

李学杰,田成静,钟和贤,等.南海晚更新世以来火山玻璃分布特征与物源分析.吉林大学学报(地球科学版),2025,55(1): 1-14.doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230335.
Li Xuejie, Tian Chengjing, Zhong Hexian, et al. Distribution Characteristics of Volcanic Glass in South China Sea Since Late Pleistocene and Their Provenance. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2025, 55(1): 1-14. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230335.

南海晚更新世以来火山玻璃分布特征与物源分析

李学杰,田成静,钟和贤,张江勇,廖志良

中国地质调查局广州海洋地质调查局/自然资源部海底矿产资源重点实验室,广州 511400

摘要:南海东缘吕宋岛弧和南缘巽他—爪哇岛弧是重要的地震火山活动带,其大量火山玻璃成为南海主要沉积物来源之一。本文利用南海大量的柱状样,鉴定并统计火山玻璃体积分数,结合¹⁴C测年和氧碳稳定同位素测定,分析其分布特征。结果表明:柱状样火山玻璃分布特征与表层沉积物样品类似,最高体积分数出现南海东部,并呈现往外扩散的特征;南海柱状样火山玻璃来源以菲律宾群岛为主,但晚更新世以来南海南缘的苏门答腊—爪哇岛弧火山—地震带的影响比表层沉积大;南海东北部 MIS1 期火山玻璃体积分数比 MIS2 期高,可能表明吕宋岛弧北部 MIS1 期火山活动有所增强;南海北部陆架和陆坡区基本不含火山玻璃,表明北部的华南大陆近期缺乏强烈的火山活动,对南海近表层沉积基本没有影响。

关键词:南海;火山玻璃;沉积作用;物源;火山—地震带;¹⁴C测年;氧碳稳定同位素

doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230335

中图分类号:P618.13

文献标志码:A

Distribution Characteristics of Volcanic Glass in South China Sea Since Late Pleistocene and Their Provenance

Li Xuejie, Tian Chengjing, Zhong Hexian, Zhang Jiangyong, Liao Zhiliang

Guangzhou Marine Geological Survey/Key Laboratory of Marine Mineral Resources, MNR, Guangzhou 511400, China

Abstract: The Luzon Arc in the eastern margin and Sunda-Java Arc in the southern margin of the South China Sea (SCS) are important volcano-seismic belts, with their volcanic glass serving as the main sediment source in SCS. Volcanic glass was identified in a large number of columnar cores to analyze its distribution characteristics, supplemented by ¹⁴C dating and oxygen-carbon stable isotope determination. The results show that the distribution characteristics of columnar volcanic glass are similar to those of surface sediment samples, peaking in the eastern SCS and spreading outward, indicating the primary source is still the Philippine Islands. However, the volcanic provenances from the Sumatra-Java Arc volcano-seismic belt since Late Pleistocene exceed those from surface sediments. The volcanic glass content of MIS1 in the northeastern SCS is greater than in MIS2, suggesting enhanced volcanic activity of MIS1 in the northern Luzon Arc. The absence of volcanic glass in the northern shelf and slope area of

收稿日期:2023-12-06

作者简介:李学杰(1964—),男,教授级高工,博士,主要从事海洋基础地质调查与研究工作,E-mail: xuejieli@yeah.net

基金项目:中国地质调查局项目(1212011220116,1212011220117,DD20160138,GZH201300502,D20190378)

Supported by the Project of China Geological Survey (1212011220116,1212011220117,DD20160138,GZH201300502,D20190378)

the SCS indicates a lack of recent volcanic activity from the northern South China continent, exerting minimal influence on the near-surface sediments of SCS.

Key words: South China Sea; volcanic glass; sedimentation; provenance; volcano-seismic belts; ^{14}C dating; oxygen-carbon stable isotope

0 引言

20 世纪 80 年代以来,已有不少学者陆续开展了对南海火山玻璃成分、含量与分布特征的研究^[1-3],探讨了表层沉积物中火山物质来源与搬运过程、火山喷发的关系^[4-7]。杨群慧等^[8]对南海东部表层沉积物中火山玻璃进行研究,认为其主要来源于附近岛屿的火山喷发;陈忠等^[9]研究认为菲律宾岛弧火山带、南海深海盆火山喷发以及印尼岛弧火山带是南海火山玻璃主要源区;李学杰等^[10]近年对南海表层沉积物进行系统取样,对火山玻璃进行鉴定并分析其分布特征,认为南海沉积物中火山玻璃主要分布在东部海域,与菲律宾群岛的火山喷发有关。

有些利用柱状样和钻孔样品开展的研究认为,南海深海火山玻璃成分不同,可能来源不同^[1-3, 11]。王汝建^[12]利用南沙海区柱状样识别了 8 个火山灰层,认为其记录了 8 次明显的火山活动,可作为地层划分和对比的标志;陈国成等^[13]利用南海 ODP (大洋钻探计划)钻孔样品的磁化率和粒度特征,识别了 48 万 a 来火山灰层及其与周边火山喷发的关系。但受取样的限制,南海海域柱状样火山玻璃分布特征的研究明显不足,缺乏整体认识。

物源分析是沉积学的重要研究内容。本文试图通过对南海全海域柱状样进行系统取样分析,结合 ^{14}C 测年和氧碳稳定同位素分析研究晚更新世以来南海沉积物中火山玻璃分布特征及其来源,进而分析南海及周边的火山喷发特征,以期对西太平洋边缘新构造活动提供佐证。

1 区域地质背景

南海是西太平洋最大的边缘海,周边构造活动活跃,火山频发^[14]。火山碎屑成为南海沉积的重要组成部分,是研究南海沉积过程与构造活动的基础^[2-3]。南海周缘发育两条重要的岛弧火山-地震带(图 1),东缘为琉球-台湾-菲律宾岛弧火山-地震带,南缘为苏门答腊-爪哇岛弧火山-地震带。

南海东缘的菲律宾岛弧带是西太平洋构造带的重要组成部分,其西侧欧亚板块南海洋壳往东俯冲于菲律宾岛弧之下,东侧菲律宾海板块洋壳往西俯

冲,构成双向俯冲构造带,新生代以来火山和地震频发。菲律宾群岛活火山众多,吕宋岛有塔阿尔火山、巴纳豪火山、皮纳图博火山、马荣火山^[15],巴布延岛有克拉洛(Claro)火山,内格罗斯岛有坎拉翁火山,棉兰老岛有拉冈火山、阿波火山,霍洛岛有霍洛火山等(图 1)。

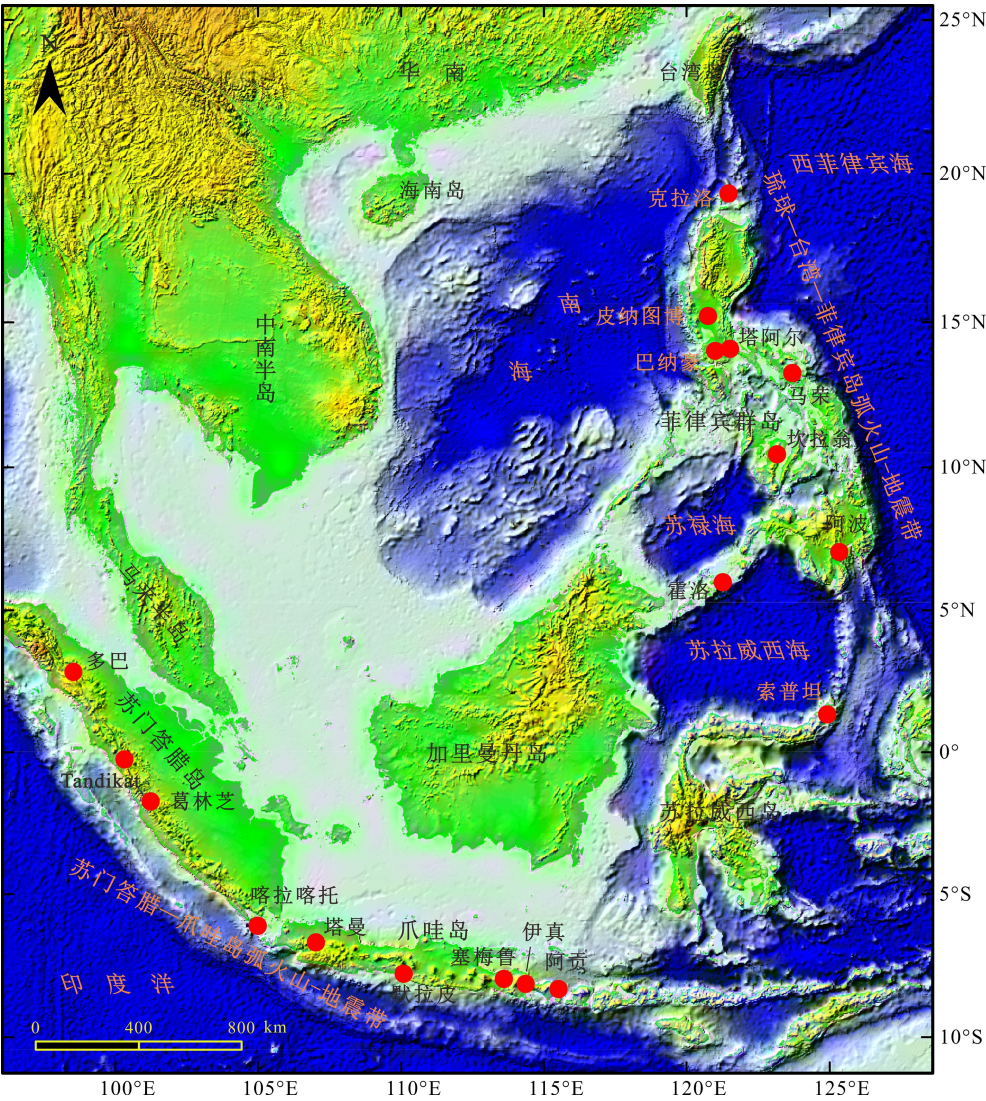
塔阿尔火山是菲律宾群岛最活跃的火山之一^[16],1572 年以来已有 33 次爆发记录,早期喷发主要为英安岩类,后期以玄武岩和玄武质安山岩为主^[17],具有弧后盆地到岛弧玄武岩特征^[18-19]。巴纳豪火山主要由安山岩组成,其岩浆与塔阿尔火山相似,显示碱性特征^[22-23]。

吕宋岛中部的皮纳图博火山以玄武岩和英安岩混合岩浆为主,主要矿物成分是橄榄石、辉石、石英等,其大量火山玻璃覆盖南海中部、西部海域,影响到海洋生态系统^[4, 24-25]。吕宋岛东南部的马荣火山是世界最著名的活火山之一,已有 47 次喷发记载^[24],岩性成分主要为玄武质安山岩, $w(\text{SiO}_2)$ 为 54%~58%^[26]。

南海南缘为苏门答腊-爪哇岛弧火山-地震带,是印度板块洋壳沿巽他海沟-爪哇海沟往北俯冲于欧亚大陆之下的产物,成为地球上火山最密集的地区(图 1),分布有 120 多座活火山,占全球活火山的 16%。其中著名的火山包括苏门答腊岛西北部的多巴(Toba)火山^[5]、中部的葛林芝(Kerinci)火山、南部喀拉喀托(Krakatau)火山、爪哇岛塔曼(Taman)火山、阿贡(Agung)火山等,喷发的大量火山灰对周围环境造成极大的影响^[21, 27-28]。

东缘的琉球-台湾-菲律宾岛弧火山-地震带,岩性为安山岩、石英安山岩或玄武岩,南缘的苏门答腊-爪哇岛弧火山-地震带,岩性为安山岩、玄武岩和流纹岩^[9]。这两条火山-地震带长期活动,可能为南海的沉积提供丰富的物源。

除这两条重要的火山-地震带外,南海北部广东、广西沿海地区及海南岛北部第四纪均有火山活动^[29-34]。南海深海盆地海底扩张后仍有大量火山活动,形成以基性为主的火山岩^[35-37]。南海周边陆地岛弧以及海盆的地震活动为海域火山玻璃沉积提供来源。



据文献[4,15-21]编制。

图 1 南海周边部分活火山分布

Fig.1 Distribution of some active volcanoes around South China Sea

2 样品与方法

2.1 柱状岩心样品

对南海全海域(包括陆架、陆坡和深海盆)进行系统的柱状样取样,共取 61 个柱状样,包括 26 个重力活塞样,35 个重力柱状样。重力活塞样,长度通常为 5~9 m;重力柱状样,长度小于 3 m。柱状样通常按 5 cm 或 10 cm 连续分样,并进行样品处理和碎屑矿物鉴定,包括火山玻璃的鉴定和统计。

2.2 样品处理与分析方法

2.2.1 碎屑矿物分析

沉积物碎屑矿物鉴定步骤包括:1)样品自然风干或烘干后,称取定量干样;2)对样品浸泡,冲洗过

筛,选取粒径为 0.063~0.25 mm 的颗粒,风干后称重;3)采用淘洗法,分离重、轻矿物;4)对重矿物进行磁选、电磁选分离,并称各部分质量;5)采用实体显微镜鉴定各类碎屑矿物,并目估体积分数,统计火山玻璃体积分数。

2.2.2 氧碳同位素分析

挑选新鲜未污染浮游有孔虫 *Globigerinoides ruber* 或 *Globigerinoides sacculifer* 壳体若干;加入适量无水酒精,经超声波清洗后烤干;在 70 °C 温度下经磷酸溶解后放出 CO₂ 气体,该气体经过高真空管路系统导入到主机稳定同位素质谱仪(Thermo Fisher MAT253)上分析氧同位素比值($\delta^{18}\text{O}$)。

2.2.3 AMS ¹⁴C 测年

前期处理方法:1)样品冷冻干燥;2)取 3~5 g 样品加入 2 mol/L 的 HCl,浸泡 48 h 去除可能存在的碳酸盐;3)蒸馏水洗至中性,加入 NaOH,浸泡 24 h 去除可能存在的现代碳污染和后期进入的腐殖酸;4)洗涤至中性,加入少量的 HCl 去除在第 2 步中可能吸收的大气中的 CO₂;5)洗涤至中性,在 60 °C 下烘干。

石墨靶制备:取适量烘干的沉积物样品置于有 CuO 的石英管中,加热,将有机碳转化成 CO₂ 气体。CO₂ 气体经过提纯后,冷冻在石墨合成管中密封,在

500~600 下将 CO₂ 气体转化成石墨。
将用于¹⁴C 分析的石墨靶样品送北京大学核物理和技术国家重点实验室加速器质谱(AMS)中心,采用美国 NEC ¹⁴C 专用加速器质谱仪进行¹⁴C 年代测定,测量精度优于±4‰。

3 柱状样火山玻璃分布特征

利用实体显微镜鉴定结果,28 个柱状样基本不含火山玻璃,33 个柱状样含火山玻璃(图 2),其中 26 个柱状样含较丰富的火山玻璃。这里仅分析含量丰富的 26 个柱状样火山玻璃分布特征。

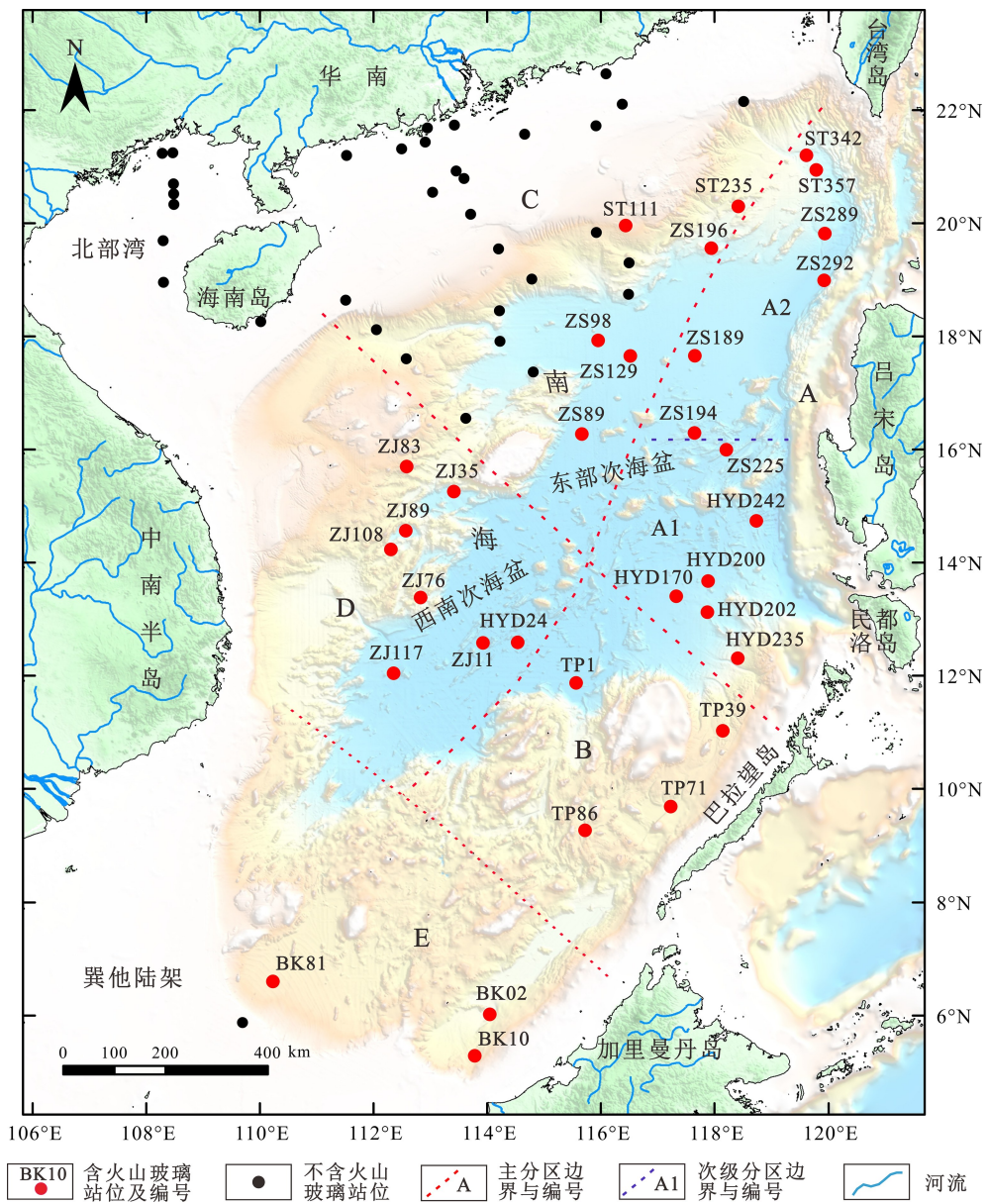


图 2 南海柱状样站位分布及火山玻璃体积分数分区

Fig.2 Columnar sample site distribution and volcanic glass content division in South China Sea

南海沉积物中火山玻璃包括无色和有色两类:无色玻璃通常为透明,玻璃光泽,碎屑状,硬度大,性脆;有色玻璃以浅褐色、浅棕色为主,透明至半透明,性脆,主要呈不规则的多角状、板状、纤维状等,正交偏光镜下多显均质性。

南海柱状样火山玻璃分布极不均匀,富含火山玻璃的柱状样主要分布于南海东部海域,西部海域和南部海域少量分布,而北部宽广的陆架和陆坡基本缺乏火山玻璃。根据火山玻璃分布特征,南海大致可以分为 5 区:东部深水海域(A 区)、东南部海域(B 区)、北部海域(C 区)、中西部海域(D 区)和南部海域(E 区)(图 2)。

3.1 南海东部海域

南海东部海域(A 区),东邻菲律宾吕宋岛、民都洛岛,北为台湾岛,东南为巴拉望岛,主体为南海海盆区,共取 12 个柱状样(图 2),均含多层火山玻璃,总体含量最高,大致可再分为南北两区,南区(A1)含量比北区(A2)更高。

南区最南部的柱状样 HYD235,取样位置水深 2 695 m,位于西北巴拉望岛坡底部。对该样进行了详细的 $\delta^{18}\text{O}$ 分析,可见其曲线特征明显,底部相当于 MIS8 期,沉积速率相对较低,记录了近 300 kaB.P. 以来的沉积特征。火山玻璃体积分数呈明显

的周期性变化特征,高体积分数占碎屑矿物比例的 40%~60%,低体积分数通常在 10% 以内,反映火山喷发期和间歇期的明显差异(图 3)。

HYD235 站位北侧的 HYD170 和 HYD202 柱状样位于东部次海盆,柱状样所在水深分别为 4 149、3 700 m。对 HYD170 柱状样进行了 ^{14}C 测年,可知全新世(MIS1 期)厚度约 50 cm,表明与 HYD235 柱状样沉积速率大致相当。两个柱状样 MIS1 期火山玻璃体积分数基本均大于 40%,且相对稳定,表明 MIS1 期火山活动频发,覆盖本区的火山玻璃丰富,MIS2 期以下火山玻璃峰值体积分数变化较大,部分层段体积分数较低。

HYD200 和 HYD242 柱状样所在水深分别为 4 033、4 030 m,同位于东部次海盆,因缺乏 $\delta^{18}\text{O}$ 和 ^{14}C 数据的约束,难以确定准确时代;但从水深和离陆缘距离,大致可以判断其沉积速率应不高于 HYD235,火山玻璃峰值均接近或超过 50%,体积分数大。

位于 HYD242 站位以北的 ZS225 柱状样所在水深为 3 950 m, ^{14}C 测年 40 cm 处为 $(18\,591\pm104)$ aB.P.,根据测年结果及与其他柱状样的对比,MIS1 与 MIS2 分界确定在厚度 45 cm 处。160 和 220 cm 处 ^{14}C 测年分别为 $(34\,263\pm220)$ 和 $(38\,527\pm290)$ aB.P.,

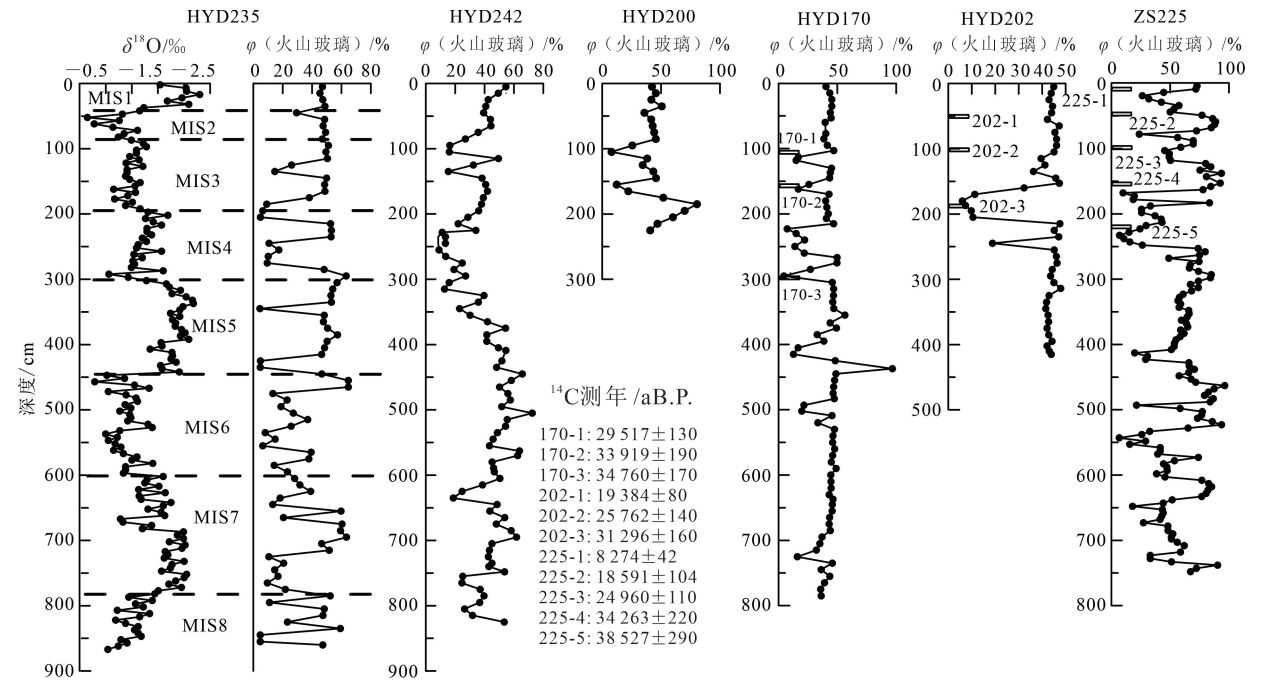


图 3 南海东部海域(A1 区)柱状样火山玻璃体积分数分布图
Fig.3 Distribution of columnar volcanic glass in area A1 of center and eastern South China Sea

根据沉积速率大致推测底部年龄应超过 100 kaB.P.。因此,至少 100 kaB.P.或 MIS5 期以来,各层位均含火山玻璃,体积分数为 6.67%~96.46%,整体体积分数高,95 个样品体积分数超过 50%,占样品总数的 64.2%,周期性变化明显。

北区(A2)柱状样包括 ZS194、ZS189、ZS292、ZS289、ST357、ST342 等,其火山玻璃体积分数均具有由南往北、由东往西逐渐减少的趋势,最北侧 ST357、ST342 柱状样火山玻璃体积分数很少,未作图。

ZS194 柱状样所在水深为 3 950 m,长度仅 1.7 m,根据其沉积特征,应属全新统,大致相当于 9 000 aB.P.以来的沉积特征,总体火山玻璃体积分数仍较高,通常为 20%~80%,仅 110~120 cm 段未见火山玻璃。

ZS289 柱状样所在水深为 3 605 m,位于台湾岛南侧陆坡底部,根据 AMS ¹⁴C 测年,60 cm 处为 (3 088±133)aB.P.,265 cm 处为 (4 689±285)aB.P.,465 cm 处为 (18 765±112)aB.P.,同时挑选浮游有孔虫 *Globigerinoides ruber* 进行 $\delta^{18}\text{O}$ 稳定分析(图 4),时代包括 MIS1—MIS3 共 3 期,因距离台湾岛

物源较近,沉积速率较高。该柱状样火山玻璃体积分数比南部已明显下降,通常<50%,部分层段体积分数极低或不含火山玻璃,是可以更明显识别受火山喷发影响的层段。MIS1 期,火山玻璃体积分数有 4 个峰值,可能反映 4 次较大规模的火山喷发,其中全新世早期,约 9 000 aB.P.和全新世末期火山玻璃体积分数高,喷发规模大;MIS2 期,火山玻璃体积分数早晚相对较低,反映较弱的火山活动,中部有 2 个峰值,可能反映 2 次较大规模的火山喷发,峰值之间火山玻璃体积分数近于 0,表明基本未受火山活动影响;MIS3 期,各层样品均含火山玻璃,有 2 个峰值,位于早中期和末期,表明该期各时段均有不同程度的火山活动。

ZS289 站位南侧的 ZS292 柱状样所在水深为 3 998 m,结合 ¹⁴C 测年和火山玻璃体积分数分布与 ZS289 柱状样对比,MIS1 与 MIS2 分界定在 100 cm。MIS1 期火山玻璃体积分数比 MIS2 高,尤其是约 9 000 aB.P.和全新世末期体积分数高;而 MIS2 期的中晚期,相当于 10~20 kaB.P.,火山玻璃体积分数极低。

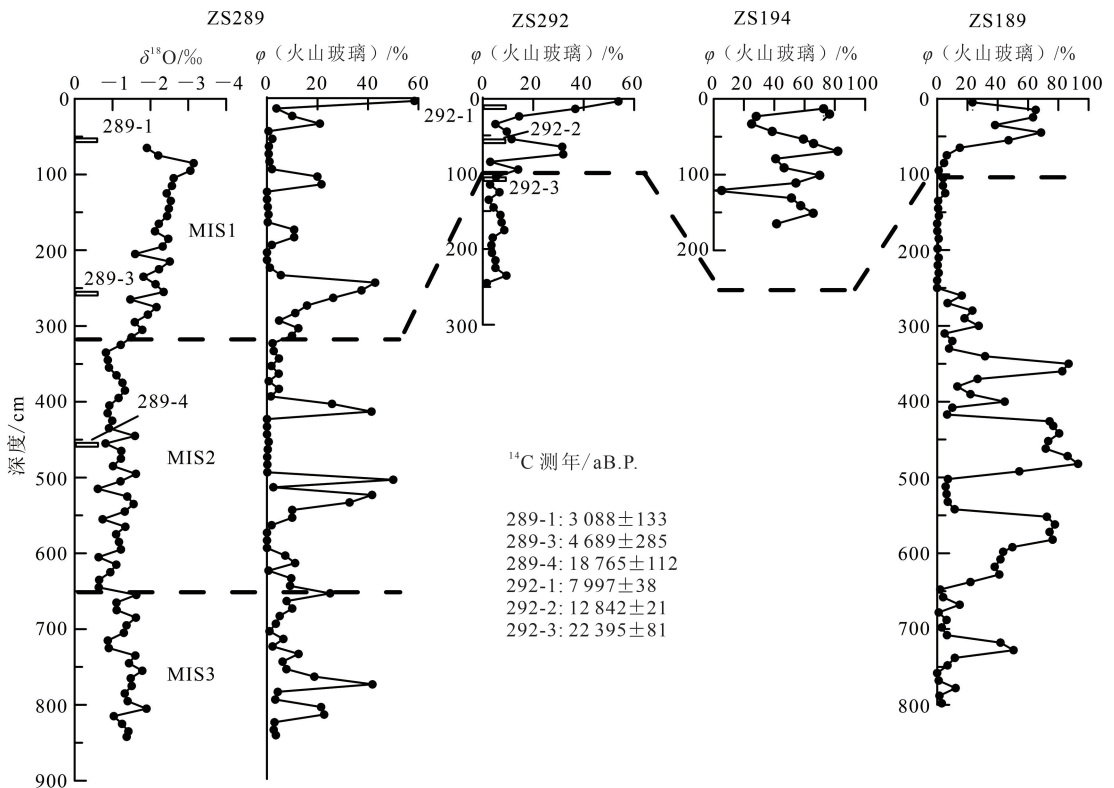


图 4 南海东部海域(A2 区)柱状样火山玻璃体积分数分布图

Fig.4 Distribution of columnar volcanic glass in area A2 of northeastern South China Sea

位于 ZS292 站位西南的 ZS189 柱状样所在水深为 3 950 m,依据水深和离主要物源距离判断,其沉积速率应与 ZS292 大致相当,MIS1 与 MIS2 分界在 90 cm 附近。MIS1 期火山玻璃体积分数高,最高达 68.67%;MIS2 期体积分数总体较低,大多在 5%以下;再往下火山玻璃体积分数变化大。

南海东部海域由南往北、由东往西火山玻璃体积分数明显减少,MIS1 期火山玻璃体积分数明显比 MIS2 期的中晚期高,表明 MIS2 中晚期周边为火山相对平静期,全新世以来再次明显增强。

3.2 东南部海域

南海东南部海域(B区)位于巴拉望岛西北,主体为岛坡和海盆,共分析 4 个柱状样:TP71、TP39、TP1 和 TP86,水深分别为 2 100、1 595、4 384 和 1 722 m,除 TP71 站位位于西南次海盆外,其余 3 个站位位于南沙陆坡区。这些柱状样均含火山玻璃,但体积分数变化明显,总体火山玻璃体积分数比其北部的 A 区明显较少,并由北往南呈下降趋势(图 5)。

根据 $\delta^{18}\text{O}$ 分布特征,TP71 和 TP39 柱状样揭示至 MIS3 期,反映近 50 kaB.P.以来的沉积特征。其中:TP71 总体火山玻璃体积分数较低,<8%,尤其 MIS1 和 MIS2 期体积分数基本<2%,仅 MIS2

中部出现小峰值,MIS3 期火山玻璃体积分数明显增高(图 5);TP39 柱状样总体火山玻璃体积分数比 TP71 略高,尤其一些峰值层段,可达 15%~30%。MIS1 期没有明显峰值,MIS2 期出现 3 次明显峰值,最大峰值出现的时间与 TP71 可对比,但体积分数大得多。

对南部的 TP86 柱状样进行详细的氧碳同位素分析,揭示至 MIS8 期,近 300 kaB.P. 以来的变化特征。该柱状样总体火山玻璃体积分数很低,很多层位不含火山玻璃,但个别层位体积分数很高,主要记录 5 次峰值,从早到晚为 MIS7 中部,约 220 kaB.P.;MIS6 与 MIS7 之交,190 kaB.P.;MIS5 中部,约 110 kaB.P.;MIS4 与 MIS5 之交,75 kaB.P.;MIS3 中部,35~40 kaB.P.(图 5)。

西南次海盆的 TP1 柱状样未进行 $\delta^{18}\text{O}$ 分析和 ^{14}C 测年,时代难以准确确定,但根据水深和离岸距离判断,其沉积速率应比 TP71 和 TP39 柱状样低。中上部火山玻璃体积分数总体上比 TP71 和 TP39 柱状样高,可能是沉积速率较低,尤其是粗碎屑少,导致火山玻璃相对集中的结果。

总体来看,南海东南部海域比南海东部海域(A区)火山玻璃体积分数明显降低,而且从北往南呈下降趋势,但与 A 区北部相比,本区 MIS1 期总体火山

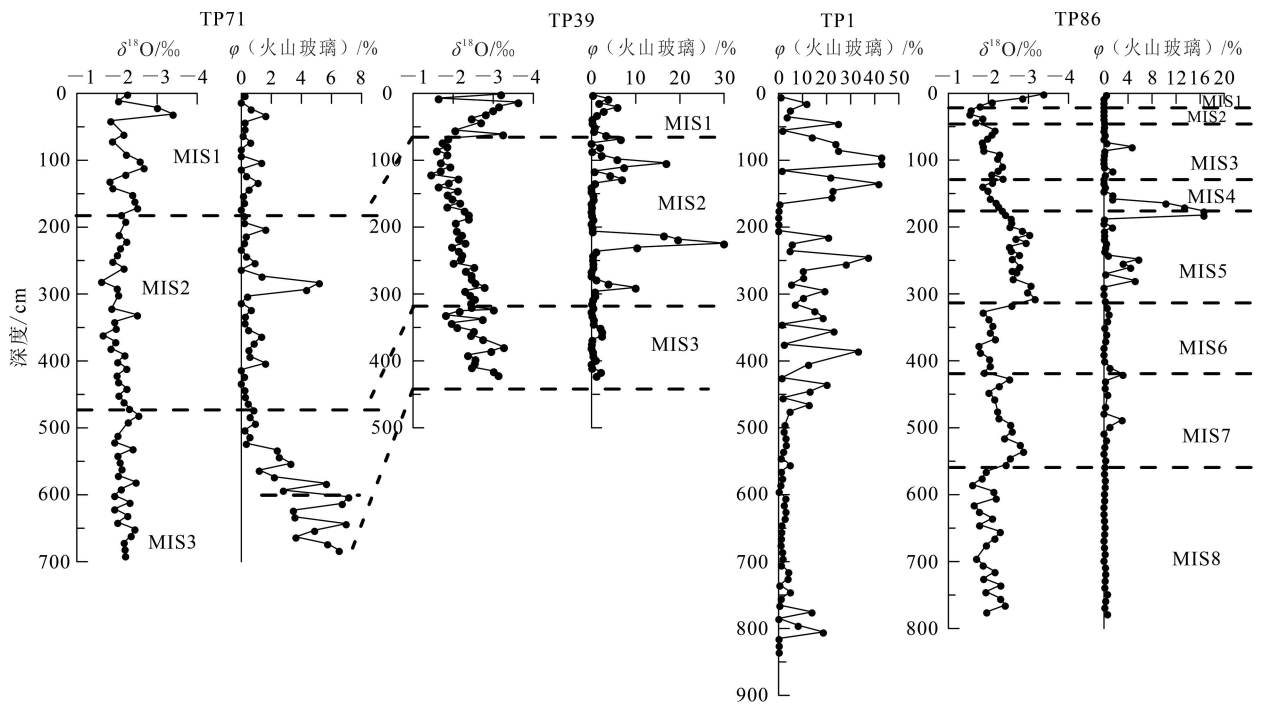


图 5 南海东南部海域(B区)柱状样火山玻璃体积分数分布图

Fig.5 Distribution of columnar volcanic glass in area B of southeastern South China Sea

玻璃体积分数低,相反 MIS2 期出现 1 次或数次峰值。本区火山玻璃总体体积分数较低,沉积速率的变化也是控制其体积分数的重要因素。

3.3 北部海域

南海北部海域(C 区)包括宽广的陆架、陆坡和深海盆,北邻华南大陆,东北为台湾岛,西北为海南岛,陆源物质丰富,沉积速率相对较高。在该区共分析了 30 多个柱状样,仅在 6 个柱状样中发现了火山玻璃,且体积分数较低,含火山玻璃的柱状样主要分布于东部和南部的下陆坡和海盆(图 2)。

该区东部的 ZS196 柱状样所在水深为 3 000 m,位于陆坡底部,对该柱状样进行 $\delta^{18}\text{O}$ 稳定同位素分析,只揭示 MIS1 和 MIS2(图 6)。该柱状样 MIS1 期火山玻璃体积分数总体很低,多数层位基本为 0,记录 3 次小峰值,早中期 2 次,末期 1 次;MIS2 期记录 5 次火山玻璃高值,其中 2 次体积分数很高,火山玻璃体积分数接近 50%,表明喷发规模大。总体上 MIS2 期的火山玻璃明显比 MIS1 期高,火山喷发强度较大,这与其东部海域相似。

位于 ZS196 站位西南部的 ZS89、ZS129 和

ZS98,水深分别为 4 120、3 950、3 849 m,位于深海盆区,柱状样长度较短,未进行 $\delta^{18}\text{O}$ 稳定同位素分析和 ^{14}C 测年,其水深与离岸距离比 ZS196 站位大,但考虑珠江物源,其沉积速率可能大致相当,均为 MIS1 期。这些柱状样大部分层段均不含火山玻璃,但记录一些较高的峰值。ZS129 记录 2 次峰值,ZS98 和 ZS89 各记录 1 次峰值。ZS129 与 ZS98 的新峰值与 ZS196 可对比,时间大致在 500 a.B.P.前后(图 6)。

位于 ZS196 站位北侧的 ST235,水深 2 695 m,未进行 $\delta^{18}\text{O}$ 稳定同位素分析和 ^{14}C 测年,时代难以准确确定,但根据水深与离岸距离,大致可以确定其沉积速率应比 ZS196 大,火山玻璃体积分数更低, <3%,更多层段体积分数为 0。所记录的最后峰值与 ZS196 最后峰值可对比。

南海北部海域火山玻璃体积分数较低,仅分布于东部和南部柱状样中;而北部和西部的大部分海域,尤其北部陆架区均不含火山玻璃。MIS1 期记录到火山玻璃峰值的次数和体积分数均比 MIS2 期少,这与其东部海域类似。

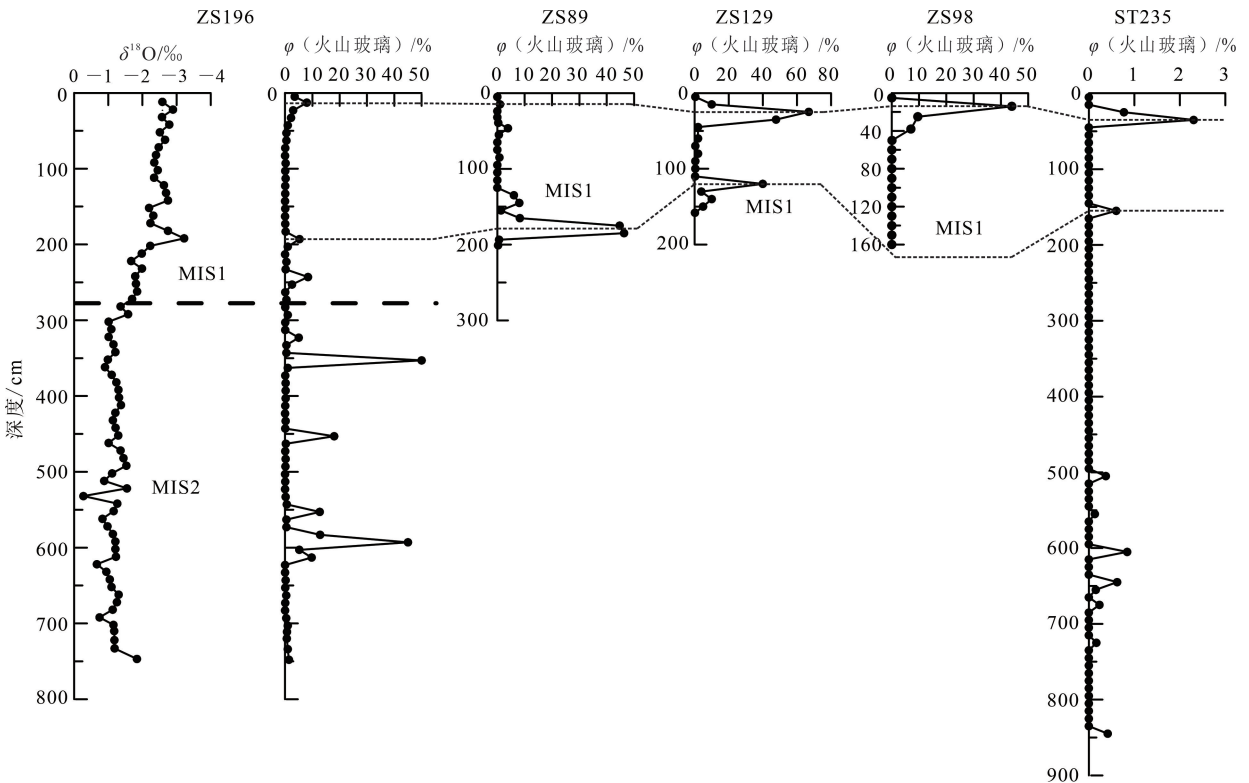


图 6 南海北部海域(C 区)柱状样火山玻璃体积分数分布图
Fig.6 Distribution of columnar volcanic glass in area C of the northern South China Sea

3.4 中西部海域

南海中西部海域(D区)西邻中南半岛,北为海南岛和华南大陆,共有 16 个柱状样,其中有 8 个含火山玻璃,主要分布于西部陆坡和西南次海盆,而陆架区基本不含火山玻璃。其中 ZJ76、HYD24、ZJ117、ZJ89 和 ZJ35 等 5 个柱状样火山玻璃体积分数较大,其水深分别为 2 384、4 385、4 255、3 746 和 3 821 m(图 2)。

位于陆坡底部的 ZJ76 柱状样, $\delta^{18}\text{O}$ 分析表明其底部至 MIS5 期,总体火山玻璃很少,多数样品为 0,仅在 MIS5 期底部记录 1 次明显的火山玻璃峰值,其上记录 6~7 次微量火山玻璃(图 7)。

西南次海盆的 HYD24 柱状样,水深更深,远离陆源,沉积速率可能更低,80 cm 处 ^{14}C 测年为 $(20\,430\pm100)\text{aB.P.}$,其底部年龄应早于 MIS5 期。该柱状样 4 次明显的火山玻璃峰值,表明近 10 多万 a 来至少有 4 次火山喷发明显影响该站位,MIS1 期基本不含火山玻璃。

同在西南次海盆的 ZJ117,位于 HYD24 站位的西南,缺少测年数据,因更靠近西部陆坡,沉积速率可能比 HYD24 略高。该柱状样仅在 210~240 cm 记录到火山玻璃峰值,大致相当于 MIS2 至 MIS3

期。
ZJ89 和 ZJ35 柱状样,位于 ZJ76 站位以北的下陆坡,两者长度均较短,小于 3 m,估计沉积速率大致相当,两者在底部均记录 1 次火山玻璃峰值,大致可对比,应为同一次火山爆发的产物,与 ZJ76 和 HYD24 的第一次峰值相当,时代为 MIS2 至 MIS3 期。所不同的是 ZJ35 的顶部 0~50 cm 还记录 1 次峰值,体积分数 $>50\%$,而 ZJ89 仅有少量分布。

该区柱状样总体火山玻璃体积分数很低,许多层位样品基本为 0,尤其是 MIS1 期,除 ZJ35 外,基本不含火山玻璃,这与东南部海域(B区)类似,表明全新世以来南海中西部海域基本未受火山喷发的影响。本区所能记录到有限含火山玻璃峰值,可能记录周边大规模高强度的火山喷发。北部 ZJ35 记录 MIS1 期峰值与东北部海域相似,可能表明主要来自东北部的火山喷发或附近喷发所致。

3.5 南部海域

南海南部海域(E区)包括宽广的巽他陆架和曾母暗沙陆坡区,共分析 4 个柱状样,除陆架样品外,其余 3 个位于陆坡区的柱状样 BK02、BK10 和 BK81 均含火山玻璃,其水深分别为 2 796、1 826 和 1 574 m。

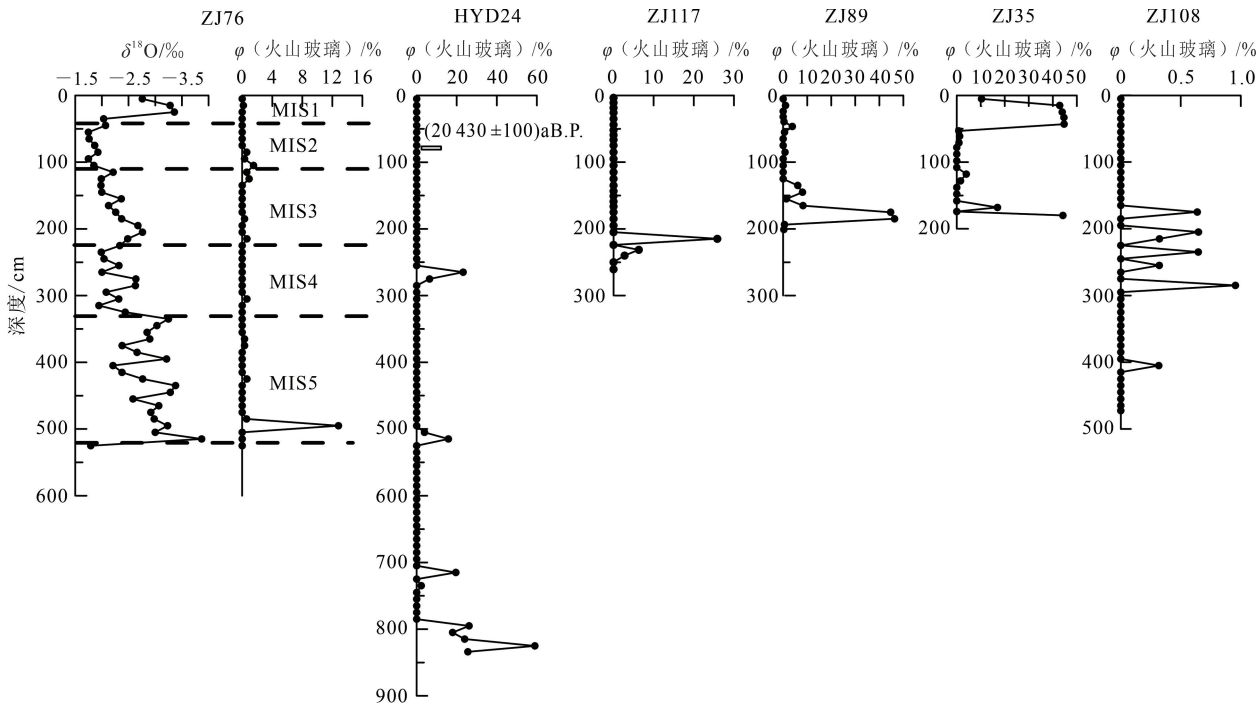


图 7 南海中西部海域(D区)柱状样火山玻璃体积分数分布图
Fig.7 Distribution of columnar volcanic glass in area D of central and western South China Sea

这 3 个柱状样均缺乏 $\delta^{18}\text{O}$ 分析和 ^{14}C 测年数据的约束,时代难以准确确定,但考虑到该区有来自中南半岛湄公河以及加里曼丹岛的物源,其沉积速率应比 TP86 大,所记录的沉积时间较短。这 3 个柱状样均含较丰富的火山玻璃(图 8),尤其 BK10 柱状样,460 cm 以上绝大部分样品含火山玻璃,体积分数达 10%~50%。BK10 北侧的 BK02,水深和离岸距离增大,但火山玻璃体积分数也明显下降,均小于 10%,且不少样品体积分数为 0,表明其离火山喷发源区更远,所受影响下降。位于西部的 BK81 柱状样,110 cm 以上段不含火山玻璃,110~390 cm 段出现多层体积分数较高的火山玻璃,390~580 cm 段体积分数基本为 0,580~630 cm 再次出现峰值。显然该柱状样火山玻璃的分布特征与 BK10 和 BK02 明显不同。

与该区北部毗邻海域,包括 B 区的 TP86、TP71 以及 D 区的 ZJ117、HYD24 进行对比,本区 3 个柱状样火山玻璃体积分数明显更高得多,表明其来源可能主要为南部,而非东北部。西部 BK81 与东部 BK02、BK10 分布特征明显不同,可能表明其来自不同方向的火山喷发。

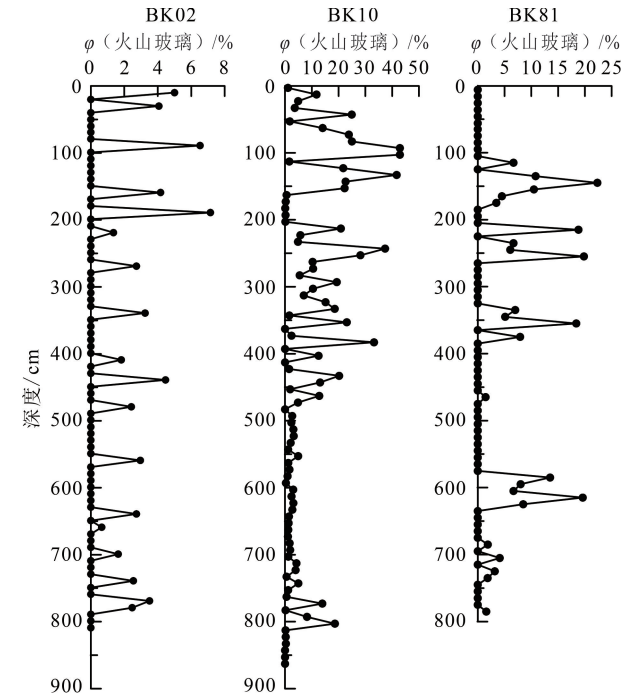


图 8 南海南部海域(E 区)柱状样火山玻璃体积分数分布图
Fig.8 Distribution of columnar volcanic glass in area E of southern South China Sea

4 火山玻璃物源分析

4.1 与表层火山玻璃分布的对比

前人对南海表层样火山玻璃的分布特征及其来源已进行了较深入的研究,可以为柱状样的研究提供参考。如:杨群慧等^[8]对南海东部表层沉积物中火山玻璃研究认为,其主要来源于附近弧状列岛的火山喷发物,基性火山碎屑矿物则主要来自海底火山岩的剥蚀物;陈忠等^[9]认为,表层沉积物中的火山玻璃体积分数基本呈南北向分布,由北部、西部、南部大陆架向中部、东部深海盆逐渐增加,菲律宾岛弧火山带、南海深海盆火山喷发以及印尼岛弧火山带是南海火山玻璃主要源区,火山玻璃搬运和沉积主要受台风、越赤道气流和环流的影响与控制。但总体来看,受取样的限制,对南海海域火山玻璃分布特征的研究明显不足,难以形成整体认识。

李学杰等^[10]对南海表层沉积物火山玻璃体积分数作了至今为止最系统的研究,取样站位达 2 276 个,认为表层沉积物火山玻璃主要分布在南海东部海域,以菲律宾吕宋岛—民都洛岛一带海域高体积分数为中心,往西呈逐渐降低趋势;并认为火山玻璃主要来自南海东部菲律宾吕宋等岛屿,与南海东缘的琉球—台湾—菲律宾火山—地震带大量活火山分布有关。南海南缘苏门答腊—爪哇岛弧火山—地震带,虽第四纪火山和地震活动频发,但对南海表层沉积贡献不大,海域火山可能只有少量贡献。

柱状样火山玻璃分布与表层沉积物总体类似,依然呈现以南海东部海域为中心往外扩散的特征,靠近菲律宾群岛的柱状样(C 区和 A 区)火山玻璃体积分数很高,各层位体积分数虽有周期性变化,但基本均有出现,而南海宽广的北部陆架和西部海域均基本没有火山玻璃。但柱状样火山玻璃的分布范围比表层样更广,主要表现为:

1)南海南部海域(E 区),大量的表层样基本没有火山玻璃^[7],但在研究的 4 条柱状样中的 3 条均不同程度发现火山玻璃(图 8)。其中:该区东南部靠近加里曼丹的 BK10 柱状样出现的频率和体积分数均较高;该区北侧的 BK02 柱状样,不论出现的频率和体积分数均明显下降;该区西部的 BK81 多次出现火山玻璃,但体积分数均较低。

2)南海东北部(A 区),台湾西南海域,相当于高屏斜坡的海域,表层样火山玻璃极少,或基本没有火山玻璃,但该区 ST342 和 ST357 柱状样一些层位发

现少量火山玻璃。该区来自台湾岛和台湾海峡的陆源物质丰富,沉积速率较高,火山玻璃很容易被陆源物质所稀释,只有较大规模的喷发才会在沉积层出现明显的富集。

上述分析表明,晚更新世以来,南海周边的火山活动基本稳定,火山玻璃的来源均主要来自南海的东缘和南缘,但活动强度可能有所不同,一些时段活动强度比现今大,火山玻璃覆盖的范围更广。

4.2 柱状沉积物火山玻璃物源

吕宋岛西侧的南海东部海域柱状样,火山玻璃含量最高,基本各层位均有出现,表明该区不仅靠近火山源区,而且存在长期的多次喷发。该区往北、往西火山玻璃体积分数明显减少,东北部台湾南侧的ST342、ST357柱状样仅见极少量的火山玻璃,这除与北部陆缘物质供给增加有关外,最主要的是远离火山喷发源区。

同样,往南至西北巴拉望海域(B区)和往西至西南次海盆(D区)火山玻璃体积分数均明显下降,因此,南海东部海域是火山玻璃的高体积分数区。尽管陆源物质供给和海流可能影响火山玻璃的分布,因南海不同季节的环流方向不同,可能产生完全不同的效果,东部深水海域陆源物质供给相对较少,可能有利于火山玻璃的富集。但总体而言,火山玻璃的分布主要反映源区火山喷发的特征。

南海北部陆架和陆坡广大海域样品基本不含火山玻璃,表明样品的沉积时期,该海域基本不受火山喷发的影响。南海西北的华南陆地,包括海南岛和雷州半岛,第四纪均有火山喷发^[29-32],但从南海北部海域沉积记录来看,近数万年,尤其是全新世以来基本未受影响,更不可能大规模影响南海东部的深海海域。

因此,南海东部海域火山玻璃应主要来自其东缘的菲律宾岛弧火山-地震带,尤其是吕宋岛的塔阿尔、巴纳豪、皮纳图博、马荣和克拉洛(Claro)火山等^[15],这些火山相当活跃,喷发所产生的大量火山碎屑可以覆盖南海东部大片海域。

东部深水海域(A区),以中部火山玻璃体积分数为最高,往南和往北体积分数均下降,但南部、北部火山玻璃体积分数 MIS1 期和 MIS2 期的变化模式不同,北部邻近台湾海域, MIS2 体积分数低, MIS1 期体积分数高;而南部的西北巴拉湾海域相反, MIS2 体积分数高, MIS1 期体积分数低,可能是菲律宾群岛南北火山喷发差异的结果。

中西部海域(D区),总体火山玻璃体积分数很低,大致呈由东往西下降趋势,与表层样一致,主体物源来自菲律宾群岛^[7]。而北部 ZJ35 柱状样 MIS1 期出现火山玻璃高体积分数层段,特征与 A 区北部类似,可能表明主要来自北部的火山喷发,也可能是附近火山喷发的结果^[38-39]。

南海南缘的苏门答腊一爪哇岛弧是地球上火山最密集的地区,拥有大量的活火山,喷发大量的火山灰^[5, 26-27],因距离较远,南海南部表层样基本不含火山玻璃^[10]。柱状样结果揭示,含有较丰富的火山玻璃,甚至比其北部的 B 区和 D 区更丰富,表明南缘火山喷发对南海南部有一定的影响。东西部火山玻璃的分布特征明显不同,表明其来自不同方向的火山喷发,不仅有多巴火山^[5],可能有更多火山的共同影响。

5 结论

南海全海域 61 个柱状样中,28 个柱状样基本不含火山玻璃,33 个柱状样含火山玻璃,其中 26 个柱状样含较丰富的火山玻璃。根据分析结果,可以取得以下认识:

1)南海东部 A1 区柱状样火山玻璃含量最高,各层位基本均含火山玻璃,表明该区不仅靠近火山源区,而且存在长期的多次喷发。该区往北、往南、往西火山玻璃体积分数均明显下降,结合周边地质构造特征与火山喷发状况,认为柱状样火山玻璃主要来自其东缘的菲律宾岛弧火山-地震带。

2)南海东部海域南北端火山玻璃体积分数变化模式不同,北端靠近台湾的南海东北海域 MIS2 火山玻璃体积分数低, MIS1 期火山玻璃体积分数高;而南端巴拉望岛西北海域 MIS2 火山玻璃体积分数高, MIS1 期火山玻璃体积分数低,反映菲律宾群岛南北火山喷发特征的差异。

3)南海中西部海域(D区),总体火山玻璃体积分数很低, MIS1 期基本不含火山玻璃,表明全新世以来,该区基本未受火山喷发的影响,少量火山玻璃可能主要来自北部的火山喷发。

4)南海北部陆架和陆坡区基本不含火山玻璃,表明北部的华南大陆近期缺乏强烈的火山活动,对南海近表层沉积基本没有影响。

5)南海南部海域含有较丰富的火山玻璃,推测主要来自南缘的苏门答腊一爪哇岛弧,且可能来自不同期次的火山喷发。

参考文献(References):

- [1] 杨育标,范时清. 南海深海晚第四纪火山沉积物及其起源探讨[J]. 热带海洋学报,1990,9(1):52-60.
Yang Yubiao, Fan Shiqing. Research on Volcanic Sediments and Origin of Volcanic Substance in South China Sea During Late Quaternary [J]. Tropic Oceanology, 1990, 9(1): 52-60.
- [2] 谈丽芳. 南海火山玻璃的初步研究[J]. 南海地质研究, 1991 (3):158-171.
Tan Lifang. A Study on Volcanic Glass in the South China Sea[J]. Geological Research of South China Sea, 1991(3): 158-171.
- [3] 李志珍. 南海深海表层沉积物中的火山碎屑矿物及火山作用[J].海洋学报,1989,11(2):176-184.
Li Zhizhen. Volcaniclastics Minerals and Volcanism in Deep-sea Surface Sediments of the South China Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1989, 11(2):176-184.
- [4] 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: 885-888.
- [5] 梁细荣,韦刚健,邵磊,等. Toba 火山喷发在南海沉积物中的记录:ODP1143 站钻孔火山玻璃的证据[J]. 中国科学:D 辑,2001,31(10): 861-866.
Liang Xirong, Wei Gangjian, Shao Lei, et al. The Records of the Toba Volcanic Eruption in Sediments of the South China Sea-Evidence from the Volcanic Glass in ODP1143 Cores [J]. Science in China: Series D, 2001, 31(10): 861-866.
- [6] Bühring C S. Toba Ash Layers in the South China Sea; Evidence of Contrasting Wind Directions During ca. 74 ka[J]. Geology,2000, 28:275-278.
- [7] Song S R, Chen C H, Lee M Y, et al. Newly Discovered Eastern Dispersal of the Youngest Toba Tuff[J]. Marine Geology,2000,167:303-312.
- [8] 杨群慧,林振宏,张富元,等.南海东部重矿物分布特征及其影响因素[J]. 青岛海洋大学学报,2002, 32 (6): 956-964.
Yang Qunhui, Lin Zhenhong, Zhang Fuyuan, et al. The Distribution Characteristics of Heavy Minerals in the East of South China Sea and Their Controlling Factors [J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 2002, 32(6): 956-964.
- [9] 陈忠,夏斌,颜文,等. 南海火山玻璃的分布特征、化学成分及源区探讨[J]. 海洋学报,2005, 27(5):73-81.
Chen Zhong, Xia Bin, Yan Wen, et al. Distribution, Chemical Characteristics and Source Area of Volcanic Glass in the South China Sea [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2005, 27(5):73-81.
- [10] 李学杰,廖志良,田成静,等. 南海表层沉积物火山玻璃分布特征与源区分析[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2022, 42(3):1-8.
Li Xuejie, Liao Zhiliang, Tian Chengjing, et al. Distribution Pattern of Volcanic Glasses in the Surficial Sediments of the South China Sea and Their Provenance [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2022, 42(3):1-8.
- [11] 时振波,林晓彤,杨群慧,等. 南海东部晚更新世以来的火山沉积特征[J]. 中国海洋大学学报,2004,34 (6):1063-1068.
Shi Zhenbo, Lin Xiaotong, Yang Qunhui, et al. Volcanic Sediments in the Eastern South China Sea During the Late Pleistocene Epoch[J]. Periodical of Ocean University of China,2004, 34(6):1063-1068.
- [12] 王汝建. 南沙海区更新世以来的火山灰及其地质意义[J]. 海洋地质与第四纪地质,2000,20(1):51-56.
Wang Rujian. Pleistocene Volcanic Shards and Their Geological Significance in the Nansha Area of the South China Sea[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2000,20(1):51-56.
- [13] 陈国成,郑洪波,李建如,等. 48 万年来南海及周边地区火山喷发作用的沉积学记录[J]. 海洋地质与第四纪地质,2007,27(4): 69-76.
Chen Guocheng, Zheng Hongbo, Li Jianru, et al. Sedimentary Records of Volcanic Activity in the South China Sea over the Past 480 ka [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2007, 27(4): 69-76.
- [14] 李学杰,王哲,姚永坚,等. 西太平洋边缘构造特征及其演化[J]. 中国地质, 2017, 44(6): 1102-1114.
Li Xuejie, Wang Zhe, Yao Yongjian, et al. The Tectonic Features and Its Evolution of the West Pacific Margin [J]. Geology in China, 2017, 44(6): 1102-1114.
- [15] 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.
- [16] Torres R C, Self S, Punongbayan R S. Attention

- Focuses on Taal: Decade Volcano of the Philippines [J]. *Eos Transactions American Geophysical Union*, 1995, 76(24):241-247.
- [17] Listanco E. Space-Time Patterns in the Geologic and Magmatic Evolution of Calderas: A Case Study at Taal Volcano, Philippines [D]. Tokyo: Tokyo University, 1994.
- [18] Robin C, Eissen J P, Monzier M. Ignimbrites of Basaltic Andesite and Andesite Compositions from Tanna, New Hebrides Arc [J]. *Bulletin of Volcanology*, 1994, 56(1):10-22.
- [19] Knittel U, Dietmar O. Basaltic Volcanism Associated with Extensional Tectonics in the Taiwan-Luzon Island Arc: Evidence for Non-Depleted Sources and Subduction Zone Enrichment [J]. *Geological Society London Special Publications*, 1994, 81(1):77-93.
- [20] Lagmay A, Valdivia W. Regional Stress Influence on the Opening Direction of Crater Amphitheatres in Southeast Asian Volcanoes [J]. *Journal of Volcanology & Geothermal Research*, 2006, 158(1/2): 139-150.
- [21] Rose W I, Chesner C A. Worldwide Dispersal of Ash and Gases from Earth's Largest Known Eruption: Toba, Sumatra, 75 ka [J]. *Global and Planetary Change*, 1990, 3(3):269-275.
- [22] Miklius A, Flower M, Huijsmans J, et al. Geochemistry of Lavas from Taal Volcano, Southwestern Luzon, Philippines: Evidence for Multiple Magma Supply Systems and Mantle Source Heterogeneity [J]. *Journal of Petrology*, 1991, 32(3):593-627.
- [23] Pallister J S, Hoblitt R P, Reyes A G. A Basalt Trigger for the 1991 Eruptions of Pinatubo Volcano? [J]. *Nature*, 1992, 356:426-428.
- [24] Haeckel M, van Beusekom J, Wiesner M G, et al. The Impact of the 1991 Mount Pinatubo Tephra Fallout on the Geochemical Environment of the Deep-sea Sediments in the South China Sea [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2001, 93: 151-166.
- [25] Jentzsch G, Haase O, Kroner C, et al. Mayon Volcano, Philippines: Some Insights into Stress Balance [J]. *Journal of Volcanology & Geothermal Research*, 2001, 109(1/2/3):205-217.
- [26] Castillo P R, Newhall C G. Geochemical Constraints on Possible Subduction Components in Lavas of Mayon and Taal Volcanoes, Southern Luzon, Philippines [J]. *Journal of Petrology*, 2004, 6:1089-1108.
- [27] Aldiss D T, Ghazali S A. The Regional Geology and Evolution of the Toba Volcano-Tectonic Depression, Indonesia [J]. *Journal of the Geological Society*, 1984, 141(3): 487-500.
- [28] Lorius C, Barkov N I, Jouzel J, et al. Antarctic Ice Core: CO₂ and Climatic Change over the Last Climatic Cycle [J]. *EOS*, 1988, 69: 681-684.
- [29] 黄镇国,蔡福祥. 雷琼第四纪火山活动的新认识 [J]. *热带地理*, 1994, 14(1): 1-10.
- Huang Zhenguo, Chai Fuxiang. A New Approach to the Quaternary Volcanicity in the Leiqiong Area [J]. *Tropical Geography*, 1994, 14(1): 1-10.
- [30] 樊祺诚,孙谦,龙安明,等.北部湾涠洲岛及斜阳岛火山地质与喷发历史研究 [J]. *岩石学报*, 2006, 22(6): 1529-1537.
- Fan Qicheng, Sun Qian, Long Anming, et al. Geology and Eruption History of Volcanoes in Weizhou Island and Xieyang Island, Northern Bay [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(6): 1529-1537.
- [31] 许建东,于红梅,赵波,等.广西北海涠洲岛火山最后喷发活动时代 [J]. *岩石学报*, 2020, 36(7): 2111-2115.
- Xu Jiandong, Yu Hongmei, Zhao Bo, et al. The Chronology of Last Eruption of Weizhou Island Volcano in Northern Bay of Guangxi Province [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2020, 36(7): 2111-2115.
- [32] 王丽竹,赵勇伟,李霓,等.广东涠洲岛火山碎屑成因与水下火山喷发机制 [J]. *岩石学报*, 2023, 39(3): 907-920.
- Wang Lizhu, Zhao Yongwei, Li Ni, et al. The Genesis of Pyroclasts and the Mechanism of Submarine Eruption of Naozhou Island in Guangdong, South China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2023, 39(3): 907-920.
- [33] 王霄飞,李三忠,龚跃华,等.南海北部活动构造及其对天然气水合物的影响 [J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2014, 44(2): 419-431.
- Wang Xiaofei, Li Sanzhong, Gong Yuehua et al. Active Tectonics and Its Effect on Gas Hydrate in Northern South China Sea [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2014, 44(2): 419-431.
- [34] 郝国丽,蒋迪娅,许风光,等.珠江口盆地恩平凹陷西南部火山岩相和火山机构特征及其分布控制因素 [J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2024, 54(6): 1951-

1967.

Hao Guoli, Jiang Diya, Xu Fengguang, et al. Characteristics and Controlling Factors of Distribution of Volcanic Facies and Volcanic Edifice in Southwestern Enping Sag, Pearl River Mouth Basin [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54(6): 1951 - 1967.

[35] 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, et al. 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.

[36] Yan Quanshu, Shi Xuefa, Wang Kunshan, et al. Major Element, Trace Element, and Sr, Nd and Pb Isotope Studies of Cenozoic Basalts from the South China Sea [J]. Science in China: Series D: Earth Sciences, 2008, 51(4): 550 - 566.

[37] 李诗颖,余克服,张瑜,等. 西沙群岛基底火山碎屑岩中单斜辉石的矿物化学特征及其地质意义[J]. 海洋学报,2019, 41(7):66 - 76.

Li Shiyong, Yu Kefu, Zhang Yu, et al. Mineral Chemistry of Clinopyroxene in Pyroclastic Rocks of the Xisha Islands and Their Geological Significance [J]. Haiyang Xuebao,2019, 41(7):66 - 76.

[38] 任江波,王嘹亮,鄢全树,等. 南海玳瑁海山玄武质火山角砾岩的地球化学特征及其意义[J]. 地球科学:中国地质大学学报,2013,38(增刊 1):10 - 20.

Ren Jiangbo, Wang Liaoliang, Yan Quanshu, et al. Geochemical Characteristics and Its Geological Implications for Basalts in Volcaniclastic Rock from Daimao Seamount [J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2013, 38(Sup.1): 10 - 20.

[39] 李平原,刘志飞. 南海中央海盆晚中新世深海火山碎屑沉积的遗迹学特征及意义[J].地球科学, 2018, 43(增刊 2): 203 - 213.

Li Pingyuan, Liu Zhifei. Characteristics and Significance of Trace Fossils in Late Miocene Deep-Sea Volcaniclastic Sediments in the Central Basin of South China Sea[J]. Earth Science,2018, 43(Sup.2): 203 - 213.