值从大到小的顺序为: F 断面、A 断面、C 断面、G 断面, 而 LSi 的平均值从高到低的顺序为: A 断面  $\approx$  C 断面、F 断面、G 断面。

表 1 各断面生物硅和成岩硅的浓度范围(括号内为平均值)

	A 断面	C 断面	F 断面	G 断面
PBSi 浓度/ $\mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$	0.09~ 1.4(0.52)	0.14~ 0.91(0.52)	0.00~ 1.7(0.55)	0.06~ 1.1(0.34)
LSi 浓度/ $\mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$	0.96~ 33.2(12.1)	1.03~ 33.2(12.2)	0.58~ 18.7(7.71)	0.48~ 17.1(4.70)

#### 3.2 水团对悬浮颗粒态生物硅和成岩硅分布的影响

从各断面的水温和盐度分布发现, 外海高温 (> 18  $^{\circ}\text{C}$ ) 高盐 (> 34) 的海水入侵到 20~30 m 深的调查海区 (图 2, 3)。根据李凤歧和苏育嵩<sup>[45]</sup> 关于南海北部水团划分, 我们将得到的 PBSi 和 LSi 按照不

水体中的硅主要以成岩硅、溶解硅酸盐以及生物硅的形式存在, 在调查海区各形态硅百分含量为成岩硅 (65%) > 溶解硅 (30%) > 生物硅 (5%)。成岩硅百分含量在底层和近岸 (> 70%) 大, 向远岸表层 (< 40%) 减少, 说明底层的再悬浮作用和近岸陆源向水体中输送较多的成岩硅; 溶解硅酸盐相对含量分布则刚好和成岩硅相反, 在远岸上层最大 (> 40%), 分析认为在远岸由于受到锋面的阻碍作用陆源物质输送减少, 导致成岩硅和生物硅含量锐减而使得溶解硅酸盐的相对含量大。

在连续站 E6 站上, 生物硅和成岩硅浓度在各层随时间变化较小, 底层的浓度分别是上层的 5 和 33 倍。在上层以溶解硅酸盐为主, 其次为成岩硅; 在底层则以成岩硅为主要的硅形态 (见表 2)。由于在 E6 站没有近岸水的影响, 根据南海海洋沉积物<sup>[44]</sup> 中硅铝酸盐百分含量 (48.6%) 及连续站 E6 站上层硅铝酸盐平均含量 (1.44%) 和底层的硅铝酸盐平均含量 (18.7%), 估算得到再悬浮作用的对底层水体中的颗粒物的质量贡献为 36.7%, 可见再悬浮作用对于水体中的颗粒硅的输送显著。

A 断面除 A9 站底层硅铝酸盐百分含量值异常大外, 成岩硅浓度和硅铝酸盐的百分含量成明显相关 ( $R = 0.97, N = 20, P < 0.0001, a = 0.01$ ), 硅铝酸盐百分含量在近岸和底层含量高向远岸表层降低与 LSi 分布类似。在 F 断面上, 硅铝酸盐百分含量等值线与海底地形一致并与 LSi 浓度分布成明显正相关 ( $R = 0.97, N = 14, P < 0.0001, a = 0.01$ )。硅铝酸盐百分含量与 LSi 浓度的明显正相关及其近岸和底层百分含量高, 表明近岸的陆源输送和底层的沉积物再悬浮作用对水体中的 LSi 含量贡献大。

同水团统计结果表明不同水团间生物硅和成岩硅含量经 t 检验存在明显差异 (置信度 99%), 并在广东沿岸水含量高, 向南海北部表层水降低, 幅度达 4~10 倍。而成岩硅在总硅中所占的比例由沿岸水向陆架表层水降低, 生物硅和溶解硅酸盐所占的比例则呈相反的趋势 (见表 3)。

表 2 连续站 E6 站表、中与底层各参数浓度(平均值±标准偏差)

	表层	中层	底层
PBSi / $\mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$	0.17±0.03	0.21±0.03	1.00±0.39
LSi / $\mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$	0.67±0.11	0.70±0.32	22.64±11.42
DSi / $\mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$	1.59±0.33	1.48±0.36	2.34±0.57
PBSi- Si 含量(%)	7.2±1.7	9.3±2.7	4.0±1.0
LSi- Si 含量(%)	27.8±5.1	28.4±6.2	84.0±10.1
DSi- Si 含量(%)	65.0±6.1	62.4±5.9	12.0±10.2
硅铝酸盐含量(%)	1.42±0.21	1.47±0.65	18.74±7.09

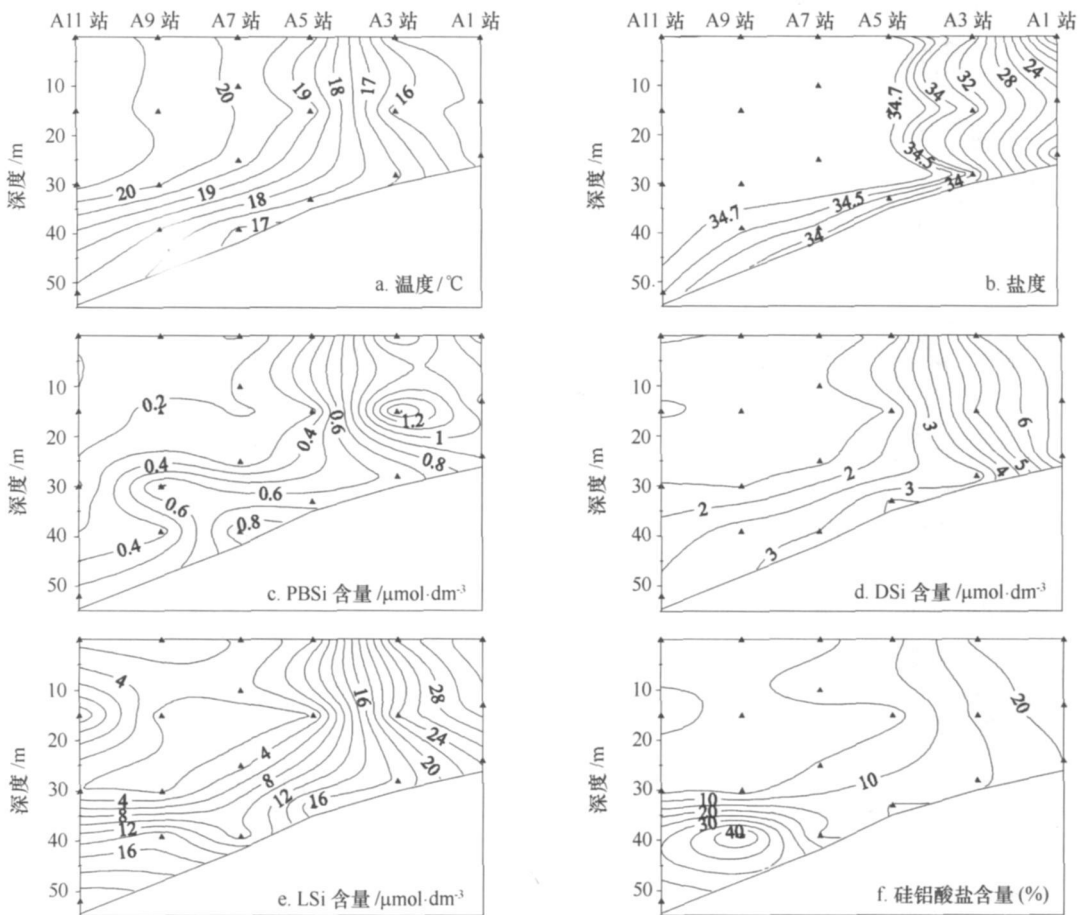


图 2 A 断面水温(a)、盐度(b)、各形态硅(c-e)以及硅铝酸盐百分含量(f)的分布

不同水团的营养盐浓度经  $t$  检验存在明显的差异(置信度 99%)。近岸接受丰富的陆源颗粒物以及营养盐的输送,叶绿素含量高且硅藻为优势种类<sup>[46-49]</sup>,所以在近岸 PBSi 和 LSi 含量最高;在远岸的南海北部表层水中则由于营养盐含量低,硅藻由

于受到营养盐的限制,不再是浮游植物的优势种群<sup>[46,47,49]</sup>,PBSi 含量低,同时陆源输入的减少也使得 LSi 含量处于最低;而在过渡区内 PBSi 和 DSi 存在明显正相关( $R=0.48$ ,  $N=44$ ,  $P=0.001$ ,  $\alpha=0.01$ ),也说明在营养盐含量不小于绝对限制时,营

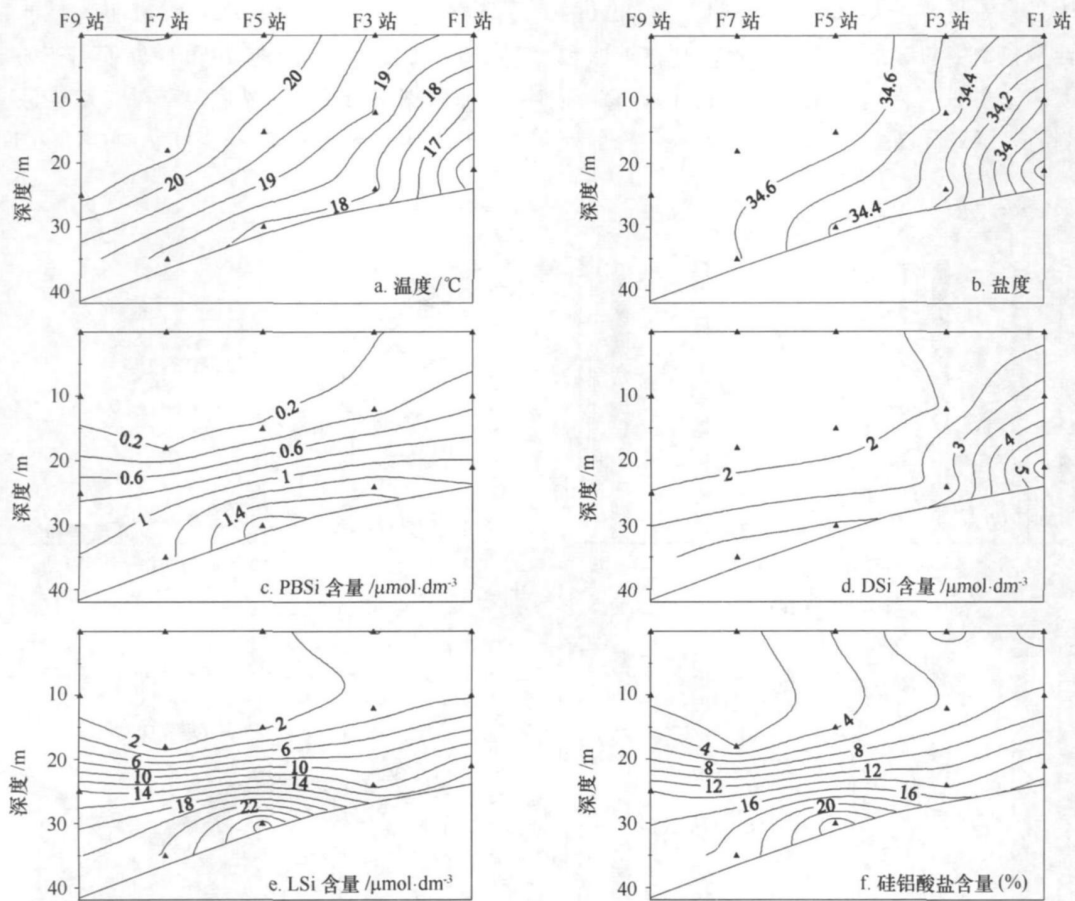


图3 F断面水温(a)、盐度(b)各形态硅(c-e)以及硅铝酸盐百分含量(f)的分布

养盐含量大小直接影响水体中 PBSi 含量。

在有沿岸水的 A 断面, PBSi 和 LSi 高值区主要集中在沿岸水体中, 在远岸 PBSi 和 LSi 浓度呈现层

化分布; 而在没有沿岸水的 F 断面, PBSi 和 LSi 浓度层化并向底层增加。因而认为水团不仅影响了 PBSi 和 LSi 浓度, 还影响了其分布趋势。

表3 各参数在不同水团内的数值(平均值±标准差值)

	广东沿岸水 $T: 12 \sim 19\text{ }^{\circ}\text{C}; S < 32.0$	过渡区	南海北部表层水 $(T: 20 \sim 22\text{ }^{\circ}\text{C}; S: 34.3 \sim 34.8)$
PBSi / $\mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$	$1.04 \pm 0.25$	$0.65 \pm 0.45$	$0.23 \pm 0.21$
LSi / $\mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$	$22.81 \pm 8.37$	$10.76 \pm 8.69$	$2.42 \pm 3.77$
DSi / $\mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$	$6.39 \pm 0.51$	$2.26 \pm 1.06$	$1.54 \pm 0.26$
PBSi- Si 含量 (%)	$4.1 \pm 2.0$	$5.3 \pm 2.2$	$6.1 \pm 4.4$
LSi- Si 含量 (%)	$72.4 \pm 7.7$	$71.0 \pm 14.1$	$44.3 \pm 16.8$
DSi- Si 含量 (%)	$23.5 \pm 5.9$	$23.7 \pm 13.2$	$49.6 \pm 16.6$
DIN / $\mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$	$6.09 \pm 1.04$	$2.19 \pm 0.99$	$1.56 \pm 0.43$
DIP / $\mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$	$0.25 \pm 0.03$	$0.09 \pm 0.04$	$0.07 \pm 0.02$

### 3.3 陆架锋对悬浮颗粒态生物硅和成岩硅分布的影响

在 A 断面温度锋(温差达  $0.49\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ )最为明显, 在表层各形态硅及其总硅在通过锋面处降幅较

大, 在锋面近岸一侧以成岩硅为主向远岸一侧以成岩硅和溶解硅酸盐为主转变, 而生物硅则在锋面近岸一侧的 A3 站最大( $1.2\text{ }\mu\text{mol}/\text{dm}^3$ ), 在远岸浓度较低( $0.18\text{ }\mu\text{mol}/\text{dm}^3$ ); 在底层各参数差别与锋面

关系不大,且以成岩硅为主(69%~91%之间)(图4)。悬浮颗粒物中的硅铝酸盐百分含量则在近岸和底层绝大部分在20%左右(A9站底层除外),向锋面远岸一侧的表层降低,最低至1.5%,而在表层锋面处

降幅最大(2.6倍)。在C断面温度锋(温差 $0.38^{\circ}\text{C}/\text{km}$ )明显减弱,F和G断面由于被高温高盐海水占据,只有在F1站底层存在较大温度差,因此在C,F,G断面锋面对各形态硅的分布不是很明显。

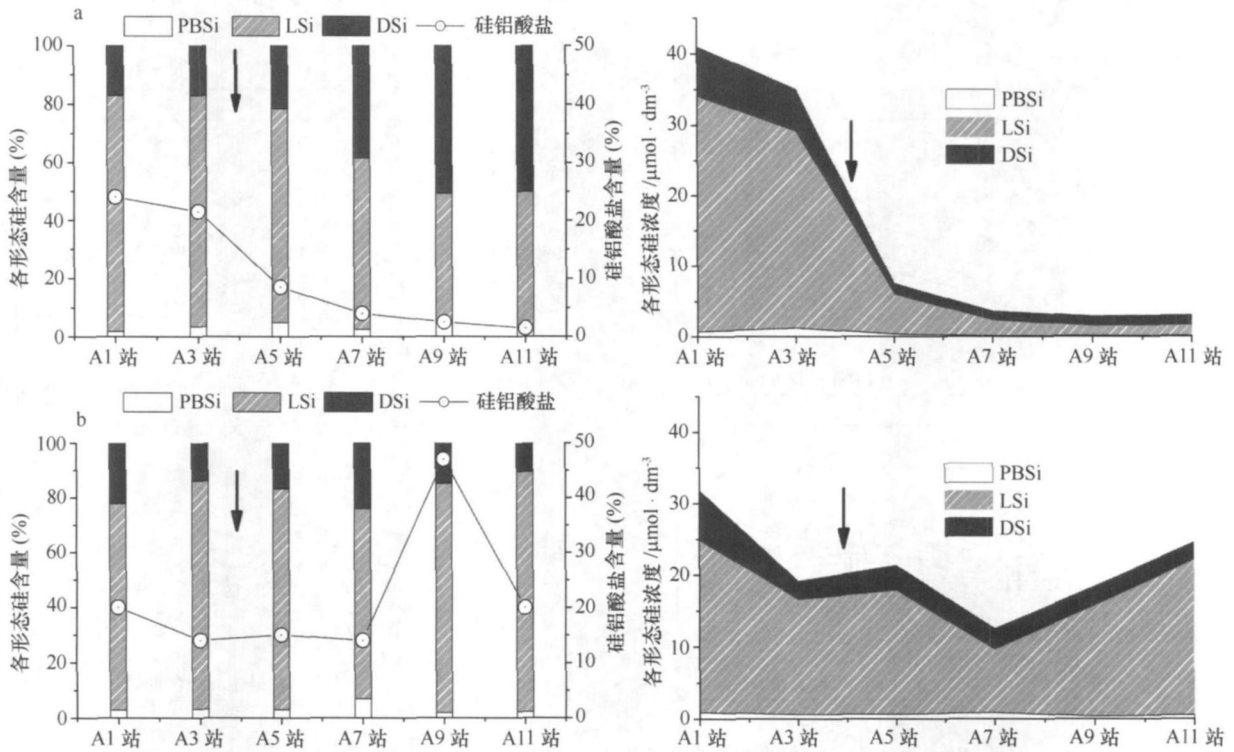


图4 A断面的表层(a)和底层(b)各形态硅百分含量和浓度以及硅铝酸盐百分含量(箭头代表锋面的位置)

海洋锋是海洋一种常见的物理现象,在锋面处由于物理参数的梯度跨度大,限制了浮游植物的运动,所以常在锋面一侧形成浮游植物的高值区<sup>[27-28]</sup>。调查海区处于南海北部,在冬季东北季风的影响下,沿岸流和高温高盐海水形成的温度锋,则受到短期天气变化的影响,导致锋面位置向外海(沿岸)推移<sup>[42]</sup>。所以只有在A断面发现完整的锋面结构,而其他断面多则由于锋面向沿岸推移而落到锋面远岸一侧。由于锋面阻碍了陆源颗粒物和营养盐向远岸的输送,使得在近岸一侧由于人类活动输入近岸的营养盐富集,逐步富营养化而引起南海北部近岸有害藻类和赤潮频发<sup>[50]</sup>,直接造成巨大的经济损失以及影响沿岸居民健康。硅藻,作为对富营养化敏感的藻类,在硅相对氮和磷还不是限制营养元素<sup>[33]</sup>时迅速繁殖,引起近岸水体高的生物硅含量。作为寡营养盐指标的原绿球藻<sup>[51]</sup>,在A断面锋面远岸一侧被发现<sup>[52]</sup>也证实了锋面远岸一侧寡营养盐的条件,不利于硅藻的生长,使得远岸一侧生物硅含

量降低。同时锋面的位置也直接影响了调查海区上层水体内PBSi和LSi的含量。

### 3.4 与其他海区的对比

调查海区既有低温、低盐、高营养盐的广东沿岸水,又有高温、高盐、低营养盐的南海北部表层水(各参数详见表2)。近岸和远岸由于陆源输入的差异,LSi浓度相差接近一个数量级,而PBSi浓度也差异4倍多。虽然在冬季南海生产力水平高<sup>[53]</sup>,但是由于在此期间珠江冲淡水主要影响河口以西的近岸地区<sup>[54]</sup>,且在香港东南外海存在大面积的低营养盐低硅藻含量的海区<sup>[47-48]</sup>。随着外海水对本调查海区的入侵,使得生物硅含量较内湾(胶州湾<sup>[55]</sup>,布雷斯特湾<sup>[37]</sup>)和长江口临近海区<sup>[56]</sup>及加利福尼亚沿岸<sup>[57]</sup>低。与智利沿岸上升流区<sup>[16]</sup>生物硅浓度相比则是低了一个数量级,只有在陆架表层水体中生物硅的平均值落在南大洋<sup>[37]</sup>范围内。说明南海北部陆架锋区生物硅含量处于一个较低水平(见表4)。

表4 世界上不同海区生物硅和成岩硅含量( $\mu\text{mol}/\text{dm}^3$ )(括号内为平均值)

地点	生物硅	成岩硅	参考文献
加利福尼亚沿岸	0.1~ 42	-	[57]
南大洋	0.1~ 0.5	0.3~ 1.3	[37]
长江口临近海区	0.2~ 2.8	-	[56]
布雷斯特湾	0.4~ 2.1	1.2~ 2.8	[37]
智利沿岸上升流区	0.4~ 23	0.1~ 8	[16]
胶州湾	0.14~ 7.2(2.2)	-	[55]
南海北部陆架锋区	沿岸水	0.73~ 1.5(1.0)	正文
	过渡区	0.09~ 1.7(0.65)	正文
	陆架表层水	0.00~ 0.76(0.23)	正文

注:“-”表示数据未测定。

## 4 结论

南海北部陆架区悬浮颗粒态生物硅和成岩硅平均含量分别为  $0.59$  与  $8.93 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$ , 由于调查海区复杂的水动力环境, 生物硅分布呈现三大空间分布: 在近岸水体中由于陆源营养盐的输送, 导致硅藻在此区域占据优势地位, 生物硅含量较高, 介于  $0.73 \sim 1.4 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$  之间, 平均值为  $1.0 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$ ; 而在南海北部陆架表层水中由于营养盐含量低, 生物硅含量小于  $0.76 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$ , 平均值为  $0.21 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$ ; 而在两

种水团的过渡区中, 生物硅浓度从  $0.09$  到  $1.7 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$  之间, 平均值为  $0.65 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$ , 含量居中; 其中陆架锋面对各形态硅分布起到重要作用。在各种形态硅中, 成岩硅比例最高平均为  $65\%$ ; 其次为溶解硅酸盐 ( $30\%$ ); 而生物硅的比例最小平均为  $5\%$ 。本调查海区与其他海区相比生物硅处于一个低值区。

感谢“延平二号”船员在调查期间给予的帮助, 感谢华东师范大学 邓兵与中国海洋大学海洋生物地球化学实验室的同学们给予的帮助!

## 参考文献:

- [1] RAGUENEAU O, TREGUER P, LEYNAERT A, et al. A review of the Si cycle in the modern ocean: recent progress and missing gaps in the application of biogenic opal as a paleoproductivity proxy [J]. *Global and Planetary Change*, 2000, 26(4): 317—365.
- [2] BUESSELER K O. The decoupling of production and particulate export in the surface ocean [J]. *Global Biogeochemistry Cycles*, 1998, 12: 297—310.
- [3] LIU S M, YE X W, ZHANG J, et al. The silicon balance in Jiaozhou Bay, North China [J]. *Journal of Marine Systems*, 2008, 74(1/2): 639—648.
- [4] GOLDMAN J G. Spatial and temporal discontinuities of biological processes in pelagic surface waters [M]// Rothschild B J. *Toward a Theory of Biological+Physical Interactions in the World Ocean*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishing, 1988: 273—296.
- [5] GOLDMAN J C. Potential role of large oceanic diatoms in new primary production [J]. *Deep-Sea Res*, 1993, 40: 159—168.
- [6] NELSON D M, TREGUER P, BRZEZINSKI M A, et al. Production and dissolution of biogenic silica in the ocean: revised global estimates, comparison with regional data and relationship to biogenic sedimentation [J]. *Global Biogeochemistry Cycles*, 1995, 9: 359—372.
- [7] CUSHING D H. A difference in structure between ecosystems in strongly stratified waters and in those that are only weakly stratified [J]. *Journal of Plankton Research*, 1989, 11(1): 1—13.
- [8] NIXON S W, AMMERMAN J W, Atkinson L, et al. The fate of nitrogen and phosphorus at the land-sea margin of the North Atlantic Ocean [J]. *Biogeochemistry*, 1996, 35: 141—180.
- [9] HOWARTH R W, BILLEN G, SWANEY D, et al. Regional nitrogen budgets and riverine inputs of N & P for the drainages to the North Atlantic Ocean: natural and human influences [J]. *Biogeochemistry*, 1996, 35: 75—139.
- [10] Conley D J, Schelske C L, Stoermer E F. Modification of the biogeochemical cycle of silica with eutrophication [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1993, 101: 179—192.
- [11] HUMBORG C, ITTEKOT V, COCIASU A, et al. Effect of Danube river dam on Black Sea biogeochemistry and ecosystem structure

- [J]. *Nature*, 1997, 386: 385—388.
- [12] HUMBORG C, SEMDBERG E, MEDINA M R, et al. Changes in dissolved silicate loads to the Baltic Sea – The effects of lakes and reservoirs[J]. *Journal of Marine Systems*, 2007, 73: 223—235.
- [13] DELAMO Y, QUEGUINER B, Tr guer P, et al. Impacts of high- nitrate freshwater inputs on macrotidal ecosystems: ④. Specific role of the silicic acid pump in the year- round dominance of diatoms in the Bay of Brest (France)[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1997, 161: 225—237.
- [14] RAGUENEAU O, CHAU VAND L, LEYNAERT A, et al. Direct evidence of a biologically active coastal silicate pump: Ecological implications[J]. *Limnology and Oceanography*, 2002, 47(6): 1849—1854.
- [15] TREGUER P, NELSON D M, Van BENNEKOM A J, et al. The silica balance in the world ocean: A reestimate[J]. *Science*, 1995, 268: 375—379.
- [16] SÁNCHEZ G E, PANTOJA S, LANGE C B, et al. Seasonal changes in particulate biogenic silica and lithogenic silica in the upwelling system off concepcion (~ 36° S), Chile, and their relationship to fluctuations in marine productivity and continental input[J]. *Continental Shelf Research*, 2008, 28: 2594—2600.
- [17] DERRY L A, KURTZ A C, ZIEGLER K, et al. Biological control of terrestrial silica cycling and export fluxes to watersheds[J]. *Nature*, 2005, 433: 728—731.
- [18] NELSON D M, BRZEZINSKI M A. Diatom growth and productivity in an oligotrophic midocean gyre: A 3- yr record from the Sargasso Sea near Bermuda[J]. *Limnology and Oceanography*, 1997, 42: 473—486.
- [19] OWEN R W. Fronts and eddies in the sea: mechanisms, interactions and biological effects[M]//Longhurst A R. *Analysis of Marine Ecosystems*. Orlando: Academic Press, 1981: 197—233.
- [20] Le FÈ VRE J. Aspects of the biology of frontal systems[J]. *Advances in Marine Biology*, 1986, 23: 163—299.
- [21] FEDOROV K N. The physical nature and structure of oceanic fronts[M]. New York: Springer-Verlag, 1986: 1—7.
- [22] 冯士筌, 李凤岐, 李少普. 海洋科学导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999: 477—479.
- [23] SU J. Overview of the South China Sea circulation and its influence on the coastal physical oceanography outside the Pearl River Estuary [J]. *Continental Shelf Research*, 2004, 24: 1745—1760.
- [24] 许建平, 苏纪兰. 黑潮水入侵南海的水文分析: ④ 1994 年 8- 9 月观测结果 [J]. *热带海洋*, 1997, 16(2): 1—23.
- [25] OILSON D B, HITCHCOCK G L, MARIANO A J, et al. Life on the edge: marine life and fronts[J]. *Oceanography*, 1994, 7(2): 52—60.
- [26] 周菊珍, 谷国传. 长江河口夏季营养盐的分布、变化及锋面对营养盐的影响[J]. *广州环境科学*, 2002, 17(1): 1—5.
- [27] 刘桂梅, 孙松, 王辉, 等. 春秋季节黄海海洋锋对中华哲水蚤分布的影响[J]. *自然科学进展*, 2002, 12(11): 1150—1154.
- [28] 陈长胜. 海洋生态系统动力学与模型[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 133—182.
- [29] 李洪波, 等. 南黄海潮汐锋对浮游细菌生物量分布的影响[J]. *生态学报*, 2004, 24(11): 2608—2615.
- [30] 万小芳, 潘爱军, 郭小刚. 台湾海峡表层叶绿素含量的季节、年际变化特征研究[J]. *台湾海峡*, 2007, 26(1): 36—45.
- [31] MUELBERT J H, ACHA M, MIANZAN H, et al. Biological, physical and chemical properties at the subtropical shelf front zone in the SW Atlantic continental shelf[J]. *Continental Shelf Research*, 2008, 28: 1662—1673.
- [32] 王汝建, 房殿勇, 邵磊, 等. 南海北部陆坡渐新世的蛋白石沉积[J]. *中国科学 D 辑*, 2001, 31(10): 867—872.
- [33] 贾国东, 彭平安, 傅家谟. 珠江口近百年来富营养化加剧的沉积记录[J]. *第四纪研究*, 2002, 22(2): 158—165.
- [34] 李家英. 南海北部陆坡 ODP 1144 站位第四纪硅藻及其古环境演变[J]. *地质论评*, 2002, 48(5): 542—551.
- [35] 黄元辉, 蓝东兆. 南海东北部末次冰期以来的沉积环境演变 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2005, 25(4): 9—14 .
- [36] HU J, ZHANG G, LI K, et al. Increased eutrophication offshore Hong Kong, China during the past 75 years: Evidence from high resolution sedimentary records [J]. *Marine Chemistry*, 2008, 110(1/2): 7—17.
- [37] RAGUENEAU O, SAUOYEN, AMO Y D, et al. A new method for the measurement of biogenic silica in suspended matter of coastal waters: using Si: Al ratios to correct for the mineral interference[J]. *Continental Shelf Research*, 2005, 25: 697—710.
- [38] 罗忻. 胶州湾、东海悬浮颗粒生态生物硅的研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2006.
- [39] MULLIN J B, RILEY J P. The colorimetric determination of silicate with special reference to sea and natural waters[J]. *Analytica Chimica Acta*, 1955, 12: 162—176.
- [40] REN J L, ZHANG J, LUO J Q, et al. Improved fluorimetric determination of dissolved aluminium by micelle enhanced lumogallion complex in natural waters[J]. *The Royal Society of Chemistry: The Analyst*, 2001, 126: 698—702.
- [41] 陈洪涛, 张泉泉, 米铁柱, 等. 悬浮颗粒物中生物硅测定方法的改进与应用[J]. *海洋学报*, 2007, 29(4): 156—160.
- [42] 王磊. 南海北部陆架区域的海洋锋及锋面涡旋研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2004.
- [43] 程岩. 胶州湾、东海和南海部分海区中溶解态砷的行为[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2005.
- [44] GBW07334, 南海海洋沉积物成分分析标准物质[S].



- [45] 李凤岐, 苏育嵩. 海洋水团分析[M]. 青岛: 青岛海洋大学出版社, 2000.
- [46] 彭欣, 宁修仁, 孙军, 等. 南海北部浮游植物生长对营养盐的响应[J]. 生态学报, 2006, 26(12): 3959—3968.
- [47] 袁梁英. 南海北部营养盐结构特征[D]. 厦门: 厦门大学, 2005.
- [48] 孙军, 宋书群, 乐凤凤, 等. 2004年冬季南海北部浮游植物[J]. 海洋学报, 2007, 29(5): 132—145.
- [49] 乐凤凤, 宁修仁, 刘诚刚, 等. 2006年冬季南海北部浮游植物生物量和初级生产力及其环境调控[J]. 生态学报, 2008, 28(11): 5775—5784.
- [50] YIN K. Influence of monsoons and oceanographic process on red tides in Hong Kong waters[J]. Marine Ecology Progress Series, 2003, 262: 27—41.
- [51] PARTENSKY F, BLANCHOT J, VAU LOT D. Differential distribution and ecology of Prochlorococcus and Synechococcus in oceanic waters: a review[J]. Bulletin de l'Institut océanographique, Monaco (n° special), 1999, 19: 457—475.
- [52] PAN L A, ZHANG J, CHEN Q, et al. Picoplankton community structure at a coastal front region in the northern part of the South China Sea[J]. Journal of Plankton Research, 2005, 28(3): 337—343.
- [53] 李小斌, 陈楚群, 施平, 等. 南海 1998—2002 年初级生产力遥感估算及其时空演化机制[J]. 热带海洋学报, 2006, 25(3): 52—57.
- [54] 庞海龙. 珠江冲淡水扩散路径分析[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2006.
- [55] 罗忻, 刘素美, 张经, 等. 胶州湾悬浮颗粒态生物硅的研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2008, 38(4): 627—634.
- [56] LIU S M, ZHANG J, LI R X. Ecological significance of biogenic silica in the East China Sea[J]. Marine Ecology Progress Series, 2005, 290: 15—26.
- [57] FIRME G, RUE E, WEEKS D, et al. Spatial and temporal variability in phytoplankton iron limitation along the California coast and consequences for Si, N, and C biogeochemistry[J]. Global Biogeochemical Cycle, 2003, 17: 1016—1029.

## A study on particulate silica in the northern part of the South China Sea in winter

LU Chao<sup>1</sup>, LIU Su-mei<sup>1</sup>, REN Jing-ling<sup>1</sup>, CHEN Qi<sup>2</sup>, LUO Xin<sup>1</sup>,  
LI Jian-bing<sup>1, 3</sup>, ZHANG Jing<sup>1, 3</sup>

(1 Key Laboratory of Marine Chemistry Theory and Technology Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2 Laboratory of Ocean Dynamic Processes and Satellite Oceanography, Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou 310012, China; 3 State Key Laboratory of Estuary and Coast, Eastchina Normal of University, Shanghai 200062, China)

**Abstract:** The distribution of particulate biogenic silica (PBSi) and lithogenic silica (LSi) were studied in the northern part of South China Sea in winter 2004. The average concentrations of PBSi and LSi were 0.59 and 8.93  $\mu\text{mol}/\text{dm}^3$ , respectively. Due to the intrusion of offshore seawater, the concentrations of PBSi decreased greatly from the coastal water ( $1.0 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$ ) to the offshore water ( $0.23 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$ ), just like the distribution of dissolved silicate (DSi), which is related to the water mass and shelf front. The concentration of PBSi in the northern part of South China Sea is ranked at the lower end among the world coastal areas.

**Key words:** biogenic silica; lithogenic silica; distribution; shelf front; South China Sea