

董振, 梁锦, 曹志敏, 等. 西南印度洋中脊 51°E (#26 洋脊段) 地质特征及其对海底热液活动的指示[J]. 海洋地质前沿, 2023, 39(4): 14-22.
DONG Zhen, LIANG Jin, CAO Zhimin, et al. Geological characteristics at 51°E (Segment 26) of the Southwest Indian Ridge: implication to submarine hydrothermal activity[J]. Marine Geology Frontiers, 2023, 39(4): 14-22.

西南印度洋中脊 51°E (#26 洋脊段) 地质特征及其对海底热液活动的指示

董振^{1,2,3}, 梁锦^{2*}, 曹志敏³, 贺惠忠¹, 陈亮¹, 吕修亚¹, 孙金辉^{2,4}

(1 自然资源部南海调查中心, 海洋环境探测技术与应用重点实验室, 广州 510275;

2 自然资源部第二海洋研究所, 海底科学重点实验室, 杭州 310012;

3 中国海洋大学海洋地球科学学院, 青岛 266100; 4 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083)

摘要:在海底多金属硫化物调查过程中, 对于已知热液区需要精细地质填图工作, 而这种填图往往存在覆盖面积较小、所包含的地质要素较少以及与区域构造作用和岩浆活动联系不足等问题。基于历年大洋航次在西南印度洋中脊#26 洋脊段 (51°E 区域) 所获得的深海光学拖曳系统的资料, 结合高精度多波束水深数据, 提出一种系统的底质热液异常划分原则, 识别出热液蚀变岩石或角砾、疑似热液沉积物、热液生物及其遗骸富集和胶结碳酸盐 4 种底质热液异常类型。高分辨率海底地质填图结果表明, 本区存在 4 处热液活动的异常区。#26 洋脊段热液活动频率值为 2~10, 至少是全球海底热液活动频率经验公式的 1.8 倍以上。我们认为在超慢速扩张脊局部熔融异常或者发育非转换不连续带的洋脊段, 可能存在更多的海底热液活动, 也具有形成大型多金属硫化物矿床的潜力。

关键词:底质类型; 热液异常; #26 洋脊段; 西南印度洋中脊

中图分类号: P736

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2021.283

0 引言

海底热液活动一般发生于洋中脊、弧后盆地以及岩浆作用或者构造活动较强的海山等区域, 常伴有热液喷口(烟囱体)、热液羽状流、围岩蚀变以及热液产物富集成矿等特殊地质现象。目前已发现的 666 处活动热液区和 55 处非活动热液区(<https://vents-data.interridge.org/>)多分布于快速-慢速扩张洋脊^[1-5], 如东太平洋海隆、大西洋中脊等。而在北冰洋 Gakkel 脊以及西南印度洋中脊(SWIR)等超慢速

扩张洋脊, 由于其独特的岩浆活动和构造作用特征, 沿轴岩浆供给量较少且极不均匀, 通常认为其存在大型海底热液活动的可能性较低^[5-7], 因而相关的研究内容也较少, 仅有少量海底热液喷口被发现证实^[3,8-9]。

近些年来, 随着大洋调查工作的深入以及深海探测技术的提高, 在超慢速扩张脊陆续发现数量较多、规模较大的活动和非活动热液区, 同时, 也发现了大量的多金属硫化物烟囱或者丘体^[4,10-14]。BAKER 等^[6]认为超慢速扩张洋脊在发育和补给海底热液活动方面比快速扩张洋脊更高效, 形成热液喷口或者多金属硫化物矿床的潜力也巨大^[2,15]。

#26 洋脊段位于 SWIR 的 51°E 附近, 目前在該区域内仅发现 1 处非活动碳酸盐烟囱区(长白热液区), 区内以产出数量较多的碳酸盐烟囱体残骸和规模较大的胶结碳酸盐为主要特征。本文基于 DY30/34/43/49 航次船载多波束和摄像拖体数据, 通过系统的底质分析, 阐明#26 洋脊段底质类型和

收稿日期: 2021-11-08

资助项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目“‘龙旂’热液区成为首个公海世界自然遗产的可行性研究”(SZ2201)

作者简介: 董振(1988—), 男, 博士, 工程师, 主要从事海洋地质方面的研究工作。E-mail: dongzhen@stu.ouc.edu.cn

* 通讯作者: 梁锦(1986—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事海底硫化物成矿作用方面的研究工作。E-mail: kamleung@aliyun.com

地质构造等条件, 结合底质热液异常分布规律, 圈定海底热液活动发生的潜在有利区域, 旨在为找寻新的海底热液喷口或者多金属硫化物矿床提供理论依据和技术手段。

1 区域地质背景

SWIR 的 #26 洋脊段位于 50.9°~51.4° E, 全长约 55 km (图 1), 平均扩张速率为 14 mm/a。该区由 3 条规模不等的非转换不连续带 (non-transform discontinuities, NTDs) 进一步分割洋脊段所组成^[16]。这些 NTDs 的规模由西向东有减小的趋势, 相应地

导致次级洋脊段的错断距离也依次减小, 这一规律性的变化很可能与研究区西侧 #27 洋脊段发育有巨厚洋壳有关^[17-19]。#26 洋脊段中部水深较浅 (2 300~2 700 m), 并没有发育超慢速扩张洋中脊轴部典型的“V”形中央裂谷, 相比其东、西两侧, 其洋壳厚度具有明显增厚的趋势。#26 洋脊段东部和西部两侧水深较深 (西部: 3 200~3 600 m; 东部: 3 000~3 200 m), 都发育有典型的“V”形中央裂谷, 而且中央裂谷坡度较大。但是西部谷底宽度约 8~11 km, 远远大于东部的 2~4 km, 并且在西部中央裂谷内发育明显的轴部新生火山脊, 而东部洋中脊轴部隆起却相对不明显。

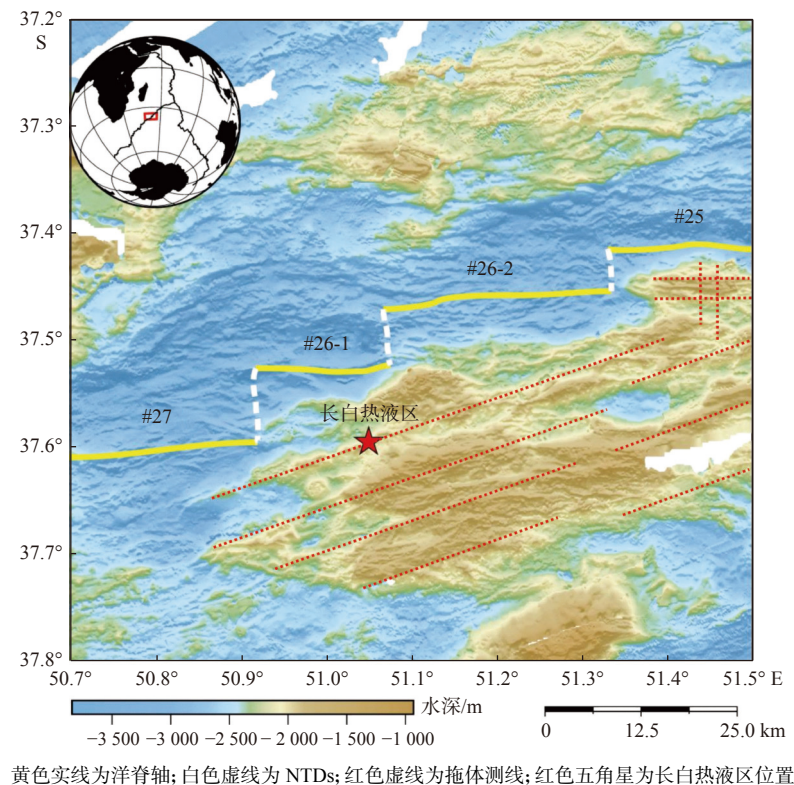


图 1 西南印度洋中脊 #26 洋脊段水深图

Fig.1 Bathymetric map of Segment 26 of the Southwest Indian Ridge

研究区内构造作用较强, 发育有大量平行于或者近平行于洋脊轴方向的线形断裂, 其中绝大多数为正断层^[20-21]。这些线形构造单元在靠近洋中脊的区域往往延伸较短、规模较小, 走向为近 EW 向 (平行于洋中脊走向)。而在距离洋中脊较远区域的线形构造一般延伸较远, 规模较大, 走向逐渐转变为 NEE—SWW 向。#26 洋脊段在 NTDs 的作用下, 发生错断和变形, 各个次级洋脊段的扩张方向或扩张速率发生改变。随着洋壳年龄的增加, 线形断裂的规模与走向发生规律性的变化, 最终使得

#26 洋脊段整体呈斜向扩张的趋势。

2 研究方法

底质解译主要是通过综合异常探测拖体中搭载高清摄像机与照相机等光学传感器, 在近底作业过程中, 传感器对海底现象进行拍照和摄像, 获取范围内海底地质现象、地貌特征、岩石或沉积物类型及其分布特征和海底生物等信息, 进行底质或热液异常的识别与分类 (表 1)。本文基于 4 个大洋航次共计 11 条综合异常拖体所获得的底质视频与

表 1 底质与热液异常的类型及特征

Table 1 Types and characteristics of substrate and hydrothermal anomalies

要素属性	名称	特征描述
底质异常	热液蚀变岩石或角砾	岩石具黄褐色-红褐色蚀变边缘或斑块, 破碎程度强
	疑似热液沉积物	沉积物呈杂色、夹黄褐色-红褐色; 部分站位通过沉积物化探异常确定
	热液生物及其遗骸富集	主要为常见的底栖生物群落活动(如珊瑚、藤壶等), 也包括已经死亡的各种疑似热液生物遗骸
	胶结碳酸盐	固结-半固结沉积物

照相资料,对海底底质异常的露头与地形地貌等特征按照 V 字形法则勾绘底质异常边界。该部分数据的分析与制图使用的是 Arcgis 软件(Esri, Version 10.4)。

3 结果

根据研究区内 11 条综合异常拖体测线所获得的视频和照片资料,绘制#26 洋脊段底质热液异常分布图(图 2)。区内共识别 5 处热液生物及其遗骸富集区、7 处岩石与角砾蚀变异常区、8 处疑似热液沉积物区、19 处疑似碳酸盐烟囱区(图 3)以及 20 处胶结碳酸盐区。

热液生物及其遗骸富集区一般分布在海山山顶或山脊处,并沿山脊呈长条状分布,生物类型主要为珊瑚及其残骸、藤壶等常见的底栖生物等,此外,个别热液生物及其遗骸富集区(如 SN4 异常区

内)则以可能与热液活动有关的生物遗骸为主(疑似贻贝等),主要受水深和地形控制,推测其附近可能或者曾经存在热液活动。蚀变异常区主要分布在中部与东北部(西南部仅有 1 处出露),以黄色或黄褐色蚀变岩为特征,整体位于离轴高地之上,水深较浅,呈长条状或椭圆状分布,推测其主要由构造与地形控制,我们认为该类异常区附近可能存在热液活动。疑似热液沉积物主要位于研究区的中东部,以出露黄绿色或红褐色软泥为特征,局部呈面状展布,出露面积较小,厚度较薄,常分布于构造较为发育的区域。疑似碳酸盐烟囱集中分布于研究区的西侧(长白热液区附近),出露范围较小,呈串珠状沿断裂的两侧发育。胶结碳酸盐在本区分布最广,面积最大(约 110 km²),主要集中分布于长白热液区附近,厚度较大,一般分布在海山周围较低洼的区域,局部较平坦的海山顶部也有零星分布。

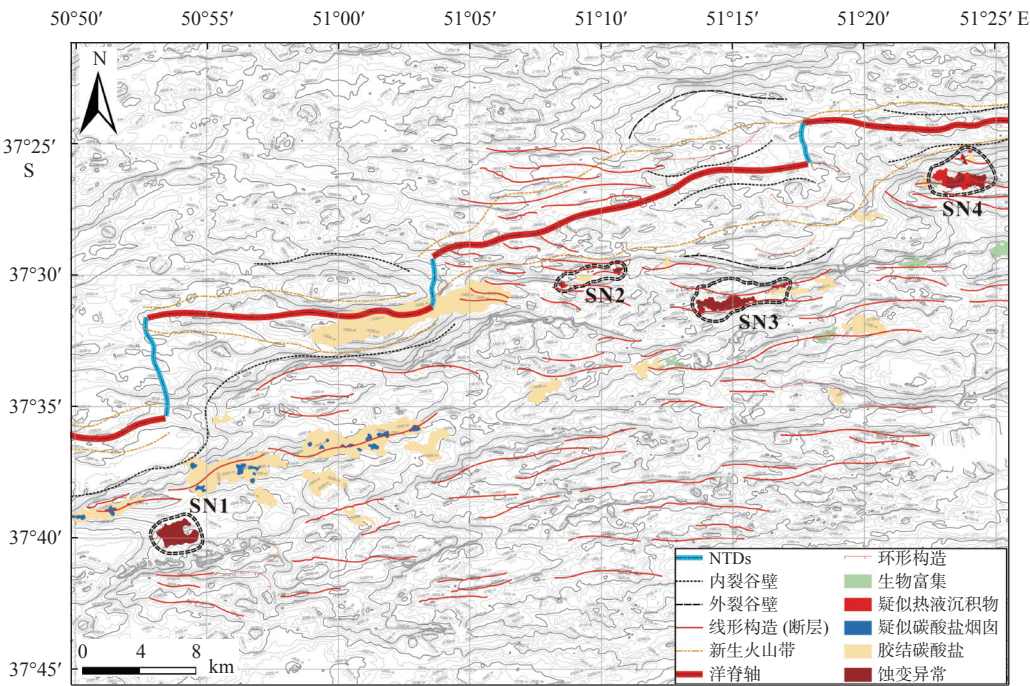
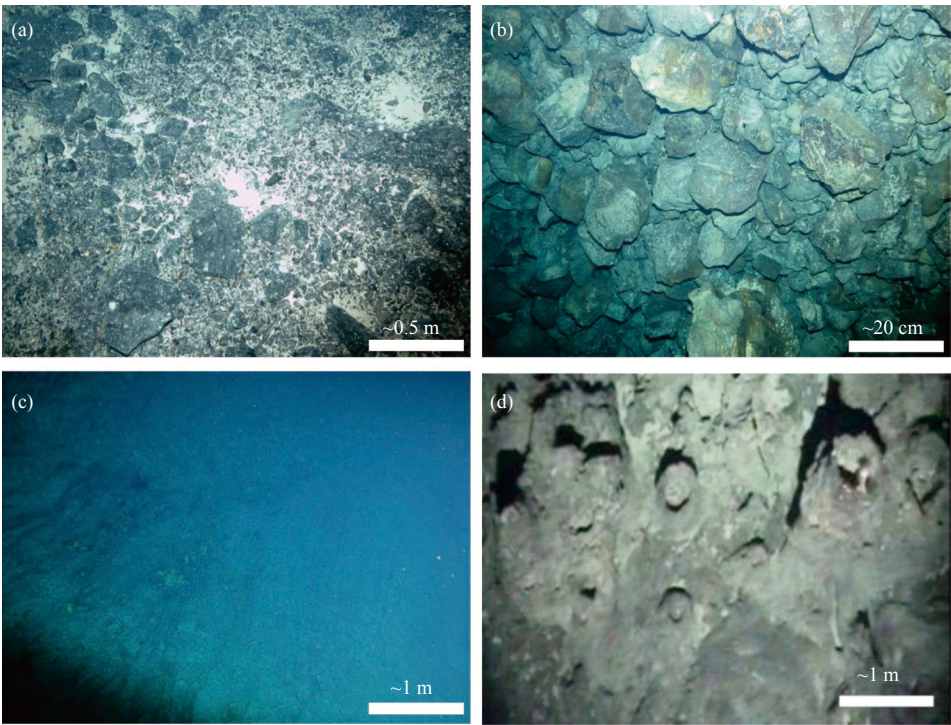


图 2 西南印度洋中脊#26 洋脊段热液异常

Fig.2 Hydrothermal anomalies of Segment 26 of Southwest Indian Ridge



(a)疑似热液生物遗骸; (b)蚀变岩石角砾; (c)疑似热液沉积物; (d)疑似碳酸盐烟囱体

图 3 #26 洋脊段常见热液异常照片

Fig.3 The photos of common hydrothermal anomalies in Segment 26

4 讨论

4.1 底质异常对海底热液活动的指示

热液沉积物与蚀变现象是海底热液活动的重要产物,也是找寻多金属硫化物的重要手段^[22-24]。

部分学者在 TAG、Logachev、龙旂和玉皇等热液区调查发现热液蚀变角砾往往分布在喷口周围 200 m 以内的区域,而热液沉积物分布极不均匀,一般 <1.5 km^[12-13,25-27]。结合研究区内疑似热液沉积物与蚀变角砾分布特征,我们圈定出 SN1、SN2、SN3 和 SN4 共 4 个热液异常区(图 2),各热液异常区分布特征见表 2。

表 2 热液异常区的分布与特征

Table 2 Distribution and characteristics of hydrothermal anomaly areas

异常区	中心位置	水深范围/m	面积/km ²	底质类型	热液异常
SN1	37.66°S, 57.89°E	2 350~2 650	6.5	沉积物为主,玄武岩与角砾次之	1处热液蚀变角砾
SN2	37.50°S, 51.16°E	1 950~2 650	3.3	角砾为主,沉积物与玄武岩较少,有超基性岩出露	1处疑似热液沉积物,2处热液蚀变角砾
SN3	37.51°S, 51.25°E	2 000~2 400	8.5	玄武岩为主,沉积物与角砾次之	2处热液蚀变角砾
SN4	37.44°S, 51.40°E	1 750~2 650	约18	角砾为主,沉积物与玄武岩较少,有超基性岩出露	4处疑似热液沉积物,3处热液蚀变角砾

4.1.1 SN1 异常区

SN1 位于研究区西南部,处于 2 条走向近平行于洋脊轴(NE-SW)的大型断裂之间的离轴高地之上(图 4)。区内底质类型主要以沉积物为主,分布在海底火山之间地势较低且平坦的区域,厚度较大,而玄武岩多出露在海底火山顶部与中部,岩石角砾则在构造作用强烈部位集中产出。该区线形构造数量较多,但其规模较小且走向复杂,属于后期构

造作用形成的次级断裂系统。环形构造相对线形构造较少,但环形断裂的形成和重新活化及其对侵入到环形断裂当中岩脉的约束可能对热液流体的流动及相应的热液蚀变模式和成矿机制具有重要指示意义^[28-29]。不同类型构造单元的形成是火山构造和区域构造相互作用的结果,促进了热液流体循环,它们为深部热传导提供有效通道,也为热液循环提供了必要条件^[30]。

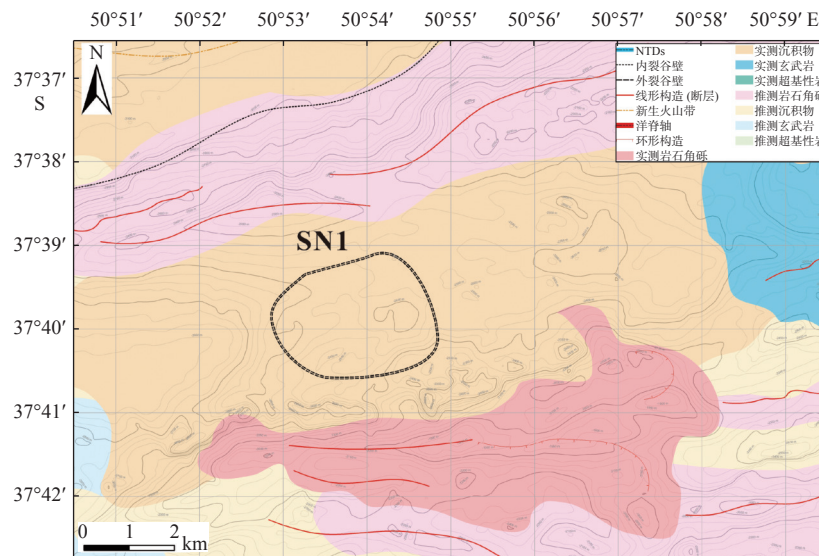


图 4 SN1 异常区底质类型

Fig.4 The substrate types of the SN1 anomaly area

SN1 处于距离洋中脊轴较远的离轴台地之上,随着洋中脊扩张,岩石圈逐渐冷却并发育不同类型和规模的正断层,深部的熔体可能沿着断层向上运移,形成离轴的新火山机构^[31]。扩张中心的深部熔体会沿着离轴区的深大断裂向两侧运移,成为驱动离轴热液循环系统的稳定热源^[32]。此外,区内仅出露 1 处蚀变角砾区,面积约 2.8 km²,角砾颜色呈淡黄色或者褐黄色,角砾大小极不均一,分选性差,而且角砾形态各异,表面不平整,棱角不鲜明。推测其主要来自因海底火山作用而形成的火山角砾^[33],这与观察到的该区发育有大量火山锥与火山口等特殊火山地貌一致。强烈的离轴火山活动暗示着

本区浅部可能存在一定规模的岩浆房,这为热液循环提供了充足的热源^[31,34]。

4.1.2 SN2 与 SN4 异常区

SN2 与 SN4 分别位于研究区中北部和东北部,都处于洋中脊轴部裂谷(地堑)南侧内裂谷壁之上(图 5、6)。两者在水深、地形地貌以及地质构造等条件均十分类似。区内底质类型主要以玄武质构造角砾为主,广泛分布于断层附近,而玄武岩与少量的蛇纹石化橄榄岩仅仅分布在少数区域的火山顶部或中部,沉积物则在一些狭长沟谷等区域零星出露,厚度较薄。大量平行于洋中脊轴方向、规模不等的线形构造密集分布在洋中脊轴内侧裂谷壁

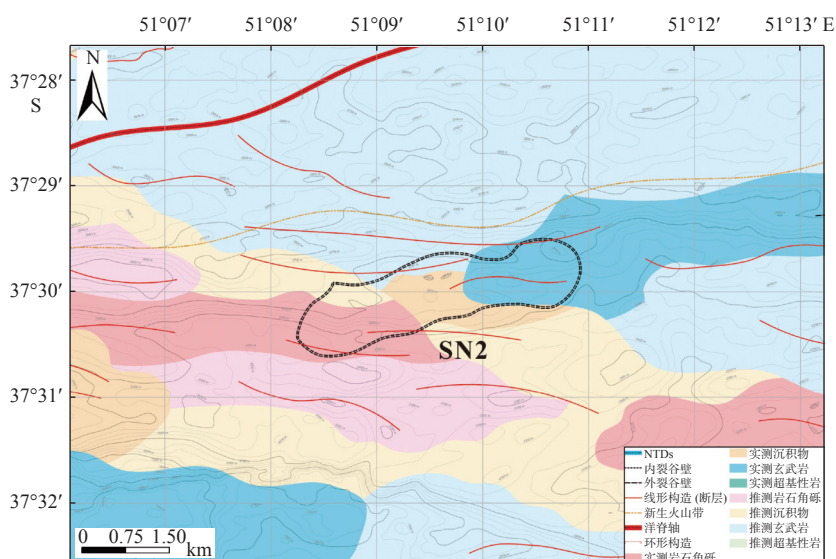


图 5 SN2 异常区底质类型图

Fig.5 The substrate types of the SN2 anomaly area

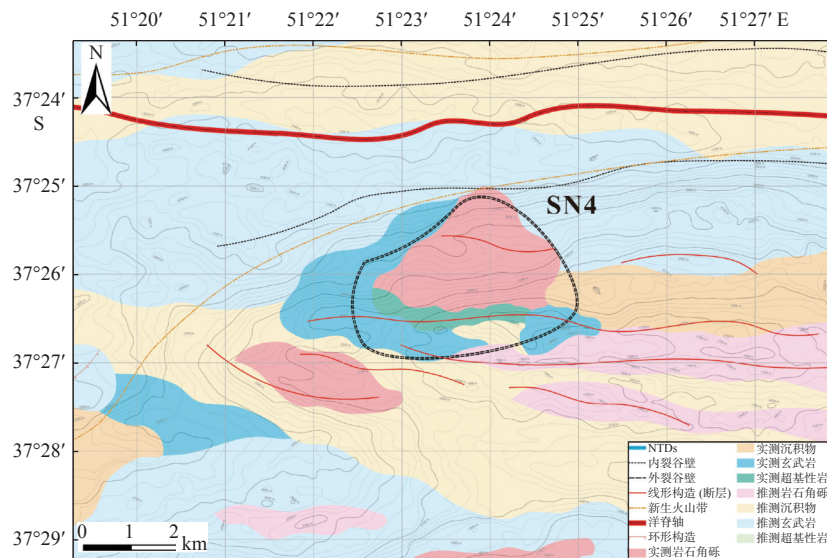


图 6 SN4 异常区底质类型图

Fig.6 The substrate types of the SN4 anomaly area

之上,而环形构造则数量有限。

SN2 与 SN4 所处的水深范围、地形地貌、底质类型以及岩浆和构造条件等十分类似于已知的龙旗和玉皇热液区^[12-13,27]。我们认为该异常区内可能发育有一定规模的低角度拆离断层,这些长期活动的拆离断层使得大量下地壳或地幔物质暴露在海底,形成海底核杂岩,它是慢速-超慢速扩张洋脊海底热液活动发育的重要指示标志^[35-36]。超基性岩有较小规模的出露,拆离断层可能处于发展的早期阶段,这为区内的热液循环提供了重要通道^[36-38]。这 2 个异常区内蚀变角砾颜色一般呈淡黄色或者褐黄色,角砾大小形状各异,分选性较差;并且区内火山活动与构造作用均十分强烈,发育有大量平行于洋脊轴方向的断层,火山锥或火山口等火山地貌也有不同程度出露。因此,该蚀变角砾的形成是同时受到以上 2 种地质作用的结果。黄色或黄绿色的疑似热液沉积物在 SN2 和 SN4 内较大面积出露,而且附近往往伴随有大量蚀变角砾,这些现象与目前在玉皇热液区的发现十分类似^[37]。此外,SN4 内发现 1 处疑似貽贝和藤壶残骸富集区(图 3a),它们通常是海底热液活动重要的指示物^[13,24]。综上,我们推测 SN2 和 SN4 异常区很可能存在活动的热液喷口和(或)已消亡的烟囱体。

4.1.3 SN3 异常区

SN3 位于研究区中北部,距离洋脊轴较远。区内底质以新鲜的枕状玄武岩为主,规模较大,分布广泛,而沉积物主要出露于中部狭长的沟谷当中,厚度较薄,玄武质角砾则零星分布在一些小规模

断裂带附近(图 7)。异常区蚀变角砾呈淡黄色,角砾往往较大且均一,分选性较好,而且形状基本一致,表面平整,棱角鲜明。其可能主要是基底岩石在构造应力作用下发生变形和破碎而形成的构造角砾。本区构造作用十分发育,特别是在不同类型断裂系统密集交汇的部位或者构造应力最为集中的区域尤为突出,这为热液循环提供了流体运移与物质交换的有利场所^[34,39],对海底热液活动具有一定的指示意义。

热液活动的发生与维持需要底部存在持续而稳定的热源,持续为热液循环系统供给,目前已发现的绝大多数热液区均位于扩张中心两侧裂谷壁之上^[40]。但是 SN3 位于脊轴南侧约 10 km 处依然存在明显的热液活动异常。部分学者认为超慢速扩张洋脊之上部分大型断层可以延伸至远离洋脊轴 20 km 的位置,这些断层可以为熔体的迁移提供通道,导致离轴火山作用和地壳增生等现象的发生^[31]。栾锡武^[40]对洋中脊区域熔体的传播距离进行了估算,认为熔体通过侧向传播,可以从中心处运移至洋脊段的两端。这些都表明在慢速-超慢速扩张脊,远离洋脊轴的区域依然存在岩浆作用为热液循环系统提供热源,形成离轴的海底热液活动。

4.2 #26 洋脊段热液活动特征

SWIR 有独特的岩浆活动和构造作用特征,沿轴岩浆供给量较少且极不均匀,往往认为其存在海底热液活动的可能性较低^[6-7]。GERMAN 等^[5]总结了热液活动发生频率 F_s (每 100 km 上热液喷口

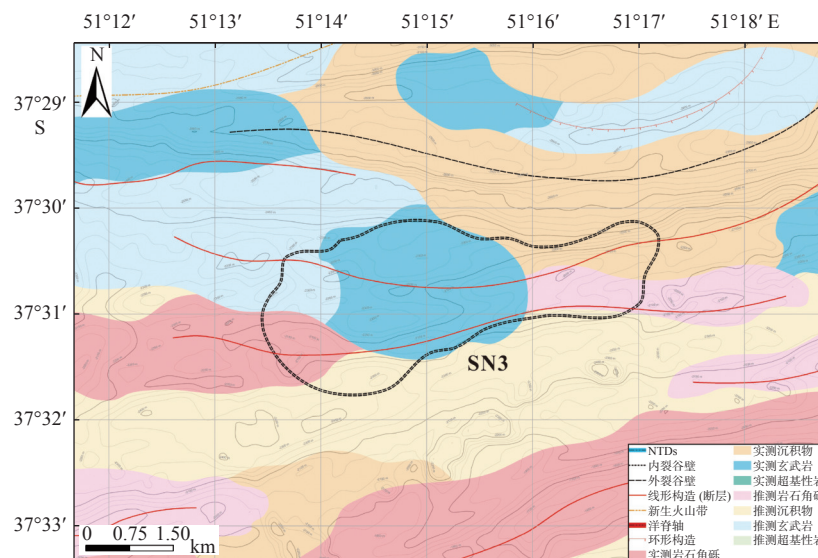
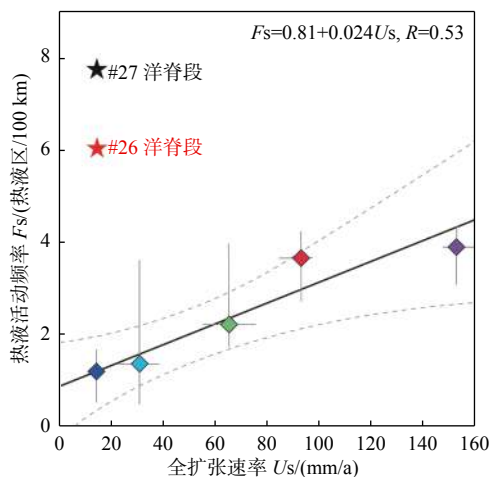


图7 SN3异常区底质类型图

Fig.7 The substrate types of the SN3 anomaly area

的数量)与扩张速率之间的关系(图8),认为随着扩张速率的增加,热液活动更加频繁,并给出喷口发生率与全扩张速率的线性经验公式。

图8 全球洋中脊系统热液活动发生率 F_s 与扩张速率 U_s 关系示意图^[5]Fig.8 The relationship between hydrothermal activity occurrence rate (F_s) and spreading rate (U_s) of the global mid-ocean ridge system

最新研究表明#27洋脊段的平均 F_s 约为 7.7^[41]。而在#26洋脊段共有确认热液活动1处,疑似热液活动4处。如果将4处疑似热液活动全部考虑进去的话, #26洋脊段热液活动频率 F_s 值为10。如果仅考虑已确认的热液活动,那么#26洋脊段 F_s 值为2,都远高于全球洋中脊热液活动趋势。根据全球海底热液活动频率的经验公式, #26洋脊段热液活动频率约为1.1^[5],而本文计算得到的 F_s 是经验公式的1.8~9.1倍。我们认为该经验公式

可能仅仅反映洋中脊系统中一大尺度范围内发生海底热液活动的可能性,但在局部洋脊段尺度上并不适用,特别是在一些熔融异常(如#27洋脊段)或者发育NTDs等洋脊段,其往往可能形成更多的海底热液活动。

5 结论

(1)在#26洋脊段发现有4种底质热液异常类型,其中疑似热液沉积物与热液蚀变异通常是找寻热液喷口或者烟囱体重要的指示标志。

(2)#26洋脊段热液活动频率 F_s 值为2~10,是全球海底热液活动频率经验公式的1.8倍以上。该经验公式在局部洋脊段上并不适用,特别是在一些发育有NTDs的洋脊段,可能存在更多的海底热液活动。

参考文献:

- [1] BEAULIEU S E, BAKER E T, GERMAN C R, et al. On the global distribution of hydrothermal vent fields: one decade later[C]//Paper presented at the Agu Fall Meeting, 2012.
- [2] BEAULIEU S E, BAKER E T, GERMAN C R, et al. Where are the undiscovered hydrothermal vents on oceanic spreading ridges?[J]. *Deep-sea Research Part II - Topical Studies in Oceanography*, 2015, 121: 202-212.
- [3] GERMAN C R, BAKER E T, MEVEL C A, et al. Hydrothermal activity along the Southwest Indian Ridge[J]. *Nature*, 1998, 395(6701): 490-493.
- [4] EDMONDS H N, MICHAEL P J, BAKER E T, et al. Discovery of abundant hydrothermal venting on the ultraslow-spreading

- Gakkel Ridge in the Arctic Ocean[J]. *Nature*, 2003, 421(6920): 252-256.
- [5] GERMAN C R, PETERSER S, HANNINGTON M D. Hydrothermal exploration of mid-ocean ridges: where might the largest sulfide deposits be forming?[J]. *Chemical Geology*, 2016, 420(1): 114-126.
- [6] BAKER E T, CHEN Y J, MORGAN J P. The relationship between near-axis hydrothermal cooling and the spreading rate of mid-ocean ridges[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1996, 142: 137-145.
- [7] BAKER E T, URABE T. Extensive distribution of hydrothermal plumes along the superfast spreading East Pacific Rise, 13°30'–18°40'S[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1996, 101: 8685-8695.
- [8] HERZIG P M, PLUGER W L. Exploration for hydrothermal activity near the Rodriguez Triple Junction, Indian Ocean[J]. *The Canadian Mineralogist*, 1988, 26: 721-736.
- [9] GAMOA T, NAKAYAMA E, SHITASHIMA K, et al. Hydrothermal plumes at the Rodriguez Triple Junction, Indian Ridge[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1996, 142(1/2): 261-270.
- [10] GAMOA T, CHIBAB H, YAMANAKAC T, et al. Chemical characteristics of newly discovered black smoker fluids and associated hydrothermal plumes at the Rodriguez Triple Junction, Central Indian Ridge[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2001, 193(3): 371-379.
- [11] DOVER V C L. Biogeography and ecological setting of Indian Ocean hydrothermal vents[J]. *Science*, 2001, 294(5543): 818-823.
- [12] 陶春辉, 周建平, 李怀明, 等. 西南印度洋脊49°39'E热液区硫化物烟囱体的矿物学和地球化学特征及其地质意义[J]. *科学通报*, 2011, 56(28/29): 2413-2423.
- [13] 陶春辉, 李怀明, 金肖兵, 等. 西南印度洋脊的海底热液活动和硫化物勘探[J]. *科学通报*, 2014, 59(19): 1812-1822.
- [14] TAO C H, LIN J, GUO S Q, et al. First active hydrothermal vents on an ultraslow-spreading center: Southwest Indian Ridge[J]. *Geology*, 2012, 40(1): 47-50.
- [15] BEAULIEU S E, BAKER E T, GERMAN C R, et al. An authoritative global database for active submarine hydrothermal vent fields[J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2013, 14(11): 4892-4905.
- [16] SAUTER D, PATRIAT P, ROMMEVAUX J C, et al. The Southwest Indian Ridge between 49°15'E and 57°E: focused accretion and magma redistribution[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2001, 192(3): 303-317.
- [17] LI J B, JIAN H C, CHEN Y J, et al. Seismic observation of an extremely magmatic accretion at the ultraslow spreading Southwest Indian Ridge[J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(8): 2656-2663.
- [18] NIU X W, RUAN A G, LI J B, et al. Along-axis variation in crustal thickness at the ultraslow spreading Southwest Indian Ridge (50°E) from a wide-angle seismic experiment[J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2015, 16(2): 468-485.
- [19] JIAN H C, SINGH S C, CHEN Y J, et al. Evidence of an axial magma chamber beneath the ultraslow-spreading Southwest Indian Ridge[J]. *Geology*, 2017, 45(2): 143-146.
- [20] ZHANG H T, TAO C H, LI J H. Different crust failure modes controlled by spreading obliquity and its implication: insight from Southwest Indian Ridge 46-52°E[C]//InterRidge Theoretical Institute, 2015.
- [21] LIU C, LI J, TAO C H, et al. Variations in faulting style of the Southwest Indian Ridge (46°-53.5°E): implications for crustal accretion process at ultraslow-spreading ridges[J]. *Tectonophysics*, 2020: 228552.
- [22] 翟世奎, 于增慧, 杜同军. 冲绳海槽中部现代海底热液活动在沉积物中的元素地球化学记录[J]. *海洋学报*, 2007, 29(1): 58-65.
- [23] 曹红, 曹志敏. 西南印度洋中脊海底热液活动[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2011, 31(1): 67-75.
- [24] 曾志刚, 陈祖兴, 张玉祥, 等. 海底热液活动的环境与产物[J]. *海洋科学*, 2020, 44(7): 143-155.
- [25] DEMARTIN B J, SOHN R A, CANALES J P, et al. Kinematics and geometry of active detachment faulting beneath the Trans-Atlantic Geotraverse (TAG) hydrothermal field on the Mid-Atlantic Ridge[J]. *Geology*, 2007, 35(8): 711-714.
- [26] ANDERSEN C, RUPKE L, GREVEMEYER I, et al. Conditions for high-temperature off-axis venting at the Lgatchev 1 hydrothermal field[C]//EGU General Assembly, 2013.
- [27] YU J Y, TAO C H, LIAO S L, et al. Resource estimation of the sulfide-rich deposits of the Yuhuang-1 hydrothermal field on the ultraslow-spreading Southwest Indian Ridge[J]. *Ore Geology Reviews*, 2021, 134(7): 104169.
- [28] LORETO M F, Doan D D, UNER S, et al. Fault-controlled deep hydrothermal flow in a back-arc tectonic setting, SE Tyrrhenian Sea[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 17724.
- [29] STIX J, KENNEDY B, HANNINGTON M, et al. Caldera-forming processes and the origin of submarine volcanogenic massive sulfide deposits[J]. *Geology*, 2003, 31(4): 375.
- [30] EMBLEY R W, DE RONDE C E J, MERLE S G, et al. Detailed morphology and structure of an active submarine arc caldera: Brothers volcano, Kermadec arc[J]. *Economic Geology*, 2012, 107(8): 1557-1570.
- [31] STANDISH J J, SIMS K W W. Young off-axis volcanism along the ultraslow-spreading Southwest Indian Ridge[J]. *Nature Geoscience*, 2010, 3(4): 286-292.
- [32] TAO C H, SEYFRIED W E, LOWELL R P, et al. Deep high-temperature hydrothermal circulation in a detachment faulting system on the ultra-slow spreading ridge[J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 1300.
- [33] CAROSI R, MONTOMOLI C, IACCARINO S. 20 years of geological mapping of the metamorphic core across Central and Eastern Himalayas[J]. *Earth-Science Reviews*, 2018, 177: 124-138.
- [34] 张涛, JIAN L, 高金耀. 西南印度洋中脊热液区的岩浆活动与

- 构造特征[J]. 中国科学: 地球科学, 2013, 43(11): 1834-1846.
- [35] TUCHOLKE B E, BEHN M D, BUCK W R, et al. Role of melt supply in oceanic detachment faulting and formation of megamullions[J]. *Geology*, 2008, 36(6): 455-458.
- [36] MCCAIG A M, CLIFF R A, ESCARTIN J, et al. Oceanic detachment faults focus very large volumes of black smoker fluids[J]. *Geology*, 2007, 35(10): 935-938.
- [37] SMITH D K, CANN J R, ESCARTIN J, et al. Widespread active detachment faulting and core complex formation near 13° N on the Mid-Atlantic Ridge[J]. *Nature*, 2006, 442(7101): 440-443.
- [38] 周鹏, 韩喜球, 王叶剑, 等. 拆离断层对海底热液硫化物形成的制约: 来自岩石学和近底观测的证据[C]. 中国矿物岩石地球化学学会第17届学术年会论文摘要集. 2019.
- [39] KLISCHIES M, PETERSEN S, DEVEY C W, et al. Geological mapping of the Menez Gwen segment at 37°50'N on the Mid-Atlantic Ridge: implications for accretion mechanisms and associated hydrothermal activity at slow-spreading mid-ocean ridges[J]. *Marine Geology*, 2019, 412: 107-122.
- [40] 栾锡武. 现代海底热液活动[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [41] YUE X H, LI H M, REN J Y, et al. Seafloor hydrothermal activity along mid-ocean ridge with strong melt supply: study from Segment 27, Southwest Indian Ridge[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 1-10.

Geological characteristics at 51°E (Segment 26) of the Southwest Indian Ridge: implication to submarine hydrothermal activity

DONG Zhen^{1,2,3}, LIANG Jin^{2*}, CAO Zhimin³, HE Huizhong¹, CHEN Liang¹, LV Xiuya¹, SUN Jinye^{2,4}

(1 South China Sea Marine Survey Center, Key Laboratory of Marine Environmental Survey Technology and Application, Ministry of Natural Resources, Guangzhou 510275, China; 2 Second Institute of Oceanography, Key Laboratory of Submarine Geosciences, Ministry of Natural Resources,

Hangzhou 310012, China; 3 College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

4 College of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: In the survey of oceanic polymetallic sulphides, detailed geological mapping is needed for a known hydrothermal area, which often covers a small area, contains less geological elements, and is not connected with regional tectonism and magmatism. Based on the data of deep-towed optical system obtained from ocean voyages over the years in the Segment 26 (51°E) of the Southwest Indian Ridge (SWIR), and combined with high-precision multi-beam bathymetric data, we proposed a systematic division principle of substrate hydrothermal anomaly, and identified four types of substrate hydrothermal anomaly: hydrothermal altered rocks or breccia, suspected hydrothermal sediments, hydrothermal organisms and their remains enrichment, and cemented carbonate rocks. The results of high-resolution submarine geological mapping show that there are 4 abnormal areas of hydrothermal activity in Segment 26. The hydrothermal activity occurrence rate of Segment 26 ranged 2~10, which is at least 1.8 times higher of the global one using empirical formula. Therefore, there may be more submarine hydrothermal activities in Segment 26 with melting anomalies or non-transform discontinuities of ultra-slow spreading ridge, and it also has the potential to form large polymetallic sulfide deposits.

Key words: substrate type; hydrothermal anomaly; Segment 26; Southwest Indian Ridge