

大洋钻探 504B 钻孔研究综述:从洋壳结构 到地球系统科学前沿

韩均中^{1,2}, 宋 刚^{2,3*}, 王 瑜¹, 牛庆磊^{2,3},
崔淑英^{2,3}, 陈晓君^{2,3}, 陈根龙^{2,3}, 刘政涛^{1,2}

(1. 中国地质大学(北京)深部探测与成像全国重点实验室, 北京 100083; 2. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北 廊坊 065000; 3. 中国地质调查局深部探测钻探装备技术创新中心, 河北 廊坊 065000)

摘要:大洋钻探 504B 钻孔是深海科学钻探的里程碑。该钻孔历经 40 余年 9 个航次探索, 累计钻探深度达 2111 m, 首次系统揭示了东太平洋哥斯达黎加裂谷的上洋壳完整层序(沉积层-枕状玄武岩-过渡带-席状岩墙群)。通过测井技术和有缆型 CORK 原位监测装置, 研究阐明了洋壳热液循环的“浅层对流-深部补给”机制, 发现席状岩墙段微裂隙中存在以 H₂ 为能量来源的化能自养微生物群落。其成果验证了 Penrose 洋壳模型的核心框架, 量化了热液系统对全球碳循环的贡献(年输入无机碳约占河流输入量的 15%), 并为火星古热液活动、木卫二冰下海洋等地外天体探测提供了关键类比。尽管面临不同扩张速率洋壳结构差异等争议, 但 504B 钻孔仍以多学科交叉模式推动了地球深部过程研究的范式革新, 其技术经验(如高温测井、数据共享平台)为深海探测与地外生命研究奠定了基础。

关键词:大洋钻探; 深海探测; 504B 钻孔; 洋壳结构; 热液循环; 深部生物圈

中图分类号: P756.5; P634 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2025)S1-0029-08

A review of the ocean drilling Hole 504B research: From oceanic crust structure to the frontiers of earth system science

HAN Junzhong^{1,2}, SONG Gang^{2,3*}, WANG Yu¹, NIU Qinglei^{2,3}, CUI Shuying^{2,3},
CHEN Xiaojun^{2,3}, CHEN Genlong^{2,3}, LIU Zhengtao^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Deep Earth Exploration and Imaging, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China; 3. Innovation Center for Deep Exploration and Drilling Equipment Technology, CGS, Langfang Hebei 065000, China)

Abstract: The ocean drilling Hole 504B is a milestone in deep-sea scientific drilling. After more than 40 years and nine expeditions, it has reached a cumulative drilling depth of 2111m, and for the first time, it has systematically revealed the complete sequence of the upper oceanic crust in the Costa Rica Rift of the eastern Pacific Ocean (sedimentary layer-pillow basalt-transition zone-sheeted dyke complex). Through logging technology and the CORK in-situ monitoring device, the research has clarified the “shallow convection-deep supply” mechanism of the oceanic crust hydrothermal circulation, and discovered that there are chemolithoautotrophic microbial communities in the micro-fissures of the sheeted dyke section, with H₂ as the energy source. Its achievements have verified the core framework of the Penrose oceanic crust model, quantified the contribution of the hydrothermal system to the global carbon cycle (annual input of inorganic carbon accounts for 15% of the river input), and provided key analogies for the exploration of ancient

收稿日期: 2025-05-27 DOI: 10.12143/j.ztgc.2025.S1.005

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“深海钻探工程关键技术支撑”(编号: DD20230400402)

第一作者: 韩均中, 男, 汉族, 2001 年生, 硕士研究生, 地质工程专业, 研究方向为地质钻探、海工装备等, 河北省廊坊市广阳区金光道 77 号, 1120953176@qq.com。

通信作者: 宋刚, 男, 汉族, 1971 年生, 正高级工程师, 探矿工程专业, 博士, 主要从事地质钻探、海域天然气水合物钻探工艺器具、海工装备等方面的研究工作, 河北省廊坊市广阳区金光道 77 号, 379012534@qq.com。

引用格式: 韩均中, 宋刚, 王瑜, 等. 大洋钻探 504B 钻孔研究综述: 从洋壳结构到地球系统科学前沿[J]. 钻探工程, 2025, 52(S1): 29-36.

HAN Junzhong, SONG Gang, WANG Yu, et al. A review of the ocean drilling Hole 504B research: From oceanic crust structure to the frontiers of earth system science[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(S1): 29-36.

hydrothermal activities on Mars and the subsurface ocean of Europa. Despite controversies such as the structural differences of oceanic crust with different spreading rates, the 504B borehole has promoted the paradigm shift in the study of deep Earth processes through an interdisciplinary approach, and its technical experience (such as high-temperature logging and data sharing platforms) has laid the foundation for deep-sea exploration and the study of extraterrestrial life.

Key words: ocean drilling; deep-sea exploration; Hole 504B; oceanic crust structure; hydrothermal circulation; deep biosphere

0 引言

大洋钻探是地球科学史上规模最大、历时最久的国际合作项目,其发展历程深刻影响了人类对地球深部结构和演化的认知^[1]。在地球科学探索的历史长河中,大洋钻探无疑是一座璀璨的灯塔,而504B钻孔则是这座灯塔上最明亮的光芒之一。它宛如一把神奇的钥匙,打开了人类了解深海洋壳的大门。位于东太平洋哥斯达黎加裂谷南翼的504B钻孔($1^{\circ}13.611'N$, $83^{\circ}43.818'W$)(如图1所示)^[2],自1979年在深海钻探计划(DSDP)第69航次中首次开启钻探之旅以来,便成为了全球海洋地质学家瞩目的焦点。这里的地质环境独特而复杂,处于中速扩张的洋脊区域,洋壳年龄约690 Ma,水深达3474 m^[3]。在这片看似平静的海底之下,隐藏着地球演化的诸多奥秘。历经DSDP、ODP、IODP三个阶段共计9个航次的持续探索,504B钻孔以其基岩进尺1836.5 m、重入次数98次等一系列耀眼的纪录,成为了国际深海科学钻探工程中的传奇^[4]。以其独特的地质位置和科学价值,被誉为“深海地壳研究的里程碑”,是目前穿透上洋壳最深、研究最系统的科学钻孔之一^[5]。

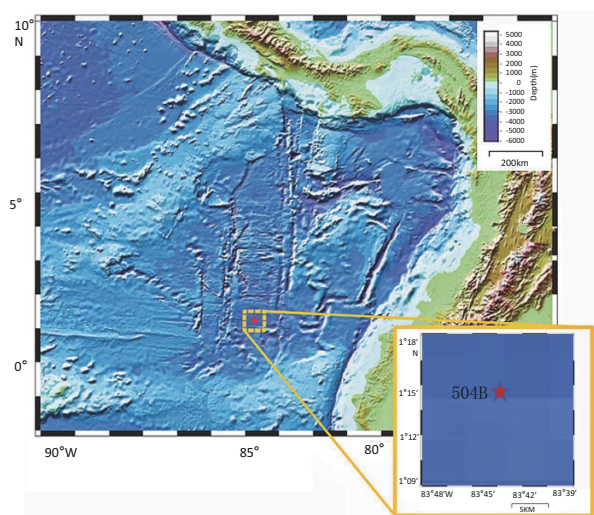


图1 504B钻孔的位置

504B钻孔的研究聚焦于四大核心科学问题:洋壳结构与演化、热液循环机制、深部生物圈以及行星科学类比。具体而言,该钻孔旨在验证经典洋壳层序模型(Penrose模型),揭示洋壳内部热液蚀变、裂隙网络与岩浆活动的动态过程;解析深海热液系统的流体运移路径、能量来源及对全球元素循环的贡献;探索极端环境下微生物的生存极限、代谢途径及其与地质过程的相互作用;建立地球洋壳与类地行星壳幔过程的类比模型,为地外生命探测提供理论依据。

本文基于504B钻孔的公开数据、航次报告及相关研究成果,从钻探历程与技术突破、洋壳结构与热液循环、深部生物圈与多学科交叉、争议问题及未来展望5个部分展开综述,系统梳理其科学贡献与未解之谜。

1 钻探历程、技术突破与基础数据积累

1.1 钻探阶段与科学进展

1.1.1 初始探测与沉积层研究(DSDP阶段,1979—1983)

1979年DSDP第69航次首次抵达504B钻孔位置,开启了对该区域的探索。此航次主要目标是调查海洋地壳中的地热过程,首次穿透海底沉积层,钻入基岩214.5 m,发现了热液循环的初步证据。随后的第70、83航次逐步加深钻探深度,到1981年第83航次时,钻孔深度已达1350 m,成功穿透枕状玄武岩层和过渡层,进入席状岩墙层^[6]。

这一阶段,504B钻孔穿透海底沉积层(274.5 m)及上部枕状玄武岩层(累计深度1204 m),首次获取洋壳表层岩心,揭示枕状玄武岩的低温蚀变特征(沸石化、黏土化),发现热液活动对沉积层地球化学信号的改造作用。这一时期采用旋转取心器(RCB)进行基岩取心^[7],平均回收率约20%,为后续深部钻探奠定基础^[8]。

1.1.2 洋壳深部结构解析(ODP阶段,1986—1993)

ODP阶段的4个航次(111、137、140、148)进一步向深部推进,将钻孔深度最终加深至2111 m,钻入基岩深度达1836.5 m。这一阶段的重要成果是首次完整揭示了席状岩墙群(深度1054.5~2111 m)的结构特征,发现其由密集的垂向岩墙群组成,建立全球首个完整上洋壳层序(沉积层-枕状玄武岩-过渡带-席状岩墙群)^[6]。这一钻探阶段结束后于2001年部署有缆型CORK装置(孔内长期观察装置),实现对孔内温度(最高190℃)、压力及流体通量的长期原位监测。这一时间段回收岩心92.45 m,测井数据覆盖地震波速(4.5~6.5 km/s)、渗透率(10^{-15} ~ 10^{-18} m²)及温度梯度(80℃/km),构建了洋壳研究基准数据集^[9-13]。

1.1.3 技术验证与重启探测(IODP阶段,2019)

2019年的385T航次是IODP对504B钻孔的重要重返探测,旨在推进对504B钻孔的岩性地层、水文地质特征和深部生物圈研究。通过高分辨率微电阻率扫描测井优化对洋壳岩性的识别与解释,并尝试采集原位深部流体样品以评估热液系统对深部生物圈的控制机制。此次作业团队尝试用 $\varnothing 168$ mm的打捞工具抓取CORK井口短管,但3次尝试均未成功。随后更换为特制的打捞矛继续作业,虽成功穿透CORK框架,但在后续操作中,遇到了如难以确定从孔中带出的CORK电缆和封隔器情况、无法在海底释放896A钻孔的CORK架等问题^[3]。

航次虽因封隔器滞留问题导致取心设备无法顺利下放,样品采集作业受阻,但在技术上进一步验证了有缆型CORK装置的长期观测能力,为未来深部原位监测技术的发展积累了经验教训。在504B钻孔的9个航次相关取心数据见表1^[10-12,14-17]。

1.2 关键技术突破与应用

1.2.1 硬岩取心技术

在DSDP阶段,针对深海硬岩钻探的技术难题研发了旋转取心器(RCB),这是当时唯一能对1 km或更深岩层进行有效取心的核心工具,取心直径58.7 mm,最大长度9.5 m,通过绳索回收系统提升效率,但受限于深海高水压,深层取心率低^[18],针对席状岩墙群因蚀变破碎地层取心,平均取心率仅14.3%^[19],导致地层重建多解性,需依赖测井数据(如电阻率、声波速度)进行弥补。

表1 504B钻孔的9个航次相关取心数据
(数据来自DSDP、ODP及IODP共享资料)

航次	年份	钻入深度/ mbsf	基岩进尺/ m	岩心采取 率/%
69	1979	489	214.5	16.3
70	1979	836	561.5	26.3
83	1981	1350	1075.5	15.3
92	1983	1204	929.5	
111	1986	1562.3	1287.8	12.6
137	1991	1621.5	1347	18
140	1991	2000.4	1725.9	12.6
148	1993	2111	1836.5	8.66
385T	2019	2111	1836.5	

1.2.2 原位监测技术

有缆型CORK装置在2001年首次部署,由控制舱、封隔器及监测系统组成(如图2所示),可独立封隔3个层位^[20],实时监测流体化学(如Cl⁻、H₂浓度)与微生物活动,数据分辨率达分钟级,为热液循环动态研究提供关键支撑。通过CORK数据,发现岩墙段裂隙流体Cl⁻浓度显著低于海水,证实深部存在高温水-岩反应(如蛇纹石化)^[21-22]。

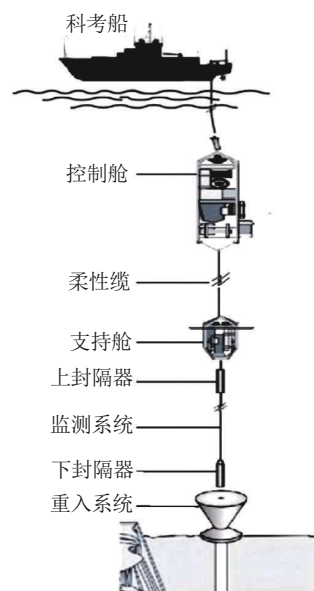


图2 有缆型CORK安装示意

1.2.3 高温测井与数据分析

耐高温传感器的开发,如耐150℃以上温度的电阻率及声波测井工具等,使得深部洋壳连续物理参数剖面的获取成为可能,测井数据揭示了热液活

动对岩石物性的改造^[23]。同时,建立了FluidNet(流体-岩石相互作用的数值模型)多物理场耦合模型,整合了岩心、测井及原位数据(如图3所示),模拟了热液通量与系统寿命。

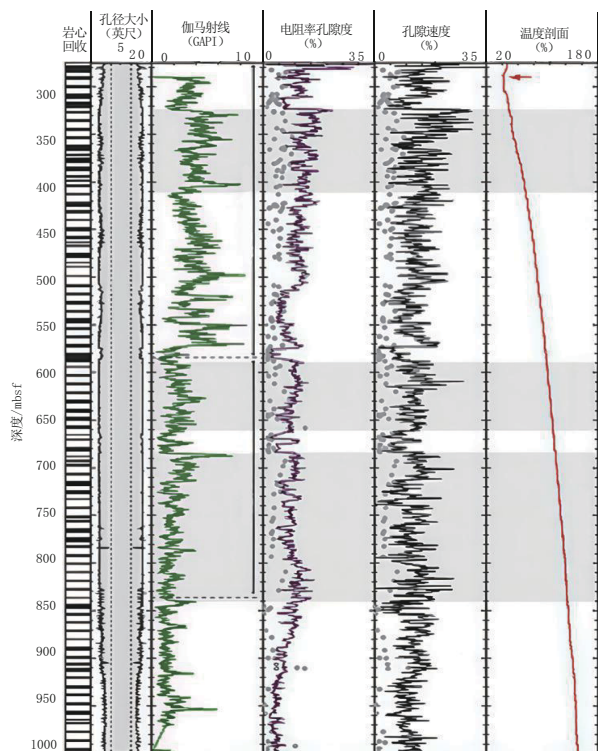


图3 504B 钻孔位置地层剖面测井数据
(测量数据由 ODP 第 148 航次期间收集)

2 洋壳结构、热液循环与地球系统科学贡献

2.1 洋壳层序的实证与动态修正

2.1.1 层序结构与岩性特征

504B 钻孔揭示了洋壳的层序结构,包括沉积层、枕状玄武岩层、过渡带和席状岩墙群(如图4所示)^[24]。各层在岩性、蚀变特征、渗透率及同位素组成等方面表现出显著差异,构成了热液流体运移的主要通道和反应场所。

沉积层(0~274.5 m):由新生代软泥、燧石及白垩岩组成, $\delta^{18}\text{O}$ 同位素记录冰期-间冰期气候波动,如间冰期生物生产力高, CO_2 吸收能力增强^[25]。

枕状玄武岩层(274.5~845.5 m):岩性以拉斑玄武岩为主,发育张性裂隙,低温蚀变矿物(沸石、蒙脱石)充填, $\delta^{18}\text{O}$ 值 $+6.1\text{‰} \sim +8.5\text{‰}$,渗透率 $10^{-15} \sim 10^{-16} \text{ m}^2$,构成热液流体主要通道^[26]。

过渡带(845.5~1054.5 m):枕状岩向席状岩墙

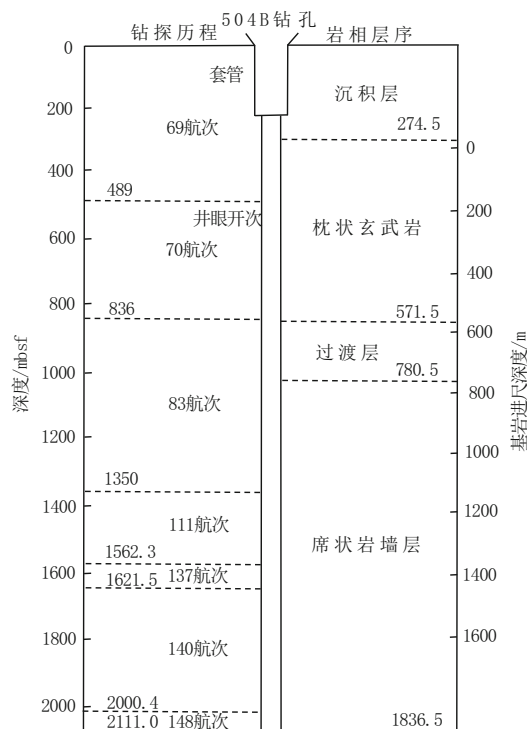


图4 504B 钻孔各个航次钻进深度以及岩石地层结构

过渡,绿片岩相蚀变(绿泥石-阳起石)主导, $\delta^{18}\text{O}$ 值低至 $+3.6\text{‰}$,反映 $250 \sim 350\text{ }^{\circ}\text{C}$ 高温热液改造, Fe 、 Mg 元素迁移显著^[27]。

席状岩墙群(1054.5~2111 m):垂向岩墙密集(间距 $0.5 \sim 2\text{ m}$),蚀变不均一,局部保留原生辉绿结构, $\delta^{18}\text{O}$ 平均值 $+5.4\text{‰}$,渗透率 $<10^{-18} \text{ m}^2$,热液活动受限^[24,28-29]。

2.1.2 对 Penrose 经典模型的验证与拓展

在洋壳研究中,依据分布在大陆边缘的蛇绿岩套确定的 Penrose 模型,是描述洋壳结构的重要理论(如图5所示)^[30]。该模型认为洋壳从浅到深具有“沉积层-枕状熔岩-席状岩墙-辉长岩”的垂向分带结构。沉积层位于最上部,是洋壳表层的物质堆积;枕状熔岩以其独特的枕状形态为特征,普遍发育低温蚀变;席状岩墙由密集的岩墙群组成;辉长岩则处于洋壳较深部,是岩浆房冷凝形成的深部岩浆结晶体。504B 钻孔的研究在一定程度上验证了该模型,钻孔岩心的岩性特征与地震波速剖面的耦合分析表明,洋壳垂向分层与地震波速跃升存在明确的对应关系,为该模型提供了实证支撑。但该模型的全球适用性存在争议,因其可能过度依赖单一构造背景的数据。在超慢速扩张洋中脊(如西南印

度洋脊), 洋壳结构显示显著差异, 如席状岩墙规模缩减、辉长岩缺失等^[31]; 在慢速扩张区 (如大西洋中脊), 高温蚀变矿物分布更分散, 与快速扩张洋中脊 (如东太平洋海隆) 适用的“双层蚀变模型”存在偏差^[32]。

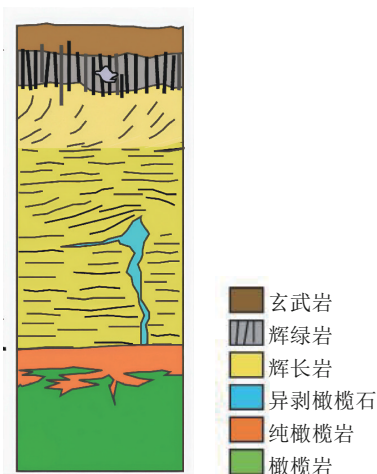


图5 典型的快速扩展山脊的 Penrose 模型

2.2 热液循环的动力学机制

2.2.1 裂隙网络与渗透率演化

504B 钻孔数据揭示了裂隙网络与渗透率演化的垂向分异规律,以及构造控制作用对裂隙发育和热液活动强度的影响。上部火山岩裂隙密度高、渗透率大,形成“开放系统”;深部岩墙裂隙密度低、渗透率骤降,形成“封闭系统”。上部火山岩裂隙密度比深部岩墙群大,渗透率高;在深部岩墙区,石英、绿帘石充填导致渗透率骤降,形成“浅层对流-深部补给”模式。裂隙发育与扩张速率正相关,中速扩张脊(如东太平洋海隆)裂隙网络更密集,热液活动强度高于慢速扩张区^[33]。

2.2.2 流体运移与元素循环

在 504B 钻孔, 科学家重建了流体循环路径: 海水沿火山岩裂隙下渗→岩墙段受热液加热(地温梯度 $80\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$)→与围岩反应(如蛇纹石化生成 H_2)→富金属流体上升至海底排泄, 形成硫化物分带沉淀; 通过质量平衡计算, 重建了热液流体的运移路径, 并评估了其对全球元素循环的贡献。洋壳热液系统年输入海洋无机碳量约占河流输入量的 15%, 硫同位素分馏影响全球硫循环^[34]。

2.3 地球物理与地球化学的协同研究

地震波速与蚀变关联的研究揭示了岩石物理

性质与化学蚀变之间的紧密联系,上部低速带(P波4.5~5.5 km/s)对应高孔隙度(5%~15%)与低温蚀变,岩墙段高速带(P波>6.5 km/s)与岩石致密化、高温蚀变相关^[35-36]。同位素示踪分析表明,上部蚀变以海水为主,过渡带存在深部岩浆流体混合则提供了深部岩浆流体混合的证据,支持了“双端元混合”模型的提出^[24]。

3 深部生物圈与多学科交叉突破

3.1 深部生物圈的发现与生态特征

在 504B 钻孔的席状岩墙段微裂隙中,通过 16SrRNA 基因测序和培养实验,首次发现了“化能自养”微生物群落,揭示了深海极端环境下的生命存在形式。优势菌群包括硫氧化细菌(如硫杆菌属)与产甲烷古菌(如甲烷球菌属),这些深部微生物生活在高压、高温(最高接近 122℃)、无光的极端环境中,完全依赖化学能而非太阳能进行生命活动,能量来源主要是岩石蚀变过程中释放的 H_2 、 CO_2 以及硫化物氧化产生的化学梯度。热液流体中的 H_2 浓度达 15 mmol/kg,为产甲烷古菌提供了电子供体,它们通过 H_2 与 CO_2 的化学反应合成 CH_4 , 获取能量;硫氧化细菌则利用硫化物(如黄铁矿)氧化的能量,将 CO_2 固定为有机碳,形成独特的化能合成生态系统^[37-38]。

微生物丰度与裂隙渗透率($10^{-15} \sim 10^{-18} \text{ m}^2$)呈正相关,表明流体运移通道是深部生物圈分布的关键控制因素。此外,微生物活动还通过催化矿物反应反哺地质过程,如加速硫化物沉淀和元素循环,形成地球-生命协同演化的典型范例^[39]。

504B 钻孔深部生物圈的发现,拓展了生命存在的极限定义,证明生命可以在高温、高压、无氧的极端环境中生存和繁衍。这为火星、木卫二等类地天体的深部生命探测提供了重要的地球类比模型。例如,火星陨石中发现的类似绿泥石-阳起石蚀变矿物组合,暗示火星曾存在类似的热液活动和潜在生命环境;木卫二冰下海洋的热通量估算和流体化学特征,也参考了 504B 钻孔的研究成果,为评估地外天体的宜居性提供了科学依据。

3.2 多学科交叉研究与技术创新

3.2.1 地球物理与地球化学的协同

通过整合地震波速、电磁测井、岩石地球化学和同位素数据,研究者定量刻画了洋壳裂隙网络对

热液流体运移的时空控制规律。三维裂隙建模显示,玄武岩段的裂隙密度与渗透率呈指数关系,而岩墙段的矿物充填导致渗透率骤降两个数量级。由次级矿物与海水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 计算得出温度,通过井下温度与 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 联合分析(如图6所示),揭示了热液流体的双端元混合演化路径,即上部低温蚀变受海水主导,深部高温蚀变与深部岩浆流体混合相关,修正了传统“单一流体来源”模型^[40]。

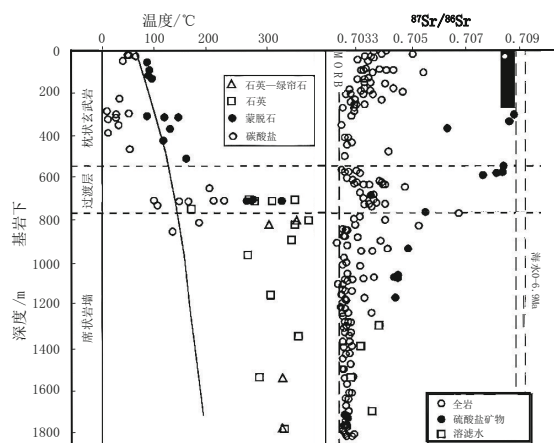


图6 504B钻孔温度和Sr同位素随深度的变化

3.2.2 岩石学与微生物学的交叉

岩石学研究为微生物生存环境提供了地质约束,而微生物学发现则揭示了岩石蚀变过程中的生物地球化学作用。例如,岩墙段微裂隙中的微生物群落通过代谢活动影响矿物蚀变进程,加速磁铁矿的蛇纹石化反应,形成独特的生物-矿物相互作用界面。这种交叉研究不仅深化了对深部生物圈生存策略的理解,还为研究地球早期生命演化和极端环境适应机制提供了新视角。

3.2.3 数值模拟与观测数据的融合

基于504B钻孔的渗透率、温度梯度、流体化学等实测数据,构建了洋壳尺度热液循环动力学模型和深部生物圈能量代谢模型。数值模拟显示,热液循环通量可达 $0.1\sim 0.3\text{ m}^3/\text{s}$,系统寿命约 $1.2\sim 2\text{ Ma}$,与地球化学预算研究形成互补;微生物代谢模型定量评估了 H_2 驱动的化能合成作用对全球碳循环的贡献,提出洋壳热液系统每年向海洋输入无机碳量相当于全球河流输入量的15%^[41-42]。

4 争议与挑战

4.1 洋壳层序模型的普适性争议

尽管504B钻孔验证了Penrose洋壳层序模型的核心框架,但其在不同构造背景下的普适性仍存疑。例如,超慢速扩张洋脊(如西南印度洋脊)的洋壳结构显示席状岩墙规模缩减、辉长岩缺失等特征,与504B钻孔的中速扩张洋脊结构存在显著差异。此外,慢速扩张区的高温蚀变矿物分布更分散,可能与岩浆供给的周期性相关,挑战了“双层蚀变模型”的广泛适用性,需要结合全球不同扩张速率区的钻探结果进行重新评估。

4.2 热液循环效率的估算矛盾

基于504B钻孔渗透率数据的数值模拟显示,单一生热液系统的流体通量约为 $0.1\sim 0.3\text{ m}^3/\text{s}$,但地球化学研究表明,全球热液流体通量需达到 $1\sim 5\text{ m}^3/\text{s}$ 才能平衡海洋镁含量,二者相差一个数量级^[43]。这一矛盾暗示现有模型可能低估了断裂带或转换断层等构造薄弱区的热液活动强度,或者未充分考虑热液系统的脉冲式排泄机制,需要进一步结合全球热液系统的观测数据进行校准。

4.3 深部生物圈的能量来源不确定性

虽然504B钻孔证实了 H_2 驱动的化能合成作用是深部微生物的主要能量来源,但实验研究表明,单纯橄榄石蛇纹石化生成的 H_2 浓度通常低于 5 mmol/kg ,远低于钻孔中实测的 $>10\text{ mmol/kg}$,暗示可能存在其他氢源,如深部岩浆脱气或放射性元素衰变,但缺乏直接证据。此外,微生物是否主动参与硫化物沉淀以及深部生物圈的全球生物量总量仍难以量化,需要更多的原位实验和全球钻孔数据支持。

4.4 技术局限与数据缺口

当前研究受限于深部原位探测技术的不足,例如传统水文抽水试验难以在深海钻孔中实施,导致流体样品可能混合不同深度的成分,影响热液流体化学特征的准确评估;微生物活性检测依赖DNA测序和培养实验,缺乏原位实时监测数据,无法全面了解深部生物圈的代谢动态。此外,504B钻孔未穿透下洋壳和莫霍面,缺乏深部辉长岩和地幔橄榄岩的直接样本,制约了对洋壳形成机制和深部结构的完整认知。

5 结论与展望

504B 钻孔是国际大洋钻探的标志性工程,在洋壳结构、热液循环、深部生物圈等领域取得了一系列突破性成果,成为地球科学研究的重要里程碑。它不仅验证了经典理论,更推动了多学科交叉融合,为人类理解地球深部过程和地外天体演化提供了独特的视角。

尽管面临岩心回收率低、技术局限等挑战,但其积累的海量数据和技术经验为未来研究奠定了坚实基础。随着钻探技术的不断创新和全球合作的深入开展,504B 钻孔有望在穿透下洋壳、揭示莫霍面奥秘、探索深部生命极限等方面取得新的突破,继续引领地球系统科学的发展,为人类揭示更多地球与宇宙的奥秘。

参考文献:

- [1] 徐晶晶,张涛,吴林强,等.大洋科学钻探特点与发展趋势——基于国际大洋发现计划科学框架的对比分析[J].海洋开发与管理,2023,40(3):30-38.
- [2] Teagle D, Reece J, Coggon R, et al. International ocean discovery program expedition 393 preliminary report: South Atlantic Transect 2[J]. International Ocean Discovery Program Expedition Preliminary Report, 2023, 393.
- [3] Tominaga M, Orcutt B N, Blum P. Expedition 385T Preliminary Report: Panama Basin Crustal Architecture and Deep Biosphere: Revisiting Holes 504B and 896A [J]. Preliminary report, 2019, 385.
- [4] 熊亮,谢文卫,卢秋平,等.我国深海钻探重入钻孔技术优选及设计思路[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(7):1-7.
- [5] Ildefonse B, Rona P A, Blackman D. Drilling the crust at mid-ocean ridges: An “in depth” perspective [J]. Oceanography, 2007, 20(1): 66-77.
- [6] Gregory E P M. The seismic characterisation of layer 2 in oceanic crust around ODP borehole 504B [D]. Durham University, 2018.
- [7] Storms M A. Ocean Drilling Program (ODP) Deep Sea Coring Techniques [J]. Springer Netherlands, 1990. DOI: 10.1007/978-94-009-0615-0_10.
- [8] Ildefonse B, Abe N, Godard M, et al. Formation and evolution of oceanic lithosphere: New insights on crustal structure and igneous geochemistry from ODP/IODP Sites 1256, U1309, and U1415 [M]//Developments in marine geology. Elsevier, 2014, 7: 449-505.
- [9] Gable R, Morin R H, Becker K. Geothermal state of Hole 504B: ODP Leg 111 overview [C]//Becker, K., Sakai, H., et al., Proc. ODP, Sci. Results. 1989, 111: 87-96.
- [10] Becker K, Foss M G, Graham M A G, et al. Ocean Drilling Program Leg 137 Preliminary report Hole 504B cleanout [J]. 1991.
- [11] Dick H, Erzinger J, Stokking L, et al. Ocean Drilling Program Leg 140 Preliminary report Hole 504B [J]. 1992.
- [12] Alt J C, Kinoshita H, Stokking L, et al. Ocean Drilling Program Leg 148, Preliminary report Hole 504B [J]. College Station, TX (Ocean Drilling Program), 1993.
- [13] Alt J C, Laverne C, Vanko D A, et al. Hydrothermal alteration of a section of upper oceanic crust in the Eastern Equatorial Pacific: a synthesis of results from site 504 (DSDP LEGS 69, 70, and 83, and ODP LEGS 111, 137, 140, and 148) [C]//Proceedings of the Ocean Drilling Program, scientific results. 1996, 148: 417-434.
- [14] Party S S. Site 505: sediments and ocean crust in an area of low heat flow south of the Costa Rica Rift [J]. Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, 1983, 69: 175-214.
- [15] Brewer T S, Lovell M A, Harvey P K, et al. Preliminary geochemical results from DSDP/ODP Hole 504B: a comparison of core and log data [J]. Geological Society, London, Special Publications, 1990, 48(1): 195-202.
- [16] Alt J C, Honnorez J, Hubberten H W, et al. Occurrence and origin of anhydrite from Deep Sea Drilling Project Leg 70, hole 504B, Coast Rica rift [J]. DSDP, 1983, 69.
- [17] Becker K, Sakai H, Merrill R B, et al. Ocean Drilling Program [J]. 1986.
- [18] 王诗竣,宋刚,王瑜,等.中国主导的IODP航次取心所遇问题分析及探讨[J].钻探工程,2023,50(1):10-17.
- [19] Umino S. Reviews of deep drilling into oceanic crust [J]. Journal of Geography (Chigaku Zasshi), 2003, 112(5): 650-667.
- [20] 吕阳,熊亮,田烈余.大洋科学钻探井下长期观测装置研究进展及展望[J].钻探工程,2025,52(2):1-9.
- [21] Honnorez J. Hydrothermal alteration vs. ocean-floor metamorphism. A comparison between two case histories: the TAG hydrothermal mound (Mid-Atlantic Ridge) vs. DSDP/ODP Hole 504B (Equatorial East Pacific) [J]. Comptes Rendus Geoscience, 2003, 335(10-11): 781-824.
- [22] Wheat C G, Mottl M J. Composition of pore and spring waters from Baby Bare: global implications of geochemical fluxes from a ridge flank hydrothermal system [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2000, 64(4): 629-642.
- [23] BBecker K, Davis E E, Fisher A T, et al. Monitoring subsurface temperature and fluid pressure in sealed ODP/IODP boreholes to constrain in situ hydrological state and processes in igneous oceanic crust [J]. Canadian journal of earth sciences, 2024, 62(4): 658-683.
- [24] Becker K, Sakai H, Adamson A C, et al. Drilling deep into young oceanic crust, Hole 504B, Costa Rica Rift [J]. Reviews of Geophysics, 1989, 27(1): 79-102.
- [25] Slagle A L, Goldberg D S, et al. Evaluation of ocean crustal Sites 1256 and 504 for long-term CO₂ sequestration [J]. Geophysical Research Letters, 2011, 38(16).
- [26] Laverne C. Les Altérations des basaltes en domaine océanique: minéralogie, pétrologie et géochimie d'un système hydrothermal, le puits 504 B, Pacifique oriental [D]. ANRT, 1987.
- [27] Busigny V, Cartigny P, Laverne C, et al. A re-assessment of the nitrogen geochemical behavior in upper oceanic crust from Hole 504B: Implications for subduction budget in Central America [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2019, 525:

- 115735.
- [28] Bach W, Peucker-Ehrenbrink B, Hart S R, et al. Geochemistry of hydrothermally altered oceanic crust: DSDP/ODP Hole 504B - Implications for seawater-crust exchange budgets and Sr- and Pb- isotopic evolution of the mantle [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2003, 4(3).
- [29] [29] Gu C, Vanko D A. Nature of fluid inclusions in samples of the deep sheeted dikes cored during Leg 148 (Hole 504B) [C]//*Proceedings-Ocean Drilling Program scientific results*. national science foundation, 1996: 87-96.
- [30] Dick H J B, Natland J H, Ildefonse B. Past and future impact of deep drilling in the oceanic crust and mantle [J]. *Oceanography*, 2006, 19(4): 72-80.
- [31] Dick H J B, Natland J H, Alt J C, et al. A long in situ section of the lower ocean crust: results of ODP Leg 176 drilling at the Southwest Indian Ridge [J]. *Earth and planetary science letters*, 2000, 179(1): 31-51.
- [32] Carbotte S M. Tectonics seismic structure at mid-ocean ridges [J]. 2005.
- [33] Haymon R M. Hydrothermal vents at mid-ocean ridges [J]. 2014.
- [34] Honnorez J, Alt J C, Honnorez-Guerstein B, et al. Stockwork-like sulfide mineralization in young oceanic crust: Deep Sea Drilling Project hole 504B [J]. 1985.
- [35] Carlson R. L. How crack porosity and shape control seismic velocities in the upper oceanic crust: Modeling downhole logs from Holes 504B and 1256D [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2010, 11(4).
- [36] [36] Guerin G, Goldberg D S, Iturrino G J. Velocity and attenuation in young oceanic crust: New downhole log results from DSDP/ODP/IODP Holes 504B and 1256D [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2008, 9(12).
- [37] Nigro L M, Harris K, Orcutt B N, et al. Microbial communities at the borehole observatory on the Costa Rica Rift flank (Ocean Drilling Program Hole 896A) [J]. *Frontiers in microbiology*, 2012, 3: 232.
- [38] Wheat C G, Mottl M J. Composition of pore and spring waters from Baby Bare: global implications of geochemical fluxes from a ridge flank hydrothermal system [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, 64(4): 629-642.
- [39] Fisher A T, Davis E E, Hutnak M, et al. Hydrothermal recharge and discharge across 50 km guided by seamounts on a young ridge flank [J]. *Nature*, 2003, 421(6923): 618-621.
- [40] Teagle D A H, Bickle M J, Alt J C. Recharge flux to ocean-ridge black smoker systems: a geochemical estimate from ODP Hole 504B [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, 210(1-2): 81-89.
- [41] Kolandaivelu K P, Harris R N, Lowell R P, et al. Evolution of heat flow, hydrothermal circulation and permeability on the young southern flank of the Costa Rica Rift [J]. *Geophysical Journal International*, 2020, 220(1): 278-295.
- [42] Alt J C, Teagle D A H. The uptake of carbon during alteration of ocean crust [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, 63(10): 1527-1535.
- [43] Kirchner T M, Gillis K M. Mineralogical and strontium isotopic record of hydrothermal processes in the lower ocean crust at and near the East Pacific Rise [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2012, 164: 123-141.

(编辑 王跃伟)