

# 南海东北部和南部海域表层沉积物生物硅研究\*

周鹏<sup>1</sup>, 李冬梅<sup>1</sup>, 刘广山<sup>2</sup>, 门武<sup>2,3</sup>, 纪利红<sup>2</sup>

(1. 国家海洋局南海环境监测中心, 广东 广州 510300; 2. 厦门大学海洋与环境学院, 福建 厦门 361005; 3. 国家海洋局第三海洋研究所, 福建 厦门 361005)

**摘要:** 本研究测定了南海东北部和南部海域表层沉积物的生物硅含量(SiO<sub>2</sub>%), 其含量范围分别为 1.08%—3.01% 和 0.79%—9.06%, 平均值分别为 1.76%和 4.22%。研究表明, 南海表层沉积物中的生物硅含量与站位水深呈正相关关系; 南海东北部的表层沉积物中的生物硅含量与其中的矿物含量、铁离子浓度、间隙水中的营养盐浓度不存在明显的相关性; 南海南部海域表层沉积物中的生物硅含量与烧失量、有机碳含量、碳酸盐含量呈正相关关系, 与粘土矿物含量相关性不明显。

**关键词:** 生物硅; 表层沉积物; 南海东北部; 南海南部海域

中图分类号: P736 文献标识码: A 文章编号: 1009-5470(2010)04-0040-08

## Biogenic silica in surface sediments of the northeastern and southern South China Sea

ZHOU Peng<sup>1</sup>, LI Dong-mei<sup>1</sup>, LIU Guang-shan<sup>2</sup>, MEN Wu<sup>2,3</sup>, JI Li-hong<sup>2</sup>

(1. *South China Sea Environment Monitoring Center, State Oceanic Administration, Guangzhou 510300, China*; 2. *College of Oceanography and Environmental Science, Xiamen University, Xiamen 361005, China*; 3. *Third Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Xiamen 361005, China*)

**Abstract:** Biogenic silica (BSi) contents in surface sediments from the northeastern South China Sea (NSCS) and southern South China Sea (SSCS) were measured. The BSi contents (SiO<sub>2</sub>%) were in the range of 1.08%–3.01% and 0.79%–9.06%, with the means of 1.76% and 4.22% for the NSCS and SSCS, respectively. The results showed that the BSi contents in surface sediments have positive correlation with water depth of the sampling locations. The BSi contents in the NSCS had no evident correlation with minerals, ferrum ion concentrations in surface sediments or nutrients in the pore waters of sediments. The BSi contents in the SSCS had positive correlations with organic material and carbonate contents but not with clay material contents.

**Key words:** biogenic silica; surface sediment; northeastern South China Sea; southern South China Sea

生物硅又称生源硅或蛋白石(biogenic silica, BSi 或 Opal), 是一种无定型的二氧化硅, 主要由硅藻、硅鞭藻、放射虫和少量的海绵骨针等组成。海底生源硅非常稳定, 大约 10<sup>6</sup>—10<sup>9</sup> 年才发生溶解<sup>[1-2]</sup>。随着人类活动以及农业耕种、森林开采、污水排放的增多, 水体中氮、磷的输入剧增。这些营养元素的输入, 通常会导致硅藻产率的增加, 从而加速生物硅的沉积<sup>[3]</sup>。但是随着水体中溶解硅的不

断消耗, 硅藻生长的速度开始减慢, 最终其生长受硅限制<sup>[4]</sup>。沉积物中生物硅的积累记录着水体中溶解硅的历史变化, 反映硅质生物(主要是浮游硅质生物)生产力的时间和空间的变化, 可以是古气候学研究中的一种重要的指标<sup>[5-10]</sup>。

南海东北部和南部海域是我国集中进行综合研究较多的两个海区。20 世纪 70 年代以来, 海峡两岸科学工作者对南海东北部海域进行了多次专题调

收稿日期: 2009-05-07; 修订日期: 2009-08-11。卢冰编辑

基金项目: 国家基础研究发展计划项目(2005CB422305)

作者简介: 周鹏(1976—), 男, 河南省开封市人, 硕士, 主要从事同位素海洋学研究。E-mail: samzhou2@126.com

\*感谢各位审稿人的宝贵意见; 感谢厦门大学海洋与环境学院同位素海洋化学研究组的大力协助。

查<sup>[11-13]</sup>, 研究者对该海域的海底地貌、沉积物分区、表层沉积物类型及粒度特征、沉积物中的碎屑矿物和沉积物成因、放射性核素、铁的形态、间隙水中的氧和硅等进行了研究<sup>[14-23]</sup>。在该海区, 李建等测定了 ODP1144 岩心中的蛋白石分布, 进行了古生产力研究<sup>[24]</sup>。在邻近西边海区的珠江口, 贾国东等测定了岩心中的生物硅, 进行了近百年来该海区富营养化的记录研究<sup>[25]</sup>。在邻近的东边海区, 谷日光等对表层沉积物中的生物硅和有机物进行了研究<sup>[26]</sup>。

已有研究者对南海南部海域沉积物/海水界面的有机碳、磷、铁和锰的分配与转移<sup>[28-29]</sup>, 沉积物的放射性核素、营养盐、有机物、铁和锰、重金属、稀土元素、磷、有机碳、粘土矿物和碳酸盐等进行了研究<sup>[30-36]</sup>。为研究气候变化, 还有研究者测定了在该海域采集的沉积物岩心中的生物硅分布<sup>[37-40]</sup>。张兰兰等测定了该海区表层沉积物的生物硅, 研究了其环境意义<sup>[41]</sup>。

本研究测定了在“南海东北部海区环流配合性合作调查研究”中和“八五”南沙群岛及邻近海区综合科学考察采集的表层沉积物样品中的生物硅, 对两个海区表层沉积物含量与站位水深的关系进行了分析, 研究了南海东北部表层沉积物中生物硅含量与矿物含量等的相关性和南海南部海域表层沉积物生物硅含量与有机物、碳酸盐、粘土矿物含量的相关性。

## 1 研究海区与采样站位

南海东北部指珠江口以东粤闽沿岸、台湾岛和吕宋岛之间的海域。该海域等深线呈 SW—NE 走向, 海底地形自东南向西北方向抬升。南部是南海海盆, 深达数千米, 经巴士海峡与太平洋沟通; 西北部是大陆沿岸陆架区, 水深数十米到百余米不等; 东北方向经台湾海峡与东海相连, 东沙群岛位于其中<sup>[21]</sup>。本研究在该海域的样品于 1992 年 3 月 5 日至 28 日集中采集, 共 8 个样品, 采样站位如图 1 和表 1 所示。选择的采样站位主要为从大亚湾外向东南方向辐射的一个断面, 另外在海区东面和西面各选择一个站位。

南海南部海域处于欧亚、太平洋和印度板块的结合部位, 属于典型的热带开放海区, 物质来源广泛, 沉积物记录了陆地和海洋古气候、古环境变化的丰富信息, 是研究现在和过去全球变化的理想场所<sup>[42]</sup>。本研究在该海域的样品于 1993 年 11—12 月采集, 共 15 个样品, 采样站位如图 1 和表 1 所示, 所

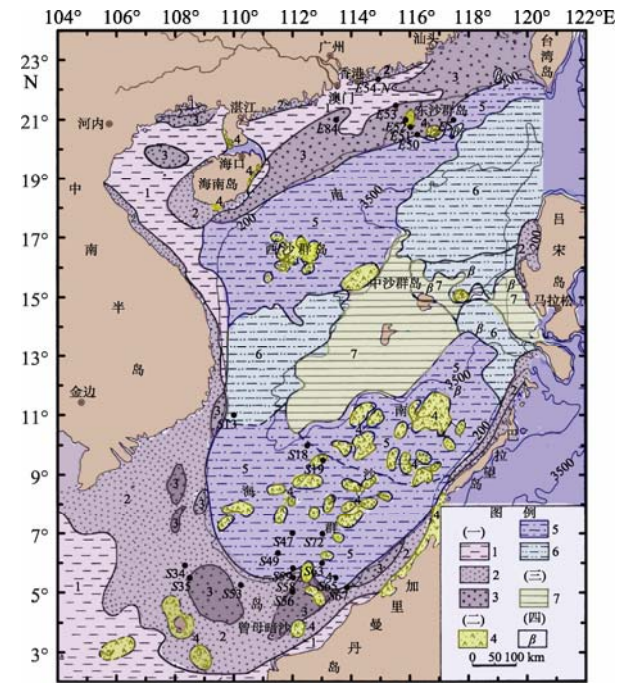


图 1 南海沉积成因类型分布和本研究样品的采样站位 (底图取自文献[27])

(一) 陆源碎屑成因类型: 1. 近岸现代陆源泥; 2. 近岸现代陆源砂和粉砂; 3. 浅海(古滨海)残留砂。

(二) 生物源成因类型: 4. 浅海珊瑚砂砾; 5. 半深海-钙质泥; 6. 深海硅质泥。

(三) 生源-陆源成因类型: 7. 深海黏土。

(四) 火山-生源-陆源成因类型: 火山物质(占沉积物  $\pm 5\%$ )

Fig. 1 Distributions of sediment types in the South China Sea and sampling locations of this study

选站位散布于研究海区。

## 2 沉积物中生物硅测定方法

有用 X 射线衍射法、红外分光法、大体积沉积物化学标准计算法、微体化石计数法和化学提取法测定海洋沉积物中生物硅含量的报道<sup>[43-52]</sup>, 其中化学提取法相对简便、经济, 易操作性强, 是目前较广泛使用的方法。

### 2.1 测量流程

本文采用化学提取法测量沉积物中生物硅, 流程为: 1) 将样品 105 烘干研碎, 取 110—140mg 置于 100mL 的聚丙烯离心试管中, 加 5—8mL 的 10%  $H_2O_2$ , 超声波震荡反应约 30min; 再加入 5—8mL  $1.0mol \cdot L^{-1}$  的 HCl, 超声波震荡 30min; 然后  $4000r \cdot min^{-1}$  离心 5min, 弃上层液。再加入 20mL Milli-Q 水洗涤, 离心 5min, 弃上清液, 置于烘箱中干燥。2) 加入 40mL 碳酸钠溶液, 封盖超声 5min 后, 置 85 水浴中提取生物硅。3) 采用 8 小时连续法提取, 每 1h 取出 0.250—1.000mL 提取上清液, 采用酸

性硅钼蓝分光光度法测量溶解硅含量<sup>[53]</sup>。4)最后结果以沉积物中 SiO<sub>2</sub> 的百分含量表示。

## 2.2 条件实验

不同来源的沉积物中生物硅组分、年龄、含量以及非生源粘土矿物可能存在很大差异,这些都是影响测量结果的因素,通常通过条件实验优化选择提取液的种类和浓度<sup>[43]</sup>。样品采用浓度为 2.0mol·L<sup>-1</sup> 的 NaOH 溶液, 2mol·L<sup>-1</sup>、0.5mol·L<sup>-1</sup> 和 0.2mol·L<sup>-1</sup> 的 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 溶液等 4 种配方的提取液分别对南海东北部的 E51 号样品进行条件试验:每 1h 取出 0.250—1.000mL 上清液测定并计算样品中溶出的硅含量(提取液中 SiO<sub>2</sub> 质量/沉积物质量×100%),最后以时间为横坐标,沉积物中溶出硅含量(以 SiO<sub>2</sub>%表示)为纵坐标,绘出硅溶出含量随时间变化的关系图,见图 2。计算溶出的硅含量时,必须考虑取样前后提取液的体积变化、及移出的硅含量的影响,经过计算校正才能准确得出溶出的硅含量。研究发现 2.0mol·L<sup>-1</sup>NaOH 溶液所提取的二氧化硅含量随时间呈现明显的递增趋势,说明碱度过强,生物硅和非生物硅的溶解速度都较快,不适合用于测量近岸沉积物中的生物硅;而 0.5mol·L<sup>-1</sup> 和 0.2mol·L<sup>-1</sup> Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 溶液也呈现递增的趋势,说明碱性相对较弱,生物硅未完全溶解;2.0mol·L<sup>-1</sup> 的 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 在 3h 后呈现稳定趋势,这说明生物硅溶解完全,而且非生源硅的溶解速度较低。

采用同样的方法对一个南海南部海域的样品进行对比测量,得到相同的结论,故采用 2.0mol·L<sup>-1</sup> Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 连续提取法测定南海东北部和南部表层沉积物中生物硅含量。对南海南部海域采集的样品,取 2g 左右沉积物,在 105 温度下烘干后,在 450 温度下灼烧至恒重测定烧失量。

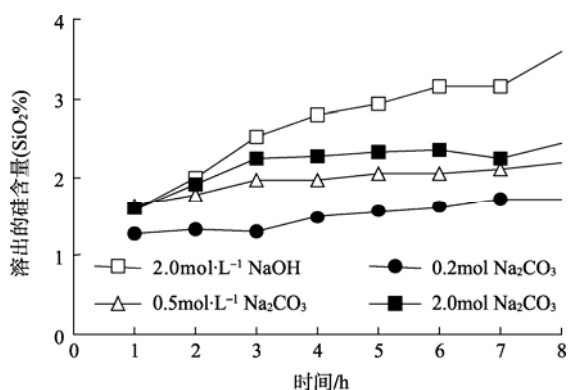


图 2 四种提取液提取效率的对比

Fig. 2 Comparison of silica extraction efficiency with four alkaline solutions

## 3 结果与讨论

### 3.1 南海东北部和南部海域的表层沉积物中生物硅含量

南海东北部和南部海域表层沉积物生物硅的测定结果列于表 1。南海东北部表层沉积物中生物硅含量(SiO<sub>2</sub>%)范围为 1.08%—3.01%,平均为 1.76%,其中 E5 站最低, E50 站最高。距岸最近,水深最浅的 E54-N 站的生物硅含量为 1.90%。南海南部表层沉积物中生物硅含量(SiO<sub>2</sub>%)范围为 0.79%—9.06%,平均为 4.22%。不同站位差异明显, S35 站最低, S19 站最高。南海东北部海域表层沉积物中的生物硅含量低于南部海域。

表 2 是一些文献报道的中国海洋沉积物中生物硅含量。一些文章中的生物硅含量仅有图,所以未能析出数据。文献中以 Si 含量表示的,本文将其折算为 SiO<sub>2</sub> 含量。大部分研究测量生物硅采用 2.0mol·L<sup>-1</sup> 或 1%的碳酸钠溶液作为提取液,提取温度为 85 ,而且采用单点提取方法测量样品。

表 1 采样站位和样品生物硅测定结果

Tab. 1 Sampling locations and the BSi contents in the samples

海区	站位编号	水深 /m	离岸距离 /m	生物硅(SiO <sub>2</sub> %)		烧失量 /%
				含量	平均值	
南海东北 部海域	E50	670	272	3.01		
	E51	400	252	2.17		
	E52	274	215	1.60		
	E53	107	148	1.22	1.76	
	E54	66	72	1.40		
	E54-N	32	30	1.90		
	E5	740	255	1.08		
	E84	70	150	1.73		
南海南部 海域	S13	665		3.30	4.22	5.92
	S18	2500		8.09		9.51
	S19	—		9.06		7.96
	S34	—		1.19		2.41
	S35	—		0.79		1.48
	S47	2038		5.48		9.58
	S49	—		4.59		7.49
	S53	—		1.32		1.22
	S56	105		1.81		4.96
	S58	—		1.77		4.61
	S59	1059		2.80		6.08
	S63	1883		6.38		9.24
	S65	—		7.31		8.48
	S67	612		3.47		10.61
S72	1450		5.93		5.22	

表 2 文献报道的中国海沉积物生物硅含量

Tab. 2 BSi contents in the sediments of some China seas from literature

海区	样品类型	生物硅含量(SiO <sub>2</sub> /%)		测量方法与提取液碳酸钠浓度	文献
		平均值	范围值		
长江口	岩心	1.20	0.90—1.73	单点提取, 2.0mol·L <sup>-1</sup>	[54]
东海、黄海	岩心		0.64—1.50	连续提取, 2.0mol·L <sup>-1</sup>	[55]
黄海	表层沉积物		0.45—0.98	连续提取, 2.0mol·L <sup>-1</sup>	[56]
渤海	表层沉积物		0.53—1.24	连续提取, 2.0mol·L <sup>-1</sup>	[56]
东海	岩心		0.19—1.50	连续提取, 2.0mol·L <sup>-1</sup>	[57]
厦门港	岩心和表层沉积物		1.5—2.5	单点提取, 1.0mol·L <sup>-1</sup> ,	[58]
珠江口	岩心 ZJ6	1.54	0.98—2.35	单点提取, 2.0mol·L <sup>-1</sup>	[25]
	岩心 ZJ10	1.33	0.91—1.81	单点提取, 2.0mol·L <sup>-1</sup>	[25]
粤东海域	表层沉积物		0.43—1.44	连续提取, 0.5mol·L <sup>-1</sup>	[26]
南海东北部	表层沉积物	1.72	1.08—3.01	连续提取, 2.0mol·L <sup>-1</sup>	本文
南海西南部, 湄公河口附近	岩心		1.04—6.51	单点提取, 1%	[52]
			-1.28—6.16	SiO <sub>2</sub> /TiO <sub>2</sub> 比值校正法, 1%	[52]
南海南部	岩心 17962		1.31—3.38	单点提取, 1%	[37]
南海南部	表层沉积物	4.96	0.33—9.00	单点提取, 2.0mol·L <sup>-1</sup>	[41]
南海南部	表层沉积物	4.22	0.79—9.06	连续提取, 2.0mol·L <sup>-1</sup>	本文
总范围值			0.19—9.06		

可以将表 2 中的数据分为低、高两个水平。渤海、黄海和东海沉积物中的生物硅含量范围接近, 具有低的含量水平; 南海北部也具有低水平的生物硅含量; 而南海南部具有高生物硅含量水平。本研究中, 除最小水深的 E50 号站稍高外, 其余数据与文献给出的该海域沉积物生物硅含量水平一致。本研究的南海南部海域与张兰兰等<sup>[41]</sup>的研究海区一致, 两者的结果范围值也非常一致, 可能是张兰兰等的研究位于深海区的站位比本研究多, 所以平均值稍高于本研究, 因为由下文知水深越深沉积物中的生物硅含量越高。

### 3.2 沉积物生物硅含量与站位水深的相关性分析

南海东北部和南部海域表层沉积物中生物硅含

量与水深存在明显的线性相关关系, 如图 3a 所示。水深越深, 生物硅含量越高, 因为站位水深越深, 距岸距离越远, 陆源物质输入的稀释作用越小, 上覆水体中生源物质贡献越大, 生物硅含量就会越高。该结论与张兰兰的结果一致<sup>[41]</sup>。但是, 将南海东北部的数据放大处理(图 3b)发现存在细结构, 水深低于 150m 的海区, 沉积中的生物硅含量是随水深减小的。E5 号站虽然处于硅质泥沉积海区边缘, 水深较深, 却具有低的生物硅含量, 与生物硅-水深关系趋势线偏离较远。

### 3.3 南海东北部表层沉积物中生物硅与矿物含量的相关性分析

在南海东北部, 对同一航次相同站位采集的样

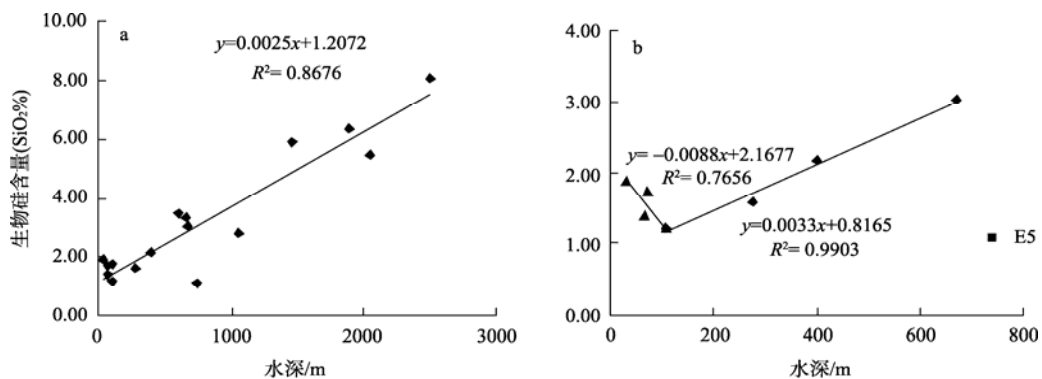


图 3 南海南部海域表层和东北部沉积物中生物硅含量随水深的变化

a. 全体样品; b. 仅南海东北部的样品

Fig. 3 Correlation between BSi contents and water depths

a. all samples; b. only the samples of the NSCS.

品,徐茂泉等(1994)进行了碎屑矿物研究<sup>[18]</sup>;陈绍勇(2006)研究了沉积物中  $Fe^{3+}$  和  $Fe^{2+}$  含量以及  $Fe^{3+}/Fe^{2+}$  的比值变化<sup>[22]</sup>, 和间隙水中的营养盐氮和硅<sup>[23]</sup>。本研究对沉积物中的生物硅与 0.063—0.125mm 和 0.125—0.25mm 两种粒级的矿物含量和两种粒级的轻重矿物含量的相关性进行了相关性分

析,如图 4 所示,结果表明生物硅含量与碎屑矿物相关性较弱。图 5 给出南海东北部沉积物中生物硅含量和铁离子浓度、沉积物间隙水中的营养盐浓度的相关性分析结果。结果表明除与间隙水硝酸盐存在较弱的相关性外,生物硅含量与沉积物铁离子和间隙水营养盐浓度基本上不存在相关性。

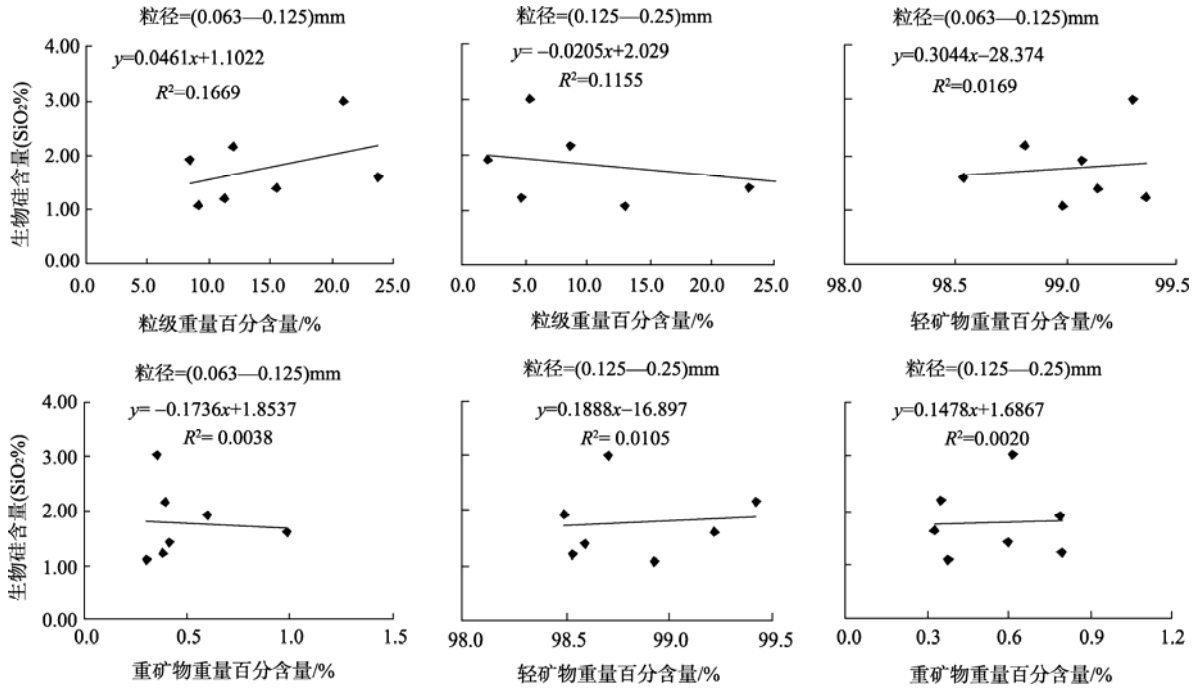


图 4 南海东北部表层沉积物中生物硅与矿物<sup>[18]</sup>的相关关系

Fig. 4 Correlation between BSi and mineral contents of surface sediments from the NSCS

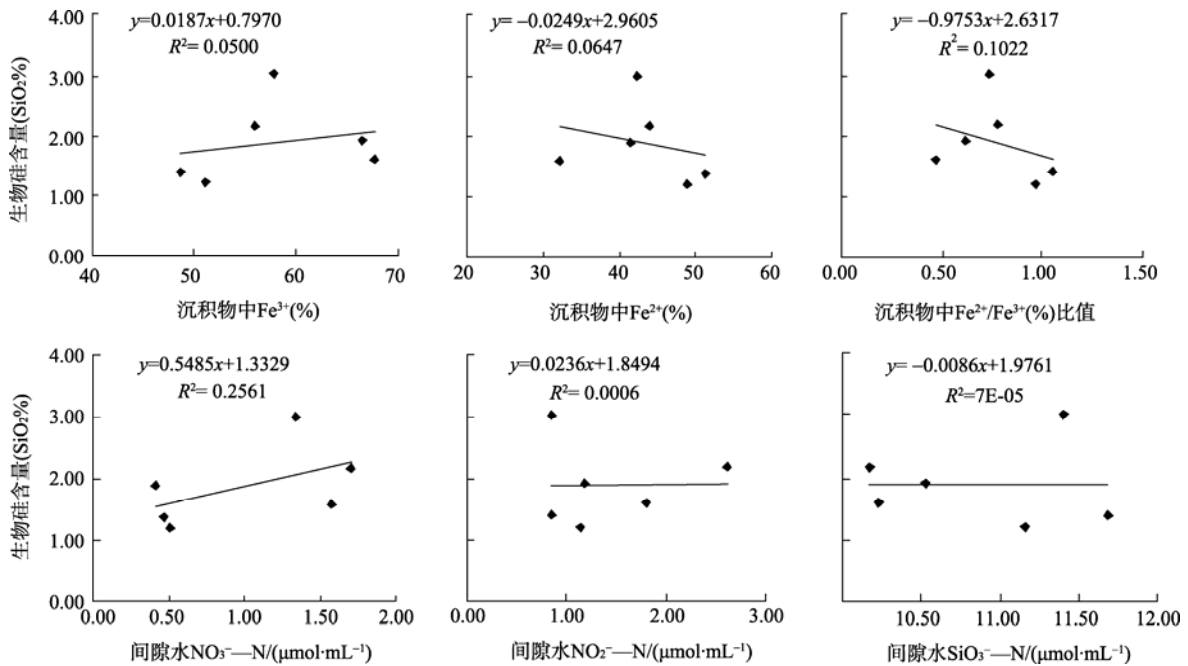


图 5 南海东北部表层沉积物生物硅含量与沉积物铁离子、间隙水中的氮和硅<sup>[22-23]</sup>之间的相关关系

Fig. 5 Correlation between BSi and Fe in surface sediments, N and Si in pore water of surface sediment from the NSCS

以上结果可以解释为生物硅是生源物质, 与矿物等陆源物质不存在相关性。尽管生物硅是硅质生物甲壳, 但是沉积物中的生物硅已与软组织分离, 所以沉积物中的生物硅含量与间隙水中的营养盐浓度相关性较差。

### 3.4 南海南部海域表层沉积物中生物硅分布特征及其与有机物等的相关性分析

本研究南海南部海域表层沉积物中生物硅含量可按高低两个水平分组。高含量组包括 S18、S19、S47、S49、S63、S65、S72 站, 沉积物中的生物硅在 4.59%—9.06% 之间, 高于平均值; 其余为低含量组, 沉积物生物硅含量为 0.79%—3.47%。两个组高低差异明显, 这与南海南部海区存在不同的沉质分区有密切关系<sup>[15,42]</sup>。从图 1 中可以看出, 高生物硅含量站位于半深海—深海钙质泥区; 低生物硅含量站位于陆源砂、粉沙和浅海残留砂类型沉积区; S13 站虽位于深海硅质泥沉积区, 但离西部海岸较近, 可能有较高的陆源物质输入, 所以生物硅含量并不很高。

对南海南部海域沉积物中生物硅含量与烧失量进行相关分析发现, 生物硅与烧失量的相关性较

高。将本研究测定的生物硅含量与文献报道的相同站位有机碳、粘土矿物和碳酸盐含量<sup>[36]</sup>进行相关分析, 发现沉积物中的生物硅与有机碳含量和碳酸盐具有较好的相关性, 与粘土矿物相关性一般, 如图 6 所示。这是由于沉积物中的生物硅和有机物是生源的, 而粘土是非生源物质。

## 4 结论

本研究得出以下结论:

1) 南海东北部和南部海域的表层沉积物中的生物硅平均含量经测定分别为 1.76% 和 4.22%, 南海南部海域的表层沉积物生物硅含量平均值大于南海东北部。

2) 南海东北部和南部海域表层沉积物中的生物硅含量与站位水深呈正相关关系, 但南海东北部近岸海域生物硅含量与站位水深呈负相关关系。

3) 南海东北部表层沉积物生物硅含量与轻重矿物含量之间不存在明显的相关关系。南海南部海域表层沉积物生物硅含量与有机碳(烧失量)、碳酸盐含量呈正相关关系, 与粘土矿物含量相关性较差。

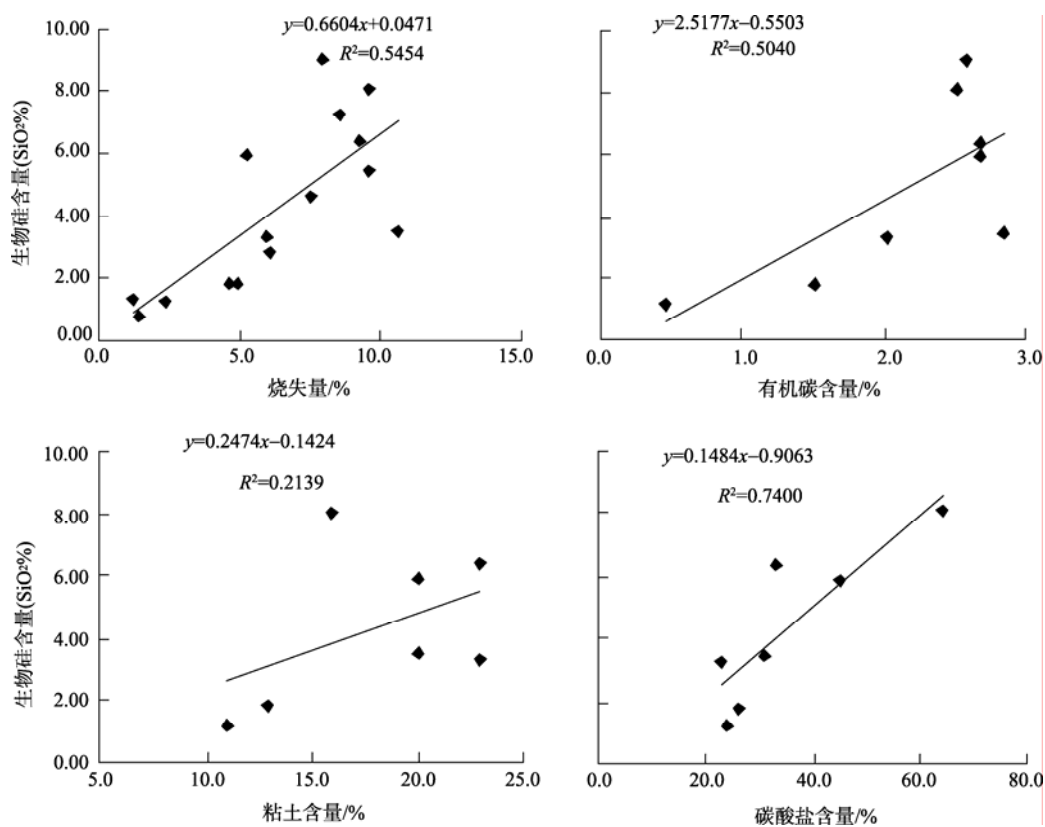


图 6 南海南部海域表层沉积物中生物硅与烧失量、有机碳、粘土和碳酸盐含量<sup>[36]</sup>的关系

Fig. 6 Correlations between BSi and ignition loss, organic carbon, clay and carbonate contents in surface sediments of the SSCS

## 参考文献

- [1] TRÉGUER 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.
- [2] MORGENSTERN U, GEYH M A, KUDRASS H R, et al.  $^{32}\text{Si}$  dating of marine sediments from Bangladesh [J]. *Radiocarbon*, 2001, 43(2): 909–916.
- [3] SCHELSKE C L, STOEMER E F. Eutrophication, silica depletion, and predicted change in algal quality in lack Michigan [J]. *Science*, 1971, 173: 423–424.
- [4] 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.
- [5] SCHELSKE C L, STOERMER E F, CONLEY D J, et al. Early eutrophication in the lower Great lakes: New evidence from biogenic silica in sediment [J]. *Science*, 1983, 222: 320–322.
- [6] SCHELSKE C L, CONLEY D J, STOERMER E F, et al. Biogenic silica and phosphorus accumulation in sediments as indices of eutrophication in the Laurentian Great Lakes [J]. *Hydrobiologia*, 1986, 143(1): 79–86.
- [7] BROECKER W S. Massive iceberg discharges as triggers for global climate change [J]. *Nature*, 1994, 372: 421–424.
- [8] 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 paleoproductivity proxy [J]. *Global and Planetary Change*, 2000, 26: 317–365.
- [9] JOHNSON T C, BROWN E T, MCMANUS J, et al. A high resolution paleoclimate record spanning the past 25000 years in southern east Africa [J]. *Science*, 2002, 296: 113–131.
- [10] 叶曦雯, 刘素美, 张经. 生物硅的测定及其生物地球化学意义[J]. *地球科学进展*, 2003, 18(3): 421–427.
- [11] 中国科学院南海海洋研究所. 南海海区综合调查研究报告(二)[R]. 北京: 科学出版社, 1985: 1–432.
- [12] 南海东北部海区环流课题组. 中国海洋学文集(6)[C]. 北京: 海洋出版社, 1996: 1–109.
- [13] 许建平, 苏纪兰. 黑潮水入侵南海的水文分析[J]. *热带海洋*, 1997, 16(2): 1–21.
- [14] 谢以萱. 南海东北部的海底地貌[J]. *热带海洋*, 1983, 2(3): 183–190.
- [15] 刘锡清. 中国边缘海的沉积物分区[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1996, 16(3): 1–11.
- [16] 罗又郎, 劳焕年, 王淦猗, 等. 南海东北部表层沉积物类型与粒度特征的初步研究[J]. *热带海洋*, 1985, 4(1): 33–41.
- [17] 罗又郎. 南海表层沉积物类型与沉积作用若干特征[J]. *热带海洋*, 1994, 13(1): 47–54.
- [18] 徐茂泉, 黄奕普, 施文远, 等. 南海东沙群岛附近海域沉积物中碎屑矿物的研究[J]. *厦门大学学报: 自然科学版*, 1994, 33(3): 380–385.
- [19] 海洋沉积研究室. 南海中北部沉积成因类型[J]. *热带海洋*, 1987, 6(6): 1–9.
- [20] 陈敏, 黄奕普, 施文远, 等. 东沙群岛附近海域表层沉积物中的镭同位素[C]//台湾海峡及邻近海域海洋科学讨论会论文集. 北京: 海洋出版社, 1995: 208–216.
- [21] 刘广山, 黄奕普, 陈敏, 等. 南海东北部表层沉积物天然放射性核素与  $^{137}\text{Cs}$ [J]. *海洋学报*, 2001, 23(6): 76–84.
- [22] 陈绍勇. 海洋沉积物铁的穆斯堡尔谱学研究[C]//海洋化学研究文集. 北京: 海洋出版社, 2006: 241–249.
- [23] 陈绍勇, 韩舞鹰. 南海东北部沉积物间隙水氧和硅的研究[J]. *热带海洋*, 1994, 13: 56–60.
- [24] 李建, 王汝建. 南海北部一百万年以来的表层古生产力变化: 来自 ODP1144 站的蛋白石记录[J]. *地球学报*, 2004, 78(2): 228–233.
- [25] 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.
- [26] 谷阳光, 王朝晖, 吕松辉, 等. 粤东海域表层沉积物中生物硅和有机质水平分布研究. *安徽农业科学*, 2008, 36(30): 13323–13325.
- [27] 刘昭蜀, 赵焕庭, 范时清, 等. 南海地质[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 388–399.
- [28] 陈松, 廖文卓, 许爱玉, 等. 南沙海域沉积物/海水界面分配与转移 I: 有机碳和磷[M]//南沙群岛海区化学过程研究. 北京: 科学出版社, 1996, 128–134.
- [29] 陈松, 廖文卓, 许爱玉, 等. 南沙海域沉积物/海水界面分配与转移 II: 铁和锰[J]. *台湾海峡*, 1999, 18(3): 268–272.
- [30] 刘广山, 黄奕普, 陈敏, 等. 南沙海区表层沉积物放射性核素的分布特征[J]. *海洋科学*, 2001, 25(8): 1–5.
- [31] 周华伟, 吴云华, 陈绍勇. 南沙群岛海域沉积物间隙水营养盐(氮磷硅的研究) [J]. *热带海洋学报*, 2001, 20(4): 49–55.
- [32] 周华伟, 吴云华, 陈绍勇. 南沙群岛海域表层沉积物中有机物、铁和锰的分布特征[J]. *热带海洋学报*, 2003, 22(1): 43–49.
- [33] 陈忠, 古森昌, 颜文, 等. 南海海槽南部海区表层沉积物重金属元素含量及其影响因素[J]. *海洋科学*, 2002, 26(1): 50–53.
- [34] 田正隆, 戴英, 龙爱民, 等. 南沙群岛海域沉积物稀土元素地球化学研究[J]. *热带海洋学报*, 2005, 24(1): 8–14.
- [35] 王汉奎, 黄良民, 陈国华. 南沙群岛海域表层沉积物中磷的形态分布特征[J]. *热带海洋学报*, 2005, 24(3): 31–37.
- [36] 田玉红, 张正斌, 刘蓬生. 南沙群岛海区表层沉积物吸附铜离子的实验研究[J]. *热带海洋*, 1999, 18(4): 69–74.

- [37] 贾国东, 翦知湜, 彭平安, 等. 南海南部 17962 柱样生物硅沉积记录及古海洋意义[J]. 地球化学, 2000, 29(3): 293-297.
- [38] 房殿勇, 王汝建, 邵磊, 等. 南海 ODP1148 站深海相渐新统硅质成岩作用[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2002, 22(2): 75-79.
- [39] 李建如, 王汝建, 李保华. 南海南部 12Ma 以来的蛋白石堆积速率与古生产力变化[J]. 科学通报, 2002, 47(3): 235-237.
- [40] 王汝建, 李建. 南海 ODP1143 站第四纪高分辨率的蛋白石记录及其古生产力意义[J]. 科学通报, 2003, 48(1): 74-77.
- [41] 张兰兰, 陈木宏, 向荣, 等. 南海南部表层沉积物中生物硅的分布及其环境意义[J]. 热带海洋学报, 2007, 26(3): 24-29.
- [42] 赵焕庭. 南沙群岛自然地理[M]. 北京: 科学出版社, 1996: 1-3.
- [43] DEMASTER D J. The supply and accumulation of the silica in the marine environment [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1981, 45(10): 1715-1732.
- [44] DEMASTER D J. Measuring biogenic silica in marine sediments and suspended matter [C]//*Marine Particulates: Analysis and characterization*. American Geophysical Union, 1991: 363-368.
- [45] MORTLOCK R A, FROELICH P N. A simple method for the rapid determination of biogenic opal in pelagic marine sediments [J]. *Deep-Sea Research*, 1989, 36(9): 1415-1426.
- [46] MÜLLER P J, SCHNEIDER R. An automated leaching method for the determination of opal in sediments and particulate matter [J]. *Deep-Sea Research I*, 1993, 40: 42-444.
- [47] SCHLUTER M, RICKERT D. Effect of pH on the measurement of biogenic silica [J]. *Marine Chemistry*, 1998, 63: 81-92.
- [48] CONLEY D J. An interlaboratory comparison for the measurement of biogenic silica in sediments [J]. *Marine Chemistry*, 1998, 63: 39-48.
- [49] KAMATANI A, OKU O. Measuring biogenic silica in marine sediments [J]. *Marine Chemistry*, 2000, 68: 219-229.
- [50] 刘素美, 张经. 沉积物中生物硅分析方法评述[J]. 海洋科学, 2002, 26 (2): 23-25.
- [51] 赵立波, 黄凌风, 潘科, 等. 内湾沉积物中生物硅的测定方法及其应用初探[J]. 厦门大学学报:自然科学版, 2004, 43 (增刊): 153-158.
- [52] 马金龙, 韦刚健, 贾国东. 碱提取法分析海洋沉积物生物硅方法中碎屑组分污染的评估及校正[J]. 地球化学, 2005, 34(3): 285-290.
- [53] 国家质量技术监督局. GB 17378.4—1998 海洋监测规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 1998.
- [54] 陈杰. 浙江沿海富营养化与赤潮历史的沉积记录研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004: 29-33.
- [55] 叶曦雯, 刘素美, 赵颖翡, 等. 东、黄海沉积物中生物硅的分布及其环境意义[J]. 中国环境科学, 2004, 24(3): 265-269.
- [56] 叶曦雯, 刘素美, 张经. 黄海、渤海沉积物中生物硅的测定及存在问题的讨论[J]. 海洋学报, 2002, 24(1): 129-134.
- [57] 赵颖翡, 刘素美, 叶曦雯, 等. 黄、东海柱状沉积物中生物硅含量的分析[J]. 中国海洋大学学报, 2005: 35(3): 423-428.
- [58] 赵立波. 内湾沉积物中生物硅测定的方法学研究及其应用[D]. 厦门: 厦门大学, 2004: 47.