

倪建宇, 付锋, 王渊, 等. 表层海水硅同位素的分布特征及其影响因素[J]. 海洋学报, 2021, 43(2): 1–8, doi:10.12284/hyxb2021020  
Ni Jianyu, Fu Feng, Wang Yuan, et al. Distributions of silicon isotopes of dissolved silicate in the surface seawater from global oceans[J]. Haiyang Xuebao, 2021, 43(2): 1–8, doi:10.12284/hyxb2021020

# 表层海水硅同位素的分布特征及其影响因素

倪建宇<sup>1</sup>, 付锋<sup>1</sup>, 王渊<sup>1</sup>, 姚旭莹<sup>1</sup>

(1. 自然资源部第二海洋研究所 自然资源部海底科学重点实验室, 浙江 杭州 310012)

**摘要:** 本文分析了采集自太平洋、印度洋和大西洋的表层海水溶解硅酸盐的  $\delta^{30}\text{Si}$  值, 结果表明, 太平洋表层海水的  $\delta^{30}\text{Si}$  值为 0.45‰~2.91‰, 平均值为  $(1.52\pm 0.59)\%$ ; 印度洋表层海水的  $\delta^{30}\text{Si}$  值为 0.98‰~2.30‰, 平均值为  $(1.52\pm 0.36)\%$ ; 大西洋表层海水的  $\delta^{30}\text{Si}$  值为 0.90‰~2.23‰, 其平均值为  $(1.55\pm 0.35)\%$ 。硅同位素在各大洋表层, 主要表现出与大洋表层环流和经向翻转流的相关性, 其分布特征受表层水体中的生物活动以及表层洋流运动导致的不同水团之间的混合的影响, 且混合作用可能对开放大洋表层水体的  $\delta^{30}\text{Si}$  分布具有显著的影响。

**关键词:**  $\delta^{30}\text{Si}$ ; 表层海水; 溶解硅酸盐; 全球海洋

中图分类号: P736.4

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2021)02-0001-08

## 1 引言

表层海水中的溶解硅酸盐(Dissolved Silicate, DSi)是氮、磷之外重要的营养元素, 和氮、磷等所有浮游生物所必需不同, 海水中的溶解硅酸盐是硅藻等硅质生物所必需的营养元素。硅质浮游生物主导着海洋中硅的循环, 同时也显著影响着碳、氮、磷等元素的生物地球化学循环。已有研究表明, 硅藻等硅质生物贡献了约 40% 的海洋初级生产, 在海洋有机质的输出中占据重要的地位, 是全球碳循环中的重要一环<sup>[1-2]</sup>。

开放大洋硅循环的研究, 对于阐述硅藻等硅质生物在上层海洋碳循环的重要性及其对海洋硅总量的贡献率具有重要的意义<sup>[3]</sup>, 在海洋硅循环研究中, 海水中溶解硅酸盐的硅同位素日趋成为一个重要的工具<sup>[4]</sup>。由于硅藻等硅质生物在吸收利用海水中的溶解硅生成其蛋白石质(生物硅)的壳体过程以及硅藻死亡后其壳体溶解过程中, 都将优先利用或释放轻的硅同位素, 从而改变海水中溶解硅的同位素组成<sup>[5-6]</sup>。因此,

海水溶解硅酸盐  $\delta^{30}\text{Si}$  值的变化反映了表层水体中硅的利用率、随后的生物硅的溶解作用以及不同水团之间混合作用的变化, 可用于示踪硅在海洋中循环的生物地球化学过程<sup>[7-18]</sup>。近年来, 全球海洋硅同位素的研究逐渐成为了一个热点, 但对于开放大洋的研究较为薄弱<sup>[17-18]</sup>。开放大洋由于远离河流等陆源输入, 表层水体中的硅酸盐主要来自次表层水体的上涌以及水平输运, 因此大洋环流以及上升流的变化将显著影响水体中溶解硅及其同位素的分布<sup>[2]</sup>。本文通过分析太平洋、印度洋和大西洋等开放大洋表层水体中硅酸盐的硅同位素( $\delta^{30}\text{Si}$ )组成, 来研究表层水体中硅同位素组成在不同大洋间的分布规律, 探讨其可能的影响因素。

## 2 样品采集与分析

本文所分析的样品分别采集自“大洋一号”执行的 Dy21 航次和 Dy22 航次, 以及“海洋六号”执行的 Dy23 航次在印度洋、大西洋和太平洋开展调查期间采集的表层海水样品, 共计 70 个(图 1)。由于表层海

收稿日期: 2020-06-30; 修订日期: 2020-10-21。

基金项目: 大洋矿产资源勘探开发专项基金项目(DY135-S1-1-08, DY135-E2-1-01)。

作者简介: 倪建宇(1969—), 男, 江苏省靖江市人, 博士, 研究员, 主要从事海洋地球化学和环境地球化学研究。E-mail: jianyuni@sio.org.cn

水中溶解硅酸盐的含量通常低于  $3 \mu\text{mol/L}$ , 为了获得足够的溶解硅用于同位素分析, 采集的  $8\sim 10 \text{ L}$  表层海水经孔径为  $0.45 \mu\text{m}$  的醋酸纤维滤膜过滤后, 加入  $1\%(\text{V/V}) 5 \text{ mol/L}$  的  $\text{NaOH}$  充分混匀后静置  $24 \text{ h}$ <sup>[17]</sup>, 弃去上清液后所富集的沉淀避光常温保存, 该过程不会导致硅同位素分馏<sup>[8,17]</sup>。在岸上实验室内, 用适量  $5 \text{ mol/L}$  的  $\text{HCl}$  将沉淀完全溶解后, 用阳离子树脂(伯乐 AG50W-X12,  $200\sim 400$  目)提纯, 提纯后的样品在华东师范大学采用 NEPTUNE 多接收器电感耦合等离

子质谱仪(Thermo Fisher Scientific)分析其硅的  $\delta^{30}\text{Si}/^{28}\text{Si}$  值<sup>[16]</sup>, 详细的分析流程见付锋在 2017 年的研究<sup>①</sup>。采用国家标准(GBW 04422 和 GBW 04421)以及 NBS 28 标准测定的仪器稳定性为  $0.06\% \sim 0.08\%$ , 测定的国家标准 GBW 04422 的  $\delta^{30}\text{Si}$  平均值为  $(-2.67 \pm 0.12)\%$  ( $2\text{sd}, n=10$ ), 与已发表的数据一致<sup>[16]</sup>。所用的试剂均为超纯试剂或经亚沸蒸馏后的试剂, 并在洁净室或台上进行样品处理。

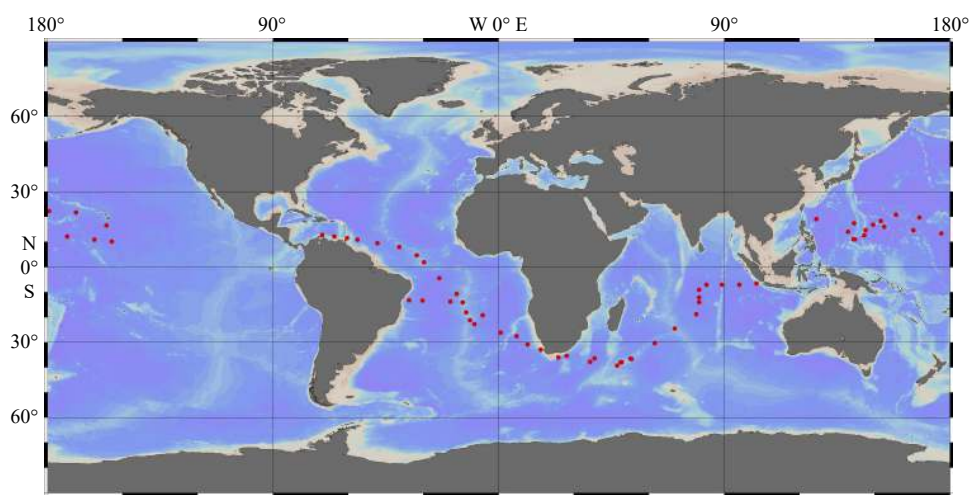


图 1 表层海水采样站位分布略图

Fig. 1 Sampling locations of the surface seawater samples

### 3 结果与讨论

#### 3.1 太平洋表层溶解态硅同位素

太平洋采样站位主要位于  $10^\circ\sim 20^\circ\text{N}$  的中低纬度(图 2)。20 个站位的分析结果表明, 表层水体溶解硅酸盐的  $\delta^{30}\text{Si}$  值在  $0.45\% \sim 2.91\%$  之间, 平均值为  $(1.52 \pm 0.59)\%$ , 高值区主要分布在  $20^\circ\text{N}, 167^\circ\text{E}$  附近, 低值区则出现在夏威夷以西以及菲律宾以东的海区(图 3)。尽管采样海区表层水体中硅酸盐的含量都较低, 但略高的硅酸盐含量对应着略低的硅同位素组成(图 2, 图 3), 这和已报道的硅同位素组成和硅酸盐含量成相反关系是一致的。

前人对太平洋海区表层水体溶解硅酸盐的  $\delta^{30}\text{Si}$  研究主要分布在东太平洋, 其范围为  $1.23\% \sim 2.36\%$ , 平均值为  $(2.18 \pm 0.73)\%$ <sup>[4, 17-20]</sup>。本文所分析的结果略低于已报道的数值, 由于我们的分析数据没有和夏威夷 ALOHA 站的水样进行比对, 造成此结果的原因可能是实验室间的分析误差<sup>[21]</sup>, 或者是采样区域的不同

造成的, 具体的原因需要进一步的研究。平面分布上表层水体的  $\delta^{30}\text{Si}$  存在自西北向东南增加的趋势(图 4), 在北太平洋中纬度地区和南太平洋靠近南美洲海域附近出现最高值, 与 Holzer 和 Brzezinski<sup>[22]</sup> 数值模拟的结果较为相似。表层水体中溶解硅酸盐的  $\delta^{30}\text{Si}$  分布主要受表层水体中硅藻等硅质生物的吸收利用以及具有不同硅同位素组成的水团的混合作用影响, 生物硅的溶解作用影响较小<sup>[21, 23]</sup>。Brzezinski 等<sup>[3]</sup> 在夏威夷 ALOHA 长期观测站的时间序列研究中发现, 对于寡营养海区硅质生物对水体中溶解硅酸盐的影响要小于大洋环流等水团运动所引起的。已有的研究也表明, 大洋中溶解硅酸盐的  $\delta^{30}\text{Si}$  分布可能受洋流, 尤其是经向翻转流的影响, 表现出近似保守的行为<sup>[10, 17, 24]</sup>。根据刘洪伟<sup>[25]</sup> 对北太平洋经向翻转流的研究, 太平洋经向环流圈较为复杂, 在北太平洋  $0^\circ\sim 30^\circ\text{N}$  存在一个较强的副热带环流圈, 其翻转区域在  $175^\circ\text{E} \sim 100^\circ\text{W}$ , 在  $15^\circ\sim 25^\circ\text{N}$  区间下沉, 下沉的海水在次表层流向赤道。本文采集的太平洋表层水

① 付锋. 溶解硅同位素在大洋中的分布. 杭州: 自然资源部第二海洋研究所.

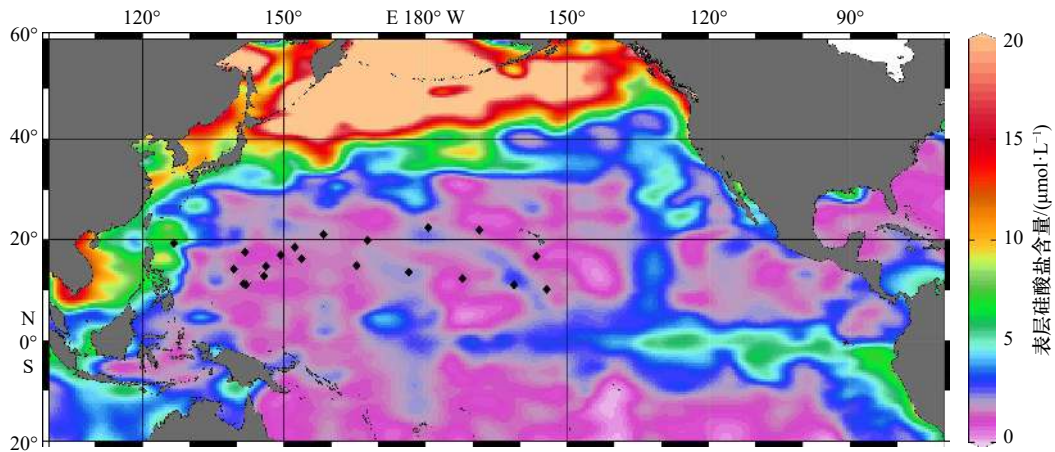
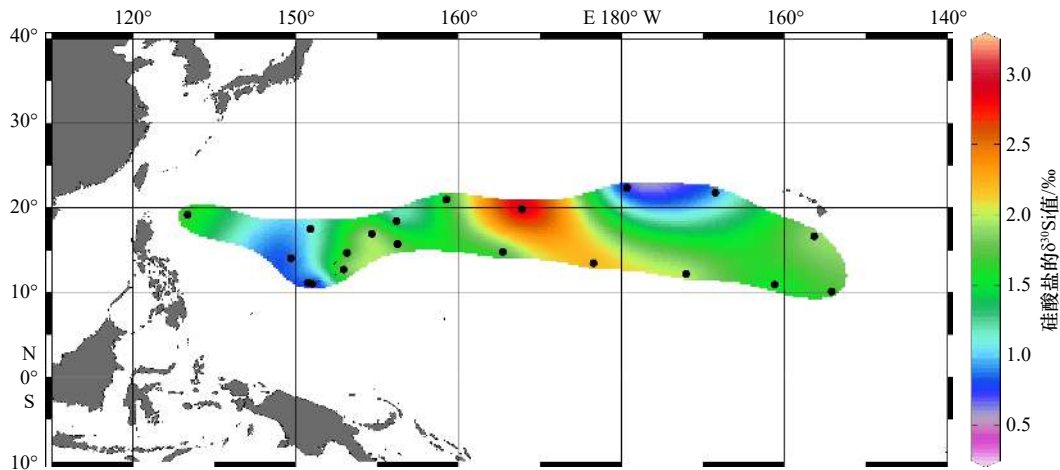


图2 太平洋采样站位分布

Fig. 2 Sampling stations in the Pacific Ocean

底图为表层硅酸盐含量的年平均平面分布(数据来自 WOA13, 采用 Ocean Data View 4.3 绘制)

The background map shows annual average dissolved silicate content in the surface water (data from WOA13, plot is generated using Ocean Data View 4.3)

图3 太平洋表层海水中溶解硅酸盐的  $\delta^{30}\text{Si}$  分布Fig. 3  $\delta^{30}\text{Si}$  distribution of dissolved silicate in the surface seawater of the Pacific Ocean

体的样品主要集中在西太平洋中低纬度海区,多介于  $10^{\circ}\sim 20^{\circ}\text{N}$  之间,主要位于北太平洋副热带环流中,受向东运动的北太平洋流和向西运动的北赤道流以及向赤道运动的加利福尼亚流的影响。北赤道流从东部携带着汇入的低盐、高营养盐的加利福尼亚流向西运动,并在菲律宾以东沿岸分叉为向南流动的棉兰老流和向北的黑潮等西边界流。在向赤道流动的加利福尼亚流携带的副极地高营养盐、低盐度海水的影响下,赤道太平洋东部表层海水的溶解硅酸盐等营养盐含量升高,提高了该区的生产力水平。西边界流系,黑潮主体携带了丰富的 DSi 等营养元素向北运动<sup>[26]</sup>,并在  $35^{\circ}\sim 38^{\circ}\text{N}$  附近转向东汇入北太平洋流,随洋流向东运动,而向南流动的棉兰老流在菲律宾以东汇入北赤道潜流,这些流系的共同作用可能是控制本文采样海区表层水体中溶解硅酸盐含量及其

硅同位素的主要因素之一。

### 3.2 印度洋表层溶解态硅同位素

印度洋表层海水的采样站位如图 5 所示,主要位于赤道以南至  $40^{\circ}\text{S}$  海域,样品采集于 12 月至翌年 2 月,为南半球的夏季期间。分析结果表明,表层水体中溶解硅酸盐的  $\delta^{30}\text{Si}$  值在  $0.98\text{‰}\sim 2.30\text{‰}$  之间,平均值为  $(1.52\pm 0.36)\text{‰}$ 。平面分布上,印度洋东部表层海水的  $\delta^{30}\text{Si}$  值较低,可能受印度尼西亚穿越流(ITF)所携带的高营养盐太平洋表层水的影响; $\delta^{30}\text{Si}$  值分别在  $15^{\circ}\text{S}$  和  $40^{\circ}\text{S}$  附近出现高值,其最大值出现在  $40^{\circ}\text{S}, 50^{\circ}\text{E}$  附近;在南非附近表层海水的  $\delta^{30}\text{Si}$  值最低(图 6),这可能反映了厄加勒斯翻转流的影响。印度洋表层海水中硅同位素的研究比较少,更多的是在印度洋更南端的南大洋一侧,主要是研究南大洋印度洋部分各水团之间  $\delta^{30}\text{Si}$  值的对比以及  $\delta^{30}\text{Si}$  值与溶解硅

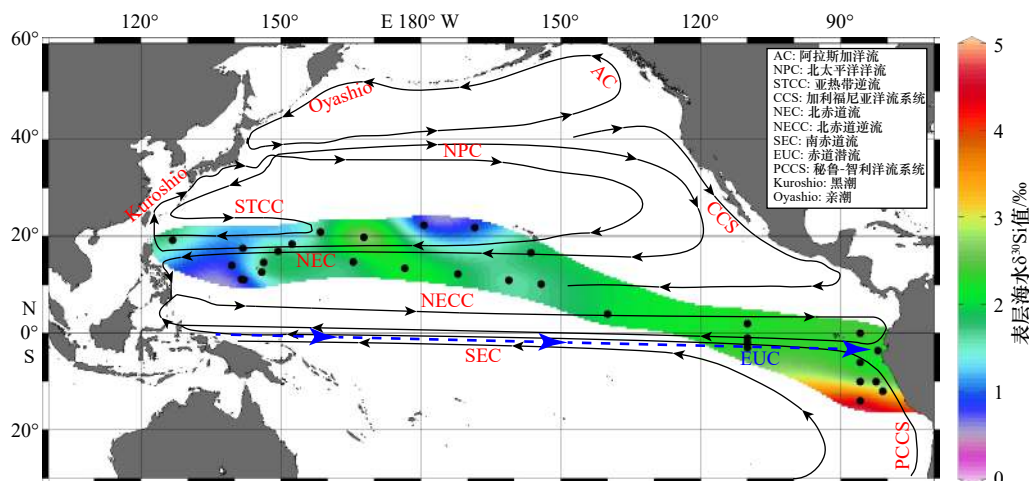


图4 太平洋表层海水  $\delta^{30}\text{Si}$  值的平面分布

Fig. 4  $\delta^{30}\text{Si}$  distribution of dissolved silicate in the surface seawater of the Pacific Ocean

东太平洋数据来自文献 [4, 17–20]; 西太平洋数据来自本文, 表层环流引自文献 [27]

Data of eastern Pacific Ocean from references [4, 17–20], data of western Pacific Ocean from this study, surface currents from reference [27]

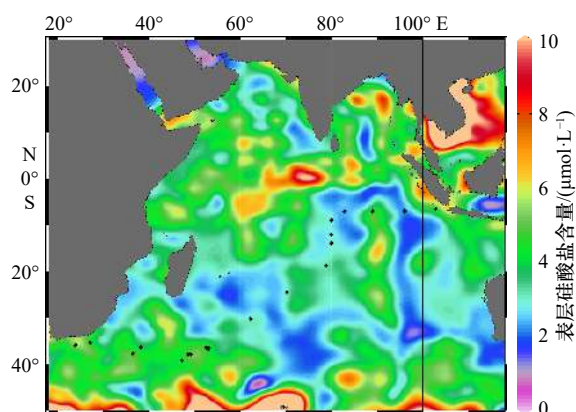


图5 印度洋硅同位素采样站位

Fig. 5 Sampling stations in the Indian Ocean

底图为表层硅酸盐含量的年平均平面分布(数据来自 WOA13, 采用 Ocean Data View 4.3 绘制)

The background map shows annual average dissolved silicate content in the surface water (data from WOA13, plot is generated using Ocean Data View 4.3)

之间的关系<sup>[122]</sup>。研究发现, 印度洋深层水  $\delta^{30}\text{Si}$  值和南大洋深层水(1.1‰~1.2‰)大体一致<sup>[22]</sup>, 在南大洋的印度洋部分的表层海水中, 其  $\delta^{30}\text{Si}$  值为 1.74‰~2.51‰<sup>[28]</sup>, 本文的分析结果与之接近。

印度洋表层海水的采样站位主要分布于印度洋南部的副热带环流区, 其北部受南赤道流和南赤道潜流的影响, 南部则受南极绕极流的影响(图6)。研究区表层海水  $\delta^{30}\text{Si}$  的最高值达到 2.30‰, 平均值为 1.52‰。由于南印度洋副热带环流作用, 将高纬度海

水引入到东印度洋, 使得东印度洋表层海水的  $\delta^{30}\text{Si}$  值变低。印度洋的上层环流存在着 3 个经向环流圈<sup>[29]</sup>, 其中两个没有跨过赤道, 一是在南印度洋副热带海域下沉, 在 5°~10°S 上升; 第二个的下沉区域与第一个相同, 但上升流位于爪哇、苏门答腊和澳大利亚西北部海域, 有时也在赤道东印度洋上升。上升流携带  $\delta^{30}\text{Si}$  值低的海水混合到表层海水中, 导致海水上升区域的  $\delta^{30}\text{Si}$  值偏低, 与本文的分析结果相符。因此推测, 印度洋经向翻转流对印度洋表层海水  $\delta^{30}\text{Si}$  值的分布起到了比较重要的作用。

### 3.3 大西洋表层溶解态硅同位素

大西洋表层海水硅同位素的采样站位示于图7, 大部分介于 10°N~30°S 之间。分析结果表明, 表层海水中溶解硅酸盐的  $\delta^{30}\text{Si}$  值在 0.90‰~2.23‰之间, 平均值为 (1.55±0.35)‰。大西洋中低纬度的营养盐主要来自南极中层水 (AAIW) 和亚南极模式水 (SAMW) 的向北扩散<sup>[30]</sup>, 而 AAIW 和 SAMW 的  $\delta^{30}\text{Si}$  值在 1.6‰~1.8‰之间<sup>[10, 24]</sup>。大西洋表层水体溶解硅酸盐的硅同位素研究目前相对较少, 主要是集中在对大西洋深层水的研究。大西洋深层水的  $\delta^{30}\text{Si}$  值 (1.5‰) 表现出保守性<sup>[23]</sup>, 主要是受北部的北大西洋深层水 (NADW,  $\delta^{30}\text{Si}$  值大于 1.7‰) 和南部的南极底层水 (AABW,  $\delta^{30}\text{Si}$  值约为 1.2‰) 混合作用的控制<sup>[23-24]</sup>。南大西洋表层  $\delta^{30}\text{Si}$  值为 1.42‰~1.85‰<sup>[28]</sup>, 与北向扩散的 AAIW 和 SAMW 的  $\delta^{30}\text{Si}$  值相似。

大西洋表层海水  $\delta^{30}\text{Si}$  值的分布主要表现为西南

① 付锋. 溶解硅同位素在大洋中的分布. 杭州: 自然资源部第二海洋研究所。

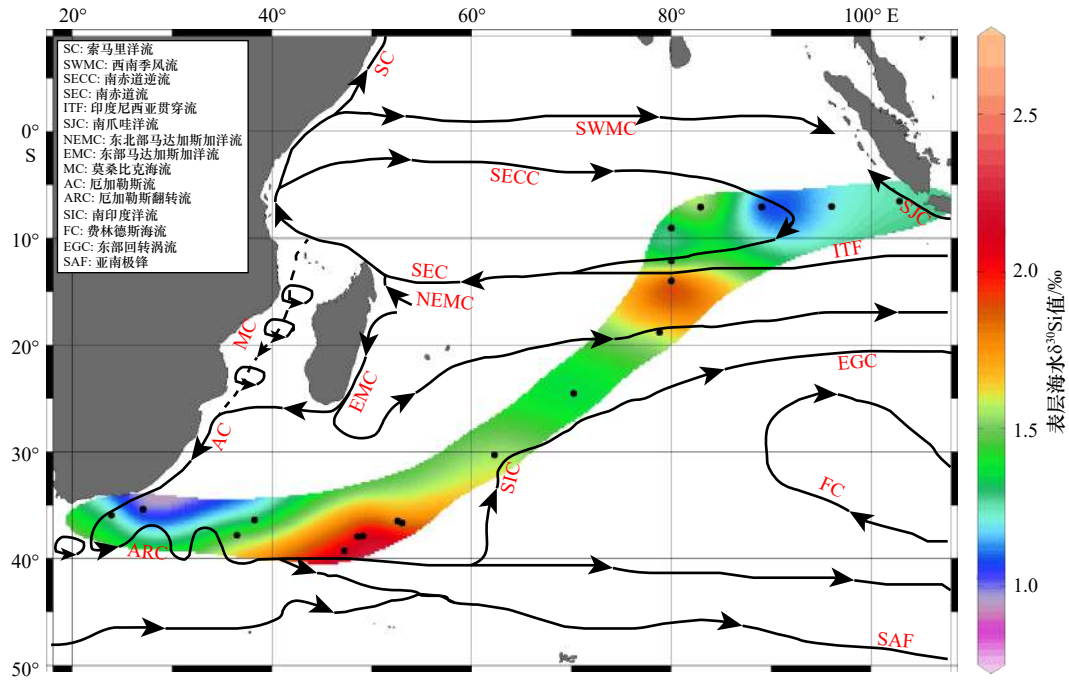


图6 印度洋表层海水 δ³⁰Si 值的平面分布

Fig. 6 δ³⁰Si distribution of dissolved silicate in the surface seawater of the Indian Ocean

表层环流引自文献 [27]

Surface currents from reference [27]

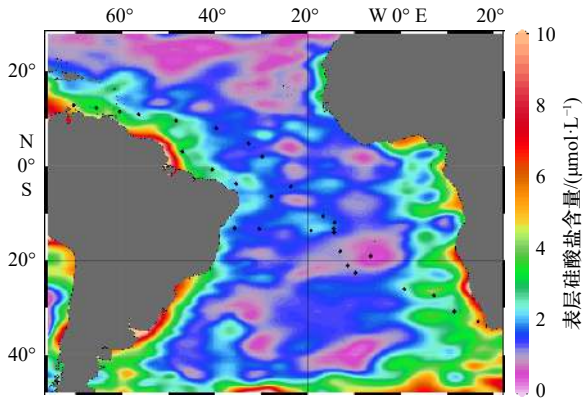


图7 大西洋硅同位素采样站位

Fig. 7 Sampling stations in the Atlantic Ocean

底图为表层硅酸盐含量的年平均平面分布(数据来自 WOA13, 采用 Ocean Data View 4.3 绘制)

The background map shows annual average dissolved silicate content in the surface water (data from WOA13, plot is generated using Ocean Data View 4.3)

大西洋的巴西海域 δ³⁰Si 值较高, 东南大西洋 δ³⁰Si 值较低(图 8)。大西洋中低纬度的表层海流较为复杂, 赤道附近的北赤道逆流(NECC)向东运动, 南赤道逆流( SECC)向西运动形成一个闭合回路。在巴西海域, 南赤道流分成两股暖流, 分别为向北运动的北巴西海流和向南运动的巴西海流。而位于南美洲东岸

南部的福克兰寒流, 当它通过合恩角后, 在阿根廷沿岸与巴西洋流发生交汇, 并继续向东运动。运动到非洲大陆的南端时, 其中的一部分海流向北转, 沿着南非西岸向北流, 即为本格拉寒流 (Benguela Current System, BCS), 最后汇入到南赤道流(SEC)中[27]。受南大西洋副热带环流的影响, 南大洋低 δ³⁰Si 值海水混入到南大洋东部, 以及本格拉寒流向北沿着非洲南部西岸往北运动, 导致在南大洋东部表层海水的 δ³⁰Si 值要低于西部。在赤道区域, 北大西洋的加那利寒流沿着非洲西部向赤道运动, 在塞内加尔转向西运动, 这也导致了在赤道大西洋东部海区的 δ³⁰Si 值要低于赤道大西洋西部海域。在巴西海域, 由于南大西洋环流分支和赤道流在该海区汇合, 导致在巴西海域附近的 δ³⁰Si 值升高。由于经向翻转流的存在, 南大西洋南部海水不断的向北运动, 使得在低纬度区域的 δ³⁰Si 值要高于高纬度区域。南大西洋则由于受源自南大洋富含硅酸盐的 AAIW/SAMW 的影响, 使得南大洋南端的 δ³⁰Si 值较低(图 8)。

### 4 结论

太平洋、印度洋和大西洋表层海水溶解硅酸盐 δ³⁰Si 的系统分析显示, 太平洋表层海水的 δ³⁰Si 最大值为 2.91‰, 平均值为 (1.52±0.59)‰; 印度洋表层海

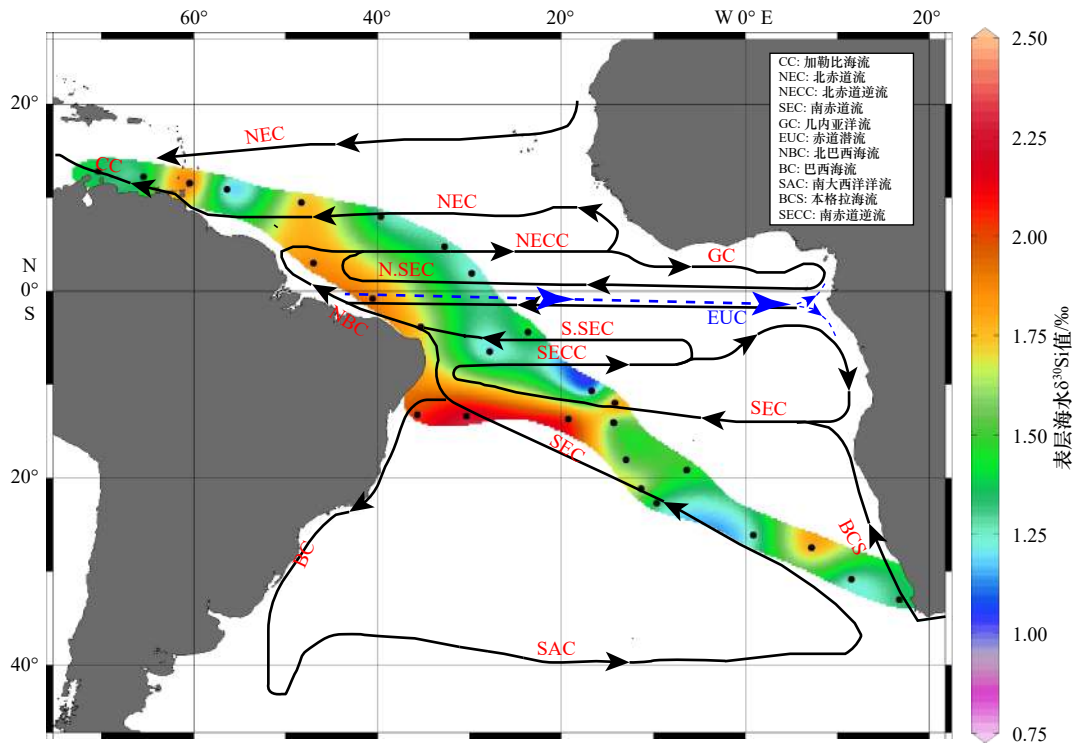


图 8 大西洋表层海水  $\delta^{30}\text{Si}$  值的平面分布

Fig. 8  $\delta^{30}\text{Si}$  distribution of dissolved silicate in the surface seawater of the Atlantic Ocean

表层环流引自文献 [27]

Surface currents from reference [27]

水的  $\delta^{30}\text{Si}$  最大值为 2.30‰, 平均值为  $(1.52 \pm 0.36)\%$ ; 大西洋表层海水的  $\delta^{30}\text{Si}$  值最大为 2.23‰, 其平均值为  $(1.55 \pm 0.35)\%$ 。硅同位素在各大洋表层, 主要表现出与大洋表层环流和经向翻转流的相关性, 分布特征受表层水体中的生物活动以及表层洋流运动导致的不同水团之间的混合的影响, 且混合作用可能对开放大洋表层水体的  $\delta^{30}\text{Si}$  分布具有显著的影响。但由于仅分析了表层水体溶解硅酸盐的  $\delta^{30}\text{Si}$  分布, 后续研

究中将对此进一步的深入研究。

**致谢:** 感谢“大洋一号”“海洋六号”调查船船长和船员以及调查队在现场调查和样品采集时所给予的帮助和支持! 感谢自然资源部第二海洋研究所的郑洋、林钟扬、王方国等同志在样品采集时的帮助和支持, 以及华东师范大学薛云同志所给予的样品分析测试的支持。

#### 参考文献:

- [1] Nelson D M, Tréguer 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 Biogeochemical Cycles*, 1995, 9(3): 359–372.
- [2] Tréguer P J, De La Rocha C L. The world ocean silica cycle[J]. *Annual Review of Marine Science*, 2013, 5: 477–501.
- [3] Brzezinski M A, Krause J W, Church M J, et al. The annual silica cycle of the North Pacific subtropical gyre[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2011, 58(10): 988–1001.
- [4] Grasse P, Ehlert C, Frank M. The influence of water mass mixing on the dissolved Si isotope composition in the Eastern Equatorial Pacific[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2013, 380: 60–71.
- [5] De La Rocha C L, Brzezinski M A, DeNiro M J. Fractionation of silicon isotopes by marine diatoms during biogenic silica formation[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1997, 61(23): 5051–5056.
- [6] Wetzel F, De Souza G F, Reynolds B C. What controls silicon isotope fractionation during dissolution of diatom opal?[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2014, 131: 128–137.
- [7] De Souza G F, Slater R D, Dunne J P, et al. Deconvolving the controls on the deep ocean's silicon stable isotope distribution[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2014, 398: 66–76.
- [8] Cardinal D, Alleman L Y, Dehairs F, et al. Relevance of silicon isotopes to Si-nutrient utilization and Si-source assessment in Antarctic

- waters[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2005, 19(2): GB2007.
- [9] De Brauwere A, Fripiat F, Cardinal D, et al. Isotopic model of oceanic silicon cycling: the Kerguelen Plateau case study[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2012, 70: 42–59.
- [10] De Souza G F, Reynolds B C, Johnson G C, et al. Silicon stable isotope distribution traces Southern Ocean export of Si to the eastern South Pacific thermocline[J]. *Biogeosciences*, 2012, 9(11): 4199–4213.
- [11] Coffineau N, Pondaven P. Exploring interacting influences on the silicon isotopic composition of the surface ocean: a case study from the Kerguelen Plateau[J]. *Biogeosciences*, 2014, 11(5): 1371–1391.
- [12] Annett A L, Henley S F, Venables H J, et al. Silica cycling and isotopic composition in northern Marguerite Bay on the rapidly-warming western Antarctic Peninsula[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2017, 139: 132–142.
- [13] Cassarino L, Hendry K R, Meredith M P, et al. Silicon isotope and silicic acid uptake in surface waters of Marguerite Bay, West Antarctic Peninsula[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2017, 139: 143–150.
- [14] Cao Zhimian, Frank M, Dai Minhan, et al. Silicon isotope constraints on sources and utilization of silicic acid in the northern South China Sea[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2012, 97: 88–104.
- [15] Cao Zhimian, Frank M, Dai Minhan. Dissolved silicon isotopic compositions in the East China Sea: Water mass mixing vs. biological fractionation[J]. *Limnology and Oceanography*, 2015, 60(5): 1619–1633.
- [16] Zhang A Y, Zhang J, Hu J, et al. Silicon isotopic chemistry in the Changjiang Estuary and coastal regions: impacts of physical and biogeochemical processes on the transport of riverine dissolved silica[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2015, 120(10): 6943–6957.
- [17] Beucher C P, Brzezinski M A, Jones J L. Sources and biological fractionation of Silicon isotopes in the Eastern Equatorial Pacific[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2008, 72(13): 3063–3073.
- [18] Beucher C P, Brzezinski M A, Jones J L. Mechanisms controlling silicon isotope distribution in the Eastern Equatorial Pacific[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2011, 75(15): 4286–4294.
- [19] De La Rocha C L, Brzezinski M A, DeNiro M J. A first look at the distribution of the stable isotopes of silicon in natural waters[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, 64(14): 2467–2477.
- [20] Reynolds B C, Frank M, Halliday A N. Silicon isotope fractionation during nutrient utilization in the North Pacific[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 244(1/2): 431–443.
- [21] Grasse P, Brzezinski M A, Cardinal D, et al. GEOTRACES inter-calibration of the stable silicon isotope composition of dissolved silicic acid in seawater[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2017, 32(3): 562–578.
- [22] Holzer M, Brzezinski M A. Controls on the silicon isotope distribution in the ocean: new diagnostics from a data-constrained model[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2015, 29(3): 267–287.
- [23] Brzezinski M A, Jones J L. Coupling of the distribution of silicon isotopes to the meridional overturning circulation of the North Atlantic Ocean[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2015, 116: 79–88.
- [24] De Souza G F, Reynolds B C, Rickli J, et al. Southern Ocean control of silicon stable isotope distribution in the deep Atlantic Ocean[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2012, 26(2): GB2035.
- [25] 刘洪伟. 北太平洋经向翻转环流的结构特征与变异机理研究[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2013.  
Liu Hongwei. Study on the structure property and variation mechanism of the North Pacific meridional overturning circulation[D]. Qingdao: Institution of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2013.
- [26] 刘伟, 宋金明, 袁华茂, 等. 黑潮化学物质输入东海的途径与通量[J]. *地球科学进展*, 2015, 30(8): 904–914.  
Liu Wei, Song Jinming, Yuan Huamao, et al. Pathway and flux of inputting chemical substances from the Kuroshio to the East China Sea[J]. *Advances in Earth Science*, 2015, 30(8): 904–914.
- [27] Talley L D, Pickard G E, Emery W J, et al. *Descriptive Physical Oceanography: An Introduction*[M]. 6th ed. Burlington, MA: Elsevier, 2011: 560.
- [28] De La Rocha C L, Bescont P, Croguennoc A, et al. The silicon isotopic composition of surface waters in the Atlantic and Indian sectors of the Southern Ocean[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2011, 75(18): 5283–5295.
- [29] 胡瑞金, 刘秦玉, 武术. 北印度洋越赤道经向翻转环流的年际变化[J]. *中国海洋大学学报*, 2005, 35(5): 697–702.  
Hu Ruijin, Liu Qinyu, Wu Shu. Study on the Interannual variability of the cross equatorial meridional overturning circulation in the north Indian Ocean[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2005, 35(5): 697–702.
- [30] Griffiths J D, Barker S, Hendry K R, et al. Evidence of silicic acid leakage to the tropical Atlantic via Antarctic Intermediate Water during Marine Isotope Stage 4[J]. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 2013, 28(2): 307–318.

## Distributions of silicon isotopes of dissolved silicate in the surface seawater from global oceans

Ni Jianyu<sup>1</sup>, Fu Feng<sup>1</sup>, Wang Yuan<sup>1</sup>, Yao Xuying<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Submarine Geosciences, Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, China)

**Abstract:** We analyzed  $\delta^{30}\text{Si}$  of dissolved silicate of surface seawater from the Pacific Ocean, Indian Ocean and Atlantic Ocean. The results showed that the  $\delta^{30}\text{Si}$  of the Pacific Ocean surface seawater was 0.45‰–2.91‰, with an average value of  $(1.52\pm 0.59)\%$ ; the  $\delta^{30}\text{Si}$  of the Indian Ocean surface seawater was 0.98‰–2.30‰, with an average value of  $(1.52\pm 0.36)\%$ ; the  $\delta^{30}\text{Si}$  value of the Atlantic Ocean surface seawater was 0.90‰–2.23‰, the average value was  $(1.55\pm 0.35)\%$ . The silicon isotope in the ocean surface layer mainly shows the correlation with the ocean surface circulation and meridional overturning current, and its distribution characteristics are mainly affected by the biological activities in the surface water and the mixing between different water masses caused by the movement of the surface ocean currents. The mixing effect perhaps has a significant effect on the distribution of  $\delta^{30}\text{Si}$  in the surface water of the open oceans.

**Key words:**  $\delta^{30}\text{Si}$ ; surface seawater; dissolved silicate; global oceans