

大别-苏鲁造山带橄榄岩的变质和交代过程

陈意*, 叶凯, 苏斌, 郭顺, 刘景波

岩石圈演化国家重点实验室, 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

* 联系人, E-mail: chenyi@mail.iggcas.ac.cn

2013-05-20 收稿, 2013-07-17 接受, 2013-08-07 网络版发表

国家重点基础研究发展计划(2009CB25001)和国家自然科学基金(41090371)资助

摘要 详细的岩石学研究表明, 大别-苏鲁造山带橄榄岩和辉石岩记录了俯冲带之上地幔楔的交代和变质信息. 在苏鲁芝麻坊石榴二辉橄榄岩中识别了七期变质矿物组合, 反映了大陆俯冲-碰撞-折返过程中多期的变质和交代作用. 大别毛屋石榴斜方辉石岩同样保存了大量的交代结构, 高 Ni 和富集轻稀土(LREE)的斜方辉石核部包裹了早期原岩橄榄石, 表明它是俯冲地壳熔/流体与原岩橄榄石在超高压条件下反应的产物. 毛屋石榴斜方辉石岩记录了六期变质作用, 对应了岩石从浅部地幔楔沿俯冲隧道进入深部地幔楔, 最后随陆壳岩石折返回浅部地壳的全部过程. 其中石榴石变斑晶核部包裹了大量的以含水矿物为主的角闪岩相多相包裹体, 具有高 X_{Mg} 和 Ni 含量, 并富集大离子亲石元素(LILE)和 LREE, 表明它们是早期岩石在浅部地幔楔与地壳流体交代的产物. 角闪岩进入深部地幔楔经历高压和超高压变质, 早期含水矿物完全脱水分解, 形成超高压石榴斜方辉石岩, 释放 LILE 和 LREE 富集的流体进入上覆高温地幔楔, 从而导致高温地幔楔发生部分熔融并产生岛弧岩浆.

关键词

地幔楔
橄榄岩
辉石岩
变质演化
交代作用

地幔楔是汇聚板块边缘位于俯冲板块之上地幔的一部分. 地幔楔底部在板块俯冲/折返过程中发生的地质变化是研究板块构造、壳幔相互作用、地幔不均一性和岛弧岩浆作用的核心. 俯冲大洋板块析出的熔/流体进入并交代上覆地幔楔, 可使受到交代的地幔楔发生部分熔融, 产生岛弧岩浆岩^[1-4]. 因此, 众多研究学者以岛弧岩浆岩的地球化学特征来代表俯冲地壳流体的成分特征. 然而, 岛弧岩浆的形成必须要求其地幔源区含有富化、富集的玄武质组分^[4,5]. 大量的研究表明, 地幔楔底部存在显著的地温梯度变化, 紧邻俯冲板块之上的为低温地幔楔, 其温度低于地幔固相线, 如果没有受到板片来源熔/流体交代就不会发生富化和富集, 也就不能成为岛弧岩浆的地幔源区. 低温地幔楔之上为高温地幔楔(岛弧地幔源区), 俯冲板片析出的流体在到达高温地幔楔之前, 必须穿过低温地幔楔, 并与之发生强烈的交代作用,

反应之后残余的流体才能进入岛弧地幔源区^[4]. 因此, 低温地幔楔是大洋俯冲带之上壳幔相互作用最为关键的区域, 它对我们理解岛弧岩浆岩的形成有重要的指示意义. 然而, 由于俯冲大洋地壳密度在 > 120 km 深度高于周围地幔^[6], 大洋板块之上的深部低温地幔楔岩石很难随洋壳一起折返回地表, 这使我们对低温地幔楔的深部动力学过程和交代机制仍缺乏系统的认识.

大陆地壳比重较轻, 即使俯冲到 >200 km 的深度仍可由自身浮力折返^[7-9]. 在低密度的超高压变质陆壳岩石折返的过程中, 它们经常携带一部分上覆深部低温地幔楔底部的橄榄岩和辉石岩沿“俯冲隧道”(subduction channel)折返^[10]. 这些来源于低温地幔楔底部的橄榄岩和辉石岩在大多数大陆俯冲碰撞造山带中都有出露, 比如大别山-苏鲁超高压变质带中出露了大量的造山带辉石岩和橄榄岩. 已有的岩

引用格式: 陈意, 叶凯, 苏斌, 等. 大别-苏鲁造山带橄榄岩的变质和交代过程. 科学通报, 2013, 58: 2294-2299

Chen Y, Ye K, Su B, et al. Metamorphism and metasomatism of orogenic peridotites from Dabie-Sulu UHP terrane. Chin Sci Bull, 2013, 58: 2294-2299, doi: 10.1360/972013-603

石学研究表明, 这些地幔楔橄榄岩的峰期变质温度普遍小于 850°C ^[11-13], 暗示紧邻俯冲大陆板块之上的地幔楔温度低于大洋板块之上的地幔楔. 这些地幔楔橄榄岩中普遍发育了交代成因矿物, 并且记录了超高压条件下的大陆俯冲带流体与地幔楔之间交代反应的岩石学信息. 对这些地幔楔辉石岩和橄榄岩进行详细的岩石学和地球化学研究, 可为深刻理解大陆俯冲带壳幔相互作用和岛弧岩浆作用以及陆下地幔楔动力学过程提供直接的岩石学基础资料.

1 苏鲁芝麻坊石榴二辉橄榄岩的变质演化

苏鲁超高压变质带中芝麻坊石榴二辉橄榄岩已被证明源自于地幔楔^[12,14], 其变质锆石年龄为 224 Ma ^[15]. 矿物显微结构和矿物化学特征表明, 它经历了复杂的变质-构造演化过程. 第一期变质作用记录在高 Ca-Cr 的石榴石变斑晶核部及其中的高 Mg 橄榄石、高 Al-Ca-Cr 斜方辉石和高 Mg 单斜辉石包裹体中(图

1(a), (b)), 表明芝麻坊橄榄岩的原岩为起源于深部高温地幔的易熔石榴二辉橄榄岩, 它的形成可能与早期的地幔交代过程有关. 第二期变质记录在低 Cr 石榴石变斑晶幔部和基质石榴石核部及其中的高 Mg-Al 尖晶石、高 Mg 橄榄石和高 Mg 斜方辉石中(图 1(b)~(d)), 表明岩石对流到浅部高温地幔楔并转变为亏损的尖晶石方辉橄榄岩, 在此过程中可能伴随着高程度部分熔融. 第三期变质记录在交代成因的斜方辉石和单斜辉石变斑晶及其中的铬铁矿、角闪石、金云母、重晶石和黄铁矿包裹体, 表明岩石对流到浅部富水的低温地幔楔, 受到陆壳富 Si, Al, Ca 和 Ba 的含水熔体或超临界流体的交代作用, 转变为含角闪石的尖晶石二辉橄榄岩. 第四期和第五期变质表明岩石卷入俯冲带并向深部俯冲, 转变为高压含角闪石的石榴橄榄岩和超高压石榴二辉橄榄岩, 在此过程中早期交代形成的角闪石和金云母发生脱水分解. 第六期和第七期分别记录了岩石在折返过程中转变

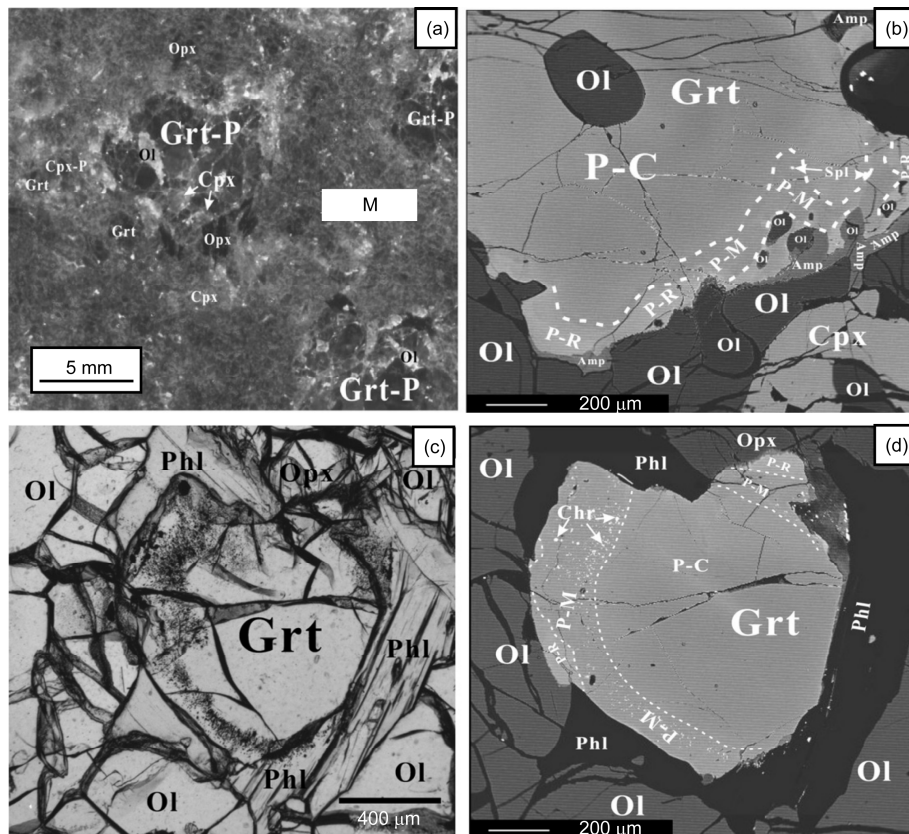


图 1 苏鲁芝麻坊石榴二辉橄榄岩记录多期变质的显微照片和背散射图像

据文献[12]修改. (a), (b) 粗粒石榴石变斑晶的核部(P-C)、幔部(P-M)和边部(P-R)及其包裹体; (c), (d) 石榴石变斑晶幔部包裹大量的尖晶石包裹体. Grt, 石榴石; Cpx, 单斜辉石; Opx, 斜方辉石; Ol, 橄榄石; Spl, 尖晶石; Amp, 角闪石; Ph, 金云母; Chr, 铬铁矿; M, 基质

为含角闪石的石榴橄榄岩和含绿泥石-角闪石的尖晶石二辉橄榄岩,反映了浅部的陆壳流体交代过程. 详细的反应结构和矿物成分表明岩石经历了从大陆地壳俯冲脱水交代/变质到超高压岩石折返脱水交代/变质过程中多期蚀变-脱水-反应-变质作用.

2 大别山毛屋石榴斜方辉石岩的原岩属性和变质演化

毛屋基性-超基性岩体作为大别山造山带经典的露头之一,其成因已争议了 20 多年. 大部分早期的研究者认为,毛屋基性-超基性岩体的原岩为基性岩浆结晶分异形成的堆晶杂岩^[16-18]. 然而,详细的矿物学、岩石学和地球化学研究结果表明,毛屋石榴斜方辉石岩的原岩不是堆晶岩,而是地幔楔橄榄岩. 石榴辉石岩中保存了大量的交代结构:(1) 基质斜方辉石(Opx2)中包裹了早期原岩的橄榄石和斜方辉石(Opx1)(图 2(a), (b)), Opx2 具有高 Ni 含量、高 Ni/Mg 比值和富集 LREE 特征, 橄榄石和斜方辉石(Opx1)包裹体成分与毛屋方辉橄榄岩和纯橄岩中的橄榄石和斜方辉石一致, 并且 Opx1 显示 LREE 亏损特征. 这些特征表明,斜方辉石是原岩橄榄石与富 Si 熔/流体

交代反应的产物^[19,20]; (2) 基质钛斜粒硅镁石中包含有原岩残留的橄榄石和斜方辉石颗粒(图 2(c)), 表明钛斜粒硅镁石是由富含 Ti 的流体与橄榄石交代反应产生的; (3) 脉状的金红石、磷灰石和钛斜粒硅镁石充填在基质矿物间的裂隙中(图 2(d)-(f)), 表明交代原岩的熔/流体富含 Ti 和 P. 毛屋石榴斜方辉石岩的全岩 X_{Mg} 较高, 在 0.88~0.92, 远高于典型的堆晶岩 X_{Mg} , 与地幔橄榄岩类似^[21].

详细的岩相学观察和矿物化学分析表明,石榴斜方辉石岩经历了复杂的六期变质演化历史^[13]. 第一期(M1)为低压高温变质阶段(~1.4 GPa, ~850°C), 记录在早期石榴石变斑晶核部的高温多相包裹体中, 如假蓝宝石、Mg-Al 尖晶石、高 Ti 低 Cl 角闪石和高 Al 斜方辉石. 第二期(M2)为低压低温变质阶段(~1.4 GPa, ~750°C), 表现为石榴石变斑晶核部的低温多相包裹体的生长, 包括绿泥石、滑石、低 Ti 高 Cl 普通角闪石、含钠铝直闪石、Ba-Cl 角闪石、黄铁矿、低 Cr 尖晶石、绿帘石、磷灰石和金红石等, 它们常分布于第一期高温矿物的外围或包裹体的边部. 第三期(M3)为高压低温变质阶段(2.1~2.5 GPa, 740~760°C), 记录在石榴石变斑晶的幔部及其包裹体之中, 如低

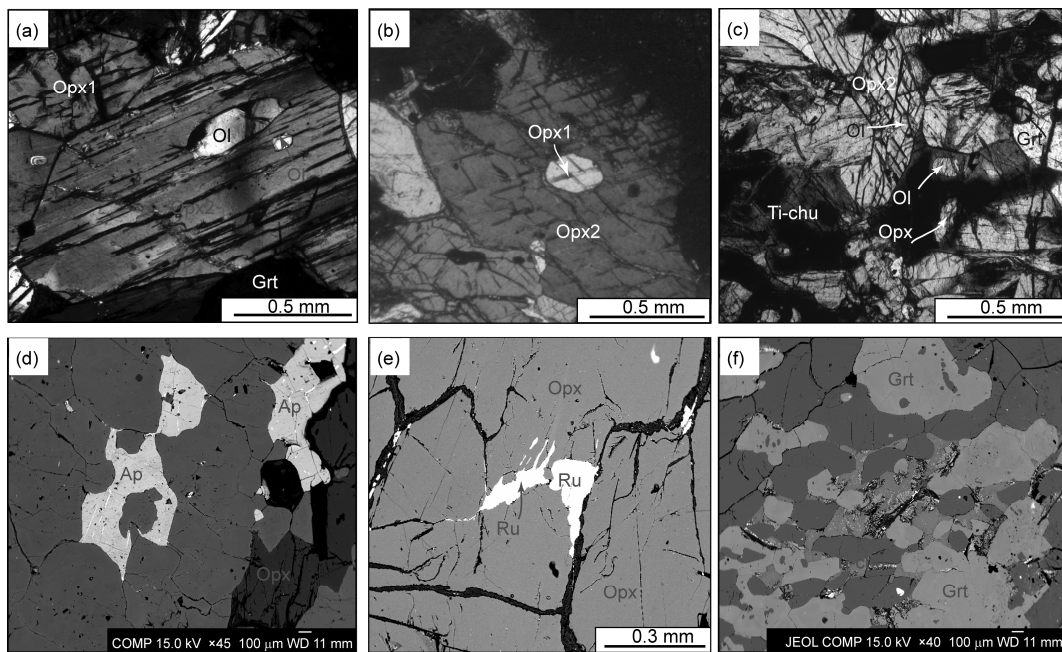


图 2 大别毛屋基性-超基性岩中的交代结构

据文献[13]修改. (a), (b) 基质斜方辉石(Opx2)核部包裹早期原岩残留的橄榄石和斜方辉石(Opx1); (c) 基质钛斜粒硅镁石包裹原岩残留橄榄石和斜方辉石; (d), (f) 脉状磷灰石、金红石和钛斜粒硅镁石充填基质颗粒边界. Ti-chu, 钛斜粒硅镁石; Ap, 磷灰石; Ru, 金红石. 其他矿物缩写与图 1 一致

Al 斜方辉石、高 Al 低 Cl 角闪石、绿泥石、高 Cr 尖晶石和金红石。第四期(M4)为峰期超高压变质阶段(5.3~6.3 GPa, ~800°C), 记录在石榴石变斑晶的边部, 基质斜方辉石的核部及其包裹体之中, 矿物组合为石榴石+低 Al 高 Ni 斜方辉石+低 Al 高 Ni 单斜辉石+含 F 钛斜粒硅镁石+铬铁矿。第五期(M5)为早期退变质阶段(<3 GPa, >750°C), 表现为钛斜粒硅镁石和钛粒硅镁石退变为橄榄石+钛铁矿的后成合晶。第六期(M6)为晚期退变质阶段(<2.3 GPa, <670°C), 表现为石榴石、斜方辉石以及后成合晶被最晚期的高 F 绿泥石、含 F 角闪石、滑石、蛇纹石和磁铁矿所取代。通过热力学计算获得的变质 $P-T$ 轨迹显示(图3): M1~M2 为近等压降温过程, 可能反映岩石经历了俯冲板块之上低温地幔楔的角流过程, 在此过程中原岩橄榄岩受到富 Si, Al, Ti, Ca, Na, P, Sr, Ba, S 和 Cl 的熔体或者超临界流体的交代作用; M2~M4 为近等温升压过程, 表明岩石被卷入俯冲带, 随俯冲板块一起沿俯冲隧道进入深部地幔并经历高压-超高压变质, 在此过程中受到陆壳富 Si 熔体的交代; M4~M6 显示降温降压过程, 表明岩石与陆壳 UHP 岩石一起沿俯冲隧道折返回浅部地壳, 并受到浅部陆壳流体的交代。

3 低温地幔楔蚀变和脱水过程和元素迁移

苏鲁芝麻坊石榴二辉橄榄岩和大别毛屋石榴斜方辉石岩均记录了低温地幔楔的蚀变和脱水过程。芝麻坊石榴二辉橄榄岩第三期角闪石、重晶石和黄铁矿为俯冲陆壳流体交代浅部低温地幔楔的产物, 随后卷入俯冲带并沿俯冲隧道向深部俯冲, 转变为较干的石榴二辉橄榄岩, 在此过程中角闪石发生脱水分解反应^[12]。毛屋石榴斜方辉石岩第一期和第二期多相包裹体中的大量含水矿物亦为俯冲陆壳流体交代浅部低温地幔楔的产物, 随后在俯冲过程中早期含水矿物不稳定而脱水分解, 形成较干的石榴斜方辉石岩^[13,22]。类似的吸水和脱水过程在其他大陆俯冲带中也有过报道^[23,24], 这说明低温地幔楔中的蚀变和脱水过程是大陆俯冲带中的普遍现象。

本研究对毛屋石榴斜方辉石岩中多相包裹体及其寄主矿物石榴石进行了系统的矿物学、岩石学和地球化学分析。结果显示, 多相包裹体主要由含水矿物(>70 vol.%, 体积分数)组成, 包括角闪石、绿泥石、滑石、氯磷灰石和金云母(图 4(a), (b)), 另含少量不含水矿物, 如斜方辉石、假蓝宝石、尖晶石、金红石和

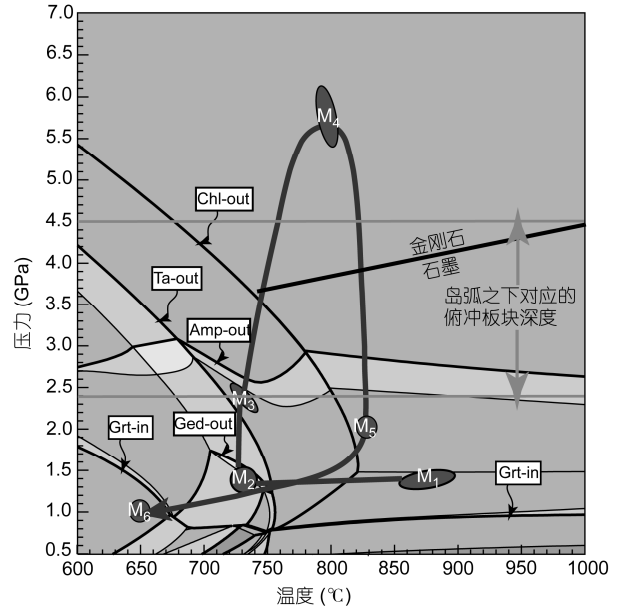


图3 毛屋石榴斜方辉石岩变质 $P-T$ 轨迹

据文献[13]修改。Chl-out, 绿泥石消失; Ta-out, 滑石消失; Amp-out, 角闪石消失; Ged-out, 铝直闪石消失; Grt-in, 石榴石出现; M₁~M₆ 分别代表第一期到第六期变质作用

黄铁矿。这些矿物记录了石榴斜方辉石岩中最早期的变质和交代作用。前已论述, 毛屋基性-超基性岩的原岩是大陆俯冲带之上地幔楔橄榄岩。而多相包裹体中所有的 Fe-Mg 矿物都具有高 X_{Mg} (0.88~0.96), NiO 含量(0.06 wt%~0.27 wt%, 质量分数)和 Ni/Mg 比值(0.0012~0.0031), 通过计算所得的多相包裹体全岩主量元素显示同样的特征, 这表明这些矿物很有可能继承了早期原岩的橄榄石的部分成分特征。此外, 激光原位分析结果显示, 多相包裹体明显富集 LILE、LREE 和高场强元素(HFSE)(图 4(c)), 并具有高 U/Th 比值(0.3~21)。结合多相包裹体形成的温压条件(~1.4 GPa, 720~850°C), 我们认为原岩橄榄岩在浅部富水的低温地幔楔(位于弧前之下)经历了强烈的交代/蚀变作用, 交代流体富集 LILE, LREE 和 HFSE, 可能来自于俯冲地壳。参与交代作用的物质可能还有含水熔体甚至超临界流体, 否则 LREE 和 HFSE 难以在多相包裹体中得到富集^[25]。从这个角度来看, 俯冲陆壳在地幔楔底部发生了部分熔融^[10]。

在大陆俯冲过程中, 受到交代/蚀变的橄榄岩被俯冲陆壳刮削下来, 与陆壳岩石一起沿俯冲隧道进入深部地幔, 经历超高压变质^[10]。在此过程中, 角闪石、滑石和绿泥石在 2.3, 2.8 和 3.5 GPa 发生了脱水

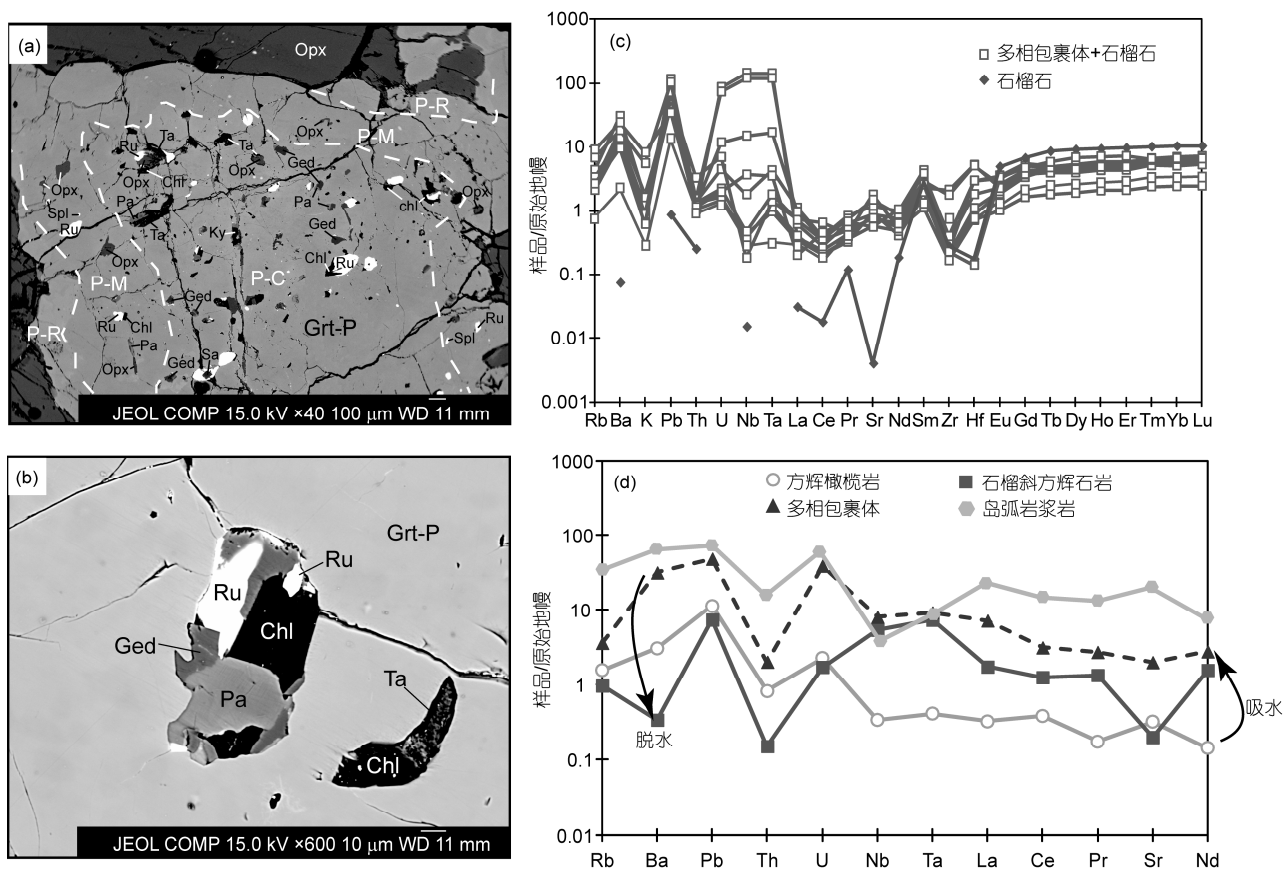


图4 石榴石变斑晶核部的多相包裹体及其微量元素特征

据文献[23]修改, (a) 毛屋石榴斜方辉岩中石榴石变斑晶核部包裹大量的多相包裹体; (b) 多相包裹体主要由含水矿物组成; (c) 多相包裹体与寄主石榴石的微量元素特征; (d) 多相包裹体与原岩方辉橄榄岩和全岩石榴斜方辉岩的微量元素对比, 岛弧岩浆岩数据来自于文献[5]. Grt-P, 石榴石变斑晶; Ged, 铅直闪石; Chl, 绿泥石; Pa, 非闪石; Ta, 滑石; Sa, 假蓝宝石; Ky, 蓝晶石; 其他矿物缩写与图1和2一致

分解反应, 此压力范围正好对应于岛弧之下的俯冲板片深度(图3). 而形成的高压和超高压矿物主要为石榴石、斜方辉石、钛斜粒硅镁石和钛粒硅镁石. 其中只有斜方辉石、钛斜粒硅镁石和钛粒硅镁石能赋存少量的 LILE 和 LREE, 而 HFSE 主要赋存在钛斜粒硅镁石和钛粒硅镁石中. 通过对比多相包裹体和全岩微量元素特征, 以及典型的岛弧岩浆岩成分特征(图4(d)), 我们推测在深部低温地幔楔脱水反应所析出

的流体, 携带了大部分的 LILE 和 LREE 进入上覆高温地幔楔(岛弧岩浆的地幔源区), 从而造成高温地幔楔发生部分熔融, 产生岛弧岩浆岩. 岛弧岩浆岩典型表现为亏损 HFSE 的特征, 一般将其解释为俯冲板片脱水过程中金红石处于稳定状态^[10]. 然而, 如果 HFSE 依然驻留在低温地幔楔而没有进入高温地幔楔, 就会造成岛弧岩浆岩具有富集 LILE 和 LREE、亏损 HFSE 的典型特征.

参考文献

- 1 Plank T, Langmuir C H. Tracing trace elements from sediment input to volcanic output at subduction zones. *Nature*, 1993, 362: 739-743
- 2 Elliott T, Plank T, Zindler A, et al. Element transport from slab to volcanic front at the Mariana arc. *J Geophys Res*, 1997, 102: 14991-15019
- 3 Churikova T, Dorendorf F, Wörner G. Sources and fluids in the mantle wedge below Kamchatka: Evidence from across-arc geochemical variation. *J Petrol*, 2001, 42: 1567-1593

- 4 Manning C E. The chemistry of subduction-zone fluids. *Earth Planet Sci Lett*, 2004, 223: 1–16
- 5 Pearce J A, Stern R J, Bloomer S H, et al. Geochemical mapping of the Mariana arc-basin system: Implications for the nature and distribution of subduction components. *Geochem Geophys Geosyst*, 2005, 7, doi: 10.1029/2004GC000895
- 6 Chen Y, Ye K, Wu T F, et al. Exhumation of oceanic eclogites: Thermodynamic constraints on pressure, temperature, bulk composition and density. *J Metamorph Geol*, 2013, 31: 549–570
- 7 Ernst W G. Alpine and Pacific styles of Phanerozoic mountain building: Subduction-zone petrogenesis of continental crust. *Terra Nova*, 2005, 17: 165–188
- 8 Lapen T J, Johnson C M, Baumgartner L P, et al. Coupling of oceanic and continental crust during Eocene eclogite-facies metamorphism: Evidence from the Monte Rosa nappe, western Alps. *Contrib Mineral Petrol*, 2007, 153: 139–157
- 9 Wu Y, Fei Y W, Jin Z M, et al. The fate of subducted upper continental crust: An experimental study. *Earth Planet Sci Lett*, 2009, 282: 275–284
- 10 Zheng Y F. Metamorphic chemical geodynamics in continental subduction zones. *Chem Geol*, 2012, 328: 5–48
- 11 Yang J J, Jahn B M. Deep subduction of mantle-derived garnet peridotite from the Su-Lu UHPM terrane in China. *J Metamorph Geol*, 2000, 18: 167–180
- 12 Ye K, Song Y R, Chen Y, et al. Multistage metamorphism of orogenic garnet-lherzolite from Zhimafang, Sulu UHP terrane, E. China: Implications for mantle wedge convection during progressive oceanic and continental subduction. *Lithos*, 2009, 109: 155–175
- 13 Chen Y, Ye K, Guo S, et al. Multistage metamorphism of garnet orthopyroxenites from the Maowu mafic-ultramafic complex, Dabieshan UHP terrane, eastern China. *Int Geol Rev*, 2013, 55: 1239–1260
- 14 Zhang R Y, Li T, Rumble D, et al. Multiple metamorphism in Sulu ultrahigh-P garnet peridotite constrained by petrological and geochemical investigations. *J Metamorph Geol*, 2007, 25: 149–164
- 15 Zheng J P, Griffin W L, O'Reilly S Y, et al. A refractory mantle protolith in younger continental crust, east-central China: Age and composition of zircon in the Sulu ultrahigh-pressure peridotite. *Geology*, 2006, 34: 705–708
- 16 Okay A I. Sapphirine and Ti-clinohumite in ultrahigh-pressure garnet-pyroxenite and eclogite from Dabie Shan, China. *Contrib Mineral Petrol*, 1994, 116: 145–155
- 17 Zhang R Y, Liou J G, Yang J S, et al. Petrochemical constraints for dual of garnet peridotites from the Dabie-Sulu UHP terrane, eastern-central China. *J Metamorph Geol*, 2000, 18: 149–166
- 18 Jahn B M, Fan Q C, Yang J J, et al. Petrogenesis of the Maowu pyroxenite-eclogite body from the UHP metamorphic terrane of Dabieshan: Chemical and isotopic constraints. *Lithos*, 2003, 70: 243–267
- 19 Malaspina N, Hermann J, Scambelluri M, et al. Polyphase inclusions in garnet-orthopyroxenite (Dabie Shan, China) as monitors for metasomatism and fluid-related trace element transfer in subduction zone peridotite. *Earth Planet Sci Lett*, 2006, 249: 173–187
- 20 Malaspina N, Hermann J, Scambelluri M. Fluid/mineral interaction in UHP garnet peridotite. *Lithos*, 2009, 107: 38–52
- 21 Zheng J P, Sun M, Griffin W L, et al. Age and geochemistry of contrasting peridotite types in the Dabie UHP belt, eastern China: Petrogenetic and geodynamic implications. *Chem Geol*, 2008, 247: 282–304
- 22 Chen Y, Ye K, Wu Y W, et al. Hydration and Dehydration in the lower margin of a cold mantle wedge: Implications for crust-mantle interactions and petrogeneses of arc magmas. *Int Geol Rev*, 2013, doi: 10.1080/00206814.2013.781732
- 23 Scambelluri M, Muntener O, Ottolini L, et al. The fate of B, Cl and Li in the subducted oceanic mantle and in the antigorite breakdown fluids. *Earth Planet Sci Lett*, 2004, 222: 217–234
- 24 Scambelluri M, Hermann J, Morten L, et al. Melt-versus fluid-induced metasomatism in spinel to garnet wedge peridotites (Ulten Zone, Eastern Italian Alps): Clues from trace element and Li abundances. *Contrib Mineral Petrol*, 2006, 151: 372–394
- 25 Zheng Y F, Xia Q X, Chen R X, et al. Partial melting, fluid supercriticality and element mobility in ultrahigh-pressure metamorphic rocks during continental collision. *Earth-Sci Rev*, 2011, 107: 342–374