

岩浆作用对海底热液系统物质的贡献

张 侠, 翟世奎, 于增慧, 王淑杰, 蔡宗伟

(中国海洋大学 海底科学与探测技术教育部重点实验室, 海洋地球科学学院, 山东 青岛 266100)

摘要: 系统地总结分析了国内外关于岩浆作用对热液系统物质贡献的证据和研究成果。在此基础上, 进一步分析了岩浆作用对热液系统物质贡献的主要形式, 并对近期研究工作的主要方向进行了探索性分析。提出岩浆作用对热液系统物质贡献的形式除了传统的岩-水反应外, 还有岩浆后期热液及挥发性组分直接进入的途径(形式); 对海底热液活动系统的研究工作近期应主要集中在 3 个方面: (1) 利用新近发展的高新技术, 强化矿物及包裹体的原位微区分析, 获取更加精细的矿物形成过程中的原始信息。(2) 非传统稳定同位素的开发应用, 为解决悬而未决的科学问题发展新的技术手段。(3) 进一步发展完善岩浆作用对热液系统物质贡献的理论模型, 更加贴近实际地定量评价岩浆作用对热液系统的物质贡献。上述工作, 无疑对推进海底热液活动研究的进一步深化具有重要意义。

关键词: 海底热液活动; 岩浆作用; 物质贡献; 证据与形式; 近期研究重点

中图分类号: P67 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2018)04-0153-09

DOI: 10.11759/hyqx20170509002

自人类 1977 年在加拉帕戈斯洋脊首次现场观察到海底热液活动以来^[1], 海底热液硫化物由于其独特的成矿环境及巨大的资源储量^[2]引起了科学界的广泛关注。迄今为止, 国内外学者对海底热液系统及其所形成的多金属硫化物已经进行了大量的研究, 对其矿物学特征、微量元素、稀土元素地球化学特征及同位素组成等一系列科学问题进行了有益的探讨^[3-11], 取得了丰硕的成果。热液硫化物成矿作用十分复杂, 其矿物组成、地球化学特征及形成过程受到了诸多地质作用和地球化学过程的影响, 主要包括以下几个方面: (1) 水-岩反应^[12-15]; (2) 热液流体相分离作用^[16-17]; (3) 高温热液流体与下渗海水的混合作用^[18-19]; (4) 岩浆作用对热液系统的物质与能量贡献^[4-5, 20-24]等。以上因素决定了海底热液硫化物成矿物质来源与成矿过程的复杂性。

关于热液硫化物成矿物质来源问题, 仍然存在很大的争议。早期的研究认为高温热液流体淋滤基底岩石并从其中萃取金属元素是热液流体获得成矿物质的主要方式^[12-15], 在有沉积物覆盖的热液活动区, 沉积物也会为热液流体提供部分成矿物质^[25-29]。近年来, 国内外学者通过同位素示踪及岩浆熔体包裹体等的研究, 证明岩浆作用对热液系统不仅只有能量的贡献, 而且有着不可忽视的物质贡献^[20, 30-33], 甚至可能是热液硫化物的主要成矿物质来源。本文

系统地归纳了国内外关于岩浆作用对热液系统物质贡献的研究成果。在此基础上, 进一步分析了岩浆作用对热液系统物质贡献的主要形式, 并对近期研究工作的主要方向进行了探索性分析。

1 岩浆作用对海底热液系统物质贡献的主要证据

1.1 矿物(气液)包裹体证据

矿物(气液)包裹体是硫化物矿物结晶时捕获的热液流体或挥发分物质, 它真实地反映了包裹体被捕获时成矿流体的温度、压力、成分等一系列物理化学性质, 因此也被称为成矿流体样品^[34]。Yu 等^[34]对冲绳海槽热液硫化物包裹体成分进行了分析测试, 发现其气相组分的平均含量与同区岩浆岩包裹体惊人的一致, 二者具有同源性, 岩浆作用可能对热液系统具有挥发分贡献。曾志刚等^[35]对冲绳海槽热液硫化物包裹体 He 同位素进行了分析, 其 $m(^3\text{He})/m(^4\text{He})$ 介

收稿日期: 2017-05-09; 修回日期: 2018-03-17

基金项目: 国家重大基础研究发展规划项目(973)(2013CB429702)

[Foundation: National Key Basic Research Program of China, No. 2013CB429702]

作者简介: 张侠(1991-), 男, 山西榆社人, 硕士研究生, 主要从事海洋地质学研究, E-mail: 15954227127@163.com; 翟世奎(1958-), 通信作者, 男, 教授, 博士生导师, 主要从事海洋地质学研究, E-mail: zhai2000@ouc.edu.cn

于 $6.2\sim 10.1$ Ra (Ra 为大气的 $m(^3\text{He})/m(^4\text{He})$ 之比, 其值为 1.39×10^{-6}), 与洋脊玄武岩比值接近, 表明硫化物中 He 主要来源于下伏岩浆房。Hou 等^[36]对冲绳海槽 Jade 热液活动区硫化物进行研究时, 发现其包裹体 He 同位素组成与地幔 He 同位素组成一致, 硫化物包裹体中的 He 来自于深部地幔, 岩浆作用对热液系统具有 He 同位素贡献。

1.2 岩浆熔体包裹体证据

熔体包裹体是高温高压阶段矿物在岩浆房中结晶时捕获的岩浆物质, 代表了原始岩浆的成分^[37]。Yang 和 Scott^[20]在马努斯海盆安山岩辉石斑晶包裹体中发现了一种多金属沉淀物, 主要由 Cu、Zn、Ni、Fe、S、Cl 等元素组成, 可能为多金属硫化物或氯化物。经过研究认为, 这种多金属沉淀物是岩浆去气作用过程中产生的富金属不混溶流体被辉石捕获后冷却沉淀形成的。据此提出了岩浆作用对热液活动物质贡献的模型: 岩浆在喷发之前通过去气作用^[22, 38-39]产生了不混溶流体, 这种岩浆流体可以携带大量的金属元素和挥发分^[40-42], 通过构造薄弱带进入到热液系统, 从而对热液硫化物产生直接的物质贡献。相对于参与水-岩反应的岩石, 岩浆去气作用产生的流体中金属元素的含量要高得多, 因此即使只有 1% 的富金属岩浆流体(含 Zn: 23 000 $\mu\text{g/g}$, Cu: 72 000 $\mu\text{g/g}$, Fe: 27 000 $\mu\text{g/g}$)^[20]和 99% 淋滤过基岩的海水(Zn: 6 $\mu\text{g/g}$, Cu: 2 $\mu\text{g/g}$, Fe: 80 $\mu\text{g/g}$)^[43]发生混合, 对硫化物矿石都有超过 85% 的金属贡献^[44]。这个结果与 Li 等^[45]通过惰性气体研究得出的结论(热液成矿流体主要来源于岩浆流体)基本一致。Manus 海盆发育了一套完整的从基性向酸性演化的岩石系列, Yang 和 Scott^[21]在该区不同岩石类型的包裹体和气孔壁上都发现了多金属沉淀物, 且随着岩石在玄武岩 \rightarrow 安山岩 \rightarrow 英安岩 \rightarrow 流纹质英安岩 \rightarrow 流纹岩系列岩石的演化中, 多金属沉淀物中金属元素组合也发生了相应的变化: $\text{Ni}+\text{Zn}+\text{Cu}+\text{Fe}\rightarrow\text{Zn}+\text{Cu}+\text{Fe}\rightarrow\text{Cu}+\text{Fe}\rightarrow\text{Zn}+\text{Fe}(\text{+Pb}?)$ 。这种现象表明岩浆在不同结晶演化阶段所产生的岩浆流体或挥发分携带的金属元素也有所不同, 这些成分不同的流体加入到热液系统中就会产生矿物或地球化学性质上不同的硫化物, 据此可以建立热液硫化物与基岩类型之间的联系。Kamenetsky 等^[23-24]在对 Manus 海盆岩石的研究中, 就在矿物包裹体中发现了这种多金属沉淀物的证据。此外, 对 Manus 海盆岩浆岩的元

素分析结果表明, 随着岩浆从基性向酸性演化, 岩石中 Cu 的含量逐渐降低, 而 Zn 的含量在安山岩中达到最高值后再逐渐降低。由于拉斑玄武质岩浆中不含有能够载带大量金属元素的矿物, 岩石中也没有发现明显的硫化物矿物, 因此 Cu 和 Zn 含量降低最有可能的原因是二者在岩浆脱水去气作用(岩浆热液流体及挥发性组分的分离)过程中, 被流体或挥发分载带脱离岩浆进入了热液系统^[23], 从而为岩浆作用对热液系统的物质贡献提供了新的证据。

综上所述, 已有研究给出了岩浆作用对热液系统物质贡献的众多证据。但是, 岩浆作用对热液系统物质贡献的比例有多大? 岩浆作用对热液系统物质贡献的形式和机制? 等重要科学问题还鲜有涉及。

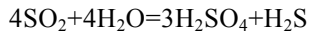
1.3 同位素证据

1.3.1 硫同位素证据

现代海底热液沉积硫化物和硫酸盐矿物中硫同位素组成可以揭示热液中硫的来源, 并能为成矿环境和硫及金属的搬运、富集、沉淀机制提供有用的信息^[46-47]。大洋中脊玄武岩中硫同位素组成具有很小的变化范围, $\delta^{34}\text{S}$ 介于 $0.1\%\pm 0.5\%$ ^[48]。岛弧岩浆岩中由于混入了俯冲海水硫酸盐组分而具有较重的硫同位素组成, $\delta^{34}\text{S}$ 可达 10.3% 左右^[49-50]。弧后盆地岩浆岩中硫同位素组成介于二者之间^[50-51]。根据传统热液循环模式, 水-岩反应是控制海底热液硫化物硫同位素组成的主要因素。因此, 不同构造环境下的热液成因硫化物矿物主要继承了该环境下岩浆岩的硫同位素组成特征^[5], 而热液成因硫酸盐矿物则在热液流体与海水混合过程中继承了海水的硫同位素组成特征, $\delta^{34}\text{S}$ 与海水值(21%)接近。但是, 随着调查研究的深入, 在 Manus 海盆及 Lau 海盆热液硫化物中发现了一些不符合这一规律的硫同位素组成异常, 可能反映了岩浆来源硫对热液系统的贡献^[4-5]。Herzig 等^[4]在对 Lau 海盆 Hine Hina 热液活动区热液沉积物的研究中, 发现该区硫化物矿物具有异常轻的硫同位素组成, $\delta^{34}\text{S}$ 介于 $-3.4\%\sim -5.7\%$, 硬石膏中的 $\delta^{34}\text{S}$ (16.1%~16.7%)也要明显低于海水值。造成硫化物矿物硫同位素组成出现负值的原因主要有以下 3 种: (1) 硫同位素的生物动力分馏: 硫细菌还原海水硫酸盐产生的硫化物矿物会相对富集 ^{32}S , 从而使生物成因的硫化物具有极低的硫同位素组成, 且通常为负值^[46, 52]; (2) 热液流体氧化还原条件的改变造成了硫同位素的分馏(例如沸腾作用)^[53]; (3) 岩浆挥发

分来源硫的贡献。在排除前两种的可能后，他们提出造成 Hine Hina 热液区 $\delta^{34}\text{S}$ 负值的原因因为岩浆来源硫的贡献，其机制如下：

高温条件下，岩浆挥发分中的硫主要以 SO_2 的形式存在，其还原产生的 H_2S 的 $\delta^{34}\text{S}$ 在 0 左右，这种性质的岩浆硫加入到热液系统中并不会对硫化物的硫同位素组成产生明显的影响。但是当岩浆挥发分温度降至 300~400℃时， SO_2 会迅速发生如下歧化作用：



该反应产生的 H_2S 会显著富集 ^{32}S ，而 SO_4^{2-} 会明显富集 ^{34}S 。该反应会造成硫同位素产生 8‰ 左右的分馏^[54]。假定岩浆中 SO_2 的 $\delta^{34}\text{S}$ 为 4‰^[49]，那么歧化作用产生的 H_2S 的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 -4‰， SO_4^{2-} 的 $\delta^{34}\text{S}$ 为 12‰，与在 Hine Hina 热液区热液沉积物中测得的硫同位素组成基本一致。从而证明了岩浆对热液系统具有硫同位素贡献。Kim 等^[5]在对 Manus 海盆 SuSu Knolls 热液活动区热液沉积物的研究中，也发现了硫化物矿物和重晶石极低的硫同位素组成，硫化物中的 $\delta^{34}\text{S}$ 介于 -3.9‰~-8.0‰之间，重晶石中 $\delta^{34}\text{S}$ 两个测量值分别为 17.5‰和 18.9‰。他们同样将造成硫同位素组成异常轻的原因归结于岩浆 SO_2 歧化作用产生的硫对热液系统的贡献。Roberts 等^[55]和 Craddock 和 Bach^[54]分别对 Manus 海盆 Snowcap 热液活动区热液成因硬石膏进行了全岩和 LA-ICP-MS 微区分析，都发现硬石膏相对于海水具有偏轻的硫同位素组成，认为岩浆源 SO_2 歧化作用形成的轻硫

组分与海水硫酸盐的混合是造成硬石膏 $\delta^{34}\text{S}$ 值偏低的原因，岩浆作用对热液系统具有硫同位素贡献。此外，微区分析发现在同一样品的不同矿物之间，甚至是同一个硬石膏颗粒的不同部位硫同位素组成都有很大的变化，这可能是由于热液流体成矿环境不稳定或者是岩浆流体与海水不同比例混合造成的^[54]。这种硫同位素大范围变化的现象是全岩分析没有发现的，说明微区同位素分析在热液硫化物成矿作用研究中可能发挥更加重要的作用。Chen 等^[56]报道了台湾龟山岛热液区 14 个自然硫烟囱体样品的硫同位素组成， $\delta^{34}\text{S}$ 变化于 -0.5‰~2.0‰，平均值为 1.1‰。与龟山岛安山岩相比，自然硫中硫同位素组成明显偏低，更接近洋中脊玄武岩的硫同位素组成，说明自然硫中的硫来自于地幔深部，可能是岩浆去气作用产生的 SO_2 和 H_2S 经过后期反应生成的，进一步证明了岩浆作用对龟山岛热液系统的物质贡献^[57]。Melekestseva 等^[33]通过对大西洋中脊 Semenov-1 热液区热液沉积物的硫同位素研究，同样认为岩浆来源硫对热液系统产生了一定的影响。

总之，现代海底热液沉积成因硫化物和硫酸盐矿物中硫的来源是一个十分复杂的科学问题，其主要来源包括海水硫酸盐的还原、高温条件下的水-岩反应和源于地幔的岩浆的脱水去气作用，三种来源的硫又经过了混合作用和歧化作用等过程(图 1)。但是，岩浆作用对热液系统有硫(物质)的贡献似乎是毋庸置疑的。

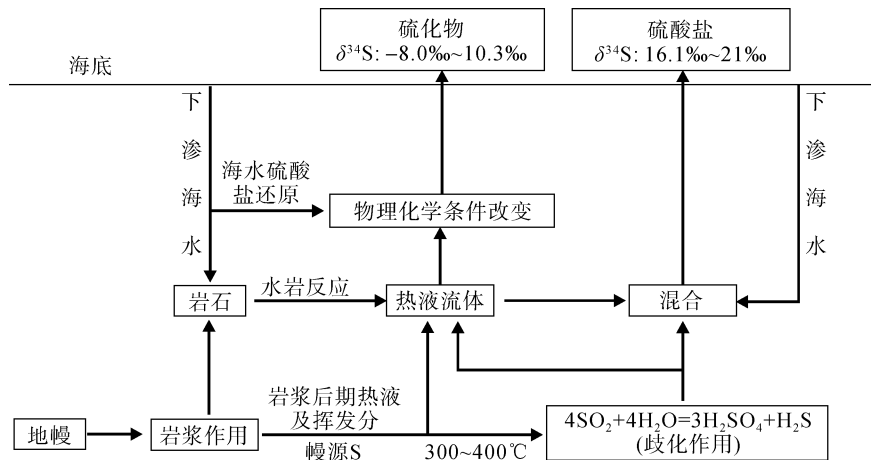


图 1 热液硫化物 S 来源模式图

Fig. 1 Sulfur sources of hydrothermal deposits

1.3.2 氢、氧同位素证据

热液成矿流体的氧同位素组成作为判断流体来源的重要指标，可以通过热液石英的氧同位素组成

和其中流体包裹体的充填温度来获取，也可以通过蚀变岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 和水-岩反应温度来界定^[58]。Sheppard 等^[59]对热液蚀变岩浆岩中白云母和钾长石的氢、氧

同位素组成进行了分析,以热液蚀变矿物(如白云母、绿泥石等)的形成温度代表水-岩反应的温度,据此计算出了热液流体的氧同位素组成。结果表明,热液流体 $\delta^{18}\text{O}$ 介于 6‰~9‰,与岩浆储库的氧同位素组成基本一致,证明了岩浆流体对热液系统的贡献。通过计算得到的热液流体氢同位素组成则具有较大的变化范围, δD 介于-35‰~-75‰,可能与岩浆演化过程中的去气作用有关。Hedenquist 和 Lowenstern^[60]对世界主要岛弧及弧后盆地火山岩的氢、氧同位素数据进行了整理分析,认为岩浆去气产生的挥发分可能对热液系统具有重要的贡献。Hou 等^[36]对冲绳海槽热液成因石英的氧同位素组成及其中流体包裹体的充填温度进行了测试。以包裹体的捕获温度代表石英的结晶温度,通过石英-水氧同位素测温公式,对石英中流体包裹体的氧同位素组成进行了计算。结果表明流体包裹体(热液流体) $\delta^{18}\text{O}$ 介于 8.25‰~9.03‰,与岩浆水的氧同位素组成基本相当,同样证明了岩浆流体对热液系统的贡献。

1.3.3 锶、铅同位素证据

海底热液沉积物中锶和铅的同位素组成是示踪其成矿物质来源的重要手段,已在海底热液成矿作用研究中得到了广泛的应用^[61]。Vidal 和 Clauer^[61]对东太平洋海隆 21°N 热液活动区热液成因硫化物中 Sr 的同位素组成进行了分析,发现其 $m(^{87}\text{Sr})/m(^{86}\text{Sr})$ (^{87}Sr 与 ^{86}Sr 质量之比)介于基底玄武岩和海水之间,硫化物中的 Sr 为岩浆和海水的混合来源,同样说明岩浆作用对热液系统具有 Sr 的贡献。Kim 等^[5]对东马努斯海盆热液活动区热液成因硫酸盐矿物中 Sr 的同位素组成进行了分析,发现其 $m(^{87}\text{Sr})/m(^{86}\text{Sr})$ 略高于基底岩石。表明硫酸盐矿物中的 Sr 除了来源于参与水-岩反应的岩石,海水也对热液系统贡献了部分 Sr,但基底岩石仍然是该区热液硫酸盐矿物中 Sr 的主要来源。以上证据都表明岩浆作用对热液系统具有不可忽视的物质贡献。海底热液硫化物铅同位素组成变化范围较大, Pb 的来源相对比较复杂,与热液活动区所处的地质背景密切相关。在没有沉积物覆盖的热液活动区,热液硫化物中的 Pb 主要来自参与水-岩反应的岩石,其 Pb 同位素组成继承了基底岩石的 Pb 同位素组成特征^[61-62]。而在有沉积物覆盖的热液活动区,热液硫化物中 Pb 的同位素组成变化范围相对较大,具有更多的放射性成因 Pb 组分,说明除了基底岩石之外,海底沉积物也对热液硫化物贡献了一定量的 $\text{Pb}^{[25-27]}$ 。Pb 主要以水-岩反应的形式

被热液流体萃取后进入到热液系统之中。

除了以上证据外,科学家通过其他研究手段同样找到了岩浆作用对热液系统物质贡献的证据。Sakai 等^[63]对冲绳海槽富 CO_2 喷口流体中 CO_2 和 H_2S 的 C、S 同位素组成进行了测试,结果表明热液流体中气相组分的 C 和 S 同位素组成与岩浆挥发分十分接近,岩浆演化后期挥发性组分可能加入了热液系统。Urabe 等^[30]在东太平洋海隆热液羽状体中检测到了异常高的挥发组分/金属元素比值,提出岩浆去气可能对热液系统贡献了大量的挥发性组分。Sun 等^[64]通过对 Manus 海盆火山岩中 Au 的含量变化的研究,提出岩石中的成矿金属元素可以通过络合物的形式随挥发性组分从岩浆中脱离,并可能进入海底热液系统。

2 岩浆作用对海底热液系统物质贡献的主要形式

根据已有研究成果,岩浆作用对海底热液系统物质贡献的形式主要包括以下 3 种:水-岩反应、岩浆期后热液加入、富金属挥发性组分的加入,其模式如图 2 所示。

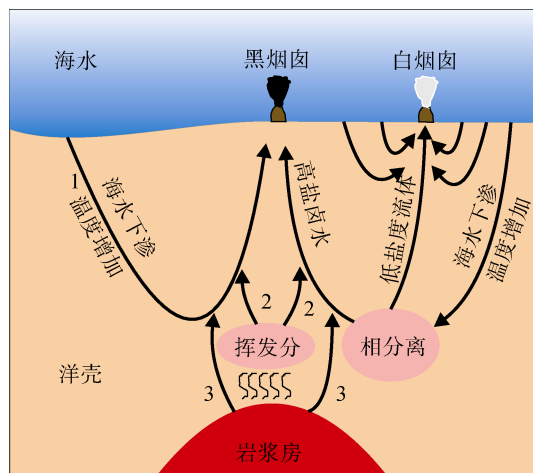


图 2 岩浆作用对热液系统物质贡献模式图

Fig. 2 Model of magmatic contribution to hydrothermal systems

1. 水-岩反应; 2. 富金属岩浆挥发分的加入; 3. 岩浆结晶演化后期热液流体的加入
1. water-rock interaction; 2. input of magmatic volatile; 3. input of magmatic fluid

2.1 水-岩反应

根据传统热液循环模式,海水沿着洋壳裂隙下渗的过程中被不断加热,高温海水淋滤基底岩石并

从中萃取成矿金属元素是热液流体获取成矿物质的主要方式^[14-15]。这种模式目前被大多数人认为是岩浆作用对热液系统物质贡献的主要方式。

海底热液循环系统主要包括 3 个部分: 补给带—海水沿着洋壳裂隙下渗, 温度逐渐增高, 岩-水反应加剧; 高温反应带—下渗的海水到达一定深度或接近岩浆房时, 水温达到最大值, 在这里可以进行高温水-岩反应, 甚至有部分岩浆作用后期热液和挥发性组分的加入; 上升流带—被加热并经过充分岩-水反应的高温热液流体呈酸性, 富含金属元素, 比重较轻, 沿构造裂隙或通道向上运移, 喷出海底。

补给带的主要热液过程包括: 基底岩石低温条件下的氧化、海水中 Mg 的固定、硬石膏的沉淀及中、高温条件下岩石中碱金属的淋失。随着海水下渗深度增加, 水温达到最大值, 在高温反应带与基底岩石发生反应。一般认为, 高温反应带中的岩-水反应确定了热液流体的最终化学特征。大量金属元素(如 Fe、Cu、Zn、Pb 等)在这一阶段会被高温酸性流体从岩石中淋滤, 进入热液流体, 从而为热液系统提供了金属来源。在高温反应带, 若温、压条件超过了临界值, 热液流体会沸腾而发生相分离作用, 形成低盐度的蒸汽相(Cl 含量较低)和高盐卤水相(Cl 含量很高)^[16, 65]。由于高温流体中大多数金属元素都是以 Cl 的络合物形式迁移, 低盐度蒸汽相由于缺少与金属元素络合的络阴离子(Cl⁻ 离子)而具有较低的金属元素含量, 会形成白烟囱流体; 而高盐卤水则会大量萃取岩石中的金属元素而形成黑烟囱流体^[16]。然而, 仅靠热液流体相分离作用很难解释白烟囱流体温度普遍较低的特点, 白烟囱流体循环深度较浅或低温海水的大量混入可能是其流体温度较低的主要原因。此外, 黑烟囱与白烟囱流体 Sr 同位素组成具有系统性的差异, 表明二者可能具有不同的物质来源。与黑烟囱流体相比, 白烟囱流体可能具有较少的地幔或岩浆组分的加入(翟世奎, 内部交流资料)。上升流带, 高温、酸性、富含金属元素的热液流体沿着构造裂隙或通道向上运移, 喷出海底。冷的海水可能沿着流体通道下渗, 与热液流体混合, 导致硫化物及硫酸盐矿物的沉淀。

2.2 岩浆期后热液的加入

岩浆演化至晚期阶段(残余岩浆阶段), 会形成岩浆期后热液。由于大部分金属元素在岩浆演化过程中表现为不相容的特征, 会保留在岩浆熔体之中。

因此, 岩浆结晶演化后期热液流体中会富含大量金属元素。若这部分流体通过构造薄弱带进入热液系统, 则会对热液成因硫化物产生直接的金属元素贡献^[36, 45]。大量研究资料表明, 海底之下存在高盐度卤水^[17, 65-66]。根据 Bischoff 和 Rosenbauer^[65]提出的热液系统双对流扩散模式, 海底之下高盐度卤水的形成可能与下渗到深部的流体相分离作用有关: 热液流体相分离会形成低盐度蒸汽相和高盐度卤水。低盐度蒸汽相由于密度较低, 会迅速上浮而喷出海底。而高盐度卤水相密度较高, 会滞留在深部裂隙, 在热液系统中保持较长时间^[17]。然而, 仅靠热液流体的相分离作用, 很难解释卤水相异常高的盐度值, 岩浆期后热液流体的加入也可能对高盐卤水提供了部分甚至是主要的成矿金属元素及流体来源。

2.3 岩浆挥发性组分的加入

岩浆演化过程中会发生 3 个阶段的去气作用: (1) 岩浆喷发之前, 在岩浆房中演化而发生去气作用(前喷发去气作用); (2) 岩浆喷发过程中伴随的去气作用(同喷发去气作用); (3) 岩浆喷发之后, 冷却成岩过程中的去气作用(后喷发去气作用)^[38-39, 67]。岩浆熔体包裹体研究表明, 岩浆前喷发去气作用阶段产生的挥发分富含络合离子, 可以载带大量金属元素从岩浆中脱离, 形成不混溶流体。若这部分富金属流体沿着构造裂隙进入热液系统, 则有可能对热液系统产生挥发分及金属元素的直接贡献^[38-39, 44]。Yang 和 Scott^[21]通过对 Manus 海盆火山岩研究表明, 不同性质的岩浆通过前喷发去气作用产生的挥发分可能载带不同的金属元素进入热液系统, 从而形成矿物或地球化学性质上不同的金属硫化物。

3 近期研究工作重点分析

综合前人的研究成果, 本文认为近期研究工作的重点应主要集中在以下 3 个方向:

(1) 利用矿物微区分析技术进行更加精细的研究
矿物微区原位分析是近年来新兴起的分析技术, 不仅避免了繁琐的化学分离提纯程序及环境的污染, 节约了成本, 提高了工作效率^[68]; 而且可以对不同的矿物颗粒及同一矿物颗粒内部的不同部位进行原位分析, 从而获得一些常规分析方法无法观测到的现象和规律。Craddock 和 Bach^[54]对 Manus 海盆热液硬石膏硫同位素及稀土元素进行了 LA-ICP-MS 微区分析, 除证明了岩浆作用对热液系统具有物质贡

献外,还揭示了热液成矿环境不稳定的特征,这是样品全岩分析没有发现的。因此,将微区分析运用于热液硫化物成矿作用研究,进行更加精细的分析测试,获取矿物形成过程中的原始信息,必将为岩浆作用对热液系统的物质贡献提供更多的证据。

(2) 非传统稳定同位素的应用

非传统稳定同位素体系是相对于 C、H、O、S 等传统同位素体系而言的,即新近发展起来的同位素体系。随着同位素分析测试手段的进步与发展,非传统稳定同位素示踪在地球科学的研究中得到了日益广泛的应用^[69]。铁、铜、锌等非传统稳定同位素在最近几年已经广泛应用于矿床形成机理等方面的研究,作为一种新兴的地球化学示踪手段,在热液硫化物成矿作用研究中同样展现出了良好的应用前景^[70-71]。海底热液成因硫化物富含多种金属元素,前人已经对其铁、铜、锌等同位素进行过研究,证明了它们在热液硫化物成矿作用研究中的重要作用^[72]。因此,开发应用非传统稳定同位素,发展新的分析测试手段,必将为海底热液系统研究打开一扇新的大门。

(3) 完善岩浆作用对热液系统物质贡献理论模型

关于热液系统成矿物质来源及热液成矿模式,目前科学界依然存在很大的争议。这一问题的澄清,有助于增进人们对海底热液活动演化规律的认识。综合前人关于岩浆作用对热液系统物质贡献的研究成果,大多数观点认为水-岩反应是岩浆作用对热液系统物质贡献的主要形式。近期,随着研究的逐步深入,岩浆期后热液流体及挥发分对热液系统物质贡献的重要性逐渐引起了科学家的重视。进一步发展完善岩浆作用对热液系统物质贡献理论模型,更加贴近实际地定量评价岩浆作用对热液系统的物质贡献,必将成为今后研究工作的重点。此外,岩浆挥发分及结晶演化后期热液流体携带金属元素对热液系统产生物质贡献的证据目前只在弧后盆地有所发现,而洋中脊热液系统则未见报道。洋脊岩浆作用对热液系统是否存在这种形式的贡献?贡献的比例有多大?等问题都需要进一步的研究。

4 结论

1) 诸多证据表明,岩浆作用对热液系统具有重要的物质贡献,是热液硫化物成矿物质的主要来源。

2) 岩浆作用对热液系统的物质贡献形式主要有以下 3 种:(1)热液流体淋滤基底岩石获得成矿金属

元素;(2)富金属岩浆期后热液流体的加入;(3)岩浆挥发分的贡献。

3) 利用矿物原位微区分析技术,结合非传统稳定同位素分析方法,对海底热液硫化物进行更加精细的研究,进一步完善热液成矿作用模式,必将成为今后研究工作的热点。

参考文献:

- [1] Corliss J B, Dymond J, Gordon L I, et al. Submarine thermal springs on the Galápagos Rift[J]. *Science*, 1979, 203(4385): 1073-1083.
- [2] Hannington M, Jamieson J, Monecke T, et al. The abundance of seafloor massive sulfide deposits[J]. *Geology*, 2011, 39(12): 1155-1158.
- [3] Halbach P, Pracejus B, Maerten A. Geology and mineralogy of massive sulfide ores from the Central Okinawa Trough, Japan[J]. *Economic Geology*, 1993, 88(8): 2210-2225.
- [4] Herzig P M, Hannington M D, Arribas A. Sulfur isotopic composition of hydrothermal precipitates from the Lau back-arc: implications for magmatic contributions to seafloor hydrothermal systems[J]. *Mineralium Deposita*, 1998, 33(3): 226-237.
- [5] Kim J, Lee I, Lee K Y. S, Sr, and Pb isotopic systematics of hydrothermal chimney precipitates from the Eastern Manus Basin, western Pacific: Evaluation of magmatic contribution to hydrothermal system[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2004, 109(12): 159-163.
- [6] Hongo Y, Obata H, Gamo T, et al. Rare Earth Elements in the hydrothermal system at Okinawa Trough back-arc basin[J]. *Geochemical Journal*, 2007, 41(1): 1-15.
- [7] Suzuki R, Ishibashi J I, Nakaseama M, et al. Diverse Range of Mineralization Induced by Phase Separation of Hydrothermal Fluid: Case Study of the Yonaguni Knoll IV Hydrothermal Field in the Okinawa Trough Back-Arc Basin[J]. *Resource Geology*, 2008, 58(3): 267-288.
- [8] 曾志刚, 陈代庚, 殷学博, 等. 东太平洋海隆 13°N 附近热液硫化物中的元素、同位素组成及其变化[J]. *中国科学: D 辑*, 2009, 39(12): 1780-1794.
Zeng Z G, Chen D G, Yin X B, et al. Elemental and isotopic compositions of the hydrothermal sulfide on the East Pacific Rise near 13°N[J]. *Science in China: Series D*, 2009, 39(12): 1780-1794.
- [9] Gena K, Chiba H, Kase K, et al. The Tiger sulfide chimney, Yonaguni Knoll IV hydrothermal field, Southern Okinawa Trough, Japan: the first reported occurrence of Pt-Cu-Fe-bearing bismuthinite and Sn-bearing chalcopyrite in an active seafloor hydrothermal system[J]. *Resource Geology*, 2013, 63(4): 360-370.
- [10] 蒋富清. 冲绳海槽现代海底热液活动研究概况[J].

- 海洋科学, 1998, 22(6): 25-28.
- Jiang F Q. Status of the studies on the hydrothermal activity in the Okinawa Trough[J]. *Marine Sciences*, 1998, 22(6): 25-28.
- [11] 刘长华, 曾志刚, 殷学博. 现代海底热液硫化物烟囱体的生长模式研究现状[J]. *海洋科学*, 2005, 30(5): 71-73.
- Liu C H, Zeng Z G, Yin X B. Current research on chimneys growth model of modern sea-floor hydrothermal sulfide[J]. *Marine Sciences*, 2005, 30(5): 71-73.
- [12] Bischoff J L, Dickson F W. Seawater-basalt interaction at 200°C and 500 bars: Implications for origin of sea-floor heavy-metal deposits and regulation of seawater chemistry[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 1975, 25(3): 385-397.
- [13] Humphris S E, Thompson G. Hydrothermal alteration of oceanic basalts by seawater[J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 1978, 42(1): 107-125.
- [14] Mottl M J, Holland H D. Chemical exchange during hydrothermal alteration of basalt by seawater—I. Experimental results for major and minor components of seawater[J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 1978, 42(42): 1103-1115.
- [15] Hinkley T K, Tatsumoto M. Metals and isotopes in Juan de Fuca Ridge hydrothermal fluids and their associated solid materials[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1987, 92(921): 11400-11410.
- [16] Damm K L V, Humphris S E, Zierenberg R A, et al. Controls on the Chemistry and Temporal Variability of Seafloor Hydrothermal Fluids[C]//Damm K L V. Seafloor Hydrothermal Systems: Physical, Chemical, Biological, and Geological Interactions. Washington: American Geophysical Union, 1995: 222-247.
- [17] Damm K L V, Buttermore L G, Oosting S E, et al. Direct observation of the evolution of a seafloor 'black smoker' from vapor to brine[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 1997, 149(s 1-4): 101-111.
- [18] Edmond J M, Campbell A C, Palmer M R, et al. Time series studies of vent fluids from the TAG and MARK sites (1986, 1990) Mid-Atlantic Ridge: a new solution chemistry model and a mechanism for Cu/Zn zonation in massive sulphide orebodies[J]. *The Geological Society*, 1995, 87: 77-86.
- [19] Tivey M K, Humphris S E, Thompson G, et al. Deducing patterns of fluid flow and mixing within the TAG active hydrothermal mound using mineralogical and geochemical data[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1995, 100(B7): 12527-12555.
- [20] Yang K, Scott S D. Possible contribution of a metal-rich magmatic fluid to a sea-floor hydrothermal system[J]. *Nature*, 1996, 383(6599): 420-423.
- [21] Yang K, Scott S D. Magmatic degassing of volatiles and ore metals into a hydrothermal system on the modern sea floor of the Eastern Manus Back-Arc Basin, Western Pacific[J]. *Economic Geology*, 2002, 97(97): 1079-1100.
- [22] Yang K. Vigorous exsolution of volatiles in the magma chamber beneath a hydrothermal system on the modern sea floor of the Eastern Manus Back-Arc Basin, Western Pacific: evidence from melt inclusions[J]. *Economic Geology*, 2005, 100(6): 1085-1096.
- [23] Kamenetsky V S, Binns R A, Gemmell J B, et al. Parental basaltic melts and fluids in eastern Manus backarc Basin: implications for hydrothermal mineralisation[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 2001, 184(00): 685-702.
- [24] Kamenetsky V S, Davidson P, Mernagh T P, et al. Fluid bubbles in melt inclusions and pillow-rim glasses: High-temperature precursors to hydrothermal fluids?[J]. *Chemical Geology*, 2002, 183(1): 349-364.
- [25] Lehuray A P, Church S E, Koski R A, et al. Pb isotopes in sulfides from mid-ocean ridge hydrothermal sites[J]. *Geology*, 1988, 16(4): 362-365.
- [26] Zierenberg R A, Koski R A, Morton J L, et al. Genesis of massive sulfide deposits on a sediment-covered spreading center, Escanaba Trough, southern Gorda Ridge[J]. *Economic Geology*, 1993, 88(8): 2069-2098.
- [27] German C R, B.A. Barreiro, Higgs N C, et al. Seawater-metasomatism in hydrothermal sediments (Escanaba Trough, northeast Pacific)[J]. *Chemical Geology*, 1995, 119(1): 175-190.
- [28] Stuart F M, Ellam R M, Duckworth R C. Metal sources in the Middle Valley massive sulphide deposit, northern Juan de Fuca Ridge: Pb isotope constraints[J]. *Chemical Geology*, 1999, 153(1): 213-225.
- [29] Cousens B L, Blenkinsop J, Franklin J M. Lead isotope systematics of sulfide minerals in the Middle Valley hydrothermal system, northern Juan de Fuca Ridge[J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2002, 3(5): 1-16.
- [30] Urabe T, Baker E T, Ishibashi J, et al. The effect of magmatic activity on hydrothermal venting along the superfast-spreading East Pacific Rise[J]. *Science*, 1995, 269(5227): 1092-1095.
- [31] Pearce J A, Stern R J. Origin of back-arc basin magmas: Trace element and isotope perspectives[J]. *Back-arc Spreading Systems*, 2006, 166: 63-86.
- [32] Piercey S J. The setting, style, and role of magmatism in the formation of volcanogenic massive sulfide deposits[J]. *Mineralium Deposita*, 2011, 46(5): 449-471.
- [33] Melekestseva I Y, Tret'Yakov G A, Nimis P, et al. Barite-rich massive sulfides from the Semenov-1 hydrothermal field (Mid-Atlantic Ridge, 13°30.87'N): Evidence for phase separation and magmatic input[J]. *Marine Geology*, 2014, 349: 37-54.
- [34] Yu Z, Zhai S, Zhao G. The evidence from inclusions in pumices for the direct degassing of volatiles from the magma to the hydrothermal fluids in the Okinawa Trough[J]. *Journal of Ocean University of China*, 2002,

- 1(2): 171-175.
- [35] 曾志刚, 秦蕴珊, 翟世奎. 冲绳海槽 Jade 热液区块状硫化物中流体包裹体的氮、氩、氦同位素组成[J]. 海洋学报, 2003, 25(4): 36-42.
Zeng Z G, Qin Y S, Zhai S K. He, Ne and Ar isotope compositions of fluid inclusions in massive sulfides from the Jade hydrothermal field, Okinawa Trough[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2003, 25(4): 36-42.
- [36] Hou Z, Zaw K, Li Y, et al. Contribution of magmatic fluid to the active hydrothermal system in the JADE field, Okinawa Trough: evidence from fluid inclusions, oxygen and helium isotopes[J]. International Geology Review, 2005, 47(4): 420-437.
- [37] Roedder E. Occurrence and significance of magmatic inclusions and silicate liquid immiscibility[J]. Acta Geologica Polonica, 1984, 34: 139-185.
- [38] Sparks & R S J, Brazier S. New evidence for degassing processes during explosive eruptions[J]. Nature, 1982, 295(5846): 218-220.
- [39] Klug C, Cashman K V. Vesiculation of May 18, 1980, Mount St. Helens magma[J]. Geology, 1994, 22(5): 468-472.
- [40] Stanton R L. Ore elements in arc lavas[M]. England: Clarendon Press, Oxford University Press, 1994.
- [41] Thompson J F H. Magmas, Fluids, and Ore Deposits[M]. Canberra: Mineralogical Association of Canada, 1995.
- [42] Hoog J C M D, Bergen M J V. Volatile-induced transport of HFSE, REE, Th and U in arc magmas: evidence from zirconolite-bearing vesicles in potassic lavas of Lewotolo volcano (Indonesia)[J]. Contributions to Mineralogy & Petrology, 2000, 139(4): 485-502.
- [43] Damm K L V. Seafloor hydrothermal activity: black smoker chemistry and chimneys[J]. Earth and Planetary Sciences, 1990, 18(18): 173-204.
- [44] Yang K, Scott S D. Mineral Deposit Research: Meeting the Global Challenge[M]. Berlin: Springer, 2005: 715-718.
- [45] Li B, Manuel O K. A noble gas technique for the identification of mantle and crustal materials and its application to the Kuroko deposits.[J]. Geochemical Journal, 1994, 28(1): 47-69.
- [46] Shanks W G III, Seyfried W E Jr. Stable isotope studies of vent fluids and chimney minerals, southern Juan de Fuca Ridge: Sodium metasomatism and seawater sulfate reduction[J]. Journal of Geophysical Research-atmospheres, 1987, 92: 11387-11399.
- [47] Peter J M, Iii W C S. Sulfur, carbon, and oxygen isotope variations in submarine hydrothermal deposits of Guaymas Basin, Gulf of California, USA[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1992, 56(56): 2025-2040.
- [48] Sakai H, Marais D J D, Ueda A, et al. Concentrations and isotope ratios of carbon, nitrogen and sulfur in ocean-floor basalts[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1984, 48(12): 2433-41.
- [49] Ueda A, Sakai H. Sulfur isotope study of Quaternary volcanic rocks from the Japanese Island Arc[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1984, 48(9): 1837-1848.
- [50] Alt J C, Iii W C S, Jackson M C. Cycling of sulfur in subduction zones: The geochemistry of sulfur in the Mariana Island Arc and back-arc trough[J]. Earth & Planetary Science Letters, 1993, 119(4): 477-494.
- [51] Woodhead J D, Harmon R S, Fraser D G. O, S, Sr, and Pb isotope variations in volcanic rocks from the Northern Mariana Islands: implications for crustal recycling in intra-oceanic arcs[J]. Earth & Planetary Science Letters, 1987, 83(1-4): 39-52.
- [52] Zierenberg R A. Data report: sulfur content of sediment and sulfur isotope values of sulfide and sulfate minerals from Middle Valley. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results(139)[R]. The United States: the U S Geological Survey Ministration, 1994.
- [53] McKibben M A, Eldridge C S. Radical sulfur isotope zonation of pyrite accompanying boiling and epithermal gold deposition; a SHRIMP study of the Valles Caldera, New Mexico[J]. Economic Geology, 1990, 85: 1917-1925.
- [54] Craddock P R, Bach W. Insights to magmatic-hydrothermal processes in the Manus back-arc basin as recorded by anhydrite[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2010, 74(19): 5514-5536.
- [55] Roberts S, Bach W, Binns R A, et al. Contrasting evolution of hydrothermal fluids in the PACMANUS system, Manus Basin: The Sr and S isotope evidence[J]. Geology, 2003, 31(9): 805.
- [56] Chen C T A, Zeng Z, Kuo F W, et al. Tide-influenced acidic hydrothermal system offshore NE Taiwan[J]. Chemical Geology, 2005, 224(1-3): 69-81.
- [57] 曾志刚, 刘长华, 陈镇东, 等. 台湾岛东北部龟山岛热液区自然硫烟囱体的成因[J]. 中国科学: D 辑, 2007, 37(8): 1134-1140.
Zeng Z G, Liu C H, Chen Z D, et al. Formation of native sulfur chimney in Kueishantao hydrothermal field, Northeast Taiwan[J]. Science in China, Series D, 2007, 37(8): 1134-1140.
- [58] 侯增谦, 艾永德. 岩浆流体对冲绳海槽海底成矿热水系统的可能贡献[J]. 地质学报, 1999, 73(1): 57-65.
Hou Z Q, Ai Y D. Possible contribution of magmatic fluids to seafloor ore-forming hydrothermal system in the Okinawa Trough[J]. Acta Geologica Sinica, 1999, 73(1): 57-65.
- [59] Sheppard S M F, Nielsen R L, Jr T H P. Hydrogen and oxygen isotope ratios in minerals from porphyry copper deposits[J]. Economic Geology, 1971, 66(4): 515-542.
- [60] Hedenquist & J W, Lowenstern J B. The role of magmas in the formation of hydrothermal ore deposits[J]. Nature, 1994, 370(6490): 519-527.
- [61] Vidal P, Clauer N. Pb and Sr isotopic systematics of some basalts and sulfides from the East Pacific Rise at

- 21°N (project RITA)[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 1981, 55(2): 237-246.
- [62] Fouquet Y, Marcoux E. Lead isotope systematics in Pacific hydrothermal sulfide deposits[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100(B4): 6025-6040.
- [63] Sakai H, Gamo T, Kim E S, et al. Venting of carbon dioxide-rich fluid and hydrate formation in mid-okinawa trough backarc basin.[J]. *Science*, 1990, 248(4959): 1093-1096.
- [64] Sun W, Arculus R J, Kamenetsky V S, et al. Release of gold-bearing fluids in convergent margin magmas prompted by magnetite crystallization[J]. *Nature*, 2004, 431(7011): 975-978.
- [65] Bischoff J L, Rosenbauer R J. Salinity variations in submarine hydrothermal systems by layered double-diffusive convection[J]. *Journal of Geology*, 1989, 97(5): 613-623.
- [66] Cowan J, Cann J. Supercritical two-phase separation of hydrothermal fluids in the Troodos ophiolite[J]. *Nature*, 1988, 333(6170): 259-261.
- [67] Whitham A G, Sparks R S J. Pumice[J]. *Bulletin of Volcanology*, 1986, 48(4): 209-223.
- [68] 杨宝菊, 曾志刚, 陈帅, 等. 激光探针硫同位素分析方法及应用[J]. *海洋科学*, 2015, 39(7): 124-129.
- Yang B J, Zeng Z G, Chen S, et al. The laser microprobe sulfur isotope measurement and applications[J]. *Marine Sciences*, 2015, 39(7): 124-129.
- [69] 张宏福, 汤艳杰, 赵新苗, 等. 非传统同位素体系在地幔地球化学研究中的重要性及其前景[J]. *地学前缘*, 2007, 14(2): 39-59.
- Zhang H F, Tang Y J, Zhao X M, et al. Significance and prospective of non-traditional isotopic systems in mantle geochemistry[J]. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14(2): 39-59.
- [70] Larson P B, Maher K, Ramos F C, et al. Copper isotope ratios in magmatic and hydrothermal ore-forming environments[J]. *Chemical Geology*, 2003, 201(2-4): 337-350.
- [71] Wang Y, Zhu X K, Mao J W, et al. Iron isotope fractionation during skarn-type metallogeny: A case study of Xinqiao Cu-S-Fe-Au deposit in the Middle-Lower Yangtze valley[J]. *Ore Geology Reviews*, 2011, 43(1): 194-202.
- [72] Polyakov V B, Soultanov D M. New data on equilibrium iron isotope fractionation among sulfides: Constraints on mechanisms of sulfide formation in hydrothermal and igneous systems[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2011, 75(7): 1957-1974.

Review on magmatic contribution to seafloor hydrothermal systems

ZHANG Xia, ZHAI Shi-kui, YU Zeng-hui, WANG Shu-jie, CAI Zong-wei

(Key Laboratory of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques, Ministry of Education, College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Received: May 9, 2017

Key words: seafloor hydrothermal activity; magmatism; ore-forming material source; evidences and mode; emphasis of further researches

Abstract: Seafloor hydrothermal activities and sulfides have been researched sufficiently in the past few decades, and important results have been obtained. However, there remain much arguments about the ore-forming material source of hydrothermal deposits. Earlier studies show that water-rock reaction provides most of the ore-forming materials to hydrothermal deposits, while with the progress in research, more evidences suggest that magmatism considerably contributes to hydrothermal systems. In this paper, evidences and research results concerning magmatic contributions to hydrothermal systems are systematically summarized. On this basis, we analyze the main forms of magmatic contribution and present the directions of further research. In addition to water-rock reaction, magmatic fluids and volatiles also contribute a large amount of ore-forming materials to hydrothermal systems. Further research should focus on the following: (1) Use recently developed analysis methods and microanalysis techniques to obtain more detailed information about mineral-forming processes; (2) Develop and apply non-traditional stable isotopes analysis techniques to solve the existing controversial scientific issues; (3) Perfect the theoretical mode of hydrothermal mineralization and evaluate the magmatic contributions to hydrothermal system more precisely.

(本文编辑: 刘珊珊)