

现代海底 热液活动

栾锡武/著



科学出版社

现代海底热液活动

栾锡武 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书介绍了近年来对洋中脊、板内火山以及弧后盆地现代海底热液活动的调查与发现,描述了现代海底热液活动区的分布特征,讨论了现代海底热液活动的热源和通道,给出了现代海底热液活动的成因模式。本书亦进行了热液柱的讨论,阐述了热液柱与大洋底层流对富钴结壳形成与分布的控制作用。

本书可以作为从事海洋地质调查研究专业人员的参考用书,也可以作为海洋地质、环境、资源勘查等专业本科生和研究生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

现代海底热液活动 / 栾锡武著. —北京: 科学出版社, 2017. 6

ISBN 978-7-03-052450-8

I. ①现… II. ①栾… III. ①海底-热流-研究 IV. ①P738.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 068723 号

责任编辑: 周 杰 刘文杰 / 责任校对: 彭 涛

责任印制: 肖 兴 / 封面设计: 黄华斌 陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 6 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2017 年 6 月第一次印刷 印张: 15 1/4

字数: 360 000

定价: 128.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)



自序

科学与技术总是共同存在于一个特定的范围内，在很多时候，我们习惯于把科学和技术连在一起，统称为“科技”。实际上二者既密不可分，又互相区别。科学是表征客观世界的知识，技术则是获取知识和应用知识的手段与方法。

尽管科学与技术相互依存、互相渗透，紧密联系，但在人类社会发展的过程中，科学与技术常常脱节。在 19 世纪中叶以前，科学是落后于生产和技术的，其发展是在生产需要推动下进行的。那时，科学、技术和生产之间的关系，往往是生产实际需要刺激技术的进步，再促进科学发展。它们之间的发展顺序是生产—技术—科学。生产和技术实践为科学理论的形成奠定基础。

19 世纪下半叶以后，这种关系发生了微妙的变化。科学理论研究不仅走在了技术和生产的前面，还为技术和生产发展开辟了各种可能的途径，形成了科学—技术—生产的发展顺序。例如，麦克斯韦电磁场理论带动了无线电技术与相关产业的发展。

进入 20 世纪以后，工业生产和技术的长足发展已经超出了人们熟悉的范围。一些研究甚至一时还看不出和人们当前生活的关系。科学的任务，是要在最短的时间内，为技术和生产发展开拓出新的途径。现代科学产生了空前的先行作用，科学变成了超越一般技术进步的因素。

在过去的半个世纪，我国社会发展经历了一条特殊的发展道路，科学、技术与生产之间呈现出不同寻常的关系。20 世纪 80 年代开始，我国实行了改革开放政策，使得国民经济实现了突飞猛进的发展。但经济的迅猛发展，并没有带来科学和技术的迅速进步。实际上，在这个时期，我国实行的科技战略方针（特别是有关海洋方面的科技战略方针）基本上可以概括为跟踪、模仿，并以跟踪为主。通过跟踪，我们获得了有关海洋的新知识。但这段时间，我们的海洋技术却没有进步。

“阿尔文”号载人潜器是目前世界上最著名的载人深海考察工具，服务于美国伍兹霍尔海洋研究所。它是在 1964 年 6 月 5 日下水时以伍兹霍尔海洋研究所科学家阿尔文的名字命名的。“阿尔文”号载人潜器的下水对现代海底热液活动调查研究起到了决定性的作用，同时也对整个海洋地质学发展起到了很大的促进作用。

另一个需要提及的载人潜器是日本的“深海 2000”号。“深海 2000”号下水服役

时间要比“阿尔文”号晚 17 年，但其后续科学贡献仍可载入史册，特别是其在东海冲绳海槽的调查及其中热液喷口的发现。

受技术条件的制约，我国的海洋地质工作是从海岸带调查开始的，历经 20 多年，从无到有，并取得了不少科研成果。具有代表性的包括“第四纪冰冻成卤理论”和“陆架沙漠化理论”等。20 世纪 70 年代包括“科学一号”在内的 6 艘 625 型科学调查船下水，将我国海洋地质学研究调查领域从海岸带扩展到了大陆架。此时，东海冲绳海槽开始进入我们的视野。“深海 2000”号在冲绳海槽的一系列热液调查发现成为我国启动现代海底热液活动调查研究的主要动因。

20 世纪 80 年代初，我国科研人员通过国际交流陆续了解到国外现代海底热液活动调查研究所取得的重要成果，知晓了冲绳海槽热液喷口的存在。90 年代初在秦蕴珊院士的主导下，中国科学院海洋研究所成立了专门的现代海底热液活动研究小组。“科学一号”组织了几个航次的冲绳海槽地质调查。但当时的“科学一号”只有单波束测深、磁力和地质取样能力，航次虽然获得了大量的浮岩、海底沉积物等样品，却并不具备发现海底热液喷口的能力。所以，当时开展现代海底热液活动的主要研究手段是跟踪。

通过国际跟踪，我们的现代海底热液活动知识迅速从红海拓展到太平洋中脊，从大西洋海隆拓展到印度洋海岭，从太平洋板内火山拓展到西太平洋弧后盆地，从黑烟囱、白烟囱拓展到黄烟囱，从高温热液喷口拓展到低温热液喷口，从超速、快速扩张洋脊拓展到慢速、超慢速扩张洋脊，从海洋地质学领域拓展到海洋生物学、海洋生态学领域。通过对 400 多个现代海底热液活动区的分析，对现代海底热液活动的基本规律，包括现代海底热液喷口分布和洋脊扩张速率的关系、现代海底热液喷口分布和水深的关系、现代海底热液喷口分布和构造环境的关系等有了基本认识，同时对热液活动的热流输出、热液柱的基本形态、热液活动对洋底锰结核与富钴结壳成因的控制作用等也都有了基本认识。

2000 年，由于已经获得关于现代海底热液活动较为全面、系统的认知，后续调查工作较少能在该领域取得突破性发现。但在我国开展现代海底热液活动调查研究的驱动力依然存在，这不仅是因为当时我们对热液活动发现的零贡献，更是因为我们的海洋技术依然空白，虽然我们通过跟踪也已掌握了关于现代海底热液活动的科学认知，但却没有应用知识以及产生新知识的技术和手段。很明显，在该领域，我国的科学、技术以及生产应用脱节，科学再次表现出了其先行的特征。

2011 年，中国大洋协会在西南印度洋获得面积为 1 万 km^2 的多金属硫化物合同区，2012 年“蛟龙”号载人深潜器完成 7000m 下潜测试，2015 年交付国家深海基地管理中心正式投入使用，标志着我国现代海底热液活动调查进入科研、技术、生产并举，并从生产为主导的新阶段。

没有生产的带动，科学知识往往局限在有限的范围内。在这个时候，笔者认为有

必要把有关现代海底热液活动的资料整理出版,以便服务于生产,同时也为更多的人了解这些知识提供便利。此外,出版这本书还得益于编辑的鼓励与督促。

本书是笔者自 20 世纪 90 年代以来在现代海底热液活动领域的工作总结,涵盖了大量国内外在海底热液活动领域的相关资料和对资料的分析、归纳总结以及所做的模式假设、模型计算等。本书分析了热液活动在全球的分布规律,并从理论上分析了热液喷口在时间上的脉动特征,和在空间上的等间距分布特征,通过对岩浆破裂的研究,分析了轴旁火山和热液发育的理论基础。本书亦进行了热液柱的讨论,阐述了热液柱与大洋底层流对富钴结壳形成与分布的控制。

仅以本书的出版表达对秦蕴珊院士的怀念。

李锡武

2017 年 2 月于青岛海洋科学与技术国家实验室

前 言

地球有一个高热的内核，是能量聚集的地方，在其通往死寂的演化过程中，不断地由内而外，以各种方式释放着这部分能量。

这是一个完全自然的过程。

人类努力通过认识这些方式和这一自然过程的每一细节来了解地球，了解我们自身的生存环境。

在这些方式中，人们认识最早的是火山喷发，因为它是那么的轰轰烈烈，有的还给人造成了极大的危害。

20 世纪 70 年代，海底热液活动的发现为我们打开了研究地球的另一扇窗户。

不同于火山喷发的短时与猛烈，海底热液活动在持续不断地向我们提供着地球深部信息。我们在欣喜地关注这扇窗户的同时，也发现其在徐缓地，但却不停地调整着我们的生存环境，使我们感到热液活动研究成为一种需要。

现代海底热液活动是板块构造活动的重要表象，其研究内容十分丰富。例如，现代海底热液活动分布规律研究、热液成矿研究、热液活动成因机制研究、热液活动环境效应研究、极端条件下生命过程研究等都是现代海底热液活动研究的内容。上述各研究内容既相互独立、自成体系，又相互联系、相互补充。只是在不同研究时期，研究的侧重点各不相同。

在现代海底热液活动研究的初期阶段，人们关心最多的是，在茫茫海洋中到底哪里存在热液活动，即热液活动的分布问题。近年来，随着人口、资源、环境问题的提出，现代海底热液活动的研究主题开始侧向热液活动的环境效应。但也应该看到，无论是过去，还是现在，热液硫化物矿床研究似乎是一个永恒的主题。

进入 20 世纪 90 年代以来，厄尔尼诺灾害频发，使得对厄尔尼诺的研究成为海洋科学领域的一个焦点问题。

围绕这一焦点问题，全球海洋工作者开展了海洋与大气长周期变化研究、大洋表层水温长周期震荡研究、海洋暖池研究等。

目前，虽然这方面的工作取得了一些的成果，但关于厄尔尼诺成因问题却一直没有得到一个令人满意的答案。经过一系列研究，人们将现代海底热液活动和厄尔尼诺事件联系起来，开始考虑现代海底热液活动对全球气候有多大影响，现代海底热液活动会不会是厄尔尼诺事件的成因等问题。

但是，至少目前还不能完全回答这个问题。首先，直到现在我们在大洋中进行热液调查的面积仅占海底总面积很少一部分，因而热液活动区的分布、大洋中到底有多少热液活动区尚不能确定，全部海底热液活动区的总能量输出也不能确定；其次，现代海底热液活动的成因机制、热液活动的活动时间与周期仍不明晰，热量通过热液柱向海洋的输送形式也不明确。问题的回答依赖于对现代海底热液活动透彻的调查研究。

本书不奢求回答诸如现代海底热液活动是否是厄尔尼诺事件起因这样的问题，而是希望在现代海底热液活动的分布特征和与热液成因相关的轴地壳岩浆房、岩浆房过程、岩浆破裂、海底裂隙以及热液活动对海洋的热贡献等方面有所贡献，为上述重大问题研究提供可靠的基本素材。

大洋锰结核、富钴结壳等成因依然是海洋地质科学领域研究的热点问题。本书提出热液柱和大洋底层流的共同作用控制了富钴结壳的成因和分布。但由于受笔者研究领域的限制，笔者对此研究并不深入，难免有不足认识，其他方面亦是如此，敬请读者不吝批评、赐教。

李锡武

2017年2月

目 录

自序

前言

第1章 绪言	1
1.1 现代海底热液活动的调查历史	1
1.2 现代海底热液活动调查的主要成果	10
第2章 现代海底热液活动区的分布	11
2.1 东太平洋海隆	11
2.2 大西洋中脊	23
2.3 印度洋中脊	28
2.4 西太平洋边缘	31
2.5 板内火山上的热液活动	40
2.6 全球海底热液活动区汇总	41
第3章 现代海底热液活动的分布特征	48
3.1 现代海底热液活动的空间分布特征	48
3.2 现代海底热液活动的水深分布特征	49
3.3 现代海底热液活动分布区的地形地貌特征	54
3.4 现代海底热液活动分布区的构造环境	58
3.5 现代海底热液活动的分布和洋脊扩张速率的关系	67
3.6 现代海底热液活动区的地球物理特征	79
第4章 现代海底热液活动的热源和通道	82
4.1 轴地壳岩浆房的存在与形态	83
4.2 岩浆房过程	86
4.3 破裂传播的流体力学分析	90
4.4 岩浆破裂的形态研究	96
4.5 岩浆迁移过程中的冷凝问题	103

4.6	岩浆的侧向传播	105
4.7	扩张中心海底裂隙的特征和分布	110
4.8	弧后岩石圈的破裂与传热	116
第5章	现代海底热液活动的成因模型	136
5.1	模型一：热液活动等间距分布	136
5.2	模型二：热液喷口的自脉动	141
5.3	模型三：短时的热液活动	143
第6章	热液柱与大洋底层流对富钴结壳的形成与分布的控制研究	145
6.1	热液柱的研究	145
6.2	大洋底层流的研究	167
6.3	大洋富钴结壳的研究现状与意义	177
6.4	PLUME 与南极底流对富钴结壳成因的控制作用	181
第7章	结论	198
参考文献		200
附录	现代海底热液活动的观测方法	228

| 第 1 章 | 绪 言

现代海底热液活动是普遍发育于海洋中活动板块边界及板内火山活动中心的一种在岩石圈和海洋之间进行能量和物质交换的过程，其显著表象是高温热液从海底流出。这种热液流体在海洋岩石圈中的流动，一方面使地球的热传递由热传导占主导地位变为热对流占主导地位，极大地提高了热传递效率；另一方面热液活动还会伴随地球物质由内向外迁移，成为地球化学能量动态平衡中的重要一环。现代海底热液活动在时间上，或串接岩浆活动、火山活动、构造活动等地质过程，或和这些地质过程相伴生，在海洋岩石圈的演化过程中扮演着十分重要的角色。热液生物发现以后，现代海底热液活动研究从地质科学领域延伸到了生命科学领域。现代海底热液活动研究在海洋科学研究中虽然时间短，但却已占据相当重要的地位。

1.1 现代海底热液活动的调查历史

1.1.1 早期现代海底热液活动调查

现代海底热液活动最初发现于红海。1948 年，瑞典科学考察船“信天翁”（Albatross）号在红海中部 Atlantis I 深渊附近（ $21^{\circ}20'N$ ， $38^{\circ}09'E$ ，水深 1937m）发现了高温、高盐溶液（Bruneau et al. , 1953）。

20 世纪 60 年代初，人们在东太平洋海隆发现了富铁、锰、铜、铬、镍、铅等多金属的沉积软泥，且多金属沉积物分布区与高热流异常区相对应。因此，有些学者提出了多金属沉积物与高热流活动有关的观点（Arrhenius and Bonatti, 1963；Skornyakova, 1965）。

1963 ~ 1965 年，国际印度洋调查计划期间，“发现者”（Discovery）号考察船经过红海时，第一次记录到中层海水的声学反射现象。随后科研人员对该区水样和海底沉积物样品进行了采集，经过研究发现中层海水的声学反射现象是由含悬浮金属颗粒的热卤水阻抗不同所致，从上覆水体中沉淀下来的多金属沉积物覆盖在红海北部慢速扩

张中心海底的许多地方 (Swollow and Crease, 1965; Miller et al., 1966; Hunt et al., 1967; Bischoff, 1969)。在红海的轴部及中央盆地中所发现的热液多金属沉积软泥震动了整个地学界, 从而揭开了现代海底热液活动调查研究的序幕。

现代海底热液活动调查研究在开始阶段就有一系列重要发现 (表 1-1)。初期, 热液成矿现象是现代海底热液活动调查研究所关注的主要问题。例如, 20 世纪 60 年代初期, Bonatti 和 Joensuu (1966) 在南太平洋海隆附近的海山上采集到了洋中脊的海底热液沉积物 (铁锰结壳); 1972 年, 在大西洋中脊 26°N 的 TAG 热液区采集到了低温热液样品 (锰氧化物结壳) (Rona, 1973; Scott et al., 1974a, b; Rona et al., 1975)。

表 1-1 现代海底热液活动调查研究中的几次重要发现

年份	位置	重要发现	文献
1963	红海	多金属软泥	Swallow 和 Crease, 1965; Miller 等, 1966; Hunt 等, 1967; Bischoff 等, 1969; Degens 等, 1969
1963 ~ 1966	EPR ^① (快速扩张洋中脊)	多金属软泥	Arrhenius 和 Bunatti, 1963
1972 ~ 1973	TAG 热液区 (慢速扩张洋中脊)	低温热泉	Rona, 1973; Scott 等, 1974a; Rona 等, 1975
1974	劳海盆 (弧后盆地)	热液硅和重晶石	Bertine 和 Keene, 1975
1977	加拉帕戈斯	热液生物	Lonsdale, 1977b; Corliss, 1979
1978	EPR21°N	块状硫化物	Francheteau 等, 1979
1979	EPR21°N	高温黑烟囱	RISE Project Group, 1980
1981	Loihi 海山 (板内火山)	硫化物	Malahoff, 1982
1984	“夏岛 84-1” 海丘	死烟囱	Kimura 和 Kaneoka, 1986
1986	“夏岛 84-1” 海丘	热液小墩	Halbach 等, 1989a; Kimura 等, 1988
1988	伊是名海洼 (具有陆壳性质)	热液硫化物矿床	中村光一等, 1990; 田中武男等, 1989
1991	南奄西海丘	热液烟囱	千叶仁等, 1993

但随后的一些重大发现, 如海底高温黑烟囱和海底热液生物的发现令世人为之震惊, 大大地改变了人们头脑中已有的关于传统海洋地质学和传统生物学的认识。

① EPR: east pasific rise, 东太平洋海隆。

(1) 高温黑烟囱的发现

1978年,法国、美国和墨西哥组成的调查队使用法国“西雅娜”(Cyana)号深潜器对东太平洋21°N海隆进行了调查,拍摄到许多形状古怪的丘状体,并在洋中脊第一次采集到块状硫化物样品(Hekinian et al., 1980; Francheteau et al., 1979)。对样品分析发现,其矿物成分主要为闪锌矿、黄铜矿、白铁矿和黄铁矿。沉积物全岩样品中Zn的含量高达29%,Cu的含量达6%,这是首次在洋底发现富含有色金属的块状硫化物。

一年后,法国、美国和墨西哥组成的调查队利用“阿尔文”(Alvin)号载人潜器开始了“RISE”项目的调查,在东太平洋海隆21°N洋底附近发现了由块状硫化物构成的黑烟囱以及25个正在活动的高温“黑烟囱”热液喷口。通过原位测量获得的温度高达350~400℃,同时在平行的洋脊轴区热液喷口处采集到了135kg热液硫化物样品。这是科学家发现的第一个由硫化物堆积形成的“黑烟囱”,也是第一次发现“黑烟囱”喷溢黑色高温流体(Francheteau et al., 1981; RISE Project Group, 1980; 高爱国, 1996)。

(2) 海底热液生物的发现

1976年,在加拉帕戈斯(Galápagos)扩张中心进行底层水调查时发现了水体温度异常及水体³He含量异常,同时在海底发现了一堆蛤壳。1977年2月,“阿尔文”(Alvin)号载人潜器下潜到Galápagos断裂扩张中心顶部时,发现了正在活动的热液喷口,且在该热液区海底首次观察到活的生物。观察到的生物包括双壳类、管状蠕虫以及其他生物。详细的调查研究发现,热液生物群落中的初级生产者是热液口的化能自养细菌,其能量来源是热液喷出的流体提供的化学能,这些生活在热液喷口处的细菌通过氧化热液中的还原性硫化物(如H₂S)获得能量,并以CO₂和H₂O化合成碳水化合物化合物的过程来代替光合作用,以此供应整个生态系统。这种不以光合作用为基础创建食物链的庞大海底热液生物群落的发现,彻底改变了人们关于地球上食物链以光合作用为基础的旧有认识(Lonsdale, 1977a; Corliss, 1979; Barnes et al., 1992; 季敏, 2004; 高爱国, 1996; 王兴涛, 2004)。

(3) 从快速洋脊到慢速洋脊,从洋脊到弧后盆地,再到板内火山

随着调查活动的不断进行,人们发现,现代海底热液活动的调查研究不仅可以为板块构造理论提供重要的支持证据,同时它也是我们认识地球内部结构与组成的一个重要窗口。热液活动调查研究的科学意义在某种程度上更甚于其经济意义(吴世迎, 2000),从而得到更加广泛地关注。

海底热液活动研究的主要科学问题有海底热液活动的分布规律、成因机制、环境

效应及其成矿机理等。海底热液活动发育的构造环境研究不仅可以从理论上认识热液活动发育的机制,同时也可以为新的海底热液活动区的调查发现指明方向,多少年来一直是备受关注的问题之一。对该问题的认识也随着热液调查发现的深入而不断从片面走向深入。20 世纪 70 年代以前,Arrhenius 和 Bonatti (1963) 认为只有在快速扩张的洋中脊才能发育热液活动。但 1974 年, Rona 和 Scott (1974) 宣布在慢速扩张的大西洋中脊也发现了热液活动区,这就是著名的 TAG 热液活动区。同年,劳海盆 (Lau Basin) 中热液活动区的发现又将海底热液活动发育的构造背景从洋中脊扩大到了弧后盆地 (Bertine and Keene, 1975)。很快,人们就认识到海底热液活动是一种全球性的地质现象。现代海底热液活动的研究也不断地走向广泛和深入。从 20 世纪 80 年代开始,海底热液活动的调查研究逐渐扩展到全球各大洋构造活动带,如弧后扩张盆地以及板内火山以及海底山^①等。

1985 年 7~8 月, Trocine 和 Trefry (1988) 在慢速扩张的大西洋中脊 TAG 区发现正在活动的黑烟囱、块状硫化物以及喷口生物群落,并测得喷口温度为 200℃。同年 12 月,大洋钻探计划 (ODP) 106 航次在大西洋中脊 (mid-Atlantic ridge, MAR) 23°N 裂谷处又发现一处高温热液活动区。在该区的海底发现有黑色热液沉积物、墩状硫化物、硫化物烟囱和高温黑烟囱等。从黑烟囱热液喷口测得的温度高达 350℃,这是在慢扩张洋脊发现的温度最高的热液喷口。该热液活动区被命名为蛇坑 (Snake Pit) 热液区 (Karson and Brown, 1988)。1986 年,“阿尔文”号载人潜器对 Snake Pit 热液区进行了调查,证实了热液区的存在,并采集了块状硫化物、热液沉积物及流体和生物样品。

1981 年, Malahoff 等 (1982) 对夏威夷群岛南的 Loihi 海山研究时发现了硫化物等海底热液沉积。同年, Leinen 等 (1981) 首次报道了西太平洋马里亚纳海沟存在热液沉积物。

1984 年 9 月,日本海洋科技中心利用“深海 2000” (Shinkai 2000) 号载人潜器对冲绳海槽中部进行了调查,在“夏岛 84-1”海丘的顶部发现了不活动的类似烟囱状构造的热液堆积物——死烟囱 (Kimura and Kaneoka, 1986)。1986 年 7 月,又在该处发现了活动的热液喷口,测量获得喷口温度为 42℃,并获得了热液沉积物样品 (Halbach et al., 1989a; Kimura et al., 1988)

1988 年 6 月,日德科学家利用“太阳” (RV Sonne) 号科考船在冲绳海槽中部的伊是名 (Izena) 海洼发现了热液硫化物样品。9 月,“深海 2000”号在伊是名海洼发现了三个黑烟囱群,其中一处烟囱喷口附近的热液流体温度为 67℃,喷口周围覆盖黑

^① 大洋内分布大量海底山 (群),其中部分被认为是古陆,所以有别于板内火山。

色的热液硫化物沉积。一处烟囱已停止活动,但地热测量结果表明其热流值仍然较高。同年,在伊平屋(Iheya)海隆北坡发现了活动的热液底栖生物群和复式丘状热液沉积体,丘体裂隙中喷出的热液流体温度高达 220°C (中村光一等,1988)。

1989年6月,在冲绳海槽伊是名海洼发现正在活动的“黑烟囱”,喷口温度高达 320°C 。在伊平屋CLAM区也第一次发现了碳酸盐烟囱和丘体(中村光一等,1990;田中武男等,1989)。

1991年6月,在冲绳海槽南奄西海丘的调查发现了热液烟囱,测得其喷出温度高达 278°C 。由此开始,三处热液活动区(“夏岛84-1”海丘、伊是名海洼和南奄西海丘)的重大发现使冲绳海槽成为了当时热液活动调查的热点地区之一(千叶仁等,1993)。

1.1.2 近期海底热液活动调查

在现代海底热液活动调查研究的开始阶段,美国、法国、德国、日本、加拿大、俄罗斯等国家先后对太平洋海隆、中大西洋洋脊、西南太平洋弧后盆地等海域进行了多次热液活动调查和取样,获得了很多重要的成果。尽管如此,迄今为止,人类过去的调查活动,仅覆盖了不到10%的全球洋脊系统,而且调查的区域主要集中于东北太平洋海隆、中大西洋中脊和西太平洋弧后盆地等区域,对印度洋、北冰洋、南极等地区的研究相对较少。

(1) 印度洋洋中脊

1994~2002年,在Inter Ridge、DSDP、ODP和IODP等国际计划的大力推动下,美、日等国在超慢速扩张的西南印度洋中脊完成了包括热液活动调查在内的16个调查航次,使西南印度洋中脊成为地球上研究得最好的慢速扩张洋脊。

1997年,“Fuji”航次在西南印度洋脊东部区域的调查中,发现了6个水体化学异常区,推测该区域底部可能存在海底热液活动区(German et al., 1998)。

1998年,日本“Indoyo”航次首次利用“深海6500”(Shinkai 6500)号深潜器对印度洋洋中脊进行调查,在 $63^{\circ}56'\text{E}$ 、 $27^{\circ}51'\text{S}$ 处的Jourdanne海山发现了块状硫化物和不活动的烟囱体,证实西南印度洋脊轴部火山曾经存在热液活动区,这说明高温块状硫化物烟囱也可以存在像西南印度洋脊这样的超慢速扩张洋脊环境中(Fujimoto et al., 1999; Münch et al., 2000, 2001)。

2000年,“R/V Knorr 162”航次在西南印度洋脊西部的调查中,发现了8个热液异常区。2001年,“R/V Knorr 162”航次在西南印度洋脊 10°E ~ 16°E 发现了1个超基

性岩控制的热液矿化点 (Bach et al., 2002; Baker et al., 2004)。

近年来,我国大洋协会在印度洋进行了大量热液活动调查。

(2) 北冰洋洋脊

2001年, Hannington 等阐述了1997年和1999年德国利用“R/V Poseidon”号考察船(229航次和253航次)在格利姆塞岛地区进行的两个航次调查首次在格利姆塞岛地堑——一个浅水且充满沉积的地堑环境中发现高温热液喷口(温度达250℃)和大量的硬石膏沉积。格利姆塞岛喷口区位于北大西洋,是在北极圈内的第一个已知的重要热液活动区,也是海底高温环境中记录的最大规模地区之一(Hannington et al., 2001)。

2001年,在北冰洋 Gakkel 洋脊的第一次国际性航次的调查期间,发现了多处海底热液喷口,找到了 Gakkel 洋脊在“慢速扩张速率下也可以具有强烈的熔融富集”这一假设的实际证据,表明与断裂伴生的岩浆活动强烈富集可能解释了这种事先未预料高度活跃的热液活动(Michael et al., 2003)。

(3) 南极地区

1987年 Suess 等最早报道了南极 Bransfield Strait (布兰斯菲尔德海峡) 弧后盆地水体化学异常,海底沉积物热液蚀变,以及海底热流异常等(Suess et al., 1987)。1995年 Klinkhammer 等组织航次,对南极 Bransfield Strait 进行专门的热液活动调查,发现了水体 Mn 含量、光度、温度等异常,初步圈定了热液活动区范围(Klinkhammer et al., 1995)。1997年“RV Polarstern”航次,在此前圈定的 Hook 脊区获得了沉积物样品。样品在甲板上测得的温度为24℃(Bohrmann et al., 1999)。1999年的 NBP99-04 航次, Klinkhammer 等继续对 Bransfield Strait 盆地进行调查,在火山口中测得火山灰沉积的温度为42~49℃,并使用电视抓斗获得了硫化物烟囱碎块,根据其结构和化学成分,推测其形成时的温度为250℃(Klinkhammer et al., 2001)。

(4) 马里亚纳海槽

1987年“Alvin”号载人潜器在马里亚纳海槽18.2°N,沿海槽的脊线发现 Alice 热液活动区(18°13'N, 144°42'E; 水深3600m)。热液喷口的温度高达287℃,喷口周围发育热液生态系统(Craig and Poreda, 1987)。1988年和1990年德国“太阳”号对 Alice 热液区进行了调查(Stuben et al., 1995)。1992年和1996年,日本“深海6500”号深潜器两度重返 Alice 热液活动区进行热液等样品采样(Gamo et al., 1993; Fujikura et al., 1997)。1992年日本“深海6500”号深潜器对马里亚纳海槽南部 ASVP 区也进行了调查,在 Peak B 海底山的山峰发现了 Forecast 热液活动区(13°24'N, 143°55'N; 水深1470m)。日本“深海6500”号深潜器于1993年和1996年又对 Forecast 热液活动区进行了调查(Gamo et al., 1993; Fujikura et al., 1997)。

马利亚纳海槽南部热液活动区发现于2003年 (Utsumi et al., 2004)。Snail 热液活动区 ($12^{\circ}57'10''\text{N}$, $143^{\circ}37'10''\text{E}$; 水深2870m) 和 Yamanaka 热液活动区 ($12^{\circ}56'40''\text{N}$, $143^{\circ}36'45''\text{E}$; 水深2820m) 位于弧后扩张轴上; Archean 热液活动区 ($12^{\circ}56'26''\text{N}$, $143^{\circ}37'55''\text{E}$; 水深3000m) 位于扩张轴东部坡脚; Pika 热液活动区 ($12^{\circ}55'1''\text{N}$, $143^{\circ}38.95'\text{E}$; 水深2920m) 则位于扩张轴以东5km的轴旁山丘上 (Yoshikawa et al., 2012)。Pika 热液区热液喷口的温度在 $110 \sim 340^{\circ}\text{C}$, 海底发育正在活动的黑烟囱、白烟囱, 也发育大量不活动的热液烟囱体。喷口周围存在大面积正在漫溢的流体区 (Kakegawa et al., 2008)。

Nakamura 等于2009年和2010年分别利用“Urashima”号AUV和“Shinkai 6500”号载人潜器在关岛西南约130km的马利亚纳弧后盆地进行了声学、磁学调查, 此外还进行了海底观测与取样, 结果发现了一个新的热液活动区 (热液喷口位置位于 $12^{\circ}55.30'\text{N}$, $143^{\circ}38.89'\text{E}$), 其深度为2922m, 热液喷口区面积大约为 $300\text{m} \times 300\text{m}$, 由黑烟囱、棕色闪光烟囱以及不活动烟囱组成, 称为 Urashima 热液活动区。该热液活动区位于 Pika 热液活动区以北300m (Nakamura et al., 2013)。

(5) 西南太平洋弧后盆地

西南太平洋弧后盆地较早的海底热液活动发现应是1974年在劳海盆地区的热液。1991年, PACMANUS I 考察队利用“富兰克林”(Franklin) 号船在东马努斯海盆发现了热液活动和硫化物堆积体 (Binns and Scott, 1993)。1995年, 日法联合考察队利用“R/V Yokosuka”号考察船和“Shinkai 6500”号载人潜器对南太平洋新不列颠活动的俯冲带附近进行取样, 同时研究人员在马努斯盆地扩张系统的中部和东北部洋脊的岩浆、构造和热液过程中有了许多重大发现, 并首次在马努斯盆地中部取得富集 H_2S 的高浓度酸性流体 (Auzende et al., 1996)。

最近我国利用“发现”号ROV也不同程度地开展了西南太平洋弧后盆地的热液活动调查工作 (Zhang et al., 2016)。

(6) 发育在地幔上的热液活动区

1994年, 俄罗斯“R/V Professor Logatchev”号调查船在大西洋进行调查, 发现了 Logatchev 热液区 (Batuev et al., 1994; Gebruk et al., 2000)。此处被认为是超基性的地幔岩出露海底。

2004~2005年, 德国科学基金会 (DFG) 的“地幔扩张轴的能量、物质和生命循环”项目先后两次采用“R/V Meteor”号考察船 (M60/3 和 M64/2) 到 Logatchev 热液区调查、取样, 其目的是研究超基性洋壳上热液系统的发育特征及其生命过程 (Schmidt et al., 2007)。