中国科学: 地球科学 2023 年 第 53 卷 第 8 期: 1933 ~ 1936
SCIENTIA SINICA Terrae earthcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS

点 评

大陆碰撞带超高压变质岩的折返机制与地壳深熔

吴元保*

中国地质大学(武汉)地球科学学院, 武汉 430074
* 通讯作者, E-mail: yuanbaowu@cug.edu.cn

收稿日期: 2023-06-08; 收修改稿日期: 2023-07-03; 接受日期: 2023-07-12; 网络版发表日期: 2023-07-18
国家自然科学基金项目(批准号: 42130307)资助

1 引言

超高压变质岩广泛出露于大陆碰撞带, 它们通常为不同岩片组成的推覆体, 形成于大陆地壳在俯冲隧道中的俯冲和折返过程. 但是, 文献中对这些超高压地体以何种机制从地幔深度折返到浅部地壳还存在争议, 总体上可以归纳为两种构造机制(Schmalholz等, 2014; Zheng, 2021). 一种为单阶段机制, 即超高压岩片沿俯冲隧道直接逆冲折返到浅部地壳; 另一种为两阶段机制, 其中第一阶段是超高压岩片逆冲折返到莫霍深度而不是地壳浅部, 第二阶段是超高压岩片呈穹隆状侵出. 无论是单阶段还是两阶段构造机制, 它们在岩石学上有什么表现? 分别引起了什么类型的变质作用? 对应的地球动力学背景是什么?

一般来说, 大陆地壳在俯冲至地幔深度过程中发生阿尔卑斯型进变质作用(Zheng和Chen, 2021). 但是, 在大陆深俯冲之前地壳会发生加厚, 引起巴罗型进变质作用(郑永飞等, 2022). 不过, 超高压变质岩在早期折返阶段会发生巴罗型退变质作用(Zheng和Chen, 2021). 无论如何, 大陆碰撞带下地壳都发生了加厚并经受巴罗型高压麻粒岩相变质作用后, 在碰撞后阶段还常常受到巴肯型低压麻粒岩相叠加. 这些变质过程与高级变质岩的折返有什么联系? 由于超高压变质岩在折返至地表前不仅可以经历巴罗型退变质作用的叠加, 形成中压角闪岩-高压麻粒岩相变质相系, 而且可以经历巴肯型进变质作用的叠加, 形成低压角闪岩-麻粒岩相变质相系(Zheng和Chen, 2021). 这些叠加变质作用使得限定超高压变质岩的构造演化、折返机制和动力学背景成为当前研究的难点.

此外, 深俯冲陆壳岩石在折返的不同阶段可能发生部分熔融. 这个过程不仅可以明显降低地壳岩石的密度(Gerya等, 2004)并引起大陆地壳的分异(Rosenberg, 2001), 而且可以导致深俯冲陆壳与岩石圈地幔之间的脱耦, 引发超高压岩石在不同阶段的快速折返(Labrousse等, 2015). 深俯冲陆壳岩石发生部分熔融的时限、机制及其与超高压地体折返过程的对应关系, 也是造山带研究的重要课题, 但是还少有涉及.

为了解决上述问题, 中国科学技术大学夏琼霞教授等对大别造山带的混合岩进行了详细的岩石学、锆石U-Pb同位素年代学和相平衡模拟研究(Xia等, 2023). 结果发现, 这些超高压岩片在大陆碰撞结束之际的晚三叠世, 沿俯冲隧道逆冲叠置折返到莫霍面深度附近, 并发生以降压为主的多硅白云母脱水熔融; 在大陆碰撞之后的早白垩世, 由于山根垮塌引起超高压岩片以穹窿式侵出折返至上地壳, 并引发耦合的黑云母水化-脱水部分熔融. 这个结果明确了超高压地体两种折返机制的先后顺序及不同的地球动力学背景, 并对应于两种类型的地壳部分熔融机制.

中文引用格式: 吴元保. 2023. 大陆碰撞带超高压变质岩的折返机制与地壳深熔. 中国科学: 地球科学, 53(8): 1933–1936, doi: 10.1360/SSTe-2023-0113
英文引用格式: Wu Y B. 2023. Exhumation mechanism and crustal anatexis of ultrahigh-pressure metamorphic rocks in continental collision zones. Science China Earth Sciences, 66(8): 1913–1916, https://doi.org/10.1007/s11430-023-1145-7

© 2023 《中国科学》杂志社

2 研究背景和结果

大别造山带是华南陆块在三叠纪时期俯冲到华北克拉通岩石圈之下发生超高压变质作用之后又折返到地壳层位的构造作用产物(Zheng等, 2019). 与南大别低温超高压和中大别中温超高压变质带不一样, 北大别高温超高压变质带不仅出露有超高压变质岩, 而且广泛发育混合岩和碰撞后岩浆岩(Xu和Zhang, 2017; Zhao等, 2017), 是研究深俯冲岩石折返过程和地壳深熔的天然实验室.

Xia等(2023)在北大别英山地区长英质混合岩中识别出三种不同类型的淡色体, 分别为富斜长石淡色体、富钾长石淡色体和富石英淡色脉体, 其中富石英淡色脉体中含有少量残斑状石榴石. 通过对混合岩中锆石进行U-Pb定年、岩相学和地球化学综合研究, 他们发现深色体和三类淡色体中均出现三个阶段生长的变质-转熔-深熔锆石, 分别为早三叠世的变质成因锆石、晚三叠世的转熔成因锆石以及早白垩世的深熔成因锆石. 特别是在晚三叠世年龄的转熔锆石区域发现大量的多相晶体包裹体矿物组合(图1), 其中Rt+Ttn+Mus+Kfs组合显示高压条件下多硅白云母部分熔融的特征, 而Grt+Qz+Pl+Kfs组合则显示高压条件下石榴石与熔体的同生长过程.

通过对淡色脉体中石榴石以及深色体中角闪石的研究, Xia等(2023)确定了这些矿物都存在多期次生长的特征, 其中石榴石的生长分别是早三叠世超高压变质期间变质反应和晚三叠世初始折返期间转熔反应形成, 而角闪石的两期生长分别是早白垩世黑云母加水熔融和脱水熔融的产物. 综合矿物成分、全岩相平衡模拟、锆石U-Pb定年以及热压比计算结果, 他们提出研究区混合岩化片麻岩记录了三阶段变质-深熔过程(图1): 第一阶段(M1)为约240~220Ma的阿尔卑斯型超高压榴辉岩相变质, 所处的地温梯度约为5~10°C/km; 第二阶段(M2)为约220~200Ma的巴罗型高压麻粒岩相变质-深熔作用, 所处的地温梯度约为12~15°C/km; 第三阶段(M3)为约140~120Ma的巴肯型低压麻粒岩相变质-深熔作用, 所处地温梯度为30~50°C/km. 因此, 大别造山带的大陆地壳经历了深俯冲到地幔深度过程中的阿尔卑斯型变质, 在大陆碰撞结束之际折返到莫霍面深度过程中从阿尔卑斯型向巴罗型变质相系转变, 以及在大陆碰撞之后折返到上地壳深度过程中由巴罗型向巴肯型变质相系转变.

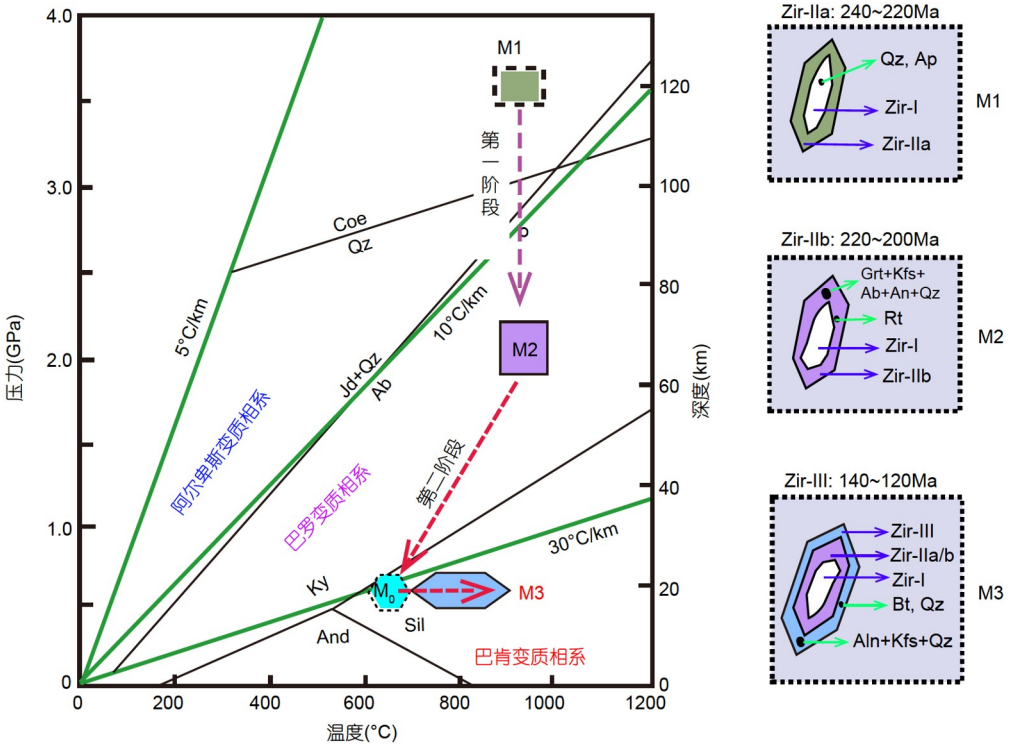

图 1 (网络版彩图)大别造山带混合岩经历的三个变质阶段(M1, M2, M3)及其对应的地温梯度(改自Xia等, 2023)

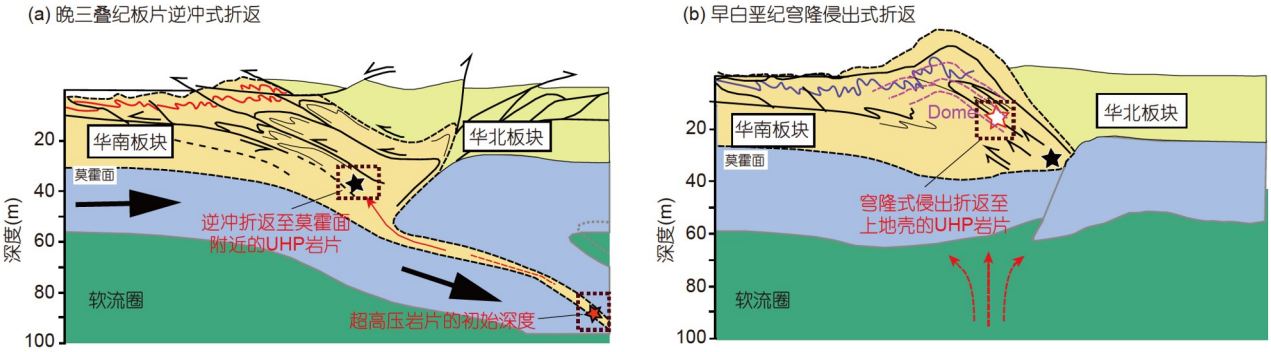

图 2　(网络版彩图)碰撞造山带深部地壳折返的两阶段模型(改自Xia等, 2023)

Xia等(2023)的岩石年代学研究为深俯冲大陆地壳折返的构造机制提供了强有力的证据. 在晚三叠世时期, 由于俯冲大陆板块前端的俯冲大洋板片的断离, 导致俯冲大陆地壳在浮力及俯冲隧道内构造作用下, 从岩石圈地幔深度通过岩片逆冲折返至莫霍面深度堆垛, 形成不对称的推覆体(图2a); 在近等温降压折返的情况下, 多硅白云母在高压麻粒岩相条件下发生脱水熔融, 产生第一期熔体. 在早白垩世时期, 大陆碰撞带山根发生拆沉减薄及伸展构造背景, 堆垛在莫霍面的岩石在地温梯度升高的条件下, 黑云母在低压角闪岩相-麻粒岩相变质条件下发生加水熔融和脱水熔融作用, 深熔变质产物以穹隆式侵出到上地壳层位形成对称的变质核杂岩(图2b), 表现为广泛出露的早白垩世混合岩化作用和长英质岩浆岩(Xu和Zhang, 2017; Zhao等, 2017).

3　研究启示及存在问题

对大陆碰撞带超高压变质岩的折返机制, Zheng (2021)提出了两阶段构造模型: 第一阶段是深俯冲大陆地壳在浮力及俯冲隧道内构造作用下逆冲折返至莫霍面深度, 堆垛形成不对称的推覆体; 第二阶段是在大陆碰撞带山根发生拆沉的构造背景下, 位于莫霍面之上的加厚下地壳岩石发生深熔变质作用, 所产生的熔体裹带麻粒岩相残留体呈穹隆状挤出, 形成较为对称的变质核杂岩. Xia等(2023)的研究不仅以实例验证了这个模型, 而且对折返相关地壳熔融的物理化学机制提出了新的认识: 第一阶段变质岩发生以降压为主的多硅白云母脱水熔融, 而第二阶段变质岩发生以升温为主的黑云母水化-脱水部分熔融. 在第二阶段, 地温梯度的显著升高指示, 在地壳深熔过程中有外部热源的贡献, 可能与伸展背景下碰撞造山带山根垮塌引起的软流圈地幔上涌有关; 它们对应碰撞造山带发生张裂作用, 但是大陆张裂没有进一步演化到大陆裂解乃至洋盆打开, 因此对应于夭折的大陆张裂(Zheng和Chen, 2021).

在大陆碰撞带超高压变质地体的折返与地壳深熔的研究中, 未来还需要关注下列问题: (1) 所有超高压变质地体都是两阶段折返吗? 如果不是, 是什么原因导致不同的折返过程? (2) 超高压地体不同阶段折返熔融的性质、规模及其与同时代花岗岩之间的成因联系是什么? (3) 大陆张裂判定因素有哪些, 与造山带伸展垮塌之间的因果关系如何对应? (4) 大陆张裂成功与否的关键因素是什么? 为了回答这些科学问题, 需要深入了解汇聚板块边缘的构造演化、变质历史、动力学体制和热状态及其变化等关键参数.

致谢　感谢郑永飞院士对稿件的建设性评审, 感谢夏琼霞博士协助提供论文素材.

参考文献

郑永飞, 陈伊翔, 陈仁旭, 戴立群. 2022. 汇聚板块边缘构造演化及其地质效应. 中国科学: 地球科学, 52: 1213–1242

Gerya T V, Yuen D A, Maresch W V. 2004. Thermomechanical modelling of slab detachment. Earth Planet Sci Lett, 226: 101–116

Labrousse L, Duretz T, Gerya T. 2015. H2O-fluid-saturated melting of subducted continental crust facilitates exhumation of ultrahigh-pressure rocks in continental subduction zones. Earth Planet Sci Lett, 428: 151–161

Rosenberg C L. 2001. Deformation of partially molten granite: A

review and comparison of experimental and natural case studies. Int J Earth Sci, 90: 60–76

Schmalholz S M, Duretz T, Schenker F L, Podladchikov Y Y. 2014. Kinematics and dynamics of tectonic nappes: 2-D numerical modeling and implications for high and ultra-high pressure tectonism in the Western Alps. Tectonophysics, 631: 160–175

Xia Q X, Yu M, Zhu E L, Chen R X, Li W C, Zheng Y F, Zhao Z F, Li Z Y. 2023. Two generations of crustal anatexis in association with two-stage exhumation of ultrahigh-pressure metamorphic rocks in the Dabie orogen. Lithos, 446-447: 107146

Xu H, Zhang J. 2017. Anatexis witnessed post-collisional evolution of the Dabie orogen, China. J Asian Earth Sci, 145: 278–296

Zhao Z F, Liu Z B, Chen Q. 2017. Melting of subducted continental crust: Geochemical evidence from Mesozoic granitoids in the Dabie-Sulu orogenic belt, east-central China. J Asian Earth Sci, 145: 260–277

Zheng Y F, Zhao Z F, Chen R X. 2019. Ultrahigh-pressure metamorphic rocks in the Dabie-Sulu orogenic belt: Compositional inheritance and metamorphic modification. Geol Soc London Spec Publ, 474: 89–132

Zheng Y F. 2021. Exhumation of ultrahigh-pressure metamorphic terranes. In: Alderton D, Elias S A. eds. Encyclopedia of Geology. 2nd ed. Academic Press, United Kingdom. 3: 868–878

Zheng Y F, Chen R X. 2021. Extreme metamorphism and metamorphic facies series at convergent plate boundaries: Implications for supercontinent dynamics. Geosphere, 17: 1647–1685

(责任编委: 郑永飞)