



西太平洋弧后盆地的热液系统及其岩浆环境研究

曾志刚, 张玉祥, 陈祖兴, 李晓辉, 齐海燕, 王晓媛, 陈 帅, 殷学博

Seafloor hydrothermal system and its magmatic setting in the western Pacific back-arc basins

ZENG Zhigang, ZHANG Yuxiang, CHEN Zuxing, LI Xiaohui, QI Haiyan, WANG Xiaoyuan, CHEN Shuai, and YIN Xuebo

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2021070101>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

北康盆地基底卷入断层特征及其对南海南部构造演化的启示

Features of the basement-involved faults in the Beikang Basin and their implications for the tectonic evolution of the southern South China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(4): 116



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2021070101

西太平洋弧后盆地的热液系统及其岩浆环境研究

曾志刚^{1,2,3,4}, 张玉祥^{1,2,3,5}, 陈祖兴^{1,2,3,5}, 李晓辉^{1,2}, 齐海燕^{1,2,3,5}, 王晓媛^{1,2,5},
陈帅^{1,2,5}, 殷学博^{1,2,5}

1. 中国科学院海洋研究所, 青岛 266071
2. 中国科学院海洋地质与环境重点实验室, 青岛 266071
3. 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 266237
4. 中国科学院大学, 北京 100049
5. 中国科学院海洋大科学研究中心, 青岛 266071

摘要: 研究海底热液系统及其岩浆环境, 可为了解西太平洋流固界面跨圈层物质与热交换过程, 揭示板块俯冲过程的岩浆活动和资源环境效应提供研究支撑。为此, 研究了冲绳海槽热液活动的岩浆环境、马努斯海盆的热液柱以及弧后盆地和洋中脊背景下的硫化物与玄武岩的同位素组成, 对冲绳海槽热液区附近玄武岩、安山岩、粗安岩、英安岩、流纹岩及其基性岩浆包体进行了岩相学、矿物学以及主量元素、微量元素和同位素组成分析, 对马努斯海盆 PACMANUS 和 Desmos 热液区的热液柱及海水进行了测量, 在海底热液区岩浆混合过程及时间尺度、透视冲绳海槽深部岩浆房及岩浆演化过程和岩浆对热液系统物质贡献研究方面获新进展, 揭示了俯冲蛇纹岩对琉球构造带南部岩浆活动的影响, 论证了熔体包裹体对弧后盆地岩浆演化的指示, 获得了冲绳海槽玄武质岩浆来源新证据, 揭示了弧后盆地与洋中脊硫化物和玄武岩中铁、铜、锌的来源及其同位素在硫化物形成和岩浆活动过程中的分馏情况, 明确了热液柱的物理、化学空间结构与物质组成特征, 以及热液柱的扩散受深度和底流流速的影响, 且热液柱扩散过程中溶解铁浓度异常比溶解锰的维持时间更长。未来, 发展非传统稳定同位素和挥发份测试技术, 进一步了解西太平洋板块俯冲环境下热液活动与岩浆作用的关系, 将有助于海底热液系统及其成矿过程研究获得新进展。

关键词: 海底热液系统; 岩浆作用; 深海; 弧后盆地; 西太平洋

中图分类号: P736 **文献标识码:** A

Seafloor hydrothermal system and its magmatic setting in the western Pacific back-arc basins

ZENG Zhigang^{1,2,3,4}, ZHANG Yuxiang^{1,2,3,5}, CHEN Zuxing^{1,2,3,5}, LI Xiaohui^{1,2}, QI Haiyan^{1,2,3,5}, WANG Xiaoyuan^{1,2,5},
CHEN Shuai^{1,2,5}, YIN Xuebo^{1,2,5}

1. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China
2. CAS Key Laboratory of Marine Geology and Environment, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China
3. Laboratory for Marine Mineral Resources, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266237, China
4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
5. Center for Ocean Mega-Science, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China

Abstract: The study of seafloor hydrothermal system and its magmatic setting can provide effective research support for understanding the material and heat exchange processes across the multi-spheric fluid-solid interfaces in the western Pacific. In order to reveal the magmatic activities, mineral deposition and environmental responses to plate subduction, the magmatic setting of Okinawa Trough hydrothermal systems, hydrothermal plume of Manus basin, isotopic composition of sulfide and basalt in back arc basins and mid-ocean ridges are carefully studied in this paper. The petrographic, mineralogical, major and trace elements, and isotopic composition for basalt, andesite, trachyandesite, dacite,

资助项目: 国家自然科学基金“西太平洋俯冲体系中岩浆活动及其对热液物质供给的制约”(91958213); 全球变化与海气相互作用专项课题“菲律宾海板块西边界及东南边界俯冲系统的岩浆构造演化”(GASI-GEOGE-02); 中国科学院国际合作局对外合作重点项目“冲绳海槽热液活动成矿机理及其沉积效应”(133137KYSB20170003); 大洋“十三五”深海资源潜力评估项目课题“海底多金属硫化物及金属软泥的成矿机理”(DY135-G2-1-02); 泰山学者工程专项“特聘专家资助计划项目”(ts201511061); 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目“典型弧后盆地热液活动及其成矿机理”(2013CB429700)

作者简介: 曾志刚(1968—), 男, 博士, 研究员, 从事海底热液活动及成矿研究, E-mail: zgzheng@qdio.ac.cn

收稿日期: 2021-07-01; **改回日期:** 2021-08-26. 周立君编辑

rhyolite and their basic magmatic enclaves near the Okinawa Trough hydrothermal field have been carried out, whereas the hydrothermal plume and seawater measurement in PACMANUS and Desmos hydrothermal fields of the Manus basin studied. The results have successfully revealed the magmatic mixing process and time scale, the deep magmatic chamber and magma evolution process, the contribution of magma to the hydrothermal system in the Okinawa Trough as well as the influence of subduction serpentinite on magmatic activity in the southern Ryukyu subduction zone. Melt inclusions are used as the mean to study the evolution of the back-arc basin magma, and the new evidence of the source of basaltic magma in the Okinawa Trough. The origin of iron, copper and zinc in the sulfide and basalts of the mid-ocean ridges and the back-arc basins, and the iron, copper, and zinc isotopic fractionation during sulfide formation and magmatic activity are discussed. The physical and chemical spatial pattern and material composition characteristics of the hydrothermal plume have been defined. It seems that the diffusion depth of the hydrothermal plume is affected by local seawater depth and bottom current, and the concentration anomaly of the dissolved Fe may remain for longer time than dissolved Mn during lateral plume dispersal. In the future, non-traditional stable isotopes and volatile analytical technology should be adopted for further understanding of the relationship between hydrothermal activity and magmatism under plate subduction environment taking the western Pacific as a research case so as to know more about the seafloor hydrothermal system and its ore-forming processes.

Key words: seafloor hydrothermal system; magmatism; deep-sea; back-arc basin; western Pacific

近 23 年的调查研究,使我们认识到分布于洋中脊、弧后盆地、岛弧以及热点等环境的海底热液活动发育在多种围岩类型之上,包括超基性岩石、基性岩石、中性岩石、酸性岩石和沉积物,且海底热液流体循环受到了岩浆去气作用、流体-岩石/沉积物相互作用和流体-海水混合等过程的影响,获取了岩浆、岩石、海水和沉积物的物质贡献,产生了高温、低氧、高或低 pH 值、富含 Fe、Mn、Cu、Zn、Pb、Hg、As 等元素以及气体组分(甲烷、氢等)的喷口流体,形成了热液柱、硫化物、含金属沉积物和蚀变岩石等热液产物,并影响了海水、沉积、岩石和生物环境,从而组成了海底热液系统^[1]。同时,海底热液喷口区的地质、物理及化学特征为了解海底热液系统的形成和演化、确定海底热液成矿物质来源和重建成矿过程提供了重要线索。为此,我们已先后对东太平洋海隆(East Pacific Rise, EPR) 13°N 附近的玄武岩和火山玻璃样品、东海陆架边缘玄武岩和冲绳海槽南端流纹岩中的角闪石进行了研究,揭示了 EPR 13°N 附近玄武质岩浆的演化过程,划分了 EPR 13°N 附近玄武岩中斜长石微斑晶和玄武质玻璃边缘的化学蚀变类型,明确了东海陆架边缘玄武质岩浆形成过程中的温度、压力和氧逸度条件,揭示了冲绳海槽南端流纹岩中角闪石的结晶环境及成因,这对深入认识洋中脊和弧后盆地热液活动期间的蚀变过程和化学交换,明确洋中脊、东海和冲绳海槽岩浆活动的形成、演化具有重要的意义,有助于了解大陆架与弧后盆地形成演化过程的内在联系以及冲绳海槽南北差异的形成机制,评估全球洋壳蚀变过程中的整体地球化学收支情况,并可为海底热液活动的物源体系及硫化物等热液产物形成机理研究提供工作基础^[1]。

进一步,在海底热液产物研究方面,进行了热液流体中 REE 对海底热液过程的示踪分析,揭示了海水对 EPR 13°N 附近热液硫化物中元素的改造情况,提出了两种新的计算热液柱温度异常值的方法,建立了龟山岛热液区自然硫烟囱体的形成模式,并分别探讨了大西洋 TAG 热液区和冲绳海槽 Jade 热液区中热液硫化物以及龟山岛热液区自然硫烟囱体中 REE、硫、铅、钼与稀有气体的来源和演化,明确了冲绳海槽 Jade 热液区硫化物的形成年代,认识到热液柱颗粒物的快速沉淀导致了 EPR 13°N 附近 Si-Fe-Mn 羟基氧化物中的低 REE 含量和偏高的 Mn 含量,分析了 EPR 热液硫化物的资源潜力。进而指出了 EPR 13°N 附近热液 Fe-羟基氧化物中元素富集的机理、海水和热液柱的物质供给以及与其他海区 Fe-羟基氧化物不同的原因,论证了 PACMANUS 热液区中 Si-Fe-Mn 氧化物显微结构的形成过程、Si-Fe-Mn 羟基氧化物的成因以及 Si-Mn 质核和 Si 质核的形成过程及其与生物活动的关系,阐述了 EPR 13°N 附近热液柱和冲绳海槽热液活动对沉积作用的影响,以及含金属沉积物中的物质组成及其元素赋存状态和来源^[1]。同时,取得了若干新认识,包括:① 明确喷口流体中 Re 和 Os 更倾向于进入 Fe-Cu-硫化物矿物相中;② 高温流体环境中沉淀的硫化物能够保持原始热液流体的 He 同位素组成,而低温流体环境中沉淀的硫化物、硫酸盐、蛋白质则不能;③ 相对较低的温度(<116 °C)、氧化和酸性流体环境条件有利于形成自然硫烟囱体;④ “汤圆”形成模式是浅海热液区自然硫球的主要形成机制;⑤ 提出海底热液活动、冷泉及天然气水合物的“同源异汇”假说。上述认识及假说为海底热液地质过程及其资源环境效应研究提供了

理论基础^[2]。进一步,将东太平洋海隆作为地球系统的窗口,从分析热液硫化物和玄武岩的矿物、元素和同位素组成,揭示蚀变玄武岩中矿物的化学组成变化,阐述海底热液活动对水体和沉积环境的影响状况,剖析海底热液循环系统及其成矿模式,以及构建Fe-羟基氧化物成因模式等多个角度展示了东太平洋海隆热液地质的研究进展,为了解以流体为桥梁的跨圈层动力过程与物质能量循环这一重大科学问题,服务于东太平洋海隆硫化物资源调查、环境保护等重大需求提供了研究支撑^[3]。

总之,了解弧后盆地、岛弧和洋中脊热液区中热液系统及其硫化物等热液产物的化学组成特征及其岩浆环境,对于深入研究深、浅海热液活动的演化规律、流体循环以及陆上古代类似矿床和全球现代热液成矿作用均具有重要的意义,也有助于更深入地认识热液硫化物的成因以及海底热液系统中微生物与金属元素相互作用的过程^[1]。

1 西太平洋俯冲体系中热液系统及其岩浆环境研究的意义与现状

1.1 研究意义

俯冲带是地表圈层与地球深部圈层之间进行化学交换和物质迁移的主要场所^[4-10]。一方面,大洋板片及其上覆沉积物保存了与海洋、大气和大陆相互作用的地球化学记录,这些物质通过俯冲带向地幔输送,控制着地球深部的元素、同位素及挥发份组成特征与变化规律^[4],另一方面,岛弧和弧后盆地的岩浆活动与热液活动是地球深部物质向地表输出的重要窗口^[11]。西太平洋是全球最著名的汇聚板块边缘之一,发育有独特的沟-弧-盆构造体系和弧后盆地热液系统,其中琉球俯冲带(洋-陆俯冲)和马里亚纳俯冲带(洋-洋俯冲)岩浆、热液活动频繁,蕴藏丰富的硫化物资源,是国家调查海底战略性资源的重要区域之一,也是研究俯冲系统中流固界面跨圈层物质和能量循环的天然实验室。厘清琉球俯冲带和马里亚纳俯冲带中各成分端元对岩浆的物质贡献,认识挥发份及金属元素在俯冲板片脱水、岩浆演化及海底热液过程中的行为,阐明金属元素在俯冲带岩浆和热液硫化物中的富集规律,从而揭示板块俯冲、岩浆作用与热液活动之间的联系和相互作用方式,将有助于深入认识西太平洋俯冲体系地表圈层与地球深部圈层的关联机制,对于理解西太平洋俯冲体系的物质循环具有十分重要的

意义。

1.2 国内外研究现状

(1)俯冲系统对岩浆系统的物质贡献研究

经过几十年的研究,科学家对俯冲系统中的物质循环已经有了基本的认识:在俯冲带,俯冲板片携带沉积物等进入地幔楔,并随着温度和压力的升高而发生脱水、熔融,进一步,俯冲流体、熔体交代地幔,诱发岩浆活动^[4-10],且受俯冲组分的影响,岛弧和弧后盆地岩浆往往富含大离子亲石元素(K、Rb、Th、Ba、U等)和挥发份(H₂O、CO₂、SO₂、F、Cl等),同时,放射性成因同位素也表现出富集的特征^[11-19]。随着分析测试技术的进步,一些新型的非传统同位素(如B、Li、Tl、Ba、Cl、Fe、Mg、Mo等)被应用到俯冲组分的示踪研究中^[20-27],进一步明晰了俯冲组分对俯冲带岩浆活动的影响机制。近年来,一些学者针对俯冲沉积组分进入地幔的方式提出了新的观点,他们认为俯冲的沉积物并没有发生熔融,而是与俯冲板片、地幔岩石发生机械混合形成混杂岩(mélange),然后通过底辟作用进入地幔楔^[28-29],这种观点也得到了岛弧火山岩地球化学^[30]和实验岩石学研究^[31-32]的支持。

马里亚纳俯冲带和琉球俯冲带是西太平洋“洋-洋俯冲”和“洋-陆俯冲”体系的典型代表。研究表明,马里亚纳岛弧及海槽玄武岩与洋中脊玄武岩(MORB)具有相似的组成特征,且受俯冲组分的影响,其具有较高含量的大离子亲石元素和挥发份组成^[14,17,33]。另一方面,Nd-Hf同位素体系指示马里亚纳俯冲带下部地幔具有印度洋型地幔的特征^[34],受俯冲沉积物的影响最为明显^[35-36]。此外,蛇纹岩、蚀变洋壳和沉积物孔隙流体对该区域岩浆的挥发份组成也有重要贡献^[37-39]。不仅如此,琉球岛弧-冲绳海槽靠近亚洲大陆,俯冲组分更加复杂多样,受其影响,下部地幔呈现多个地幔端元的混合特征,亏损地幔端元包括太平洋型(N-MORB型)地幔^[40]和印度洋型地幔^[41];富集地幔端元包括OIB型E-MORB^[42]、EM1和EM2型富集地幔^[40,43-44]。随着冲绳海槽的扩张,其下部地幔逐渐向N-MORB型地幔演化^[40,44]。同时,微量元素及同位素(Sr、Nd、Pb、Li、Tl等)地球化学研究表明,冲绳海槽南部地幔比中部地幔受到了更多俯冲组分的贡献^[43,45]。

(2)俯冲带岩浆与热液硫化物中挥发份研究

俯冲带岛弧火山岩比洋中脊和洋岛火山岩更富集H₂O、S、Cl、Br和I等挥发份,这些元素在板片脱水或者熔融过程中被释放出来,反映了板片来

源流体对原始熔体成分的贡献^[46-48]。岛弧岩浆具有高 S 特征, 表明岛弧区域较高的氧逸度提升了熔体携带溶解性硫酸盐的能力^[49]。弧后盆地火山岩同样具有较高的 Cl 和 H₂O 含量, 则可能与板片来源流体交代地幔楔有关^[48, 50-51]。此外, 地幔中超过 90% 的非放射性稀有气体 (Ar、Kr、Xe) 和大多数卤素 (F、Cl、Br、I) 也来自于俯冲作用^[52-53], 可用于揭示俯冲带挥发份进入地幔楔的过程及行为^[52-57]。同时, 海底蛇纹石化过程使蛇纹岩比橄榄岩更富集 Cl、S^[58-59] 和 F^[60], 且在俯冲过程中, 蛇纹石化的大洋岩石圈释放的流体导致了 F、Cl 和 S 从板片内转移至岛弧岩浆中^[22, 46, 60]。

不仅如此, 海底硫化物中卤族元素的含量及比值 (Br/Cl、I/Br、I/Cl) 也可以用来区分地幔来源物质和海水来源物质对热液流体的影响^[61], 同时稀有气体的研究可以为流体来源、流体通量变化以及海底热液过程的研究提供信息^[19, 62]。目前俯冲带区域海底硫化物中稀有气体的研究主要集中在冲绳海槽 Jade 热液区^[63-65]、北斐济海盆热液区^[63]和马努斯海盆的 PACMANUS 热液区^[66]。研究表明热液区内硫化物的 ³He/⁴He 比值与热液喷口流体和 MORB 的值接近, 硫化物内的 He 可能主要来自于热液系统下部的岩浆^[63, 65, 67], 且流体包裹体记录了原始热液流体的 He 同位素组成^[67]。此外, 冲绳海槽 Jade 热液区和北斐济海盆热液区中硫化物的流体包裹体内稀有气体 Ne、Ar、Kr、Xe 的含量表明, 其重稀有气体主要来自于周围的海水^[65, 67], 且 PACMANUS 热液区硫化物中流体包裹体的氩同位素组成 (⁴⁰Ar/³⁶Ar, 295~310)^[66] 接近于大气成分 (298.56)^[68-69]。

(3) 金属元素在岩浆演化过程中的行为研究

目前, 对俯冲带岩浆中金属元素性质的研究, 多集中于 Pb、Cu、Au、Ag 和 Re。结果显示, Pb 在俯冲板片脱水过程中具有较强活动性且在岩浆演化过程中表现出强不相容性, 因此, 马里亚纳与琉球俯冲系统中玄武岩比洋中脊玄武岩富集 Pb^[45, 70-72], 且演化程度高的流纹岩中 Pb 含量更高^[73-74]。而 Cu、Au 和 Ag 在俯冲带岩浆演化的早期均表现为中度不相容性, 但其性质受氧逸度的影响较大^[75-77], 如在东马努斯海盆 Pual Ridge 和劳海盆西北部, 当岩浆演化到一定阶段时 (如 Mg# 值约 40; MgO 的含量约 7 wt.%), 其 Cu-Au-Ag 含量急剧下降, 这是由于磁铁矿的分离结晶将硫酸根 (SO₄²⁻) 还原为硫离子 (S²⁻), 引起岩浆中氧逸度条件发生改变, 造成硫化物饱和和沉淀, 从而导致岩浆中 Cu、Au、Ag 含量的降低^[78]。与此不同, 劳海盆 Valu Fa Ridge 岩浆中

Cu 的含量随着岩浆演化持续降低, 主要受控于原始岩浆的氧逸度条件^[79]。Re 通常比 Au、Cu 等元素更亲石, 尤其在氧逸度较高的岛弧岩浆中, 其行为主要受岩浆过程的控制。此外, Re 在未去气的岛弧火山岩样品中的含量远高于陆相喷发的岩石, 显示其具有强烈的挥发性^[80-81]。

(4) 岩浆活动对热液系统的物质贡献研究

早期的研究主要认为, 海水沿裂隙下渗, 被不断加热并从基底岩石中淋滤金属元素, 为热液系统提供物质^[82-84]。近年来, 国内外学者通过岩浆熔体包裹体及同位素示踪等研究表明, 岩浆去气/出溶过程能够产生富金属元素和挥发份的不混溶热液流体, 从而向热液系统直接提供物质^[85-88]。马里亚纳海槽硫化物中的 S 同位素组成也反映出存在岩浆硫的贡献^[89-90]; 进一步, 弧后扩张中心轴部热液区的流体具有与洋中脊玄武岩相似的 He-C 同位素组成, 且富含碱性元素 (如 K、Rb 和 Cs), 这均表明热液区玄武质岩浆对热液系统可能存在物质贡献^[91]。此外, 冲绳海槽中硫化物的 REE 和 S-Sr-Nd-Pb-He 同位素组成, 不仅表明长英质火山岩和深部地幔等是其物质来源^[64-65, 92-99], 其硫化物具有较高的 He 和 C 同位素组成、热液蚀变岩的高 δ¹⁸O 组成 (2.3‰~14.7‰)、而且初始热液流体的 δ¹⁸O 组成与岩浆流体相似、以及高温 (330~392 °C) 和高盐度 (6.7%~7.5%) 流体包裹体发育等证据, 均表明长英质岩浆对冲绳海槽热液系统可能存在物质贡献^[63, 65, 91-101]。

尽管如此, 围绕西太平洋俯冲物质循环研究国际上仍存在一些亟待解决的问题, 例如, 在俯冲系统对岩浆系统物质贡献方面, 我们仍不明确俯冲组分进入地幔楔的方式和控制机制; 在陆缘俯冲带 (如琉球俯冲带), 则难以完全区分俯冲组分贡献与地壳混染对岩浆成分的影响。在俯冲带挥发份研究方面, 尚不清楚稀有气体和卤族元素在板片脱水过程中的地球化学行为。在俯冲带岩浆中金属元素行为的研究方面, 不了解金属元素 (Zn、Cu、Au、Ag 等) 在“洋-洋”和“洋-陆”俯冲过程中的活动性, 不清楚岩浆演化过程中分离结晶、同化混染等地质作用以及氧逸度条件变化对岩浆中金属元素迁移与富集的影响。在俯冲带岩浆活动与热液活动关系方面, 仍不清楚岩浆活动对热液系统的物质贡献方式。无疑, 这些问题的解决将有助于深入认识西太平洋俯冲系统热液活动和岩浆作用的跨圈层物质交换过程。

为此, 我们开展了冲绳海槽热液系统的岩浆环境、马努斯海盆热液柱以及洋中脊和弧后盆地中硫

化物和玄武岩的同位素组成研究。

2 冲绳海槽热液系统的岩浆环境

2.1 海底热液区的岩浆混合过程及时间尺度研究

对采自冲绳海槽热液区附近的英安岩及其基性岩浆包体内的斜长石进行了详细的矿物学及微区主量元素、微量元素和 Sr 同位素组成分析。结果显示,英安岩中斜长石斑晶表现出明显的成分环带,即核部具有高 An 值和高 Sr/Ba 比值,边部具有低 An 值和低 Sr/Ba 比值,且从核部到边部 An 值与 Sr/Ba 比值骤降。不仅如此,斜长石斑晶边部具有低 Sr/Ba 比值且 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值与英安岩全岩的 Sr 同位素组成相似,则表明斜长石边部是在寄主英安质岩浆中结晶的^[102]。相比之下,斜长石核部的 Sr 同位素组成具有两种类型:一种是富集放射性成因 Sr 同位素组成($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.70724\sim0.70791$);另一种具有非放射性成因 Sr 同位素组成($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.70535\sim0.70595$),且这两种类型斜长石的核均具有高 An 值和高 Sr/Ba 比值的特征^[102]。此外,斜长石核部具高 Ca/Na 比值及其平衡熔体高 Sr 含量均表明它们与寄主英安质岩浆不平衡,且来自于深部不同的铁镁质岩浆系统,被上升岩浆夹带进入浅层岩浆房^[102]。

进一步,使用 Mg 元素在斜长石中的扩散速率结合扩散方程(菲克第二定律; $\partial C/\partial t=D(\partial^2 C)/(\partial X^2)$),利用有限差分的数值方法模拟计算出钙质斜长石核部进入浅层岩浆房后经历了很长的滞留时间(可达 600 年),这说明热液区浅部岩浆房具较长的持续时间。同时,包体和寄主英安岩中斜长石不同的 Sr 同位素组成,尤其是其钛磁铁矿成分的显著差异(钛磁铁矿晶体内部阳离子扩散速率快,易达到扩散平衡),则反映了基性岩浆注入浅层岩浆房中形成包体到岩浆喷发必须发生在很短的时间内(几十天),从而抑制了包体与寄主英安岩发生完全化学平衡。因此,基性岩浆的注入很可能触发了英安质岩浆的喷发,且热液区酸性岩浆中具有复杂的、开放体系结晶历史的矿物组合,幔源基性岩浆注入浅层酸性岩浆房内,随后进行的岩浆混合作用,则是控制岩浆化学成分和矿物结构多样性的重要过程且是岩浆喷发的主要诱因^[102]。

2.2 海底热液区岩浆活动对热液系统的物质贡献研究

研究西太平洋弧后盆地热液区附近岩浆中硫

化物饱和及溶解机制,有助于理解俯冲带岩浆活动对热液系统的物质贡献方式^[103]。研究发现,在冲绳海槽南部八重山地堑热液区附近的玄武安山岩中存在岩浆硫化物饱和及溶解现象,且通过全岩地球化学和矿物化学的研究,明晰了硫化物饱和时岩浆房的深度以及寄主岩浆的温度、氧逸度、含水量和 S 含量等特征,揭示了岩浆分异过程中熔体的 S 含量增加以及温度降低、熔体成分变化导致硫化物饱和时所需 S 含量的降低共同驱使玄武安山质岩浆中硫化物饱和,而岩浆上升喷发过程中的挥发份(H_2O 、S 等)去气/出溶作用则导致岩浆携带的硫化物发生溶解。同时,由于岩浆中硫化物作为亲铜元素最主要的寄主矿物,该溶解过程将促使 Cu 重新进入熔体中,并再分配进入出溶的岩浆流体,从而形成富金属元素的岩浆流体,并在喷发去气过程中直接释放进入海洋中^[103]。进一步研究表明,由于岩浆硫化物密度较大,大部分岩浆硫化物不能被上升岩浆携带而沉入岩浆房底部,此过程亦可实现亲铜元素的预富集。后期其他岩浆过程,如氧化性基性岩浆注入岩浆房,导致硫化物氧化溶解,可实现亲铜元素再活化,而岩浆喷发前的去气作用则将该富金属元素的岩浆流体直接贡献于岩浆房上覆的热液系统中^[103]。

2.3 岩浆房持续的时间:矿物内元素扩散年代学研究

岩浆房持续的时间尺度对认识岩浆房的稳定性、评估活动火山的活跃程度具有重要意义。扩散计时法将具有元素浓度梯度的矿物作为计时器,加之,由于矿物中的元素扩散再平衡过程符合菲克第二定律,与时间有关,从而可以限定岩浆作用过程的时间尺度,进而指示岩浆房持续的时间。该方法目前已广泛应用于不同的火山岩矿物,如橄榄石和辉石中 Fe-Mg 元素扩散、斜长石中 Mg 元素扩散、石英中 Ti 元素扩散以及锆石中 Li 元素扩散等,可以记录持续数小时至几百万年的岩浆过程。未来,随着原位分析测试技术的不断发展,与岩浆作用有关的扩散系数,其可用性和精度的增加,以及扩散模型的完善将极大地推动矿物内元素扩散年代学的发展^[104]。

2.4 获得冲绳海槽热液区玄武质岩浆来源新证据

橄榄岩源区和辉石岩源区是产生玄武质岩浆的两个重要源区。由于 Ni、Ca、Mn 等元素在岩浆源区不同矿物内分配系数的差异,使得橄榄石的地

球化学成分可以很好地用于鉴别橄榄岩源区和辉石岩源区在玄武质岩浆产生时的贡献程度。近年来研究表明, 洋岛玄武岩(OIB)和大火成岩省(LIP)火山岩的产生具有较大源区辉石岩熔融的贡献。然而, 由于缺乏高精度橄榄石成分分析, 在俯冲带区域及其海底热液活动区关于玄武质岩浆来源的研究较少, 且仅有的少量工作集中在堪察加半岛、中墨西哥火山带、中美洲及安第斯南部火山带等区域^[105]。

为了更进一步认识俯冲带区域及其海底热液区中火山岩的岩浆源区特征, 对采自冲绳海槽热液区火山岩中橄榄石的地球化学分析显示, 该区橄榄石具有较低的 Ni、Ca 含量及 Fe/Mn 比值, 较高的 Mn 和 Mn/Zn 比值, 除 Ca 含量外, 其余特征与橄榄岩源区相似, 低 Ca 含量落入了辉石岩源区范围。研究发现, 俯冲带海底热液区火山岩中橄榄石的 Ca 含量普遍低于洋中脊玄武岩(MORB), 这种特征可能由于俯冲带海底热液区岩浆的高 H₂O 含量降低了 Ca 在橄榄石内的分配系数, 这与弧后盆地橄榄石内熔体包裹体的高 H₂O 含量特征相一致。此外, 氧同位素分析结果显示在玄武质安山岩和安山岩中均存在低 $\delta^{18}\text{O}$ 值($<5\text{‰}$)的橄榄石。低 $\delta^{18}\text{O}$ 值的橄榄石在全球范围内分布较少, 通常受到高温热液蚀变的影响, 在岩浆形成过程中具有重要的指示意义。我们通过对低 $\delta^{18}\text{O}$ 值橄榄石的产出特征及其地质背景进行分析, 认为低 $\delta^{18}\text{O}$ 值的橄榄石不是来自于高温热液蚀变的下洋壳部分熔融, 而是同化了高温热液蚀变具低 $\delta^{18}\text{O}$ 值的陆壳围岩, 这证明了陆壳同化混染在岩浆产生过程中具有重要意义。与低 $\delta^{18}\text{O}$ 值的橄榄石相反, 冲绳海槽热液区的火山岩普遍具高 $\delta^{18}\text{O}$ 值的特征($>6\text{‰}$), 这可能是岩浆演化后期淋滤了具高 $\delta^{18}\text{O}$ 值的陆源物质或发生了低温热液蚀变的结果。详细的橄榄石元素及氧同位素组成分析首次确认了冲绳海槽热液区内具低 $\delta^{18}\text{O}$ 值岩浆的存在, 打破了火山岩全岩研究的局限, 明确了具低 $\delta^{18}\text{O}$ 值的岩浆在冲绳海槽火山岩演化过程中的重要贡献, 从橄榄石的新角度辨别出陆壳混染对冲绳海槽热液区火山岩的产生具有重要影响^[105]。

2.5 透视冲绳海槽热液区深部岩浆房及岩浆演化过程研究

俯冲带岩浆活动是海底热液地质学研究的热点问题之一, 由于俯冲洋壳、俯冲沉积物等物质的影响, 俯冲带火山岩往往成分多样, 成因复杂。弧

后盆地作为重要的俯冲构造单元, 其海底热液区火山岩的研究可为进一步明确俯冲带岩浆作用过程提供帮助。传统火山岩全岩的研究由于受到后期岩浆演化及蚀变作用的影响而不能很好地刻画岩浆演化过程。单斜辉石是岩浆演化过程中的早期结晶矿物, 可存在于岩浆演化的大部分阶段, 且不同结构环带、元素组成的单斜辉石具有不同的成因。因此, 火山岩中单斜辉石可以保存岩浆房物理化学状态及其岩浆演化过程信息, 指示多期岩浆充填或混合现象, 是研究岩浆组成、演化及运移的理想工具^[106]。

为此, 对采自冲绳海槽热液区的玄武岩、安山岩、粗安岩和流纹岩内单斜辉石进行了详细的岩相学及矿物学研究, 并分析了其主量和微量元素地球化学特征。根据环带结构、主量元素及稀土元素组成特征可将不同火山岩中的单斜辉石分为多种类型。其中, 玄武岩中类型 1 的单斜辉石与粗安岩中类型 1 的单斜辉石在地球化学特征上具相似性, 表现出亏损 LREEs 和无明显 Eu 异常; 玄武岩中类型 2 的单斜辉石与安山岩及粗安岩中类型 2 的单斜辉石在地球化学特征上具有相似性, 表现出亏损 LREEs 及明显 Eu 负异常。进一步, 通过对单斜辉石的微量元素模拟发现, 不同岩性中的单斜辉石可以通过玄武质岩浆发生单斜辉石+斜长石±斜方辉石±副矿物的分离结晶获得。此外, 在安山岩中存在与玄武岩中单斜辉石成分相似的环带, 表明了同源岩浆的充填和混合在不同岩性单斜辉石中普遍存在。同时, 根据单斜辉石与熔体间元素分配系数获得了基性岩中单斜辉石的平衡熔体成分。进一步, 通过对平衡熔体的成分模拟, 显示源区岩浆受到明显的俯冲沉积组分的影响, 且俯冲熔体的影响强于俯冲流体。其中, 首次单斜辉石的详细研究突破了全岩成分对岩浆信息刻画的局限, 对明确海底热液区岩浆成分、分析火山岩成因具有重要意义, 且基性-中性-酸性岩中系统的单斜辉石研究明确了分离结晶及同源岩浆混合对冲绳海槽热液区内中酸性火山岩成因起着主导地位^[106]。

2.6 熔体包裹体地球化学特征对冲绳海槽热液区岩浆演化的指示

传统火山岩全岩成分的研究往往反映的是经历了复杂演化过程(岩浆混合、陆壳混染、蚀变等)后的“混合”熔体, 很大程度消减了熔体的差异性并掩盖了岩浆源区及演化过程的信息。相比较而言, 火山岩中熔体包裹体因受寄主矿物保护, 岩浆后期

改造程度小,可提供岩浆演化的瞬时信息,是研究岩浆源区地幔属性及岩浆演化过程的有力工具^[107]。

为了明确冲绳海槽弧后盆地内的岩浆演化过程,对采自冲绳海槽热液区火山岩中橄榄石的熔体包裹体进行了详细的元素及同位素地球化学研究,发现相比较于寄主全岩,熔体包裹体表现出更大的元素及 Pb 同位素组成变化范围。根据元素及 Pb 同位素组成特征可以将熔体包裹体分为两种类型:低²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 值熔体包裹体和高²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 值熔体包裹体。其中低²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 值熔体包裹体的地球化学特征与全岩的类似,而高²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 值熔体包裹体具有明显高 K₂O、P₂O₅、Rb、U 含量,低 Pb、Cu 含量特征。通过对熔体包裹体数据的模拟计算显示其岩浆地幔源区受 MORB、来自下陆壳的 EMI 成分和来自沉积物的 EMII 成分不同程度的混合,且安山质火山岩主要来自于同源玄武质岩浆的分离结晶,同时受到了部分具有高²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 值,高 K₂O、P₂O₅、Rb、U,低 Pb、Cu 含量熔体的混合,表现出岩浆成分的不均一特征。熔体包裹体中与全岩成分不同的高²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 熔体的存在,表明岩浆演化过程中外来熔体很容易被全岩组分掩盖,导致部分岩浆演化信息的丢失^[107],这突破了火山岩的全岩成分对岩浆演化信息刻画的局限,且首次利用火山岩中熔体包裹体反演冲绳海槽热液区岩浆的演化过程,对明确冲绳海槽热液区中火山岩的成因、充分认识岩浆起源及演化过程具有重要意义。

2.7 弧后盆地热液区的岩浆混合研究

双峰式火山岩是一套以基性岩和酸性岩为主的岩石组合,关于缺少中性岩的原因,仍存在争议。一种解释是,存在大量中性岩浆,但是由于某些原因而未能喷出地表。另一种解释是,中性岩可能是由玄武质岩浆与流纹质岩浆混合而成,因此形成较少。为此,将冲绳海槽中部热液区的安山岩分为 A、B、C 三种类型,并对 C 类安山岩开展了详细的矿物学研究,识别出三种截然不同的矿物组合:① 基性矿物组合,② 酸性矿物组合,③ 中性矿物组合。火山岩全岩的主量和微量元素、同位素组成及矿物结晶温度模拟计算,均指示该类安山岩由冲绳海槽的玄武质岩浆和流纹质岩浆以 4:6 的比例混合而成。结合前人的资料,对 B 类安山岩进行混合模拟计算,也展示其为玄武岩-流纹岩混合成因,这说明岩浆混合作用在弧后盆地热液区安山岩的成因上扮演了重要角色。此外,还发现冲绳海槽的一组流纹岩也明显受到了岩浆混合的影响,反映岩浆混

合作用普遍存在,这与冲绳海槽异常高的热流值及活跃的海底热液活动相耦合,指示岩浆活动对热液活动起重要的控制作用^[108]。

2.8 俯冲蛇纹岩对琉球俯冲带南部岩浆活动的影响

蛇纹岩富含水、卤素、稀有气体及多种微量元素,是俯冲带流体的重要来源,在全球地球化学循环中扮演着极为重要的角色。因此,厘清俯冲蛇纹岩对弧岩浆的物质贡献,对于了解俯冲带物质的迁移与循环具有重要的意义^[109]。加之,硼(B)同位素是俯冲蛇纹岩的一种有效示踪剂,为此,采用离子探针分析了冲绳海槽(琉球俯冲带)南部八重山地堑、与那国地堑(弧后扩张中心)及伊良部海丘(现代岛弧前缘)热液区中玄武安山岩的 B 同位素组成和卤素(F 和 Cl)含量,同时获得了样品的微量元素和 Sr-Nd-Pb 同位素组成。结果显示,从弧后扩张中心到岛弧前缘,玄武安山岩的 B 同位素逐渐变重,⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值逐渐增大,Cl/K、F/Nd 比值及流体活性元素与不活动元素比值逐渐升高,指示了俯冲流体输入的增多。其中,伊良部海丘热液区中玄武安山岩具有最重的 B 同位素组成($\delta^{11}\text{B} = +6.6\text{‰} \pm 1.5\text{‰}$),这只能由板片蛇纹岩中流体加入来解释,表明了蛇纹岩是该俯冲带流体的重要供给源。此外,该玄武安山岩样品的 Cl/K、F/Nd 比值均与 $\delta^{11}\text{B}$ 呈现良好的正相关关系,全球岛弧火山岩也呈现出与其一致的变化趋势,说明俯冲蛇纹岩对弧岩浆的卤素通量也具有重要的贡献^[109]。

同时,伊良部海丘热液区中火山岩的 Sr 同位素组成相比于其 Nd 同位素组成更加富集,在 Sr-Nd 同位素相关图解上表现为数据点落在地幔与沉积物混合线的右侧。这种 Sr-Nd 同位素解耦的特征在现代岛弧火山岩中很常见,例如马里亚纳岛弧、汤加岛弧、南桑威奇岛弧等。进一步,发现具有 Sr-Nd 同位素解耦特征的弧火山岩通常具有较重的 B 同位素组成,而它们所对应的弧后盆地样品其 Sr-Nd 同位素组成无异常,B 同位素也较轻。同时,混合模拟计算显示,俯冲蛇纹岩的加入无法造成弧火山岩 Sr 同位素组成的异常富集,但蚀变洋壳可以,暗示了俯冲蛇纹岩和蚀变洋壳中的流体可能通常一起对弧岩浆的形成产生影响,这支持了地幔楔流体通道理论,即俯冲蛇纹岩流体并没有广泛交代地幔楔,而是经流体通道穿过地幔,到达弧岩浆源区^[109]。

2.9 冲绳海槽地质构造对热液系统的控制机理

海底热液活动一直是当代海洋科学研究的重

要前沿领域之一, 了解地质构造对海底热液活动的控制作用对于认识热液系统的形成机理及寻找海底硫化物资源具有重要的指示意义。为此, 在总结了冲绳海槽中部和南部地形与断裂构造、地壳结构、重磁场、热流及岩浆活动等方面的地质构造特征以及冲绳海槽热液区分布和热液产物基本特征的基础上, 通过对比冲绳海槽与马努斯海盆、马里亚纳海槽、北斐济海盆、劳海盆等基底和扩张阶段不同的弧后盆地构造特征的差异, 归纳了冲绳海槽地质构造的特殊性, 包括过渡性地壳性质、低扩张程度、高热流值、巨厚沉积层及双峰式火山作用等。进一步研究发现冲绳海槽的热液活动不仅受断裂构造、岩浆活动、扩张速率等构造因素的控制, 而且也受基岩类型和沉积物盖层等地质条件的影响, 且冲绳海槽中部和南部平行和垂直盆地走向的两组断裂带为流体循环提供了通道, 大规模的岩浆活动则为热液系统提供了充足的热量。此外, 冲绳海槽内广泛分布的酸性火山岩和较厚的沉积盖层与流体相互作用, 使得热液产物富含有机质、二氧化碳以及 Ag 和 Au 等元素。根据冲绳海槽的扩张速率和地质构造特征, 冲绳海槽中部和南部热液活动的发生频率整体上处在慢速扩张中心的范围内, 进一步, 根据异常高的热流值、发育的岩浆活动和断裂构造等地质构造特征, 推测冲绳海槽仍具有发现新热液区的潜力, 其中部和南部两组断裂交汇的部位、轴部火山、受海脊俯冲影响的区域以及靠近岛弧一侧的新火山带是最有潜力发现新海底热液活动的区域^[110]。

3 马努斯弧后盆地的热液柱

热液柱的组成不仅可以反映海底热液流体的物理化学特征, 而且还可以反映热液区围岩的组成、海底流体-岩石相互作用的条件以及热液柱的扩散过程, 且分析热液柱的浊度、pH 值、溶解铁和溶解锰浓度数据, 有助于了解热液柱的空间分布和物质来源。为此, 对 2015 年“科学”号 MANUS 航次获得的 18 个站位的浊度和海流数据以及 8 个站点的水样进行了分析。明确研究区热液柱的特点是高浊度、高溶解铁及高溶解锰浓度, 在 PACMANUS 和 Desmos 热液区中热液柱横向扩散至数百米, 最大溶解锰浓度分别为 $0.533 \mu\text{mol/kg}$ 和 $0.539 \mu\text{mol/kg}$, 最大溶解铁浓度分别为 $0.058 \mu\text{mol/kg}$ 和 $0.133 \mu\text{mol/kg}$ 。其中, Satanic Mills 热液柱和 Fenway 热液柱, 分别从海底上升 140 m 和 220 m。同时, 在 PACMANUS 和

Desmos 热液区观察到热液柱的浊度、溶解铁和溶解锰浓度异常值均高于其他层位, 且所有异常均表明存在高铁和高锰流体的输入。不仅如此, 还发现 PACMANUS 热液区中热液柱的浊度、溶解铁和溶解锰浓度均高于 Desmos 热液区, 说明流体中铁和锰的浓度对 PACMANUS 热液区中热液柱的影响更大, 且 PACMANUS 热液区中的热液柱比 Desmos 热液区具更高的 Cl、溶解铁、溶解锰和更低 SO_4^{2-} 含量。同时, 距离热液区近的热液柱比距离热液区远的热液柱更年轻。进一步, 揭示了热液柱的扩散受深度和底流流速的影响, 且热液柱扩散过程中溶解铁浓度异常比溶解锰的维持时间更长。此外, 需要强调的是, 在热液柱横向扩散过程中, 溶解铁浓度异常的扩散速度比溶解锰的扩散速度慢, 在 PACMANUS 热液区中, Satanic Mills 热液柱和 Fenway 热液柱在水深 1625 m 和 1550 m 有明显的交叉, 且混合热液柱的扩散趋势与海流相关, 随着扩散距离的增加, 铁和锰对热液柱的影响减弱^[111]。

4 弧后盆地和洋中脊热液硫化物研究

海底火山岩与硫化物中的铁、铜和锌同位素组成研究为理解岩浆、热液和蚀变过程提供了重要工具, 有助于确定过渡金属元素的来源和热液活动对岩石环境的影响。为此, 分析了西太平洋弧后盆地、东太平洋海隆和印度洋脊中玄武岩与硫化物的铁、铜和锌同位素组成^[112]。

在此基础上, 明确了洋中脊玄武岩的 $\delta^{56}\text{Fe}$ 和 $\delta^{57}\text{Fe}$ 值高于海底热液流体的值, 而 $\delta^{66}\text{Zn}$ 和 $\delta^{68}\text{Zn}$ 值则相反, 这表明流体-玄武岩相互作用优先将 ^{54}Fe 、 ^{66}Zn 和 ^{68}Zn 结合到流体中, 导致了 ^{56}Fe 、 ^{57}Fe 和 ^{64}Zn 在蚀变玄武岩中的富集。大部分硫化物矿物的 $\delta^{56}\text{Fe}$ 值 ($-1.96\text{‰} \sim +0.11\text{‰}$) 处于喷口流体的范围内, 但明显低于弧后盆地和洋中脊玄武岩的值, 说明硫化物中的 Fe 主要来源于喷口流体。黄铜矿的 $\delta^{56}\text{Fe}$ 和 $\delta^{57}\text{Fe}$ 值高于闪锌矿和黄铁矿的值, 表明高温硫化物矿物富集 ^{56}Fe 和 ^{57}Fe , 而中低温硫化物则亏损 ^{56}Fe 和 ^{57}Fe ^[112]。

此外, 硫化物矿物的 $\delta^{65}\text{Cu}$ ($-0.88\text{‰} \sim -0.16\text{‰}$) 和 $\delta^{66}\text{Zn}$ ($-0.39\text{‰} \sim -0.03\text{‰}$) 值显著低于弧后盆地和洋中脊玄武岩以及热液区喷口流体, 反映了 ^{63}Cu 和 ^{64}Zn 优先从流体中去除, 并分别进入黄铜矿和闪锌矿中。因此, 喷口流体的注入及硫化物矿物的沉淀可导致热液柱、海水和沉积物具相对较重的铜和锌同位素组成^[112]。

通过该项研究揭示了流体-岩石相互作用和流体与海水混合对弧后盆地和洋中脊硫化物中 Fe-Cu-Zn 同位素组成的影响,指出板块俯冲将导致弧后盆地和岛弧岩石具 ^{56}Fe 、 ^{57}Fe 和 ^{64}Zn 富集的特征,促进了海底热液硫化物的元素和同位素地球化学研究,这将有助于我们更好地了解海底硫化物与其基底岩石之间的关系,以及铁、铜、锌在地幔、热液、基底岩石和硫化物之间的迁移过程^[112]。

5 发展趋势

在西太平洋,利用熔体包裹体反演了岩浆的演化过程,对明确冲绳海槽热液区中火山岩的成因、充分认识岩浆的起源及演化过程具有重要意义。进一步,详细的橄榄石元素及同位素组成分析首次确认了弧后盆地热液区中具低 $\delta^{18}\text{O}$ 值岩浆的存在,打破了火山岩全岩成分研究对岩浆信息刻画的局限,明确了具低 $\delta^{18}\text{O}$ 值的岩浆在冲绳海槽热液区火山岩演化过程中的重要贡献,并从橄榄石角度辨别出陆壳混染对冲绳海槽热液区中火山岩的产生具有重要影响。不仅如此,通过研究单斜辉石,对明确海底热液区岩浆成分、分析火山岩的成因也具有重要意义。

未来,监测和了解海底热液系统的物理结构、化学组成、地质过程和生物多样性,将是海底热液地质学研究的热点和前沿^[2]。同时,促进海底热液活动探测技术和热液产物测试方法的发展,加快对海底热液区的岩石、喷口流体、热液柱、硫化物、含金属沉积物以及热液循环、生物活动的持续观测与研究^[1]。特别是在已有调查工作基础上,开展西太平洋弧后盆地的热液系统及其岩浆环境研究,深入拓展海底热液活动对水体、沉积和生态环境的影响机制研究,探讨俯冲带岩浆源区特征、俯冲组分以及地壳混染对岩浆成分的影响,研究岩浆演化过程及其对热液系统的物质贡献方式,并在验证热液活动、冷泉及天然气水合物的“同源异汇”假说方面获得新的进展,进而为海底硫化物和天然气水合物资源的开发利用提供新的调查研究基础,无疑也将为人类探知海底地质过程及生命活动、保护海底热液环境和合理开发利用海底资源提供有力的工作支撑^[2]。

参考文献 (References)

- [1] 曾志刚,陈祖兴,张玉祥,等. 海底热液活动的环境与产物[J]. 海洋科学, 2020, 44(7): 143-155. [ZENG Zhigang, CHEN Zuxing, ZHANG Yuxiang, et al. Seafloor hydrothermal activities and their geological environments and products [J]. *Marine Sciences*, 2020, 44(7): 143-155.]
- [2] Zeng Z G, Chen Z X, Zhang Y X, et al. Geological, physical, and chemical characteristics of seafloor hydrothermal vent fields [J]. *Journal of Oceanology and Limnology*, 2020, 38(4): 985-1007.
- [3] 曾志刚. 东太平洋海隆热液地质[M]. 北京: 科学出版社, 2020. [ZENG Zhigang. *Submarine Hydrothermal Geology of the East Pacific Rise*[M]. Beijing: Science Press, 2020.]
- [4] Bebout G E. Chemical and isotopic cycling in subduction zones[M]//Holland H D, Turekian K K. *Treatise on Geochemistry*. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier Inc., 2014: 703-747.
- [5] Bindeman I N, Eiler J M, Yogodzinski G M, et al. Oxygen isotope evidence for slab melting in modern and ancient subduction zones [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 235(3-4): 480-496.
- [6] Duggen S, Portnyagin M, Baker J, et al. Drastic shift in lava geochemistry in the volcanic-front to rear-arc region of the Southern Kamchatkan subduction zone: Evidence for the transition from slab surface dehydration to sediment melting [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2007, 71(2): 452-480.
- [7] Harvey J, Garrido C J, Savov I, et al. ^{11}B -rich fluids in subduction zones: The role of antigorite dehydration in subducting slabs and boron isotope heterogeneity in the mantle [J]. *Chemical Geology*, 2014, 376: 20-30.
- [8] Kendrick M A, Arculus R J, Danyushevsky L V, et al. Subduction-related halogens (Cl, Br and I) and H_2O in magmatic glasses from Southwest Pacific Backarc Basins [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2014, 400: 165-176.
- [9] Scambelluri M, Pettke T, Cannao E. Fluid-related inclusions in Alpine high-pressure peridotite reveal trace element recycling during subduction-zone dehydration of serpentinized mantle (Cima di Gagnone, Swiss Alps) [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2015, 429: 45-59.
- [10] Spandler C, Pirard C. Element recycling from subducting slabs to arc crust: A review [J]. *Lithos*, 2013, 170-171: 208-223.
- [11] Ryan J G, Chauvel C. The subduction-zone filter and the impact of recycled materials on the evolution of the mantle[M]//Holland H D, Turekian K K. *Treatise on Geochemistry*. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier Inc., 2014, 3: 479-508.
- [12] Ague J J, Nicolescu S. Carbon dioxide released from subduction zones by fluid-mediated reactions [J]. *Nature Geoscience*, 2014, 7(5): 355-360.
- [13] John T, Gussone N, Podladchikov Y Y, et al. Volcanic arcs fed by rapid pulsed fluid flow through subducting slabs [J]. *Nature Geoscience*, 2012, 5(7): 489-492.
- [14] Pearce J A, Stern R J. Origin of back-arc basin magmas: trace element and isotope perspectives[M]//Christie D M, Fisher C R, Lee S M, et al. *Back-Arc Spreading Systems; Geological, Biological, Chemical, and Physical Interactions*. Washington: American Geophysical Union, 2006, 166: 63-86.

- [15] Plank T, Langmuir C H. Tracing trace elements from sediment input to volcanic output at subduction zones [J]. *Nature*, 1993, 362 (6422): 739-743.
- [16] Schmidt M W, Jagoutz O. The global systematics of primitive arc melts [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2017, 18 (8): 2817-2854.
- [17] Taylor B, Martinez F. Back-arc basin basalt systematics [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, 210 (3-4): 481-497.
- [18] Timm C, Davy B, Haase K, et al. Subduction of the oceanic Hikurangi Plateau and its impact on the Kermadec arc [J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 4923.
- [19] Turner S, Caulfield J, Turner M, et al. Recent contribution of sediments and fluids to the mantle's volatile budget [J]. *Nature Geoscience*, 2012, 5: 50-54.
- [20] Bouvier A S, Manzini M, Rose-Koga E F, et al. Tracing of Cl input into the sub-arc mantle through the combined analysis of B, O and Cl isotopes in melt inclusions [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2019, 507: 30-39.
- [21] De Hoog J C M, Savov I P. Boron isotopes as a tracer of subduction zone processes [M]//Marshall H, Foster G. Boron Isotopes. Cham: Springer, 2018: 217-247.
- [22] Debret B, Koga K T, Nicollet C, et al. F, Cl and S input via serpentinite in subduction zones: implications for the nature of the fluid released at depth [J]. *Terra Nova*, 2014, 26 (2): 96-101.
- [23] Hu Y, Teng F Z, Plank T, et al. Magnesium isotopic composition of subducting marine sediments [J]. *Chemical Geology*, 2017, 466: 15-31.
- [24] Nielsen S G, Horner T J, Pryer H V, et al. Barium isotope evidence for pervasive sediment recycling in the upper mantle [J]. *Science Advances*, 2018, 4 (7): eaas8675.
- [25] Nielsen S G, Yagodinski G, Prytulak J, et al. Tracking along-arc sediment inputs to the Aleutian arc using thallium isotopes [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2016, 181: 217-237.
- [26] Palmer M R. Boron cycling in subduction zones [J]. *Elements*, 2017, 13 (4): 237-242.
- [27] Teng F Z, Hu Y, Chauvel C. Magnesium isotope geochemistry in arc volcanism [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 113 (26): 7082-7087.
- [28] Behn M D, Kelemen P B, Hirth G, et al. Diapirs as the source of the sediment signature in arc lavas [J]. *Nature Geoscience*, 2011, 4 (9): 641-646.
- [29] Marshall H R, Schumacher J C. Arc magmas sourced from mélange diapirs in subduction zones [J]. *Nature Geoscience*, 2012, 5 (12): 862-867.
- [30] Nielsen S G, Marshall H R. Geochemical evidence for mélange melting in global arcs [J]. *Science Advances*, 2017, 3 (4): e1602402.
- [31] Codillo E A, Le Roux V, Marshall H R. Arc-like magmas generated by mélange-peridotite interaction in the mantle wedge [J]. *Nature Communications*, 2018, 9 (1): 2864.
- [32] Cruz-Urbe A M, Gaetani G A, Le Roux V, et al. Generation of alkaline magmas in subduction zones by partial melting of mélange diapirs—An experimental study [J]. *Geology*, 2018, 46 (4): 343-346.
- [33] Stern R J, Fouch M J, Klemperer S L. An overview of the Izu-Bonin-Mariana Subduction factory [M]//Inside the Subduction Factory. Washington, D C: American Geophysical Union, 2004: 175-222.
- [34] Woodhead J, Stern R J, Pearce J, et al. Hf-Nd isotope variation in Mariana Trough basalts: The importance of "ambient mantle" in the interpretation of subduction zone magmas [J]. *Geology*, 2012, 40 (6): 539-542.
- [35] Chauvel C, Marini J C, Plank T, et al. Hf-Nd input flux in the Izu-Mariana subduction zone and recycling of subducted material in the mantle [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2009, 10 (1): Q01001.
- [36] Tollstrup D L, Gill J B. Hafnium systematics of the Mariana arc: evidence for sediment melt and residual phases [J]. *Geology*, 2005, 33 (9): 737-740.
- [37] Alt J C, Shanks W C, Jackson M C. Cycling of sulfur in subduction zones: the geochemistry of sulfur in the Mariana Island Arc and back-arc trough [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1993, 119 (4): 477-494.
- [38] Barnes J D, Sharp Z D, Fischer T P. Chlorine isotope variations across the Izu-Bonin-Mariana arc [J]. *Geology*, 2008, 36 (11): 883-886.
- [39] Stern R J, Kohut E, Bloomer S H, et al. Subduction factory processes beneath the Guguan cross-chain, Mariana Arc: no role for sediments, are serpentinites important? [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2006, 151 (2): 202-221.
- [40] Hoang N, Uto K. Upper mantle isotopic components beneath the Ryukyu arc system: Evidence for 'back-arc' entrapment of Pacific MORB mantle [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 249 (3-4): 229-240.
- [41] Yan Q S, Shi X F. Petrologic perspectives on tectonic evolution of a nascent basin (Okinawa Trough) behind Ryukyu Arc: A review [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2014, 33 (4): 1-12.
- [42] Shinjo R, Chung S L, Kato Y, et al. Geochemical and Sr-Nd isotopic characteristics of volcanic rocks from the Okinawa Trough and Ryukyu Arc: implications for the evolution of a young, intracontinental back arc basin [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1999, 104 (B5): 10591-10608.
- [43] Guo K, Zhai S K, Yu Z H, et al. Geochemical and Sr-Nd-Pb-Li isotopic characteristics of volcanic rocks from the Okinawa Trough: implications for the influence of subduction components and the contamination of crustal materials [J]. *Journal of Marine Systems*, 2018, 180: 140-151.
- [44] Zhang Y X, Zeng Z G, Li X H, et al. High-potassium volcanic rocks from the Okinawa Trough: implications for a cryptic potassium-rich and DUPAL-like source [J]. *Geological Journal*, 2018, 53 (5): 1755-1766.
- [45] Shu Y C, Nielsen S G, Zeng Z G, et al. Tracing subducted sediment inputs to the Ryukyu arc-Okinawa Trough system: evidence from thallium isotopes [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2017, 217: 462-491.
- [46] Kendrick M A, Scambelluri M, Honda M, et al. High abundances of noble gas and chlorine delivered to the mantle by serpentinite

- subduction [J]. *Nature Geoscience*, 2011, 4(11): 807-812.
- [47] Métrich N, Schiano P, Clocchiatti R, et al. Transfer of sulfur in subduction settings: an example from Batan Island (Luzon volcanic arc, Philippines) [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1999, 167(1-2): 1-14.
- [48] Straub S M, Layne G D. The systematics of chlorine, fluorine, and water in Izu arc front volcanic rocks: Implications for volatile recycling in subduction zones [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2003, 67(21): 4179-4203.
- [49] Wallace P J, Edmonds M. The sulfur budget in magmas: evidence from melt inclusions, submarine glasses, and volcanic gas emissions [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2011, 73(1): 215-246.
- [50] Kelley K A, Plank T, Grove T L, et al. Mantle melting as a function of water content beneath back-arc basins [J]. *Journal of Geophysical Research:Solid Earth*, 2006, 111(B9): B09208.
- [51] Sun W D, Binns R A, Fan A C, et al. Chlorine in submarine volcanic glasses from the eastern Manus basin [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2007, 71(6): 1542-1552.
- [52] Holland G, Ballentine C J. Seawater subduction controls the heavy noble gas composition of the mantle [J]. *Nature*, 2006, 441(7090): 186-191.
- [53] Kendrick M A, Hémond C, Kamenetsky V S, et al. Seawater cycled throughout Earth's mantle in partially serpentinized lithosphere [J]. *Nature Geoscience*, 2017, 10(3): 222-228.
- [54] Barnes J D, Manning C E, Scambelluri M, et al. The behavior of halogens during subduction-zone processes [M]//Harlov D, Aranovich L. *The Role of Halogens in Terrestrial and Extraterrestrial Geochemical Processes: Surface, Crust, and Mantle*. Cham: Springer, 2018: 545-590.
- [55] Chavrit D, Burgess R, Sumino H, et al. The contribution of hydrothermally altered ocean crust to the mantle halogen and noble gas cycles [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2016, 183: 106-124.
- [56] Kobayashi M, Sumino H, Nagao K, et al. Slab-derived halogens and noble gases illuminate closed system processes controlling volatile element transport into the mantle wedge [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2017, 457: 106-116.
- [57] Sumino H, Burgess R, Mizukami T, et al. Seawater-derived noble gases and halogens preserved in exhumed mantle wedge peridotite [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2010, 294(1-2): 163-172.
- [58] Alt J C, Shanks W C. Serpentinization of abyssal peridotites from the MARK area, Mid-Atlantic Ridge: sulfur geochemistry and reaction modeling [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2003, 67(4): 641-653.
- [59] Orberger B, Mosbah M, Mevel C, et al. Nuclear microprobe analysis of serpentine from the mid-Atlantic ridge [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B:Beam Interactions with Materials and Atoms*, 1999, 158(1-4): 575-581.
- [60] Alt J C, Garrido C J, Shanks W C, et al. Recycling of water, carbon, and sulfur during subduction of serpentinites: a stable isotope study of Cerro del Almirez, Spain [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2012, 327-328: 50-60.
- [61] Kendrick M A, Burgess R, Pattrick R A D, et al. Fluid inclusion noble gas and halogen evidence on the origin of Cu-Porphyry mineralising fluids [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2001, 65(16): 2651-2668.
- [62] Zeng Z G, Niedermann S, Chen S, et al. Noble gases in sulfide deposits of modern deep-sea hydrothermal systems: implications for heat fluxes and hydrothermal fluid processes [J]. *Chemical Geology*, 2015, 409: 1-11.
- [63] Hou Z Q, Zaw K, Li Y H, 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.
- [64] Lüders V, Pracejus B, Halbach P. Fluid inclusion and sulfur isotope studies in probable modern analogue Kuroko-type ores from the JADE hydrothermal field (Central Okinawa Trough, Japan) [J]. *Chemical Geology*, 2001, 173(1-3): 45-58.
- [65] 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氦、氟、氩同位素组成 [J]. *海洋学报*, 2004, 23(4): 655-661. [ZENG Zhigang, QIN Yunshan, ZHAI Shikui. Helium, neon and argon isotope compositions of fluid inclusions in massive sulfides from the Jade hydrothermal field, Okinawa Trough [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2004, 23(4): 655-661.]
- [66] Lüders V, Niedermann S. Helium isotope composition of fluid inclusions hosted in massive sulfides from modern submarine hydrothermal systems [J]. *Economic Geology*, 2010, 105(2): 443-449.
- [67] Webber A P, Roberts S, Burgess R, et al. Fluid mixing and thermal regimes beneath the PACMANUS hydrothermal field, Papua New Guinea: helium and oxygen isotope data [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, 304(1-2): 93-102.
- [68] Lee J Y, Marti K, Severinghaus J P, et al. A redetermination of the isotopic abundances of atmospheric Ar [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2006, 70(17): 4507-4512.
- [69] Mark D F, Stuart F M, De Podesta M. New high-precision measurements of the isotopic composition of atmospheric argon [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2011, 75(23): 7494-7501.
- [70] Elliott T, Plank T, Zindler A, et al. Element transport from slab to volcanic front at the Mariana arc [J]. *Journal of Geophysical Research:Solid Earth*, 1997, 102(B7): 14991-15019.
- [71] Guo K, Zeng Z G, Chen S, et al. The influence of a subduction component on magmatism in the Okinawa Trough: Evidence from thorium and related trace element ratios [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2017, 145: 205-216.
- [72] Ribeiro J M, Stern R J, Kelley K A, et al. Nature and distribution of slab-derived fluids and mantle sources beneath the Southeast Mariana forearc rift [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2013, 14(10): 4585-4607.
- [73] Chen Z X, Zeng Z G, Yin X B, et al. Petrogenesis of highly fractionated rhyolites in the southwestern Okinawa Trough: constraints from whole-rock geochemistry data and Sr-Nd-Pb-O

- isotopes [J]. *Geological Journal*, 2019, 54(1): 316-332.
- [74] Zhang Y X, Zeng Z G, Yin X B, et al. Petrology and mineralogy of pumice from the Iheya North Knoll, Okinawa Trough: Implications for the differentiation of crystal-poor and volatile-rich melts in the magma chamber [J]. *Geological Journal*, 2018, 53(6): 2732-2745.
- [75] Sun W D, 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.
- [76] Sun W D, Arculus R J, Kamenetsky V S, et al. Metals and chlorine in the evolution of convergent margin magmas [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2006, 70(18): A629.
- [77] 孙卫东, 胡艳华, 丁兴, 等. 汇聚板块边缘岩浆中金属和氯的地球化学性质研究[J]. *地学前缘*, 2007, 14(2): 139-148. [SUN Weidong, HU Yanhua, DING Xing, et al. The geochemical behaviors of some metals and chlorine during the evolution of convergent margin magmas [J]. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14(2): 139-148.]
- [78] Jenner F E, O'Neill H S T C, Arculus R J, et al. The magnetite crisis in the evolution of arc-related magmas and the initial concentration of Au, Ag and Cu [J]. *Journal of Petrology*, 2010, 51(12): 2445-2464.
- [79] Li Z G, Chu F Y, Dong Y H, et al. Origin of selective enrichment of Cu and Au in sulfide deposits formed at immature back-arc ridges: Examples from the Lau and Manus basins [J]. *Ore Geology Reviews*, 2016, 74: 52-62.
- [80] Sun W, Bennett V C, Eggins S M, et al. Rhenium systematics in submarine MORB and back-arc basin glasses: laser ablation ICP-MS results [J]. *Chemical Geology*, 2003, 196(1-4): 259-281.
- [81] Sun W D, Bennett V C, Kamenetsky V S. The mechanism of Re enrichment in arc magmas: evidence from Lau Basin basaltic glasses and primitive melt inclusions [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 222(1): 101-114.
- [82] Alt J C. Subseafloor processes in mid-ocean ridge hydrothermal systems[M]//Humphris S E, Zierenberg R A, Mullineaux L S, et al. *Seafloor Hydrothermal Systems: Physical, Chemical, Biological, and Geological Interactions*. Washington D C: American Geophysical Union, 1995: 85-114.
- [83] 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(8): 1103-1115.
- [84] Humphris S E, Klein F. Progress in deciphering the controls on the geochemistry of fluids in seafloor hydrothermal systems [J]. *Annual Review of Marine Science*, 2018, 10(1): 315-343.
- [85] Yang K H, Scott S D. Possible contribution of a metal-rich magmatic fluid to a sea-floor hydrothermal system [J]. *Nature*, 1996, 383(6599): 420-423.
- [86] Marques A F A, Scott S D, Guillion M. Magmatic degassing of ore-metals at the Menez Gwen: Input from the Azores plume into an active Mid-Atlantic Ridge seafloor hydrothermal system [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, 310(1-2): 145-160.
- [87] 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.
- [88] 王淑杰, 翟世奎, 于增慧, 等. 关于现代海底热液活动系统模式的思考[J]. *地球科学*, 2018, 43(3): 835-850. [WANG Shujie, ZHAI Shikui, YU Zenghui, et al. Reflections on model of modern seafloor hydrothermal system [J]. *Earth Science*, 2018, 43(3): 835-850.]
- [89] Ikehata K, Suzuki R, Shimada K, et al. Mineralogical and geochemical characteristics of hydrothermal minerals collected from hydrothermal vent fields in the southern Mariana spreading center[M]//Ishibashi J, Okino K, Sunamura M. *Subseafloor Biosphere Linked to Hydrothermal Systems*. Tokyo: Springer, 2015: 275-287.
- [90] Kakegawa T, Utsumi M, Marumo K. Geochemistry of sulfide chimneys and basement pillow lavas at the southern Mariana trough (12.55°N–12.58°N) [J]. *Resource Geology*, 2008, 58(3): 249-266.
- [91] Ishibashi J I, Tsunogai U, Toki T, et al. Chemical composition of hydrothermal fluids in the central and southern Mariana Trough backarc basin[J] *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2015, 121: 126-136.
- [92] Halbach P, Hansmann W, Köppel V, et al. Whole-rock and sulfide lead-isotope data from the hydrothermal JADE field in the Okinawa back-arc trough [J]. *Mineralium Deposita*, 1997, 32(1): 70-78.
- [93] Hongo Y, Nozaki Y. Rare earth element geochemistry of hydrothermal deposits and *Calypptogena* shell from the Iheya Ridge vent field, Okinawa Trough [J]. *Geochemical Journal*, 2001, 35(5): 347-354.
- [94] Zeng Z G, Ma Y, Chen S, et al. Sulfur and lead isotopic compositions of massive sulfides from deep-sea hydrothermal systems: Implications for ore genesis and fluid circulation [J]. *Ore Geology Reviews*, 2017, 87: 155-171.
- [95] 曾志刚, 翟世奎, 杜安道. 冲绳海槽Jade热液区海底块状硫化物的Os同位素组成[J]. *海洋与湖沼*, 2003, 34(4): 407-413. [ZENG Zhigang, ZHAI Shikui, DU Andao. Os isotopic compositions of seafloor massive sulfides from the Jade hydrothermal field in the Okinawa Trough [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2003, 34(4): 407-413.]
- [96] 曾志刚, 蒋富清, 秦蕴珊, 等. 冲绳海槽中部Jade热液活动区中块状硫化物的稀土元素地球化学特征[J]. *地质学报*, 2001, 75(2): 244-249. [ZENG Zhigang, JIANG Fuqing, QIN Yunshan, et al. Rare earth element geochemistry of massive sulphides from the Jade hydrothermal field in the Central Okinawa Trough [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2001, 75(2): 244-249.]
- [97] 曾志刚, 蒋富清, 翟世奎, 等. 冲绳海槽Jade热液活动区块状硫化物的铅同位素组成及其地质意义[J]. *地球化学*, 2000, 29(3): 239-245. [ZENG Zhigang, JIANG Fuqing, ZHAI Shikui, et al. Lead isotopic compositions of massive sulfides from the Jade hydrothermal field in the Okinawa Trough and its geological implications [J]. *Geochimica*, 2000, 29(3): 239-245.]
- [98] 侯增谦, 李延河, 艾永德, 等. 冲绳海槽活动热水成矿系统的氦同位素组成: 幔源氦证据[J]. *中国科学(D辑)*, 1999, 29(2): 155-162. [HOU Zengqian, LI Yanhe, AI Yongde, et al. The helium isotopic compositions of activity hydrothermal system in the Okinawa Trough: mantle-derived helium evidence [J]. *Science in China Series D-Earth Sciences (in Chinese)*, 1999, 29(2): 155-162.]

- [99] 刘焱光, 孟宪伟, 付云霞. 冲绳海槽Jade热液场烟囱物稀土元素和锶、钕同位素地球化学特征[J]. 海洋学报, 2005, 27(5): 67-72. [LIU Yanguang, MENG Xianwei, FU Yunxia. Rare earth element and strontium-neodymium isotope characteristics of hydrothermal chimney in Jade area in the Okinawa Trough [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2005, 27(5): 67-72.]
- [100] 侯增谦, 艾永德, 曲晓明, 等. 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 Zengqian, AI Yongde, QU Xiaoming, et al. Possible contribution of magmatic fluids to seafloor ore-forming hydrothermal system in the Okinawa Trough [J]. Acta Geologica Sinica, 1999, 73(1): 57-65.]
- [101] 侯增谦, 张绮玲. 冲绳海槽现代活动热水区CO₂-烃类流体: 流体包裹体证据[J]. 中国科学(D辑), 1998, 28(2): 142-148. [HOU Zengqian, ZHANG Qiling. CO₂-Hydrocarbon fluids of the Jade hydrothermal field in the Okinawa Trough: fluid inclusion evidence [J]. Science in China Series D-Earth Sciences, 1998, 28(2): 142-148.]
- [102] Chen Z X, Zeng Z G, Wang X Y, et al. Element and Sr isotope zoning in plagioclase in the dacites from the southwestern Okinawa Trough: Insights into magma mixing processes and time scales [J]. Lithos, 2020, 376-377: 105776.
- [103] Chen Z X, Zeng Z G, Tamehe L S, et al. Magmatic sulfide saturation and dissolution in the basaltic andesitic magma from the Yaeyama Central Graben, southern Okinawa Trough [J]. Lithos, 2021, 388-389: 106082.
- [104] 陈祖兴, 曾志刚, 王晓媛, 等. 岩浆房持续的时间: 矿物内元素扩散年代学研究进展及展望[J]. 地球科学进展, 2020, 35(12): 1232-1242. [CHEN Zuxing, ZENG Zhigang, WANG Xiaoyuan, et al. Duration of magma chamber: Progress and prospect of element diffusion chronometry of minerals [J]. Advances in Earth Science, 2020, 35(12): 1232-1242.]
- [105] Li X H, Zeng Z G, Dan W, et al. Source lithology and crustal assimilation recorded in low $\delta^{18}\text{O}$ olivine from Okinawa Trough, back-arc basin [J]. Lithos, 2020, 360-361: 105444.
- [106] Li X H, Zeng Z G, Yang H X, et al. Integrated major and trace element study of clinopyroxene in basic, intermediate and acidic volcanic rocks from the middle Okinawa Trough: Insights into petrogenesis and the influence of subduction component [J]. Lithos, 2020, 352-353: 105320.
- [107] Li X H, Ren Z Y, Zeng Z G, et al. Petrogenesis of middle Okinawa Trough volcanic rocks: Constraints from lead isotopes in olivine-hosted melt inclusions [J]. Chemical Geology, 2020, 543: 119600.
- [108] Zhang Y X, Zeng Z G, Gaetani G, et al. Mineralogical constraints on the magma mixing beneath the Iheya Graben, an active back-arc spreading centre of the Okinawa trough [J]. Journal of Petrology, 2020, 61(9): ega098.
- [109] Zhang Y X, Gaetani G, Zeng Z G, et al. Halogen (F, Cl) concentrations and Sr-Nd-Pb-B isotopes of the basaltic andesites from the southern Okinawa Trough: Implications for the recycling of subducted serpentinites [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2021, 126(3): e2021JB021709.
- [110] 张玉祥, 曾志刚, 王晓媛, 等. 冲绳海槽地质构造对热液活动的控制机理[J]. 地球科学进展, 2020, 35(7): 678-690. [ZHANG Yuxiang, ZENG Zhigang, WANG Xiaoyuan, et al. Geologic control on hydrothermal activities in the Okinawa Trough [J]. Advances in Earth Science, 2020, 35(7): 678-690.]
- [111] Zeng Z G, Wang X Y, Murton B J, et al. Dispersion and intersection of hydrothermal plumes in the Manus back-arc basin, western pacific [J]. Geofluids, 2020, 2020: 4260806.
- [112] Zeng Z G, Li X H, Chen S, et al. Iron, copper, and zinc isotopic fractionation in seafloor basalts and hydrothermal sulfides [J]. Marine Geology, 2021, 436: 106491.