

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2025.237>



南岭地区西山钙碱性火山岩中石榴子石的成因及其地质意义

丁丽雪^{1,2,3}, 付建明^{1,2,3}, 周岱^{1,2,3}, 李岩^{1,2,3}

1. 中国地质调查局花岗岩成岩成矿地质研究中心, 湖北武汉 430205

2. 中国地质调查局武汉地质调查中心, 湖北武汉 430205

3. 中南地质科技创新中心, 湖北武汉 430205

摘要: 保存在钙碱性火山岩中的石榴子石不仅可以限定岩浆结晶的温压条件, 而且可以揭示寄主岩浆的演化历史, 具有重要的成因意义。然而, 全球范围内产出在钙碱性火山岩中的石榴子石非常稀少, 且目前对于该类岩石中石榴子石的成因还存在很大争议。西山侏罗纪含榴英安岩中产出了岩浆型、变质型、转熔型 3 种成因石榴子石晶体。岩浆型石榴子石, 多数以单晶形式存在, 不发育反应边, 成分上贫 MgO (0.92%~2.37%)、CaO (1.21%~2.85%)、MnO (0.82%~1.64%), 富 FeO (36.01%~39.82%); 变质型石榴子石, 发育钠长石反应边, 成分上富 MgO (7.42%~8.46%)、FeO (27.80%~30.99%), 贫 CaO (1.32%~1.33%)、MnO (0.56%~0.60%); 转熔型石榴子石, MgO (2.89%~3.55%)、FeO (34.57%~37.39%)、CaO (2.08%~2.51%)、MnO (0.72%~1.17%) 含量介于岩浆型、变质型石榴子石之间。在稀土元素组成上, 三类石榴子石均显示出 LREE 强烈亏损的特征, 但岩浆型石榴子石富集 HREE, Eu 负异常 ($Eu/Eu^* = 0.004 \sim 0.005$) 最显著; 变质型石榴子石亏损 HREE, 稀土元素总含量 ($\Sigma REE = 64 \times 10^{-6} \sim 72 \times 10^{-6}$) 明显低于岩浆型石榴子石 ($\Sigma REE = 681 \times 10^{-6} \sim 906 \times 10^{-6}$), 具弱负 Eu 异常 ($Eu/Eu^* = 0.24$); 转熔型石榴子石稀土元素特征总体上介于岩浆型、变质型石榴子石之间 ($\Sigma REE = 673 \times 10^{-6} \sim 2731 \times 10^{-6}$; $Eu/Eu^* = 0.02 \sim 0.03$), 且含量变化范围较大。岩相学、矿物化学等特征一致表明西山含榴英安岩中的岩浆型石榴子石是下地壳高温 (740~959 °C)、高压 (>7 kbar)、低氧逸度 $\log f_{O_2}$ (-23.67~-12.32) 岩浆演化早期结晶的产物; 变质型石榴子石是在岩浆型石榴子石晶出之后, 经由火山喷发作用从源岩捕获的变质晶体; 转熔型石榴子石则是研究区下地壳变泥质岩减压部分熔融过程中, 由黑云母脱水部分熔融形成的。结合区域地质背景以及岩石中锆石、石榴子石 Hf-O 同位素等特征, 认为西山含榴英安岩可能源于成熟度较高的变沉积岩, 且形成于伸展构造背景。

关键词: 石榴子石; 英安岩; 伸展构造背景; 西山岩体; 南岭地区; 构造地质。

中图分类号: P581; P611

文章编号: 1000-2383(2026)02-477-19

收稿日期: 2025-03-17

Genesis of Garnet in Calc-Alkaline Volcanic Rocks from Xishan Complex in Nanling Region, and Its Geological Significance

Ding Lixue^{1,2,3}, Fu Jianming^{1,2,3}, Zhou Dai^{1,2,3}, Li Yan^{1,2,3}

1. Research Center for Petrogenesis and Mineralization of Granitoid Rocks, China Geological Survey, Wuhan 430205, China

2. Wuhan Center of China Geological Survey, Wuhan 430205, China

3. Central South China Innovation Center for Geosciences, Wuhan 430205, China

基金项目: 中国地质调查局项目“南岭成矿带区域地质调查”(No. DD20240038); 国家自然科学基金项目(No. 41902053); 中国地质调查局花岗岩成岩成矿地质研究中心开放基金项目(No. PMGR202501)。

作者简介: 丁丽雪(1982—), 女, 高级工程师, 主要从事岩浆与成矿作用研究。ORCID: 0000-0003-1349-4452. E-mail: 569259265@qq.com

引用格式: 丁丽雪, 付建明, 周岱, 李岩, 2026. 南岭地区西山钙碱性火山岩中石榴子石的成因及其地质意义. 地球科学, 51(2): 477-495.

Citation: Ding Lixue, Fu Jianming, Zhou Dai, Li Yan, 2026. Genesis of Garnet in Calc-Alkaline Volcanic Rocks from Xishan Complex in Nanling Region, and Its Geological Significance. *Earth Science*, 51(2): 477-495.

Abstract: Garnets preserved in calc-alkaline volcanic rocks can not only constrain the temperature and pressure conditions of magma crystallization, but also can reveal the evolution history of the host magma, presenting significant genetic implications. However, garnet occurring in calc-alkaline volcanic rocks is extremely rare globally, and there remain substantial controversies regarding the genesis of such garnets. In the Jurassic garnet-bearing dacite from Xishan complex, three genetic types of garnet crystals coexist: magmatic garnet, metamorphic garnet and peritectic garnet. Magmatic garnets mostly occur as single crystals without reaction rims, characterized by low MgO (0.92%~2.37%), CaO (1.21%~2.85%), and MnO (0.82%~1.64%) contents, but high FeO (36.01%~39.82%) contents. Metamorphic garnets develop albite reaction rims. In terms of composition, they are rich in MgO (7.42%~8.46%) and FeO (27.80%~30.99%), and poor in CaO (1.32%~1.33%) and MnO (0.56%~0.60%). For peritectic garnets, the contents of MgO (2.89%~3.55%), FeO (34.57%~37.39%), CaO (2.08%~2.51%), and MnO (0.72%~1.17%) are all between those of the former two types. In terms of rare earth elements (REE), all three types of garnet exhibit strong depletion in light REE(LREE). Notably, magmatic garnets are enriched in heavy REE(HREE), with the most significant Eu negative anomaly ($\text{Eu}/\text{Eu}^*=0.004\sim0.005$). Metamorphic garnets are depleted in HREE, and the total rare earth element content ($\sum \text{REE}=64\times 10^{-6}\sim 72\times 10^{-6}$) is significantly lower than those of the magmatic garnets ($\sum \text{REE}=681\times 10^{-6}\sim 906\times 10^{-6}$), with a weaker Eu negative anomaly ($\text{Eu}/\text{Eu}^*=0.24$). The characteristics of rare earth element of peritectic garnets are generally between those of magmatic and metamorphic garnets ($\sum \text{REE}=673\times 10^{-6}\sim 2\,731\times 10^{-6}$; $\text{Eu}/\text{Eu}^*=0.02\sim 0.03$), and the content variation range is relatively large. Petrographic and mineral chemical characteristics consistently indicate that the magmatic garnets in the garnet-bearing dacite from Xishan complex is a product of early crystallization during magma evolution under high-temperature (740~959 °C), high-pressure (>7 kbar), and low oxygen fugacity ($\log f_{\text{O}_2}$: -23.67 to -12.32) conditions in the lower crust. In contrast, the metamorphic garnets are metamorphic crystal captured from the source rock by volcanic eruption after the former crystallized. The peritectic garnets were formed by partial melting of biotite dehydration during the decompression partial melting process of metapelitic rocks in the lower crust of the study area. Combining with the regional geological context and Hf-O isotopic characteristics of zircon and garnet, this study suggests that the Xishan garnet-bearing dacite may be derived from relatively mature metasedimentary rocks and formed in an extensional tectonic setting.

Key words: garnet; dacite; extensional tectonic setting; Xishan complex; Nanling Region; structural geology.

0 引言

石榴子石是一种复杂的硅酸盐矿物,自然界中的石榴子石按照成分分为两个固溶体系列:钙质系列(钙铁榴石、钙铬榴石、钙铝榴石)和铝质系列(镁铝榴石、锰铝榴石、铁铝榴石)。目前,铝质系列石榴子石的成因类型主要包括3种:变质成因、转熔成因和岩浆成因。变质成因石榴子石是各类变质岩(包括榴辉岩、角闪岩、片岩、片麻岩、麻粒岩等)中重要的造岩矿物,可以为示踪寄主岩石经历的变质演化历史提供重要记录(牛贺才等, 2007; Guillot *et al.*, 2008; Zhou *et al.*, 2011; Caddick and Kohn, 2013; Xu *et al.*, 2013; Xia *et al.*, 2016; 高利娥等, 2017; Dong *et al.*, 2018; 夏琼霞等, 2019; Devoir *et al.*, 2021; Zhu *et al.*, 2022; Zhang *et al.*, 2023)。转熔成因石榴子石是在变质岩发生深熔过程中,由黑云母等矿物的脱水部分熔融作用形成(Patiño Douce and Harris, 1998; Zeng *et al.*, 2005; Stevens *et al.*, 2007; Villaros *et al.*, 2009; Taylor and Stevens, 2010; Lackey *et al.*, 2012; Tacchetto *et al.*, 2019;

Dorais *et al.*, 2023; Wang *et al.*, 2025)。岩浆成因石榴子石产出的岩石类型比较广泛且形成机制复杂,如产出在金伯利岩、橄榄岩、辉石岩和玄武岩等基性—超基性岩中的石榴子石,通常形成于高压环境,且具有高镁的特征(Liu *et al.*, 1992; Dong, 1997; 张宏福和路凤香, 2000; 李积山等, 2022);产出在过铝质(如S型花岗岩)、准铝质以及铁质花岗岩中的石榴子石,通常作为副矿物形成于中—低压环境(Allan and Clarke, 1981; Hogan, 1996; Kebede *et al.*, 2001; Dahlquist *et al.*, 2007; Zhang *et al.*, 2012; Samadi *et al.*, 2014b; Narduzzi *et al.*, 2017; Das *et al.*, 2020);产出在伟晶岩、细晶岩以及淡色花岗岩中的石榴子石则主要形成于岩浆演化后期,通常具有低镁富锰的特征(于津海和 O'Reilly, 2001; Bizimis *et al.*, 2005; Dahlquist *et al.*, 2007; Zeng *et al.*, 2012; Müller *et al.*, 2012; Gadas *et al.*, 2013; Xu *et al.*, 2013; Cheng *et al.*, 2014; Samadi *et al.*, 2014a; Taylor *et al.*, 2015; Mahdy *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2025)。

然而,全球范围内产出在钙碱性火山岩中的石

石榴子石非常稀少. 研究表明, 保存在钙碱性火山岩中的石榴子石具有重要的成因意义(Mitropoulos *et al.*, 1999; Harangi *et al.*, 2001; Kawabata and Takafuji, 2005; Rubatto and Hermann, 2007; Patrabis - Deb *et al.*, 2009; Taylor and Stevens, 2010; Caffè *et al.*, 2012; Lackey *et al.*, 2012; Hönig *et al.*, 2014; Taylor *et al.*, 2015; Zhou *et al.*, 2017; Lucci *et al.*, 2018; Yan *et al.*, 2022). 目前, 关于钙碱性火山岩中石榴子石的成因机制还存在很大争议, 主要包括: ①由过铝质岩浆在高温($\sim 950\sim 1\,050\text{ }^{\circ}\text{C}$)、高压($9\sim 18\text{ kbar}$)条件下结晶形成, 且常与黑云母、堇青石等矿物共生(Green and Ringwood, 1972; Clemens and Phillips, 2014); ②由准铝质岩浆在相对高压($\geq 7\text{ kbar}$)条件下结晶产生, 通常与角闪石、黑云母、斜方辉石、单斜辉石等矿物共生(Harangi *et al.* 2001; Kawabata and Takafuji, 2005; René and Stelling, 2007); ③由晚期演化岩浆在低温($< 800\text{ }^{\circ}\text{C}$)、低压($5\sim 7\text{ kbar}$)和富流体的条件下结晶产生, 通常富 MnO 含量(Abbott, 1981; Miller and Stoddard, 1981; Yan and He, 2022); ④围岩混染, 即在岩浆上升过程中, 捕获的围岩中的石榴子石(Allan and Clarke, 1981; Lantai, 1991); ⑤岩浆源区岩石部分熔融产生的残余相矿物(Zeng *et al.*, 2005; Stevens *et al.*, 2007).

位于南岭西段的西山杂岩体中产出了含榴英安岩, 为研究火山岩中石榴子石的成因提供了理想对象. 本文通过对西山含榴英安岩中的石榴子石开展系统的岩相学、矿物原位微区地球化学、O 同位素等研究并结合锆石 Hf-O 同位素等分析, 揭示出该类岩石中石榴子石形成的物理化学条件、成因机制等. 在此基础上, 进一步探讨了寄主岩石的演化历史及其地质意义等.

1 地质背景

南岭地区位于华南腹地, 区内中生代岩浆活动强烈, 且以花岗质岩石最为发育. 地质、地球物理资料显示南岭地区的花岗岩体在空间分布上受基底构造以及深大断裂的联合控制, 构成以 EW 向为主、规模巨大的花岗岩带(周新民等, 2007). 早中生代(印支期)花岗岩缺乏同期的火山岩伴生, 中侏罗世的火山岩浆作用拉开了华南晚中生代大规模岩浆作用的序幕, 随后喷出和侵入岩浆作用相伴产出, 至晚白垩世结束(徐夕生, 2008). 近年来, 大量高精

度测年结果显示, 南岭地区中生代岩浆岩主要形成于 $150\sim 180\text{ Ma}$ (付建明等, 2004; 华仁民等, 2005; 黄会清等, 2008; 朱金初等, 2008; 周立同等, 2022; 席振等, 2024; 何川等, 2025), 且在空间分布上具有从内陆向沿海方向迁移的特征.

西山杂岩体位于南岭地区九嶷山复式岩体的最东端(图1), 呈岩盆状产出, 面积约 705 km^2 . 大地构造位置上处于华夏与扬子板块接合带的中段, 区域构造上受大型断裂带和褶皱构造的共同控制, 这些构造要素共同塑造了西山岩体及周边的构造格局. 茶陵—郴州—临武断裂等大型断裂带为区域构造运动的重要构造线, 对西山岩体的分布、岩浆活动范围等起了重要控制作用. 此外, 区域褶皱构造的轴向、形态等影响了岩体的就位空间, 岩体的展布方向等. 区内地层以震旦系—寒武系、泥盆系—中三叠统为主, 主要岩性为边缘海盆相砂泥质岩、浅海台地相碳酸盐岩. 该岩体岩性复杂, 从花岗岩、碎斑熔岩到喷溢火山岩均可见到, 为一火山—侵入杂岩体. 本研究中的含榴英安岩主要分布在西山杂岩体东北部的西山林场、枫木山村等地.

2 样品特征

西山含榴英安岩呈灰—紫灰色, 斑状结构, 块状构造. 斑晶主要由斜长石($\sim 8\%$)、钾长石($\sim 3\%$)、石英($\sim 2\%$)以及少量黑云母($< 1\%$)和石榴子石($< 1\%$)组成. 斜长石, 半自形—自形板状, 粒径以 $2\sim 3\text{ mm}$ 为主, 局部被绢云母、方解石交代, 发育聚片双晶、卡钠复合双晶; 钾长石, 半自形板状, 以高温透长石、正长石为主, 粒径介于 $1\sim 3\text{ mm}$ 之间; 石英, 半自形—他形粒状, 边部常发生溶蚀呈浑圆状或港湾状, 内部发育裂纹, 晶体粒径以 $1.0\sim 1.5\text{ mm}$ 为主. 石榴子石, 呈浅棕色, 多数晶体以单晶形式存在(图2), 少数晶体周缘发育钠长石边、绿泥石边等, 未见堇青石—紫苏辉石反应边或堇青石—黑云母反应边, 也未见到磁铁矿反应边, 晶体普遍受到熔蚀且发育碎裂结构, 多呈浑圆状、不规则港湾状或礁岛状, 粒径一般介于 $0.8\sim 1.5\text{ mm}$ 之间. 基质为霏细结构, 矿物组成与斑晶相似.

3 分析方法

3.1 电子探针分析

石榴子石的主量元素成分分析在中国地质调

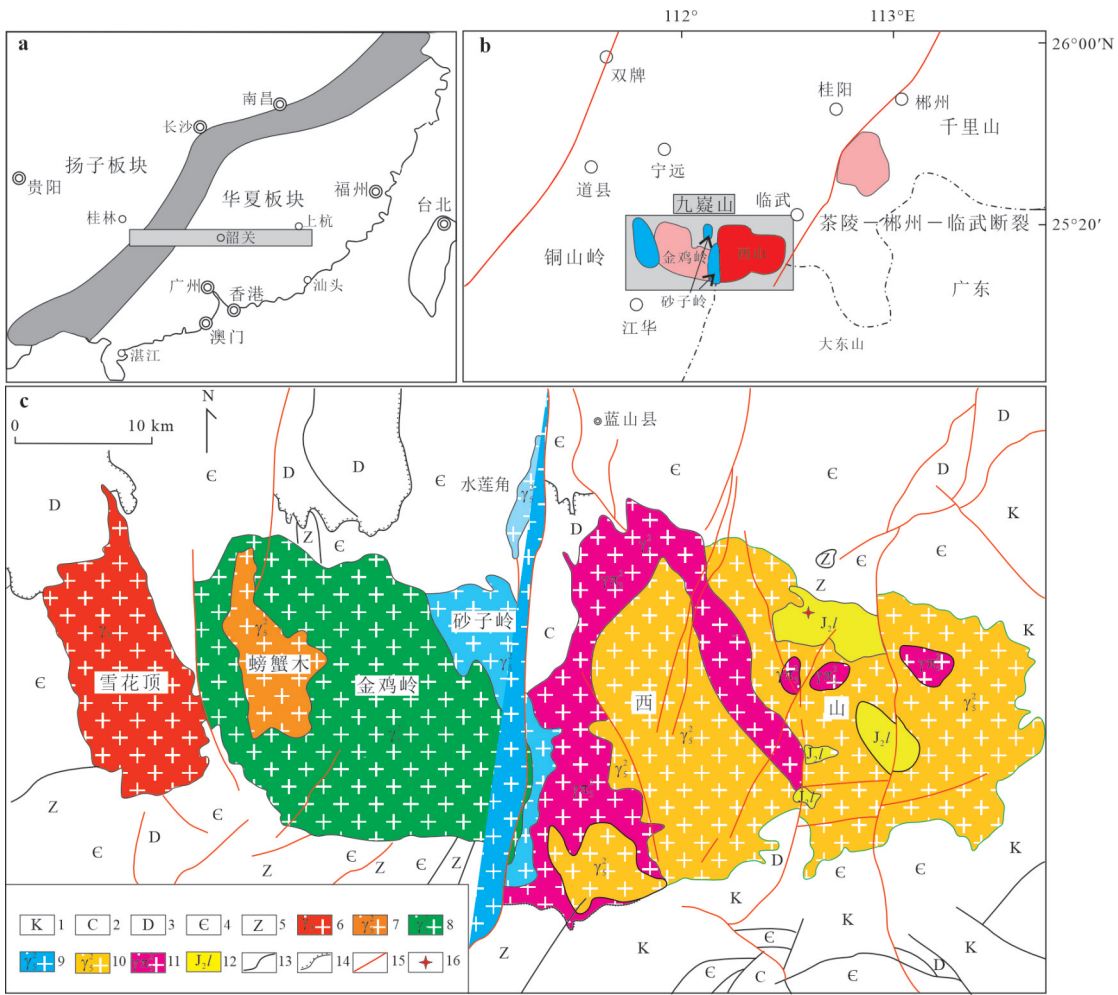


图 1 九嶷山复式岩体地质简图

Fig.1 Simplified geological map of the Jiuyishan composite pluton

1. 白垩系; 2. 石炭系; 3. 泥盆系; 4. 寒武系; 5. 震旦系; 6. 志留纪花岗岩; 7. 中侏罗世细粒斑状二长花岗岩; 8. 中侏罗世粗中粒斑状正长花岗岩; 9. 中侏罗世中细粒花岗岩闪长岩、二长花岗岩; 10. 中侏罗世浅色碎斑熔岩; 11. 中侏罗世黑色碎斑熔岩; 12. 中侏罗世英安/流纹(斑)岩; 13. 地质界线; 14. 不整合界线; 15. 断层; 16. 采样点

查局武汉地质调查中心电子探针室完成,使用的仪器型号为岛津 EPMA-1600,加速电压为 15 kV,电流为 10 nA,束斑直径为 1 μ m,采用 SPI 国际标准物质进行校正,各元素含量检出限为 $\sim 100 \times 10^{-6}$,分析精度优于 1%~2%(RSD).

3.2 LA-ICP-MS 微区原位微量元素分析

石榴子石原位微区微量元素含量在武汉上谱分析科技有限责任公司利用 LA-ICP-MS 完成. 详细的仪器参数和分析流程见 Zong *et al.* (2017). GeoLas HD 激光剥蚀系统由 COMPeXPro 102 ArF 193 nm 准分子激光器和 MicroLas 光学系统组成, ICP-MS 型号为 Agilent 7900. 本次分析的激光束斑和频率分别为 44 μ m 和 5 Hz. 激光能量为 80 mJ. 单矿物微量元素含量处理中采用玻璃标准物质 BH-

VO-2G, BCR-2G 和 BIR-1G 进行多外标无内标校正 (Liu *et al.*, 2008). 每个时间分辨分析数据包括大约 20~30 s 空白信号和 50 s 样品信号. 对分析数据的离线处理(包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正以及元素含量计算)采用软件 ICPMSDataCal (Liu *et al.*, 2008) 完成.

3.3 能谱面扫描分析

石榴子石能谱面扫描分析在中国地质调查局武汉地质调查中心扫描电镜室完成,使用的仪器为日本电子 JSM-7500F 型扫描电子显微镜,搭载牛津 X-MaxN 型能谱仪. 测试条件为加速电压 20 kV, 电流初始值 10 μ A. 能谱面扫描参数设置为像素驻留时间 100 μ s, 扫描 200 帧.

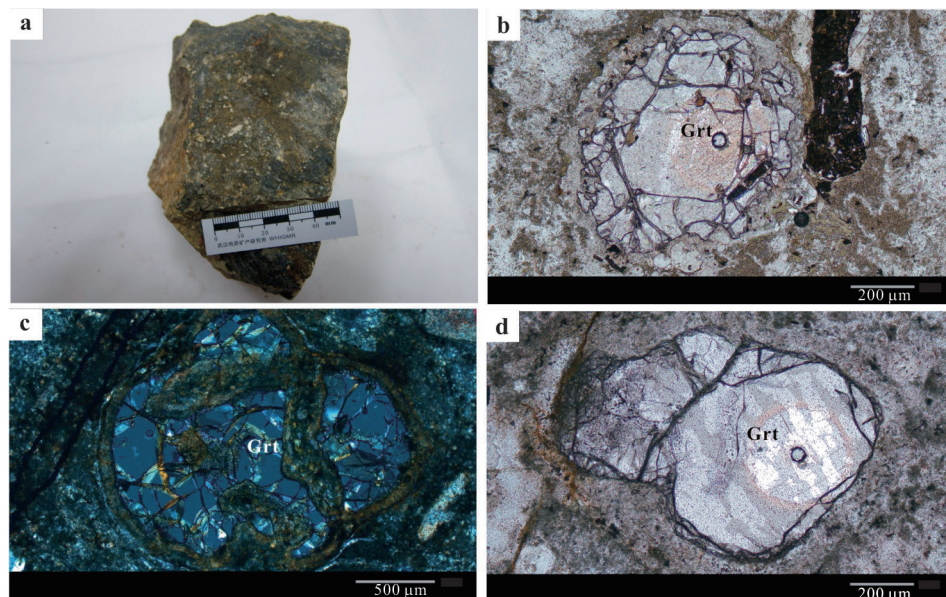


图2 西山含榴英安岩手标本以及岩石中不同类型石榴子石显微照片

Fig.2 Hand specimen and microphotographs of different types of garnets in the garnet-bearing dacite from Xishan complex

a. 含榴英安岩手标本; b. 类型Ⅰ石榴子石, 晶体自形程度较好, 整体形态相对完整, 均发育裂隙, 受熔蚀现象显著, 部分晶体形态因熔蚀和破碎显得较为不规则, 均无明显的反应边结构; c. 类型Ⅱ石榴子石, 可见非常明显的反应边结构, 反应边围绕石榴子石晶体生长, 与石榴子石主体在光学特征、矿物组成方面均存在显著差异; d. 类型Ⅲ石榴子石, 自形程度较差, 晶体形态相对不规则, 晶体轮廓较清晰, 内部未见明显包裹矿物

3.4 锆石 U-Pb 定年及 Lu-Hf 同位素分析

锆石单矿物分选在河北廊坊市诚信地质服务公司完成. 样品采用常规方法粉碎, 用重选、磁选等方法进行分选. 锆石制靶、透、反射光以及阴极发光 (CL) 照相均在北京锆年领航

科技有限公司完成. 锆石 CL 照相在配备 Gatan 阴极荧光探头装置的 JSM6510 扫描电镜上完成. 锆石 U-Pb 定年、微量元素含量以及 Lu-Hf 同位素分析均在中国地质调查局武汉地质调查中心同位素地球化学实验室完成. 锆石 U-Pb 定年和微量元素含量分析利用 RESolution LR 193 nm 激光剥蚀系统和 ICAP-Q 电感耦合等离子体质谱的联用装置 (LA-ICP-MS) 完成. 测试所用激光束斑直径为 19 μm , 激光束能量密度 4 J/cm², 频率为 3 Hz. 锆石微量元素含量利用 NIST610 为外标, ²⁹Si 作为内标进行定量计算. 锆石 U-Pb 定年分析采用锆石标准矿物 91500 为外标进行同位素分馏校正. 锆石样品的同位素比值和元素含量采用软件 ICPMSDataCal (Liu *et al.*, 2008) 进行数据处理分析, U-Pb 谐和年龄和加权平均年龄计算及绘图采用软件 Isoplot 3.0 (Ludwig, 2003) 完成. 锆石原位 Lu-Hf 同位素分析所用仪器为 RESolution LR 193 nm 激光剥蚀系统和 Neptune plus 多接收电感耦合等离子体质谱的联用装置 (LA-MC-ICP-MS). 实验过程中, 激光束斑

直径为 43 μm , 激光束能量密度为 4 J/cm², 频率为 6 Hz. 采用锆石标准物质 Penglai 和 Plésovice 为监控样. 采用 ¹⁷⁶Lu 衰变常数 $1.867 \times 10^{-11} \text{a}^{-1}$ 和样品 ¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf 实测值进行 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 和二阶段 Hf 同位素模式年龄计算.

3.5 锆石 SHRIMP 氧同位素分析

锆石 SHRIMP 氧同位素分析在北京离子探针中心多接收二次离子质谱仪 (SHRIMP II e-MC) 上完成. 仪器运行条件和详细分析流程参见 Ickert *et al.* (2008). 锆石单点测定值为 10 组单组 ¹⁸O/¹⁶O 值, 且单组 ¹⁸O/¹⁶O 数据精度一般优于 0.2‰~0.3‰ (1 σ) (Ickert *et al.*, 2008). 本次实验使用的标样为 Temora-2 ($\delta^{18}\text{O}=8.20\text{‰}$; Black *et al.*, 2004) 和 91500 ($\delta^{18}\text{O}=9.86\text{‰}$; Wiedenbeck *et al.*, 2004), 用以监控仪器的稳定性及校正被测样品. 标准锆石分析误差为 0.10~0.17 (1 σ).

3.6 单矿物激光氟化法 O 同位素分析

单矿物激光氟化法 O 同位素分析在中国科学院地质与地球物理研究所稳定同位素分析实验室完成. 实验过程中, 重量约为 1.5 mg 的样品在样品室中与纯化的 BrF₅ 试剂反应以释放氧气. 激光室中产生的气体通过一系列保持在液氮温度下的低温阱进行净化. O₂ 在 MAT252 质谱仪上进行分析. 实验过程中使用的标样为锆石 PL (IGGCAS, $\delta^{18}\text{O}=$

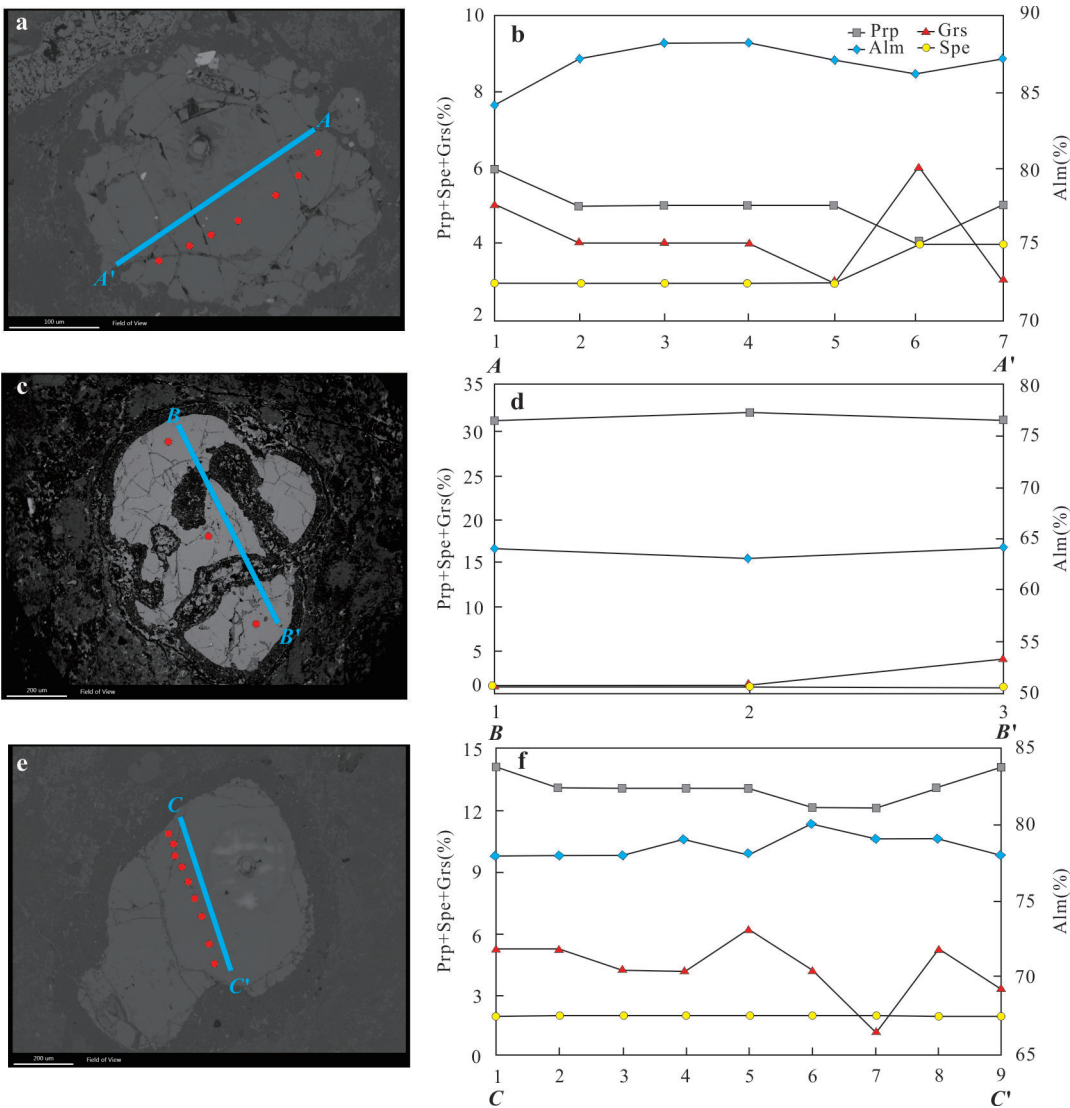


图3 西山含榴英安岩中3种类型石榴子石 EPMA 端元成分剖面图
Fig.3 EPMA composition profiles of typical magmatic garnets in the garnet-bearing dacite from Xishan complex
a,b. 类型 I 石榴子石; c,d. 类型 II 石榴子石; e,f. 类型 III 石榴子石

+5.17‰±0.08‰)和石榴石 04BXL07(中国科学技术大学;δ¹⁸O=+3.70‰±0.11‰)。

4 分析结果

4.1 矿物化学成分特征

石榴子石主量元素数据列于附表1。根据主量元素成分特征,大致可将西山含榴英安岩中的石榴子石分为3类:①类型 I 石榴子石,富 FeO(36.01%~39.82%),贫 MgO(0.92%~2.37%)、CaO(1.21%~2.85%)、MnO(0.82%~1.64%)含量,端元成分主要由铁铝榴石(80%~88%)、镁铝榴石(4%~9%)、锰铝榴石(2%~4%)等组成;②类型 II 石榴子石,富 MgO(7.42%~8.46%)、贫 CaO(1.32%~1.33%)、FeO

(27.80%~30.99%)、MnO(0.56%~0.60%),端元成分由铁铝榴石(63%~64%)、镁铝榴石(31%~32%)、锰铝榴石为(1%)、钙铝榴石(1%~4%)组成;③类型 III 石榴子石,MgO(2.89%~3.55%)、FeO(34.57%~37.39%)、CaO(2.08%~2.51%)、MnO(0.72%~1.17%)含量介于类型 I、类型 II 石榴子石之间,端元成分主要由铁铝榴石(74%~80%)、镁铝榴石(12%~14%)、锰铝榴石(2%~3%)等组成。

从端元成分剖面图(图3)来看,类型 I 石榴子石显示出明显的成分环带特征。如图3所示,从核部到边部,铁铝榴石组分(Alm)呈降低趋势,镁铝榴石组分(Prp)呈升高趋势,两者之间呈镜像关系,钙铝榴石(Grs)、锰铝榴石组分(Spe)略具波动,显示出典

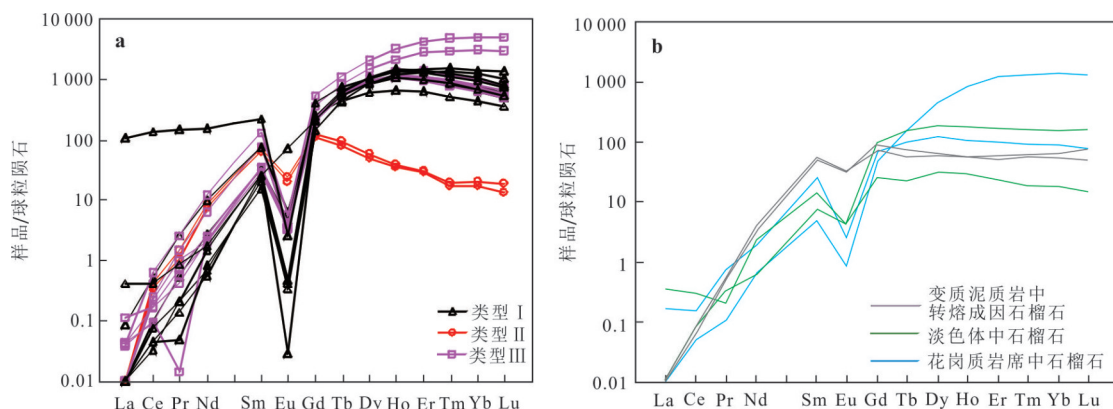


图4 西山含榴英安岩中3种类型石榴子石球粒陨石标准化稀土配分图(a)和斯威士兰姆洪多谷变质岩套中转熔成因石榴子石标准化稀土配分图(b)

Fig.4 Chondrite-normalized Rare Earth Element(REE) distribution patterns of three types of garnets in garnet-bearing dacite from Xishan complex (a) and peritectic garnets from the Mkhondo Valley Metamorphic Suite in Swaziland (b)

图b数据来源于 Taylor and Stevens(2010);标准化值据 Sun and McDonough(1989)

型生长环带的特征。相比之下,类型Ⅱ石榴子石,从核部到边部铁铝榴石组分(Alm)呈略升高趋势,镁铝榴石(Prp)组分呈略下降趋势,钙铝榴石(Grs)略具升高趋势,锰铝榴石组分(Spe)无明显变化,未显示出明显生长环带的特征;类型Ⅲ石榴子石,从核部到边部铁铝榴石组分(Alm)呈略下降趋势,镁铝榴石(Prp)组分呈略上升趋势,钙铝榴石(Grs)组分略具波动,锰铝榴石组分(Spe)无明显变化,显示出与类型Ⅰ、Ⅱ石榴子石明显不同的特征。

石榴子石原位微量、稀土元素分析结果见附表2。如附表2所示,3种类型石榴子石在微量、稀土元素特征方面均存在显著差异(图4)。在微量元素方面,类型Ⅰ石榴子石具有较低的Ti、Cr、Co、Ni、Zr含量,较高的Zn、Y、Sr、Rb含量;相比之下,类型Ⅱ石榴子石具有较高的Ti、Cr、Co、Ni、Zr含量,较低的Zn、Y、Sr、Rb含量;类型Ⅲ石榴子石,基本介于类型Ⅰ、类型Ⅱ石榴子石之间。在稀土元素方面,3种类型石榴子石均显示出LREE强烈亏损的特征,但三者存在一定的差异,类型Ⅰ石榴子石 Σ LREE最低,介于 $2.80 \times 10^{-6} \sim 6.48 \times 10^{-6}$ 之间;类型Ⅱ石榴子石 Σ LREE明显高于类型Ⅰ石榴子石,介于 $14.6 \times 10^{-6} \sim 16.7 \times 10^{-6}$ 之间;类型Ⅲ石榴子石 Σ LREE变化范围较大,介于 $5.47 \times 10^{-6} \sim 27.0 \times 10^{-6}$ 之间。从稀土元素标准化配分模式图(图4)来看,三类石榴子石在HREE和Eu异常方面存在显著差异:类型Ⅰ石榴子石 Σ HREE含量介于 $676 \times 10^{-6} \sim 902 \times 10^{-6}$ 之间,Eu负异常($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.004 \sim 0.005$)最显著;类型Ⅱ石榴子石 Σ HREE含量明显较类型Ⅰ石榴子石

低,介于 $49 \times 10^{-6} \sim 55 \times 10^{-6}$ 之间,Eu负异常($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.24$)最不明显;类型Ⅲ石榴子石 Σ HREE含量总体上较类型Ⅰ、类型Ⅱ偏高,且变化范围较大,介于 $666 \times 10^{-6} \sim 27.04 \times 10^{-6}$ 之间,Eu负异常程度介于类型Ⅰ、类型Ⅱ石榴子石之间($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.02 \sim 0.03$)。此外,在HREE-LREE、Y-Zn、Y-Zr、Y-Cr、Y-Sc等二元图解(图5)中,三类石榴子石均表现出明显的分布趋势。

4.2 能谱面扫描分析特征

石榴子石能谱面分析元素窗口积分分布图像(图6~8)显示,类型Ⅱ石榴子石具有明显的边缘环形富集,而类型Ⅰ、Ⅲ石榴子石则不具有此特征,且边缘环形富集主要元素组成为Al、Si、O、Na,推测可能为钠长石。此外,如图7所示,类型Ⅱ石榴子石明显较类型Ⅰ、Ⅲ石榴子石破碎,且沿颗粒碎裂边形成宽窄不一的边缘环形富集,局部反应边内部Fe元素较富集,推测是交代残余的石榴子石。类型Ⅱ石榴子石内Mg元素含量高且均匀,类型Ⅰ、Ⅲ石榴子石均无此特征。

4.3 锆石U-Pb定年及Lu-Hf同位素特征

西山含榴英安岩样品(D9910)中的锆石主要呈半自形—自形柱状,少数为较自形粒状,无色透明,锆石粒径主要分布在 $150 \sim 320 \mu\text{m}$ 之间,长宽比为2:1~5:1。锆石内部多发育振荡环带,属于典型岩浆锆石。如附表3所示,本次共对21颗锆石进行分析且均为有效点,所测锆石的Th、U含量分别为 $16.7 \times 10^{-6} \sim 236.8 \times 10^{-6}$ 和 $20.6 \times 10^{-6} \sim 694.3 \times 10^{-6}$,Th/U比值为0.31~1.04。21个测点均分布在谐和线上或谐和线附近(图

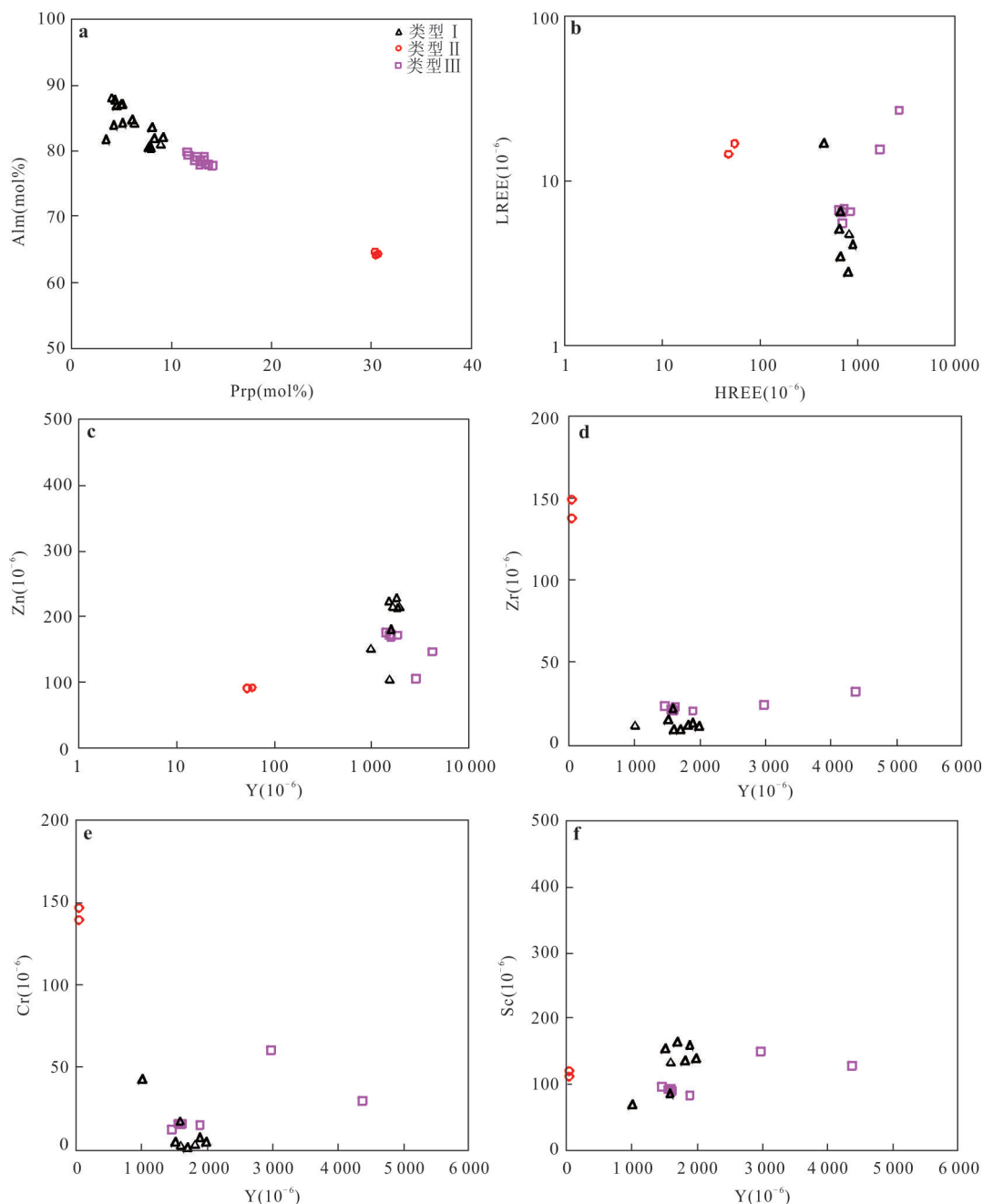


图5 西山含榴英安岩中3种类型石榴子石代表性稀土、微量元素二元图解

Fig. 5 Binary diagrams of representative rare earth and trace elements of three types of garnets in the garnet-bearing dacite from Xishan complex

9), 获得其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄值为 152.5 ± 1.2 Ma (MSWD=1.5), 代表了西山含榴英安岩的结晶年龄。

如附表4所示, 本研究共对20颗锆石进行了Lu-Hf同位素测试, 所有测试点的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值均小于0.002, 表明锆石在形成以后具有极低的放射性成因Hf的积累。测试点的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值较均一, 变化范围为0.282 461~0.282 650, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值分布在-7.8~-1.1之间, 加权平均值为 -6.5 ± 0.3 , 对应

的单阶段Hf模式年龄值(T_{DM})为0.86~1.12 Ga, 两阶段Hf模式年龄值(T_{DM2})为1.27~1.69 Ga。

4.4 锆石、石榴子石O同位素特征

如附表5所示, 西山含榴英安岩锆石 $\delta^{18}\text{O}_{\text{‰}}$ 值介于8.62‰~10.46‰之间, 石榴子石 $\delta^{18}\text{O}_{\text{‰}}$ 值为10.25‰。显然, 本研究的锆石和石榴子石的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{‰}}$ 值均明显高于地幔岩($\delta^{18}\text{O}_{\text{‰}} = 5.3 \pm 0.6$; Valley *et al.*, 2005), 表明西山含榴英安岩主要源于壳源。

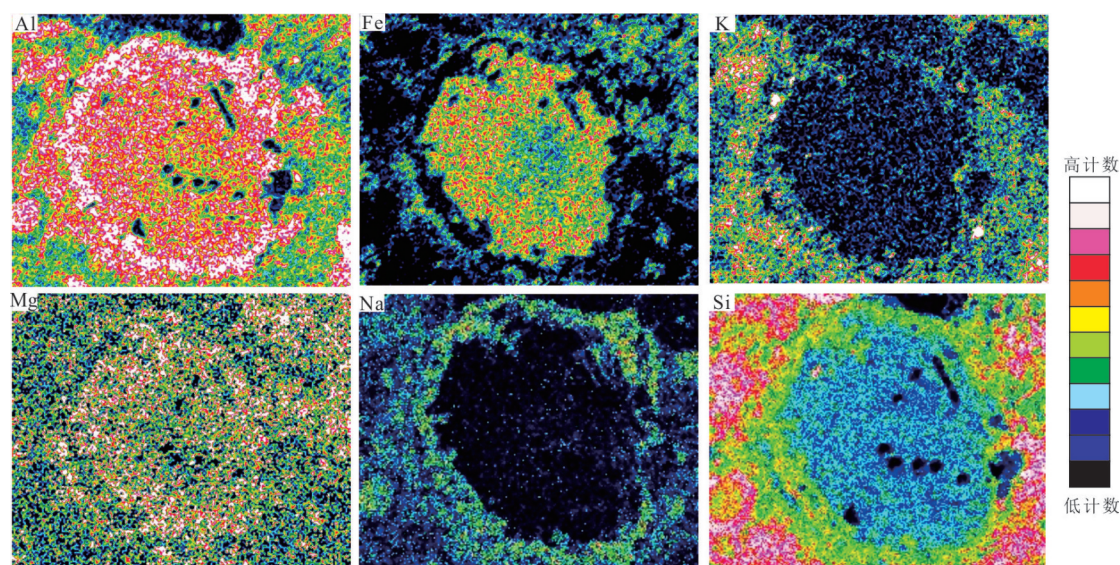


图6 类型I石榴子石能谱面扫描元素分布图

Fig. 6 Energy dispersive spectroscopy (EDS) surface scanning elemental distribution map of Type I Garnet

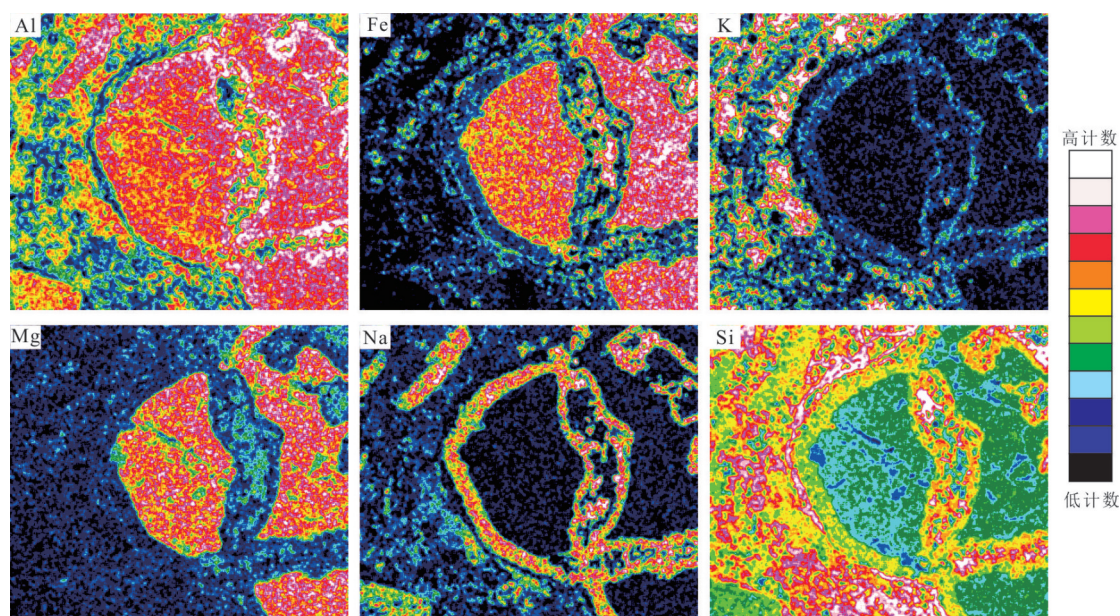


图7 类型II石榴子石能谱面扫描元素分布图

Fig. 7 Energy dispersive spectroscopy (EDS) surface scanning elemental distribution map of Type II

5 讨论

5.1 成因类型

不同成因的石榴子石通常具有不同的主量、微量元素地球化学特征,记录了不同的成因信息(Lackey *et al.*, 2012; Hönig *et al.*, 2014; Taylor *et al.*, 2015; 高利娥等, 2017; Zhou *et al.*, 2017; Devoir *et al.*, 2021; Zhu *et al.*, 2022; Dorais *et al.*, 2023; Mahdy *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2023, 2025; Wang *et al.*, 2025). 如前所述,根据石榴子石

的岩相学、矿物化学成分等特征,大致可以将本文中的石榴子石分为3类.

类型I石榴子石,大多以单晶的形式存在,晶体自形程度较好,整体形态相对完整,受熔蚀现象显著,颗粒内部或周缘未见黑云母、石英等,仅含少量锆石、磷灰石等矿物包裹体,晶体周缘不发育反应边,显示出岩浆型石榴子石的典型特征,暗示它们可能是从熔体中结晶而成. 在矿物化学成分上,它们具有富铁、贫镁、锰、钙的特征,端元组分主要

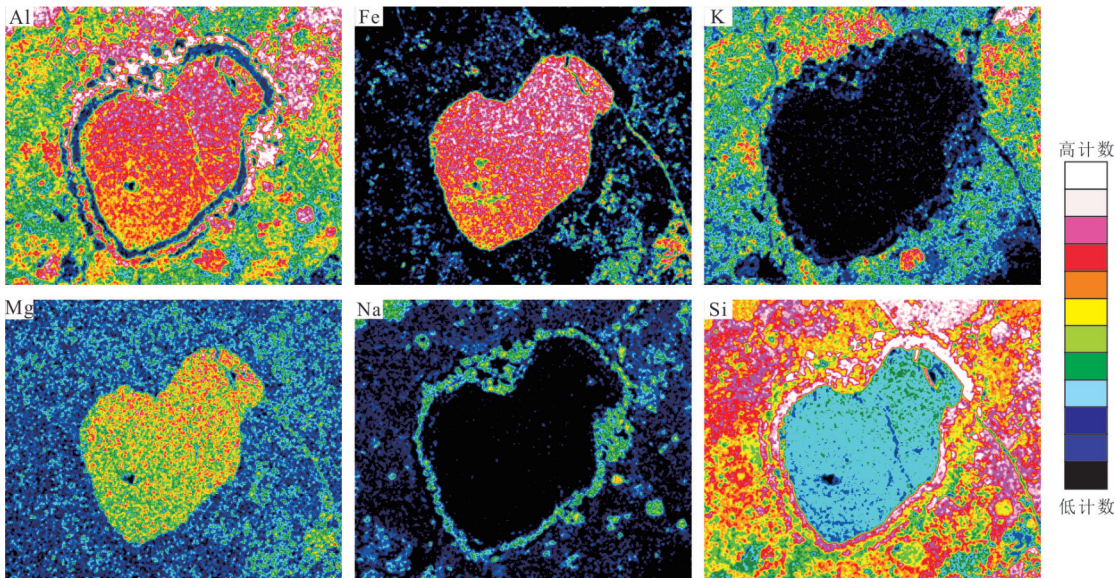


图8 类型Ⅲ石榴子石能谱面扫描元素分布图

Fig.8 Energy dispersive spectroscopy (EDS) surface scanning elemental distribution map of Type III Garnet

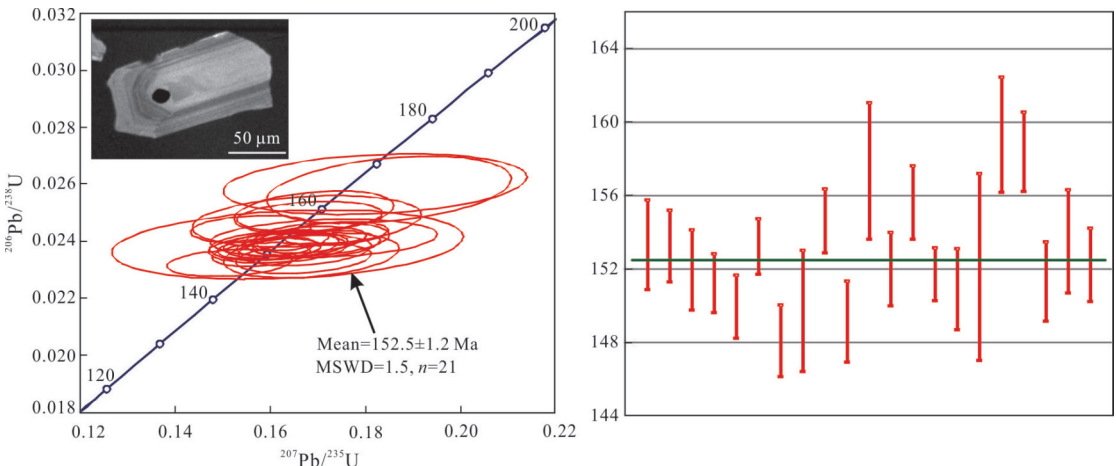


图9 西山含榴英安岩LA-ICP-MS 锆石U-Pb年龄谐和图及加权平均年龄图

Fig.9 LA-ICP-MS zircon U-Pb concordia diagram and weighted mean age diagram for the garnet-bearing dacite from Xishan complex

由铁铝榴石、镁铝榴石组成,这一成分特征与国外钙碱质火山岩中的石榴子石斑晶十分相似(Cheng *et al.*, 2017; Lucci *et al.*, 2018; Coira *et al.*, 2018). 研究表明,岩浆型石榴子石在形成过程中,其 Mg^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 含量通常会随着温度、压力的增大或减少产生规律性变化. 当温度、压力升高时,石榴子石通常由核部到边部形成正生长环带,具体表现为 MnO 含量逐渐降低, FeO^{T} 、 MgO 含量逐渐升高;当温度、压力降低时,石榴子石往往由核部到边部形成反生长环带,具体表现为 MnO 含量逐渐升高, FeO^{T} 、 MgO 含量逐渐降低;当温度较高且持续一段时间时,石榴子石的生长环带往往会表现为由核部到边部 FeO^{T} 、 MgO 、 MnO 、 CaO 曲线呈现平直的特

点,即产生均一化现象(Tracy *et al.*, 1976; Carlson *et al.*, 1997). 从端元成分剖面图(图3)来看,本文中的类型Ⅰ石榴子石总体上表现为从核部到边部, MgO 含量升高, MnO 、 FeO^{T} 含量降低,显示出典型生长环带的特征. 在成因类型判别图解中(图10),类型Ⅰ石榴子石均分布在岩浆成因石榴子石的成分分布范围内. 类似地,在 MnO - CaO 二元图解中,本文中的类型Ⅰ石榴子石均分布在源于S型岩浆的石榴子石成分分布范围内,与Deh-Saml和La Heradura地区钙碱性火山岩中的石榴子石斑晶分布范围一致. 在微量、稀土元素组成特征上,本文中的类型Ⅰ石榴子石稀土元素配分模式明显不同于其他两类石榴子石,且与Taylor and Stevens (2010)报道

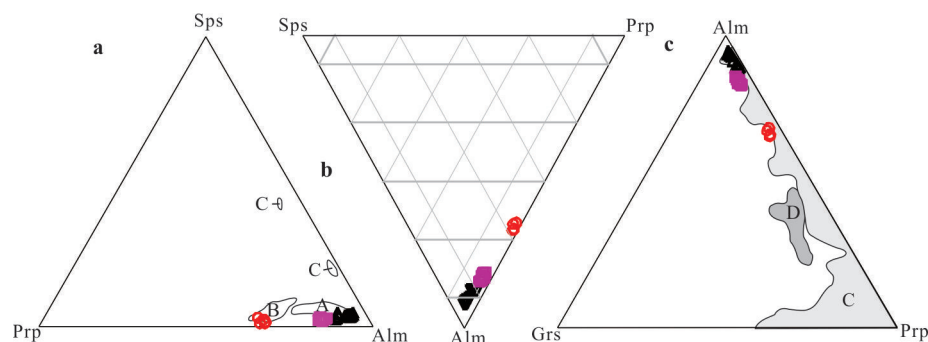


图10 石榴子石分类三角图

Fig.10 Triangular variation diagrams of garnet composition

a, b. 引自 Hamer *et al.* (1982); c. 引自 Dahlquist *et al.* (2007); A. 火山岩浆中晶出的石榴子石组分; B. 变质成因的石榴子石组分; C. 深成侵入岩浆中晶出的石榴子石组分 Alm. 铁铝榴石; Sps. 锰铝榴石; Grs. 钙铝榴石; Prp. 镁铝榴石; 图例同图 5

的斯威士兰姆洪多谷变质岩套中转熔成因的石榴子石存在显著差异,尤其是Eu异常特征方面,本文中的类型Ⅰ石榴子石具有更显著的Eu负异常特征.此外,在Sc-Y图解(图5f)中,本文中的类型Ⅰ石榴子石均显示出Sc和Y渐变的趋势,与这些石榴子石颗粒作为岩浆成因斑晶的特征一致.综上所述,本文中的类型Ⅰ石榴子石属于岩浆成因.

与类型Ⅰ石榴子石相比,本研究中的类型Ⅱ石榴子石具有较明显的碎裂结构,且发育明显的反应边(图7),显示出其作为捕虏晶与岩浆体系发生相互作用的特征.在主量元素特征上,它们具有较高的MgO含量,较低的CaO、MnO含量(<1%).Hamer *et al.* (1982)通过对南极圣三主半岛火山岩中不同成因类型的石榴子石进行研究,提出变质成因的石榴子石通常具有高MgO、低CaO含量,而产出在深成侵入岩中的石榴子石则具有高MnO、低MgO含量.从端元成分剖面图来看(图3c、3d),本文中的类型Ⅱ石榴子石并未显示明显生长环带的特征.在微量、稀土元素特征(图4)上,该类石榴子石无论在稀土元素配分模式还是Eu异常特征方面均与其他两类石榴子石存在显著差异,同时也不同于前人报道的转熔成因石榴子石.在成因判别图解(图10)中,该类石榴子石均分布在变质成因石榴子石成分分布范围内或岩浆成因石榴子石成分分布范围以外的区域.同样地,在MnO-CaO图解(图12)中,类型Ⅱ石榴子石,主要分布在来自变泥质岩的石榴子石成分分布范围内,与其他两类石榴子石在分布趋势和范围上存在显著差异.综上所述,本文中的类型Ⅱ石榴子石可能属于变质成因.

类型Ⅲ石榴子石,颗粒边缘不规则,且晶体周缘不发育反应边,晶体内部未发现有黑云母、石英

等包裹体,边部也未见被黑云母、尖晶石等矿物包围.如图5、图10所示,类型Ⅲ石榴子石无论在主量元素还是微量元素组成上均与类型Ⅰ、类型Ⅱ石榴子石明显不同.在稀土元素标准化配分图解中(图4),本文中的类型Ⅲ石榴子石与Taylor and Stevens (2010)报道的产出在斯威士兰姆洪多谷变质岩套中的转熔成因石榴子石十分相似.此外,在Sc-Y图解(图5f)中,类型Ⅲ石榴子石呈现出平缓的趋势,随着Y的减少,Sc保持相对均匀,这表明在石榴子石生长过程中熔体中Sc的浓度恒定,这与由黑云母脱水熔融形成的转熔成因石榴子石特征一致,排除了这些颗粒是斑晶的可能.此外,从端元成分剖面图来看(图3e、3f),类型Ⅲ石榴子石表现出由核部到边部铁铝榴石组分(Alm)呈略下降趋势,镁铝榴石(Prp)组分呈略上升趋势,钙铝榴石(Grs)略具下降趋势,锰铝榴石组分(Sps)无明显变化,明显不同于类型Ⅰ石榴子石的生长环带特征,而更符合扩散环带的特点.研究表明,扩散环带是缓慢冷却阶段石榴子石与周围相接触的黑云母、堇青石等铁镁质矿物发生Fe-Mg离子交换的结果,具有这种环带特征的石榴子石通常周围会与黑云母接触(夏琼霞等, 2019).值得注意的是,由于转熔矿物来自变质矿物在超固相线条件下的转熔反应,因此一般会与变质残余矿物共生.纵观前人报道的转熔成因石榴子石,基本上都在石榴子石颗粒内部会发现有黑云母、石英等包裹体,或石榴子石与黑云母共生等现象(Taylor and Stevens, 2010; 焦淑娟等, 2013; Xia *et al.*, 2016; 孟繁聪等, 2018; Tacchetto *et al.*, 2019; 冯帆等, 2022).本文中的类型Ⅲ石榴子石内部未见任何参与转熔反应的变质残留矿物包裹体,推测很可能是由于源区岩浆温度较高,参与转熔反

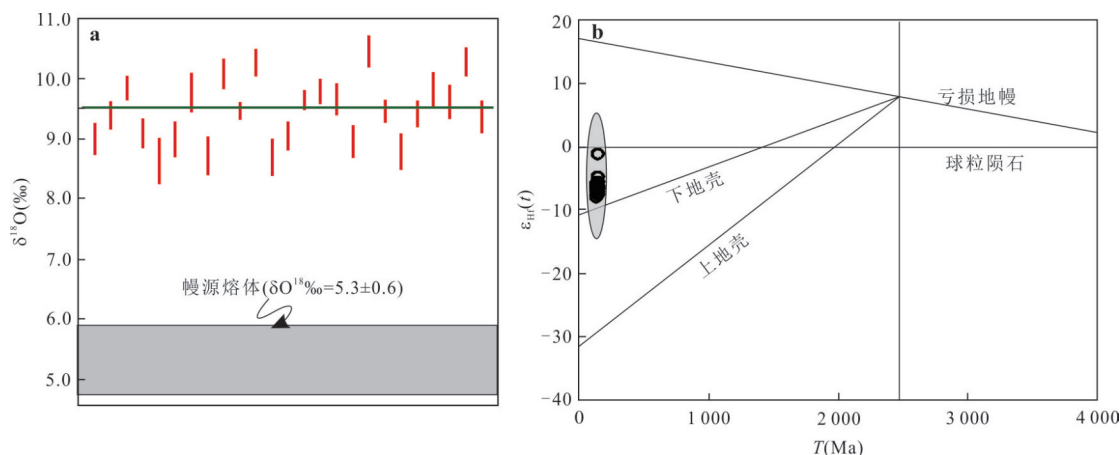


图 11 西山含榴英安岩 $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ 加权平均图(a)和 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ - $T(\text{Ma})$ 图(b)

Fig.11 $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ weighted mean diagram (a) and $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ vs. $T(\text{Ma})$ diagram(b) of garnet-bearing dacite from Xishan complex

图 b 中阴影部分为南岭西段岩体分布范围(舒徐洁, 2014)

应的变质残留矿物已完全溶解所致. 综上所述, 本文中的类型 III 石榴子石可能属于转熔成因.

5.2 温压条件

实验岩石学研究表明, 岩浆成因的石榴子石是在不同压力、温度条件下形成的近液相线矿物, 它们不仅受寄主岩浆成分的影响, 且与其结晶时的岩浆温度、压力和水含量密切相关. 因此, 岩浆成因的石榴子石可以有效约束寄主岩浆结晶的 P - T - X 条件 (Green, 1977; Harangi *et al.*, 2001; Mirnejad *et al.*, 2008a; Alonso-Perez *et al.*, 2009; Taylor *et al.*, 2015; Baxter *et al.*, 2017; Narduzzi *et al.*, 2017; Das *et al.*, 2020; Ferrero *et al.*, 2021; Mahdy *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2025).

研究表明, 石榴子石中各端元组分的组成比例与其形成时的温压条件有关. 通常, 在高温、高压环境下, 配位半径较小的二价阳离子 (如 Mg^{2+} 、 Fe^{2+} 等) 较配位半径较大的二价阳离子 (如 Mn^{2+} 、 Ca^{2+} 等) 更容易进入石榴子石晶格内且较稳定; 而在低温、低压环境下, 配位半径较大的二价阳离子 (如 Mn^{2+} 、 Ca^{2+} 等) 更容易进入石榴子石晶格内. 对于铝系石榴子石而言, 其对应的二价阳离子主要包括 Mn^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Mg^{2+} , 其中 Mn^{2+} 离子半径最小, 因此, 其进入晶格时所需的压力最小. 例如, 高侵位、高分异的花岗岩以及伟晶岩中产出的石榴子石多为富 Mn 的铁铝榴石 ($\text{MnO} > 4\%$; Green, 1977), 均形成于相对低温 ($< 820^\circ\text{C}$)、低压 ($< 4 \times 10^8 \text{ Pa}$) 的环境. 此外, Green (1977) 通过高温高压实验证实, 石榴子石成分中 Mn 的含量可以反映其形成的压力条件, 并提出 MnO 含量的增加会扩大低压范围石榴子石

的稳定域. 如附表 1 所示, 本研究的岩浆型石榴子石 (类型 I) 具有较低的 MnO 含量, 明显不同于花岗岩内岩浆成因的石榴子石, 因此, 可以排除其形成于低压条件的可能性.

如图 12 所示, 本研究的岩浆型石榴子石与来自新西兰 Canterbury、伊朗 Deh-Salm、墨西哥中央高原地区流纹岩中的石榴子石成分十分相似, 且均分布于来自 S 型岩浆的石榴子石分布范围内 (Mirnejad *et al.*, 2008b; Bach *et al.*, 2012; Sieck *et al.*, 2019). 根据前人研究, 上述地区的石榴子石均产出在结晶压力大于 7 kbar 的条件下. 此外, Green and Ringwood (1972) 通过对流纹岩中的石榴子石进行稳定性和组成进行研究, 发现在水压 ($P_{\text{H}_2\text{O}}$) 小于负荷压 (P_{LOAD}) 的条件下, 与天然石榴子石具有相同组成的石榴子石可以在 7~18 kbar 的压力条件下晶出. 甚至还有一些学者提出火山岩中石榴子石的晶出需要一个位于壳幔边界的深位岩浆房 ($> 25 \text{ km}$; Gilbert and Rogers, 1989; Dahlquist *et al.*, 2007). 综上, 我们推测西山含榴英安岩中的石榴子石斑晶可能形成于大于 7 kbar 的较高压力条件下.

此外, 一些研究表明, 石榴子石的液相线温度和液相线相的性质在很大程度上受水压 ($P_{\text{H}_2\text{O}}$) 控制. 通常, 在相对较干的岩浆体系 ($P_{\text{H}_2\text{O}} \ll P_{\text{LOAD}}$), 石榴子石的液相线温度会更高, 同时石榴子石作为近液相线相需要的压力也更大, 而对于相对较湿的岩浆系统, 情况则正好相反. 如果岩浆的 $P_{\text{H}_2\text{O}}$ 很高, 则液相线上可能会出现角闪石而并非石榴子石. 西山火山—侵入杂岩体中铁铝榴石、铁辉石、铁橄榄石等富铁矿物的广泛产出, 表明源区岩浆中的水含

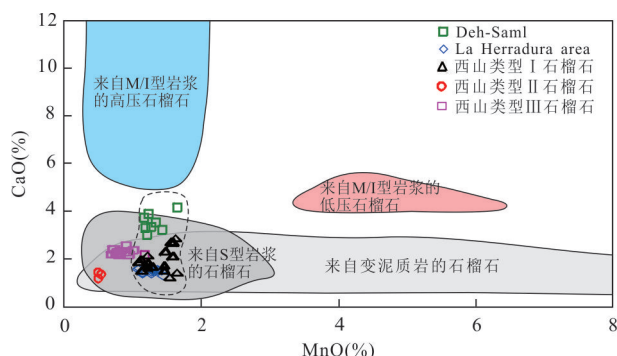


图12 石榴子石 MnO-CaO 二元图解

Fig. 12 MnO vs. CaO binary diagram of garnets

底图引自 Harangi *et al.* (2001); Deh-Saml 和 La Herradura 地区的石榴子石数据分别引自 Mirnejad *et al.* (2008b) 和 Sieck *et al.* (2019)

量和氧逸度足够低,且足以支持硅酸盐熔体中 Fe^{2+} 的稳定存在. 如附表6所示,计算获得的西山含榴英安岩的锆石饱和温度为 $877\sim 879\text{ }^{\circ}\text{C}$,锆石 Ti 温度为 $740\sim 959\text{ }^{\circ}\text{C}$,一致表明本研究中的石榴子石斑晶形成于较高的温度条件. 此外,利用 Li *et al.* (2019) 的 Geo-f O_2 软件计算获得的结果显示,西山含榴英安岩具有相对较低的 $\log f\text{O}_2$ ($-23.67\sim -12.32$) 值,进一步表明本研究中的岩浆型石榴子石斑晶可能结晶于低氧逸度的深源环境.

5.3 对岩浆源区及成岩过程的指示意义

研究表明,火山岩中的石榴子石可以由 I-/M 型岩浆结晶形成,如由壳源火成岩部分熔融产生的熔体或源于上地幔的熔体,也可以由 S 型岩浆结晶形成 (Chappell and White 1974; Green, 1992; Harangi *et al.*, 2001). 如前所述,在同位素组成上,西山含榴英安岩中的石榴子石与锆石的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{‰}}$ 值均明显高于地幔岩 ($\delta^{18}\text{O}_{\text{‰}} = 5.3 \pm 0.6$) (图 11a),显示出明显的壳源属性. 同时,在 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ -T 图解 (图 11b) 中,本研究的样品均落入南岭西段典型岩体范围内,进一步印证其源区以陆壳物质为主. 此外,相关研究表明,源于变泥质岩或变沉积岩熔体的石榴子石通常具有低 CaO ($<4\%$) 和变化的 MnO 含量 (Harangi *et al.*, 2001). 如图 12 所示,产出在西山含榴英安岩中的石榴子石晶体均具有较低的 CaO、MnO 含量,三种类型石榴子石均分布在 S 型岩浆成因的石榴子石分布范围内或来自变泥质岩的石榴子石与来自 S 型岩浆的石榴子石的重叠分布范围内. 综上表明,西山含榴英安岩可能源于成熟度较高的变质沉积岩.

如前所述,西山含榴英安岩中的石榴子石斑晶属于铁铝榴石,且在成分上具有贫锰的特征. 研究

表明,对于钙碱性岩浆体系而言,不同演化阶段产生的石榴子石晶体在成分上存在一定的差异. 在岩浆演化早期形成的石榴子石通常在成分上具有低 MnO、高 FeO 含量的特征,而在岩浆演化晚期晶出的石榴子石则往往具有高 MnO、低 FeO 含量的特征 (Green, 1977). 同时,通常情况下贫锰铁铝榴石在浅部是不稳定的 (Harangi *et al.*, 2001),因此,本研究中的岩浆成因铁铝榴石的存在表明其母岩浆的上升速率应该是非常快的. 如果岩浆侵位发生在伸展的构造背景下,则有助于实现岩浆的快速上升. LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果显示,西山含榴英安岩的结晶年龄为 $152.5 \pm 1.2\text{ Ma}$,属于侏罗纪岩浆作用的产物. 研究表明,南岭西段地区在侏罗纪时期,在与钦杭成矿带叠加部位一形成湘南—桂北段一条高 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 、低钨模式年龄 A 型花岗岩带,该 A 型花岗岩带自南西至北东依次有花山、姑婆山、九嶷山、骑田岭及千里山等岩体. 众所周知, A 型花岗岩通常代表伸展的构造背景. 因此,我们推测西山含榴英安岩很可能形成一个伸展的构造背景.

此外,研究表明,围岩的同化混染作用可以促进石榴子石的晶出. 西山含榴英安岩中石榴子石斑晶和捕虏晶的共存似乎表明围岩的同化混染作用在岩石的形成过程中扮演了重要的角色. 然而,如果在成岩过程中,围岩的同化混染作用起了主导作用的话,那么必然会导致高铝岩浆的产生,并促使石榴子石斑晶的晶出. 这种情况下,岩石中捕获的围岩中的变质成因石榴子石必然在成分特征上与岩浆成因的石榴子石斑晶相似. 然而,两者在成分特征上存在显著差异,这一事实表明,岩石中变质成因的石榴子石可能不是捕获的围岩中的变质晶体,而很可能是在石榴子石斑晶晶出之后,在深部岩浆由高压环境向浅部低压环境迅速上升迁移的过程中加入的. 在伸展构造背景下,研究区内中下地壳中的变泥质岩发生脱水熔融反应. 在变泥质岩减压部分熔融过程中,黑云母脱水部分熔融形成转熔成因石榴子石,同时捕获了源岩中的变质石榴子石.

6 结论

(1) 根据岩相学、矿物化学成分等特征,赋存在西山含榴英安岩中的石榴子石可分为岩浆型、变质型、转熔型 3 种类型. 岩浆型石榴子石贫 MgO 、 MnO 、 CaO , 富 FeO , 具有较低的 Ti、Cr、Co、Ni、Zr

含量,较高的 Zn、Y、Sr、Rb 含量,亏损 LREE,富集 HREE, Eu 负异常最显著;变质型石榴子石富 MgO、FeO, 贫 CaO、MnO, 具有较高的 Ti、Cr、Co、Ni、Zr 含量, 较低的 Zn、Y、Sr、Rb 含量, LREE、HREE 均不富集, 且稀土元素总含量明显低于岩浆型石榴子石, Eu 负异常较弱;转熔型石榴子石矿物化学成分特征总体上介于岩浆型、变质型石榴子石之间。

(2) 西山含榴英安岩中岩浆型石榴子石是下地壳高温、高压、低氧逸度且贫水的岩浆在演化早期结晶的产物, 变质型石榴子石是岩浆型石榴子石斑晶结晶后, 岩浆由深部高压环境向浅部低压环境上升迁移过程中捕获的源岩中的石榴子石。转熔型石榴子石是研究区内中下地壳中的变泥质岩减压部分熔融过程中, 由黑云母脱水部分熔融形成的。

(3) 西山含榴英安岩可能源于成熟度较高的变质沉积岩且形成于伸展的构造背景。

致谢: 样品分析得到北京离子探针中心、中国科学院地质与地球物理研究所稳定同位素分析实验室、武汉上谱分析科技有限责任公司、中国地质调查局中南矿产资源监督检测中心相关工作人员的指导和帮助; 审稿过程中两位审稿专家和编辑部老师对文章提出宝贵的意见, 在此一并表示感谢!

附表见: <https://doi.org/10.3799/dqkx.2025.237>

References

- Abbott, R.N., 1981. The Role of Manganese in the Paragenesis of Magmatic Garnet: an Example from the Old Woman-Piute Range, California: a Discussion. *The Journal of Geology*, 89 (6): 767—769. <https://doi.org/10.1086/628645>
- Allan, B.D., and Clarke, D.B., 1981. Occurrence and Origin of Garnets in the South Mountain Batholith, Nova Scotia. *Canadian Mineralogist*, 19(1): 19—24. <https://doi.org/10.1007/BF01087170>
- Alonso-Perez, R., Müntener, O., Ulmer, P., 2009. Igneous Garnet and Amphibole Fractionation in the Roots of Island Arcs: Experimental Constraints on Andesitic Liquids. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 157(4): 541—558. <https://doi.org/10.1007/s00410-008-0351-8>
- Bach, P., Smith, I. E. M., Malpas, J. G., 2012. The Origin of Garnets in Andesitic Rocks from the Northland Arc, New Zealand, and Their Implication for Sub-Arc Processes. *Journal of Petrology*, 53(6): 1169—1195. <https://doi.org/10.1093/petrology/egs012>
- Baxter, E. F., Caddick, M. J., Dragovic, B., 2017. Garnet: a Rock-Forming Mineral Petrochronometer. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 83(1): 469—533. <https://doi.org/10.2138/rmg.2017.83.15>
- Bizimis, M., Sen, G., Salters, V. J. M., et al., 2005. Hf-Nd-Sr Isotope Systematics of Garnet Pyroxenites from Salt Lake Crater, Oahu, Hawaii: Evidence for a Depleted Component in Hawaiian Volcanism. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(10): 2629—2646. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2005.01.005>
- Black, L. P., Kamo, S. L., Allen, C. M., et al., 2004. Improved $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ Microprobe Geochronology by the Monitoring of a Trace-Element-Related Matrix Effect; SHRIMP, ID-TIMS, ELA-ICP-MS and Oxygen Isotope Documentation for a Series of Zircon Standards. *Chemical Geology*, 205(1/2): 115—140. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2004.01.003>
- Caddick, M. J., Kohn, M. J., 2013. Garnet: Witness to the Evolution of Destructive Plate Boundaries. *Elements*, 9(6): 427—432. <https://doi.org/10.2113/gselements.9.6.427>
- Caffe, P. J., Trumbull, R. B., Siebel, W., 2012. Petrology of the Coyaguayma Ignimbrite, Northern Puna of Argentina: Origin and Evolution of a Peraluminous High-SiO₂ Rhyolite Magma. *Lithos*, 134: 179—200. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2011.12.013>
- Carlson, W., Schwarze, E., 1997. Petrological Significance of Prograde Homogenization of Growth Zoning in Garnet: an Example from the Llano Uplift. *Journal of Metamorphic Geology*, 15(5): 631—644. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.1997.tb00640.x>
- Chappell, B. W., White, A. J. R., 1974. Two Contrasting Granite Types. *Pacific Geology*, 8(1): 173—174. <https://doi.org/10.1046/j.1440-0952.2001.00882.x>
- Cheng, Z. G., Zhang, Z. C., Santosh, M., et al., 2017. Late Carboniferous to Early Permian Partial Melting of the Metasedimentary Rocks and Crustal Reworking in the Central Asian Orogenic Belt: Evidence from Garnet-Bearing Rhyolites in the Chinese South Tianshan. *Lithos*, 282: 373—387. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2017.03.017>
- Cheng, Z. G., Zhang, Z. C., Santosh, M., et al., 2014. Carbonate- and Silicate-Rich Globules in the Kimberlitic Rocks of Northwestern Tarim Large Igneous Province, NW China: Evidence for Carbonated Mantle Source. *Journal of Asian Earth Sciences*, 95: 114—135. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2014.04.018>
- Clemens, J. D., Phillips, G. N., 2014. Inferring a Deep-Crustal Source Terrane from a High-Level Granitic Pluton: The Strathbogie Batholith, Australia. *Contributions to Min-*

- eralogy and Petrology*, 168(5): 1070. <https://doi.org/10.1007/s00410-014-1070-y>
- Coira, B., Kay, S. M., Viramonte, J. G., et al., 2018. Origin of Late Miocene Peraluminous Mn-Rich Garnet-Bearing Rhyolitic Ashes in the Andean Foreland (Northern Argentina). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 364: 20–34. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2018.08.020>
- Dahlquist, J. A., Galindo, C., Pankhurst, R. J., et al., 2007. Magmatic Evolution of the Peñón Rosado Granite: Petrogenesis of Garnet-Bearing Granitoids. *Lithos*, 95(3/4): 177–207. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2006.07.010>
- Das, S., Goswami, B., Basak, A., et al., 2020. A Grenvillian Magmatic Almandine Garnet-Bearing Ferroan Granite Intrusion in the Chhotanagpur Gneissic Complex, Eastern India: Petrology, Petrochemistry, Petrogenesis and Geodynamic Implications. *Lithos*, 376/377: 105749. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2020.105749>
- Devoir, A., Bloch, E., Müntener, O., 2021. Residence Time of Igneous Garnet in Si-Rich Magmatic Systems: Insights from Diffusion Modeling of Major and Trace Elements. *Earth and Planetary Science Letters*, 560: 116771. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2021.116771>
- Dong, J., Wei, C. J., Clarke, G. L., et al., 2018. Metamorphic Evolution during Deep Subduction and Exhumation of Continental Crust: Insights from Felsic Granulites in South Altyn Tagh, West China. *Journal of Petrology*, 59: 1965–1990. <https://doi.org/10.1093/petrology/egy086>
- Dong, Z. X., 1997. Pyropes from China: Peridotite Xenoliths from Kimberlites versus Megacrysts in Basalts. *International Geology Review*, 39(2): 141–150. <https://doi.org/10.1080/00206819709465264>
- Dorais, M. J., Campbell, S., 2023. An Oxygen Isotopic Study of Garnet and Zircon of the Flagstaff Lake Igneous Complex: Identification of Peritectic and Phenocrystic Garnet with Implications for the Petrogenesis of Strongly Peraluminous Granites. *Lithos*, 440: 107042. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2023.107042>
- Feng, F., Xu, Z. Y., Dong, X. J., et al., 2022. Microstructure and Mineralogical Evidence for Peritectic Garnet in Thegarnet Granite in the Wulashan Area, Inner Mongolia. *Acta Geologica Sinica*, 96(11): 3819–3833(in Chinese with English abstract).
- Ferrero, S., Wannhoff, I., Laurent, O., et al., 2021. Embryos of TTGS in Gore Mountain Garnet Megacrysts from Water-Fluxed Melting of the Lower Crust. *Earth and Planetary Science Letters*, 569: 117058. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2021.117058>
- Fu, J. M., Ma, C. Q., Xie, C. F., et al., 2004. Geochemistry and Tectonic Setting of Xishan Aluminous A-Type Granitic Volcanic-Intrusive Complex, Southern Hunan. *Journal of Earth Science and Environmental*, 26(4): 15–23(in Chinese with English abstract).
- Gadas, P., Novák, M., Talla, D., et al., 2013. Compositional Evolution of Grossular Garnet from Leucotonalitic Pegmatite at Ruda Nad Moravou, Czech Republic; A Complex EMPA, LA-ICP-MS, IR and CL Study. *Mineralogy and Petrology*, 107(2): 311–326. <https://doi.org/10.1007/s00710-012-0232-8>
- Gao, L.E., Zeng, L.S., Zhao, L.H., et al., 2017. Multiphase Growth of Garnet in Gneisses from the Himalayan Orogenic Belt. *Acta Petrologica Sinica*, 33(12): 3729–3740 (in Chinese with English abstract).
- Gilbert, J. S., Rogers, N. W., 1989. The Significance of Garnet in the Permo-Carboniferous Volcanic Rocks of the Pyrenees. *Journal of the Geological Society*, 146(3): 477–490. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.146.3.0477>
- Gill, J. B., 1981. Orogenic Andesites and Plate Tectonics. Springer Science & Business Media, 390. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(82\)90212-8](https://doi.org/10.1016/0040-1951(82)90212-8)
- Green, D. H., Ringwood, A. E., 1972. A Comparison of Recent Experimental Data on the Gabbro-Garnet Granulite-Eclogite Transition. *The Journal of Geology*, 80(3): 277–288
- Green, T. H., 1977. Garnet in Silicic Liquids and Its Possible Use as a P-T Indicator. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 65(1): 59–67. <https://doi.org/10.1007/BF00373571>
- Guillot, S., Mahéo, G., de Sigoyer, J., et al., 2008. Tethyan and Indian Subduction Viewed from the Himalayan High-to-Ultrahigh-Pressure Metamorphic Rocks. *Tectonophysics*, 451(1/2/3/4): 225–241. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2007.11.059>
- Hamer, R. D., Moyes, A. B., 1982. Composition and Origin of Garnet from the Antarctic Peninsula Volcanic Group of Trinity Peninsula. *Journal of the Geological Society*, 139(6): 713–720. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.139.6.0713>
- Harangi, S., Downes, H., Kósa, L., et al., 2001. Almandine Garnet in Calc-Alkaline Volcanic Rocks of the Northern Pannonian Basin (Eastern-Central Europe): Geochemistry, Petrogenesis and Geodynamic Implications. *Journal of Petrology*, 42(10): 1813–1843. <https://doi.org/10.1093/petrology/42.10.1813>
- He, C., Liu, W.B., Hu, W.J., et al., 2025. Petrogenesis and Geological Significance of Highly Differentiated A-Type Granites in Bankeng Pluton, Nanling Region, South China.

- Earth Science*, 50(7): 2525–2547 (in Chinese with English abstract).
- Hogan, J. P., 1996. Insights from Igneous Reaction Space: a Holistic Approach to Granite Crystallisation. *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 87(1/2): 147–157. <https://doi.org/10.1017/s0263593300006568>
- Hönl, S., Čopjaková, R., Škoda, R., et al., 2014. Garnet as a Major Carrier of the Y and REE in the Granitic Rocks: an Example from the Layered Anorogenic Granite in the Brno Batholith, Czech Republic. *American Mineralogist*, 99(10): 1922–1941. <https://doi.org/10.2138/am-2014-4728>
- Hua, R. M., 2005. Differences between Rock-Forming and Related Ore-Forming Times for the Mesozoic Granitoids of Crust Remelting Types in the Nanling Range, South China, and Its Geological Significance. *Geological Review*, 51(6): 633–639 (in Chinese with English abstract).
- Huang, H. Q., Li, X. H., Li, W. X., et al., 2008. Age and Origin of the Dadongshan Granite from the Nanling Range: SHRIMP U-Pb Zircon Age, Geochemistry and Sr-Nd-Hf Isotopes. *Geological Journal of China Universities*, 14(3): 317–333 (in Chinese with English abstract).
- Ickert, R. B., Hiess, J., Williams, I. S., et al., 2008. Determining High Precision, in Situ, Oxygen Isotope Ratios with a SHRIMP II: Analyses of MPI-DING Silicate-Glass Reference Materials and Zircon from Contrasting Granites. *Chemical Geology*, 257(1/2): 114–128. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.08.024>
- Jiao, S. J., Guo, J. H., and Peng, S. B., 2013. Petrogenesis of Garnet in the Darongshan-Shiwandashan Granitic Suite of the South China Block and the Metamorphism of the Granulite Enclave. *Acta Petrologica Sinica*, 29(5): 1740–1758 (in Chinese with English abstract).
- Kawabata, H., Takafuji, N., 2005. Origin of Garnet Crystals in Calc-Alkaline Volcanic Rocks from the Setouchi Volcanic Belt, Japan. *Mineralogical Magazine*, 69(6): 951–971. <https://doi.org/10.1180/0026461056960301>
- Kebede, T., Koeberl, C., Koller, F., 2001. Magmatic Evolution of the Suqii-Wagga Garnet-Bearing Two-Mica Granite, Wallagga Area, Western Ethiopia. *Journal of African Earth Sciences*, 32(2): 193–221. [https://doi.org/10.1016/S0899-5362\(01\)90004-1](https://doi.org/10.1016/S0899-5362(01)90004-1)
- Lackey, J. S., Romero, G. A., Bouvier, A. S., et al., 2012. Dynamic Growth of Garnet in Granitic Magmas. *Geology*, 40(2): 171–174. <https://doi.org/10.1130/g32349.1>
- Lantai, C., 1991. Genesis of Garnets from Andesite of Karanca Mountains. *Acta Geologica Hungarica*, 34: 133–154.
- Li, J. S., Zhang, J. J., Liu, W., et al., 2022. Mineralogical Characteristics and Constraints of Formation Conditions of Garnet in Kimberlite in Shizhuang Area, Southern He'nan Province. *Geological Bulletin of China*, 41(5): 824–835 (in Chinese with English abstract).
- Li, W. K., Cheng, Y. Q., Yang, Z. M., 2019. Geo-fO₂: Integrated Software for Analysis of Magmatic Oxygen Fugacity. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 20(5): 2542–2555. <https://doi.org/10.1029/2019gc008273>
- Liu, C. Q., Masuda, A., Xie, G. H., 1992. Isotope and Trace-Element Geochemistry of Alkali Basalts and Associated Megacrysts from the Huangyishan Volcano, Kuandian, Liaoning, NE China. *Chemical Geology*, 97(3/4): 219–231. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(92\)90077-1](https://doi.org/10.1016/0009-2541(92)90077-1)
- Liu, Y. S., Hu, Z. C., Gao, S., et al., 2008. In Situ Analysis of Major and Trace Elements of Anhydrous Minerals by LA-ICP-MS without Applying an Internal Standard. *Chemical Geology*, 257(1/2): 34–43. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.08.004>
- Lucci, F., Rossetti, F., Becchio, R., et al., 2018. Magmatic Mn-Rich Garnets in Volcanic Settings: Age and Longevity of the Magmatic Plumbing System of the Miocene Ramadas Volcanism (NW Argentina). *Lithos*, 322: 238–249. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2018.10.016>
- Ludwig, K. R., 2003. User's Manual for a Geochronological Toolkit for Microsoft Excel (Isoplot/Ex version 3.0). Geochronology Center, Berkeley.
- Mahdy, N. M., Iizuka, T., Pease, V., et al., 2023. Origin, Dynamics, and Chemical Evolution of Garnet-Bearing Leucogranitic Magma, Eastern Desert of Egypt: Controls on the Rare-Metal Enrichment in the A-Type Magmatism. *Geochemistry*, 83(4): 126025. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2023.126025>
- Meng, F. C., Tian, G. K., Duan, X. P., et al., 2018. Evidence from Garnet for Genesis of Garnet-Cordierite-Granite in the Jinshuikou Area, Eastern Segment of the East Kunlun Mountains. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 37(2): 192–204 (in Chinese with English abstract).
- Miller, C. F., Stoddard, E. F., 1981. The Role of Manganese in the Paragenesis of Magmatic Garnet: an Example from the Old Woman-Piute Range, California. *The Journal of Geology*, 89(2): 233–246
- Mirnejad, H., Blourian, G. H., Kheirhah, M., et al., 2008a. Garnet-Bearing Rhyolite from Deh-Salm Area, Lut Block, Eastern Iran: Anatexis of Deep Crustal Rocks. *Mineralogy and Petrology*, 94(3): 259–269. <https://doi.org/10.1007/s00710-008-0015-4>
- Mirnejad, H., Blourian, G. H., Kheirhah, M., et al., 2008b.

- Garnet-Bearing Rhyolite from Deh-Salm Area, Lut Block, Eastern Iran: Anatexis of Deep Crustal Rocks. *Mineralogy and Petrology*, 94(3): 259—269. <https://doi.org/10.1007/s00710-008-0015-4>
- Mitropoulos, P., Katerinopoulos, A., Kokkinakis, A., 1999. Occurrence of Primary Almandine-Spessartine-Rich Garnet and Zinnwaldite Phenocrysts in a Neogene Rhyolite on the Island of Chios, Aegean Sea, Greece. *Mineralogical Magazine*, 63 (4): 503—510. <https://doi.org/10.1180/002646199548673>
- Müller, A., Kearsley, A., Spratt, J., et al., 2012. Petrogenetic Implications of Magmatic Garnet in Granitic Pegmatites from Southern Norway. *Canadian Mineralogist*, 50 (4): 1095—1115. <https://doi.org/10.3749/canmin.50.4.1095>
- Narduzzi, F., Farina, F., Stevens, G., et al., 2017. Magmatic Garnet in the Cordilleran-Type Galiléia Granitoids of the Araçuaí Belt (Brazil): Evidence for Crystallization in the Lower Crust. *Lithos*, 282: 82—97. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2017.02.017>
- Patino Douce, A. E., Harris, N., 1998. Experimental Constraints on Himalayan Anatexis. *Journal of Petrology*, 39 (4): 689—710. <https://doi.org/10.1093/petroj/39.4.689>
- Patranabis-Deb, S., Schieber, J., Basu, A., 2009. Almandine Garnet Phenocrysts in a ~1 Ga Rhyolitic Tuff from Central India. *Geological Magazine*, 146(1): 133—143. <https://doi.org/10.1017/s0016756808005293>
- René, M., Stelling, J., 2007. Garnet-Bearing Granite from the Třebíč Pluton, Bohemian Massif (Czech Republic). *Mineralogy and Petrology*, 91(1): 55—69. <https://doi.org/10.1007/s00710-007-0188-2>
- Rubatto, D., Hermann, J., 2007. Experimental Zircon/Melt and Zircon/Garnet Trace Element Partitioning and Implications for the Geochronology of Crustal Rocks. *Chemical Geology*, 241(1/2): 38—61. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2007.01.027>
- Samadi, R., Miller, N.R., Mirnejad, H., et al., 2014a. Origin of Garnet in Aplite and Pegmatite from Khajeh Morad in Northeastern Iran: a Major, Trace element, and Oxygen Isotope Approach. *Lithos*, 208: 378—392. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2014.08.023>
- Samadi, R., Mirnejad, H., Kawabata, H., et al., 2014b. Magmatic Garnet in the Triassic (215 Ma) Dehnow Pluton of NE Iran and Its Petrogenetic Significance. *International Geology Review*, 56 (5): 596—621. <https://doi.org/10.1080/00206814.2014.880659>
- Shu, X. J., 2014. Petrogenesis and Crustal Evolution of the Mesozoic Granites from Nanling, South China (Dissertation). Nanjing University, Nanjing (in Chinese with English abstract).
- Sieck, P., Rubén, L.D., Pablo, D.Harris., et al., 2019. Almandine Garnet-Bearing Rhyolites Associated to Bimodal Volcanism in the Mesa Central of Mexico: Geochemical, Petrological and Geochronological Evolution. *Journal of South American Earth Sciences*, 92: 310—328. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.03.018>
- Stevens, G., Villaros, A., Moyen, J. F., 2007. Selective Peritectic Garnet Entrainment as the Origin of Geochemical Diversity in S-Type Granites. *Geology*, 35(1): 9—12. <https://doi.org/10.1130/G22959A.1>
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313—345. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1989.042.01.19>
- Tacchetto, T., Bartoli, O., Cesare, B., et al., 2019. Multi-phase Inclusions in Peritectic Garnet from Granulites of the Athabasca Granulite Terrane (Canada): Evidence of Carbon Recycling during Neoproterozoic Crustal Melting. *Chemical Geology*, 508: 197—209. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2018.05.043>
- Taylor, J., Stevens, G., 2010. Selective Entrainment of Peritectic Garnet into S-Type Granitic Magmas: Evidence from Archaean Mid-Crustal Anatectites. *Lithos*, 120(3/4): 277—292. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2010.08.015>
- Taylor, R. J. M., Harley, S. L., Hinton, R. W., et al., 2015. Experimental Determination of REE Partition Coefficients between Zircon, Garnet and Melt: a Key to Understanding High-T Crustal Processes. *Journal of Metamorphic Geology*, 33(3): 231—248. <https://doi.org/10.1111/jmg.12118>
- Tracy, R.J., Robinson, P., Thompson, A.B., 1976. Garnet Composition and Zoning in the Determination of Temperature and Pressure of Metamorphism, Central Massachusetts. *American Mineralogist*, 61(7—8): 762—775.
- Valley, J.W., Lackey, J.S., Hanchar, J.M., et al., 2005. Oxygen Isotope Evidence for Widespread Crustal Recycling in the Mantle. *Geology*, 33(9): 761—764. <https://doi.org/10.1130/G21709.1>
- Villaros, A., Stevens, G., Moyen, J. F., et al., 2009. The Trace Element Compositions of S-Type Granites: Evidence for Disequilibrium Melting and Accessory Phase Entrainment in the Source. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 158(4): 543—561. <https://doi.org/10.1007/s00410-009-0396-3>
- Wang, L. T., Yu, S. Y., Li, C. Z., et al., 2025. Peritectic Garnet Entrainment Obscures Iron Isotopic Fractionation

- during Crustal Anatexis: Evidence from Cogenetic TTG-Like Leucosomes and Tonalite Pluton. *Lithos*, 508/509: 108096. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2025.108096>
- Wiedenbeck, M., Hanchar, J. M., Peck, W. H., et al., 2004. Further Characterisation of the 91500 Zircon Crystal. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 28(1): 9—39. <https://doi.org/10.1111/j.1751-908X.2004.tb01041.x>
- Xi, Z., Liu, Q. Q., Wu, D. H., et al., 2024. Geochronology, Geochemistry and Tectonic Implications of Triassic A-Type Granites in Pingtian Area, Northern Guangdong. *Earth Science*, 49(7): 2508—2525(in Chinese with English abstract).
- Xia, Q. X., Wang, H. Z., Zhou, L. G., et al., 2016. Growth of Metamorphic and Peritectic Garnets in Ultrahigh-Pressure Metagranite during Continental Subduction and Exhumation in the Dabie Orogen. *Lithos*, 266/267: 158—181. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2016.08.043>
- Xia, Q.X., 2019. Different Origins of Garnet in High to Ultrahigh Pressure Metamorphic Rocks. *Earth Science*, 44(12): 4042—4049 (in Chinese with English abstract).
- Xu, L. J., Xiao, Y. L., Wu, F., et al., 2013. Anatomy of Garnets in a Jurassic Granite from the South-Eastern Margin of the North China Craton: Magma Sources and Tectonic Implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, 78: 198—221. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2012.11.026>
- Xu, X.S., 2008. Several Problems Worthy to be Noticed in the Research of Granites and Volcanic Rocks in SE China. *Geological Journal of China Universities*, 14(3): 283—294 (in Chinese with English abstract).
- Yan, L. L., He, Z. Y., 2022. Rejuvenation of Silicic Magmatic Systems: Insights from the Formation of Garnet-Bearing, Crystal-Rich Tuff in Southeast China. *Lithos*, 432: 106895. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2022.106895>
- Yu, J.H., O'Reilly, S.Y., 2001. The Megacrysts of Almandine in Basalt of Yingfengling, Leizhou Peninsula and the Genesis of Its Parent Magma. *Chinese Science Bulletin*, 46(6): 492—497(in Chinese)
- Zeng, L. S., Asimow, P. D., Saleeby, J. B., 2005. Coupling of Anatexis Reactions and Dissolution of Accessory Phases and the Sr and Nd Isotope Systematics of Anatexis Melts from a Metasedimentary Source. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(14): 3671—3682. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2005.02.035>
- Zeng, L. S., Gao, L., Dong, C. Y., et al., 2012. High-Pressure Melting of Metapelite and the Formation of Ca-Rich Granitic Melts in the Namche Barwa Massif, Southern Tibet. *Gondwana Research*, 21(1): 138—151. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2011.07.023>
- Zhang, C. W., Yang, Y., Liu, Y. C., et al., 2023. UHP Metamorphism, Decompression Anatexis and Retrogression of Garnet-Bearing Metagranite and Granitic Gneiss from the Dabie Orogen during Continental Collision. *Lithos*, 456: 107339. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2023.107339>
- Zhang, H.F., Lu, F.X., 2000. Major and Trace Elements of Garnet and Megacryst Garnet in Paleozoic Mantle Xenoliths from North China. *Science in China (Series D)*, 30(2): 128—134(in Chinese with English abstract).
- Zhang, J. Y., Ma, C. Q., She, Z. B., 2012. An Early Cretaceous Garnet-Bearing Metaluminous A-Type Granite Intrusion in the East Qinling Orogen, Central China: Petrological, Mineralogical and Geochemical Constraints. *Geoscience Frontiers*, 3(5): 635—646. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2011.11.011>
- Zhang, X., Wang, M. T., Ma, Z. L., et al., 2025. Petrogenesis of Granitic Pegmatites in the Chinese Altay: Insights from Apatite, Garnet, and Quartz Geochemistry. *Lithos*, 516: 108250. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2025.108250>
- Zhou, J. H., Feng, C. Y., Li, D. X., 2017. Geochemistry of the Garnets in the Baiganhu W-Sn Orefield, NW China. *Ore Geology Reviews*, 82: 70—92. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.11.019>
- Zhou, L. G., Xia, Q. X., Zheng, Y. F., et al., 2011. Multi-stage Growth of Garnet in Ultrahigh-Pressure Eclogite during Continental Collision in the Dabie Orogen: Constrained by Trace Elements and U-Pb Ages. *Lithos*, 127(1/2): 101—127. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2011.08.010>
- Zhou, L.T., Chen, J.F., Du, Y., et al., 2022. Monazite U-Pb Geochronology of Granites in the Shaping Tungsten Deposit, Western Nanling Metallogenic Belt and Its Geological Significance. *South China Geology*, 38(3): 486—495 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, X.M., 2007. Genesis of Late Mesozoic Granites and Lithospheric Dynamic Evolution in the Nanling Region. Science Press, Beijing, 1—691 (in Chinese).
- Zhu, J.C., Chen, J., Wang, R.C., et al., 2008. Early Yanshanian NE Trending Sn/W-Bearing A-Type Granites in the Western-Middle Part of the Nanling Mts Region. *Geological Journal of China Universities*, 14(4): 474—484 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, L., Chen, R. X., Zheng, Y. F., et al., 2022. Multistage Growth of Garnet Fingerprints the Behavior and Property of Metamorphic Fluids in a Paleotethyan Oceanic Subduction Zone. *Lithos*, 430/431: 106851. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2022.106851>

10.1016/j.lithos.2022.106851

Zong, K. Q., Klemm, R., Yuan, Y., et al., 2017. The Assembly of Rodinia: The Correlation of Early Neoproterozoic (Ca. 900Ma) High-Grade Metamorphism and Continental Arc Formation in the Southern Beishan Orogen, Southern Central Asian Orogenic Belt (CAOB). *Precambrian Research*, 290: 32–48. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2016.12.010>

中文参考文献

冯帆, 徐仲元, 董晓杰, 等, 2022. 内蒙古乌拉山地区石榴子石花岗岩中石榴子石转熔成因的显微结构及矿物学证据. *地质学报*, 96(11): 3819–3833.

付建明, 马昌前, 谢才富, 等, 2004. 湘南西山铝质A型花岗质火山—侵入杂岩的地球化学及其形成环境. *地球科学与环境学报*, 26(4): 15–23.

高利娥, 曾令森, 赵令浩, 等, 2017. 喜马拉雅造山带片麻岩中石榴子石的多期生长. *岩石学报*, 33(12): 3729–3740.

何川, 刘文斌, 胡文洁, 等, 2025. 南岭半坑高分异A型花岗岩成因及其地质意义. *地球科学*, 50(7): 2525–2547.

华仁民, 2005. 南岭中生代陆壳重熔型花岗岩类成岩—成矿的时间差及其地质意义. *地质论评*, 51(6): 633–642.

黄会清, 李献华, 李武显, 等, 2008. 南岭大东山花岗岩的形成时代与成因——SHRIMP锆石U-Pb年龄、元素和Sr-Nd-Hf同位素地球化学. *高校地质学报*, 14(3): 317–333.

焦淑娟, 郭敬辉, 彭松柏, 2013. 华南大容山——十万大山花岗岩体中石榴石成因以及麻粒岩包体变质作用研究. *岩石学报*, 29(5): 1740–1758.

李积山, 张军杰, 刘伟, 等, 2022. 豫南史庄一带金伯利岩中石

榴子石矿物学特征及其形成条件的约束. *地质通报*, 41(5): 824–835.

孟繁聪, 田广阔, 段雪鹏, 等, 2018. 东昆仑东段金水口石榴堇青石花岗岩成因——石榴子石证据. *矿物岩石地球化学通报*, 37(2): 192–204.

牛贺才, 张海祥, 单强, 等, 2007. 扎河坝石榴辉石岩中超硅—超钛石榴子石的发现及其地质意义. *科学通报*, 52(18): 2169–2174.

舒徐洁, 2014. 华南南岭地区中生代花岗岩成因与地壳演化(博士学位论文). 南京: 南京大学.

席振, 刘清泉, 吴德华, 等, 2024. 粤北坪田地区三叠纪A型花岗岩年代学、地球化学及其构造意义. *地球科学*, 49(7): 2508–2525.

夏琼霞, 2019. 高压—超高压变质岩石中不同成因的石榴石. *地球科学*, 44(12): 4042–4049.

徐夕生, 2008. 华南花岗岩—火山岩成因研究的几个问题. *高校地质学报*, 14(3): 283–294.

于津海, O'Reilly, S.Y., 2001. 雷州半岛英峰岭玄武岩中的铁铝石榴石巨晶及母岩浆成因. *科学通报*, 46(6): 492–497.

张宏福, 路风香, 2000. 华北古生代地幔岩捕虏体中石榴石和巨晶石榴石的主、微量元素. *中国科学(D辑)*, 30(2): 128–134.

周立同, 陈剑锋, 杜云, 等, 2022. 南岭西段沙坪钨矿区花岗岩独居石U-Pb定年及地质意义. *华南地质*, 38(3): 486–495.

周新民, 2007. 南岭地区晚中生代花岗岩成因与岩石圈动力学演化. 北京: 科学出版社, 1–691.

朱金初, 陈骏, 王汝成, 等, 2008. 南岭中西段燕山早期北东向含锡钨A型花岗岩带. *高校地质学报*, 14(4): 474–484.