

川西呷村超大黑矿型矿床成矿流体稀土元素组成*

别风雷¹ 侯增谦¹ 李胜荣² 苏文超³ 徐九华⁴

1. 中国地质科学院, 北京 100037; 2. 中国地质大学, 北京 100083;
3. 中国科学院地化所, 贵阳 550002; 4. 北京科技大学, 北京 100083

1. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;

2. China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

3. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China;

4. Beijing University of Science and Technology, Beijing 100083, China.

2000-07-03 收稿, 2000-09-30 改回.

Bie Fenglei, Hou Zengqian, Li Shengrong, Su Wenchao and Xu Jiuhua. 2000. Composition characteristics of rare earth elements in metallogenetic fluid of the Gacun superlarge "Kuroko"-type deposit. *Acta Petrologica Sinica*, 16(4):575~580

Abstract REE in fluid inclusions of the Gacun VMS deposit are first measured by ICP-MS. Chondrite-normalized REE patterns in fluid inclusions of main mineralization stage show patterns with light REE enrichment and a huge positive Eu anomaly. Similar profiles have been found in some hydrothermal solutions from submarine system (East Pacific rise and Mid-Atlantic ridge) and from crust, which indicate that the fluid share common geochemical characteristics. But REE content in Gacun ore-forming fluids is higher than others, and their Eu anomaly is also different. It is extremely likely that the Eu is divalent in the main ore-forming fluids of Gacun and in other solutions with high-temperature, acidic, lower oxygen fugacity. Temperature, oxygen fugacity, pH value mainly constrain on the Eu huge anomaly and REE patterns in high-temperature acidic solutions, while the pressure of water-rock interaction zone and rock type may be the possible controlling factors.

Key words "Kuroko"-type deposit, Fluid inclusion, Rare earth element, ICP-MS, Gacun Sichuan

摘要 本文用 ICP-MS 首次测定了呷村银多金属黑矿型矿床矿石流体包裹体中的稀土元素含量。研究表明, 主成矿期流体稀土元素配分模式均为轻稀土富集, Eu 具明显正异常。通过初步对比, 本区主成矿期流体与东太平洋脊、大西洋脊等现代高温酸性地热系统热液具有相似的稀土模式, 反映了它们物化条件的相似性; 但前者 ΣREE 高于后者, 且两者 Eu/Eu^* 值不同。经过分析, 本区成矿流体 Eu 正异常主要为 T 、 pH 、 f_{O_2} 控制, 另外, 围岩性质和水-岩主反应带压力也可能影响了 REE 含量及 Eu 异常的不同。至于 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{cn}} > 1$, 可能是由于矿物或微粒表面的吸附作用所致。

关键词 VMS 矿床; 流体包裹体; 稀土元素; ICP-MS; 川西呷村

中图法分类号 P611; P618.4

1 引言

岩石圈中流体及水/岩反应是当今地球科学重要前沿领域之一, 通过对成矿过程中稀土元素的研究, 可以对成矿流体的来源及物理化学性质提供信息, 并对勘查提供指导意义。

自 80 年代开始, Michard *et al.* (1983, 1986, 1989) 测

定了现代地热系统, 尤其是扩张洋脊地热系统热液中稀土元素的含量, 取得了丰富的第一手资料。目前对古海洋扩张中心的喷流热液中的稀土元素研究只是通过矿石稀土元素地球化学 (Lottermoser, 1989; 韩发等, 1996) 间接地判别成矿流体 REE 的性质, 对流体包裹体中的稀土元素的直接测定开展较少。但包裹体中的流体作为原始成矿流体被保存下来, 它能最真实、最直接地提供原始成矿时的信息, 反映成矿时的物理化学条件。作为成矿流体的直接证据, 直接测定

* 本研究得到国家攀登预选项目(95-预-39)及国家自然科学基金项目(49873013)资助。

第一作者简介: 别风雷, 男, 1970 年生, 博士, 矿物学岩石学矿床学专业, E-mail: flbie@sina.com

其 REE 具有重要意义。研究流体包裹体中稀土元素的先驱为 Norman *et al.* (1989), 随后 Eaton *et al.* (1992)、Ghazi *et al.* (1993) 和 Banks *et al.* (1994) 及王丽娟 (1998) 通过压碎-淋滤包裹体的方法, 苏文超等 (1998) 运用高温爆裂 (>500 C)-淋滤包裹体的方法, 成功地用电感耦合等离子体质谱 (ICP-MS) 对包裹体中稀土元素进行了测试。ICP-MS 具有灵敏度高、检出限低、质谱图简单的特点, 目前是分析稀土最灵敏的方法之一, 但目前应用于流体包裹体的分析仍处于探索阶段。

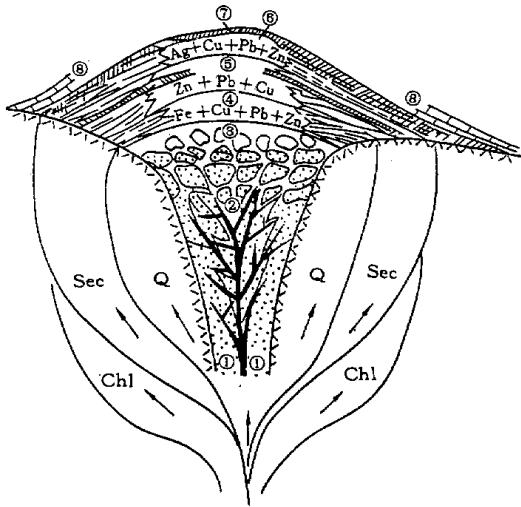


图 1 呷村矿床金属分带与蚀变分带示意图 (引自侯增谦, 1991 年)

①网脉状铅锌矿, 中心为黄铁矿; ②网脉状铜铅锌矿; ③角砾状或碎屑状矿石; ④块状黄铁矿和铜铅锌矿; ⑤块状铅锌矿; ⑥块状银铅锌矿; ⑦重晶石岩层; ⑧顶板为灰岩、白云岩、硅质岩等; Chl-绿泥石-绢云母化带, Sec-绢云母化-硅化带, Q-硅化带; 蚀变原岩为流纹质火山岩, 箭头代表流体运动方向

Fig. 1 Sketch diagram showing alteration and metallic zoning of Gacun deposit. (after Hou Zengqian, 1991)

本文研究通过高温爆裂 (>500 C)-淋滤流体包裹体的方法, 用 ICP-MS 首次对呷村矿床网脉状矿石中石英包裹体中稀土元素的含量进行了测定, 获得了成矿流体稀土元素特征的直接证据, 初步探讨了本区流体性质对 REE 行为的影响, 为系统开展古代海底扩张中心地热系统 REE 地球化学研究奠定了基础。

2 呷村矿床地质概况

呷村矿床为一古海底黑矿型矿床, 其位于我国特提斯—喜马拉雅构造域东缘的三叠纪义敦古岛弧系德格-乡城

主弧带中的弧间裂谷带内, 成矿作用发生于岛弧裂谷作用阶段, 受深水断陷盆地和双峰式火山岩 (拉斑玄武岩-流纹岩)-沉积岩系控制。矿床主体产于厚约 1km 的流纹岩系上部和顶部, 其上分布了喷气岩和喷气沉积岩并被白云质灰岩和板岩整合覆盖 (图 1)。矿床具典型的黑矿“双层结构”特征, 由上部层状块状矿和伏于其下的脉状-网脉状矿组成 (图 1), 前者呈层状或长透镜状产出, 代表热液流体在海底排泄和淀积产物, 后者产于蚀变岩筒中, 代表热液流体在海底喷射通道的卸载产物。网脉状矿-块状矿处于统一热液体系中。矿化元素主要为 Zn、Pb、Cu、Ag、Hg、Au 等, 其中 $Zn > Pb > Cu$, 属 Zn-Pb-Gu 型。块状矿体下盘含矿酸性火山岩系发生强烈蚀变, 围绕网脉状矿化带形成蚀变岩筒及相应的蚀变分带 (图 1)。

前人对呷村矿床成矿流体进行了大量研究 (侯增谦, 1991, 1995; 徐明基等, 1993), 对网脉状矿而言, 主矿化期流体均一温度为 250~350 C, pH 值 3.5~5.3, 氧逸度 $10^{-38} \sim 10^{-30}$, 形成网脉状矿的主成矿期流体为 Na-K-Cl 为主的流体。成矿晚期碳酸盐-硅化阶段, 流体温度降至 100~185 C 左右, pH 值增高, 呈中酸-偏碱性特征, 达到 7 左右, 氧逸度亦略增大。

3 流体包裹体 REE 测定及组成特征

3.1 样品特征

样品 07-18、07-9 和 4160-5 取自网脉状矿带主成矿阶段细脉网脉状矿石, 4160-18 为成矿晚期碳酸盐-石英脉样品, 其中出现白云石, 呈团块状与石英共生。经显微镜下观测, 各石英样品中原生流体包裹体均大于 95%。

将样品粉碎至 60 目, 在镜下仔细挑纯石英单矿物 2.5g (纯度 >99%)。测试所用设备为 Finnigan MAT 公司的 ELEMENT 型高分辨等离子质谱仪, 分辨率为 300、3000 和 75000 档。具体实验方法及参数设置详见苏文超等 (1998)。

3.2 流体包裹体 REE 组成特征

表 1 列出了流体包裹体中真实 REE 浓度值。所有样品 $(La/Yb)_{en}$ 和 Eu/Eu^* 均大于 1。出现碳酸盐的 4160-18 样品 REE 含量显著较其它样品高。除 4160-18 外, 其余样品轻稀土分馏程度明显强于重稀土 ($(La/Sm)_{en} > (Gd/Yb)_{en}$)。

流体中稀土元素球粒陨石标准化配分模式 (图 2) 显示 LREE 相对富集, 具明显 Eu 值正异常。4160-18 样品中 REE 的高含量, 表明成矿晚期含 CO_2 流体中 HCO_3^- , CO_3^{2-} 浓度增高, 可能对 REE 的络合富集增强 (王中刚等, 1989; 苏文超等, 1998), 致使 REE 含量增高, 并且白云石沉淀时, 可能 Eu^{2+} 替代 Ca^{2+} 进入白云石而流体 Eu^{2+} 含量降低, 也可能 Eu^{3+}/Eu^{2+} 原有平衡被破坏 (见后述讨论) 致使 Eu/Eu^* 低于其它样品。故碳酸盐的淀出, 可能是引起 4160-18 与其它样品不同特征的原因。

表 1 石英中流体包裹体稀土元素含量及组成特征($\times 10^{-6}$)
Table 1 REE composition ($\times 10^{-6}$) of fluid inclusions in quartz

采样点 样号	7 号勘探线		4160 平洞坑口	
	07-18	07-9	4160-5	4160-18
La	7.46	3.16	1.39	23.54
Ce	7.61	4.29	1.74	48.43
Pr	0.79	0.36	0.17	6.07
Nd	2.67	1.22	0.61	28.9
Sm	0.93	0.24	0.1	11.35
Eu	3.62	1.0	0.06	5.42
Gd	0.96	0.17	0.01	9.22
Tb	0.22	0.04	0.06	1.2
Dy	1.49	0.3	0.01	6.29
Ho	0.31	0.006	0.01	1.13
Er	1.02	0.21	0.04	3.18
Tm	0.19	0.03	0.004	0.47
Yb	1.41	0.25	0.03	3.22
Lu	0.23	0.04	0.008	0.52
LREE/HREE	1.7	3.6	3.8	1.62
Σ REE	28.91	11.37	4.932	148.94
(La/Yb) _{en}	3.57	8.52	31.24	4.98
(La/Sm) _{en}	5.05	8.28	8.74	1.304
(Gd/Yb) _{en}	0.55	0.55	1.61	2.31
Eu/Eu*	11.71	15.14	27.63	1.62

07-18、07-9、4160-5 网脉状矿第Ⅲ阶段石英；4160-18 第Ⅳ阶段晚期碳酸盐-石英脉中石英。测试所用设备为 Finnigan MAT 公司 ELEMENT 型高分辨等离子质谱仪，由中国科学院贵阳地化所苏文超测定。

表 2 呷村与现代地热区对比

Table 2 The contrast of Gacun and modern geothermal field

地热区	T(°C)	pH	P(MPa)	Eu/Eu*	(Ce/Yb) _{en}	地质环境
呷村	280~320	3.5~5.3	30	11.7~27.6	3.3~12	古岛弧裂谷
MAR23°N ^{1,2}	330~350	3.4~5.3	60~70	12.7~13.7	13~14	大西洋中脊慢速扩张中心
EPR21°N ^{2,3,4}	350	3.3~3.8	40~45	4.16~7.67	5~12	太平洋中脊快速扩张中心
EPR13°N ^{4,5,6}	>320~350	<4.8	60~100	6.63~9.85	10~20	太平洋中脊快速扩张中心
劳厄海盆 ⁷	285~334	2	35~40			弧后盆地扩张区
Salton ¹	351	5.7		39.23	19	大陆地热区
Phegrean ¹	236~247	5.66		137.59	15	大陆地热区

数据来源：1 A. Michard, 1989; 2 A. Michard *et al.*, 1986; 3 Von Damm *et al.*, 1985; 4 Bowers *et al.*, 1988; 5 A. Michard *et al.*, 1983; 6 G. Michard *et al.*, 1984; 7 Fouquet, 1993

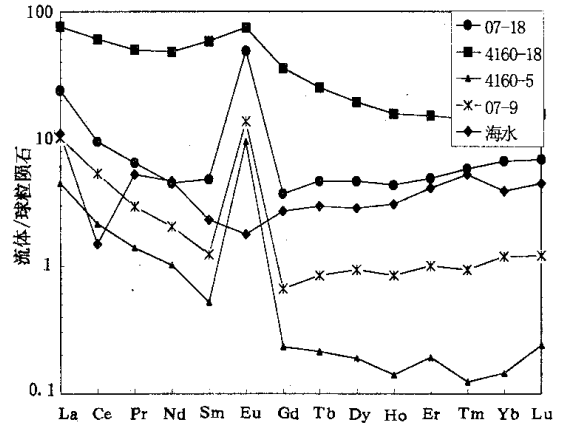


图 2 呷村矿床网脉状矿石石英流体包裹体中 REE 配分模式(海水数据引自 Høgdahl *et al.*, 1968)

Fig. 2 Chondrite normalized REE patterns of ore-forming fluids in stockwork ore

由表 1 和图 2 可见本区流体包裹体中稀土特征如下：

- (1) 轻稀土元素较富集。
- (2) Eu 均为正异常。
- (3) 呷村矿床成矿流体稀土元素总量均高于其它较高温地热系统(图 2、3, 两图纵坐标数量级不同), 其中碳酸盐化样品的稀土元素总量明显高于其它样品。

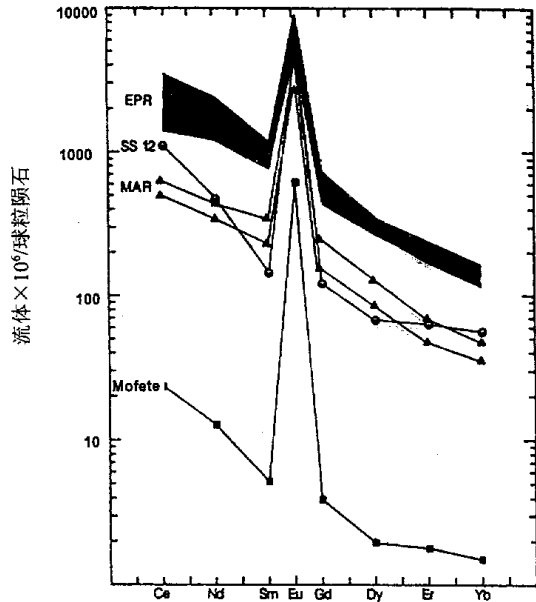


图3 现代中高温酸性($t > 230^{\circ}\text{C}$, $\text{pH} < 6$)地热系统热液REE 稀土配分模式(据 A. Michard, 1989)

EPR-东太平洋洋中脊海隆; MAR-大西洋洋中脊; SS-美国 Salton 湖; Mofete-意大利 Phegrean 区

Fig. 3 Chondrite normalized REE patterns of mid-high temperature acidic water ($\text{pH} < 6$, $t > 230^{\circ}\text{C}$) EPR(shaded field)-East Pacific Rise, MAR-Mid-Atlantic Ridge, SS-Salton Sea(California), Mofete-Phlegrean field(Italy)

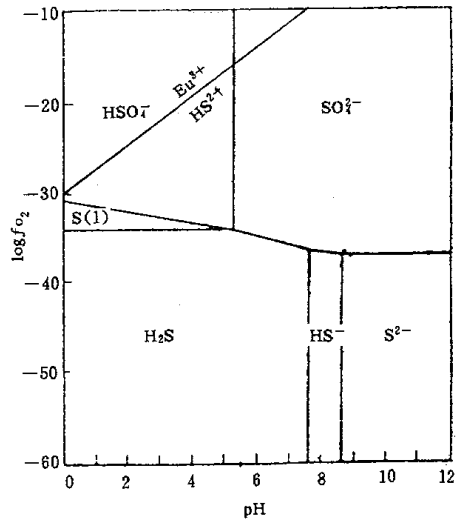


图4 250°C $\text{Eu}^{3+}/\text{Eu}^{2+}$ 氧化还原平衡位与溶解硫类型优势场关系

($1 \times 10^5 \text{Pa}$, $\Sigma\text{S} = 0.1$, $\text{Eu}^{3+}/\text{Eu}^{2+}$ 平衡线根据 Sverjensky, 1984; 溶解硫类型优势场底图根据 Barnes, 1979)

Fig. 4 The relationship between $\text{Eu}^{3+}/\text{Eu}^{2+}$ redox equilibrium and the stabilities of aqueous, sulfur-containing species at 250°C ($1 \times 10^5 \text{Pa}$, $\Sigma\text{S} = 0.1$)

(based on Sverjensky, 1984, and Barnes, 1979)

4 讨论

4.1 与现代地热系统对比

本区流体中稀土模式与现代快速扩张太平洋脊(EPR13°N, EPR21°N)、慢速扩张大西洋脊(MAR)、弧后扩张中心劳厄盆地及其它高温地热系统相比,有明显异同点(图2、3,表2):

(1) 相同点:

(a) 前者与后者具有相似的配分模式(图2、3):它们均为富LREE,明显的Eu正异常。

(b) 虽然这些热液产自不同地质环境,但它们却具有较高温($> 250^{\circ}\text{C}$)、富Cl、低pH值(< 5),低氧逸度的共同特点(Von Damm *et al.*, 1985; Campell *et al.*, 1988; Michard, 1989; Fouquet *et al.*, 1993)。

(2) 不同点:

(a) ΣREE 含量不同:处于岛弧裂谷环境的呷村矿床成矿流体 ΣREE 明显高于其它较高温地热系统(图2、3)。

(b) 位于古岛弧裂谷的呷村地热系统 Eu/Eu^* 值高于洋中脊,而低于 Salton 湖和 Phegrean 大陆地热区。

(c) 不同构造背景,初始热液流体的水-岩主反应带压力不同,呷村主反应带低于其它。

4.2 控制 Eu 异常的可能因素

本文所测样品及表2所示现代较高温酸性地热系统热液均为明显Eu正异常。根据本区的流体性质(前述)、洋中脊及其它较高温地热系统环境(A. Michard, 1989),本文认为:呷村及现代高温酸性地热系统热流体中Eu以 Eu^{2+} 形式出现, Eu 异常的产生主要取决于 $\text{Eu}^{2+} - \text{Eu}^{3+}$ 平衡,主要由温度、氧逸度、pH 值控制,而压力的影响则相对较小。

(1) 根据 M. Bau(1991)和 Sverjensky(1984)研究: 随温度升高和 pH 的增加, Eu^{2+} 存在环境的氧逸度升高, 即 $\text{Eu}^{3+}/\text{Eu}^{2+}$ 氧化还原平衡线向氧逸度升高方向移动; 但随压力的增加, $\text{Eu}^{3+}/\text{Eu}^{2+}$ 氧化还原平衡降低不显著。 Eu^{2+} 及 Eu^{3+} 的络合作用对 $\text{Eu}^{3+}/\text{Eu}^{2+}$ 平衡虽然重要, 但在现代洋脊及本区主成矿阶段相应的物化条件下, 影响不显著。

(2) 岬村主成矿阶段网脉状矿矿石主要由黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿、方铅矿等硫化物组成, 在 250 C, 结合本区的流体性质, 溶解硫类型的优势场为 -2 价硫(图 4), Eu^{2+} 将是主要存在形式。高一些的温度和压力条件下也将出现相似的情况(Barnes, 1979; Sverjensky, 1984)。在洋脊地热系统, 情况类似。因而, 随着温度升高(>250 C), Eu 相对于其他稀土元素可能发生显著分馏, Eu 在溶液中最可能以 Eu^{2+} 及其相关络合物形式出现, 即使有大量络合作用, 三价 Eu 在温度不断升高条件下也不能稳定存在(Sverjenky, 1984)。

当温度降低至 100~185 C 时, 矿石矿物以重晶石为主, pH 值为中酸-碱性时, f_{O_2} 升高, 原有 $\text{Eu}^{3+}/\text{Eu}^{2+}$ 将被破坏, 在此情况下, 络合作用将使 Eu^{3+} 的稳定性趋向更低的 f_{O_2} 值(Michael, 1991; Sverjenky, 1984), 热液中 Eu^{2+} 有氧化为 Eu^{3+} 的倾向, 这也可能是导致碳酸盐硅化期流体(样品 4160-18)与主成矿期流体(其它样品)有所差异的原因之一。

大陆较高温酸性地热系统的 Eu/Eu^* 高于大洋地热系统(表 2), 则可能和围岩的性质有关。至于 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{en}} > 1$, 可能由 Cl^- 、 F^- 等络阴离子和 REE 的络合所致(M. Bau, 1991; Woods, 1990), 但 M. Bau(1991)经过研究 REE 原子特性及理论计算, 指出更可能是由于矿物或微粒表面的吸附作用所致。

5 结论

(1) 岬村主成矿期流体的稀土模式为 LREE 富集, Eu 具明显正异常。

(2) 本区主成矿阶段流体与东太平洋脊, 大西洋中脊等现代高温酸性地热系统热液具有相似的热液物理化学性质, 两者稀土配分模式相似, 但 REE 含量和 Eu/Eu^* 不同。

(3) 本区及现代高温酸性低氧逸度地热系统热流体中 Eu 以 Eu^{2+} 形式出现, 这导致了热流体 Eu 正异常。 Eu/Eu^* 及 REE 模式主要由温度、氧逸度、pH 值控制, 另外, 围岩的性质及热液流体的水-岩主反应带压力也可能影响了 REE 的含量和 Eu/Eu^* 的不同。反之, 根据 Eu 异常的类型也可反推成矿流体性质。

致谢: 中国科学院地球化学所漆亮高级工程师协助完成测试。本文工作中得到了中国地质大学孙岱生教授的悉心指导。

References

- Banks DA, Yardely BWD, Campell AR and Jarvis KE. 1994. REE Composition of an aqueous magmatic fluid: fluid inclusions study from the Capitan pluton, New Mexico, USA. *Chemical Geology*, 113:259~272
- Barnes HL. 1979. *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*. New York, Holt, Rinehart and Winston
- Bowers TS, Campell AC, Measures CI, Spivack AJ, Khadem M and Edmond JM. 1988. Chemical control on the composition of vent fluids at 13°-11°N and 21°N, East Pacific Rise. *Journal of Geophysical Research*, 93(B5):4522~4536
- Campbell AC, Palmer MR, Klinkhammer GP, Bowers TS, Edmond JM, Lawrence JR, Casey JF, Thompson G, Humphris S, Rona P and Karson JA. 1988. Chemistry of hot spring on the Mid-Atlantic Ridge. *Nature*, 335:514~519
- Eaton AN, Hutton RC and Holland JG. 1992. Application of flow injection sample introduction to inductively coupled plasma-mass spectrometry for geochemical analysis. In: Jarvis I and Jarris KE(Eds.), *Plasma Spectrometry in the Earth Sciences*. *Chem. Geol.* 95:63~71
- Ghazi AM, Vanko DA, Roedder E and Seeley RC. 1993. Determination of rare earth elements in fluid inclusions by inductively coupled plasma-mass spectrometry (ICP-MS). *Geochim. Cosmochim. Acta*, 57(18):4513~4516
- Hou Zengqian, Hou Liwei, Ye Qingtong, Liu Fulu, Tang Guoguang. 1995. Tectonic-magmatic evolution of Yidun Island-Arc and volcanogenic massive sulfide deposits in Sanjiang region, S. W. China. Beijing: Seisological Press (in Chinese)
- Hou Zengqian, Wu Shiyong, Tetsuro Urabe. 1996. Silicon and oxygen isotopic composition of cherts from the Gacun Kuroko-type deposit, Sichuan and comparison with silica chimineys from the modern seafloor. *Geological Review*, 42(6):531~539 (in Chinese with English abstract)
- Hou Zengqian. 1991. Chemical and thermal evolution of ore-forming fluids and chemical processes of Gacun Kuroko-type deposit, Sichuan province. *Mineral Deposits*, 10(4):312~323 (in Chinese with English abstract)
- Lottermoser B.G. 1989. Rare earth element study of exhalites within the Willyama Supergroup, Broken Hill Block, Australia. *Mineral Deposita*, 24:92~99
- Michael Bau. 1991. REE mobility during hydrothermal and metamorphic fluid-rock interaction and the significance of the oxidation state of europium. *Chemical Geology*, 93:219~230
- Micharal A and Albaredo F. 1986. The REE content of some hydrothermal fluids. *Chemical Geology*, 55:51~60
- Michard A, Albaredo F, Michard G, Minster JF and Charlou JL. 1983. Rare earth elements and uranium in high-temperature solutions from EPR13°N. *Nature*, 303:795~797

- Michard A. 1989. Rare earth element systematics in hydrothermal fluids. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 53:745~750
- Michard G, Albarede F, Michard A, Minster JF, Charlou JL and Tan N. 1984. Chemistry of solutions the 13°N East Pacific Rise hydrothermal site. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 67:297~307
- Norman DI, Kyle PR and Charles Baron. 1989. Analysis of trace elements including REE in fluid inclusion Liquid. *Econ. Geol.*, 84:162~166
- Su Wenchao, Qi Liang, Hu Rizhong and Zhang Guoping. 1998. ICP-MS analyses of REE in inclusion fluids. *Chinese Science Bulletin*, 43(10):1094~1098 (in Chinese)
- Sverjensky DM. 1984. Europium redox equilibrium in aqueous solutions. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 67:70~78
- Von Damm KL, Edmond JM, Grant B and Measures CI. 1985. Chemistry of submarine hydrothermal solutions at 21°N East Pacific Rise. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 49:2197~2220
- Wang Lijuan. 1998. Analysis and study of composition of fluid inclusion. *Geological Review*, 44(5):496~499 (in Chinese with English abstract)
- Wang Zhonggang. 1989. *Geochemistry of Rare Earth Element*. Beijing: Science Press (in Chinese)
- Woods SA. 1990. The aqueous geochemistry of the rare earth elements and yttrium, 2. Theoretical predictions of speciation in hydrothermal solutions to 350 °C at saturation water vapor pressure. *Chem. Geol.*, 88:99~125
- Xu Mingji, Fu Deming, Yin Yuming, Yin Xianke, Xian Xiangming, Xiao Yi. 1993. Gacun Ag-rich polymetallic deposit in Sichuan Province. Chengdu: Chengdu University of Sciences and Technology Press (in Chinese with English abstract)
- Yves Fouquet, Ulrich von Stackelberg, Jean luc Charlou, Erzinger J, Herzig P M, Muhe R and Wiedicke M. 1993. Metallogenesis in back-arc environments; The Lau basin example. *Econ. Geol.*, 88:2154~2181

附中文参考文献

- 侯增谦. 1991. 川西呷村黑矿型多金属矿床成矿流体化学和热演化历史与成矿过程. *矿床地质*, 10(4):312~323
- 侯增谦, 侯立纬, 叶庆同, 刘福禄, 唐国光. 1995. 三江地区义敦岛弧构造-岩浆演化与火山成因块状硫化物矿床. 北京:地震出版社
- 侯增谦, 吴世迎, Tetsuro Urabe. 1996. 四川呷村黑矿型矿床硅质岩的硅、氧同位素组成及其现代海底硅质烟囱比较研究. *地质论评*, 42(6):531~539
- 苏文超, 漆亮, 胡瑞忠, 张国平. 1998. 流体包裹体中稀土元素的 ICP-MS 分析研究. *科学通报*, 43(10):1094~1098
- 王丽娟. 1998. 流体包裹体成分分析研究. *地质论评*, 44(5):496~499
- 王中刚. 1989. *稀土元素地球化学*. 北京:科学出版社
- 徐明基, 傅德明, 尹裕明, 尹显科, 咸向明, 肖懿. 1993. 四川呷村银多金属矿床. 成都:成都科技大学出版社