

# 西南印度洋中脊热液区特征闪锌矿硫化物的 EPMA 分析

EPMA-030

**摘要：**对海底热液金属硫化物的研究具有科学和经济上的双重意义。以往的研究主要集中于快速及慢速扩张洋脊的热液活动区，我国首次在西南印度洋超慢速扩张中脊观察到正在活动的热液异常点并成功取样。针对此处试样的分析显示：热液区硫化物矿物主要由闪锌矿、黄铁矿为代表的复杂 Zn 系列和 Fe 系列硫化物构成，包括一些黄铜矿（Cu-Fe-S 系列）包裹体，且同一矿物颗粒不同位置成分差异较大；在闪锌矿中发现了 Fe 的异常分布带，显示了硫化物矿物的非平衡成矿过程；在闪锌矿的寄主矿物中也发现了微量的包体银金矿物。

**关键词：**超慢速扩张中脊 热液活动 金属硫化物 闪锌矿 EPMA XRD

1978 年，在东太平洋发现了正在活动的高温热泉、正在喷发的黑烟囱和海底热液喷口生物群落，掀起了研究海底热液的热潮。

现代海底热液活动一般发生在板块活动的边界，它是岩石圈与海水之间物质和能量交换的过程，是板块构造活动的重要表现之一。随着一系列海底热液喷口系统不断发现以及相关研究的逐步深入，诞生了海底热液系统的地质学、地球化学以及生物学过程及其彼此之间相互联系的前沿交叉学科。为了对地球上最大地质体的洋壳进行协同研究，增强对洋壳组成、演化及其与海洋、生物圈、气候、人类社会之间相互作用的认识，2011 年成立了该领域唯一的科学组织——国际大洋中脊协会（InterRidge）。据该组织统计，目前全球洋底已发现热液场和热液异常点共 588 处，其中赋存金属硫化物的热液场有 349 处。

从全球范围来看，因受条件限制，目前有关现代

海底热液硫化物成矿作用的研究大多数都集中在慢速、中速和快速扩张洋脊及西太平洋的弧后盆地等热液活动区，有关超慢速扩张洋脊热液区硫化物成矿作用的研究相对较少。

2005 年我国“大洋一号”科学考察船在西南印度洋超慢速扩张脊 49.6° E 附近首次发现了热液活动异常，并于 2007 年确定了该热液区的位置并顺利取得硫化物样品，使得该区成为全球超慢速扩张脊中发现的第一个正在活动的热液区。

海底热液多金属硫化物矿藏丰富，成为继大洋铁锰结核、富钴结壳之后一种新的海底多金属矿产资源，富含 Cu, Fe, Zn, Mn, Pb 以及 Ag, Au, Co, Mo 等金属元素和稀有金属元素，具有易于冶炼和资源量巨大的优点，被认为重要的潜在矿产资源之一。对海底热液硫化物的研究有着重要的科学意义和经济价值。

## 实验部分

### 1.1 仪器

岛津电子探针 EPMA-1720 电子探针显微分析仪

### 1.2 分析条件

加速电压：20 kV

束流：定量测试 20nA、面分析 100nA

束斑直径：定量测试 1 $\mu$ m、面分析 MIN

测试时间：定量测试 10s、面分析 30ms/point



## 样品处理

海底采样烘干，环氧树脂冷固化后切片，制成地质光薄片，机械磨制和抛光。电子探针测试前，表面喷镀碳膜约 20nm 以增加导电性。

## ■ 热液活动点分布及 SWIR 区特征

海底热液系统广泛存在于大洋中脊、弧后盆地等张性构造环境和火山活动区。不同扩张速率的大洋中脊构造环境中深部岩浆活动强度、两侧海底断裂、裂隙的发育程度与分布以及海底沉积物覆盖情况等均存在差异，造成其上形成的热液多金属硫化物具有明显不同的矿体规模、类型和分布特征。

快速扩张洋中脊环境产生的热液矿点主要位于南太平；中速扩张洋中脊环境下的热液矿点主要位于东北太平洋；慢速扩张洋中脊环境下的热液矿点在大西洋、太平洋、印度洋中均有分布；而相对研究较少的超慢速扩张洋中脊环境中发现的热液矿点主要位于较为偏僻的西南印度洋中脊。

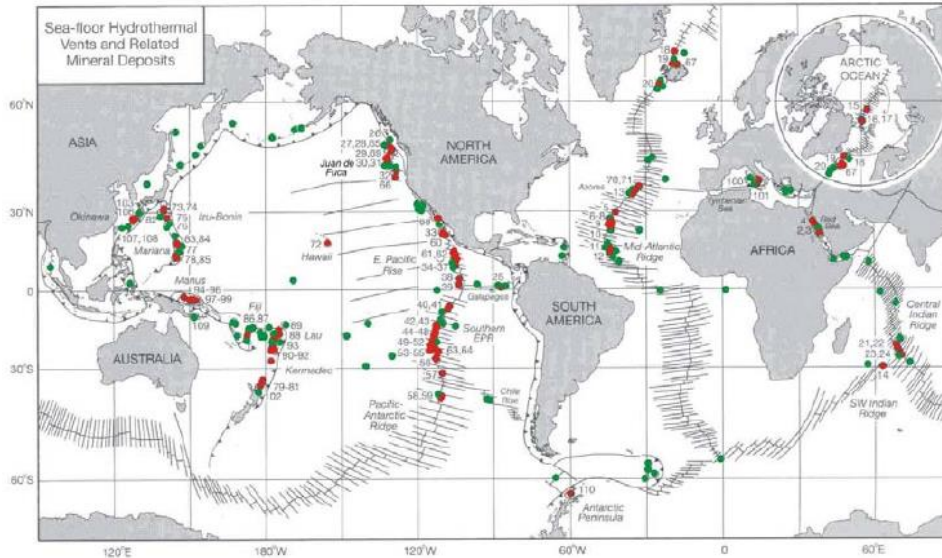


图 1 全球热液活动区及矿床分布，红色点代表高温多金属热液点，绿色点代表低温热液及 Fe-Mn 多金属沉积物点（图片来源于文献）

本例中测试试样采自西南印度洋中脊（SWIR）热液区。以往预测超慢速扩张脊出现热液活动的频率极小或接近于零，随着大洋科考，在西南印度洋典型超慢速扩张脊几百公里范围内，相继发现了六处热液活动异常和两处已熄灭的热液活动区，证明了超慢速扩张脊环境中，也同样可形成热液活动，并产生多金属硫化物成矿。我国在西南印度洋超慢速扩张脊 49.6° E 附近首次发现了正在活动的热液热液硫化物喷口并成功取得热液硫化物样品。



图 2 超慢速扩张西南印度洋脊位置特征（图片来源于文献）

## ■ 测试结果及讨论

现代海底热液硫化物是热液流体与冷海水混合结晶而形成的富含多种金属的矿物堆积体。堆积体中的矿物组合、矿物化学特征以及结构构造记载了流体迁移、演化以及沉淀的过程，是成矿物理化学过程的直接反映，是研究海底热液成矿作用过程的基础和前提。

采样的硫化物经破碎研磨后进行 XRD 衍射图谱分析，展谱见图 3。物相分析结果表明，该热液硫化物样品中含有黄铁矿 (FeS<sub>2</sub>)、闪锌矿 (ZnS)、铅矾 (Pb(SO<sub>4</sub>)) 和水锌矾 (Zn(SO<sub>4</sub>)(H<sub>2</sub>O)) 等矿相。

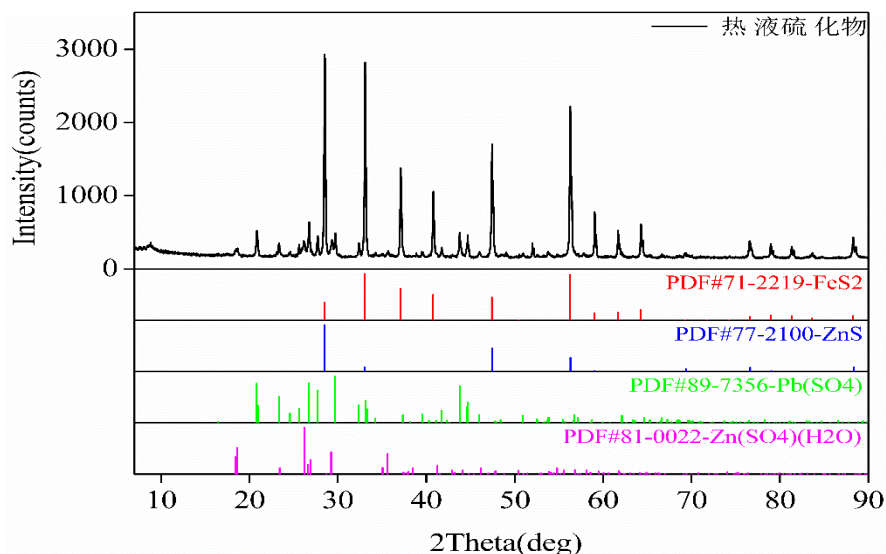


图 3 热液硫化物 XRD 物相定性分析结果

对同一热液活动取样点的 T1-2 试样上不同的硫化物进行电子探针定量分析，其背散射图像及测试点如图 4 所示，定量结果见表 1 和表 2。

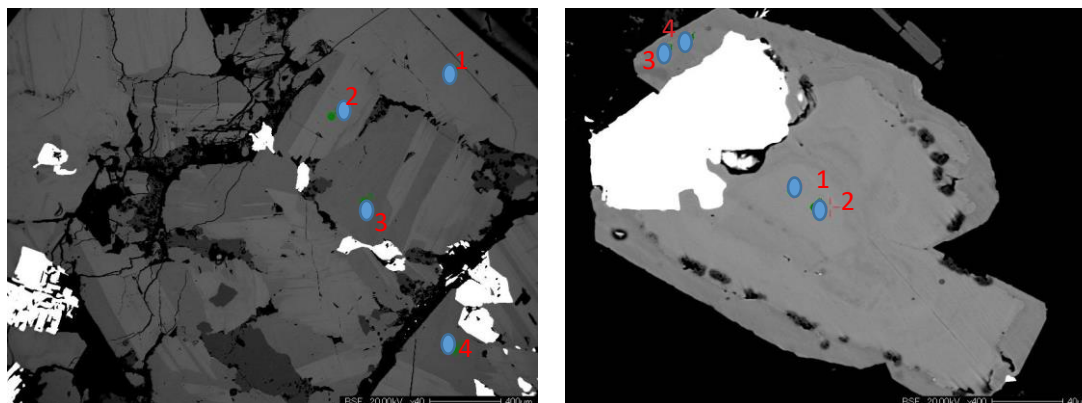


图 4 热液闪锌矿中成分不均匀分布，a.T1-2-1 (左图)，b.T1-2-2 (右图)

表 1T1-2-1 热液闪锌矿定量测试结果 (Wt%)

Data	Se La	S Ka	Fe Ka	As La	Sb La	Cu Ka	Ag La	Co Ka	Au Ma	Zn Ka	Cd La	Pb Ma	Sn La	Mo La	Total
1	0.00	33.73	9.40	0.16	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	53.14	0.11	0.05	0.00	0.36	96.94
2	0.01	33.51	9.86	0.06	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	52.60	0.11	0.06	0.05	0.33	96.63
3	0.00	33.63	10.35	0.16	0.01	0.14	0.01	0.00	0.00	51.92	0.08	0.00	0.10	0.31	96.69
4	0.00	33.10	9.69	0.08	0.00	0.11	0.00	0.01	0.00	52.56	0.12	0.03	0.10	0.32	96.12

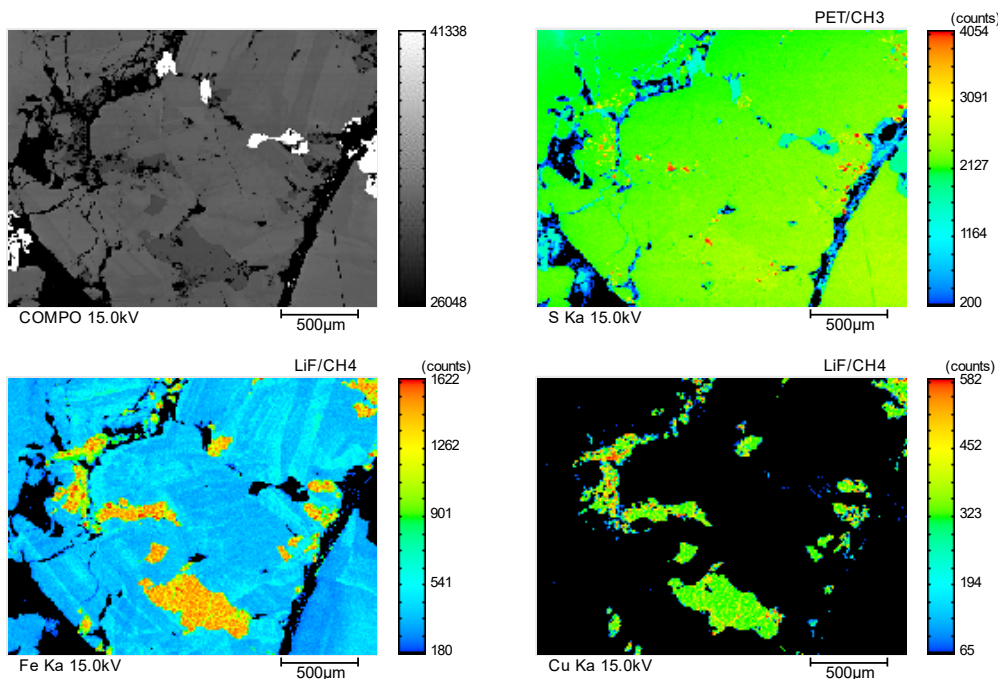
表 2T1-2-2 热液闪锌矿定量测试结果 (Wt%)

Data	Se La	S Ka	Fe Ka	As La	Sb La	Cu Ka	Ag La	Co Ka	Au Ma	Zn Ka	Cd La	Pb Ma	Sn La	Mo La	Total
1	0.02	33.65	7.16	0.04	0.00	0.18	0.02	0.01	0.00	57.47	0.08	0.00	0.00	0.31	98.94
2	0.00	33.82	6.94	0.10	0.00	0.17	0.02	0.03	0.00	58.16	0.10	0.00	0.00	0.33	99.67
3	0.01	33.94	17.12	0.21	0.00	0.17	0.01	0.01	0.00	42.48	0.04	0.01	0.00	0.32	94.31
4	0.00	34.43	16.96	0.21	0.00	0.15	0.02	0.00	0.00	42.62	0.02	0.04	0.03	0.28	94.76

由矿物组成可以看出，西南印度洋脊 49.6° E 热液区硫化物矿物主要由以黄铁矿为代表的 Fe 系列硫化物和以闪锌矿为代表的 Zn 系列硫化物组成，且不同热液硫化物块体中，黄铁矿和闪锌矿含量差别较大。图 4.b 也显示闪锌矿存在含 Fe 高值带，指示成矿流体非平衡成矿过程。

针对图 4.a 硫化物矿物进行元素的面分析，结果见图 5，背散射图像显示表面常见的溶蚀形成的孔洞和裂缝。从 Fe 的分布图可以看出，Cu-Fe-S 系列硫化物包裹于闪锌矿中。Cu-Fe-S 系列硫化物是现代海底热液流体沉淀结晶的重要组成部分，该系列矿物对流体物理化学的变化具有十分敏感的反应，记录了流体成矿过程演化的重要信息。

Ag-Au 分布显示有较低含量的包体银金矿物。图 6 对这些微量 Ag-Au 元素进行了确认。银金矿包体包裹于其他寄主矿物，寄主矿物主要是闪锌矿和黄铁矿，此处为闪锌矿。包体银金矿经溶蚀作用后容易被暴露于闪锌矿晶体边界。



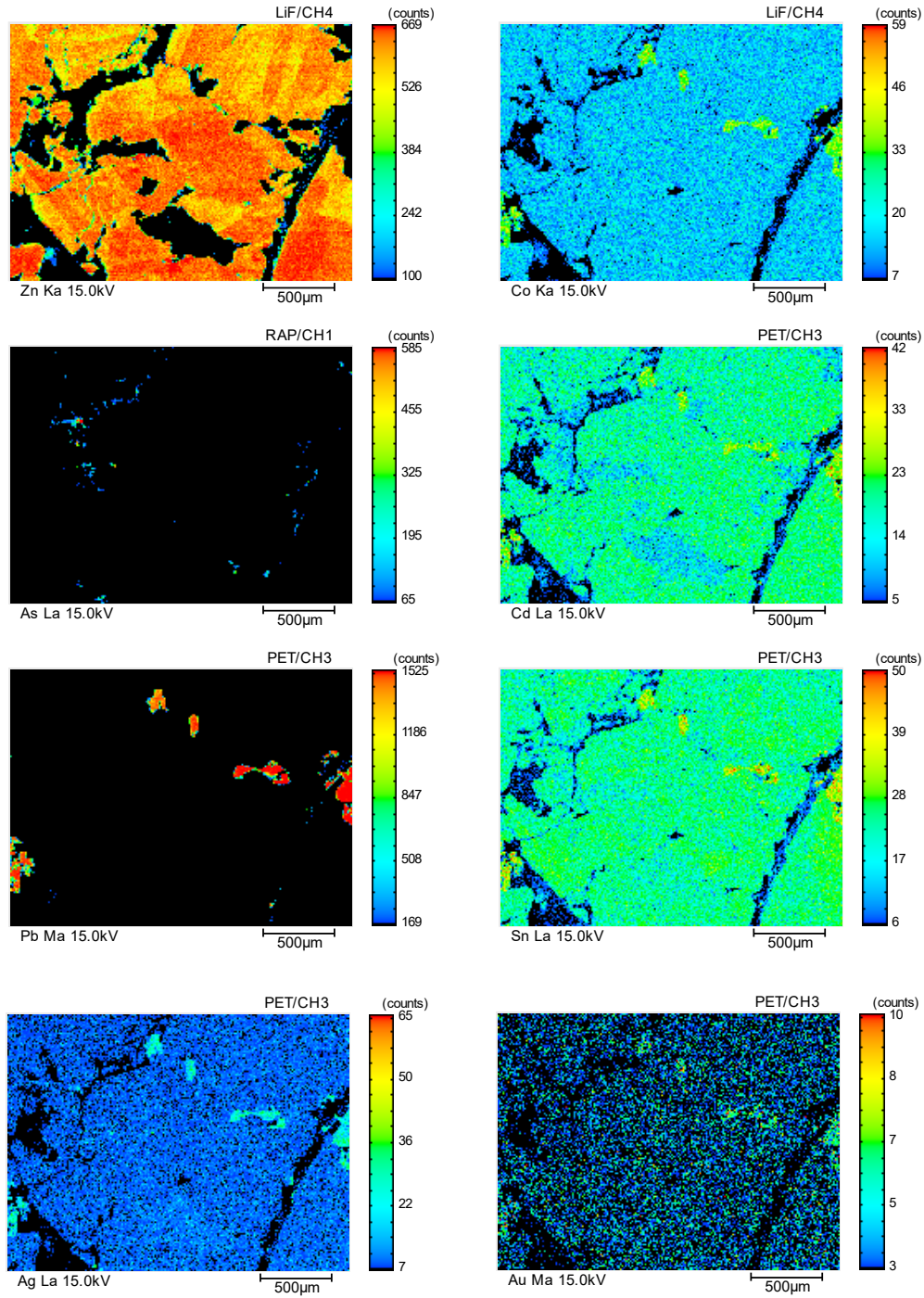


图 5T1-2-1 热液硫化物矿物的元素面分布特征

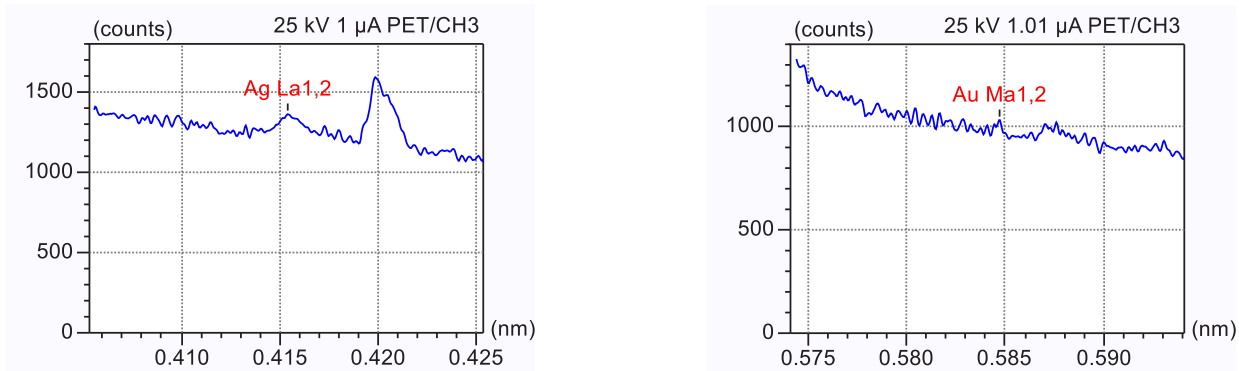


图 6 银金矿的元素确认

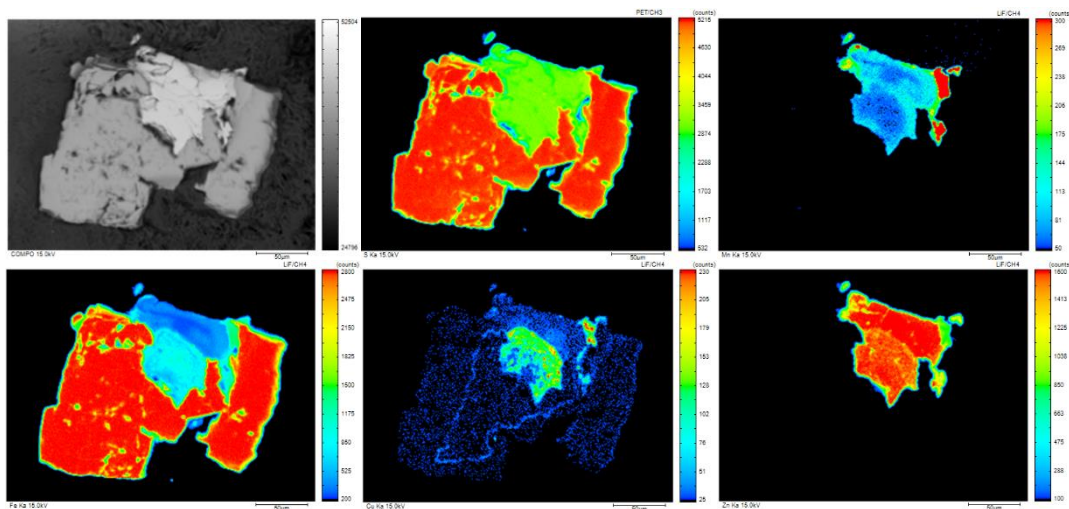


图 7 T1-2-3 热液金属硫化物

图 7 中的金属硫化物主要由黄铁矿和闪锌矿构成，即使在闪锌矿中也有分布不均匀的 Mn, Fe 等元素，这与图 5 中的 Fe 元素分布，以及图 4 中的背散射图像及对应的微区定量成分都能相互应合的。

## ■ 结论

西南印度洋为典型的超慢速扩张中脊，此类区域也能发现正在活动的热液喷口。在 49.6° E 热液活动区取样分析显示，其金属硫化物主要由锌系列硫化物，以闪锌矿为代表，包括闪锌矿 - 黄铁矿 - 黄铜矿，以及由黄铁矿为代表的铁系列硫化物。对闪锌矿的 EPMA 的微区定量分析及元素面分析显示，即使是比较小的同一颗粒闪锌矿，其不同位置元素含量差异也较大，在一些闪锌矿颗粒发现了溶蚀孔洞及裂纹，以及异常的铁元素的同质增生边结构。同时也发现了包裹于闪锌矿中的微量银金矿包体。

### 参考资料：

- 1、张锋. 现代海底热液硫化物矿床构造环境综述 [J]. 西部探矿工程, 2013
- 2、马乐天. 国际大洋中脊第三个十年科学计划介绍 (2014-2023)[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2015
- 3、李小虎, 初凤友, 雷吉江等. 慢速 - 超慢速扩张西南印度洋中脊研究进展 [J]. 地球科学进展, 2008
- 4、曹红, 曹志敏. 西南印度洋中脊海底热液活动 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2011
- 5、李三忠, 索艳慧, 余珊等. 西南印度洋构造地貌与构造过程 [J]. 大地构造与成矿学, 2015

- 6、曹红, 孙治雷, 刘昌岭等. 现代海底热液硫化物的成矿序列和指示意义——以印度洋中脊为例 [J]. 应用海洋学报, 2018
- 7、叶俊, 石学法, 杨耀民等. 西南印度洋超慢速扩张脊 49.6° E 热液区硫化物矿物学特征及其意义 [J]. 矿物学报, 2011
- 8、叶俊. 西南印度洋超慢速扩张脊 49.6° E 热液区多金属硫化物成矿作用研究 [D]. 中国科学院研究生院, 2010
- 9、叶俊, 石学法, 杨耀民等. 西南印度洋超慢速扩张脊 49.6° E 热液区矿物组合及成矿阶段划分 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2009