

夏志颖, 冉莉华, Martin G Wiesner, 等. 1991 年皮纳图博火山灰沉降物对南海海洋环境及硅藻生长的影响 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2022, 42(2): 28-35.

XIA Zhiying, RAN Lihua, MARTIN G Wiesner, et al. Impact of ash precipitation on marine environments and diatoms: A case of 1991 from the Pinatubo volcano in the South China Sea[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2022, 42(2): 28-35.

1991 年皮纳图博火山灰沉降物对南海海洋环境及硅藻生长的影响

夏志颖^{1,2}, 冉莉华^{2,3,4}, Martin G Wiesner^{3,5}, 梁宇钊², 任健², 李冬玲¹

1. 宁波大学地理与空间信息技术系, 宁波 315211

2. 自然资源部海洋生态系统动力学重点实验室, 自然资源部第二海洋研究所, 杭州 310012

3. 卫星海洋环境动力学国家重点实验室, 自然资源部第二海洋研究所, 杭州 310012

4. 南方海洋科学与工程广东实验室, 珠海 519000

5. 德国汉堡大学, 海洋生物地球化学和海洋化学研究所, 汉堡 D-20146

摘要:通过对菲律宾皮纳图博 (Pinatubo) 火山 1991 年 6 月爆发前后南海表层沉积物及沉降颗粒物中的硅藻丰度及群落组成进行分析, 试图揭示皮纳图博火山爆发对南海硅藻生长的影响。研究发现, 火山爆发后南海沉积物中硅藻相对丰度显著减少, 原因主要在于皮纳图博火山喷发物大量沉积于南海深海, 显著提高了南海沉积速率, 同时稀释了沉积物中生源物质的含量。进一步对火山爆发前后同期南海中部深海沉降颗粒物开展研究发现, 火山爆发次年同期沉降颗粒物总通量以及生物硅通量明显增加, 而硅藻及其他硅质生物相对丰度和通量均显著降低, 其中硅藻相对丰度从 2.20×10^8 枚 $\cdot g^{-1}$ 降到 5.48×10^7 枚 $\cdot g^{-1}$, 通量从 2.90×10^7 枚 $\cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ 降到 8.57×10^6 枚 $\cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ 。1 年后的南海中部深海沉降颗粒物中仍然有大量火山玻璃的存在, 可能是导致湿化学法测量生物硅含量明显增加的主要原因, 而硅藻乃至所有硅质生物通量及丰度的显著降低可能与火山灰沉降的负面影响有关, 也可能与 1991 年厄尔尼诺对南海海洋环境的影响有关。总之, 1991 年 6 月皮纳图博火山爆发后南海的沉积物硅藻及沉降颗粒物硅藻丰度都出现了显著降低, 但具体的环境调控机制仍有待进一步深入研究。

关键词:皮纳图博火山; 火山灰; 硅藻; 生物硅; 南海

中图分类号: P76

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2021051402

Impact of ash precipitation on marine environments and diatoms: A case of 1991 from the Pinatubo volcano in the South China Sea

XIA Zhiying^{1,2}, RAN Lihua^{2,3,4}, MARTIN G Wiesner^{3,5}, LIANG Yuzhao², REN Jian², LI Dongling¹

1. Department of Geography and Spatial Information Techniques, Ningbo University, Ningbo 315211, China

2. Key Laboratory of Marine Ecosystem Dynamics, Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, China

3. State Key Laboratory of Satellite Ocean Environment Dynamics, Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, China

4. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory, Zhuhai 519000, China

5. Institute of Geology, University of Hamburg, D-20146 Hamburg, Germany

Abstract: The abundance and species composition of diatoms and sinking particles in the surface sediments of the South China Sea (SCS) before and after the 1991 eruption of Pinatubo volcano are analyzed in this work, in order to better reveal the impact of ash precipitation on marine diatoms. It is found that the precipitation of volcanic ash apparently increases the sedimentation rate, and dilutes the other components of the surface sediments, as the result, the relative abundance of diatoms in the surface sediments is significantly decreased. The records of sinking particles further suggest that the ash precipitation has a long-term effect to the sea environment. Both the total sinking particle flux and biogenic silica (BSi) flux in the deep water of central SCS increased substantially one year after the eruption, as the relative abundance and flux of diatoms and other siliceous organisms decreased significantly. The relative abundance decreased from 2.20×10^8 to 5.48×10^7 individuals g^{-1} , and

资助项目:国家重点基础研究发展计划项目“海洋微生物碳泵与生物泵的互作过程与储碳机制”(2016YFA0601101); 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海)创新团队建设科研项目(SML311019006/311020006)

作者简介:夏志颖(1997—), 男, 硕士研究生, 从事海洋生物地球化学研究, E-mail: diatomxzy@163.com

通讯作者:冉莉华(1982—), 女, 博士, 副研究员, 从事海洋微体古生物学研究, E-mail: lihuaran@sio.org.cn

收稿日期:2021-05-14; **改回日期:**2021-10-24. 蔡秋蓉编辑

the flux of diatoms decreased from 2.90×10^7 to 8.57×10^6 individuals $\text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$. The apparent decrease in siliceous organism fluxes is attributed to the depressed productivity in the central SCS, that might be related to Pinatubo ash falling, or the impact of the El Niño in 1991. On the other hand, the increase in “BSi” flux one year after the eruption is more likely resulted from the dissolution of volcanic glass during measurement of BSi in the lab, but not from the increase of biogenic siliceous organism frustules or skeletons. It is found that there is a large amount of volcanic glass in the sinking particles. Further works are necessary to clarify the change in the BSi flux before and after the Pinatubo eruption, the decrease of siliceous organisms, and the impact of volcanic eruption on biogeochemistry and sedimentation dynamics in the SCS.

Key words: Pinatubo volcano; volcanic ash; diatom; biogenic silica; South China Sea

火山爆发是地球上常见的地质灾害之一, 广义上的火山灰泛指火山爆发过程中喷向大气中的火成碎屑物质的总称, 而狭义上则指直径 $< 2 \text{ mm}$ 的细粒岩浆源碎屑, 其主要成分包括岩石、矿物和火山玻璃碎片, 含有 S、Fe、Si、Ca 等多种元素^[1-2]。火山爆发喷出的巨量火山灰进入大气和海洋, 会通过刺激浮游植物的生长^[3-4], 改变浮游生物沉降过程及海底沉积环境^[5-6], 对其临近海域生态系统和海洋生物地球化学过程产生重要影响^[6]。

硅藻是海洋浮游植物的重要类群, 海洋初级生产力最重要的组成成分, 在海洋生态系统中起着举足轻重的作用^[7-8]。硅藻的生长繁殖对海洋环境变化反应非常灵敏, 受海水温度、盐度、水深、营养盐等环境因素的影响^[9], 其数量、种类及种群结构都会出现明显的差异, 进而影响整个海洋生态系统。火山灰沉降对于海洋环境的影响是显而易见的, 然而作为海洋生态系统的基础、海洋初级生产力的主要贡献者的硅藻对于火山灰沉降引起的海水环境变化的响应到目前为止尚不太明确。

1991 年 6 月 15 日菲律宾皮纳图博火山喷发是 20 世纪最大的火山喷发事件之一, 其喷发后的火山灰横跨南海中部, 影响面积达 $4 \times 10^5 \text{ km}^2$ ^[10-11]。根据斯密森研究所对火山爆发强度指数 (volcanic explosivity index, VEI) 的划分标准^[12], 1991 年皮纳图博火山爆发指数为 6 级, 该指数由 0 到 8 逐级递增, 每增加一级意味着火山爆发强度增加十倍。研究指出, 1991 年皮纳图博火山爆发将 5 km^3 的火山灰喷射到高空, 其中包含约 3 Mt 的 Cl、42 Mt 的 CO_2 、17 Mt 的 SO_2 以及大量其他气体^[13]。Martin 等通过显微镜观察发现, 皮纳图博火山喷发的火山灰主要成分是浮石和玻璃 (74%), 其次是斜长石 (15%) 和角闪石 (9%), 黑云母、石英、镁铁闪石等仅占 2%。在火山玻璃、斜长石、角闪石和镁铁闪石中检测出大量 Si、Al、Fe、Mg 等元素^[10]。如此巨量的火山灰输入南海, 必然在一定程度上改变南海海洋环境, 进而对南海海洋硅藻群落乃至整个生态系统产生强烈影响。

本文拟通过对皮纳图博火山爆发前后南海东部的沉积物及南海中部沉降颗粒物中的硅藻丰度、通量及群落组成的研究, 结合火山爆发前后南海中部沉降颗粒物总通量及生物硅等主要组分通量数据, 以及其他硅质生物分析结果, 探讨皮纳图博火山灰的输入对南海海洋硅藻可能造成的影响。

1 区域背景

南海位于亚洲大陆、菲律宾群岛、婆罗洲和印度尼西亚之间, 通过吕宋海峡与西太平洋相连, 是世界最大的半封闭型边缘海之一。南海位处低纬东亚季风影响范围, 在季风系统以及半封闭地形的影响下, 南海的气候以及海洋环流模式存在季节性反转, 并在吕宋岛西北部、越南岸外及南部近巽他陆架等海域形成了季节性上升流系统, 对南海上层水体及生态环境造成强烈的影响^[14-17]。虽然有季节性上升流的影响, 但在南海东中部海盆区因为上层水体层化较强, 混合层深度较浅, 仍然是典型的寡营养海域^[18]。如图 1 所示, 1991 年皮纳图博火山灰沉降的主要影响区在南海东部和中部, 巨量火山灰的输入很可能对南海海盆区海洋环境及生态系统造成重要影响。

2 材料与方法

本研究所用沉积物样品来自 1996 年 11—12 月太阳号 (R/V-Sonne) 114 航次在南海采集的 6 个箱式沉积物插管样品 (图 1, 表 1), 沉降颗粒物样品来源于 1991 年 4—5 月和 1992 年 4—5 月布放在南海中部 SCS-C 站 3 730 m 水深处 (图 1, 表 1) 的时间序列沉积物捕获器所回收样品。

1991 年 6 月 15 日皮纳图博火山爆发喷发出的火山灰迅速填满了当时正布放于 SCS-C 站的沉积物捕获器集样漏斗, 并逐步填满后续的采样瓶直至 1992 年 5 月捕获器回收, 因此, 我们无法获得火山爆发后短时间内的沉降颗粒物样品。为排除南海

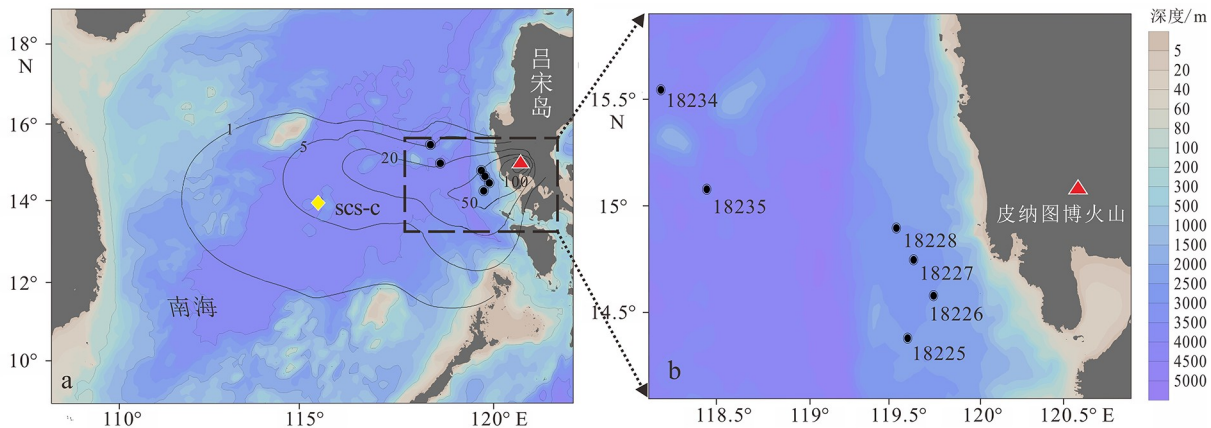


图 1 皮纳图博火山灰沉积范围及研究站位示意图
a. 火山灰影响范围及沉积厚度等值线图, 黑色等值线表示皮纳图博火山灰沉积层厚度 (mm), 黄色菱形表示南海中部沉积物捕获器锚系站位 (SCS-C)^[1]; b. 本文研究的南海东部箱式沉积物站位示意图。

Fig.1 The distribution of Pinatubo volcano ash deposit and site locations in this work

a. Distribution map of the Pinatubo volcano ash deposited in the SCS, the black contours represent variation of Pinatubo ash thickness (mm)^[1], and the yellow diamond represents the site location of the sediment trap mooring; b. Sites location of the box-core sediment samples studied in this work .

表 1 本研究所采用的箱式沉积物及沉积物捕获器
站位信息

Table 1 Basic information of box core and sediment trap
mooring stations

站位号	纬度	经度	水深/m
18225	14°23.0'	119°36.0'	2 511
18226	14°35.1'	119°45.1'	2 510
18227	14°45.8'	119°38.4'	2 576
18228	14°54.7'	119°32.3'	2 513
18234	15°33.9'	118°10.8'	3 686
18235	15°05.3'	118°26.7'	3 943
SCS-C	14°60.0'	115°10.0'	3 730

本身海洋环境及生态系统的季节变化, 我们选择了皮纳图博火山爆发前一个月 (1991 年 5 月) 和 1992 年同一月份的沉降颗粒物样品进行对比分析。

沉积物捕获器样品总通量以及颗粒物其他主要组分, 如有机质、CaCO₃、生物硅和陆源物质等的通量分析和计算方法具体见 Li 等^[19]。其中, 生物硅含量的测定采用碱化学单点提取法分析获得^[20]。硅藻样品处理和制片流程以 Ran 等的方法为主要依据, 在装有沉积物或沉降颗粒物样品的试管中加入浓度为 10% 的稀盐酸和浓度为 30% 的双氧水用以除去钙质和有机质, 等待完全反应后, 加入适量去离子水混匀静置 24 h。之后, 利用虹吸法去除上清液, 重复 3 次清洗过程以达到去除残余的稀盐酸和双氧水的目的, 充分混合样品溶液轻轻倒入事先

固定好的 2 个 24 mm×24 mm 盖玻片的培养皿中。静置 24 h 后, 用纸巾吸出培养皿中的上清液。当培养皿中的样品完全干燥后, 将盖玻片转移到做好标记的载玻片上, 用 Naphrax 胶 ($d=1.72$) 固定。最后在 1000 倍的 Leica DM 6000 油镜下进行硅藻计数和鉴定, 硅藻计数至少 300 枚, 不足 300 枚的样品进行全片统计^[21]。此外, 也利用 Motic 410 显微镜在 400 倍镜下对沉降颗粒物中硅鞭藻、海绵骨针及放射虫等硅质生物壳体也进行了数量统计。

硅藻相对丰度和沉降颗粒物中硅藻通量的计算公式如下:

$$r = \frac{N \times A \times 1000}{n \times a \times m}$$

$$f = \frac{N \times A \times F}{n \times a \times m}$$

式中, r 是相对丰度 (枚·g⁻¹); f 是硅藻通量 (枚·m⁻²·d⁻¹); N 是显微镜下计数的硅藻数量; A 是培养皿的面积; F 是颗粒物总通量 (mg·m⁻²·d⁻¹); n 为显微镜下硅藻计数的视野数; a 为显微镜视域的面积; m 为硅藻分析所用样品的质量 (mg)。其他硅质生物丰度和通量计算参考硅藻丰度和通量计算方法。

3 结果

3.1 皮纳图博火山爆发前后南海东部沉积物中硅藻丰度的变化

在本文研究的箱式沉积物柱样中, 除 18234 站

位外, 其他站位均可见明显的灰白色火山灰层, 由上到下粒径逐渐变粗, 与上覆粉砂或黏土质为主的沉积层差异明显(图 2)。不同站位火山灰层厚度与其所处位置和皮纳图博火山之间的空间距离成反比, 其中, 离皮纳图博火山最近的 18227 站和 18228 站火山灰层厚约为 70 和 65 mm, 离皮纳图博火山较远的 18235 站火山灰层厚仅约 5 mm。

如图 2 所示, 1991 年皮纳图博火山爆发前后南海东部海域沉积物中硅藻相对丰度存在显著差异, 火山爆发后所有站位的沉积硅藻丰度较爆发前均明显减少。其中, 以 18226 站位的沉积硅藻丰度变化最大, 该站位火山灰层以下的沉积硅藻丰度约为 6.04×10^6 枚 $\cdot g^{-1}$, 火山灰层以上的沉积物硅藻丰度仅

为 1.15×10^5 枚 $\cdot g^{-1}$, 前后相差 50 余倍, 其他站位硅藻丰度也相差几倍到十几倍。

3.2 皮纳图博火山爆发前后南海中部沉降颗粒物总通量、主要成分、硅藻及其他硅质生物的变化

皮纳图博火山爆发前 1991 年 5 月南海中部海盆 SCS-C 站 3 730 m 水深的沉降颗粒物总通量为 $132 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, 而次年同一月份颗粒物通量增加到 $156.37 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ (图 3a)。颗粒物通量增长的主要原因是生物硅和岩源物质通量的显著提高, 其中生物硅通量从 $26.53 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 增加至 $51.49 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, 其含量增加了 12%, 与之相反, 碳酸钙的通量和含量都明显减少。

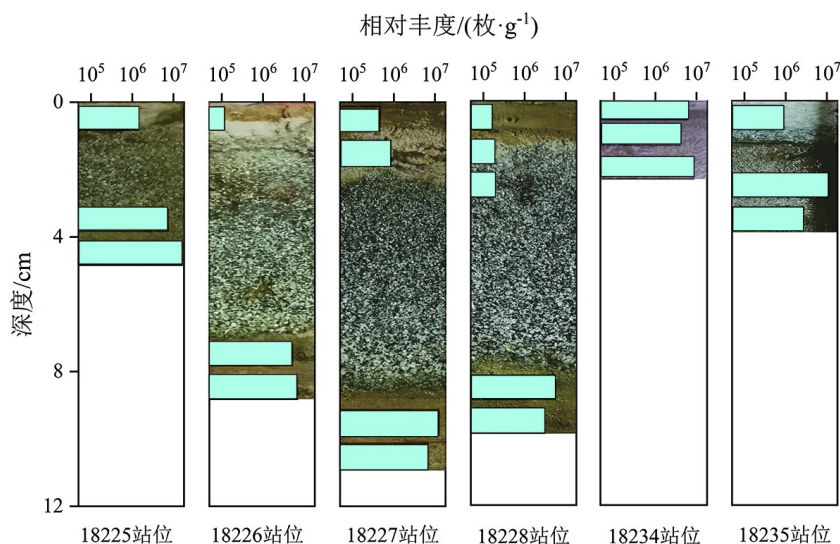


图 2 研究站位沉积剖面及火山爆发前后沉积硅藻相对丰度
横轴为对数刻度。

Fig.2 Sedimentary profile of the sediment cores and relative abundance of sediment diatoms before and after the volcanic eruption

The horizontal axis is logarithmic scale.

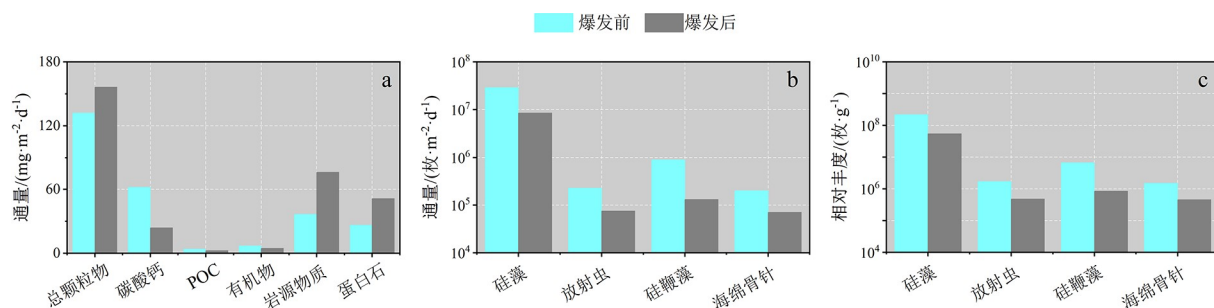


图 3 火山爆发前 (1991 年 5 月) 和爆发后 (1992 年 5 月) 南海中部 SCS-N 站沉降颗粒物总通量及主要成分通量、硅质生物通量及硅质生物丰度变化

a. 沉降颗粒物总通量及主要成分通量, b. 不同硅质生物通量变化, c. 不同硅质生物相对丰度变化, 其中 b 和 c 的纵轴为对数刻度。

Fig.3 Sinking flux of total particulate matter, main components, flux and relative abundance of diatoms and other siliceous organisms in the central SCS before (May 1991) and after (May 1991) Pinatubo eruption

a. Sinking flux of total particulate matter and main components; b. flux diatoms and other siliceous organisms; c. relative abundance of diatoms and other siliceous organisms. The vertical axes of (b) and (c) are on a logarithmic scale.

1992 年 5 月沉积物捕获器中硅藻通量为 8.57×10^6 枚· $\text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, 相对丰度为 5.48×10^7 枚· g^{-1} , 较之火山爆发前同期的硅藻通量和相对丰度 (2.90×10^7 枚· $\text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, 2.20×10^8 枚· g^{-1}) 都有显著降低。与硅藻相同, 同为生物硅(无定形二氧化硅水合物 ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$)) 主要贡献者的其他硅质生物, 包括放射虫、硅鞭藻、海绵骨针等^[22] 的通量和相对丰度也都出现了明显的下降。

3.3 皮纳图博火山爆发前后南海沉降颗粒物中硅藻属种的变化

在本研究的南海箱式沉积物柱样和沉降颗粒物样品中, 主要的硅藻种类有 *Azpietia nodulifera*、*Cyclotella striata*、*Fragilariopsis doliolu*、*Nizschia interruptestriata*、*Nizschia marina*、*Rhizosolenia bergonaii*、*Roperia tesslata*、*Thalassiosira excentrica*、*Thalassiosira oestrupi*、*Thalassionema nitzschioides*、*Fragilaria berolinensis*、*Nizschia bicaipitata*、*Nizschia braarudii*、*Nizschia fustulum*、*Nizschia solita* 等。考虑到箱式沉积物插管样品取样分辨率 (1 cm) 较低, 火山灰上覆沉积物样品是 1991 年皮纳图博火山爆发至 1996 年箱式采样期间 5 年内的累积结果, 火山灰以下 1 cm 厚度的沉积物样品可能代表了百年尺度累积沉积物, 过去几百年来全球气候变化很有可能已经对南海海洋环境及其海洋硅藻属种结构产生了影响^[23-24], 因此, 我们在探讨皮纳图博火山爆发前后南海硅藻属种组成变化时, 主要考虑 SCS-C 站沉积物捕获器中硅藻属种分析结果。

如图 4 所示, 无论是皮纳图博火山爆发前 (1991 年 5 月) 还是爆发后的次年同期 (1992 年 5 月) 采集的南海中部沉降颗粒物中菱形藻都占有绝对优势, 其中包括众多细胞个体较小 (纵轴 $\leq 20 \mu\text{m}$) 的菱形藻种, 如 *Nizschia bicaipitata*、*Nizschia fustulum* 等。除此之外, *Thalassionema nitzschioides* 及其变种 (var. *parva*, var. *inflata* 等) *Thalassiosira* spp.、*Fragilaria* spp.、*Coscinodiscus* spp. 等含量也相对较高。与火山爆发前的 5 月相比, 火山爆发后的次年同期收集的沉降颗粒物中硅藻属种组合确实存在一定的变化, 但主要体现在菱形藻属内部种类变化上, 其他硅藻种类变化不明显。其中, 变化最为明显的是 *Nizschia bicaipitata*、*Nizschia fustulum* 等小型菱形藻, 其相对含量明显降低, 其他个体相对较大的菱形藻 (包括拟菱形藻) 的百分含量则显著提高。

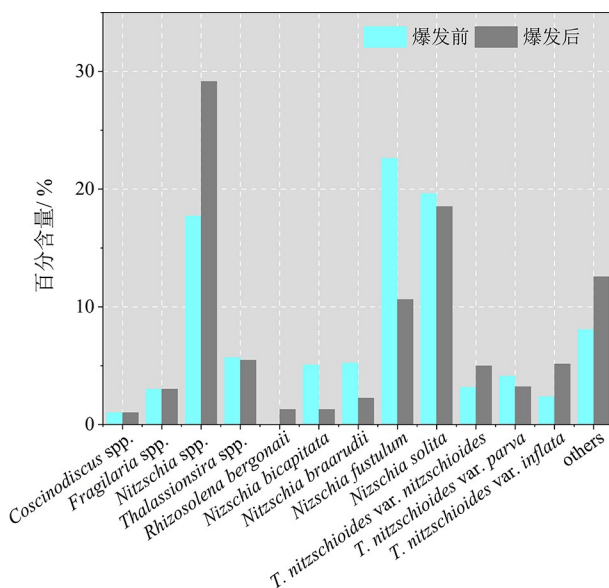


图 4 皮纳图博火山爆发前后沉降颗粒物中硅藻属种百分含量的变化

Fig.4 Changes in relative abundance of diatom species or groups in the sinking particles before and after the eruption of Mount Pinatubo

4 讨论

4.1 皮纳图博火山爆发对南海深海海洋环境的影响分析

从我们的研究结果可以看出, 1991 年皮纳图博火山爆发后的南海沉积物及沉降颗粒物中硅藻丰度都显著降低。与此同时, 我们通过电镜观察发现火山爆发后的沉积物及沉降颗粒物中含有明显的火山玻璃和浮石等火山碎屑物 (图 5), 而火山爆发前沉降颗粒物则以生源颗粒物为主。由此可知, 沉积物和沉降颗粒物中硅藻丰度的显著降低很可能是由于火山灰沉积对生源物质的稀释作用所致。

Wiesner 等^[11] 基于多个航次调查结果和沉积物捕获器收集的沉积颗粒物通量, 统计了皮纳图博火山爆发后南海不同海域沉积物中火山灰层的厚度, 指出皮纳图博火山喷发物导致了随后几年南海表层沉积物沉积速率的显著提高。如图 2 所示, 除火山灰沉积分界不清晰的 18234 站外, 其余站位火山灰上覆沉积物厚度虽然存在一定差异, 但基本都在约 1 cm。考虑到箱式取样过程中表层沉积物可能存在一定损失, 可以推算火山爆发后 1991—1996 年的 5 年间, 南海东部靠近菲律宾海域年平均沉积速率 $\leq 0.2 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$, 该沉积速率显著高于前人通过柱状沉积物 ^{14}C 以及 ^{210}Pb 同位素测定结果计算获得的

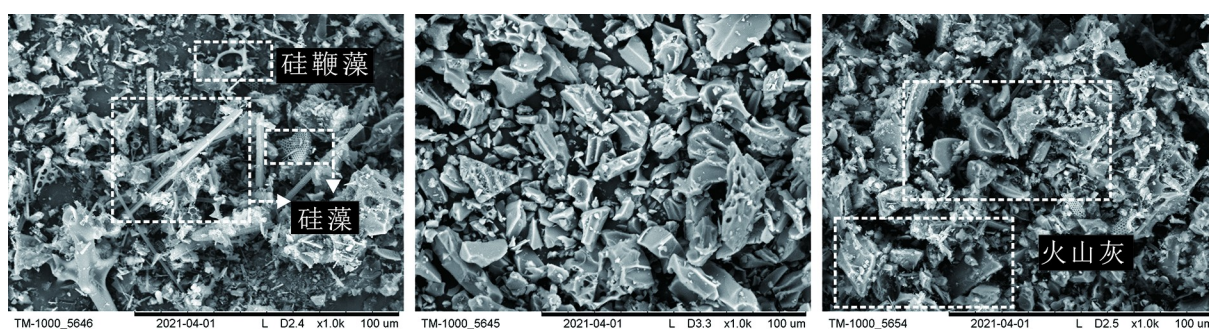


图 5 1991 年 5 月 (左)、1991 年 7 月 (中)、1992 年 5 月 (右) 南海中部沉降颗粒物扫描电子显微照片
Fig.5 Scanning electron micrographs of sinking particulate matter collected in the central SCS in May 1991 (left), July 1991 (middle), and May 1992 (right)

南海海盆区晚更新世以来的沉积速率 ($0.003 \sim 0.005 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$)^[25-26], 表明 Pinatubo 火山灰输入确实在短时间内迅速提高了南海东部沉积速率。

另一方面, 火山爆发一年后 (1992 年 5 月) 南海中部沉降颗粒物生物硅通量和含量出现了明显的增加, 与同时期硅藻及其他硅质生物通量和丰度都显著降低存在矛盾。显微镜观察结果表明, 火山爆发前后沉降颗粒物中硅藻及其他硅质生物的个体大小整体上并没有发生明显变化。由此可知, 生物硅沉降通量和含量的增加并非由硅质生物增加所致。根据 Wisner 等^[10]的研究结果, 1991 年 SCS-C 站沉积物捕获器中收集到的 Pinatubo 火山灰沉积中以浮石和火山灰为主, 其中二氧化硅含量 $>77\%$ 。实验室分析结果表明, 利用强碱提取沉积物生物硅的方法会导致火山灰沉积中硅的溶出 (Wiesner 等, 未发表数据)。因此, 1992 年 5 月南海中部沉降颗粒物中所有硅质生物含量和通量都显著减少, 而生物硅含量和通量却显著增加的主要原因, 应该是沉积物捕获器中火山灰残留物质尤其是火山玻璃等硅质矿物在强碱的作用下溶解, 生物硅含量被高估所致。

综上所述, 皮纳图博火山爆发后, 其火山灰沉降物在南海海底有一个长期持续的沉积或再沉积过程, 不仅造成其影响海域沉积速率的显著提高, 而且影响南海深部沉积动力环境。另一方面, 这些火山灰在南海深海还可能存在一个持续溶出过程, 并可能对南海深海硅循环乃至整个生物地球化学过程都产生持续影响。

4.2 皮纳图博火山爆发对南海硅藻生长的潜在影响分析

研究发现, 火山爆发后同期采集的沉降颗粒物中硅藻绝对通量明显低于火山爆发前, 这可能反映

了火山爆发后次年硅藻生产力有所降低。硅藻属种分析结果表明, 火山爆发前后的沉降颗粒物中变化最为明显的是 *N. bicaipitata*、*N. fustulum* 等小型菱形藻的相对含量明显降低, 而其他个体相对较大的菱形藻 (包括拟菱形藻) 的百分含量则显著提高。根据 Ran 等^[21]研究, 小型菱形藻相对含量与硅藻总通量和南海上层海洋初级生产力有明显正相关关系, 因此, 火山爆发次年 5 月沉降颗粒物中小型菱形藻相对含量的明显下降, 表明当年春季南海硅藻生产力可能有所降低。此外, 有机碳、碳酸钙及其他硅质生物通量都明显降低, 都反映了上层海洋初级生产力有所降低。

前人研究普遍认为, 火山爆发产生的火山灰进入寡营养盐海域后, 经海水溶解释放出的 P、Fe、Mn 等营养物质和微量金属元素会促进浮游植物大规模的生长^[27-28], 从而提高海洋初级生产力^[3-4]。例如, Mélançon 等^[29]对照试验发现, 添加火山灰的实验组固碳率和叶绿素浓度提升明显, 实验后期部分硅藻在浮游植物群落结构中占到主导地位, 表明火山灰提供的营养物质可以促进以硅藻为主的浮游植物生长^[30]。但另有研究也指出, 火山灰在接触海水后, 容易在海面上形成大面积的浮石区域, 加上火山灰内一些不可溶的物质悬浮在上层海洋, 可能导致真光层辐射光强度减弱, 影响真光层浮游植物的光合作用^[28-31]。还有研究认为火山灰溶解会导致海水 pH 下降, 海水酸化则会增强火山灰中 Cd、Cu、Pb 以及氟化物 (如氟化铝) 等多种有毒元素^[3, 32-33]的释放, 从而对海洋生态系统造成压力^[34]。由于缺少皮纳图博火山灰微量元素的研究结果, 以及火山爆发后短时期内沉降颗粒物样品的缺失, 我们虽然发现火山爆发后次年同期的硅藻生产力有所降低, 但这是否与皮纳图博火山爆发有直接联系尚无定论。

此外需要注意的是, 1991—1992 年是厄尔尼诺

影响年份^[35-36],前人大量的研究指出,厄尔尼诺事件会导致东亚季风强度减弱,厄尔尼诺发生几个月后南海表层海水温度增加,海水层化加强,真光层营养盐减少,从而限制浮游植物的生长^[37]。因此,本研究发现火山爆发次年后硅藻及其他硅质生物的降低也可能与1991年厄尔尼诺的影响有关,但具体情况需进一步开展详细研究。

5 结论

(1)皮纳图博火山爆发后南海沉积物硅藻相对丰度明显降低。巨量的火山灰沉降至南海海底,使火山爆发后的沉降速率($\geq 0.2 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$)远高于火山爆发前的沉积速率($0.003 \sim 0.005 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$),但同时稀释了沉积物中其他组分,这是火山爆发后沉积物硅藻相对丰度骤降的主要原因。

(2)火山爆发一年后沉降颗粒物总通量和生物硅通量显著提高,而硅藻及其他硅质生物相对丰度和通量都显著下降。其中颗粒物总通量和生物硅通量的提高可能与火山灰,尤其是火山玻璃的贡献有关。

(3)皮纳图博火山爆发一年后同季节的沉降颗粒物中硅藻和其他硅质生物通量,以及有机碳和碳酸钙通量的显著降低以及与小生产力的降低,都表明南海上层硅藻生产力有所降低。但这究竟与皮纳图博火山灰的持续影响有关,还是由于厄尔尼诺对南海海洋环境的影响所致,抑或是二者相结合的结果,有待下一步更深入详细的研究。

参考文献 (References)

- [1] 鄢全树, 石学法, 刘季花, 等. 中沙群岛近海表层沉积物中的火山灰及其对构造环境的响应[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2007, 27(4): 9-16. [YAN Quanshu, SHI Xuefa, LIU Jihua. Characteristics of volcanic ash in surface sediments around Zhongsha islands: response to tectonic setting in the north margin of the South China Sea [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2007, 27(4): 9-16.]
- [2] Lowe D J, Alloway B. Tephrochronology[M]//Jack R W, Thompson J W. Encyclopedia of Scientific Dating Methods. Dordrecht: Springer, 2015: 783-799.
- [3] Frogner P, Gislason S R, Óskarsson N. Fertilization potential of volcanic ash in ocean surface waters [J]. Journal of Conference Abstracts, 2000, 5(2): 415.
- [4] Lin I I, Hu C M, Lu Y H, et al. Fertilization potential of volcanic dust in the low-nutrient low-chlorophyll western North Pacific subtropical gyre: Satellite evidence and laboratory study [J]. Global Biogeochemical Cycles, 2011, 25(1): GB1006.
- [5] McKinley G A, Fay A R, Eddebbar Y A, et al. External forcing explains recent decadal variability of the ocean carbon sink [J]. AGU Advances, 2020, 1(2): e2019AV000149.
- [6] Song B, Buckner C T, Hembury D J, et al. Impact of volcanic ash on anammox communities in deep sea sediments [J]. Environmental Microbiology Reports, 2014, 6(2): 159-166.
- [7] Tomas C R. Identifying marine phytoplankton[M]. Amsterdam: Elsevier, 1997.
- [8] 王开发, 蒋辉, 冯文科. 南海深海盆地硅藻组合的发现及其地质意义[J]. 海洋学报, 1985, 7(5): 590-597. [WANG Kaifa, JIANG Hui, FENG Wenke. Discovery of diatom assemblages in deep sea basins of South China Sea and its geological significance [J]. Acta Oceanologica Sinica, 1985, 7(5): 590-597.]
- [9] 孙美琴, 蓝东兆, 付萍, 等. 南海表层沉积硅藻的分布及其与环境因子的关系[J]. 应用海洋学学报, 2013, 32(1): 46-51. [SUN Meiqin, LAN Dongzhao, FU Ping, et al. Diatom distribution in surface sediment and its relation with environment factors in the South China Sea [J]. Journal of Applied Oceanography, 2013, 32(1): 46-51.]
- [10] Wiesner M G, Wang Y B, Zheng L F. Fallout of volcanic ash to the deep South China Sea induced by the 1991 eruption of Mount Pinatubo (Philippines) [J]. Geology, 1995, 23(10): 885-888.
- [11] Wiesner M G, Wetzel A, Catane S G, et al. Grain size, areal thickness distribution and controls on sedimentation of the 1991 Mount Pinatubo tephra layer in the South China Sea [J]. Bulletin of Volcanology, 2004, 66(3): 226-242.
- [12] Newhall C G, Self S. The volcanic explosivity index (VEI) an estimate of explosive magnitude for historical volcanism [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1982, 87(C2): 1231-1238.
- [13] 肖栋, 李建平. 皮纳图博火山爆发对20世纪90年代初平流层年代际变冷突变的影响机理[J]. 科学通报, 2011, 56(8): 772-780. [XIAO Dong, LI Jianping. Mechanism of stratospheric decadal abrupt cooling in the Early 1990s as influenced by the Pinatubo eruption [J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(8): 772-780.]
- [14] Chu P C, Edmons N L, Fan C W. Dynamical mechanisms for the South China Sea seasonal circulation and thermohaline variabilities [J]. Journal of Physical Oceanography, 1999, 29(11): 2971-2989.
- [15] Hu J Y, Kawamura H, Hong H S, et al. A review on the currents in the South China Sea: seasonal circulation, South China Sea warm current and Kuroshio intrusion [J]. Journal of Oceanography, 2000, 56(6): 607-624.
- [16] Wyrski K. Physical oceanography of the Southeast Asian waters[R]. University of California, 1961.
- [17] 黄玥, 冉莉华, 蒋辉. 南海北部陆坡晚更新世末期硅藻及其古环境意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2006, 26(4): 7-13. [HUANG Yue, RAN Yihua, JIANG Hui. Diatom from the south china sea during the latest pleistocene and their paleoenvironmental significance [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2006, 26(4): 7-13.]
- [18] Wong G T F, Ku T L, Mulholland M, et al. The SouthEast Asian time-series study (SEATS) and the biogeochemistry of the South China Sea—an overview [J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2007, 54(14-15): 1434-1447.

- [19] Li H L, Wiesner M G, Chen J F, et al. Long-term variation of meso-pelagic biogenic flux in the central South China Sea: Impact of monsoonal seasonality and mesoscale eddy [J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2017, 126: 62-72.
- [20] Mortlock R A, Froelich P N. A simple method for the rapid determination of biogenic opal in pelagic marine sediments [J]. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, 1989, 36(9): 1415-1426.
- [21] Ran L H, Chen J F, Wiesner M G, et al. Variability in the abundance and species composition of diatoms in sinking particles in the northern South China Sea: Results from time-series moored sediment traps [J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2015, 122: 15-24.
- [22] DeMaster D J. The supply and accumulation of silica in the marine environment [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1981, 45(10): 1715-1732.
- [23] Shiga K, Koizumi I. Latest Quaternary oceanographic changes in the Okhotsk Sea based on diatom records [J]. *Marine Micropaleontology*, 1999, 38(2): 91-117.
- [24] Smol J P, Stoermer E F. *The Diatoms: Applications for the Environmental and Earth Sciences*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2010.
- [25] Kuehl S A, Fuglseth T J, Thunell R C. Sediment mixing and accumulation rates in the Sulu and South China Seas: implications for organic carbon preservation in deep-sea environments [J]. *Marine Geology*, 1993, 111(1-2): 15-35.
- [26] Li C F, Lin J, Kulhanek D K, et al. Opening of the South China Sea and its implications for Southeast Asian tectonics, climates, and deep mantle processes since the Late Mesozoic[R]. *Integrated Ocean Drilling Program: Preliminary Reports*, 2014: 1.
- [27] Browning T J, Bouman H A, Henderson G M, et al. Strong responses of Southern Ocean phytoplankton communities to volcanic ash [J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(8): 2851-2857.
- [28] Bryan S E, Cook A G, Evans J P, et al. Rapid, long-distance dispersal by pumice rafting [J]. *PLoS One*, 2012, 7(7): e40583.
- [29] Hoffmann L J, Breitbarth E, Ardelan M V, et al. Influence of trace metal release from volcanic ash on growth of *Thalassiosira pseudonana* and *Emiliania huxleyi* [J]. *Marine Chemistry*, 2012, 132-133: 28-33.
- [30] Mélançon J, Levasseur M, Lizotte M, et al. Early response of the north-east subarctic Pacific plankton assemblage to volcanic ash fertilization [J]. *Limnology and Oceanography*, 2014, 59(1): 55-67.
- [31] 葛祥英. 四川盆地东部奥陶—志留纪交替时期事件沉积与有机质富集[D]. 中国地质大学(北京)博士学位论文, 2020 [GE Xiangying. The events across the Ordovician-Silurian transition and the organic enrichment of black shales in the east of Sichuan Basin[D]. Master Dissertation of China University of Geosciences (Beijing).]
- [32] Flaathen T K, Gislason S R. The effect of volcanic eruptions on the chemistry of surface waters: The 1991 and 2000 eruptions of Mt. Hekla, Iceland [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2007, 164(4): 293-316.
- [33] Kockum P C F, Herbert R B, Gislason S R. A diverse ecosystem response to volcanic aerosols [J]. *Chemical Geology*, 2006, 231(1-2): 57-66.
- [34] Jones M T, Gislason S R. Rapid releases of metal salts and nutrients following the deposition of volcanic ash into aqueous environments [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2008, 72(15): 3661-3680.
- [35] Voskresenskaya E N, Zelenko A A, Polonsky A B. El Niño in 1991-1992 and its manifestations in the tropical Atlantic [J]. *Physical Oceanography*, 1993, 4(6): 487-495.
- [36] Wang C Z, Wang W Q, Wang D X, et al. Interannual variability of the South China Sea associated with El Niño [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2006, 111(C3): C03023.
- [37] Zhao H, Tang D L. Effect of 1998 El Niño on the distribution of phytoplankton in the South China Sea [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2006, 112(C2): C02017.