https://doi.org/10.3799/dqkx.2026.305

Short Survey

华南早古生代混合岩中熔体包裹体的发现及其地质意义

陈以莉[1],虞鹏鹏[1*],单宏祥[1],郑 义[1],阳 峰[2],林振文[2],钱加慧[1]

1. 中山大学地球科学与工程学院,广东珠海 519082
2. 广东省地质调查研究院,广东广州 510110

地壳深熔岩石中的熔体包裹体由深熔熔体冷却结晶而成,是地壳深熔作用最直接的记录,它们记录了熔体形成与演化过程中各阶段的关键物理化学信息(Bartoli *et al.*, 2013; 高晓英等, 2019; Zhang *et al.*, 2025; Liu *et al.*, 2026),是揭示造山带演化与地壳深熔作用机制的理想载体(Feng *et al.*, 2024; 郑永飞等, 2024).

华南陆块主要由扬子地块和华夏地块组成.华南内陆的下泥盆统角度不整合覆盖于前泥盆系之上,这一区域不整合事件所对应的构造活动被称为"加里东运动"或者"武夷-云开造山运动"(Yu *et al.*, 2019, 2022).受该造山作用的影响,华南东侧广泛发育绿片岩相-角闪岩相乃至麻粒岩相变质作用,并产出大量混合岩和花岗质岩石(图1;钱加慧等, 2024).学界对华南地壳深熔作用的认识,目前主要来源于已分异的花岗岩侵入体研究(虞鹏鹏等,2023).这些研究虽提供了基于分异产物的间接热力学约束,但关于深熔熔体形成与演化过程中的原位物理化学条件及熔体成分的研究仍相对薄弱,这制约了人们对华南早古生代深熔作用过程与机制的深入理解.笔者在粤西早古生代混合岩中新发现了熔体包裹体,为研究华南地壳深熔作用提供了直接的显微结构证据与半定量成分约束.

1 粤西混合岩及其熔体包裹体矿物组成

粤西阳江海陵岛发育加里东期混合岩和花岗岩.本研究的混合岩样品采自海陵岛的东北部(图1).野外观察表明,混合岩具有显著的条带状构造(图2a),由浅色体、中色体与暗色体构成(图2b~2c).浅色体中发育较多暗红色石榴石,颗粒粗大,多为毫米级;而中色体与暗色体中的石榴石颗粒细小,肉眼不易分辨(图2b~2c).

显微观察表明,混合岩浅色体与中色体均主要由石榴石、黑云母、白云母、石英、斜长石、钾长石和少量钛铁矿组成(图3).石榴石呈他形至半自形,颗粒粗大,发育大量裂隙,裂隙中常充填黑云母和白云母(图3a).黑云母多环绕石榴石、斜长石和钾长石分布(图3b~3e).斜长石、石英和黑云母的接触界面多呈港湾状(图3b~3d).钛铁矿呈半自形至自形板状(图3f).

石榴石中发育熔体包裹体,粒径集中在5~20 μm,形态上多呈等轴状负晶形(图4);大部分包裹体不发育裂纹,仅少数可见放射状短裂纹.结合扫描电镜能谱与激光拉曼光谱分析的

基金项目:广东省自然科学基金项目(No. 2024A1515030216);广东省科协青年人才培育项目(No. SKXRC2025005).
作者简介:陈以莉(2005-),女,本科生,主要从事地壳深熔作用研究. E-mail: chenyli35@mail2.sysu.edu.cn
* **通讯作者**:虞鹏鹏,ORCID:0000-0002-7312-8940. E-mail: yupp3@mail.sysu.edu.cn

引用格式:陈以莉,虞鹏鹏,单宏祥,郑义,阳峰,林振文,钱加慧,2026.华南早古生代混合岩中熔体包裹体的发现及其地质意义.地球科学,51(9):3619-3622.

Citation: Chen Yili, Yu Pengpeng, Shan Hongxiang, Zheng Yi, Yang Feng, Lin Zhenwen, Qian Jiahui, 2026. Discovery of Melt Inclusions in Early Paleozoic Migmatites of South China and Their Geological Significance. *Earth Science*, 51(9): 3619-3622.

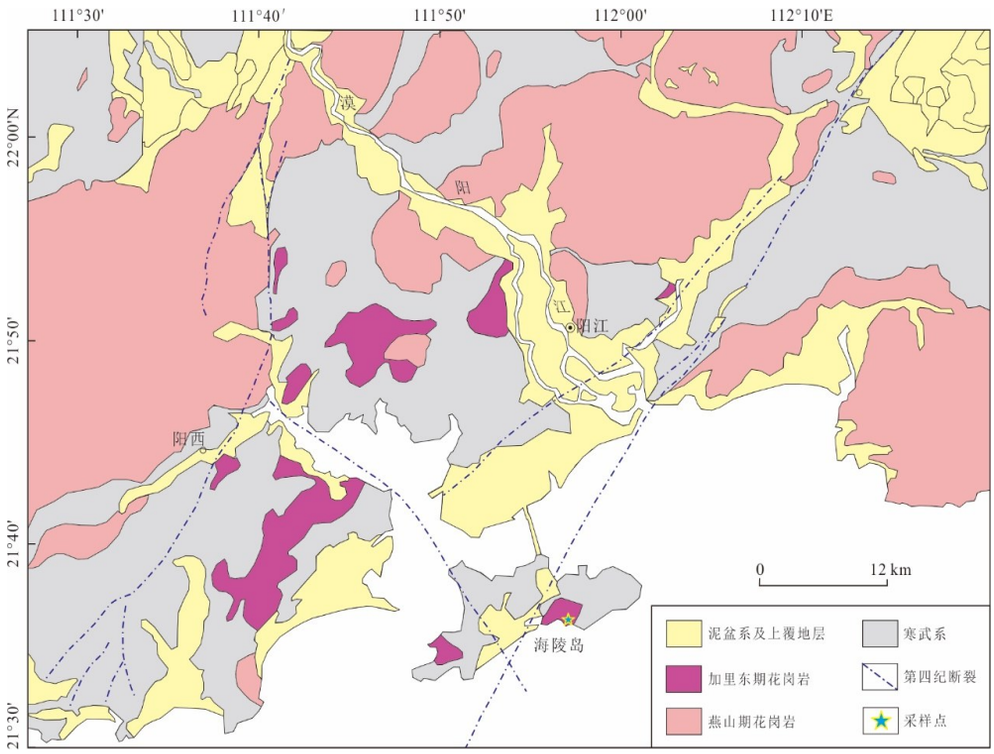

图 1 阳江地区地质图(据王小娜等, 2020修改)

Fig.1 Geological map of the Yangjiang area (modified after Wang *et al.*, 2020)

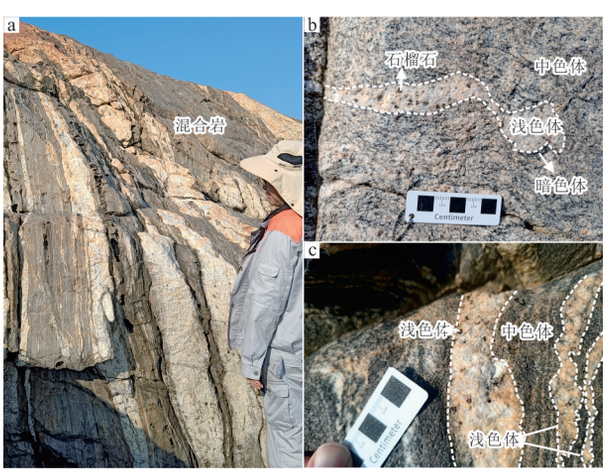

图 2 研究区混合岩野外露头

Fig.2 Outcrops of the migmatites in the study area

a.条带状混合岩;b~c.混合岩浅色体、中色体、暗色体及其中的石榴石

物相鉴定结果,可识别出从完全玻璃态(图 4a)、部分结晶态(图 4b)到完全结晶态(图 4c~4d)的熔体包裹体,其中,完全结晶态包裹体的子矿物组合为黑云母+石英+斜长石/钾长石,与花岗质熔体的结晶产物一致(图 4b~4d).此外,本研究利用活塞圆筒装置,在 750 ℃、5 kbar 的条件下对熔体包裹体进行了均一化实验,结果显示仅有少量包裹体被均一化为玻璃质(图 4e~4f).

2 对华南深熔作用研究的启示及意义

石榴石中完全结晶的熔体包裹体的矿物组分与花岗岩高度相近,亦被称作"纳米花岗岩"(Bartoli *et al.*, 2013),是判别岩石原位部分熔融最直接的微观岩相学标志.本研究在混合岩中识别出原生熔体包裹体,完善了华南早古生代造山带地壳深熔作用的显微岩相学证据,为利用熔体包裹体约束该区域的部分熔融过程提供了新的重要依据.混合岩及熔体包裹体的显微岩相与矿物组合特征表明,研究区原岩主要发生黑云母脱水熔融反应,熔融机制遵循:黑云母+斜长石+石英→石榴石+钾长石+熔体(Weinberg and Hasalová, 2015).本研究的包裹体均一化实验结果有效约束了本区部分熔融作用的下限温度与上限压力,指示其熔融温度不低于 750 ℃,发生压力不高于 5 kbar.后续可借助相平衡模拟定量约束部分熔融的温压条件,并结合熔体包裹体的原位微区成分测试,查明深熔熔体的演化规律,进而建立区内变质-深熔-岩浆作用的内在关联,为深刻揭示华南早古生代地壳深熔作用的机制提供关键约束.

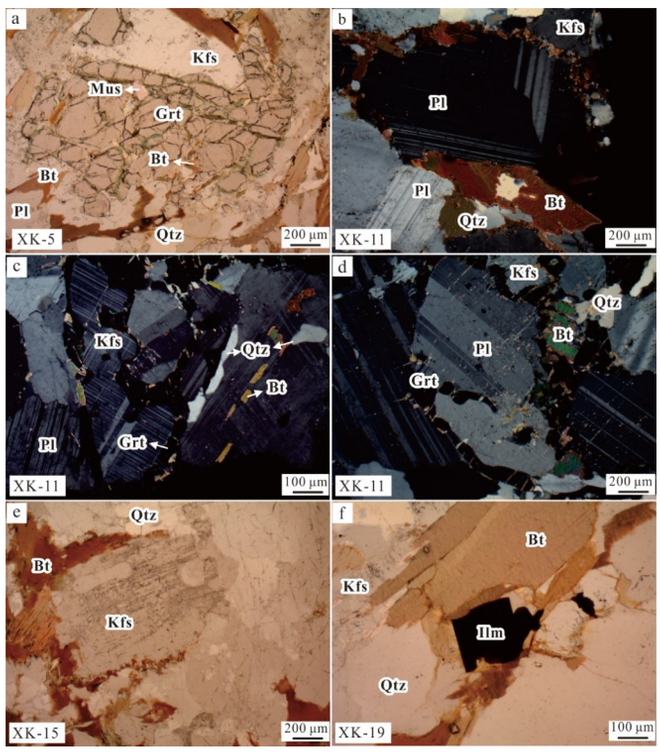

图 3　混合岩岩相学特征

Fig.3　Petrographic characteristics of the migmatites

矿物缩写:Grt.石榴石;Bt.黑云母;Mus.白云母;Qtz.石英;Pl.斜长石;Kfs.钾长石;Ilm.钛铁矿

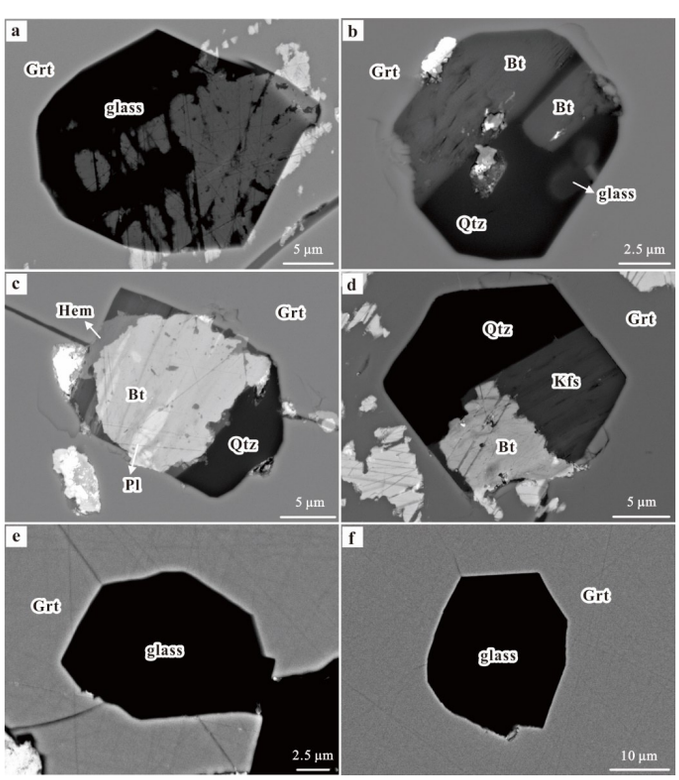

图 4　熔体包裹体及其均一化实验结果的扫描电镜背散射电子图像

Fig.4　Scanning electron microscope backscattered electron (SEM-BSE) images of melt inclusions and remelting experiment results

缩写:Hem.赤铁矿;glass.玻璃质;其他缩写与图 3 一致

References

Bartoli, O., Cesare, B., Poli, S., et al., 2013. Recovering the Composition of Melt and the Fluid Regime at the Onset of Crustal Anatexis and S-Type Granite Formation. *Geology*, 41(2): 115－118. https://doi.org/10.1130/g33455.1

Feng, P., Wang, L., Li, X. W., et al., 2024. SS-LASS Zircon Dating Deciphering Multiple Episodes of Anatexis in a Deeply-Subducted Continental Crust: An Example from Sulu Orogen, China. *Journal of Earth Science*, 35(1): 85－98. https://doi.org/10.1007/s12583-022-1797-8

Gao, X. Y., Wang, L., Meng, Z. Y., et al., 2019. Anatexis of Crustal Rocks during Continental Collision: Evidence from Multiphase Crystal Inclusions in UHP Metamorphic Rocks. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 38(4): 665－680 (in Chinese with English abstract).

Liu, Z., Bartoli, O., Tong, L. X., et al., 2026. Decoding Anatexis of Greywackes from the Prydz Bay Region, East Antarctica: Insights from Thermodynamic Modeling, Petrochronology and Nanogranitoids. *Journal of Petrology*, 67(2): egag007. https://doi.org/10.1093/petrology/egag007

Qian, J. H., Liang, Y. Z., Yin, C. Q., et al., 2024. Metamorphic *P-T-t* Evolution of Pelitic Granulite from Gaozhou, Western Guangdong Province and Its Implications for the Early Paleozoic Tectonic Setting in South China. *Chinese Science Bulletin*, 69: 2602－2617 (in Chinese with English abstract).

Wang, X. N., Deng, Z. H., Ye, X. W., et al., 2020. The Study of Crustal Velocity Structure and Seismicity in Yangjiang Area of Guangdong Province. *Seismology and Geology*, 42(5): 1153－1171 (in Chinese with English abstract).

Weinberg, R. F., Hasalová, P., 2015. Water-Fluxed Melting of the Continental Crust: A Review. *Lithos*, 212: 158－188. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2014.08.021

Yu, P. P., Zhang, Y. Z., Zhou, Y. Z., et al., 2019. Melt Evolution of Crustal Anatexis Recorded by the Early Paleozoic Baiyunshan Migmatite-Granite Suite in South China. *Lithos*, 332: 83－98. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2019.02.020

Yu, P. P., Weinberg, R. F., Zheng, Y., et al., 2022. Multiple Crustal Melting Pulses and Hf Systematics in Zircons. *Lithos*, 410: 106583. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2021.106583

Yu, P. P., Ding, W., Zeng, C. Y., et al., 2023. Episodic Magmatism and Continental Reworking in the Yunkai Domain, South China. *Earth Science*, 48(9): 3205－3220 (in Chinese with English abstract).

Zhang, C., Pu, H. X., Liu, J. Q., et al., 2025. Coexisting Carbonatite and Silicate Melt Inclusions in the Cretaceous Volcanic Rock from the Central Great Xing'an Range, Northeast China: Evidence for Recycled Carbonate from Subducted Paleo-Pacific Plate. *Journal of Earth Science*, 36(1): 364－372. https://doi.org/10.1007/s12583-024-0135-8

Zheng, Y. F., Chen, R. X., Gao, P., 2024. Anatectic Metamorphism and Granite Petrogenesis in Continental Collision Zones. *Earth Science*, 49(1): 1－28 (in Chinese with English abstract).

中文参考文献

高晓英, 王玲, 孟子岳, 等, 2019. 大陆俯冲带地壳深熔作用的记录: 来自超高压变质岩中多相晶体包裹体的研究. 矿物岩石地球化学通报, 38(4): 665－680.

钱加慧, 梁勇智, 尹常青, 等, 2024. 粤西高州泥质麻粒岩变质*P-T-t*演化及其对华南早古生代构造背景的指示. 科学通报, 69(18): 2602－2617.

王小娜, 邓志辉, 叶秀薇, 等, 2020. 广东阳江地区的地壳速度结构与地震活动性. 地震地质, 42(5): 1153－1171.

虞鹏鹏, 丁望, 曾长育, 等, 2023. 华南云开地区幕式岩浆作用与大陆再造. 地球科学, 48(9): 3205－3220.

郑永飞, 陈仁旭, 高彭, 2024. 大陆碰撞带深熔变质与花岗岩成因. 地球科学, 49(1): 1－28.