

海底热液区硫化物烟囱体的矿物学与地球化学特征：海洋资源领域的研究进展与展望

徐堃宇

桂林理工大学地球科学学院, 广西 桂林

收稿日期: 2025年2月25日; 录用日期: 2025年4月2日; 发布日期: 2025年4月14日

摘要

文章综述了海底热液区硫化物烟囱体的矿物学与地球化学特征研究进展。通过对硫化物烟囱体的形成机制、矿物组成、地球化学特征及其资源潜力的分析,探讨了当前研究现状和未来发展方向。研究表明,硫化物烟囱体富含多种金属元素,具有重要的资源开发价值。然而,深海开采技术、环境影响评估和资源可持续利用等方面仍面临挑战。未来研究应重点关注烟囱体形成演化机制、精细矿物学特征、元素迁移规律以及资源开发与环境保护的平衡,为深海资源的可持续利用提供科学依据。

关键词

海底热液区, 硫化物烟囱体, 地球化学, 海洋资源

Mineralogical and Geochemical Characteristics of Sulfide Chimneys in Hydrothermal Vent Fields: Research Progress and Prospects in the Field of Marine Resources

Kunyu Xu

College of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi

Received: Feb. 25th, 2025; accepted: Apr. 2nd, 2025; published: Apr. 14th, 2025

Abstract

This article provides a comprehensive review of the progress of research on the mineralogical and

文章引用: 徐堃宇. 海底热液区硫化物烟囱体的矿物学与地球化学特征: 海洋资源领域的研究进展与展望[J]. 地球科学前沿, 2025, 15(4): 354-359. DOI: 10.12677/ag.2025.154036

geochemical characteristics of sulfide chimneys in submarine hydrothermal vent fields. By analyzing the formation mechanisms, mineral composition, geochemical features, and resource potential of sulfide chimneys, the current research status and future development directions are explored. Studies have shown that sulfide chimneys are rich in various metallic elements, holding significant resource development value. However, challenges remain in deep-sea mining technology, environmental impact assessment, and sustainable resource utilization. Future research should focus on the formation and evolution mechanisms of chimneys, detailed mineralogical characteristics, elemental migration patterns, and the balance between resource development and environmental protection, thereby providing a scientific basis for the sustainable utilization of deep-sea resources.

Keywords

Submarine Hydrothermal Vent Fields, Sulfide Chimneys, Geochemistry, Marine Resources

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着陆地资源的日益枯竭，海洋资源的开发利用逐渐成为全球关注的焦点，其中海底硫化物矿床作为重要的海洋矿产资源，因其富含铜、锌、铅、金、银等金属元素而备受关注。海底热液活动是地球上重要的地质过程之一，其形成的硫化物烟囱体不仅记录了海洋-岩石相互作用的信息，还蕴藏着丰富的金属资源。近年来，随着深海探测技术的进步，海底硫化物矿床和热液区硫化物烟囱体的研究取得了显著进展[1][2]，然而由于海底环境的复杂性和探测技术的局限性，对海底硫化物矿床的形成机制、分布规律和资源潜力的认识仍存在诸多不足。本文旨在综述硫化物烟囱体的矿物学与地球化学特征，探讨其在海洋资源领域的应用前景，并展望未来研究方向。通过系统梳理相关研究成果，本文重点从深入理解海底热液系统、评估深海硫化物资源潜力角度对我国重大研究成果进行总结，并对未来发展方向和研究重点进行展望。

2. 海底热液区硫化物烟囱体及硫化物矿床的形成与特征

现代海底多金属硫化物矿床主要是由深部循环海水与洋壳相互作用形成的，大多分布在海床及其下方区域[3]-[5]。自首次发现海底热液喷口以来，多金属硫化物矿床引起了学术界和产业界的极大关注。

海底热液区硫化物烟囱体是海底热液活动的直接产物，其形成过程涉及复杂的地质、物理和化学作用。热液活动始于海水沿裂隙渗入洋壳，与热岩石发生反应，形成高温、富含金属元素的热液流体。这些流体在压力驱动下上升，与冷海水混合，导致金属硫化物快速沉淀，逐渐堆积形成烟囱状结构。硫化物烟囱体具有独特的形态特征和空间分布规律，典型烟囱体高度从几厘米到数十米不等，直径可达数米。它们通常成群出现，沿断裂带或火山活动区分布。根据形成环境和矿物组成，海底热液硫化物烟囱体可分为黑烟囱、白烟囱和过渡类型。黑烟囱形成于高温(300℃~400℃)、酸性(pH 2~3)环境，热液流体富含Fe、Cu、Zn等金属硫化物。当高温热液与冷海水混合时，硫化物快速沉淀，形成以黄铁矿(FeS₂)、黄铜矿(CuFeS₂)、闪锌矿(ZnS)为主的柱状结构；白烟囱则形成于较低温度(<250℃)，热液中硫酸盐(如Ba²⁺、Ca²⁺)和二氧化硅占主导，形成重晶石(BaSO₄)、硬石膏(CaSO₄)及蛋白石(SiO₂·nH₂O)，可能与热液-海水混合速率较慢或硫化物供应不足有关(图1)。

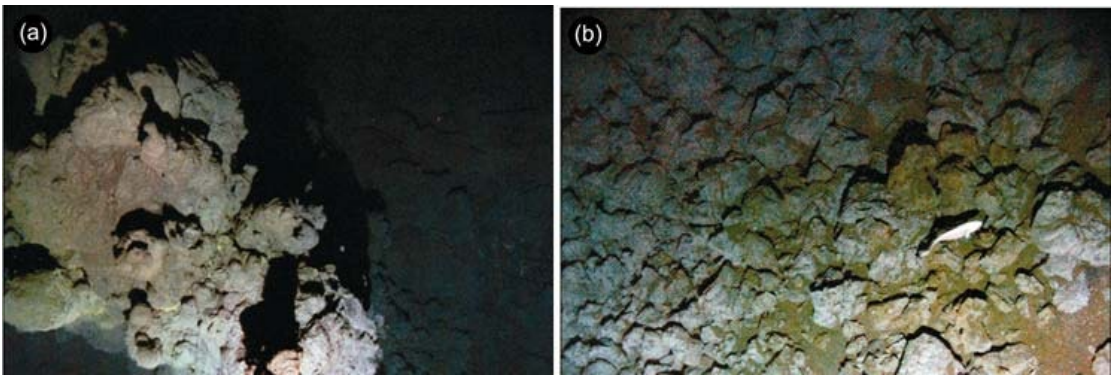


Figure 1. Photos of the Southwest Indian Ocean Ridge seabed (Captured at SWIR 49°39'E, with a field of view of 4 m × 4 m) [6]
图 1. 西南印度洋脊海底照片(拍摄于 SWIR49°39'E, 视域范围 4 m × 4 m) [6]

海底硫化物矿床主要分布在大洋中脊、弧后盆地和海底火山等构造活动活跃的区域。这些矿床通常呈丘状、烟囱状或层状产出，规模从几米到几百米不等。根据成因和地质背景，海底硫化物矿床可分为洋中脊型、弧后盆地型和火山型等类型，其中洋中脊型矿床最为常见，主要与海底热液活动有关。近年来，我国在西南印度洋中脊的龙旂和断桥热液区进行了相关的地球物理勘探和样品采集，在该研究区发现了大型拆离断层及超大规模的岩浆供给[6]-[9]。

经过研究提出了一种由拆离断层控制的地幔传导热驱动热液循环的新模型[10]，热液循环是矿床形成的关键过程，海水沿裂隙下渗，被岩浆房加热后与围岩发生水岩反应，形成富含金属元素的热液。这些热液在海底喷发，与冷海水混合，导致金属硫化物的快速沉淀从而形成矿床，还阐明了局部岩浆供给充足、渗透率适宜是硫化物发育的有利机制[11]-[13]。后期构造活动和海底风化作用可能对矿床进行改造，影响其形态和成分。

3. 硫化物烟囱体的矿物学特征

硫化物烟囱体的矿物组成复杂多样，主要分为硫化物矿物、硫酸盐矿物和硅酸盐矿物三大类。硫化物矿物以黄铁矿、闪锌矿、黄铜矿和方铅矿为主[14][15]，是烟囱体中金属元素的主要载体。硫酸盐矿物包括重晶石、硬石膏等，常见于烟囱体外部或低温区域。硅酸盐矿物如绿泥石、滑石等，多形成于热液与围岩的交代作用(表 1)。

Table 1. Mineral and structural characteristics of sulfide chimney bodies
表 1. 硫化物烟囱体矿物及结构特征

类型	典型矿物组合	结构特征
黑烟囱	黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿	层状或同心环带，内部致密
白烟囱	重晶石、硬石膏、蛋白石	多孔结构，外部覆盖硫酸盐

矿物组合和结构特征反映了烟囱体的形成环境和演化历史。高温烟囱体内部通常呈现致密的硫化物互生结构，而外部则发育多孔状或层状构造。矿物的空间分布和共生关系为重建热液活动过程提供了重要线索。例如，黄铁矿与闪锌矿的共生可能指示中温成矿环境，而黄铜矿的大量出现则暗示高温热液活动。

目前针对烟囱体成因的传统分类相对较简化，例如，某些弧后盆地烟囱体(如冲绳海槽)呈现硫化物-硫酸盐混合矿物组合，反映热液流体成分随岩浆脱气或基底岩性变化的过渡特征。以及部分地区构造背景对地球化学的控制因素对资源的勘探具有指导意义，例如洋中脊烟囱体大多以 Fe-Cu-Zn 为主，而弧后

盆地烟囱体则富 Pb、As，可能与俯冲带流体加入有关。

4. 硫化物烟囱体的地球化学特征

硫化物烟囱体的元素组成和分布规律是其地球化学研究的核心内容。其中主要的成矿元素包括 Cu、Zn、Pb、Fe 等，伴生有 Au、Ag 等贵金属。微量元素如 Cd、In、Ga 等的含量和分布模式对揭示成矿过程和资源评价具有重要意义。同位素组成(如 S、Pb、Sr 同位素)为追溯成矿物质来源和热液演化提供了有力工具。

目前的研究针对全球不同的热液区，对硫化物烟囱体进行了相关的地球化学和矿物组成方面的研究，结合不同区域所处的构造背景及流体差异等问题，发现地球化学组成有明显差异。表 2 为目前全球较为热门的 8 个热液区的多金属硫化物的主要元素对比。通过对比可以看出，西南印度洋热液区的硫化物样品的 Fe、Cu 和 Zn 含量明显高于其他热液区，形成于弧后盆地环境的 Jade 热液区的硫化物样品的贵金属元素 Au 和 Ag 高于其他热液区[25]。中印度洋 MESO 热液区的高扩张速率以及 Cu、Co、Mo 等元素更为富集的特点可能指示与岩浆活动的强度相关。其中冲绳海槽附近极浅的水深(1340 m)与超高的 Ag、Pb、Cd 含量，可能是受陆源沉积物影响或岛弧背景影响，而 Mt.Jourdanne 热液区虽然扩张速率低但是 Zn、Ag、Cd 含量的含量较高可能暗示了独特的热液循环或围岩蚀变过程。

Table 2. Comparison of the main elemental composition of polymetallic sulfides from different hydrothermal activity zones
表 2. 不同热液活动区多金属硫化物的主要元素组成对比

热液区	水深 (m)	洋脊 半扩张 速率 (cm/a)	主要 矿物	Cu (wt%)	Fe (wt%)	Zn (wt%)	Pb (wt%)	Au (ppm)	Ag (ppm)	Co (ppm)	Ni (ppm)	Cd (ppm)	Mo (ppm)	数据 来源
西南印度洋 研究区	2750	0.6	黄铁矿 - 黄铜矿	2.83	45.6	3.28	0.01	2.0	70.2	222.0	2.4	111.2	26.0	[19]
Mt.Jourdanne 热液区	2940	0.7	闪锌矿	2.72	13.88	25.66	1.65	5.6	1021	-	7.67	1204	-	[20]
中印度洋 MESO 热液区	2850	2.5	黄铁矿 - 黄铜矿	29.4	27.6	0.5	0.03	0.7	55.3	583.7	127.8	23.5	300.0	[21]
			黄铁矿 - 白铁矿	6.2	37.2	0.8	0.05	0.6	22.4	1089.6	70.4	34.2	156.2	[21]
太平洋														
21°N, 热液区	2600	3.0	黑烟囱	0.2	2.0	1.1	0.05	<0.1	6.0	29.2	2.2	40.0	1.0	[21]
			闪锌矿 - 黄铁矿	1.1	22.0	31.0	0.18	<0.2	118.0	4.1	4.1	840.0	45.0	[21]
7°24'S, 热液区	2740	7.7	黄铁矿	0.33	40.34	2.85	0.083	0.043	40	214	38	73	22	[22]
			黄铁矿 - 黄铜矿	10.53	34.46	2.23	0.034	0.051	23.41	906	29	88	120	[22]
大西洋														
TAG, 热液区	3620	1.3	黑烟囱	13.4	21.2	0.6	0.01	0.5	13.0	531.0	48.0	17.0	118.0	[21]
Logatchev, 热液区	2600~ 3400	1.3	黄铁矿 - 黄铜矿	12.8	37.3	1.4	0.02	1.4	38.0	75.0	-	38.0	144.0	[21]
			硫化物	23.1	28.6	7.85	0.022	-	-	778	<20	-	-	[23]
冲绳海槽														
Jade 热液区	1340	1.0	闪锌矿 - 黄铜矿	4.41	11.50	27.4	12.00	8.60	11300	-	-	1300	-	[24]
				5.39	10.20	33.6	4.3	0.41	4100	-	-	2000	-	[24]

注：“-”表示未检测。

地球化学特征与成矿过程密切相关。例如, Cu/Zn 比值可反映热液温度, Pb 同位素组成可指示物质来源。通过系统分析烟囱体的地球化学特征, 可以重建热液系统的物理化学条件、流体演化历史以及金属元素的迁移-沉淀机制。黑烟囱中 Fe、Cu、Zn 等元素含量高(可达 wt% 级), S 为主要阴离子; 白烟囱中则是 Ba、Ca、Si 元素更为富集, S 以 SO_4^{2-} 形式存在。通过同位素示踪方法进行研究发现对于硫同位素 ($\delta^{34}\text{S}$), 黑烟囱 $\delta^{34}\text{S}$ 接近 0‰(岩浆硫), 白烟囱 $\delta^{34}\text{S}$ 偏高(海水硫酸盐还原)。多金属硫化物的稀土元素(REE) 组成可以在一定程度上反映热液流体的物质来源和演化特征, 黑烟囱显示轻稀土富集(与热液流体演化相关)。典型大洋中脊热液区, 包括玄武岩基底和超基性岩基底热液区的热液流体 REE 多具有 LREE 富集, HREE 亏损以及强正 Eu 异常配分特点[16]-[18]。

5. 海底热液区硫化物烟囱体的资源潜力与讨论

硫化物烟囱体富含多种金属元素, 具有重要的资源开发价值。据估算, 全球海底热液硫化物资源量可达 6 亿吨, 其中 Cu、Zn、Pb 等金属含量远超陆地矿床。此外, 烟囱体中 Au、Ag 等贵金属的富集也引起了广泛关注。资源评价方法主要包括地质调查、地球化学分析和数值模拟等, 旨在准确估算资源量和预测潜在矿区。并且烟囱体的类型可以反映热液活动的变化历史, 而通过地球化学方面主微量元素及同位素的数据可以分析指示热液的来源和流体演化过程, 因此对烟囱体的元素比值和同位素组成的研究可以反演古热液系统的氧化还原状态, 可以为研究早期地球地质活动及古环境的演变提供一定的指导意义。

然而, 深海资源开发面临诸多挑战。首先, 深海开采技术尚不成熟, 需要解决高压、低温等极端环境下的工程难题。其次, 热液区生态系统脆弱, 开发活动可能对深海环境造成不可逆的影响。因此, 在资源开发的同时, 必须重视环境保护和生态修复。制定合理的开发策略, 平衡资源利用与生态保护, 是实现深海资源可持续发展的关键。技术创新和跨学科合作将是推动海底硫化物矿床研究的关键。例如, 人工智能和大数据技术的应用可以提高数据处理和解释的效率; 新型传感器和采样器的开发可以获取更高质量的样品和数据; 地球深部探测计划的实施将深化对海底地质过程的理解。这些进展将为海底硫化物矿床的勘探和开发提供新的机遇。

6. 结论

海底硫化物矿床作为重要的海洋矿产资源, 其研究对于理解地球系统过程和开发海洋资源具有重要意义。海底热液区硫化物烟囱体的矿物学与地球化学研究为理解海底热液系统、评估深海资源潜力提供了重要依据。未来研究应重点关注以下几个方面:

- (1) 深入揭示硫化物烟囱体的形成演化机制, 建立更精确的成矿模型;
- (2) 开展精细矿物学研究, 阐明金属元素的赋存状态和富集规律;
- (3) 加强地球化学示踪研究, 揭示成矿物质来源和热液流体演化过程;
- (4) 推动技术创新和跨学科合作。

参考文献

- [1] Rona, P.A. (1984) Hydrothermal Mineralization at Seafloor Spreading Centers. *Earth-Science Reviews*, **20**, 1-104. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(84\)90080-1](https://doi.org/10.1016/0012-8252(84)90080-1)
- [2] Rona, P.A. and Scott, S.D. (1993) A Special Issue on Sea-Floor Hydrothermal Mineralization; New Perspectives; Preface. *Economic Geology*, **88**, 1935-1976. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.88.8.1935>
- [3] 李家彪, 王叶剑, 李小虎. 现代海底热液硫化物成矿地质学[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [4] Beaulieu, S.E. and Szafranski, K.M. (2020) InterRidge Global Database of Active Submarine Hydrothermal Vent Fields Version 3.4. Institut de Physique du Globe de Paris.
- [5] 陶春辉, 陈建平, 廖时理, 等. 洋中脊多金属硫化物成矿预测与资源量估算方法[M]. 北京: 科学出版社, 2019.

- [6] 陶春辉, 梁锦, 王汉闯, 等. 洋中脊多金属硫化物勘查方法和技术[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [7] Liu, L., Lu, J., Tao, C., Liao, S. and Chen, S. (2021) GIS-Based Mineral Prospectivity Mapping of Seafloor Massive Sulfide on Ultraslow-Spreading Ridges: A Case Study of Southwest Indian Ridge 48.7°–50.5°E. *Natural Resources Research*, **30**, 971-987. <https://doi.org/10.1007/s11053-020-09797-y>
- [8] Li, J., Jian, H., Chen, Y.J., Singh, S.C., Ruan, A., Qiu, X., *et al.* (2015) Seismic Observation of an Extremely Magmatic Accretion at the Ultraslow Spreading Southwest Indian Ridge. *Geophysical Research Letters*, **42**, 2656-2663. <https://doi.org/10.1002/2014gl062521>
- [9] Zhao, M., Qiu, X., Li, J., Sauter, D., Ruan, A., Chen, J., *et al.* (2013) Three-Dimensional Seismic Structure of the Dragon Flag Oceanic Core Complex at the Ultraslow Spreading Southwest Indian Ridge (49°39'E). *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **14**, 4544-4563. <https://doi.org/10.1002/ggge.20264>
- [10] Tao, C., Seyfried, W.E., Lowell, R.P., Liu, Y., Liang, J., Guo, Z., *et al.* (2020) Deep High-Temperature Hydrothermal Circulation in a Detachment Faulting System on the Ultra-Slow Spreading Ridge. *Nature Communications*, **11**, Article No. 1300. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15062-w>
- [11] Tao, C., Lin, J., Guo, S., Chen, Y.J., Wu, G., Han, X., *et al.* (2012) First Active Hydrothermal Vents on an Ultraslow-Spreading Center: Southwest Indian Ridge. *Geology*, **40**, 47-50. <https://doi.org/10.1130/g32389.1>
- [12] 吴涛. 西南印度洋脊热液硫化物区近底磁法研究[D]: [博士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2017.
- [13] Zhu, Z., Tao, C., Shen, J., Revil, A., Deng, X., Liao, S., *et al.* (2020) Self-Potential Tomography of a Deep-Sea Polymetallic Sulfide Deposit on Southwest Indian Ridge. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **125**, 1-19. <https://doi.org/10.1029/2020jb019738>
- [14] 李怀明. 现代海底热液硫化物矿体内部流体过程的模拟实验研究[D]: [博士学位论文]. 青岛: 中国海洋大学, 2008.
- [15] 康欢, 江思宏, 韩宁, 等. 德国拉梅尔斯贝格铜-锌-铅-钼矿床研究进展[J]. 地质通报, 2017, 36(8): 1483-1492.
- [16] Allen, D.E. and Seyfried, W.E. (2005) REE Controls in Ultramafic Hosted MOR Hydrothermal Systems: An Experimental Study at Elevated Temperature and Pressure. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **69**, 675-683. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2004.07.016>
- [17] Douville, E., Bienvenu, P., Charlou, J.L., Donval, J.P., Fouquet, Y., Appriou, P., *et al.* (1999) Yttrium and Rare Earth Elements in Fluids from Various Deep-Sea Hydrothermal Systems. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **63**, 627-643. [https://doi.org/10.1016/s0016-7037\(99\)00024-1](https://doi.org/10.1016/s0016-7037(99)00024-1)
- [18] Humphris, S.E. (1998) Rare Earth Element Composition of Anhydrite: Implications for Deposition and Mobility within the Active TAG Hydrothermal Mound. In: Herzig, P.M., Humphris, S.E., Miller, D.J. and Zierenberg, R.A., (Eds.), *Proceedings of the Ocean Drilling Program*, Ocean Drilling Program, 143-159. <https://doi.org/10.2973/odp.proc.sr.158.213.1998>
- [19] 陶春辉, 李怀明, 黄威, 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(Z2): 2413-2423.
- [20] Münch, U., Lalou, C., Halbach, P. and Fujimoto, H. (2001) Relict Hydrothermal Events along the Super-Slow Southwest Indian Spreading Ridge near 63°56'E—Mineralogy, Chemistry and Chronology of Sulfide Samples. *Chemical Geology*, **177**, 341-349. [https://doi.org/10.1016/s0009-2541\(00\)00418-6](https://doi.org/10.1016/s0009-2541(00)00418-6)
- [21] Münch, U., Blum, N. and Halbach, P. (1999) Mineralogical and Geochemical Features of Sulfide Chimneys from the MESO Zone, Central Indian Ridge. *Chemical Geology*, **155**, 29-44. [https://doi.org/10.1016/s0009-2541\(98\)00139-9](https://doi.org/10.1016/s0009-2541(98)00139-9)
- [22] Marchig, V., Blum, N. and Roonwal, G. (1997) Massive Sulfide Chimneys from the East Pacific Rise at 7°24'S and 16°43'S. *Marine Georesources & Geotechnology*, **15**, 49-66. <https://doi.org/10.1080/10641199709379934>
- [23] Bogdanov, Y., Gurich, E., Kuptsov, V., *et al.* (1995) Relict Sulfide Mounds at the TAG Hydrothermal Field of the Mid-Atlantic Ridge (26°N, 45°W). *Oceanology*, **34**, 534-542.
- [24] Halbach, P., Pracejus, B. and Maerten, A. (1993) Geology and Mineralogy of Massive Sulfide Ores from the Central Okinawa Trough, Japan. *Economic Geology*, **88**, 2210-2225. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.88.8.2210>
- [25] 曾志刚, 蒋富清, 秦蕴珊, 等. 冲绳海槽中部 Jade 热液活动区中块状硫化物的稀土元素地球化学特征[J]. 地质学报, 2001, 75(2): 244-249.