

DOI: 10.16108/j.issn1006-7493.2019026

引用格式: 王晓媛, 国坤, 曾志刚. 2019. 浅海热液活动的地球化学示踪研究进展及展望[J]. 高校地质学报, 25 (5): 697-704

浅海热液活动的地球化学示踪研究进展及展望

王晓媛^{1,2}, 国坤^{2,3}, 曾志刚^{1,2}

1. 中国科学院海洋研究所海洋地质与环境重点实验室, 青岛 266071;
2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266000;
3. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋同位素与地质年代测定平台, 青岛 266000

摘要: 海底热液活动是海洋地质的前沿和热点研究领域之一, 相比于深海热液活动较高的关注度和取得的较多的研究成果, 浅海热液活动研究一直处于“不温不火”的状态。但浅海热液系统一般靠近人类活动的区域, 对人类生活具有一定的影响, 深入开展浅海热液活动的研究有助于深刻理解热液流体循环过程、热液成因机制及相关动力学过程。文章在简要介绍国内外浅海热液活动地球化学研究的主要成果和最新进展的基础上, 提出了今后对浅海热液活动的研究应主要集中于以下几个方面: 浅海热液流体及气体的来源; 浅海热液系统模式及与构造环境的关系; 浅海热液活动对人类的影响。

关键字: 浅海热液活动; 地球化学; 元素; 同位素

中图分类号: P736.4; P595

文献标识码: A

文章编号: 1006-7493 (2019) 05-697-08

Advances and Prospects in Geochemical Tracing for Shallow-Water Hydrothermal Activities

WANG Xiaoyuan^{1,2}, GUO Kun^{2,3}, ZENG Zhigang^{1,2}

1. Key Laboratory of Marine Geology and Environment, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China;
2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266000, China;
3. Ocean Science Isotope and Geochronology Center, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266000, China

Abstract: The seafloor hydrothermal activity research has become a hot and popular field in marine geology in recent years. Compared to the deep seafloor hydrothermal activity research that has drawn much attention, the shallow-water hydrothermal activity research is still at an infancy stage. Because the shallow-water hydrothermal regions are often located at regions close to where human activities take place, shallow water hydrothermal systems can affect human's life. Shallow-water hydrothermal activity research is helpful to understand the cyclic process of hydrothermal fluids, the origin of hydrothermal fluid, and related dynamic processes. This paper presents recent advances in shallow-water hydrothermal activity research using geochemical tracers. In addition, we highlight major scientific questions and suggest important future research directions, including the following three aspects: sources of shallow hydrothermal fluids and gases; the relationship between shallow-water hydrothermal system model and structure environment; the influence of shallow-water hydrothermal activity on human.

Key words: shallow-water hydrothermal activity; geochemistry; element; isotopic element

First author: WANG Xiaoyuan, Associate Researcher; E-mail: wangxiaoyuan@qdio.ac.cn

收稿日期: 2019-03-24; 修回日期: 2019-04-18

基金项目: 中国科学院海洋地质与环境重点实验室开放基金项目“台湾龟山岛热液含硫颗粒特征及其差异性研究”(MGE 2019KG11); 国家自然科学基金项目“台湾龟山岛热液流体扩散及其对元素分布的影响”(41476044); 山东自然科学基金项目“板块俯冲对冲绳海槽岩浆作用的影响——玄武岩B同位素的证据”(ZR20180706085); 泰山学者工程专项(ts201511061)联合资助

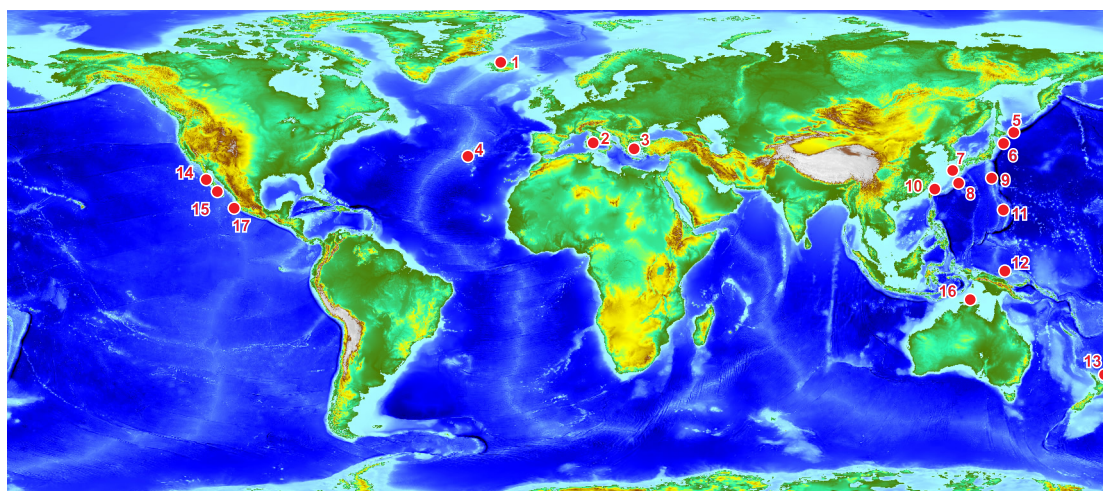
作者简介: 王晓媛, 女, 1980年生, 副研究员, 主要从事海底热液流体和热液柱研究; E-mail: wangxiaoyuan@qdio.ac.cn

海底热液活动普遍发育于洋内的活动板块边缘和板内火山活动中心,是一种在岩石圈和大洋之间进行能量及物质交换的过程(栾锡武和秦蕴珊,2002)。热液活动区持续不断地由地球的内部向外传递物质和能量,因此高温热液从海底流出,并造成热液系统和上覆水体的理化性质异常(张海燕,2013)。海底热液活动和洋壳的热液蚀变不仅仅局限于深海环境中,大量海底热液系统已在浅海区被识别出来(例如Hodkinson et al., 1994; Heikoop et al., 1996; Sedwick and Stuben, 1996; Zeng et al., 2007, 2011; 刘长华等, 2010; Wu et al., 2012; Maugeri et al., 2010; Wang et al., 2013; Chen et al., 2016; Martorelli et al., 2016)。一般来说,将水深200 m以内的热液活动定义为浅海热液(Tarasov et al., 2005),常分布于沿海活火山侧翼、海底火山顶部或构造活动区,在地形上属于深海热液和热泉的过渡区(Dando et al., 2000),目前,已有17个区域超过23余个浅海热液系统的报道(图1)。相对于深海热液活动,浅海热液也具有急剧变化的理化性质,对周围的生态环境也有着重要影响,但报道较少(Rogers and Amend, 2005; Zeng et al., 2018)。而近几年,随着人们对浅海热液认识的不断提高,其研究程度和重视程度也越来越高。浅海热液活动区通常位于沿海地区,处于深海和大陆接触或过渡区域,陆地和海洋的水体或物质都会对其产生影响,因此其成

因、作用过程及影响,均比深海热液和陆上热泉更为复杂(刘长华等,2010)。

对浅海热液活动的地球化学示踪研究主要包括以下几个方面:(1)热液流体,包括流体中的气体组分研究,判断热液流体及气体组分的来源,探讨水岩反应过程以及深部相分离过程等(Valsami-Jones et al., 2005; Santos et al., 2011; Chen et al., 2016);(2)热液沉积,浅海热液沉积难以形成烟囱状结构,多形成硬石膏、文石、铁氢氧化物、自然硫等单一矿物,研究其与压力、流体中矿物质含量、温度、流速、水岩反应的成因联系(Sedwick and Stuben, 1996; Hannington et al., 2001; Chen et al., 2005);(3)岩浆作用对热液流体物质及能量贡献,了解岩浆岩为热液活动及其成矿作用提供物质的种类和方式,估算岩浆富流体组分的散失对热液流体组分的贡献,反演流体对不同类型基底岩石的改造过程,探讨岩浆流体对热液系统的物质与能量供应机制及其对热液活动的控制(Canet et al., 2005; Ishibashi et al., 2008)。

一些新的热液流体循环模式和地球化学方法,例如双扩散对流循环模式(王淑杰等,2018),光谱原位探测与定量分析技术(Li et al., 2018)和热液流体多元同位素(例如C-H-O-S-Sr-B等)等的应用和发展(Pichler, 2005; Frijia and Parente, 2008; Zeng et al., 2013),极大地推动了浅海热液流体活动过程的研究,取得了大量的重要成果。本



1, Kolbeinsey; 2, 伊特鲁里亚海; 3, 爱琴海; 4, 亚速尔群岛; 5, 千岛群岛的克雷特那亚湾; 6, 千岛群岛国后岛; 7, 鹿儿岛湾; 8, 托科拉岛和硫磺岛; 9, 小笠原群岛; 10, 龟山岛; 11, 马里亚那群岛; 12, 巴布亚新几内亚Ambitle岛; 13, 新西兰; 14, 加利福尼亚帕洛斯弗迪斯; 15, 加利福尼亚巴哈半岛; 16, 阿拉弗拉海; 17, 墨西哥蓬塔米塔

图1 全球浅海热液活动区分布图

Fig. 1 Map showing the global distribution of shallow-submarine hydrothermal activities (modified from Tarasov et al., 2005)

文在简要介绍浅海热液地球化学示踪研究取得的主要成果和最新进展的基础上,对存在的重要科学问题和研究方向提出了建议。

1 元素化学示踪研究

浅海热液的化学组成是推断热液流体来源的重要证据,但因其所处的地形和位置的特殊性,陆地地下水会因地势原因加入至热液系统中,雨水充分时还迫使海水和地下水界面(Ghyben-Herzberg界面)推向远离海岸一侧,如热带地区和亚热带地区的火山岛弧,而且,流体成分可能还受到海水以及岩浆组分的影响(刘长华和殷学博,2006;张海燕,2013)。因此,浅海热液流体组成相对于来源较为单一的深海热液流体和陆上热泉流体更为复杂,其成因机制也受更多因素的制约。通常,热液流体表现出多变的化学组成,但总体还是表现出一定的规律,而某种(些)元素表现出的富集或亏损也反映了热液流体的来源或不同的过程。比如,热液流体相对海水富集 Mg^{2+} ,一般说明该热液流体不是典型的海水来源(McMurtry et al., 1993),低Cl含量的流体一般与相分离过程有关(Von Damm et al., 1997)。因此,通过研究流体中元素地球化学的组成,可以探讨热液流体的物质来源,演化过程等,是示踪浅海热液流体发生发展的重要指标。

1.1 常量元素示踪

本文所示热液流体中的常量元素是指除稀土元素之外常见的元素,含量上也有可能是微量级别的,比如Li、B、Br、I、Na、K、Ca、Rb、Zn、As、Sr、Fe、Mg、Cl、Mn、Si等,以及 NH_3 、 H_2S 、 CO_2 、 SO_2 、 CH_4 等化合物。这些化学元素组成是研究热液流体来源,探讨流体演化过程,判断对周围水体影响的重要指标。

Cl是浅海热液流体研究中的重要元素,相对于海水,流体中Cl的富集通常与相分离过程中的浓缩效应有关,也可能是双扩散模型中深部卤水再循环的结果(Price et al., 2015)。众多学者通常用Cl对其他元素进行标准化处理的方法进行流体活动过程的研究,例如Gallant和Von Damm(2006)认为流体中低Na/Cl和高Ca/Cl比值与水岩反应过程中的钠长石化有关,流体中的Na进入并替换了斜长石结构中的Ca,导致热液流体中的低

Na/Cl比值。Price等(2015)研究了意大利半岛Panarea岛浅海热液流体的化学组成,也发现了其低Na/Cl和高Ca/Cl比值与钠长石化有关,并发现流体的Sr/Cl比值与Na/Cl比值具有相似的减小趋势,因为Sr也容易进入到钠长石中(Berndt et al., 1988),进一步证明了流体与矿物反应的存在。Cl元素与其他卤素元素可用来联合示踪流体在深部储库的反应。Wu等(2012)研究了希腊爱琴海Milos岛浅海热液流体的Cl、Br和I等元素特征,认为流体的高I/Cl比值表明其受到了较多沉积物成岩过程的影响,而与相分离过程无关,喷口流体低I/Cl比值则说明流体物质来源中无明显的沉积物贡献,具有高Br/Cl比值的气相组分的持续蒸发可导致深部源区残留卤水具有低的Br/Cl比值,卤水上升喷出形成流体之前与海水混合又形成了高Br/Cl比值的流体。van der Zwan等(2015)研究了红海玄武岩Cl及微量元素组成,Cl含量及Cl/K、Cl/Nb等明显高于其他慢速—超慢速扩张脊玄武岩,认为Cl过剩与高的地壳温度和热液物质的循环加入有关,Cl可以成为指示正在活动或停止活动热液区的新指标。van der Zwan等(2017)继续研究了北极圈和南大西洋洋脊(慢速扩张脊)玄武岩玻璃和包裹体的Cl含量,认为此处的Cl过剩与下地壳热液物质的循环加入有关,包裹体的Cl过剩说明混染加入发生在岩浆结晶形成矿物之前,热液柱和喷口附近的样品Cl含量通常大于 25×10^{-6} ,因此可以成为寻找热液喷口的指示剂。

Si、Fe、Mn、Ba、Li、Rb、Cs、K常被用来示踪热液组分的输入,因为海水中的这些元素的含量很低,而且多数热液流体中的Mg元素含量可忽略不计(Von Damm et al., 1985),因此可将以上元素与Mg进行结合研究(Bischoff and Dickson, 1975)。热液流体中的Mg含量越低,说明海水影响越小。流体表现出高Si低Mg,是因为Si元素更倾向于从岩石中被淋滤出来而进入到流体相中,流体表现出低Fe低Mg则可能与含Fe氧化物的沉淀析出有关(Price et al., 2015)。流体中Mn、Ba、Li、Rb、Cs与Mg表现出的负相关关系与这些元素在流体中的溶解度有关。Villanueva-Estrada等(2012)研究了墨西哥Bahía Concepción地区浅海热液流体的Si、Li、K、Ca、Na、B等元素的组成,计算了热液流体的源区贡献比例,来自20%~

30%的高盐度流体和70%~80%大气降水来源流体的混合。Ishibashi等(2008)研究了日本鹿儿岛海湾Wakamiko火山口浅海热液活动区流体化学组成,表现出较高的 NH_4 含量和碱度,以及高的Si含量,说明热液系统处于一种沉积物富集的环境中,而明显低的Cl和Na含量可以解释为热液循环系统中大气降水和/或岩浆水的加入。Chen等(2018)研究了台湾岛东北部龟山岛浅海热液喷口重金属组成,认为羽状流和周围海水中的重金属(Fe、Mn、As、Y、Ba等)主要来自热液流体的释放,而Cd、Pb等有毒金属可能来自被污染的水体,龟山岛热液系统的影响范围小于 1 km^2 。通常,浅海热液流体喷出时伴有大量气泡,也常被称为“气体热液活动喷口”(Tarasov et al., 2005),一般包括 CO_2 、 N_2 、 NH_3 、 H_2S 、 SO_2 、 CH_4 以及惰性气体等,通过对它们浓度的研究可以判断其来源及形成过程。Pichler等(1999)对巴布亚新几内亚的Tutum湾热液流体的气体组分进行了研究,认为 CO_2 为主要气体组分,根据 N_2 、He、 CO_2 气体含量的相对含量特征,提出该地区流体气体主要为地幔来源。Chen等(2005)对台湾龟山岛附近浅海热液流体气体组成进行了研究,认为该地区气体具有火山—热液的共同来源,提出该地区气体具有离散型板块和热点气体组分特征,与所处的特殊地理位置有关(菲律宾海板块的俯冲)。

1.2 稀土元素示踪

稀土元素具有相似的化学性质,一般在地球化学过程中作为一组元素不发生分离。自然界水系统中,稀土元素可作为判断物质来源的重要依据之一(Zhang and Nozaki, 1998; Craddock et al., 2010),它们之间的分馏被广泛用于示踪与热液活动有关的许多海底过程,例如示踪研究热液系统中的水—岩相互作用(Bau et al., 1998; Wood and Shannon, 2003; 刘焱光等, 2005)、热液流体的演化过程、岩浆酸性挥发物的脱气(例如HF、 SO_2)(Craddock et al., 2010)、以及矿物沉淀、溶解、离子交换和吸附等过程(Sverjensky, 1984; Klinkhammer et al., 1994; 包申旭等, 2007; 王晓媛等, 2013)。热液流体中的稀土元素含量范围至少跨越了4个数量级,从低于检测限到0.1倍球粒陨石值(Migdisov et al., 2009)。热液流体中稀土元素的富集,反映了流体与围岩之间发生的水—岩

相互作用,但实际上流体不可能完全继承岩石的稀土配分模式特征,还会受到流体物理化学性质(例如温度、pH、氧化还原组成等)、富含稀土元素矿物的沉淀和溶解、矿物颗粒表面吸附作用等的控制(Lewis et al., 1998; Douville et al., 1999, 2002; Allen and Seyfried, 2005)。

尽管如此,但浅海热液流体中稀土元素的研究程度仍非常低。王晓媛等(2013)对台湾龟山岛附近热液流体的稀土元素进行了详细研究,与海水相比,龟山岛热液流体稀土元素表现出明显的富集,但低于深海热液流体,可能与水—岩相互作用时间较短、流体的沸腾和流体中硫磺的沉淀析出有关。Eu几乎未表现出明显的异常,与较低的温度和相对偏氧化状态的性质有关。其中,黄色流体中轻稀土元素(LREE)与重稀土元素(HREE)之间的分馏主要受控于极低的pH值和自然硫的沉淀,而白色流体中LREE与HREE之间的分馏主要与颗粒物吸附和稀土元素—Cl配合作用有关。

2 同位素示踪研究

同位素地球化学在浅海热液活动研究中发挥了重要作用,特别是稳定同位素地球化学研究。同一元素不同质量的稳定同位素在物理化学和热力学性质上存在一定的差异,例如碳、氢、氧等质量较小的元素,同位素间的相对质量差较大,在热液流体及气体组分的来源、物理化学作用过程(如相分离过程、流体的扩散渗透、矿物的吸附及结晶沉淀过程、生物影响等)等研究方面得到了广泛的应用,并取得了很多重要的成果。

氢、氧是自然界中最常见和分布最广的元素之一,同时也是浅海热液研究中良好的示踪剂。刘长华等(2010)对台湾龟山岛热液流体的氢氧同位素进行了分析,发现O同位素比海水值偏高,而D同位素与海水相近,且都大于大气降水的同位素值,与相距龟山岛较近的福州市大气降水氢氧同位素数据的相关性进行对比,排除了龟山岛热液流体大气降水单一来源的可能,结合其他元素组成(Na、K、Cl等)的研究,最终认为热液流体中还存在深部岩浆物质的贡献。Caliro等(2011)通过对意大利西南部维苏威火山的浅海热液活动长达12年(1998~2010)的监控分析研究,发现热液喷口处水的氢氧同位素组成发生周期性变化,较低的 $\delta^{18}\text{O}$ 和

D同位素值通常出现于秋冬季节,可能与流体排气阶段的冷凝作用有关,并认为此处的水由大气降水、岛弧岩浆水和海水混合而成,同时在热液系统的深部还存在高盐度的卤水。

C元素包括两种稳定同位素(^{12}C 和 ^{13}C),不同碳化合物之间的同位素交换、氧化还原反应、相变等均会引起碳同位素组成的变化(以 $\delta^{13}\text{C}$ 表示)。通常,热液系统有3个碳来源:岩浆源或深部源($\delta^{13}\text{C}$ 在 -7‰ 左右)、沉积碳酸盐岩来源($\delta^{13}\text{C}$ 在 0‰ 左右)和有机碳来源($\delta^{13}\text{C}$ 在 -25‰ 左右)(韩吟文等,2004)。浅海热液流体气相组成中含有大量的 CO_2 以及 CH_4 气体,因此碳同位素在浅海热液活动研究中有广阔的应用前景。Tassi等(2012)根据 CH_4 中的C同位素和D同位素值,研究了意大利Tyrrhenian地区热液流体中 CH_4 的来源,其 $\delta^{13}\text{C}$ 和 δD 值分别大于 $-28\text{‰V}_{\text{PDB}}$ 和 $-160\text{‰V}_{\text{SMOW}}$,说明热液流体中的 CH_4 主要来自非生物成因的 CO_2 和/或 CO 还原反应;结合其他高级烃类的浓度(C_1/C_{2+} 大于1000)特征,认为 CH_4 与高级烃类的主要(或部分)来源不同,高级烃类几乎全部来源于有机质的热分解或者 CH_4 的聚合作用,而流体中的 CH_4 几乎均与热液系统的热力学过程有关。Chen等(2016)根据 CO_2 中的 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 CO_2/He 比值,计算了台湾龟山岛浅海热液系统中排放的 CO_2 气体的不同端元贡献:地幔 $8\%\sim 32\%$,沉积物 $14\%\sim 27\%$,海相灰岩 $54\%\sim 72\%$;根据 CH_4 中的 $\delta^{13}\text{C}$ 值,结合 C_1/C_{2+} 比值,限定了龟山岛的 CH_4 气体可能来源于热液过程和非生物过程。

除了碳、氢、氧同位素以外,He同位素、S同位素、Sr同位素、B同位素等因为自身特殊的性质和富集机制,也是浅海热液活动研究的常用手段。Koschinsky等(2007)研究了小安得列斯群岛弧Kick'em Jenny火山周围浅海热液流体的He和O同位素组成,He同位素($\delta^3\text{He}=25.3\text{‰}$)表明有地幔组分的加入,结合其他微量元素比值,推断流体可能来自火山周围200~300 m深处的一个热的、集中的流动流体,而O同位素($\delta^{18}\text{O}=+0.3\text{‰}\sim 0.45\text{‰}$)表明存在水岩反应。Martorelli等(2016)分析了Tyrrhenian海Zannone岛浅海热液流体的He同位素比值($^3\text{He}/^4\text{He}$ 大于 $3.0 R_a$),认为流体中具有明显的地幔物质贡献,结合岩石的He和Sr同位素特征,认为热液系统以 CO_2 为主的挥发份主要来

自同区域的残留岩浆。Chen等(2005)研究了台湾龟山岛浅海热液系统中自然硫和热液流体的化学组成以及气体的He和S同位素组成,认为自然硫烟囱体中有超过90%的物质来自地幔,热液流体中的气体也是来自于上地幔。Zeng等(2013)进一步研究了龟山岛浅海热液系统中流体的B同位素组成,其 $\delta^{11}\text{B}$ 组成高于热液柱,流体和热液柱中的B主要来自海水,极少量来自同区域围岩(安山岩),提出热液流体与围岩相互作用的时间很短,流体和热液柱的pH值、B含量及 $\delta^{11}\text{B}$ 可用来描述热液热液柱在海水环境下的扩散过程。Pichler(2005)报道了巴布亚新几内亚Ambitle岛西侧Tutum海湾热液系统中热液流体的H、O、C、Sr、S同位素和化学组成,结合地质构造特征提出了热液流体的形成过程:Ambitle岛深部储库中的相分离产生了上升的高温蒸汽,其与地下水相互作用后形成了低pH值、富 CO_2 的流体,因为陡峭的地形,富 CO_2 的流体向侧面移动至热液系统的边缘,与上升的深部流体混合,产生卤水,在上升的最终过程中可能还夹带了少量地下水或海水。Price等(2015)研究了意大利Panarea岛浅海热液流体和同区域岩石的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值和Sr浓度,它们表现出协同的变化,表明热液流体已与同区域岩石达到了平衡。

3 重要科学问题及研究展望

自1977年美国科学家乘“阿尔文”号深潜器在加拉帕戈斯附近海底首次发现热液活动以来(Corliss et al., 1979),越来越多的学者开始关注并进行研究,取得了丰硕的研究成果。相较深海热液活动,浅海热液活动在成因机制、产物、地质构造特征、周期等方面都表现出了一些相同点,比如同样需要热源、流体过程、活动通道等(刘长华和殷学博,2006),但也存在诸多不同,例如几乎很少出现高温喷口、矿物结晶差异、相分离过程不同等。浅海热液活动的研究仅涉及较窄的范围,如热液流体、气体、沉积物等,并主要探讨其来源以及成因机制,但仍有诸多科学问题没有解决或存在争议。

(1) 浅海热液流体及气体的来源

当前,关于浅海热液流体的来源,已取得了很多认识,主要集中于大气降水、地下水、海水

等,通常热液活动区域均伴随有岩浆活动,浅海热液活动过程中也存在大量气体喷发,深部岩浆的去气作用对浅海热液流体有一定的贡献,这种贡献是否可以定量估算?通常,热液活动周围多伴有微生物活动,这些微生物会产生 CH_4 等气体(Tassi等, 2012),这些气体是否会参与到热液循环系统中?以何种方式参与?参与的比例是多少?

(2) 浅海热液系统模式及与构造环境的关系

在浅海热液系统循环模式方面,研究者们更多地关注浅部或较浅深度(10 km以内)范围内热液流体的循环,包括海水和地下水的下渗、岩浆房流体和挥发性组分的直接注入等(Tarasov et al., 2005; Zeng et al., 2013),这也与深海热液研究中提出的经典(传统)浅层热液循环模式相似,越来越多的研究发现,浅海热液活动中存在地幔物质的贡献,这是否说明在浅海热液活动中也存在与深海热液活动相同的双循环模式,即岩浆后期热液物质($\geq 400^\circ\text{C}$)的直接注入。深海热液活动区通常出现在大洋中脊和弧后盆地这种拉张构造环境中,都是岩浆活动强烈的地区(国坤等, 2016),而浅海热液活动区也多位于岛弧或弧后区域,属于一个碰撞或碰撞后伸展的环境,这种构造环境断层发育,非常有利于热液流体的活动,且岩浆作用强烈,多有深部幔源物质上涌,这些条件均有利于岩浆物质对热液系统的贡献。因此,浅海热液系统是否存在双循环模式仍有待更多的地球化学特别是同位素数据的证实。此外,浅海热液系统通常靠近大陆,陆源沉积物在浅海热液系统物质组成中的贡献也可能扮演重要角色。

(3) 浅海热液活动对人类的影响

浅海热液活动区具有高含量的C、N、P等生物必需营养元素和Si、Zn、Rb、Mn等生物非必需营养元素,对海洋表层初级生产力产生一定影响,是认识海洋—大气碳循环的重要环节。热液系统释放的毒性元素As、Hg、Pb、Cd等,具有残毒时间长、有蓄积性、污染后不易被发现等特点,而且浅海热液系统靠近人类活动区,更易影响人类生活(Sander and Koschinsky, 2011; Sfakianakis et al., 2015; Chen et al., 2018),但以上元素的传播途径是怎样的?赋存状态如何?尚不清晰。此外,热液活动释放的 CO_2 和 H_2S 会导致海水pH值下降、酸化,还影响生物群落的代谢和元素的地

球化学循环,释放至大气中还会造成温室效应(Luther et al., 2001; Riedel et al., 2001; 刘长华和殷学博, 2006; Espa et al., 2010)。这方面的研究更多的集中在深海热液系统,对浅海热液系统的研究很少,这些均有待进一步深入的研究。

参考文献 (References):

- 包申旭,周怀阳,彭晓彤,等. 2007. Juan de Fuca 洋脊 Endeavour 段热液硫化物稀土元素地球化学特征[J]. 地球化学, 36(3): 303-310.
- 国坤,翟世奎,于增慧,等. 2016. 板块俯冲对岩浆作用影响的同位素地球化学示踪研究[J]. 海洋科学, 40(6): 126-132.
- 韩吟文,马振东,张宏飞,等. 2004. 地球化学[M]. 北京:地质出版社.
- 刘焱光,孟宪伟,付云霞. 2005. 冲绳海槽 Jade 热液场烟卤物稀土元素和锆、钽同位素地球化学特征[J]. 海洋学报, 27(5): 69-74.
- 刘长华,汪小妹,曾志刚,等. 2010. 龟山岛附近海域热液活动流体的来源[J]. 海洋科学, 34(3): 61-68.
- 刘长华,殷学博. 2006. 关于现代浅海型海底热液活动的研究进展[J]. 地球科学进展, 21(9): 918-924.
- 栾锡武,秦蕴珊. 2002. 现代海底热液活动的调查研究方法[J]. 地球物理学进展, 17(4): 592-597.
- 王淑杰,翟世奎,于增慧,等. 2018. 关于现代海底热液活动系统模式的思考[J]. 地球科学, 43(3): 835-850.
- 王晓媛,曾志刚,陈帅,等. 2013. 我国台湾东北部龟山岛附近海域热液流体中的稀土元素组成及其对浅海热液活动的指示[J]. 科学通报, 58(19): 1874-1883.
- 张海燕. 2013. 台湾龟山岛和绿岛热液气体组分及元素扩散分布[D]. 杭州:浙江大学.
- Allen D and Seyfried W. 2005. REE controls in ultramafic-hosted MOR hydrothermal systems: An experimental study at elevated temperature and pressure [J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 69(3): 675-683.
- Bau M, Usui A, Pracejus B, et al. 1998. Geochemistry of low-temperature water-rock interaction: evidence from natural waters, andesite, and iron-oxyhydroxide precipitates at Nishiki-numa iron-spring, Hokkaido, Japan [J]. *Chemical Geology*, 151(1-4): 293-307.
- Berndt M E, Seyfried W E and Beck J W. 1988. Hydrothermal alteration processes at midocean ridges: Experimental and theoretical constraints from Ca and Sr exchange reactions and Sr isotopic ratios [J]. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 93(B5): 4573-4583.
- Bischoff J L and Dickson F W. 1975. 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 and Planetary Science Letters*, 25(3): 385-397.
- Caliro S, Chiodini G, Avino R, et al. 2011. Long time-series of chemical and isotopic compositions of Vesuvius fumaroles: evidence for deep and shallow processes [J]. *Annals of Geophysics*, 54(2): 137-149.
- Canet C, Prolledesma M, Proenza A, et al. 2005. Mn-Ba-Hg mineralization at shallow submarine hydrothermal vents in Bahía Concepción, Baja California Sur, Mexico [J]. *Chemical Geology*, 224(1): 96-112.
- Chen C T A, Zeng Z G, Kuo F W, et al. 2005. Tide-influenced acidic hydrothermal system offshore NE Taiwan[J]. *Chemical Geology*, 224(1-3): 69-81.

- Chen X G, Lyu S S, Garbe-Schönberg D, et al. 2018. Heavy metals from Kueishantao shallow-sea hydrothermal vents, offshore northeast Taiwan [J]. *Journal of Marine Systems*, 180: 211–219.
- Chen X G, Zhang H Y, Li X, et al. 2016. The chemical and isotopic compositions of gas discharge from shallow-water hydrothermal vents at Kueishantao, offshore northeast Taiwan [J]. *Geochemical Journal*, 50(4): 341–355.
- Corliss J, Dymond J, Gordon L I, et al. 1979. Submarine thermal springs on the Galápagos Rift [J]. *Science*, 203(16): 1073–1083.
- Craddock P R, Bach W, Seewald J S, et al. 2010. Rare earth element abundances in hydrothermal fluids from the Manus Basin, Papua New Guinea: Indicators of sub-seafloor hydrothermal processes in back-arc basins [J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 74(19): 5494–5513.
- Dando P R, Aliani S, Arab H, et al. 2000. Hydrothermal studies in the Aegean Sea [J]. *Physics and Chemistry of the Earth Part B Hydrology Oceans and Atmosphere*, 25(1): 1–8.
- Douville E, Bienvenu P, Charlou J L, et al. 1999. Yttrium and rare earth elements in fluids from various deep-sea hydrothermal systems [J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 63(5): 627–643.
- Douville E, Charlou J L, Oelkers E H, et al. 2002. The rainbow vent fluids (36°14'N, MAR): the influence of ultramafic rocks and phase separation on trace metal content in Mid-Atlantic Ridge hydrothermal fluids [J]. *Chemical Geology*, 184(1): 37–48.
- Espa S, Caramanna G and Vanda Bouché. 2010. Field study and laboratory experiments of bubble plumes in shallow seas as analogues of sub-seabed CO₂ leakages [J]. *Applied Geochemistry*, 25(5): 696–704.
- Frijia G and Parente M. 2008. Strontium isotope stratigraphy in the upper Cenomanian shallow-water carbonates of the southern Apennines: Short-term perturbations of marine Sr-87/Sr-86 during the oceanic anoxic event 2 [J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 261(1): 15–29.
- Gallant R M and Von Damm K L. 2006. Geochemical controls on hydrothermal fluids from the Kairei and Edmond vent fields, 23–25 S, Central Indian Ridge [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 7: Q06018.
- Hannington M, Herzig P, Stoffers P, et al. 2001. First observations of high-temperature submarine hydrothermal vents and massive anhydrite deposits off the north coast of Iceland [J]. *Marine Geology*, 177(3): 199–220.
- Heikoop J M, Tsujita C J, Risk M J, et al. 1996. Modern iron ooids from a shallow-marine volcanic setting: Mahengetang, Indonesia [J]. *Geology*, 24(8): 759.
- Hodkinson R A, Cronan D S, Varnavas S, et al. 1994. Regional geochemistry of sediments from the Hellenic volcanic arc in regard to submarine hydrothermal activity [J]. *Marine Geotechnology*, 12(2): 83–129.
- Ishibashi J, Nakaseama M, Seguchi M, et al. 2008. Marine shallow-water hydrothermal activity and mineralization at the Wakamiko crater in Kagoshima bay, south Kyushu, Japan [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 173(1–2): 84–98.
- Klinkhammer G P, Elderfield H, Edmond J M, et al. 1994. Geochemical implications of rare earth element patterns in hydrothermal fluids from mid-ocean ridges [J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 58(23): 5105–5113.
- Koschinsky A, Seifert R, Knappe A, et al. 2007. Hydrothermal fluid emanations from the submarine Kick'em Jenny volcano, Lesser Antilles island arc [J]. *Marine Geology*, 244(1): 129–141.
- Lewis A J, Komninou A, Yardley B W D, et al. 1998. Rare earth element speciation in geothermal fluids from Yellowstone National Park, Wyoming, USA [J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 62(4): 657–663.
- Li L, Zhang X, Luan Z, et al. 2018. In situ quantitative Raman detection of dissolved carbon dioxide and sulfate in deep-sea high-temperature hydrothermal vent fluids [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 19: 1809–1823.
- Luther G W, Rozan T F, Taillefert M, et al. 2001. Chemical speciation drives hydrothermal vent ecology [J]. *Nature*, 410(6830): 813–816.
- Martorelli E, Italiano F, Ingrassia M, et al. 2016. Evidence of a shallow water submarine hydrothermal field off Zannone Island from morphological and geochemical characterization: Implications for Tyrrhenian Sea Quaternary volcanism [J]. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 121(12): 8396–8414.
- Maugeri T L, Bianconi G, Canganella F, et al. 2010. Shallow hydrothermal vents in the southern Tyrrhenian Sea [J]. *Chemistry and Ecology*, 26: 285–298.
- McMurtry G M, Sedwick P N, Fryer P, et al. 1993. Unusual geochemistry of hydrothermal vents on submarine arc volcanoes: Kasuga Seamounts, Northern Mariana Arc [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 114(4): 517–528.
- Migdisov A A, Williams-Jones A E and Wagner T. 2009. An experimental study of the solubility and speciation of the rare earth elements (III) in fluoride- and chloride-bearing aqueous solutions at temperatures up to 300°C [J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 73: 7087–7109.
- Pichler T, Veizer J and Hall G E M. 1999. The chemical composition of shallow-water hydrothermal fluids in Tutum Bay, Ambitle Island, Papua New Guinea and their effect on ambient seawater [J]. *Marine Chemistry*, 64(3): 229–252.
- Pichler T. 2005. Stable and radiogenic isotopes as tracers for the origin, mixing and subsurface history of fluids in submarine shallow-water hydrothermal systems [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 139(3): 211–226.
- Price R E, LaRowe D E, Italiano F, et al. 2015. Subsurface hydrothermal processes and the bioenergetics of chemolithoautotrophy at the shallow-sea vents off Panarea Island (Italy) [J]. *Chemical Geology*, 407: 21–45.
- Riedel C, Schmidt M, Botz R, et al. 2001. The Grimsey hydrothermal field offshore North Iceland: crustal structure, faulting and related gas venting [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 193(3–4): 409–421.
- Rogers K L and Amend J P. 2005. Archaeal diversity and geochemical energy yields in a geothermal well on Vulcano Island, Italy [J]. *Geobiology*, 3(4): 319–332.
- Sander S G and Koschinsky A. 2011. Metal flux from hydrothermal vents increased by organic complexation [J]. *Nature Geoscience*, 4(3): 145–150.
- Santos I R, Lechuga-Deveze C, Peterson R N, et al. 2011. Tracing submarine hydrothermal inputs into a coastal bay in Baja California using radon

- [J]. *Chemical Geology*, 282(1-2): 1-10.
- Sedwick P and Stuben D. 1996. Chemistry of shallow submarine warm springs in an arc-volcanic setting: Vulcano Island, Aeolian Archipelago, Italy [J]. *Marine Chemistry*, 53(1-2): 147-161.
- Sfakianakis D G, Renieri E, Kentouri M, et al. 2015. Effect of heavy metals on fish larvae deformities: A review [J]. *Environmental Research*, 137: 246-255.
- Sverjensky D A. 1984. Europium redox equilibria in aqueous solution [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 67(1): 70-78.
- Tarasov V G, Gebruk A V, Mironov A N, et al. 2005. Deep-sea and shallow-water hydrothermal vent communities: Two different phenomena? [J]. *Chemical Geology*, 224(1): 5-39.
- Tassi F, Fiebig J, Vaselli O, et al. 2012. Origins of methane discharging from volcanic-hydrothermal, geothermal and cold emissions in Italy [J]. *Chemical Geology*, 310-311(3): 36-48.
- Valsami-Jones E, Baltatzis E, Bailey E H, et al. 2005. The geochemistry of fluids from an active shallow submarine hydrothermal system: Milos island, Hellenic Volcanic Arc [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 148(1-2): 130-151.
- van der Zwan F M, Devey C W, Augustin, N, et al. 2015. Hydrothermal activity at the ultraslow-to slow-spreading Red Sea Rift traced by chlorine in basalt [J]. *Chemical Geology*, 405: 63-81.
- van der Zwan F M, Devey C W, Hansteen T H, et al. 2017. Lower crustal hydrothermal circulation at slow-spreading ridges: evidence from chlorine in Arctic and South Atlantic basalt glasses and melt inclusions [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 172(11-12): 97.
- Villanueva-Estrada R E, Prol-Ledesma R M, Rodríguez-Díaz A A, et al. 2012. Geochemical processes in an active shallow submarine hydrothermal system, Bahía Concepción, México: mixing or boiling? [J]. *International Geology Review*, 54(8): 907-919.
- Von Damm K L, Buttermore L G, Oosting S E, et al. 1997. Direct observation of the evolution of a seafloor 'black smoker' from vapor to brine [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 149(1): 101-111.
- Von Damm K L, Edmond J M, Measures C I, et al. 1985. Chemistry of submarine hydrothermal solutions at Guaymas Basin, Gulf of California [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 49(11): 2221-2237.
- Wang X Y, Zeng Z G, Chen S, et al. 2013. Rare earth elements in hydrothermal fluids from Kueishantao, off northeastern Taiwan: Indicators of shallow-water, sub-seafloor hydrothermal processes [J]. *Science Bulletin*, 58(32): 4012-4020.
- Wood S A and Shannon W M. 2003. Rare-earth elements in geothermal waters from Oregon, Nevada, and California [J]. *Journal of Solid State Chemistry*, 171(1): 246-253.
- Wu S F, You C F, Valsami-Jones E, et al. 2012. Br/Cl and I/Cl systematics in the shallow-water hydrothermal system at Milos Island, Hellenic Arc [J]. *Marine Chemistry*, 140-141(3): 33-43.
- Zeng Z G, Chen C T A, Yin X B, et al. 2011. Origin of native sulfur ball front the Kueishantao hydrothermal field offshore northeast Taiwan: Evidence from trace and rare earth element composition [J]. *Journal of Asia Science*, 40: 661-667.
- Zeng Z G, Liu C H, Chen C T A, et al. 2007. Origin of a native sulfur chimney in the Kueishantao hydrothermal field, offshore northeast Taiwan [J]. *Science in China(Ser. D)*, 50(11): 1746-1753.
- Zeng Z G, Ma Y, Wang X Y, et al. 2018. Elemental compositions of crab and snail shells from the Kueishantao hydrothermal field in the southwestern Okinawa Trough [J]. *Journal of Marine Systems*, 180: 90-101.
- Zeng Z G, Wang X Y, Chen C T A, et al. 2013. Boron isotope compositions of fluids and plumes from the Kueishantao hydrothermal field off northeastern Taiwan: Implications for fluid origin and hydrothermal processes [J]. *Marine Chemistry*, 157: 59-66.
- Zhang J and Nozaki Y. 1998. Behavior of rare earth elements in seawater at the ocean margin: a study along the slopes of the Sagami and Nankai troughs near Japan [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62(8): 1307-1317.