

大西洋 TAG 热液活动区流体演化模式

李怀明*, 翟世奎, 于增慧

中国海洋大学海洋地球科学学院, 青岛 266100

* E-mail: huaiming_lee@163.com

收稿日期: 2007-12-25; 接受日期: 2008-03-20

国家重点基础研究发展计划(编号: G2000078503)资助

摘要 在大型海底热液硫化物矿体内部, 海水与热液流体的混合过程在热液硫化物矿体的形成过程中扮演着重要角色, 与之相关的一些科学问题, 例如热液活动区不同性质热液流体之间的关系, 热液硫化物矿体的化学组成和矿物组合特征及其控制因素等, 成为近年来海底热液活动调查研究的重要内容. 利用数值模拟方法, 结合 TAG 区热液流体化学组成的实测资料, 模拟了经过不同程度改造的海水同热液流体之间的混合过程, 在此基础上探讨了 TAG 热液活动区黑、白烟囱流体之间的关系和硬石膏的沉淀机制. 模拟计算结果表明: ① 海水的加热和海水与热液流体的混合是控制 TAG 区硬石膏沉淀的两个重要过程. ② 下渗海水被加热应该不会高于 150°C, 而热液端员流体的最高温度则应该高于 400°C. ③ 提出了 TAG 区热液硫化物矿体内部流体的演化模式: 海水在下渗过程中被围岩加热, 加热海水与热液端员流体发生混合, 混合流体经过传导降温和上升过程喷出海底形成白烟囱或者温度较低的黑烟囱. 另外一部分热液端员流体未与下渗海水发生混合, 经传导降温过程喷出海底形成喷溢高温热液流体的黑烟囱.

关键词

海底热液活动
混合过程
流体演化模式
TAG 热液活动区

大型海底热液硫化物矿体的形成过程是一个涉及海水的下渗、热液流体与海水的混合以及矿物的沉淀/溶解等多种地质作用的复杂动力学过程^[1]. 了解热液硫化物矿体内部流体的化学组成、流体的循环和混合过程是认识热液硫化物矿体成矿机制和演化过程的重要基础.

Trans-Atlantic Geo-Traversal(TAG)是在大西洋中脊最早发现的大型热液硫化物矿体. 随着研究成果的不断积累, 对TAG区热液硫化物矿体的内部结构、矿物学和地球化学组成特征以及热液流体的物理化学性质等问题都有了比较清楚的认识^[2~20]. Edmond等^[21]对比了TAG区不同喷口处热液流体的化学组成, 认为 15%~20%的海水进入热液硫化物矿体并同黑烟囱流体发生混合反应, 导致了该区不同热液喷口流

体之间在 $\text{H}_2\text{S}_{(\text{aq})}$, Fe, Cu 和 Zn 等组分浓度以及 pH 等方面的差异. Tivey等^[2]通过分析TAG区黑、白烟囱流体之间 SO_4^{2-} 和 Ca^{2+} 浓度的关系, 利用 14%海水(2°C)和 86%黑烟囱流体进行混合模拟计算, 然后加上“ZnS”的溶解, 模拟所获的混合流体组成与白烟囱流体基本相似^[2]. 但是, 大洋钻探计划(ODP)158 航次的成果表明^[22,23], 在TAG热液活动区黑烟囱流体与海水(2°C)的直接混合的模拟结果与钻孔内硬石膏和石英等矿物的同位素组成和包裹体封闭温度等的实验结果并不相符. 只有海水在下渗过程中首先经过了矿体围岩的加热, 然后再与热液流体发生混合, 才能解释所观测到的事实. 另外, 黑烟囱流体在向上运移直至喷出的过程中大都经过了传导降温过程. 因此, 来自于海底之下的热液端员流体温度必定高于

黑烟囱流体温度. 本文利用数值模拟方法, 结合大西洋 TAG 热液活动区的实测资料, 模拟了热液流体与经过不同程度加热海水之间的混合过程.

1 TAG 热液活动区地质背景

TAG热液活动区位于长 40 km 大西洋中脊脊段的中部, 其地理位置和ODP钻孔位置如图 1 所示. 在 5 km×5 km 左右的范围内共发现了 3 个具有明显热液活动的区块: 低温铁锰氧化物和绿脱石区^[24], 残留的热液丘状体(Mir和Alvin区)^[25]以及目前仍在活动期的 TAG 丘状体. 其中, TAG 丘状体发育在水深约为 3670 m 左右的海底, 表面形状呈直径为 200 m 的圆

形, 有 50 m 左右的地形起伏. 丘状体表层全部被松散的热液沉积物覆盖, 没有基岩出露.

活动历史长以及热液硫化物矿体多阶段的生长过程是TAG热液丘状体的重要特征. 同位素测年结果表明TAG区的热液活动开始于距今约 20 ka之前, 期间经过了多次的间歇^[26]. 另外, ODP的钻孔资料表明TAG丘状体在垂向上具有明显的分带性(图 2)^[3], 根据热液硫化物的矿物学和地球化学特征可以大体把TAG丘状体分为 3 层, 从顶部往下依次为松散的块状硫化物层(包括硫化物、铁锰氧化物等)、经过改造(表层物质的再结晶、成核作用、生长作用和脉状成矿作用等)的热液硫化物层以及基底岩石蚀变层.

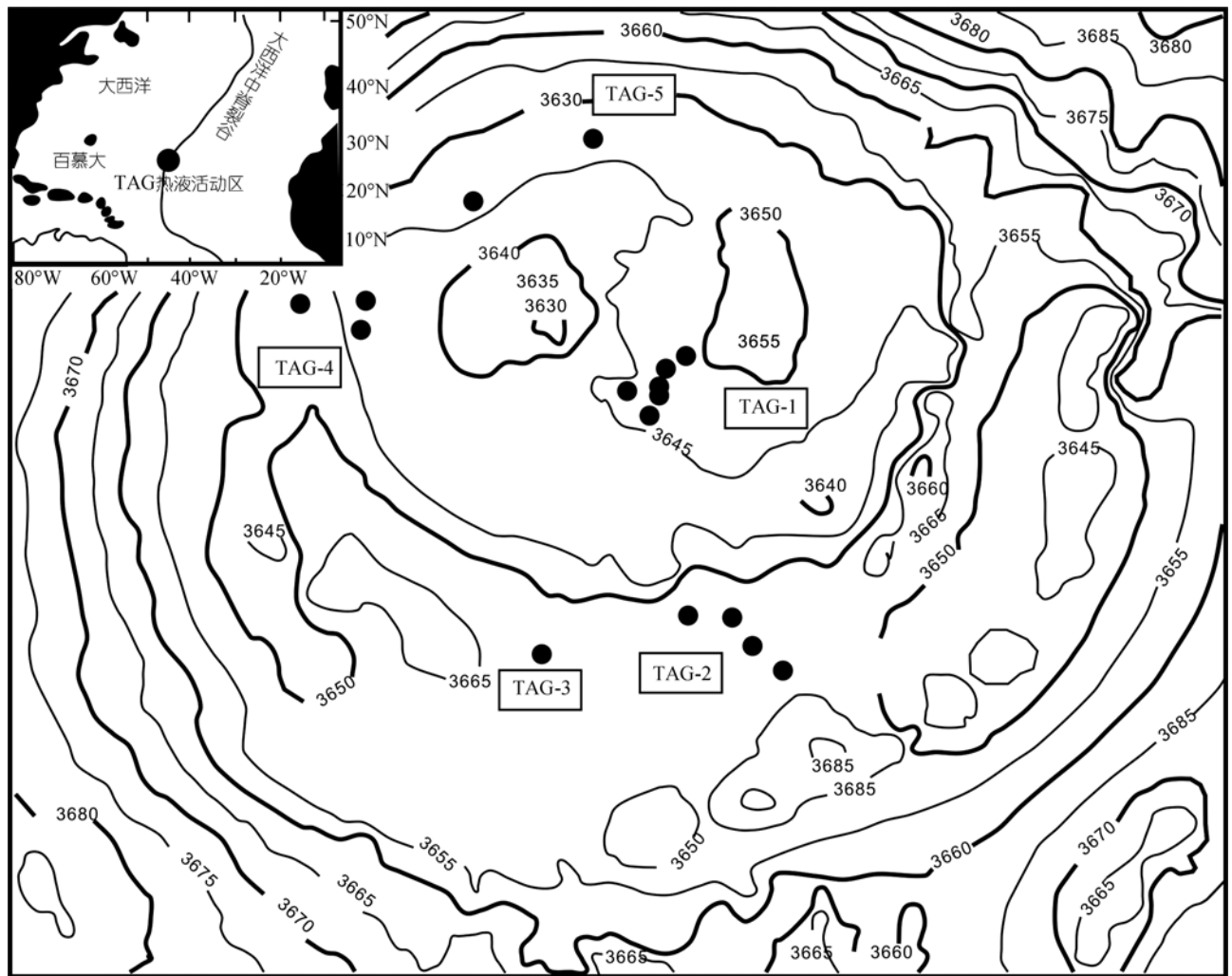


图 1 TAG热液活动区地理位置图^[2]

● ODP 钻孔位置

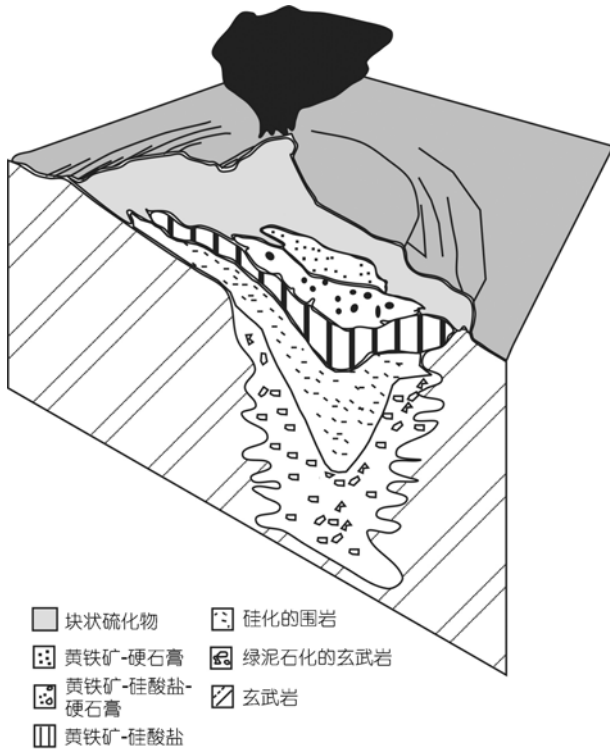


图2 TAG 丘状体的结构示意图

2 海水与热液流体的混合及地质模型

2.1 矿体内部海水与热液流体的混合

同其他大型热液硫化物矿体相比, TAG 区硫化物矿体的突出特征是在其内部发育有大量的硬石膏。这不仅表明 TAG 矿体内部海水与热液流体的混合作用非常广泛, 同时也为研究该矿体内部的流体循环演化过程提供了基础资料。

TAG 的地球化学和同位素组成($\delta^{34}\text{S}$)研究结果证明海水在下渗过程中没有流经该区基岩, 而是直接在硫化物矿体内下渗进入矿体深部^[27,28]。因此, 海水在下渗过程中不会与玄武岩发生反应。其次, TAG 区部分硬石膏包裹体的形成温度达到了 360~390℃, 超过了黑烟囱流体的最高温度(366℃)。因此, 热液端员流体的温度肯定高于黑烟囱流体温度。在此, 把来自于岩水反应区的热液端员流体最高温度设定为 400℃ 应该是合理的。

2.2 混合过程的地质模型

前已述及, 实测资料否定了原始海水(2℃)与热液流体之间混合的可能性。经过升温过程的海水与

热液流体的混合是否就能够解释不同喷出流体之间的关系是需要进一步研究探讨的重要科学问题。本文构建了加热海水与热液流体混合的地质模型(图 3), 并借助于数值方法对该地球化学过程进行了模拟计算。

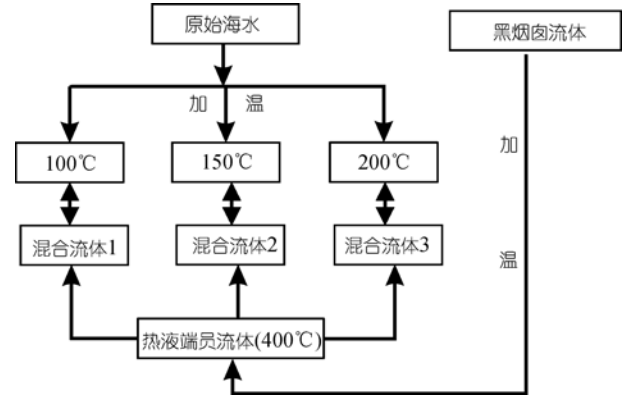


图3 混合过程的地质模型

流体混合过程的模型可以分为两种: 渐进式混合(也称为增量式混合)和一次性混合。一次性混合指两种不同性质的流体按照一定的比例一次性混合得到混合流体; 增量式混合方式则是把定量的某种流体分阶段加入到另外一种流体中。海水与热液流体的混合是一个复杂的过程, 往往是多种形式的高温海水与温度和化学成分相对稳定的热液流体的混合, 绝非单一的二元流体的混合。因此, 一次性的混合方式不能真正反映这样一个复杂过程, 选用海水增量式混合模拟方法才能较好地反映海底之下真实的混合过程。为了更为逼真地模拟计算混合过程, 混合海水增量不能太大(太大容易接近一次性混合模式), 在此海水增量步长为 1%。

MIX 是一个能够用于模拟高温高压环境中不同性质流体混合的 FROTRAN 程序软件^[29,30], 采用了部分 EQ3/6 的算法, 并利用 Newton-Raphson 方法对可溶解和矿物组分的反应方程求解, 其中计算过程中的热力学数据库采用 SUPCRT 92^[31]。为研究海底热液硫化物矿体内部海水与热液流体的混合过程, 作者对 MIX 程序进行了重新编译(EMIX)。EMIX 程序可以分为 3 个模块, 分别是低温流体的加热过程模块, 高温流体的绝热降温过程模块以及不同性质流体的混合过程模块。其组织结构如图 4 所示。

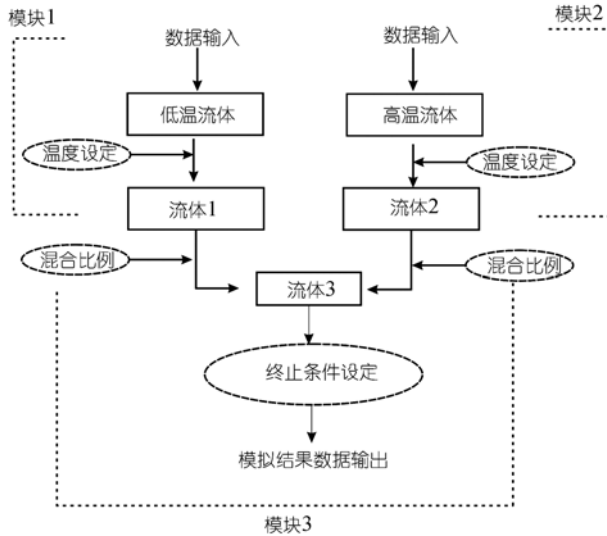


图 4 EMIX 程序的组织结构图

3 模拟计算结果

根据海水与热液流体的混合模型, 把模拟计算过程分为 3 个阶段: 首先是海水的加热过程, 2°C 海水分别被加热到 100, 150 和 200°C; 其次, 对黑烟卤流体(366°C)进行绝热的传导升温过程模拟, 最终升至热液端员流体温度(400°C); 最后, 热液端员流体分别同 100, 150 和 200°C 的海水进行混合. 表 1 给出了 2°C 海水以及 TAG 区黑、白烟卤热液流体的温度范围、pH 和部分元素的化学组成.

3.1 海水的加热过程

图 5 为海水从 2°C 升温到 250°C 的过程中, 海水的 pH, Ca 和 离子浓度以及硬石膏和方解石沉淀量的变化曲线. 图 5(a)表明海水在升温过程中 pH 呈

波动状变化趋势, 经历了降低、升高、降低再升高的过程. 当温度为 150°C 时, pH 最低(约为 6.6). 硬石膏在海水温度高于 100°C 之后开始沉淀, 这与已有的研究结果一致, 其沉淀量呈先增后减的变化(图 5(b)). 另外, 海水加热过程中会有方解石沉淀, 变化趋势同硬石膏相似, 但是沉淀量要小许多, 达到最大值的温度也不一致(图 5(c)). 硬石膏沉淀量在 200°C 时达到最大值, 方解石沉淀量最大值则出现在 150°C 左右. 由于硬石膏和方解石的不断沉淀, 海水中的 Ca 离子浓度在 150°C 之后持续降低(图 5(d)). 海水中 SO_4^{2-} 离子浓度在整个加热过程中逐渐降低, 当海水温度为 100, 150 和 200°C 时, SO_4^{2-} 离子浓度分别为 14.00, 10.80 和 6.36 mmol/kg(图 4(e)).

3.2 黑烟卤流体的升温过程

设定热液端员流体的温度为 400°C, 通过把黑烟卤流体(366°C)传导加热至 400°C 获得热液端员流体. 模拟计算结果表明该过程中没有任何矿物沉淀生成. 因此, 热液端员流体同黑烟卤流体相比, 各化学组分的总量没有变化, 变化最大的是热液流体的 pH(图 6). 随着热液流体温度的升高, pH 呈线性增加趋势, 当温度达 400°C 时, 热液端员流体的 pH 接近 4. pH 是控制热液流体化学组成的重要参数, 一般认为, 热液流体的温度越高, 其 pH 越大. Ding 等^[33]对洋中脊不同喷口处热液流体 pH 进行了长期的原位监测, 观测记录证实热液流体在从 280°C 上升到 380°C 的过程中, 热液流体 pH 呈递增趋势(图 7). 这与作者的数值模拟结果一致.

表 1 TAG 热液活动区黑、白烟卤流体与海水的化学组成

	黑烟卤流体 ^{a)}	白烟卤流体 ^{a)}	白烟卤流体(模拟) ^{b)}	原始海水 ^{c)}
温度/°C	360~366	273~301	290	2
pH	3.35	≤3	2.84	7
Si(OH) ₄ /mmol·kg ⁻¹	20.75	19.1~16.4	17.84	0.116
H ₂ S/mmole·kg ⁻¹	3.68	0.5~0.43	0.77	0
Cl/mmole·kg ⁻¹	636	623	623	542
Na/mmole·kg ⁻¹	557	533	533	465
K/mmole·kg ⁻¹	17.1	17.1~16.13	16.13	10.1
Ca/mmole·kg ⁻¹	30.8	27~24.65	25.02	10.2
Fe/μmol·kg ⁻¹	5590	3830~3294	3535	0.001
Cu/μmol·kg ⁻¹	240	3~2.6	56.4	0.004
Zn/μmol·kg ⁻¹	46	300~400, 244~344	344	0.006

a) Edmond 等^[21]. b) Tivey 等^[2]. c) Gallant 和 Von Damm^[32]

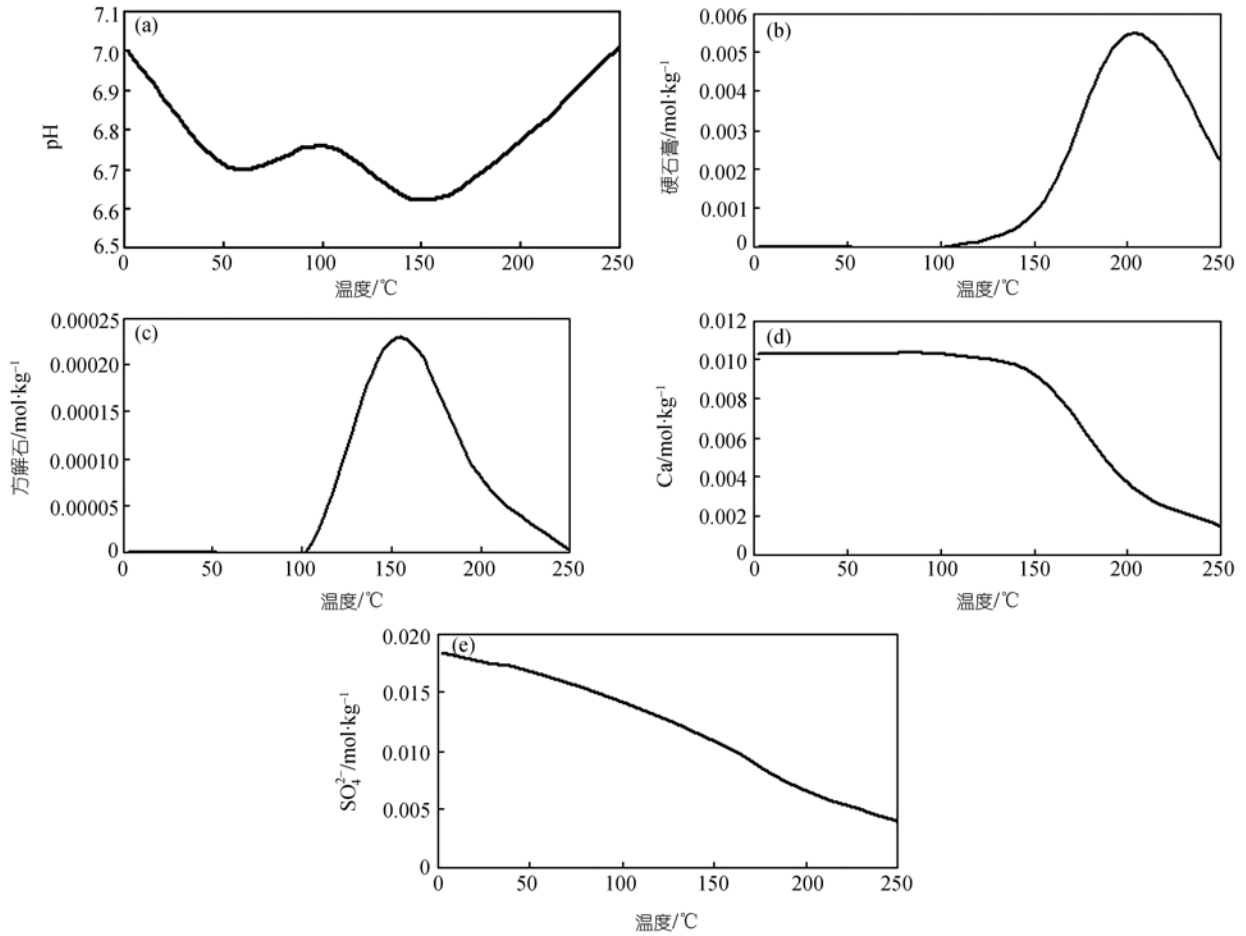


图 5 海水加热过程中重要指标的变化(2~250°C)

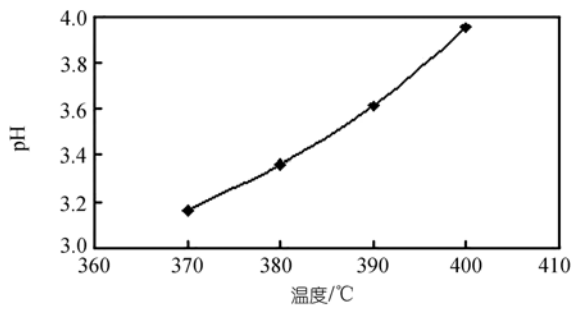


图 6 黑烟囱流体升温过程中 pH 变化

3.3 混合过程的模拟计算

研究表明TAG区白烟囱流体的Mg离子浓度比较稳定, 约为 7.4 mmol/kg^[2]. 混合流体中的Mg全部来自海水, 且在混合过程中性质稳定, 不会参与矿物沉淀过程, 因此选定Mg作为混合过程的示踪元素. 当混合流体中Mg组分浓度达到 7.4 mmol/kg时, 模拟程序终止. 另外, 已有的模拟实验结果表明在混合

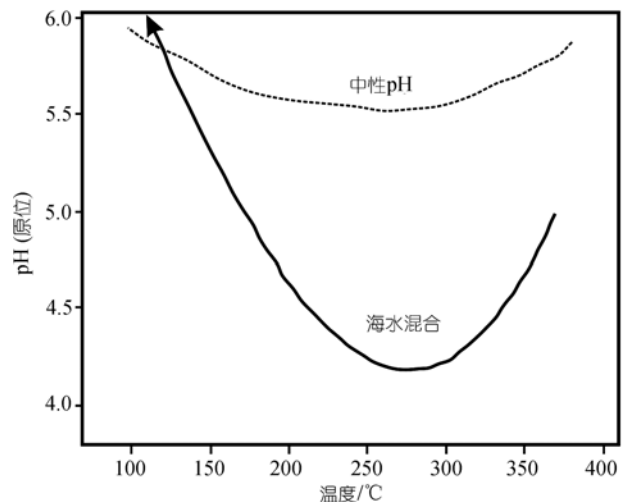


图 7 实测热液流体 pH 的变化

过程中沉淀矿物主要为石英、斑铜矿、黄铁矿和硬石膏等. 因此, 混合流体中 Ca, Fe, Cu, Si 和 H₂S_(aq)等组

分的浓度变化比较剧烈, 其他元素, 例如 Na, K, Mn 等组分浓度的变化仅仅代表了二元流体之间的简单混合, 对混合过程中矿物沉淀的指示意义不大. 因此, 模拟计算结果主要给出了混合流体中 Ca, Fe, Cu, Si 和 $H_2S_{(aq)}$ 等组分浓度以及 pH 的变化.

3.3.1 100°C 海水与热液流体混合

模拟计算结果表明当混合流体中 Mg 离子浓度达到 7.4 mmol/kg 时, 混合流体的温度为 358°C, Ca, Fe, Cu, Si 和 $H_2S_{(aq)}$ 等组分浓度分别为 27.7, 4.89, 0.206, 15.3, 0.372 mmol/kg (表 2), 混合过程中只有硬石膏沉淀. 同 TAG 区白烟囱流体的实测资料和 Tivey 等^[2] 的模拟结果 (表 1) 相比较, 该情况下混合流体中 Fe, Cu, Si 和 $H_2S_{(aq)}$ 等组分浓度与实际情况有较大偏差. 这表明仅仅利用热液端元流体同 100°C 海水的简单混合并不能解释 TAG 矿体内部的流体混合过程.

热液流体在矿体内部上升直到喷出的过程中会经历传导降温过程, 因此有必要对混合流体继续进行封闭式降温过程的模拟计算. TAG 区白烟囱流体的观测温度范围是 273~301°C, 表 2 给出了经过降温过程模拟之后, 此温度范围内热液混合流体的 pH 以及 Ca, Fe, Cu, Si 和 $H_2S_{(aq)}$ 等组分浓度. 结果表明混合流体在传导降温的过程中 (298~268°C), 没有硬石膏沉淀, 因此 Ca 离子浓度变化不大, 为 27.3 mmol/kg, 同白烟囱流体的 Ca 离子浓度 (27.0 mmol/kg) 基本一致. 另外, 降温过程中斑铜矿、石英和黄铁矿先后达到饱和, 产生沉淀. 这使得混合流体中的 Cu, Fe, Si 离子浓度逐渐降低. 其中, Fe 离子浓度变化范围是 4.73~3.81 mmol/kg, 与白烟囱流体 Fe 的实测浓度值 (3.83

mmol/kg) 基本相符. Cu 离子浓度变化范围是 0.0848~0.0475 mmol/kg, 虽然比实测白烟囱体流体中 Cu 离子浓度 (0.003 mmol/kg) 高许多, 但同 Tivey 等^[2] 模拟的白烟囱流体的 Cu 离子浓度 (0.0563 mmol/kg) 相差不大. Si 离子浓度变化范围是 10.8~8.32 mmol/kg, 同白烟囱流体的 Si 离子浓度 (19.1 mmol/kg) 相比略小. $H_2S_{(aq)}$ 浓度变化范围为 2.98~1.46 mmol/kg, 比白烟囱流体中 $H_2S_{(aq)}$ 浓度 (0.50~0.43 mmol/kg) 高. 因为 Si 和 $H_2S_{(aq)}$ 的浓度变化在很大程度上受流体 pH 控制, 作者认为在该混合过程中二者浓度与实测和 Tivey 等^[2] 模拟结果出现偏差, 应该是与 pH 的计算方法以及流体的混合模拟计算方式有关.

3.3.2 150°C 海水与热液流体混合

当混合流体中 Mg 离子浓度达到 7.4 mmol/kg 时, 混合流体温度为 365°C, 比 100°C 海水的混合流体温度 (358°C) 高, 而 Ca, Fe, Cu, Si 和 $H_2S_{(aq)}$ 等组分浓度大致相同 (表 3). 对该混合流体进行封闭式传导降温过程模拟计算, 结果表明在温度从 305°C 降到 275°C 的过程中, 混合流体中斑铜矿和石英一直饱和, 并有沉淀生成, 黄铁矿只是在温度低于 295°C 时才达到饱和. 因此, 同 100°C 海水的混合模拟计算实验结果相比, 混合流体中 Fe 离子浓度偏高, 其变化范围是 4.87~4.14 mmol/kg, 高于白烟囱流体中 Fe 的实测浓度值 (3.83 mmol/kg). Cu 离子浓度变化范围 0.1200~0.0573 mmol/kg, 高于实测的白烟囱流体中 Cu 离子浓度 (0.003 mmol/kg), 比 Tivey 等^[2] 的模拟结果 (0.0564 mmol/kg) 也略高. 另外, Si 离子浓度变化范围是 10.40~8.85 mmol/kg, 比实测白烟囱流体中 Si 离

表 2 100°C 海水与热液端元流体混合过程模拟计算结果^{a)}

混合流体		传导降温过程				
温度/°C	358	温度/°C	298	288	278	268
pH	3.30	pH	2.80	2.71	2.63	2.58
Ca/mmole · kg ⁻¹	27.7	Ca/mmole · kg ⁻¹	27.3	27.3	27.3	27.3
Fe/mmole · kg ⁻¹	4.89	Fe/mmole · kg ⁻¹	4.73	4.38	4.09	3.81
Cu/mmole · kg ⁻¹	0.2060	Cu/mmole · kg ⁻¹	0.0848	0.0729	0.0599	0.0475
Si/mmole · kg ⁻¹	15.30	Si/mmole · kg ⁻¹	10.80	9.91	9.10	8.32
$H_2S_{(aq)}$ /mmole · kg ⁻¹	3.72	$H_2S_{(aq)}$ /mmole · kg ⁻¹	2.98	2.36	1.86	1.46
黄铁矿		黄铁矿	√	√	√	√
斑铜矿		斑铜矿	√	√	√	√
石英		石英	√	√	√	√
硬石膏	√	硬石膏				

a) √表示该混合阶段沉淀出该种矿物, 下同

表 3 150℃海水与热液端员流体混合过程模拟计算结果

混合流体 2		传导降温过程				
温度/℃	365	温度/℃	305	295	285	275
pH	3.43	pH	2.82	2.75	2.66	2.60
Ca/mmol·kg ⁻¹	27.4	Ca/mmol·kg ⁻¹	26.9	26.9	26.9	26.9
Fe/mmol·kg ⁻¹	4.89	Fe/mmol·kg ⁻¹	4.87	4.76	4.41	4.14
Cu/mmol·kg ⁻¹	0.2060	Cu/mmol·kg ⁻¹	0.1200	0.0834	0.0706	0.0573
Si/mmol·kg ⁻¹	15.30	Si/mmol·kg ⁻¹	11.40	10.50	9.66	8.85
H ₂ S _(aq) /mmol·kg ⁻¹	3.72	H ₂ S _(aq) /mmol·kg ⁻¹	3.11	2.89	2.28	1.80
黄铁矿		黄铁矿		√	√	√
斑铜矿		斑铜矿	√	√	√	√
石英		石英	√	√	√	√
硬石膏	√	硬石膏				

表 4 200℃海水与热液端员流体混合过程模拟计算结果

混合流体 3		传导降温过程				
温度/℃	372	温度/℃	302	292	282	272
pH	3.52	pH	2.80	2.73	2.66	2.59
Ca/mmol·kg ⁻¹	27.0	Ca/mmol·kg ⁻¹	26.9	26.9	26.9	26.9
Fe/mmol·kg ⁻¹	4.89	Fe/mmol·kg ⁻¹	4.87	4.73	4.42	4.17
Cu/mmol·kg ⁻¹	0.2060	Cu/mmol·kg ⁻¹	0.1120	0.0794	0.0664	0.0534
Si/mmol·kg ⁻¹	15.30	Si/mmol·kg ⁻¹	11.10	10.30	9.42	8.63
H ₂ S _(aq) /mmol·kg ⁻¹	3.72	H ₂ S _(aq) /mmol·kg ⁻¹	2.82	2.56	2.01	1.57
黄铁矿		黄铁矿		√	√	√
斑铜矿		斑铜矿	√	√	√	√
石英		石英	√	√	√	√
硬石膏		硬石膏				

子浓度 (19.10 mmol/kg) 低。H₂S_(aq) 浓度范围为 3.11~1.80 mmol/kg, 高于实测白烟囱流体的 H₂S_(aq) 浓度 (0.50~0.43 mmol/kg)。

3.3.3 200℃海水与热液流体混合

表 4 给出了 200℃海水同热液流体混合, 以及混合流体经传导降温过程之后的模拟计算结果。结果表明当混合流体中 Mg 离子浓度为 7.4 mmol/kg 时, 混合流体温度为 272℃, 高于以上两种情况下的混合温度。但是, 在混合过程中没有矿物达到饱和, 这与以上两个过程中都有硬石膏沉淀的情况不同。海水加热升温过程中 SO₄²⁻ 离子的变化曲线显示, 200℃海水中 SO₄²⁻ 浓度为 6.36 mmol/kg, 明显低于 100℃ (14.00 mmol/kg) 和 150℃海水 (10.80 mmol/kg) (图 5(e))。因此, 在该混合过程中没有出现硬石膏沉淀应该与 200℃海水中 SO₄²⁻ 浓度较低有关。混合流体在降温过程中的矿物沉淀情况同 150℃海水的混合模拟计算结果相同, 斑铜矿和石英在降温过程中一直处于饱和,

并有沉淀生成, 黄铁矿只是在低于 295℃的温度条件下才出现沉淀。在混合流体从 300℃降温到 270℃的过程中, Ca 离子浓度保持不变, 为 26.9 mmol/kg, 同白烟囱流体浓度 (27.0 mmol/kg) 相当。Fe, Cu, Si 和 H₂S_(aq) 的离子浓度变化范围是与 150℃海水的混合过程计算结果相比变化不大, 分别为 4.87~4.17, 0.1120~0.0534, 11.10~8.93 和 2.130~0.921 mmol/kg。

4 结果讨论

4.1 黑、白烟囱流体的关系

热液流体在上升过程中大都会经历传导降温过程, 因此黑烟囱流体并不能真实反映矿体内部热液流体的性质。本文把热液端员流体温度设定为 400℃, 并通过 TAG 区黑烟囱流体进行模拟升温获取热液端员流体的物理化学参数。升温过程的计算结果表明 400℃热液端员流体同黑烟囱流体相比, 各组分的总量没有发生变化。但是, 随着热液流体温度的升高, 其 pH 逐渐增加, 400℃热液端员流体的 pH 接近 4。

通过对 3 种混合模式的计算结果同 TAG 区热液流体化学组成的实测资料以及 Tivey 等^[2]的模拟计算结果进行对比, 发现经过加热过程的海水(100, 150 和 200°C)与热液端员流体(400°C)的混合流体与白烟囱流体相差较大. 因此, 简单的海水与热液流体混合不能够解释 TAG 区黑、白烟囱流体之间的关系. 但是, 对混合流体进行封闭式传导降温过程的模拟计算结果表明混合流体(270~300°C)的化学组成(包括 Ca, Fe, Cu, Si 和 $H_2S_{(aq)}$ 等), 同实际观测所得的白烟囱流体的化学组成比较相近. 因此, TAG 热液活动区黑、白烟囱喷出流体在成因上具有非常紧密的联系, 经过升温过程改造的海水与热液流体的混合反应可以解释该区内黑、白烟囱流体之间在化学组成上的差异.

同时, 通过分析 3 种混合情况下混合流体(270~300°C)中 Fe 组分浓度的变化, 表明当海水温度超过 150°C 后, 经过降温过程的混合流体(270~300°C)中 Fe 组分浓度超出了白烟囱流体的 Fe 组分的浓度变化范围. 因此, 海水在下渗过程中被改造程度是有限的, 其温度应该不会超过 150°C.

4.2 硬石膏的沉淀机制

TAG 区热液硫化物矿体内部发育有大量硬石膏. 从模拟计算结果可以发现, 硬石膏的沉淀主要受到两种地质过程的控制: 其一, 海水在下渗过程中被加热, 当海水温度高于 100°C 时, 硬石膏达到饱和产生沉淀; 其二, 热液流体同加热海水的混合过程中会产生硬石膏沉淀.

当混入海水的温度超过 200°C 时, 混合过程中没有硬石膏沉淀生成, 这可能因为海水在持续加热过程中, 出现大量硬石膏沉淀, 从而造成海水中离子浓度过低有关. 热液流体同 100 和 150°C 海水的混合过程中都有硬石膏沉淀生成, 沉淀温度可达 365°C. 如此高的矿物沉淀温度能够解释为什么热液硫化物矿体内部部分硬石膏包裹体的温度较高, 甚至高于黑烟囱流体的喷出温度. 但是, 实测结果表明硬石膏包裹体的最高形成温度可达 390°C, 作者认为这可能与本文设定的热液端员流体温度为 400°C 有关, 实际情况中热液端员流体的温度可能还会高于这个温度.

另外, 如果不考虑热液流体同围岩发生物质交

换, 混合流体在传导降温过程中, 即混合后的流体在矿体内向上运移直至喷出海底的过程中不会有硬石膏的生成.

4.3 TAG 硫化物丘状体内部的流体演化模式

Tivey 等^[2]认为 2°C 海水与黑烟囱流体的混合过程可以解释 TAG 热液活动区黑、白烟囱流体之间在化学组成以及 pH 等方面的不同. 但是, 实际情况并非如此. 在模拟计算结果的基础上, 结合 TAG 区的硬石膏包裹体的实测资料, 可以更清晰地探讨 TAG 热液硫化物矿体内部流体演化模式(图 8). 海水在热液硫化物矿体(低温区, 或者裂缝区)下渗进入矿体内部, 下渗过程中被围岩加热, 当温度高于 100°C 时, 硬石膏达到饱和并产生沉淀. 经过加热过程的海水同来自于海底之下的高温热液流体发生混合, 混合流体沿着裂缝向上运移, 与此同时流体温度逐渐降低, 直到喷出海底, 形成白烟囱. 另外, 还有一部分热液流体未与海水发生混合反应, 直接沿着裂缝向上运移, 上升过程中温度逐渐降低, 喷出海底之后形成黑烟囱.

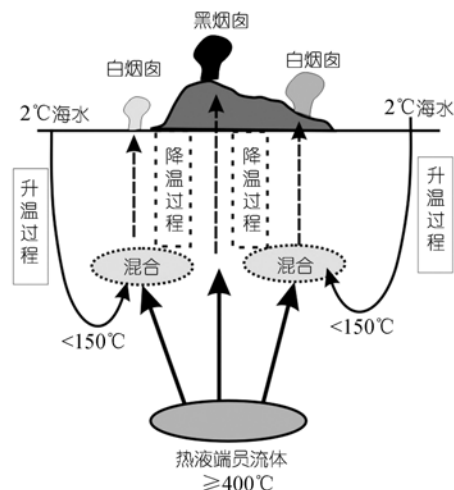


图 8 TAG 热液硫化物矿体内部流体演化模式

5 主要结论

(1) 在黑(高温)、白(相对低温)烟囱同时存在的海底热液活动区(以 TAG 热液区为例), 矿体内的流体经历了复杂的演化模式. 首先, 海水(2°C)在沿裂缝下渗的过程中被加热, 其物理化学性质参数会发生相应的变化; 其次, 加热后的海水与高温的热液端员流体混合, 出现大量硬石膏沉淀; 最后, 与海水混合后的热

液流体通过传导降温 and 上升过程喷出海底, 该过程主要形成了白烟囱和相对低温的黑烟囱. 部分未与加热海水混合的热液端元流体通过传导降温过程上升喷出海底, 则形成喷溢高温热液流体的黑烟囱.

(2) 下渗海水被加热应该不会高于 150°C, 而热液端元流体的最高温度则应该高于 400°C.

(3) 下渗海水的加热过程和海水与热液的混合过程是控制矿体内硬石膏矿物沉淀的两个主要过程. 热液流体在传导降温上升过程中, 性质变化不大, 不会造成大量矿物的沉淀, 热液流体喷出海底的突然降温和与海水的混合应该是硫化物等矿物大量沉淀的机制.

致谢 日本 Hiroshima 大学的 Hoshino 教授为本文的数值模拟工作提供了 MIX 源程序, 并在实验过程中给予了许多有价值的建议, 在此对 Hoshino 教授的无私帮助表示诚挚的谢意; 感谢审稿人提出的建设性意见.

参考文献

- 1 曾志刚, 翟世奎, 赵一阳, 等. 大西洋中脊 TAG 热液活动区中热液沉积物的稀土元素地球化学特征. 海洋地质与第四纪地质, 1999, 19(3): 59—66
- 2 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 Geophys Res*, 1995, 100(B7): 12527—12555 [\[DOI\]](#)
- 3 Knott R, Fouquet Y, Honnorez Y, et al. Petrology of hydrothermal mineralization: a vertical section through the TAG mound. *Proc ODP, Sci Results*, 1998, 158: 5—26
- 4 Rona P A, Thompson M J, Mottl J A, et al. Hydrothermal activity at the TAG hydrothermal field, Mid-Atlantic Ridge crest at 26°N. *J Geophys Res*, 1984, 89: 11365—11377 [\[DOI\]](#)
- 5 Petersen S, Herzig P, Hanington. Third dimension of presently forming VMS deposit: TAG hydrothermal mound, Mid-Atlantic Ridge, 26°N. *Miner Depos*, 2000, 35: 233—259 [\[DOI\]](#)
- 6 Zonenshain L P, Kuzmin M I, Lisitsyn A P, et al. Tectonics of the mid-Atlantic rift valley between TAG and MARK areas(26~24°N): Evidence for vertical tectonism. *Tectonophysics*, 1989, 159: 1—23 [\[DOI\]](#)
- 7 Rona P, Klinkhammer G, Nelsen T A, et al. Black smokers, massive sulfides, and vent biota at the Mid-Atlantic Ridge. *Nature*, 1986, 321: 33—37 [\[DOI\]](#)
- 8 Rona P A, Hanington M D, Raman C V, et al. Active and relict sea-floor hydrothermal mineralization at the TAG hydrothermal field, Mid-Atlantic Ridge. *Econ Geol*, 1993, 88: 1989—2017
- 9 Herzig P M, Petersen S, Hanington M D. Geochemistry and sulfur-isotopic composition of the TAG hydrothermal mound, Mid-Atlantic Ridge, 26°N. *Proc ODP, Sci Results*, 1998, 158: 47—70
- 10 Gemell J B, Sharpe R. Detailed sulfur-isotope investigation of the TAG hydrothermal mound and stockwork zone, 26°N, Mid-Atlantic Ridge. *Proc ODP, Sci Results*, 1998, 158: 71—84
- 11 Chiba H, Uchiyama N, Teagle A H. Stable isotope study of anhydrite and sulfide minerals at the TAG hydrothermal mound, Mid-Atlantic Ridge, 26°N. *Proc ODP, Sci Results*, 1998, 158: 85—90
- 12 Humphris S E. Rare Earth Element composition of anhydrite: Implications for deposition and mobility within the active TAG hydrothermal mound. *Proc ODP, Sci Results*, 1998, 158: 143—159
- 13 Rona P A, Davis E E, Ludwig R J. Thermal properties of TAG hydrothermal precipitates, Mid-Atlantic Ridge, and comparison with Middle Valley, Juan de Fuca Ridge. *Proc ODP, Sci Results*, 1998, 158: 329—335
- 14 Ludwig R J, Iturrino, Rona P A. Seismic velocity-porosity relationship of sulfide, sulfate, and basalt samples from the TAG hydrothermal mound. *Proc ODP, Sci Results*, 1998, 158: 313—327
- 15 Fouquet Y, Henry K, Knott R, et al. Geochemical section of the TAG hydrothermal mound. *Proc ODP, Sci Results*, 1998, 158: 363—387
- 16 曾志刚, 秦蕴珊, 赵一阳, 等. 大西洋 TAG 热液活动区海底热液沉积物的硫同位素组成及其地质意义. 海洋与湖沼, 2000,

- 31(5): 518—529
- 17 曾志刚, 秦蕴珊, 翟世奎. 大西洋中脊 TAG 热液区硫化物中流体包裹体的 He-Ne-Ar 同位素组成. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2000, 30(6): 628—633
- 18 曾志刚, 秦蕴珊, 翟世奎. 大西洋中脊海底表层热液沉积物的铅同位素组成及其地质意义. 青岛海洋大学学报, 2001, 31(1): 103—109
- 19 曾志刚, 翟世奎, 杜安道. 大西洋中脊 TAG 热液区中块状硫化物的 Os 同位素研究. 沉积学报, 2002, 20(3): 394—398
- 20 蒋少涌, 杨涛, 李亮, 等. 大西洋中脊 TAG 热液区硫化物铅和硫同位素研究. 岩石学报, 2006, 22(10): 2597—2602
- 21 Edmond J M, Campbell A C, German C R, et al. Time series studies of vent fluids from the TAG and MARK sites (1986,1990) Mid-Atlantic Ridge and a mechanism for Cu/Zn zonation in massive sulphide orebodies. Hydrothermal Vents and Processes, Special Publication, Geological Society of London, 1995. 77—86
- 22 Mills R A, Damon A H, Tivey M K. Fluid mixing and anhydrite precipitation within the TAG mound. Proc ODP, Sci Results, 1998, 158: 119—127
- 23 Petersen S, Herzig P M, Hannington M D. Fluid inclusion studies as a guide to the temperature regime within the TAG hydrothermal mound, 26°N, Mid-Atlantic Ridge. Proc ODP, Sci Results, 1998, 158: 163—178
- 24 Thompson G, Mottl M J, Rona P A. Morphology, mineralogy, and chemistry of hydrothermal deposits from the TAG area, 26°N, Mid-Atlantic Ridge. Chem Geol, 1985, 49: 243—257 [\[DOI\]](#)
- 25 Rona P A, Bogdanov Y A, Gurvich Y A, et al. Relict hydrothermal zones in the TAG hydrothermal field, Mid-Atlantic Ridge. J Geophys Res, 1993, 98: 9715—9730 [\[DOI\]](#)
- 26 Lalou C, Reyss J L, Bricquet E, et al. New age data for Mid-Atlantic Ridge hydrothermal sites: TAG and Snake Pit chronology revised. J Geophys Res, 1993, 98: 9705—9713 [\[DOI\]](#)
- 27 Chiba H, Uchiyama N, Damon A H. Stable isotope study of anhydrite and sulfide minerals at the TAG hydrothermal mound. Mid-Atlantic Ridge, 26°N. Proc ODP, Sci Results, 1998, 158: 85—90
- 28 Tivey M K, Mills R A, Damon A H. Temperature and salinity of fluid inclusions in anhydrite as indicators of seawater entrainment and heating in the TAG active mound. Proc ODP, Sci Results, 1998, 158: 179—190
- 29 Hoshino K, Yamamoto Y, Gu X, et al. Preliminary examination of the Ore-forming process by fluid mixing—a test of MIX99. Res Geol, 2000, 50: 185—190
- 30 Hoshino K, Itami T, Shiokawa R, et al. A possible role of boiling in ore deposition: a numerical approach. Res Geol, 2006, 56: 49—54
- 31 Johnson J W, Oelkers E H, Helgeson H C. SUPCRT92, a software package for calculating the standard molal thermodynamic properties of minerals, gases, aqueous species, and reactions from 1-bar to 5000-bar and 0°C to 1000°C. Comput Geotech, 1992, 18: 899—947
- 32 Gallant R M, Von Damm K L. Geochemical controls on hydrothermal fluids from the Kairei and Edmond Vent Fields, 23°—25°S, Central Indian Ridge. Geochem Geophys Geosyst, 2006, 7: 1—24
- 33 Ding K, Seyfried W E, Zhang Z, et al. The *in situ* pH of hydrothermal fluids at mid-ocean ridges. Earth Planet Sci Lett, 2005, 237: 167—174 [\[DOI\]](#)