

# 马利亚纳海槽海底热液活动和热液硫化物研究

吴世迎 陈穗田 张德玉 王冠荣

(国家海洋局第一海洋研究所, 青岛 266003)

## 摘 要

本文根据马利亚纳海槽海底热液活动和热液硫化物产状及矿物化学特征, 探讨了存在的高温和中低温热液产物的矿物相及其赋存形式, 认为是一种有别于大洋中脊和深断裂带的规模较小的海底热液活动类型。

**关键词:** 马利亚纳海槽, 热液活动, 硅质烟囱, 块状硫化物

## 一、引 言

马利亚纳海槽的热液活动和热液硫化物的研究始于1981年, Leinen等首次报道了西太平洋马利亚纳海槽存在热液成因的沉积物<sup>[1]</sup>. 1983年美日科学家在海槽区——非洋中脊扩张中心找到了海底热液溢口<sup>[2]</sup>. 1987年美国Alvin号下潜考察过程中获得了海底热液硫化物样品<sup>[3]</sup>.

本文作者根据1988年7至8月中国-联邦德国合作“太阳”号第57航次(简称So57)考察结果, 在海底观测资料和样品分析研究的基础上, 对于马利亚纳海槽区热液活动和热液硫化物有关问题作一初步探讨。

## 二、地质构造和岩石学背景

马利亚纳海槽是西太平洋菲律宾海三个海盆中面积最小、时代最年轻的海盆。依此向西为帕里西维拉海盆和西菲律宾海盆。

5Ma B.P. 以来, 马利亚纳海槽平均以1.5—1.7cm/a的半扩张速率扩张着<sup>[4]</sup>. 在海槽轴部的扩张中心, 断裂深谷丛生, 形成地堑型构造。断裂中央自北而南伴生一条陡峭曲折的小扩张脊, 控制了本区的主要地形构造走向。此种构造以18°N附近最为典型, 是马利亚纳海槽研究海底热液活动的理想区域(图1)<sup>[5]</sup>. 在海槽区因扩张引起的高温地幔物质上涌, 火山活动时时有发生, 许多地段发散出的地热能, 可以超过正常值的50倍<sup>[6]</sup>, 使最大热流值达到2W/m<sup>2</sup><sup>[7]</sup>. 高热流值的出现, 表明本区具备热液活动的地质构造基础。

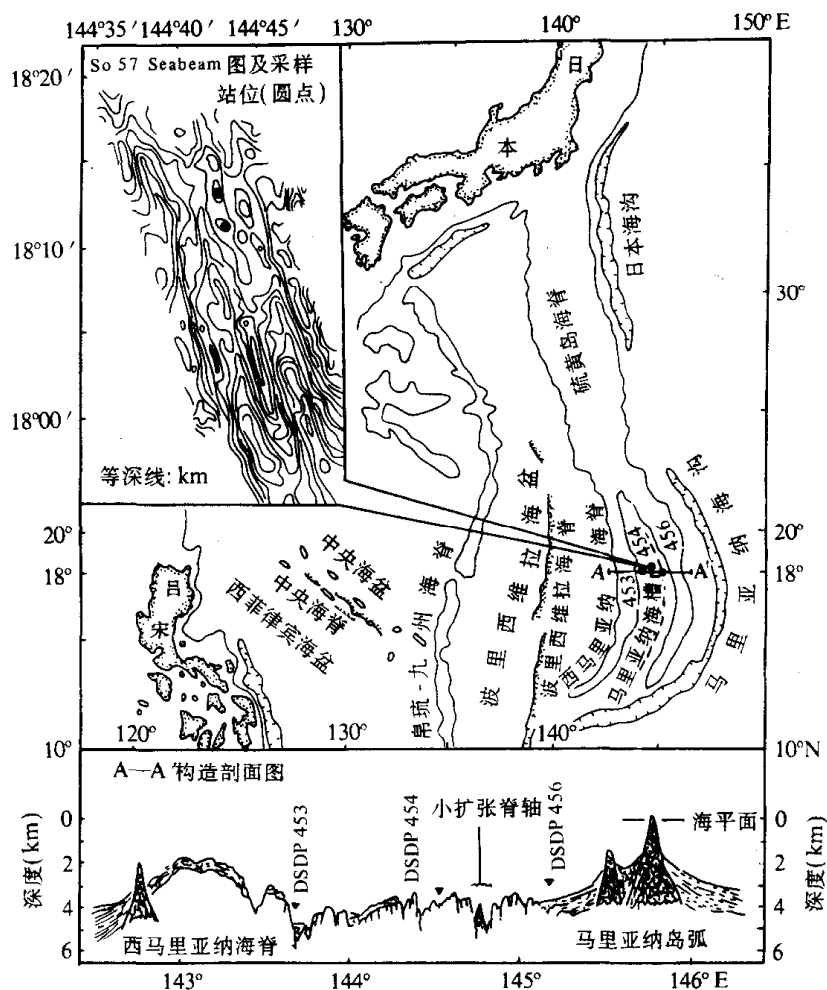


图1 马里亚纳海槽构造特征和采样站位图

(左上图采样站位标记的上部圆点包含有 18GTV, 19GTV, 24GTV, 25GTV 和 31GTV; 下部圆点为 41GTV 站)

马里亚纳海槽中央裂谷的小扩张脊部位, 分布着形态各异的玄武岩体, 它们是海底热液上涌的通道和热液硫化物产生的基础。在脊部中央一般为洋底玄武岩即拉斑玄武岩, 在脊的两翼呈钙-碱玄武岩。两者的主要差别在于脊部较两翼更显基性, 时代也更年轻, 但是其主要化学成分仍相似于大洋中脊<sup>[8]</sup>。另外, 由于马里亚纳海槽玄武岩中的水分含量较洋中脊高出 5 倍<sup>[9]</sup>, 因此 Poreda 强调, 碱性富水是马里亚纳海槽玄武岩的显著标志<sup>[10]</sup>。本航次的研究还证明, 该区玄武岩具有高 Al 组分,  $Al_2O_3$  含量可达 14.7—18.3%<sup>[11]</sup>, 构成了马里亚纳海槽区的岩石学特点。

### 三、海底热液烟囱体的产状及海底热液场

本次考察限于海槽轴部 18°20'—17°30'N 之间。在北部 18°N 附近, 水深 3600—3700m 处, 采集到 6 站非活动性的海底热液烟囱体及热液沉积物(图 1)。它们以硅质物为主, 黄褐色为基色, 间有黑、灰白或蓝绿色, 呈块状或疏松土状, 在个别站位(19GTV)也发现少量以黄铁矿为主要成分的块状硫化物和黄铁矿砂。为了叙述方便, 以下统称海底热液烟囱体(表 1)。

表 1 马里亚纳海槽的热液烟囱

| 站号     | 站 位                       | 水 深 (m) | 岩 性 描 述                                                  |
|--------|---------------------------|---------|----------------------------------------------------------|
| 18 GTV | 18°12.78' N, 144°42.51' E | 3614    | 褐黄—褐色, 有黑色壳和深褐色孔洞, 似喷口处. 块状, 主要成分硅质, 硬度较小.               |
| 19 GTV | 18°12.86' N, 144°42.46' E | 3622    | 黄褐—蓝灰绿色, 有白色斑块和黑色壳, 块状, 硬度较大, 也有呈颗粒状黄铁矿砂和以黄铁矿为主的块状硫化物出现. |
| 24 GTV | 18°12.90' N, 144°42.46' E | 3596    | 黄褐色, 疏松块状, 少有白色小粒, 吸水性强, 易碎成土, 硅质                        |
| 25 GTV | 18°12.85' N, 144°42.55' E | 3621    | 黄褐色, 间有黑色表壳, 块状, 硬度较大.<br>主要成分硅质                         |
| 31 GTV | 18°13.01' N, 144°42.68' E | 3605    | 黄褐色基调, 间有土黄、灰白及黑色, 呈皮壳状或浸染状, 质硬, 主要成分硅质, 也有程度不等的黄铁矿化     |
| 41 GTV | 18°11.21' N, 144°43.05' E | 3728    | 浅黄褐色, 疏松易碎, 吸水性强, 硅质, 与 24 GTV 站十分相似                     |

在产状上, 烟囱体有直立的高约 200 cm、直径 50—70 cm 的枯树干状, 有堆伏在玄武岩体之上的枯树桩状或碎片状, 还有残留于热液溢口外并未形成烟囱的沉积物, 以及仅在玄武岩体

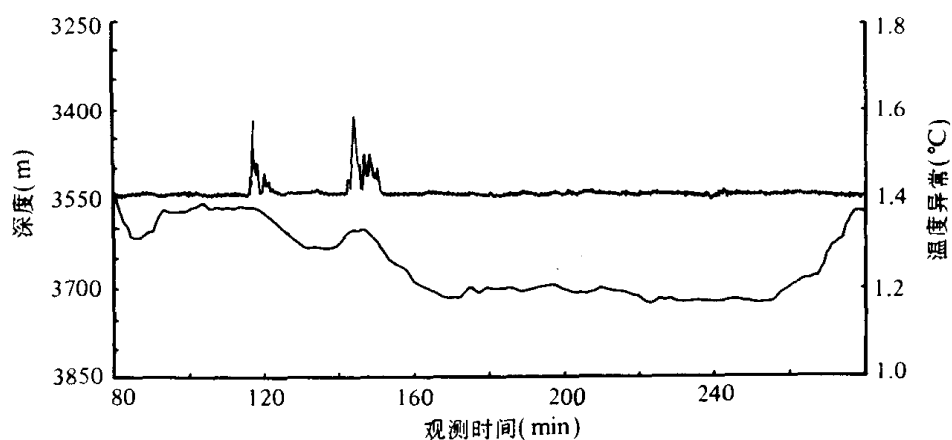


图 2 28 FS 站(OFOS)观测到的温度异常

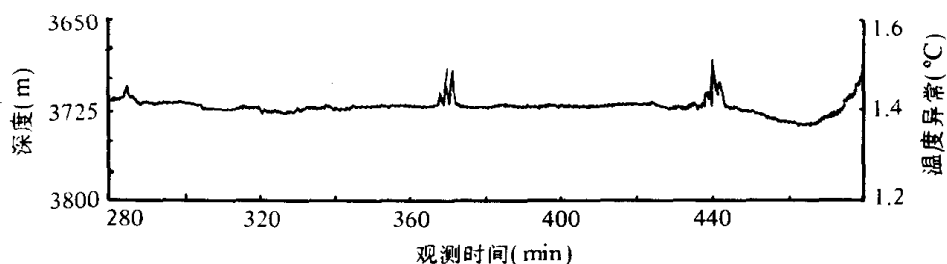


图 3 38 FS 站(OFOS)观测到的温度异常

裂隙边缘形成的少量花朵状沉淀物, 构成了多种形态的海底烟囱体及沉积物。

另外, 在马里亚纳海槽  $18^{\circ}13' - 18^{\circ}11' N$  之间, 通过海底观测系统(OFOS)和精密多功能深度探测器(PMDP)观测, 测得几处底层水温存在最大  $0.2^{\circ}C$  的温度异常(图2, 图3)。此种情况与海槽裂谷中的热液溢出密切相关, 是海底热液活动存在的重要标志。

虽然本航次并没有象 Alvin 号 1987 年直接观测到正在喷发的海底热液溢口, 但从海底玄武岩和热液烟囱体上广泛栖居的独特的海底生物群落的繁茂景观, 也可旁证海底热液活动的客观存在。

#### 四、烟囱体的化学成分和矿物组分

马里亚纳海槽的热液烟囱体的化学成分, 以高  $SiO_2$ , 低  $Al_2O_3$ ,  $MgO$ ,  $CaO$  和  $TiO_2$  为特点。从表2可见, 烟囱体中  $SiO_2$  含量最高, 但波动幅度也大, 从最低 50.82% 到最高达 93.97% 变化

表2 马里亚纳海槽与太平洋其他海域海底热液烟囱体化学元素含量的对比

| 站号或位置                           | 试样    | 化 学 元 素 (wt%)    |       |       |                                |                                 |                  |                  |                   |       | 化学元素(ppm) |      |     |     |    |     |  |
|---------------------------------|-------|------------------|-------|-------|--------------------------------|---------------------------------|------------------|------------------|-------------------|-------|-----------|------|-----|-----|----|-----|--|
|                                 |       | SiO <sub>2</sub> | CaO   | MgO   | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | TFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | TiO <sub>2</sub> | K <sub>2</sub> O | Na <sub>2</sub> O | MnO   | Cu        | Zn   | Cr  | Ni  | Y  | Zr  |  |
| 18 GTV*                         | 烟囱体   | 52.41            | 0.03  | 3.23  | 0.11                           | 35.17                           | 0.01             | 0.29             | 0.75              |       |           |      |     |     |    |     |  |
| 19 GTV <sub>1</sub>             | 黑色块状物 | 84.70            | 0.07  | 0.04  | 0.62                           | 6.63                            | 0.01             | 0.05             | 0.53              | 0.003 | 5         | 55   | <10 | 3   | 3  | 14  |  |
| 19 GTV <sub>2</sub>             | 褐色块状物 | 50.82            | 1.05  | 1.61  | 1.39                           | 27.30                           | 0.11             | 0.45             | 2.74              | 0.731 | 41        | 531  | 10  | 33  | <3 | 20  |  |
| 25 GTV <sub>1</sub>             | 绿色泥   | 64.19            | 0.30  | 1.57  | 0.62                           | 19.71                           | 0.01             | 0.53             | 3.29              | 0.019 | 6         | 27   | <10 | 9   | <3 | 25  |  |
| 25 GTV <sub>2</sub>             | 黑色块状物 | 67.44            | 0.73  | 1.10  | 0.62                           | 16.16                           | 0.06             | 0.38             | 2.66              | 0.567 | 72        | 77   | <10 | 34  | 7  | 30  |  |
| 25 GTV <sub>3</sub>             | 褐色块状物 | 93.97            | 0.38  | 0.18  | 0.62                           | 1.35                            | 0.01             | 0.05             | 0.21              | 0.004 | 2         | 2    | <10 | <1  | 3  | 30  |  |
| 25 GTV <sub>4</sub>             | 褐色块状物 | 87.93            | 0.09  | 0.12  | 0.62                           | 6.22                            | 1.01             | 0.11             | 0.46              | 0.015 | 3         | 2    | <10 | <1  | 3  | 28  |  |
| 31 GTV*                         | 烟囱体   | 55.78            | 0.62  | 2.98  | 3.13                           | 27.39                           | 0.27             | 0.57             | 0.69              |       |           |      |     |     |    |     |  |
| 41 GTV*                         | 烟囱体   | 58.52            | 0.04  | 1.99  | 0.1                            | 29.96                           | 0.01             | 0.26             | 0.26              |       |           |      |     |     |    |     |  |
| 31 GTV                          | 玄武岩   | 53.6             | 8.1   | 5.7   | 15.0                           | 19.6                            | 1.79             | 0.78             | 3.5               | 0.16  | 41        | 68   | 30  | 33  | 40 | 149 |  |
| 43 DS <sub>1</sub>              | 玄武岩玻璃 | 51.42            | 10.81 | 7.72  | 16.46                          | 8.68                            | 1.07             | 0.38             | 3.04              | 0.152 | 56        | 71   | 199 | 103 | 23 | 90  |  |
| 东太平洋<br>海隆 <sup>[12]</sup>      | 非晶质   | 89.43            | 0.20  |       | 1.91                           | 0.40                            |                  |                  | 0.10              |       |           |      |     |     |    |     |  |
|                                 | 热液硅管  |                  |       |       |                                |                                 |                  |                  |                   |       |           |      |     |     |    |     |  |
| 夏威夷<br>Loihi 海山 <sup>[13]</sup> | 热液堆积物 | 47.3             | 1.59  | 3.75  | 2.16                           | 34.1                            | 0.56             | 0.98             | 1.48              | 0.24  | 293       | 1680 | 120 | 246 |    |     |  |
| 加拉帕戈斯 <sup>[16]</sup>           | 硅质烟囱  | 92.82            | 0.03  | <0.15 | <0.20                          | 2.40                            | <0.02            | 0.11             | <0.50             | 0.03  |           |      |     |     |    |     |  |

\* 德国基尔大学地质与古生物研究所实验室分析数据。

不等; 全铁( $TFe_2O_3$ )含量次之, 随试样不同而异, 含量变化从 1.35—35.17%, 波动较大; 金属元素 Cu, Zn, Cr 和 Ni 等皆为低值, 以微量元素形式赋存。此种特点与东太平洋海隆  $21^{\circ}N$  热液场中硅酸盐相的非晶质硅质物特点基本相似<sup>[12]</sup>, 与夏威夷 Loihi 海山热液堆积物也很接近<sup>[13]</sup>(图4)。图4展示了上述太平洋不同海域类似硅质烟囱类型的  $SiO_2$  和  $TFe_2O_3$  的含量变化。显然, 不论二者各自含量变化多大, 含量之和却皆在 80% 以上, 体现了此类海底热液产物的基本组成和 Si 及 Fe 元素之间依存关系的一致性。

另外,表 2 中的数据波动还说明,不同地点(站位)烟囱体的化学成分是有所变化的.即便是同一站位,由于取样部位的不同,烟囱体的化学成分也有不同,这点由 25GTV 和 31GTV 站的烟囱体的分析得到证实.表现在  $\text{SiO}_2$  含量上,从烟囱体的外壁到内核,平均含量由 94% 降到 85.3%;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  含量却由外壁的 3% 向内核升高到 13% 以上.与此同时,代表性矿物蛋白石和黄铁矿的组分变化,也由外壁以蛋白石为主向内核变成黄铁矿的比重显著增大<sup>1)</sup>,证明了烟囱体在形成过程中经历的化学分异和矿物分异作用.

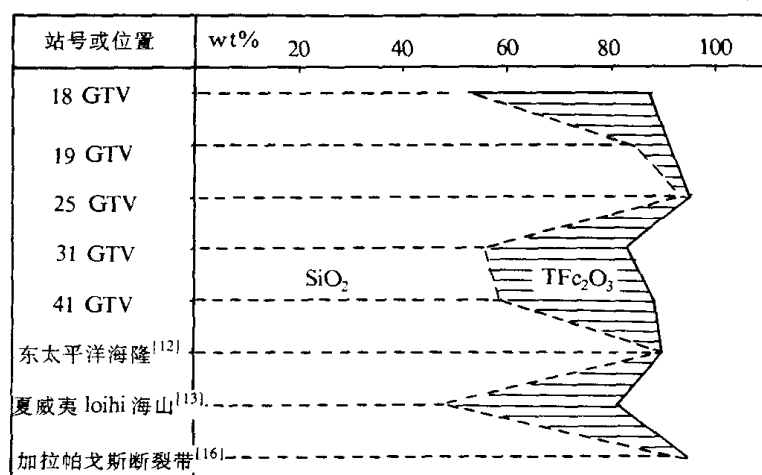


图 4 马里亚纳海槽及太平洋其他海域海底热液产物中  $\text{SiO}_2$  和  $\text{TFe}_2\text{O}_3$  含量的波动情况

马里亚纳海槽热液烟囱体的矿物成分,从 18 GTV, 19 GTV 和 31 GTV 站的鉴定结果可知,主要为蛋白石、黄铁矿、白铁矿、重晶石以及 Fe, Mn 氢氧化物. 19 GTV 站黄铁矿的扫描形态有立方体状、球粒状、草莓状和带溶蚀孔洞的玫瑰晶簇状(图版 I-1—4),重晶石的板状晶体也十分典型(图版 I-5). 19 GTV 和 31 GTV 站的光片(图版 I-6),也可清楚地说明黄铁矿在热液分异过程中产出的结构特征.

上述可见,马里亚纳海槽的海底热液烟囱体,主要是蛋白石为代表的硅酸盐相非晶质硅质烟囱,其次还有黄铁矿、白铁矿和重晶石等组成的硫化物和硫酸盐相的结晶质热液烟囱体,个别站位也发现有热液成因的细粒灰色-绿色泥,它们的主要成分为绿脱石粘土矿物,反映了马里亚纳海槽海底热液烟囱体和热液活动的基本特性.

## 五、热液烟囱体的成因探讨

马里亚纳海槽为一产生新洋壳的扩张中心,小扩张脊则是不断扩张的最年轻的洋壳部位.根据 Rona 对于扩张中心的扩张阶段和海洋循环条件的研究<sup>[14]</sup>,马里亚纳海槽存在着快速扩张和断裂所造成的良好海洋循环条件.产生的黄铁矿为代表的海底热液块状硫化物,应是在高温( $\sim 350^\circ\text{C}$ )、酸性的原始热液直接从玄武岩裂隙溢口中喷出,在烟囱通道内壁形成硫化

1) 国家海洋局第一海洋研究所,中国-联邦德国马里亚纳海槽和西菲律宾海盆海洋地质联合调查研究报告, 1989.11, 119.

物沉淀。该烟囱熄灭后,由于烟囱通道的阻塞和伴随的温度降低,造成了与原来不同的地球化学循环和介质条件。烟囱内壁的诸如磁黄铁矿等高温型矿物,也易转变成我们已鉴定到的黄铁矿、白铁矿以及铁的氢氧化物。

另外,在马里亚纳海槽 19 GTV 站,与黄铁矿砂混杂的矿物还有板状重晶石和非晶质的蛋白石。重晶石是一种低于黄铁矿温度析出的硫酸盐结晶矿物,它和硅酸盐的蛋白石的生成条件主要与中温型热液有关,应归类为海底热液“白烟囱”产物。此种热液矿物,在东太平洋海隆 21°N 西南部,伊豆-小笠原断裂带,下加利福尼亚北部 Agua Blanca 断裂带都有分布,形成温度 300—100°C<sup>[15]</sup>。

作为 SiO<sub>2</sub> 含量在 90% 以上的硅质烟囱的研究报道,至今仍是较少的。Herzig 等<sup>[16]</sup>报道了他们对东太平洋海隆加拉帕戈斯断裂带纯硅质烟囱的研究成果。根据 SiO<sub>2</sub> 溶解度和温度的关系推断,形成烟囱的初始热液温度应为 175—193°C,属于中温型产物。但是,从氧同位素的间接温度测定,也不排出低温形成的可能性<sup>[16]</sup>。本次在马里亚纳海槽获得的 6 站次热液烟囱样品,皆以硅质为主要成分,其矿物组成与“白烟囱”基本相当,但缺少东太平洋海隆“白烟囱”所含的闪锌矿或纤锌矿等 Zn 的硫化物<sup>[17]</sup>。电子探针的微区分析结果表明,马里亚纳海槽 31 GTV 站 SiO<sub>2</sub> 含量高达 95.45—98.67%,其他元素含量很少(表 3),也可认为是一种典型的纯硅质烟囱。

表 3 31 GTV 站硅质烟囱的电子探针分析 \*

| SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | FeO  | Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 合计    |
|------------------|--------------------------------|------|--------------------------------|-------|
| 95.45            |                                | 1.84 | 1.66                           | 98.95 |
| 98.67            | 0.08                           | 0.23 | 0.46                           | 99.44 |
| 98.15            | 0.03                           | 0.12 | 0.03                           | 98.33 |
| 97.92            | 0.04                           | 0.37 | 0.21                           | 98.54 |

\* 表中数据为重量百分含量 (wt%)。

综上所述,马里亚纳海槽的热液烟囱实际存在两种主要形式。一种是中低温型类似“白烟囱”的硅质烟囱。它们以非晶质的蛋白石为主要矿物成分,是马里亚纳海槽热液活动的主要产物。另一种是高温型“黑烟囱”转化而来的黄铁矿、白铁矿为代表的海底块状硫化物。由于烟囱已经熄灭,烟囱通道的阻塞及伴随而来的温度降低和介质环境变化,重晶石则以中温型矿物析出,参入了马里亚纳海槽海底热液烟囱的矿物学建造。

可以说,马里亚纳海槽的烟囱体,既有 Galapagos 断裂带纯硅质烟囱高 SiO<sub>2</sub> 含量的特点,也存在 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量在烟囱体不同发育阶段的显著差异,是西太平洋板块俯冲带所形成的小海盆(海槽)中一种规模较小的海底热液活动类型。

## 六、结 束 语

1. 马里亚纳海槽扩张中心的小扩张脊部位,具备产生海底热液活动和热液烟囱体的地质构造和岩石学条件;

2. 通过马里亚纳海槽的热液烟囱体、底层水温异常、热液场的独特生物景观以及烟囱体的产状等海底观测资料和烟囱体的矿物、地球化学分析资料的研究,揭示了马里亚纳海槽海底热液活动的规模、经历和特点,预示着海槽区存在正在形成的海底热液产物的现实性;

3. 马里亚纳海槽海底热液烟囱体基本存在两种成因类型(高温型的“黑烟囱”和中低温型的“白烟囱”,目前皆已熄灭)和三种矿物相(以蛋白石、绿脱石为代表的硅酸盐相,以黄铁矿、白铁矿为代表的硫化物相和以重晶石为代表的硫酸盐相),体现了该区热液活动和热液产物的基本特征。马里亚纳海槽所具备的这种基本特征,则是小海盆中较之大洋中脊和深断裂带规模小得多的海底热液活动类型,无疑将为我们深入研究和寻找新的热液活动类型提供重要例证。

对德国基尔大学地质与古生物研究所 P. Stoffers 教授在资料和文献方面所提供的帮助,以及徐小薇同志清绘图件,作者均深表感谢。

### 参 考 文 献

- [1] Leinen, M. & Anderson, R. N., *EOS*, **62**(1981), 914.
- [2] Horibe, Y., Kim, K. - R. & Craig, H., *Nature*, **324**(1986), 131—133.
- [3] Craig, H., Horibe, Y. & Farley, K. A., *EOS*, **68**(1987), 1531.
- [4] Hussong, D. & Uyeda, S., *Reports of the Deep Sea Drilling Project* 60, 1982, 909—929.
- [5] Lonsdale, P. & Hawkins, J., *Geol. Soc. Am. Bull.*, **96**(1985), 7: 940—951.
- [6] Anderson, R. N., *Nature*, **300**(1982), 215—216.
- [7] Hobart, M. A. et al., *EOS*, **64**(1983), 315.
- [8] Hart, S. R., Glassey, W. E. & Karig, D. E., *Earth Planet. Sci. Lett.*, **15**(1972), 12—18.
- [9] Garcia, M. O., Liu, N. M. K. & Muenow, D. W., *Geochim. Cosmochim. Acta.*, **43**(1979), 305—312.
- [10] Poreda, R., *Earth Planet. Sci. Lett.*, **73**(1985), 244—254.
- [11] Stoffers, P., Wu, S. & Puteanus, D., *Geolog. Palaont. Inst. Univ. Kiel.*, **34**(1989), 160.
- [12] Hekinian, R. et al., *Science*, **207**(1980), 1433—1444.
- [13] DeCarlo, E. H., McMurtry, G. M. & Yen, H. - W., *Earth Planet. Sci. Letters*, **66**(1983), 438—449.
- [14] Rona, P. A., *Marine Technology Society Journal*, **16**(1982), 3: 81—86.
- [15] Lonsdale, P., *EOS. Trans. Amer. Geophys. Union.*, **61**(1980), 995.
- [16] Herzig, P. M. et al., *Earth Planet. Sci. Letters.*, **89**(1988), 261—272.
- [17] Oudin, E., *Marine Mining*, **4**(1983), 39—72.