

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.130>



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

李平原, 刘志飞

同济大学海洋地质国家重点实验室, 上海 200092

摘要: 火山碎屑沉积是南海深海沉积的重要组成部分, 因记录了火山活动影响下特殊的深海环境演变过程, 具有重要的科研价值。为了解火山活动期和活动间歇期底栖环境的演变过程, 对 IODP349 航次 U1431 站火山碎屑岩地层的生物遗迹记录开展了研究。研究发现, 在中中新世—晚中新世 (12.5~7.4 Ma, 主要在晚中新世) 期间遗迹化石在该套地层的粉砂岩和泥岩层中广泛发育, 以 *Zoophycos*、*Thalassinoides*、*Chondrites* 和 *Planolites* 为主要类型。晚中新世研究区所在南海深海海盆经历了多次火山活动期和火山活动间歇期的交替演变, 研究站位遗迹化石组合特征与现代南海中央海盆遗迹化石种属相似, 指示了火山活动间歇期深海环境特征, 沉积速率在 5~15 cm/ka 范围水体平静, 同时有足够的营养物质供给, 适合底栖生物的生存。通过分析遗迹化石组合与地层岩性特征之间的联系, 研究发现遗迹化石不仅受限于底质岩性 (主要发育在粉砂岩和泥岩中), 还受控于沉积物的含氧量。研究推测海底火山活动为表层海水提供营养盐, 促使浮游生物发育, 浮游生物死亡后沉降至海底, 增加了表层沉积物有机碳的供给, 但消耗大量氧气, 不利于底栖生物活动; 反之, 在火山活动间歇期, 洋底表层沉积物有机碳含量降低, 溶解氧消耗减少, 有利于底栖生物生存。

关键词: 南海中央海盆; 遗迹化石; 晚中新世; IODP 349 航次 U1431 站; 火山碎屑沉积; 沉积学。

中图分类号: P67

文章编号: 1000 — 2383(2018)S2 — 0203 — 11

收稿日期: 2018 — 03 — 11

Characteristics and Significance of Trace Fossils in Late Miocene Deep-Sea Volcaniclastic Sediments in the Central Basin of South China Sea

Li Pingyuan, Liu Zhifei

State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China

Abstract: Volcaniclastics is one of the important compositions of deep-sea sediments produced by volcanic eruptions. It is with great research values for studies on paleoenvironmental evolution in the deep-sea volcanic environment. The purpose of this work is to reveal the pattern of the Late Miocene benthic environment revolution in the central basin of the South China Sea (SCS) by analyzing the trace fossil assemblages in the volcaniclastic sequence drilled at site U1431 during the International Ocean Discovery Program (IODP) expedition leg 349. The study shows that trace fossils were developed well in siltstone and claystone during the Middle-Late Miocene (12.5–7.4 Ma, mainly in Late Miocene), and were dominated by *Zoophycos*, *Thalassinoides*, *Chondrites*, and *Planolites*. The volcanoes in the central basin of the SCS experienced repeated alternations of eruption and quietness during Late Miocene. The trace fossil assemblage in site U1431 implies that the basin is a quiet deep-sea environment with sedimentary rate varying between 5–15 cm/ka during volcanic activity quiet periods. By analyzing the associations between the trace fossil assemblages and the lithologic stratigraphic features, the study shows that the composition of the trace fossil assemblage is limited by substrate lithology and the dissolved oxygen concentration in the water masses at the sediment/water interface. The study also suggests that during eruptions, submarine volcanic activities can potentially provide nutrients for surface seawaters, and these nutrients can promote phytoplankton growth and subsequently increase the supply of organic carbon to the seafloor. The organic carbon on the sea floor then may consume the dissolved oxygen in the sediment pore water, making it unfavorable to the activities of the benthic organisms. In contrast, during volcanic eruption quiet periods, flux of organic carbon to the seafloor possibly reduced. Consumption of the dissolved oxygen in the pore water thus reduced, and the growth of the benthic organisms subsequently developed.

Key words: central basin of South China Sea; trace fossil; Late Miocene; IODP expedition leg 349 site U1431; volcaniclastic deposit; sedimentology.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (Nos.41530964, 91528304).

作者简介: 李平原 (1986 —), 男, 博士研究生, 主要从事海洋地质学研究. ORCID:0000-0002-9142-1622. E-mail:19862006py@tongji.edu.cn

引用格式: 李平原, 刘志飞, 2018. 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. 地球科学, 43 (Suppl. 2): 203–213.

0 引言

南海位于欧亚—太平洋—印澳板块的交汇处,是火山活动的多发地带,火山碎屑物质广泛地分布在中央海盆深海沉积之中.火山活动对深海底栖环境的影响十分复杂,剧烈的火山活动对生活在其周围的生物产生毁灭性的影响,但产生的大量营养物质又能够促进附近生物生长发育,进而影响深海生态系统的更替和演变.由于研究手段有限,缺乏深部钻探取心,目前针对南海海底火山活动对底栖环境影响的了解十分有限.

遗迹化石是研究地质时期底栖环境演变的重要工具,它不仅能指示水动力和水深特征,还能指示地层的氧化还原状况和生产力等多个环境因子(Ekdale and Mason, 1988; Doradoret al., 2016).南海深海海盆的表层沉积物和第四纪以来的地层中已发现了大量的生物遗迹化石记录,对了解底栖环境的演变具有十分重要的意义(Wetzel, 2002, 2008; Wetzel et al., 2011).Wetzel(2002)发现南海深海海盆广泛分布着 *Nereites* 遗迹相,发育在水深大于 4 000 m 洋底之下 3~7 cm 深海富氧软泥中.Wetzel et al.(2011)通过研究地质时期遗迹化石的分布特征发现南海 *Zoophycos* 的出现与冰期季风加强大洋上升流加强,生产力较高有关.

2014 年春,国际大洋发现计划(International Ocean Discovery Program, IODP)349 航次发现南海中央海盆 U1431 站晚中新世沉积了 280 m 厚的火山碎屑岩层(Li et al., 2015),在该地层中发育有丰富的遗迹化石,表明在海底火山活动时期的特殊环境下同样有大量的生物生存,这些遗迹化石的形成原因和指示的沉积环境对研究南海中央海盆晚中新世特殊条件下的底栖环境演变具有重要意义.本文通过对 U1431 站火山碎屑岩地层遗迹化石的鉴定和分析,探讨海底火山活动期和活动间歇期的生物活动概况以及当时的深海海底环境演变过程和响应机制.

1 研究区概况和地层层序特征

南海中央海盆深海海盆呈菱形,南北向长为 1 600 km,东西向宽为 700 km,水深 3 000~4 400 m(图1).中央海盆通过吕宋海峡与太平洋沟通,该海峡深约 2 600 m,是南海与西太平洋之间唯一的沟通渠道,西太平洋的深层富氧水体(溶解氧含量: 2 mL

O₂/L)通过吕宋海峡进入南海,流向整个深水海盆(Wetzel, 2008).因有充足的陆缘物质、氧气供应和季节性营养物质供应,中央海盆海底营养物质丰富,适合底栖动物生活(Wetzel, 2002, 2008).

中央海盆中部分布着多座海山,这些海山东西向排列成链状组成珍珠—黄岩海山链.该海山链东西长约为 540 km,南北宽约为 40 km,含有多座相对高差超过 3 000 m 的海山,珍珠海山和黄岩海山在晚中新世均有活动记录(王贤觉等, 1984; 王叶剑等, 2009; 雷超等, 2015).IODP349 航次 U1431 站(15°22.5'N, 117°0.01'E, 水深 4 240 m)邻近南海中央海盆扩张脊,紧靠珍珠—黄岩海山链(图1).U1431 站钻进深度 1 008 m,获取岩心 644.5 m,取心率为 63.9%.岩性由 3 部分组成,包括底部 116 m 厚的玄武岩地层,中部 280 m 厚的火山碎屑岩地层,上部 603 m 厚的粉砂和细砂沉积地层(Li et al., 2015).

火山碎屑岩地层发育在研究站位的 603~882 m 深度,取心率 68.4%(Li et al., 2015).岩性为火山碎屑岩,由火山角砾岩、砂岩、粉砂岩和泥岩等不同岩性单元组成,火山角砾岩层累计厚度为 53.2 m,砂岩累计厚度层为 87.7 m,泥岩和粉砂岩累计厚度层为 51.4 m.

该套地层序列由老至新形成了 6 套沉积特征差异显著的岩性单元(图1).第 I 单元,深度为 882~827 m,由砂岩、粉砂岩和泥岩组成,下部(882~865 m)粉砂岩和泥岩厚度超过砂岩,上部(865~827 m)的砂岩厚度超过泥岩;第 II 单元,深度为 827~819 m,由角砾岩组成,角砾粒径范围 2~4 cm,呈棱角状,无明显的沉积构造;第 III 单元,深度为 819~797 m,由砂岩和浅灰色泥岩组成,泥岩中发育丰富的遗迹化石;第 IV 单元,深度为 797~700 m,由厚层的角砾岩和砂岩组成;第 V 单元,深度为 700~652 m,由互层的砂岩、粉砂岩和泥岩组成,并以泥岩层为主,粉砂岩和泥岩中发育有遗迹化石;第 VI 单元,深度为 652~603 m,由角砾岩、砂岩与少量泥岩组成,泥岩中不发育遗迹化石.

该套地层属于典型的深海火山裙沉积相.该沉积相发育在海底火山的外围,火山锥至深海平原过渡的区域.火山裙相可以进一步划分为内裙亚相,中裙亚相和外裙亚相.其中,IODP U1431 站第 II、第 IV 和第 VI 单元属于内裙亚相沉积,其特点是由火山角砾岩组成,含有玄武岩块体以及由火山锥滑塌产生的

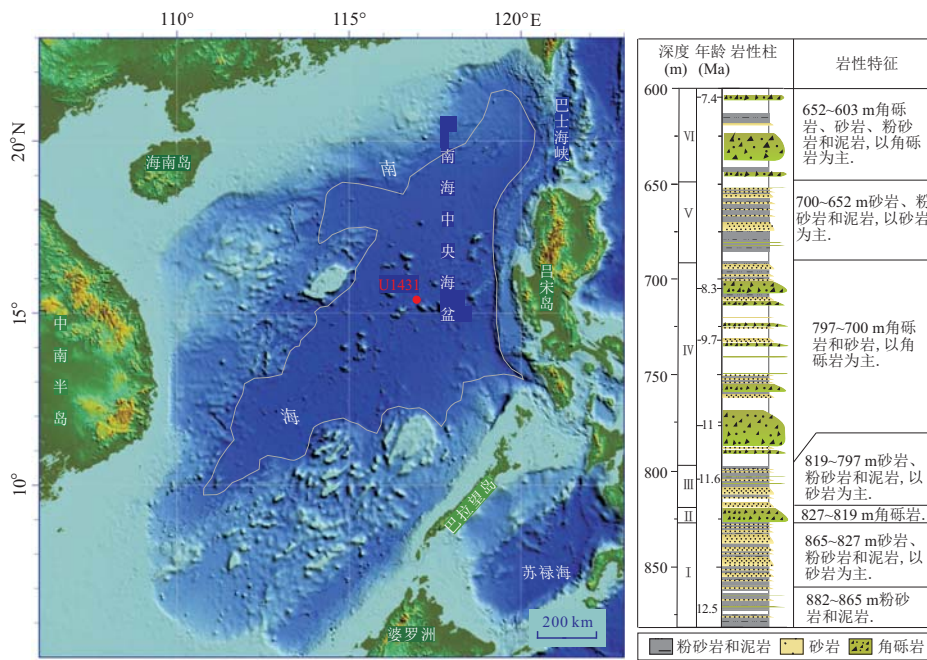


图 1 南海中央海盆地形图及 IODP 349 航次 U1431 站火山碎屑岩序列岩性

Fig.1 Topographic map of the central basin of South China Sea and the stratigraphy of the volcanoclastic sequence in IODP 349 site U1431

碎石, 颗粒纷杂, 沉积方式以碎屑流沉积为主, 除此之外还有颗粒流沉积, 因其靠近火山锥坡度较陡, 搬运过程最为剧烈; 第 I 单元上部以及第 III 单元属于中裙亚相沉积, 沉积物多为砂岩, 沉积厚度较内裙薄, 以颗粒流沉积为主, 浊流沉积次之, 中裙坡度比内裙缓, 依靠海底水道将火山碎屑从内裙将碎屑搬运而来; 第 I 单元下部和第 V 单元, 属于外裙亚相沉积, 受火山影响较弱, 以浊流沉积和远洋泥岩沉积为主, 远洋陆缘物质影响程度最深, 但沉积厚度最薄, 沉积路径为火山裙外缘水道溢流沉积 (图2).

遗迹化石在火山裙的内裙、中裙和外裙沉积亚相中均有不同程度的发育, 其中外裙最为发育、中裙次之, 以第 I、第 III 和第 V 地层单元最为集中.

2 材料与方法

本文的研究对象遗迹化石主要发育在粉砂岩和泥岩层中. 泥岩和粉砂岩沉积在地层序列中通常上覆于砂岩之上, 每层厚度 0.1~1.0 m, 呈暗灰色. 遗迹化石填充物呈现白色与之有鲜明对比, 十分容易辨认, 并且分布广泛 (图3).

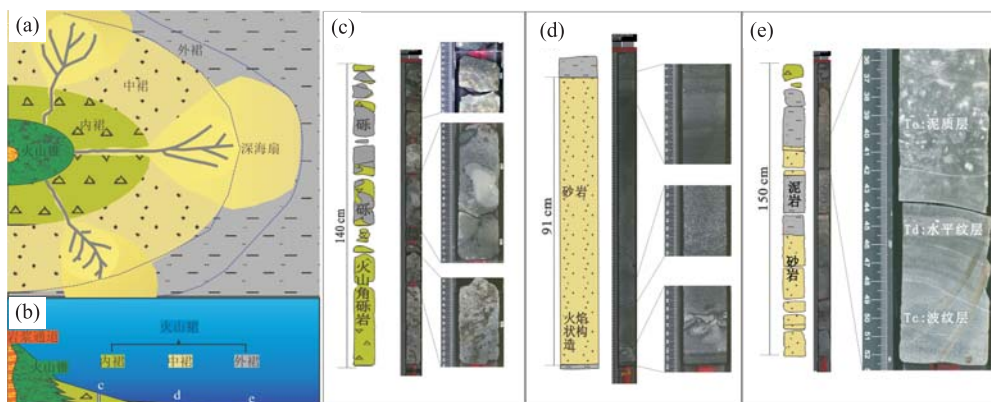


图 2 南海中央海盆 IODP 349 航次 U1431 站火山裙沉积模式图和典型沉积序列

Fig.2 Volcaniclastic apron deposition pattern and typical sedimentary sequence of IODP 349 site U1431 in the SCS central basin

(a) 海底火山垂直结构示意; (b) 海底火山水平结构面示意; (c) 内裙亚相沉积, 取自 IODP 349 航次 U1431 站 624.1~625.5 m 深度; (d) 中裙亚相沉积, 取自 IODP 349 航次 U1431 站 840.0~841.0 m 处; (e) 外裙亚相沉积, 取自 IODP 349 航次 U1431 站 654.4~656.1 m 处

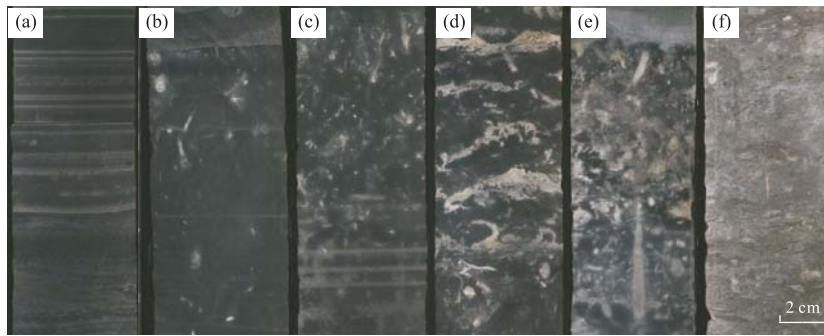


图 3 IODP U1431 站生物扰动指数

Fig.3 Variation of bioturbation index in IODP site U1431

图中从左到右生物扰动不断加强: a. 没有生物遗迹出现, 生物扰动指数为 0, 取自 IODP U1431 站 828.5~828.6 m 处; b. 轻微生物扰动, 扰动指数为 1, 取自 869.8~869.9 m 处; c. 中等程度生物扰动, 扰动指数为 2, 取自 759.8~759.9 m 处; d. 生物扰动程度高, 扰动指数为 3, 取自 800.2~800.3 m 处; e. 强烈生物扰动, 扰动指数为 4, 658.9~659.0 m 处; f. 剧烈生物扰动, 扰动指数为 5, 取自 677.9~678.0 m 处

研究材料主要包括 IODP 第 349 航次提供的高分辨率岩心照片、地层岩性描述资料以及钙质超微化石年代框架。钙质超微化石年龄框架在火山碎屑岩地层中分布有 7 个年龄控制点, 其中底部 873.74 m 处年龄为 12.46 Ma, 顶部 603.32 m 处年龄为 7.42 Ma, 火山碎屑岩地层从底部到顶部经历约为 5 Ma (表 1; Li *et al.*, 2015)。

本文研究以观察岩心照片为主要手段。首先, 根据岩心的岩性特征掌握粉砂岩和泥岩分布的主要层位; 其次, 对粉砂岩和泥岩进行详细观察, 按照遗迹化石形态进行对比, 进行辨识, 记录其类型与发育层位; 最后, 对生物扰动指数进行统计。生物扰动指数是指示生物活动频繁程度的指标, 根据生物对沉积物的改造程度分为不同的等级, 用来半定量分析生物活动的强弱 (Ekdale and Mason, 1988)。Taylor and Goldring (1993) 将生物扰动指数分为 6 个等级: 0 表示没有任何生物扰动 (图 3a); 1 和 2 等级, 生物扰动程度较低, 地层自然沉积层理占主导, 受环境因子 (如氧气含量、盐度、营养物质含量) 限制显著, 生物为逃逸迹 (分别为图 3b 和 3c); 3 和 4 等级, 生物扰动中等程度, 扰动的密度增大, 类型多样, 自然沉积层理遭到完全破坏 (分别为图 3d 和 3e); 5 和 6 等级生物扰动极其强烈, 自然沉积层理因生物反复改造破坏殆尽, 遗迹化石相互叠加 (第 5 等级为图 3f, 研究站位未发现第 6 等级)。所有的实验与统计分析工作均在同济大学海洋地质国家重点实验室完成。

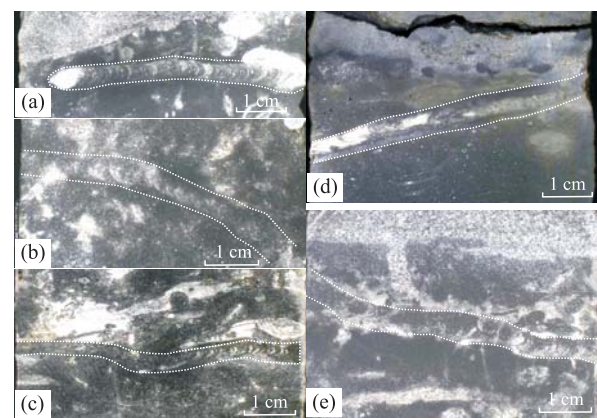
3 遗迹化石的主要类型

根据遗迹化石的形态特征, U1431 站火山碎屑岩层的粉砂岩和泥岩夹层中主要的遗迹化石包括

Zoophycos、*Thalassinoides*、*Chondrites* 和 *Planolites* 四种, 还发育有少量的 *Rhizocorallium* 遗迹, 但由于岩心鉴定遗迹化石的限制, 本文遗迹化石均鉴定至遗迹属级别。

Zoophycos 是泥岩夹层中的标志属种, 它是具有螺旋形蹼状构造的觅食迹。蹼状构造在岩心垂直岩层的切面上表现为紧密排列的新月形或者弧形深浅交替蹼纹, 是掘穴生物在觅食过程中主动充填潜穴所留下的遗迹。*Zoophycos* 蹼纹厚度约 1 mm, 弯曲方向一致, 蹼层厚度约 5~10 mm, 呈水平状或倾斜状出现在岩心中 (图 4)。

Thalassinoides 是 Y 形分枝潜穴系统, 直径 4~10 mm, 分枝规则, 表面光滑, 主干直径约为 10 mm, 侧枝直径较细约为 5 mm, 潜穴填充物为白色, 水平状或倾斜状分布在岩心切面中 (图 5)。

图 4 IODP U1431 站位火山碎屑岩地层中的 *Zoophycos* 遗迹
Fig.4 *Zoophycos* in volcaniclastic stratum of IODP site U1431

图中 a、b、c、d 和 e 分别取自 U1431 站位 807.2 m、849.2 m、878.7 m、677.1 m 和 866.5 m 处; 照片引用自 IODP349 航次报告 (Li *et al.*, 2015), 本文对其开展了遗迹化石分析

表 1 IODP U1431 站火山碎屑岩地层钙质超微化石年龄框架
Table 1 Depths and ages of calcareous nannofossil events in IODP U1431

钙质超微化石分带	钙质超微化石事件 *	地层深度 (m)	年龄 (Ma)
NN11	B <i>Amaurolithus primus</i> / <i>Amaurolithus spp.</i>	603.32	7.42
NN11/NN10	B <i>Discoaster berggrenii</i>	707.40	8.29
NN9	B <i>Minylitha convallis</i>	730.42	9.75
NN7	T <i>Coccolithus miopelagicus</i>	779.32	10.97
	T <i>Discoaster kugleri</i>	807.28	11.58
NN7/NN6	B <i>Discoaster kugleri</i>	864.10	11.9
	B <i>Calcidiscus macintyreii</i>	873.74	12.46

*B 代表初现面 (base/first appearance datum), T 代表末现面 (top/last appearance datum), 该表中数据源自 Li *et al.* (2015).

表 2 生物扰动指数的鉴别特征
Table 2 Recognition of Bioturbation Index

等级	生物扰动/沉积层 (%)	特征
0	0	无任何扰动
1	1~4	生物扰动稀少, 自然沉积层理清晰, 生物遗迹分散, 或为逃逸迹
2	5~30	生物扰动较少, 自然沉积层理清晰, 生物扰动密度低, 常见逃逸迹
3	31~60	中等程度生物扰动, 自然沉积层理面突出, 生物遗迹分散, 不可见交切关系
4	61~90	生物扰动程度高, 自然沉积层理模糊, 生物遗迹密度高, 交切关系常见
5	91~99	生物扰动剧烈, 自然沉积层理完全破坏, 出现再次改造现象
6	100	完全生物扰动状态, 自然沉积层理被生物活动多次改造完全破坏

据 Taylor and Goldring (1993).

Chondrites, 小型树枝状潜穴系统, 直径 0.5~2.0 mm, 长度小于 10 mm, 枝干上有 Y 形的分支, 分支角为 20°~40°, 个体较其他遗迹化石小, 多数呈现 Y 形, 相互之间较分散, 广泛地分布在粉砂岩和泥岩层位, 是 U1431 站分布较多的遗迹属 (图6).

Planolites, 管状潜穴, 直径为 2~5 mm, 遗迹填充物呈白色, 水平分布于岩心切面中, 最明显特点是不分枝, 表面光滑, 在切面上多呈现间断出现管状构造 (图7).

Rhizocorallium, 宽 20~50 mm, 长 10~60 mm, 平行分布于岩心切面中, 是 U 形蹼状构造的潜穴, 两翼边缘管近乎平行, 蹼状构造呈现向下凹陷的舌状重叠, 该遗迹化石通常存在于滨海相的

环境中, 最近研究发现该遗迹在深海相中也有所发现 (Knaust, 2013). 岩心图片中该遗迹化石分布较少, 仅确认两例, 位于火山碎屑岩地层的底部粉砂岩泥岩沉积中 (图8).

U1431 站遗迹化石组合主要有以下特点: (1) 遗迹化石以 *Chondrites*、*Zoophycos*、*Thalassinoides*、*Planolites* 等类型最常见; (2) 遗迹化石多以水平向活动为主, 少数以斜向为主, 表明水平向活动十分频繁, 没有发现垂直结构的居住迹; (3) 遗迹化石发育丰富, 但种类较为贫乏.

4 讨论

前人研究表明, 南海中央海盆沉积环境复杂多样, 遗迹化石种类丰富, 不仅可以指示水深、水体含氧量、季风变化, 还可以指示水体流速以及沉积速率等重要信息 (Wetzel, 2002, 2008; 李文宝和王汝建, 2016), 因此利用遗迹化石对南海深海海盆晚中新世海底环境的恢复具有十分重要的意义.

4.1 南海中央海盆晚中新世海底火山活动间歇期海底环境特征

U1431 站火山碎屑岩地层从 12.5 Ma 开始, 至 7.4 Ma 结束, 持续约 5 Ma, 期间既经历了剧烈的火山活动环境形成了厚层的火山角砾岩沉积地层, 又经历了安静的深海环境, 沉积了粉砂岩和泥岩地层, 其中包含较为丰富的遗迹化石. 粉砂岩

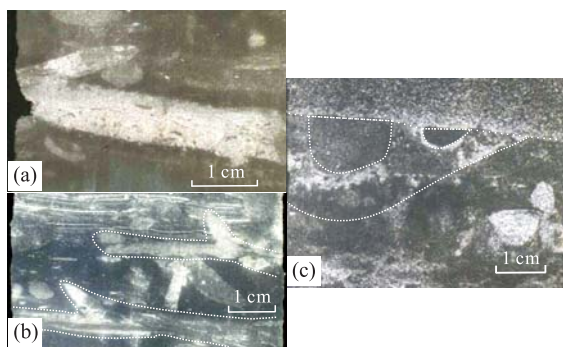


图 5 U1431 站位火山碎屑岩地层中的 *Thalassinoides* 遗迹
Fig.5 *Thalassinoides* in volcaniclastic stratum of IODP site U1431

图中 a、b 和 c 分别取自 U1431 站位 665.7 m、850 m 和 881.9 m 处; 照片引用自 IODP349 航次报告 (Li *et al.*, 2015), 本论文对其开展了遗迹化石分析

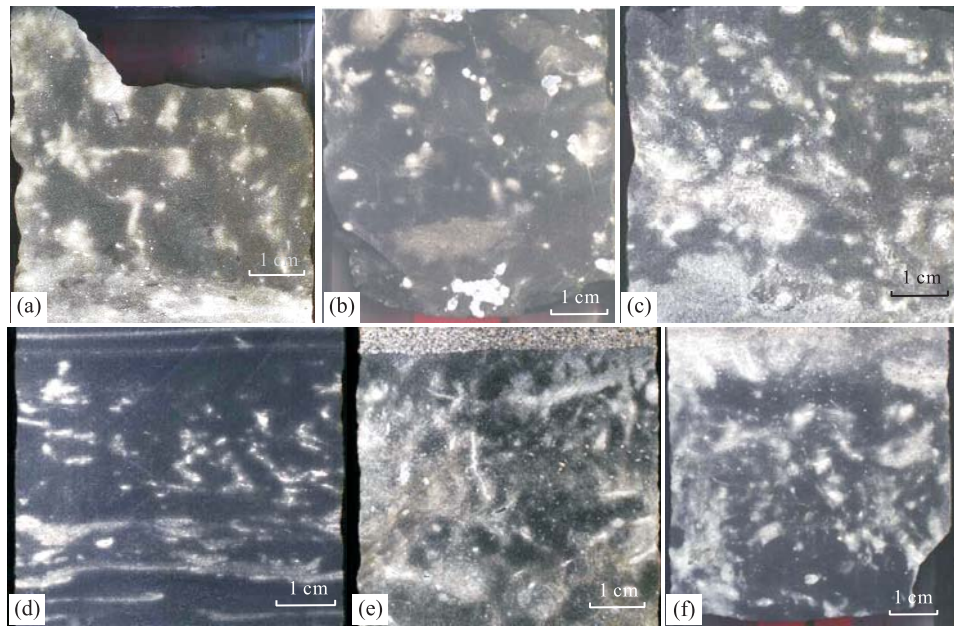
图 6 U1431 站位火山碎屑岩地层中的 *Chondrites* 遗迹化石Fig.6 *Chondrites* in volcaniclastic stratum of IODP site U1431

图 a、b 和 c 分别取自 U1431 站位 724.8 m、752.1 m 和 801.5 m 处；图 d、e 和 f 分别取自 843.2 m、867.1 m 和 876.3 m 处；照片引用自 IODP349 航次报告 (Li *et al.*, 2015)，本论文对其开展了遗迹化石分析

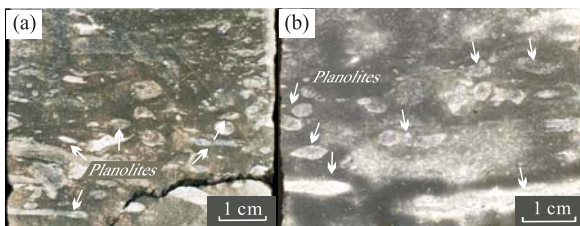
图 7 U1431 站位火山碎屑岩地层中的 *Planolites* 遗迹Fig.7 *Planolites* in volcaniclastic stratum of IODP site U1431

图 a 和 b 分别取自 U1431 站位 679 m 和 877 m 处；照片引用自 IODP349 航次报告 (Li *et al.*, 2015)，本论文对其开展了遗迹化石分析

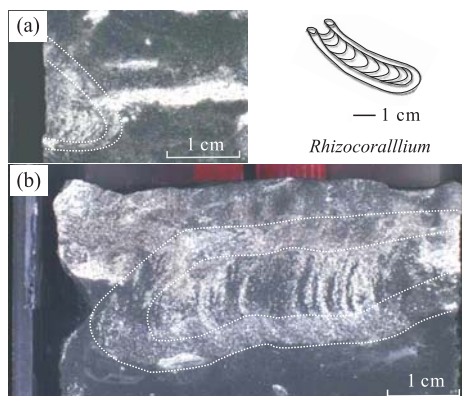
图 8 U1431 站位火山碎屑岩地层中的 *Rhizocorallium* 遗迹
Fig.8 *Rhizocorallium* in volcaniclastic stratum of IODP site U1431

图 a 和 b 分别取自 U1431 站位 871.9 m 和 873.3 m 处；照片引用自 IODP349 航次报告 (Li *et al.*, 2015)，本论文对其开展了遗迹化石分析；*Rhizocorallium* 遗迹图像引自 Miller (2007)

和泥岩中出现最多的遗迹化石为 *Zoophycos*、*Thalassinoides*、*Chondrites* 和 *Planolites* 4 种 (图 9)，早期 (第 I 单元) 和晚期 (第 V 单元) 遗迹化石属种与形态特征没有明显变化，表明在晚中新世期间该区域一直被相似的遗迹群落占据。从沉积环境考虑，U1431 站粉砂岩和泥岩地层岩性十分均一，没有反映较强水动力条件的波痕或其他沉积构造出现。现代南海中央海盆 *Zoophycos*、*Thalassinoides*、*Chondrites* 和 *Planolites* 遗迹化石组合主要分布在 118°E 水深大于 4 000 m 的深海细颗粒泥岩沉积中，有机质含量为 0.4%~0.6%，造迹生物活动集中在氧化还原带上下 (Wetzel, 2008)。观测记录显示，南海深海底层水流速小于 1.5 cm/s (Wang *et al.*, 2011)，该流速可以保证底栖生物在海底表层不受影响的自由活动。参考粉砂岩和泥岩沉积特征，结合现代南海的底栖环境研究，我们推测 U1431 站在火山活动间歇期处在平静的深海沉积环境中。

虽然研究站位角砾岩和砂岩沉积发育频繁，指示研究区域多次经历了十分剧烈的火山喷发活动，形成厚层的火山碎屑沉积，但这些沉积属于快速事件沉积，发育时间相对较短。而在海底火山间歇期，研究站位发育有粉砂岩和泥岩沉积 (第 I 和第 V 单元)，粉砂岩和泥岩沉积速率相对较慢，发育需要一个相

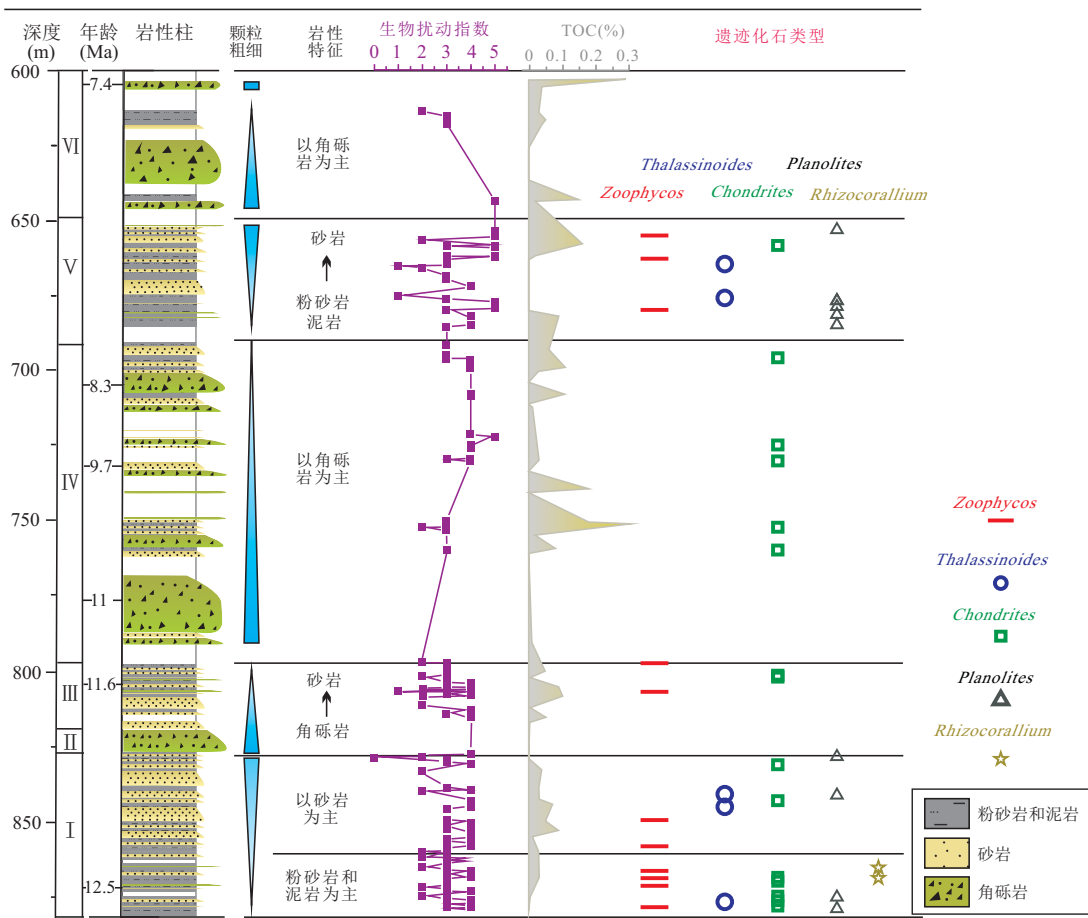


图 9 IODP U1431 站岩性、生物扰动程度变化图以及遗迹化石的分布

Fig.9 Lithostratigraphic, bioturbation index and trace fossil distributions in IODP site U1431

生物扰动指数根据图3和表2划分;红色横线指示该地层中出现 Zoophycos;地层年代根据钙质超微化石,与 TOC 数据都来自 Li et al.(2015)

当长的时间.但是根据航次报告提供的钙质超微化石年龄框架,粉砂岩和泥岩的沉积速率为 12~18 cm/ka, 不仅远高于火山碎屑岩层的平均沉积速率 (8 cm/ka), 更高于火山角砾岩层的沉积速率 (<5 cm/ka, 图10; Li et al., 2015). 验证钙质超微化石年龄准确性对了解海底火山活动具有十分重要的意义, 遗迹化石学对验证沉积速率具有帮助作用.

Zoophycos 对海底沉积物的沉积速率具有指示意义. Dorador et al. (2016) 统计发现 Zoophycos 在沉积速率为 5~20 cm/ka 的范围内出现最频繁, 沉积速率太慢, 有机质容易氧化, 食物贫乏不利于 Zoophycos 的发育, 洋底沉积物通常因氧化而呈现红色; 沉积速率太快, 有机质太多, 利于其他简单牧食、觅食遗迹发育, 同样不利于 Zoophycos 的发育. Wetzel et al.(2011) 在南海中央海盆 187-61 站位也发现, Zoophycos 主要出现在沉积速率为 5~12 cm/ka 的地层中. Zoophycos 作为 U1341 站的标志性遗迹化石, 在地层中共出现了 11 次, 主要分布在第 I、第 III 和第

V 单元 (图9和图10), 指示地层中粉砂岩和泥岩沉积速率在 5~20 cm/ka 之间, 该范围与根据航次报告中钙质生物的年龄框架计算的沉积速率相一致, 证实

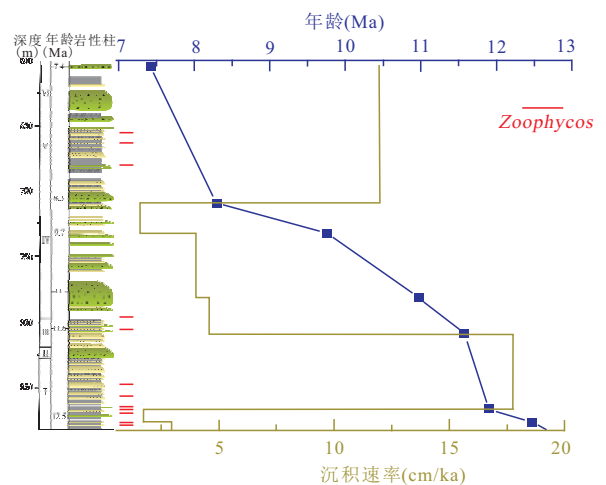


图 10 IODP U1431 站沉积速率变化图和 Zoophycos 分布 Fig.10 Sedimentary rate and Zoophycos distribution in IODP site U1431

地层年代根据钙质超微化石,数据来自 Li et al.(2015)

该年龄框架具有一定的可信度. 研究站位部分层位泥岩和粉砂岩厚度超过 100 cm, 平均厚度超过 30 cm, 遗迹化石通常是连续均匀分布, 指示造迹生物持续活动而未出现间断, 推测研究站位沉积物长期不断加积, 火山活动间隔的时间满足造迹生物长期活动的要求. 而长期稳定的深海环境, 可以为底栖生物的生存提供良好的机遇, 促进遗迹化石的形成和保存.

综合以上分析, U1431 站遗迹化石反映了晚中新世 (12.5~7.4 Ma) 中央海盆在火山活动影响下的底栖环境特点: 火山活动间隔的时间相对较长; 在火山活动间歇期, 底栖环境十分平静, 沉积速率在 5~20 cm/ka 之间, 持续时间相对较长, 有利于底栖生物的生存.

4.2 深海火山活动对遗迹化石发育的影响

前人研究发现遗迹化石的组合分布特征受到底栖环境的限制, 调控底栖环境的因素很多, 包括水深、底质、沉积速率、底流流速、潮汐和含氧量等 (杨式溥等, 2004). 火山活动对 IODP U1431 站遗迹化石的影响主要表现在底质岩性和含氧量两个方面. 首先, 遗迹化石底质岩性要求较高, 仅仅发育在粉砂岩和泥岩之中. 虽然 U1431 站角砾岩和砂岩的厚度占沉积序列的 67.7%, 但因颗粒粗糙质地坚硬, 不利于造迹生物的挖掘和筑穴, 更不利于造迹生物的滤食和捕食, 遗迹化石难以发育, 因此已发现的遗迹化石均发育在粉砂岩和泥岩中.

其次, 粉砂岩和泥岩中的遗迹化石主要受控于表层沉积物含氧量. Bromley and Ekdale (1984) 最早发现深海遗迹组合受表层沉积物含氧量的控制最为显著, 在含氧量高的底层水区域, 生物扰动指数较高,

种类丰富, 随着含氧量的下降, *Planolites* 首先消失, *Thalassinoides* 和 *Zoophycos* 随着氧含量的进一步下降而消失, 而 *Chondrites* 属于耐贫氧最强的遗迹, 最后消失. 随着氧气含量的降低, 个体大的遗迹化石首先消失, 个体小的最后消失 (图11).

对 U1431 站火山碎屑岩地层遗迹化石研究发现, 不同地层单元遗迹化石组合符合上述发育规律, 不同地层单元差异明显. 图9所示, 第 I 和第 V 单元, 遗迹化石 *Planolites*、*Thalassinoides*、*Zoophycos* 和 *Chondrites* 均十分发育; 第 III 单元粉砂岩和泥岩中 *Zoophycos* 和 *Chondrites* 较为发育; 第 IV 单元粉砂岩和泥岩层中遗迹化石的种类更少, 仅有 *Chondrites* 发育. 该特征指示了当时沉积物中氧气含量的变化, 第 I 和第 V 单元, 沉积物中氧气含量较高, 适合底栖生物活动; 而第 IV 单元, 沉积物中氧气含量相对较低, 不利于生物生存. 洋底表层沉积物中氧气的含量与有机质呈负相关关系 (Bromley and Ekdale, 1984), 航次报告提供的总有机碳 (TOC) 含量证实, 第 I 和第 V 单元, 中 TOC 含量最低, 而第 IV 单元中有机碳的含量相对较高.

海底火山活动过程中, 提供大量的营养物质促进了海洋表层浮游生物的生长发育, 在南海现代观测的过程中已经得到证实 (赵泉鸿和汪品先, 1999; 孙春青等, 2016). 浮游生物的生长发育使海底表层沉积物中有机碳的含量增加. U1431 站火山碎屑岩中角砾岩层的厚度和发育频次指示了火山活动的强度, 根据图9、图11和图12所示, 在火山活动较强的时期, 角砾岩发育频繁, 沉积物中有机质含量较高,

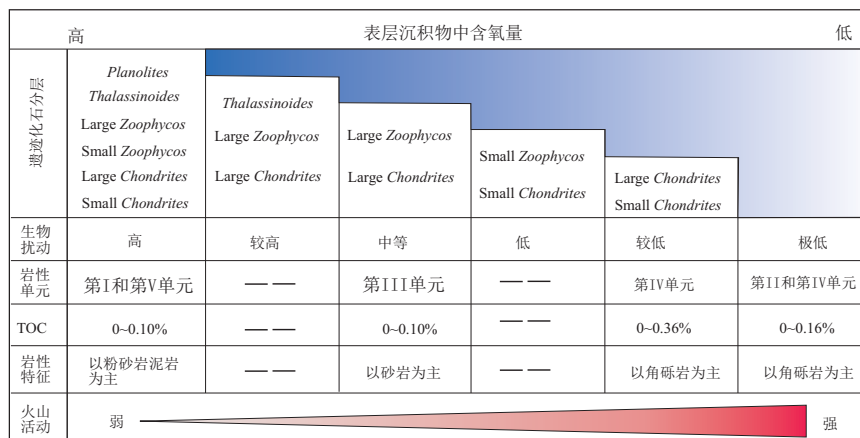


图 11 U1431 站遗迹化石组合特征分析

Fig.11 Analysis of trace fossil assemblage characteristics in IODP site U1431

图修改自 Bromley and Ekdale (1984)

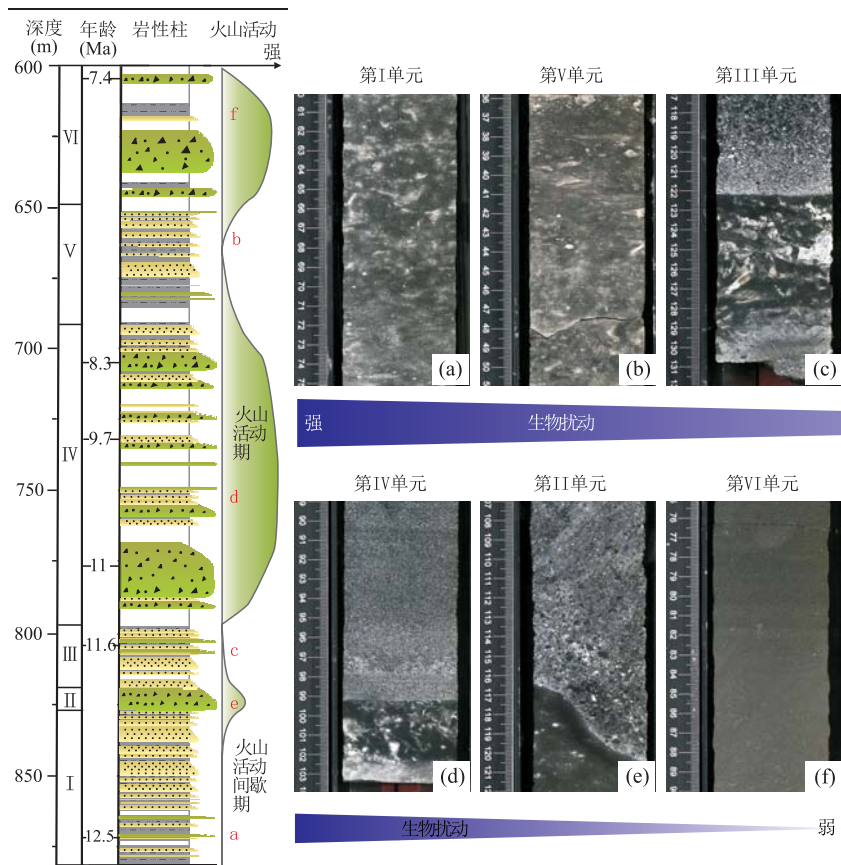


图 12 IODP U1431 站不同地层单元的生物扰动变化

Fig.12 Bioturbation variations in different units of IODP site U1431

图 a、b 和 c 分别取自 U1431 站位 875.5 m、657.4 m 和 803.4 m 处,生物扰动较为强烈;图 d、e 和 f 分别取 750.7 m、827.5 m 和 613.8 m 处,生物扰动较弱;照片引用自 IODP349 航次报告 (Li et al., 2015), 本论文对其开展了遗迹化石分析

氧气含量相对较低,不利于生物活动;在海底火山活动间歇期,沉积物中有机碳含量相对较低,氧气含量相对较高,有利于底栖生物活动。

归纳上述结论,本文对火山活动对底栖生物的影响过程进行还原。图13所示,当海底火山活动较为剧烈时,火山活动产生了大量的营养物质,促进了海洋表层浮游生物的生长发育,产生了丰富的有机质,这些有机质沉积到海底,使得海底表层沉积物 TOC 含量增加,氧气大量消耗,产生缺氧的环境,不利于底栖生物的生存,遗迹化石难以发育。当海底火山进入平静期,海底火山输送到表层海水中的营养盐大量减少,浮游生物活动减弱,产生的有机质相对减少,海底表层沉积物中的 TOC 含量也随之减少,溶解氧消耗减少,底栖生物大量活动,遗迹化石十分发育。

5 结论

本文利用 IODP349 航次 U1431 站火山碎屑岩地层泥岩和粉砂岩中发育的大量的生物遗迹化石,对

南海中央海盆晚中新世火山活动间歇期的底栖环境演变开展了研究。研究发现, U1431 站火山碎屑岩地层发育的遗迹化石以 *Zoophycos*、*Thalassinoides*、*Chondrites* 和 *Planolites* 最为常见。该遗迹属种组合特征表明,晚中新世 (12.5~7.4 Ma) 海底火山活动的间歇期,研究区底栖环境平静,营养物质供应丰富,是适于造迹生物活动的深海沉积环境。

通过分析遗迹化石组合特征与火山碎屑岩地层之间对应关系,发现遗迹化石首先受控于底质岩性特征,发育在粉砂岩和泥岩中;其次受控于深海表层沉积物含氧量。研究进一步推测剧烈的海底火山活动可以为表层海水提供丰富的营养物质,促进海洋表层浮游生物的发育,产生丰富的有机质,使洋底表层粉砂岩和泥岩中 TOC 含量增加,氧气含量下降,不利于底栖生物的活动,遗迹化石较难发育;当海底火山进入平静期,洋底表层的粉砂岩和泥岩中 TOC 含量相对减少,氧气含量增加,有利于遗迹化石发育。

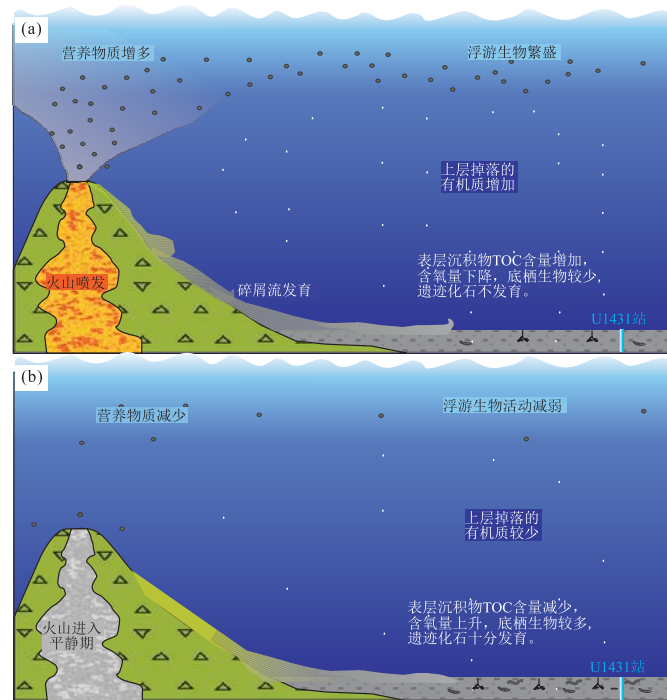


图 13 火山活动对遗迹化石发育的影响示意

Fig.13 Volcanic activity impact on the trace fossil development

a. 火山活动期间遗迹化石发育过程; b. 火山活动间歇期遗迹化石发育过程

致谢: 本文研究材料由 2014 年南海 IODP349 航次提供, 感谢参与此次航次的全体科考人员与船员。河南理工大学资源环境学院张立军老师、中国地质大学(武汉)生物地质环境地质国家重点实验室范若颖博士、同济大学海洋与地球科学学院武力博士和两位匿名审稿专家在研究中提供了重要的帮助和建议, 在此表示感谢。

References

- Bromley, R.G., Ekdale, A.A., 1984. Chondrites: A Trace Fossil Indicator of Anoxia in Sediments. *Science*, 224: 872–874.
- Dorador, J., Wetzel, A., Rodriguez-Tovar, F.J., 2016. Zoophycos in Deep-Sea Sediments Indicates High and Seasonal Primary Productivity: Ichnology as a Proxy in Palaeoceanography during Glacial-Interglacial Variations. *Terra Nova*, 28: 323–328.
- Ekdale, A., Mason, T., 1988. Characteristic Trace-Fossil Associations in Oxygen-Poor Sedimentary Environments. *Geology*, 16: 720–723.
- Knaust, D., 2013. The Ichnogenus *Rhizocorallium*: Classification, Trace Makers, Palaeoenvironments and Evolution. *Earth Science Reviews*, 126: 1–47.
- Lei, C., Ren, J.Y., Zhang, J., 2015. Tectonic Province Divisions in the South China Sea: Implications for Basin Geodynamics. *Earth Science*, 40(4): 744–762 (in Chinese with English abstract).
- Li, C.F., Lin, J., Kulhanek, D.K., et al., 2015. South China Sea Tectonics: Opening of the South China Sea and Its Implications for Southeast Asia Tectonics, Climates, and Deep Mantle Processes since the Late Mesozoic. *Proceedings of the International Ocean Discovery Program Volume 349 Publications (Site U1431)*, College Station, Texas A & M University, 1–54.
- Li, W.B., Wang, R.J., 2016. Mechanism of Sea Level Change at the Earth Orbital Parameter Cycles during the Last 2 Ma BP. *Earth Science*, 41(5): 742–756 (in Chinese with English abstract).
- Miller, W., 2007. *Trace Fossils: Concepts, Problems, Prospects*. Elsevier, New York.
- Sun, C.Q., You, H.T., Liu, J.Q., et al., 2016. Differences between Whole Rock and In Situ Analysis on Tephra: Evidence from the 1600 a cal. BP Eruption of Jinlongdingzi Volcano. *Earth Science*, 41(1): 97–104 (in Chinese with English abstract).
- Taylor, A.M., Goldring, R., 1993. Description and Analysis of Bioturbation and Ichnofabric. *Journal of Geological Society*, 150: 141–148.
- Wang, G.H., Xie, S.P., Qu, T., et al., 2011. Deep South China Sea Circulation. *Geophysical Research Letters*, 38: 1–6.
- Wang, X.J., Wu, M.Q., Liang, D.H., et al., 1984. Some Geochemical Characteristics of Basalts in the South China Sea. *Geochemica*, 4(4): 332–340 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y.J., Han, X.Q., Luo, Z.H., et al., 2009. Late Miocene Magmatism and Evolution of Zhenbei-Huangyan Seamount in the South China Sea: Evidence from Petrochemistry and Chronology. *Acta Oceanologica Sinica*, 31(4): 93–102 (in Chinese with English abstract).
- Wetzel, A., 2002. Modern *Nereites* in the South China Sea—Ecological Association with Redox Conditions in the Sediment. *Palaios*, 17: 507–515.

Wetzel,A.,2008.Recent Bioturbation in the Deep South China Sea:A Uniformitarian Ichnologic Approach.*Palaios*,23:601-615.

Wetzel,A.,Tjallingii,R.,Wiesner,M.G.,2011.Bioturbational Structures Record Environmental Changes in the Upwelling Area off Vietnam (South China Sea) for the Last 150 000 Years. *Palaeogeography,Palaeoclimatology,Palaeoecology*,311:256-267.

Yang,S.F.,Zhang,J.P.,Yang,M.F.,2004.Trace Fossils in China. Science Press,Beijing(in Chinese).

Zhao,Q.H.,Wang,P.X.,1999.Process in Quaternary Paleooceanography of the South China Sea:A Review.*Quaternary Sciences*,19(6):481-501(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

雷超,任建业,张静,2015.南海构造变形分区及成盆过程.地球科学,40(4):744-762.

李文宝,王汝建,2016.近 2 Ma BP 以来地球轨道参数周期上全球海平面变化机制.地球科学,41(5):742-756.

孙春青,游海涛,刘嘉麒,等,2016.火山灰全岩与原位分析差异:以四海龙湾记录的 1 600 年前金龙顶子火山喷发为例.地球科学,41(1):97-104.

王贤觉,吴明清,梁德华,等,1984.南海玄武岩的某些地球化学特征.地球化学,4(4):332-340.

王叶剑,韩喜球,罗照华,等,2009.晚中新世南海珍珠—黄岩海山岩浆活动及其演化:岩石地球化学和年代学证据.海洋学报,31(4):93-102.

杨式溥,张建平,杨美芳,2004.中国遗迹化石.北京:科学出版社.

赵泉鸿,汪品先,1999.南海第四纪古海洋学研究进展.第四纪研究,19(6):481-501.

* * * * *

《地球科学》

2019 年 1 月 第 44 卷 第 1 期 要目预告

华北克拉通南缘早白垩世区域大规模岩浆—热液成矿系统 赵新福等

华北克拉通怀安杂岩中早前寒武纪两期变质表壳岩的重新厘定:岩石学及锆石 U-Pb 年代学证据 张家辉等

内蒙古狼山地区石炭纪—三叠纪岩浆作用及其构造意义 田 健等

怀安杂岩中含 BIF 岩石组合的形成时代及产出构造背景 田 辉等

内蒙古狼山北部早古生代岩浆岩年代学、地球化学特征及构造意义 张 云等

东秦岭加里东期沉积—构造演化过程 江小均等

内蒙古宝音图—霍各乞地区宝音图岩群的时代约束及构造属性 腾 飞等

内蒙哈珠地区石炭纪白山组火山岩—北山北部晚古生代活动陆缘岩浆作用的产物 任云伟等

内蒙古狼山地区中三叠世早期 C 型埃达克岩的发现及其构造意义 王文龙等