



基于瞬变电磁法的南大西洋 热液硫化物区电性结构

杨悦^{1,2}, 李传顺^{1,2}, 叶俊^{1,2}, 李兵^{1,2}, 党院^{1,2}, 王赛^{1,2}

- (1. 自然资源部第一海洋研究所 自然资源部海洋地质与成矿作用重点实验室, 青岛 266061;
2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室 海洋地质过程与环境功能实验室, 青岛 266237)

摘要: 大西洋中脊属于典型的慢速扩张洋中脊, 具有形成大型热液硫化物矿床的潜力。目前, 国际上对大西洋中脊热液活动的调查研究主要集中在北大西洋, 而对于南大西洋中脊的调查和研究相对较少, 且主要采用传统的技术手段, 只能探测到矿床的表面特征, 而对其形态、规模及赋存状态等问题无法得到准确的评估。海洋瞬变电磁法对浅部高导体异常灵敏, 这使其成为热液硫化物资源探测和评价的新兴手段之一。为了研究南大西洋海底热液系统, 我国在南大西洋开展了多个科考航次, 其中大洋 52 航次在南大西洋热液硫化物区开展了瞬变电磁勘查工作; 基于 Occam 反演方法对数据进行了反演。结果表明: 测线区域浅部电阻率整体偏低, 而深部电阻率较高且横向变化不均匀; 在 840~880 和 1060~1080 号点之间存在两处由浅到深的连续低阻异常, 均对应着较强的二次场响应, 推测为热液硫化物矿堆。该矿堆呈现管状形态, 向下延伸 30 m 左右。这证明了海洋瞬变电磁法在热液硫化物矿的定位、圈定硫化物矿的范围、研究硫化物矿的空间结构等方面具有较强的可行性, 可有效地服务于多金属硫化物矿资源评价工作。

关键词: 海底热液; 多金属硫化物; 南大西洋; 瞬变电磁; 资源评价

文章编号: 1004-0609(2021)-10-2713-09

中图分类号: P71

文献标志码: A

引文格式: 杨悦, 李传顺, 叶俊, 等. 基于瞬变电磁法的南大西洋热液硫化物区电性结构[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(10): 2713-2721. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-37985

YANG Yue, LI Chuan-shun, YE Jun, et al. Electrical structure of seafloor massive sulfide deposits in South Mid-Atlantic ridge based on marine transient electromagnetic method[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(10): 2713-2721. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-37985

海底热液硫化物是 20 世纪 60 年代继大洋多金属结核和富钴结壳后发现的另一种重要的深海战略矿产资源类型^[1], 富含 Fe、Cu、Zn、Pb 以及 Au 和 Ag 等金属^[2], 是开发开采海洋矿产资源的重要组成部分。据推测, 全球海底的热液硫化物矿产资源总量约 6×10^8 t, 其中锌和铜约 3×10^7 t, 相当于全球陆地上所开采的新生代矿产资源的总和^[3], 商业应用前景巨大^[4], 被誉为 21 世纪人类可持续发展的战略接替资源^[5], 备受国际关注。此外热液喷出也是地下深部物质及热源向地表泄漏的主

要途径之一, 可以用于研究全球热通量^[6], 因此海底热液研究一直是各学科的研究热点。

海底热液硫化物主要分布于洋中脊, 且与洋中脊的扩张速率有关。洋中脊扩张越慢, 越容易发育大型热液多金属硫化物矿床。南大西洋中脊是典型的慢速扩张洋中脊, 因此, 可推断南大西洋具有发育大型硫化物矿床的条件。自 2009 年开始, 我国在南大西洋中脊开展了多个航次的热液硫化物调查(如中国大洋 22、26、46 和 52 航次), 发现了 14°S、15°S 以及 26°S 等多个热液硫化物区^[7-10], 这都表

基金项目: 中国大洋协会项目(DY135-S2-2-01)

收稿日期: 2021-06-03; 修订日期: 2021-08-24

通信作者: 李传顺, 副研究员, 博士; 电话: 0532-88966386; E-mail: lichuanshun@fio.org.cn

明南大西洋中脊具有良好的找矿前景^[9, 11-12], 是未来重要的资源保障和战略空间。然而, 目前对于这些热液硫化物矿床(点)的研究主要集中在矿物学以及成矿有关的岩石学方面, 在圈定热液多金属硫化物矿床及资源评价方面的研究程度相对较弱。究其原因, 是传统的技术手段只能探测矿床的表面特征, 无法推断矿床的内部结构特征。因此, 急需新的技术手段来获取更加精细的地下的结构特征。

瞬变电磁法是陆地找矿中一种常用的多金属硫化物矿产勘探方法, 以岩石和矿体之间的导电性差异为研究基础。TAO 等^[13]研究表明海底热液多金属硫化物矿床(点)的电导率大约是海水的 3 倍, 是海底沉积物和围岩的 5 倍多; 此外, 矿化程度越高, 电导率越高^[14-15], 具备以电导率为基础的瞬变电磁法勘探的物性条件。并且多金属硫化物还具有高极化特征^[16], 有效地增强了海洋瞬变电磁法对热液多金属硫化物的可探测性^[17]。因此, 采用海洋瞬变电磁法探测热液区理论上是可行的。

国内外许多研究团队已经研制出多套适合海洋环境的仪器设备^[18-26], 如 Golden Eye、MTEM-08 等, 并成功应用到海底热液区的调查中。TAO 等^[27]利用海洋瞬变电磁法在南大西洋一个已知热液点验证了海洋瞬变电磁法的有效性。HÖLZ 等^[19]在第勒尼安海的 Palinuro 火山群中, 利用水平重叠回线装置在距离海底 5~10 m 处进行观测, 得到了明显的异常响应。NAKAYAMA 等^[28]以及 ASAKAWA 等^[29]在冲绳热液区进行瞬变电磁, 并探测到已知 SMS 矿床。

本文拟在南大西洋典型热液区开展海洋瞬变电磁法, 通过反演获取海底的电性结构, 进而分析多金属硫化物矿床的规模、分布特征及赋存状态, 以期矿产资源评价、寻找非活动/埋藏型热液区提供新思路和新发现, 进而保障我国深海资源储备的战略安全。

1 基本理论

1.1 海洋瞬变电磁法的工作原理

瞬变电磁法(Transient electromagnetic methods, TEM), 是一种建立在电磁感应原理基础上的时间域人工源电磁探测方法。它利用不接地回线或接地线源向地下发送一次脉冲磁场(通常称为一次场),

在其激发下, 地下介质中激励起的感应涡流将产生随时间变化的感应电磁场^[30]。海洋瞬变电磁法是陆地上的瞬变电磁法的延伸, 其观测装置位于海底上方, 如图 1 所示。本次研究采用的深海拖曳式瞬变电磁法, 发射线圈位于海底上方, 接收线圈位于发射线圈中心。海洋瞬变电磁法不受一次场影响, 分辨率高, 并且对高导异常反映灵敏, 适用于海底热液硫化物找矿。

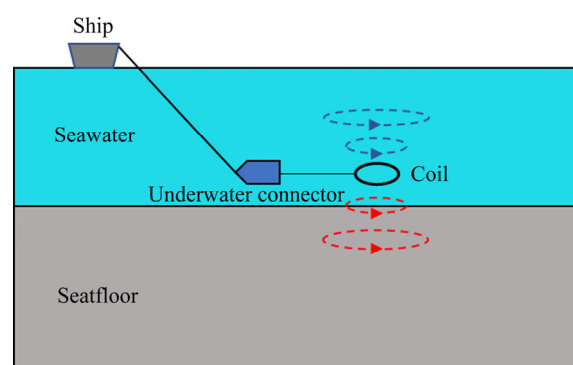


图 1 海洋瞬变电磁法原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of marine transient electromagnetic method

以发射源中心的正下方海底表面的投影点为坐标原点, 建立直角坐标系, 其中 z 轴垂直海底表面面向下。由于海底热液硫化物位于 2000~3000 m 的深度, 可以忽略海水层和空气层界面处的多次反射, 只考虑海水上下表面第一次反射的电磁波。从麦克斯韦方程组出发, 可以得到中心回线装置的垂直分量的磁场频率响应:

$$H_z = \frac{Ia}{2} \int_0^\infty \{1 + r_{TE}^+ \exp(-2u_0 h) + r_{TE}^- \exp[-u_0(d-2h)]\} \cdot \frac{\lambda^2}{u_0} J_1(\lambda a) d\lambda \quad (1)$$

式中: a 为发射线圈半径; I 为发射电流; r_{TE}^+ 、 r_{TE}^- 为海水层上下界面的反射系数; d 为海水深度; $u_0 = \sqrt{\lambda^2 + i\omega\mu_0\sigma_0}$, λ 为波长, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m, 为真空磁导率; σ_0 为海水电导率; $J_1(\cdot)$ 为第 1 阶贝塞尔函数。上式中的汉克尔积分采用数值滤波法计算^[31]。采用余弦变换法将频率域电磁响应转换为时间域 $H_z(t)$ ^[32]。

1.2 Occam 反演方法基本原理

设目标函数为

$$\chi^2(\mathbf{n}^{\text{est}}, \mathbf{d}) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{d_i - f_i[\mathbf{n}^{\text{est}}]}{\sigma_i} \right)^2 \quad (2)$$

式中: $\mathbf{n}^{\text{est}} = \{n_i, i=1, \dots, M\}$ 为模型参数向量; $\mathbf{d} = \{d_i, i=1, \dots, N\}$ 为数据向量, 这里代表感应电动势, 式中 $d_i = f(Q_i, \mathbf{n}) + \delta_i, i=1, \dots, N$, δ_i 为方差为 σ_i 的 0 均值数据独立随机噪声。

由于感应电动势是电阻率的非线性函数, 可以利用迭代法来进行求解。假设初始模型 $\mathbf{n}^0$ 接近真实值, 可以将模型响应在 $\mathbf{n}^0$ 处展开, 忽略高次项后得到:

$$d_i = f(Q_i, \mathbf{n}^0) + \sum_{j=1}^M J_{ij} \Delta n_j, i=1, \dots, N \quad (3)$$

式中: J_{ij} 为灵敏度矩阵。为了方便讨论, 假设数据方差为 1。将式(3)代入式(2)并对模型参数修正量极小化, 得到

$$\mathbf{J} \Delta \mathbf{n} = \mathbf{b} \quad (4)$$

由于问题的非适定性, 通常要对模型修正量加以约束, 得到稳定的解, 即要求

$$\min : \Phi = \|\mathbf{W} \Delta \mathbf{n}\| \quad (5)$$

同时要求式(5)满足式(4), $\mathbf{W}$ 为模型约束矩阵。式(5)的求解可以通过下面的广义逆反演完成。第 $k+1$ 次模型估计可以通过修正第 k 次模型得到, 即

$$\mathbf{n}_{k+1}^{\text{est}} = \mathbf{n}_k^{\text{est}} + \mathbf{J}^+ \mathbf{b} \quad (6)$$

式中: $\mathbf{J}^+$ 为矩阵 $\mathbf{J}$ 的广义逆矩阵。

上述反演方法是基于初始模型接近真实值, 在实际数据处理时, 初始模型可能存在不合适的情况, 为了避免这一情况导致的发散问题, Constable 等优化了反演过程。假设迭代进行了 k 次, 对应的模型为 $\mathbf{n}^k$, 则式(4)可以写成

$$\mathbf{d} = f(\mathbf{n}^k) + \mathbf{J}^k \Delta \mathbf{n}^k = f(\mathbf{n}^k) + \mathbf{J}^k \mathbf{n}^{k+1} - \mathbf{J}^k \mathbf{n}^k \quad (7)$$

由式(7)可以看出 $\mathbf{J}^k \mathbf{n}^{k+1} = \mathbf{d} - f(\mathbf{n}^k) + \mathbf{J}^k \mathbf{n}^k$ 。

在式(7)的基础上, 直接对模型参数本身, 而不是其修正量进行约束, 从而有如下的优化问题:

$$\min : \Phi = \|\mathbf{W} \mathbf{n}^{k+1}\| \quad (8)$$

同时满足 $\mathbf{J}^k \mathbf{n}^{k+1} = \mathbf{d} - f(\mathbf{n}^k) + \mathbf{J}^k \mathbf{n}^k$ 。

上述的改进使得在实际反演时不再依赖初始模型, 上式是 Occam 反演的基础。

在本文中, 上述优化问题可以等价成如下的线性方程组的求解

$$\begin{bmatrix} \mathbf{J}^k \\ \lambda \mathbf{W} \end{bmatrix} \mathbf{n}^{k+1} = \begin{bmatrix} \mathbf{d} - f(\mathbf{n}^k) + \mathbf{J}^k \mathbf{n}^k \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

该方程可以利用奇异值分解技术进行求解。式(9)即为反演计算的迭代过程。可以从均匀半空间出发, 计算相应的模型响应及偏导数矩阵, 由式(9)获得第 1 次模型估计。将这个模型作为新的初始模型, 重复上述的迭代过程(见图 2), 直到达到设定的误差或模型步长达到很小时停止迭代, 此时对应的模型即反演的结果。

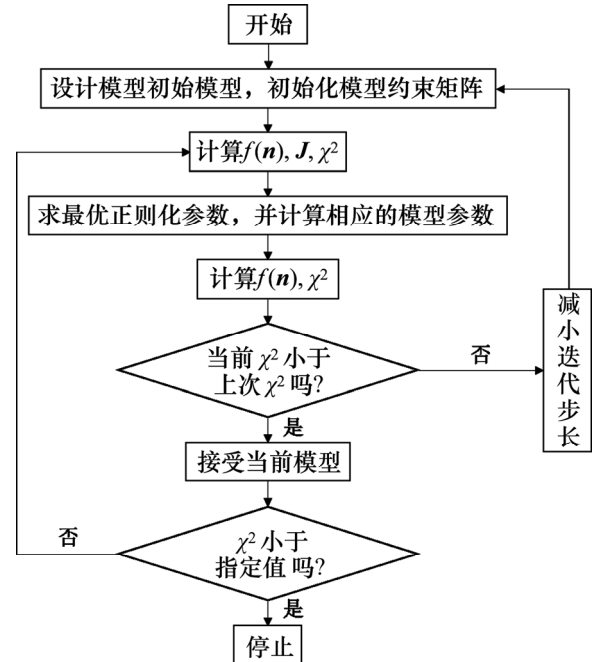


图 2 Occam 反演方法流程图

Fig. 2 Flow chart of Occam inversion

2 实际数据反演

2.1 工区概况

大西洋中脊(MAR)以赤道附近的 Romanche Trench 海沟为界, 分为北大西洋脊(NMAR)和南大西洋(SMAR); 两者在扩张速率、脊轴形态、岩石圈结构等方面都表现出很高的相似性。MAR 开展的热液调查始于 20 世纪 70 年代的 TAG(Trans-Atlantic Geotraverse)计划, 随后美、法、俄等国对 NMAR 开展了大量的调查并发现了一系列热液区。而对于 SMAR 调查研究则相对薄弱, 直到 21 世纪

初, 英美等执行的 BGP 计划(British and German Programs)对 SMAR 北部(4°S~11°S 脊段)进行了初步调查, 发现了 3 个热液区, 至此才对 SMAR 热液活动有了初步认识, 揭开了 SMAR 热液调查研究的序幕。自 2009 年开始, 我们在中国大洋协会(COMRA)资助下, 对 SMAR 开展了多个航次的调查, 先后发现 8 处热液硫化物区, 但是较北大西洋中脊而言, 南大西洋的研究程度仍然较弱。

为了提高对南大西洋中脊的认识, 中国大洋 52 航次第 2 航段在南大西洋中脊开展了深海拖曳式海洋瞬变电磁法, 采用湖南普力海洋科技有限公司研发的深海单拖体瞬变电磁探测装置。观测装置为中心回线装置, 单点采集, 这种装置操作简单, 易于导航, 更适用于海底矿床勘查。本次试验观测时, 船速控制为 1.5 kn, 点距 2 m, 共 220 个测点。发射回线半径为 2 m, 发射线圈 10 匝, 发射电流为 17 A, 采样间隔为 4 s。发送频率为 1 Hz, 接收频率为 625000 Hz, 关断时间为 135 μ s。此次研究在南大西洋完成了 10 余条 TEM 测线, 覆盖了已调查区域和未知区域, 其中 TEM08 测线在一处未知区域发现了明显的响应异常, 由于调查仍在继续, 所以位置信息暂不能公开。测线近南北向分布(见图 3), 图 3 中黄色实线表示设计的测线位置, 但由于受到洋流、风向等因素的影响, 在拖曳工作进行时, 测点无法完全按照设计的点位进行测量, 需要进行校正。

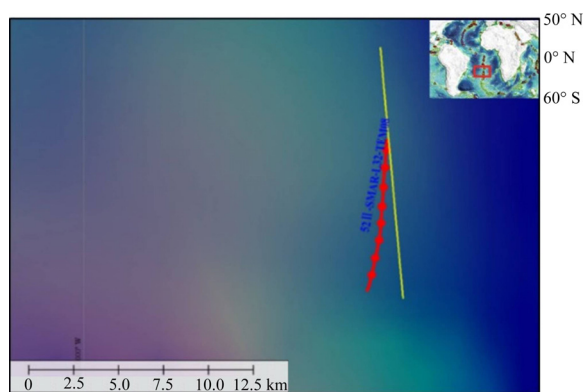


图 3 TEM08 测线测点位置分布

Fig. 3 Distribution of observed points of Line TEM08

2.2 数据预处理及反演

海洋瞬变电磁数据在反演前, 要经过一系列预处理过程, 包括: 抽道、剔除飞值和测点位置校正。

1) 抽道。对数据进行抽道取样, 抽道原则是采用近似对数等间隔取样, 数据窗宽为 1.2 倍关系, 接近对数间隔 $10^{0.1}$, 误差较小。首先确定前一测道的起始点, 计算数据窗宽, 决定该取样道内参加计算的数据个数, 再由此数据窗宽确定下一测道的起始点, 对数间隔可根据实际需要进行设定。这样既保证了数据窗的连续性, 又保证了取样抽道的中心时间和数据窗宽之间需要遵循的倍数关系。

2) 剔除飞值。电磁信号易受海底洋流干扰出现跳变点, 该测线数据整体质量较好, 响应曲线平滑, 但某些测点受到干扰仍然存在跳点, 如图 4 中红色圆圈部分。因此反演前要先去除采集数据中的跳变点, 要求数据整体上呈指数衰减趋势, 以保证后面数据处理工作的顺利以及结果的准确性。

3) 测点位置校正。由于线圈拖体上未加挂 GPS 设备, 因此在数据处理之前要先校正测点位置。根据船载 GPS 校正测点位置进行位置校正, 才能得到对应时刻的线圈拖体位置。主要方法是通过拖体上搭载的 CTD 数据测到拖体的深度, 结合钢缆的长度可以计算出拖体距船体的水平距离, 从而完成线圈拖体位置的校正工作。

经过上述预处理后的数据通过反演可以得到海底的电性结构特征, 从而分析海底地下介质的分布特征。本次研究采用一维 Occam 反演方法, 反演层数设定为 22 层, 层厚按照系数 1.1 依次递增, 反演的总深度约为 70 m。反演初始模型为层状模型, 海水电阻率设定为 $0.3 \Omega \cdot \text{m}$, 海底介质电阻率设定为 $1 \Omega \cdot \text{m}$, 海水深度设定为该区域的平均海水深度—2600 m。

3 分析与讨论

图 5 所示为 TEM08 测线的电阻率分布图, 数据拟合整体较好。从图 5 中可以看出, 测线所经过的区域在 840~880 号点之间, 1060~1080 号点之间, 均对应为相对低阻区。测线范围内电阻率横向变化不均匀, 纵向呈现低阻管状形态, 浅部低阻横向展布, 逐渐延伸变窄, 并在深部呈现纵向低阻展布, 浅部的低阻体与深部低阻管状体联通。结合二次场响应对数据结果进行分析, 该图上半部分是测线获得的二次场响应曲线, 该曲线经过了角度改正和接收线圈面积归一化, 能准确区分异常区和背景区。

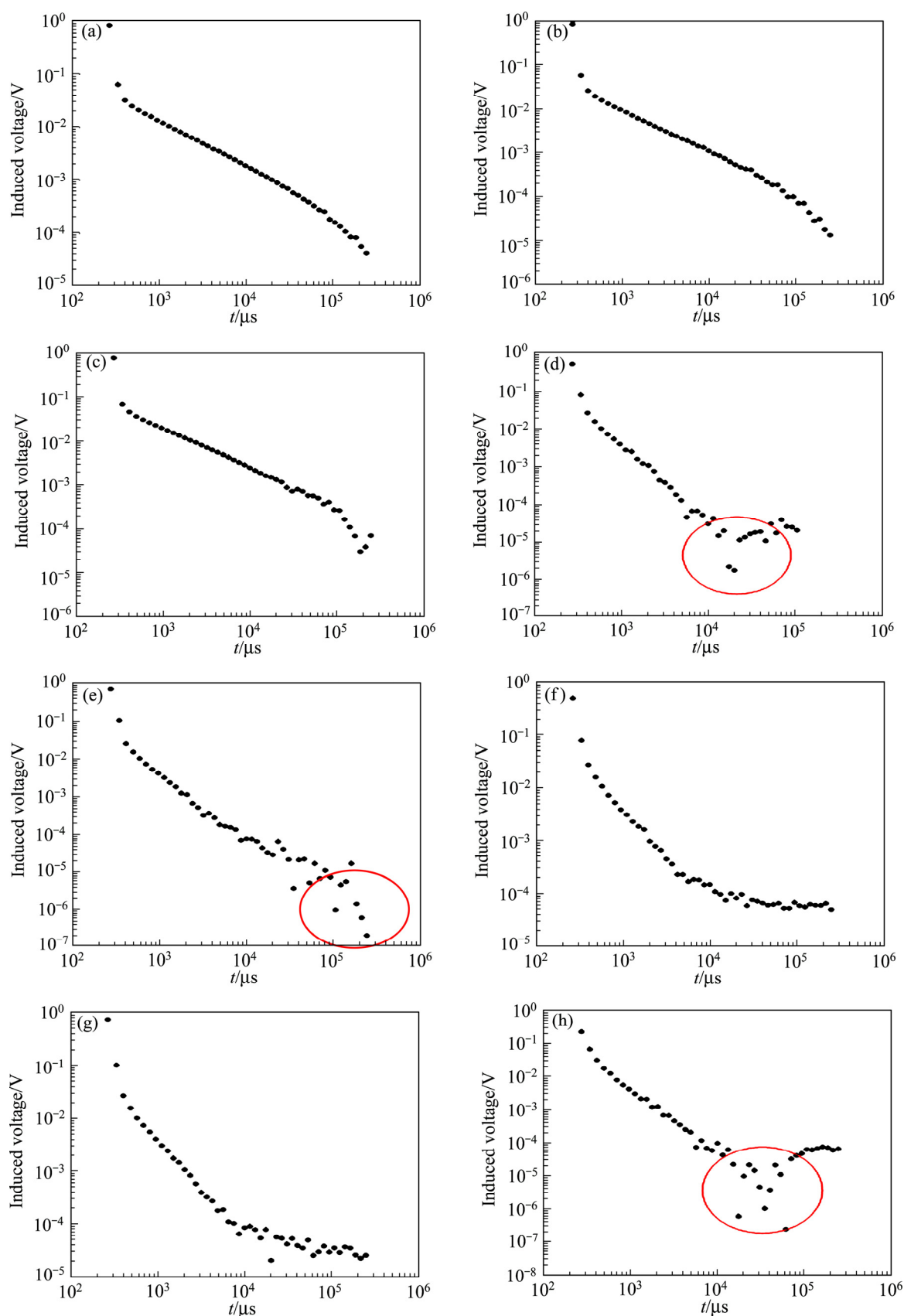


图 4 典型测点感应电压曲线

Fig. 4 Induced voltage curve of typical observed point: (a) Point 760; (b) Point 850; (c) Point 860; (d) Point 940; (e) Point 1000; (f) Point 1050; (g) Point 1070; (h) Point 1160

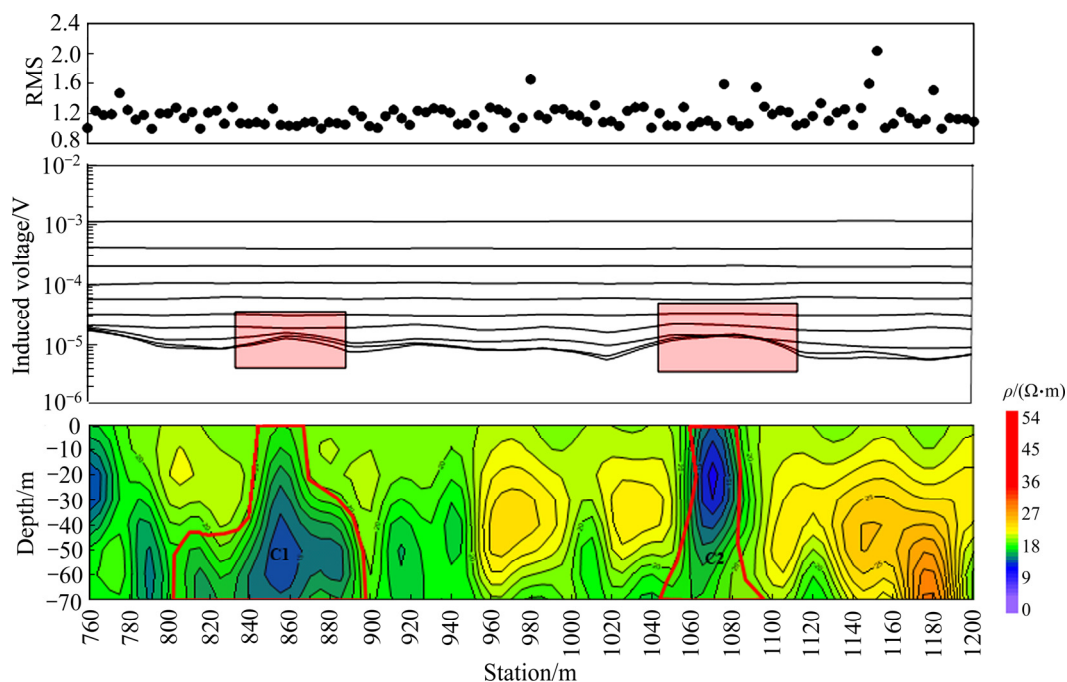


图5 TEM08 测线的电阻率分布图

Fig. 5 Resistivity distribution of inversion results of TEM08

从图5可以看出,测线所经过的区域在840~880号点之间,在1060~1080号点之间二次场响应较强,衰减较慢,据此推测该区为热液硫化矿堆。其余区域二次场相对较弱,电阻率高阻错乱分布,推测玄武岩受海水侵蚀较破碎,节理裂隙发育。

为了方便描述,将两处异常分别命名为C1和C2,两处热液硫化物矿堆,相隔150 m。C1呈现倒“蘑菇”形态,上部直径约为20 m,向下延伸,下部直径最大可达100 m。推测深部的热液在上升时,受到渗透性较差的盖层阻挡,堆积在盖层下方从而形成了下部直径较大的异常。随着热液的累积,受到压力影响,部分热液沿盖层中的裂缝或破碎带继续向上涌出,形成了上部较细的低阻异常(见图6)。

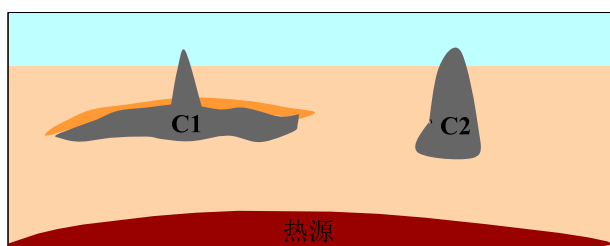


图6 硫化物矿床的示意图

Fig. 6 Schematic model of evolution of SMS deposits

这种形态不同于TAG区常见的生长于洋壳内“蘑菇”形态的硫化物矿体异常,推测该区域深部可能还存在一定规模的热液硫化物矿床。C2异常不同于C1, C2几乎竖直地立于洋壳内,直径约为60 m,厚度约50 m。C2的喷出直径较大,推测是因为周围岩石破碎程度较高导致的^[33]。

4 结论与建议

1) 经过一系列技术手段的预处理和反演后,获取了测线下方的一维电阻率结构,为海底结构特征和可能存在的硫化物矿床的研究提供了基础资料。

2) 在测线的840~880号点和1060~1080号点之间存在两处相对低阻异常体,并对应着较强的二次感应场且衰减较慢,因此,推测这两处区域为热液硫化物矿堆。该矿堆呈现管状形态,向下延伸约30 m。

3) 通过对实际采集的大洋瞬变电磁数据的处理及反演,本文获取了该区域洋底的电性结构特征,证明了采用海洋瞬变电磁法探测海底热液硫化物矿床是可行的,可以获得矿床的规模、分布特征及赋存状态等信息,为矿产资源评价提供了依据。

REFERENCES

- [1] GALLEY A G, HANNINGTON M D, JONASSON I R. Volcanogenic massive sulfide deposits[J]. GOODFELLOW W D. Mineral Deposits of Canada: A Synthesis of Major Deposit-Types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods, 2007(S5): 141–161.
- [2] HERZIG P M. Economic potential of sea-floor massive sulfides deposits: Ancient and modern[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1999, 357: 861–875.
- [3] HANNINGTON M, JAMIESON J, MONECKE T, et al. The abundance of seafloor massive sulfide deposits[J]. Geology, 2011, 39: 1155–1158.
- [4] MURTON B J, LEHRMANN B, DUTRIEUX A M, et al. Geological fate of seafloor massive sulfides at the TAG hydrothermal field (Mid-Atlantic Ridge)[J]. Ore Geology Review, 2019, 107: 903–925.
- [5] Van DOVER C L. Tighten regulations on deep-sea mining[J]. Nature, 2011, 470: 31–33.
- [6] JOHNSON H P, PRUIS M J. Fluxes of fluid and heat from the oceanic crustal reservoir[J]. Earth & Planetary Science Letters, 2003, 216(4): 565–574.
- [7] 叶俊, 石学法, 杨耀民, 等. 大西洋中脊 15°S 热液硫化物成矿阶段初步划分[J]. 矿物学报, 2013, 33(S2): 680.
YE Jun, SHI Xue-fa, YANG Yao-min, et al. Preliminary division of metallogenic stages of hydrothermal sulfide in Mid-Atlantic Ridge 15°S[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2013, 33(S2): 680.
- [8] 邵明娟, 杨耀民, 苏新, 等. 南大西洋中脊 26°S 热液区烟囱体矿物学研究[J]. 中国矿业, 2014, 23(5): 77–81.
SHAO Ming-juan, YANG Yao-min, SU Xin, et al. Study on chimney mineralogy from the 26°S hydrothermal field in south mid-Atlantic ridge[J]. China Mining Magazine, 2014, 23(5): 77–81.
- [9] 李兵, 石学法, 杨耀民, 等. 南大西洋 14.0°S 热液区热液硫化物矿物学特征及地质意义[J]. 矿物学报, 2015, 35(1): 35–43.
LI Bing, SHI Xue-fa, YANG Yao-min, et al. Mineralogy and geological significance of hydrothermal deposits from the 14.0°S hydrothermal field, South Mid-Atlantic[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2015, 35(1): 35–43.
- [10] 唐鑫. 南大西洋 15°S 热液区多金属硫化物成矿作用研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2016.
TANG Xin. Mineralization of polymetallic sulfides on South Mid-Atlantic ridge (SMAR) at 15°S[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2016.
- [11] TAO C H, LI H M, LI Y M, et al. Two hydrothermal fields found on the Southern Mid-Atlantic Ridge[J]. Science China Earth Sciences, 2011, 54(9): 1302–1303.
- [12] 石学法, 李兵, 叶俊, 等. 南大西洋中脊热液活动及形成机制[J]. 矿物学报, 2015, 35(S1): 782–783.
SHI Xue-fa, LI Bing, YE Jun, et al. Activity and formation mechanism of hydrothermal field in the South Mid-Atlantic Ridge[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2015, 35(S1): 782–783.
- [13] TAO C H, WU T, JIN X B, et al. Petrophysical characteristics of rocks and sulfides from the SWIR hydrothermal field[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2013, 32(12): 118–125.
- [14] CAIRNS G W, EVANS R L, EDWARDS R N. A time-domain electromagnetic survey of the TAG hydrothermal mound[J]. Geophysical Research Letters, 1996, 23(23): 3455–3458.
- [15] Von HERZEN R P, KIRKLIN J, BECKER K. Geoelectrical measurements at the TAG hydrothermal mound[J]. Geophysical Research Letters, 1996, 23(23): 3451–3454.
- [16] 杜华坤. 勘查海底热液硫化物的海洋伪随机激电法研究[D]. 长沙: 中南大学, 2005.
DU Hua-kun. Marine pseudo random IP method for the exploration of seafloor hydrothermal sulfide[D]. Changsha: Central South University, 2005.
- [17] 李泽, 陶春辉, 朱忠民, 等. 深海多金属硫化物瞬变电磁激电效应初探[J]. 海洋学报, 2019, 41(12): 39–50.
LI Ze, TAO Chun-hui, ZHU Zhong-min, et al. Primary study on transient electromagnetic induced polarization effects of deep-sea polymetallic sulfides[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2019, 41(12): 39–50.
- [18] 周胜, 席振铎, 宋刚, 等. 深海拖曳式瞬变电磁的响应规律[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(2): 605–610.
ZHOU Sheng, XI Zhen-zhu, SONG Gang, et al. Responses of the towed transient electromagnetic sounding on deep seafloor[J]. Journal of Central South University (Natural Science Edition), 2012, 43(2): 605–610.

- [19] HÖLZ S, JEGEN M, PETERSEN S, et al. How to find buried and inactive seafloor massive sulfides using transient electromagnetics—A case study from the Palinuro Seamount in the Tyrrhenian Sea[C]//Underwater Mining Institute Conference. FL, USA: Tampa Bay, 2015: 1–8.
- [20] SCHWALENBERG K, MLLER H, ENGELS M. Seafloor massive sulfide exploration—A new field of activity for marine electromagnetics[C]//EAGE/DGG Workshop on Deep Mineral Exploration. Münster, Germany: European Association of Geoscientists & Engineers, 2016: 1–5.
- [21] 席振铎, 李瑞雪, 宋 刚, 等. 深海热液金属硫化物矿电性结构[J]. 地球科学, 2016, 41(8): 1395–1401.
- XI Zhen-zhu, LI Rui-xue, SONG Gang, et al. Electrical structure of sea-floor hydrothermal sulfide deposits[J]. Earth Science, 2016, 41(8): 1395–1401.
- [22] 袁芬艳. 深海拖曳式瞬变电磁探测技术研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2011.
- YUAN Fen-yan. Research of deep-sea towed TEM detection technology[D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2011.
- [23] IMAMURA N, GOTO T, KASAYA T, et al. Robust data processing of noisy marine controlled-source electromagnetic data using independent component analysis[J]. Exploration Geophysics, 2018, 49(1): 21–29.
- [24] MÜLLER H, SCHWALENBERG K, REECK K, et al. Mapping seafloor massive sulfides with the Golden Eye frequency-domain EM profiler[J]. First Break, 2018, 36(11): 61–67.
- [25] SAFIPOUR R, HÖLZ S, JEGEN M, et al. On electric fields produced by inductive sources on the seafloor[J]. Geophysics, 2017, 82(6): E297–E313.
- [26] SAFIPOUR R, HÖLZ S, JEGEN M, et al. A first application of a marine inductive source electromagnetic configuration with remote electric dipole receivers: Palinuro Seamount, Tyrrhenian Sea[J]. Geophysical Prospecting, 2018, 66(7): 1415–1432.
- [27] TAO C H, XIONG W, XI Z Z, et al. TEM investigations of South Atlantic Ridge 13.2°S hydrothermal area[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2013, 32(12): 68–74.
- [28] NAKAYAMA K, SAITO A. The seabed TDEM towed by ROV for the ocean bottom hydrothermal deposits[C]//1st Conference on Geophysics for Mineral Exploration and Mining. Barcelona, Spain: European Association of Geoscientists & Engineers, 2016: 1–5.
- [29] ASAKAWA E, SUMI T, YAMAKAWA T, et al. Multi-stage and integrated approach for seafloor massive sulfide (SMS) exploration[C]//1st Conference on Geophysics for Mineral Exploration and Mining. Barcelona, Spain: European Association of Geoscientists & Engineers, 2016: 6–10.
- [30] 李 貅. 瞬变电磁测深的理论与应用[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2002.
- LI Xiu. Theory and application of TEM sounding method[M]. Xi'an: Shanxi Science and Technology Press, 2002.
- [31] 陈 欣, 熊 彬, 黄业中, 等. 不同滤波系数在电磁法数值计算中的应用研究[J]. 山东国土资源, 2017, 33(5): 62–67.
- CHEN Xin, XIONG Bin, HUANG Ye-zhong, et al. Application of several sets of filter coefficients in numerical computation of electromagnetic fields[J]. Shandong Land and Resources, 2017, 33(5): 62–67.
- [32] 李大俊. 基于时频变换实现矩形大定源瞬变电磁数据三维频率域反演[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- LI Da-jun. Three-dimensional frequency-domain inversion of transient electromagnetic data from a rectangular large loop based on time-frequency transformation method[D]. Changchun: Jilin University, 2017.
- [33] ZHOU W T, HAN Y X, SUN Y S, et al. Multi-scale impact crushing characteristics of polymetallic sulphide ores[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2019, 29(9): 1929–1938.

Electrical structure of seafloor massive sulfide deposits in South Mid-Atlantic ridge based on marine transient electromagnetic method

YANG Yue^{1,2}, LI Chuan-shun^{1,2}, YE Jun^{1,2}, LI Bing^{1,2}, DANG Yuan^{1,2}, WANG Sai^{1,2}

(1. Key Laboratory of Marine Geology and Metallogeny, First Institute of Oceanography,
Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China;

2. Laboratory for Marine Geology,
Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology(Qingdao), Qingdao 266237, China)

Abstract: The Mid-Atlantic Ridge is a typical slow spreading ridge, with great potential for the formation of seafloor massive sulfide deposits. At present, the international investigation and research on the hydrothermal activities in the Mid-Atlantic Ridge is mainly concentrated in the North Mid-Atlantic Ridge, while the research on the South Mid-Atlantic Ridge is a less. In addition, the traditional methods mainly used can only detect the surface characteristics of the deposit, and its morphology, scale and occurrence state still need to be solved. Marine transient electromagnetic method (MTEM) has become one of the emerging methods for the detection and evaluation of seafloor massive sulfide deposits because of its sensitivity to shallow conductivity. In order to study the submarine hydrothermal system in the South Atlantic, China has carried out several cruises in the South Atlantic. We have conducted a transient electromagnetic survey in the South Atlantic Ridge during cruise DY52 segment 2, using a central loop method towed by a ship. The Occam method is used for inversion. The results show that the shallow resistivity of the survey area is low, while the deep resistivity is higher. The conductivity in the shallow is distributed along the line, while the deep resistivity varies unevenly. Between points 840–880 and points 1060–1080, there are two continuous low-resistance anomalies ranging from shallow to deep, and the corresponding secondary field response is relatively strong, which is speculated to be seafloor massive sulfide deposits. The seafloor massive sulfide deposit has a tubular shape, extending down about 30 m. Which proves that the marine transient electromagnetic method can be used to locate hydrothermal sulfide ore, delineate the scope of sulfide ore, study the spatial structure of sulfide ore, etc., and finally serve the evaluation of polymetallic sulfide mineral resources.

Key words: submarine hydrothermal; seafloor massive sulfide deposit; South Mid-Atlantic; transient electromagnetic method; resource assessment

Foundation item: Project(DY135-S2-2-01) supported by China Ocean Mineral Resources Research and Development Association

Received date: 2021-06-03; **Accepted date:** 2021-08-24

Corresponding author: LI Chuan-shun; Tel: +86-532-88966386; E-mail: lichuanshun@fio.org.cn

(编辑 龙怀中)