



您现在的位置: 首页 > 新闻动态 > 学术前沿

新闻动态

- 图片新闻
- 头条新闻
- 通知公告
- 学术活动
- 综合新闻
- 科研动态
- 研究亮点
- 学术前沿

NG: 解读现代超高温 (UHT) 变质作用的形成机制

2020-12-28 | 【大 中 小】 【打印】 【关闭】

大陆地壳的形成与稳定化过程与机制,一直是地球科学的重大主题。麻粒岩 (granulite) 的形成意味着下地壳 (壳-幔边界/Moho面附近) 发生了部分熔融、熔体抽离以及高温-超高温变质作用 (>700 °C)。由此造成的地壳分异过程使得大陆地壳趋于成熟和稳定。一般认为,高压麻粒岩的形成与碰撞造山作用有关。但是,对低压麻粒岩的形成机制一直存在争议,部分学者认为伸展构造背景可以形成大规模麻粒岩。

超高温 (UHT) 变质作用是指温度大于900 °C、压力在7-13 kbar的麻粒岩相变质作用 (Harley, 1998),一般形成于夕线石稳定域。对UHT麻粒岩形成机制的探讨更关注下地壳如何形成极端高温的环境。学术界通常采用变质岩石学的研究方法 (包括特征矿物组合及变质反应、热力学相平衡模拟、传统矿物温压计、金红石Zr含量温度计、锆石Ti含量温度计、石英Ti含量温度计等) 来重建UHT麻粒岩所经历的 $P-T-t$ 轨迹,由此推演UHT变质作用发生的地球动力学背景。在研究过程中,一方面要克服变质矿物记录不完整的演化信息所带来的困难,另一方面要识别和剔除后期热扩散和构造热事件叠加的影响。因此,得到一个相对准确的 $P-T-t$ 轨迹要经历几年的研究。尽管如此,由于沧海桑田的地球演化过程,根据变质 $P-T-t$ 轨迹所推演的古老造山带的地球动力学过程难以得到现代地球物理资料的检验。因此,对UHT麻粒岩的成因难免会有不同的解读。

Michael Brown认为,UHT变质作用可能形成于高地温梯度的弧后裂谷 (例如: Brown 2007)。中科院地质地球所前寒武纪地质学研究团队针对华北克拉通孔兹岩带UHT麻粒岩地体进行了长期系统的研究,确定了UHT麻粒岩经历了减压升温的进变质过程,并推演出碰撞造山所形成的挤压环境使得华北下地壳曾经处于高温高压的环境,随后的岩石圈伸展和软流圈上涌导致了UHT变质作用 (例如: Peng et al., 2011; Guo et al., 2012; Jiao et al., 2017, 2020a, b; Jiao and Guo, 2020; Jiao et al., 2021 online)。

郑永飞院士团队近年来发表了多篇文章 (例如: Zheng and Chen 2017; He et al. 2018; Zhang et al., 2020; Zheng 2021),强调指出大洋俯冲带之上的弧后张裂 (backarc rift) 和古汇聚板块边缘的大陆张裂 (continental rift) 这两类伸展构造背景都易于形成高的地温梯度 (>30 °C/km),结果引起巴肯 (Buchan) 式变质作用 (在夕线石稳定域);而碰撞造山的挤压环境形成低的地温梯度 (<20 °C/km),导致阿尔卑斯 (Alpine) 式到巴罗 (Barrovian) 式变质作用 (在蓝晶石稳定域)。因此,伸展的构造背景是否真的可以导致下地壳的UHT变质作用,是否可以形成大规模的麻粒岩地体,特别值得关注。

奥格兰德裂谷 (RGR) 位于美国西南部,是目前正在活跃的大陆裂谷,以每年~1 mm的速度扩张 (图1)。综合的地质资料显示,该区在60-40 Ma经历了拉拉米构造挤压过程,从约35-20 Ma和10 Ma到现代该区经历了幕式的伸展构造,并发育火山活动。根据丰富的地球物理资料,前人发现该区极高的热流值 (90-110 mWm⁻²) 和Moho面温度 (> 800°C),推测该区存在岩石圈减薄/移除以及软流圈上涌。因此,RGR是解读挤压构造之后伸展背景下能发育什么样式的变质作用的绝佳场所。

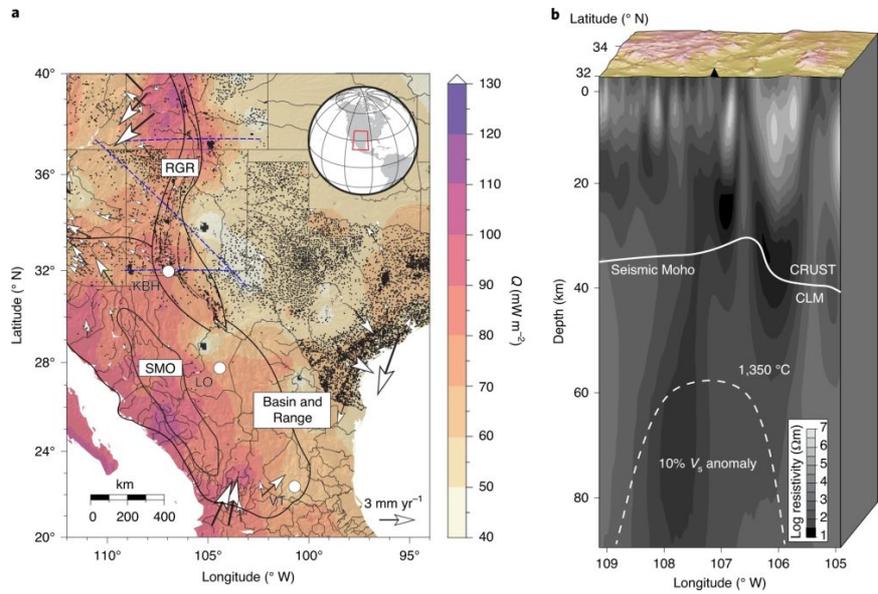


图1 RGR地质和地球物理学数据总结图和横切面 (Cipar et al., 2020)

(a) 美国和墨西哥北部RGR系统的热流值分布。箭头代表了相对于稳定北美地区的GPS速度矢量；蓝色虚线代表（从北向南）远震CREST和LA RISTRA实验以及一条电阻系数剖面；黑点代表传统热流测量和油-气井底温度的测量位置；黑线代表断层（虚线）和地理边界（实线）；白点代表了含相同下地壳捕虏体的第四纪火山中心；Q：表面热流值。(b) KBH附近垂直于裂谷的电阻率模型（a图中最南端的蓝色虚线）显示KBH下部的莫霍面和存在10%剪切波（ V_s ）异常的深度。CLM：大陆岩石圈地幔

近期，美国宾夕法尼亚州立大学的博士生Jacob H. Cipar和Andrew J. Smye助理教授以及加州大学圣巴巴拉分校高级研究员Andrew R. C. Kylander-Clark合作，在*Nature Geoscience*发表论文，对RGR地区Kilbourne Hole (KBH) 火山岩中的下地壳和地幔捕虏体开展同位素年代学和地球化学以及热-动力学模拟研究。变泥质岩捕虏体的变质年龄为~30 Ma至今。这些麻粒岩包体来自于地下29 - 36 km深处，温压条件为870 - 960°C和8 - 10 kbar；地幔橄榄岩包体来自于地下36 - 46 km深处，温压条件为970 - 1040°C和10 - 13 kbar（图2）。这些资料证实，它们都来自于RGR地区的壳-幔边界。这与地热学数据显示该区下地壳底部~10 km范围内正在经历麻粒岩变质作用、底部约~2 km的范围正在经历UHT变质作用的结论一致。沿RGR裂谷轴分布有类似的下地壳麻粒岩捕虏体，由此作者推测RGR和北墨西哥大部分地区下地壳底部正在经历麻粒岩相和UHT变质作用，其规模近似于地球上出露最大的HT - UHT地体（东南极地区）。

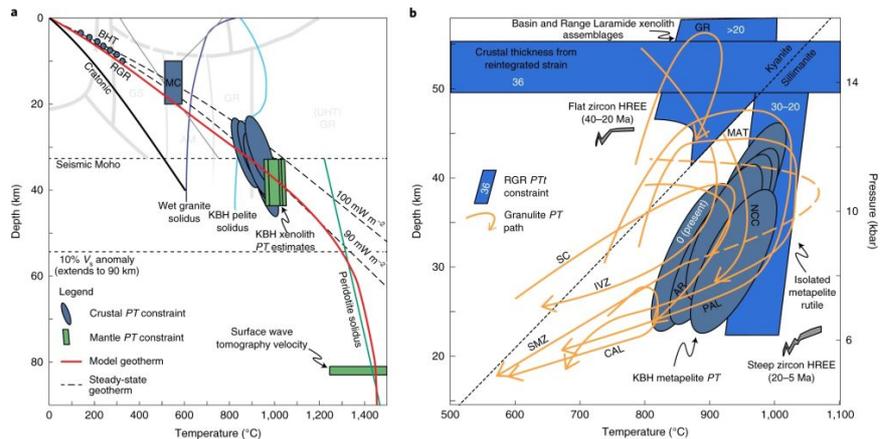


图2 KBH下部现今岩石圈地热以及与古老麻粒岩地体的比较 (Cipar et al., 2020)

(a) 图中温度 - 深度数据来自变泥质岩温压计计算结果（蓝色椭圆）、一定深度下磁铁矿居里温度（MC；蓝色矩形）以及由近地表热流测量值所计算的地温梯度（BHT；蓝色圆圈）；地幔深度和温度的估计（绿色矩形）来源于二辉石温度计和KBH下部地震学所限定的莫霍面以及表面波层析速度的温度反演；图中展示的还有干的橄榄岩固相线，湿的花岗岩固相线，变质相格子图和铝硅酸盐矿物的相图；黑色虚线表示根据KBH附近地表热流值所计算出的稳态地热，红色实线代表在30Ma与深度有关的减薄所计算的模式地热（地壳和地幔减薄系数：1.25和6）；黑色线代表克拉通地热。(b) RGR地区P - T - t轨迹和出露出的麻粒岩地体P - T轨迹（橙色箭头）的对比。浅蓝色多边形代表RGR地区>20Ma的P - T状态（白色数字代表箭头）；暗色椭圆代表现今的P/T状态。锆石REE数据显示KBH麻粒岩经历了石榴石从有到无的过程。

作者进一步开展了两种不同的伸展构造体制下的热力学模拟：第一种为岩石圈地幔的迅速拆沉以及随后软流圈地幔的逐渐上涌；第二种为地壳和岩石圈地幔逐渐伸展，但是地幔伸展的幅度远大于地壳（图3）。两种模拟的时间尺度都为30Myr。结果显示，两种动力学过程都可以造成RGR下地壳底部现今的热结构。因此，挤压构造之后岩石圈地幔拆沉或者岩石圈伸展都可以导致下地壳岩石发生UHT变质作用，形成减压升温的进变质 $P-T$ 轨迹。这与我们推演的华北孔兹岩带古元古代UHT变质作用的形成过程一致。

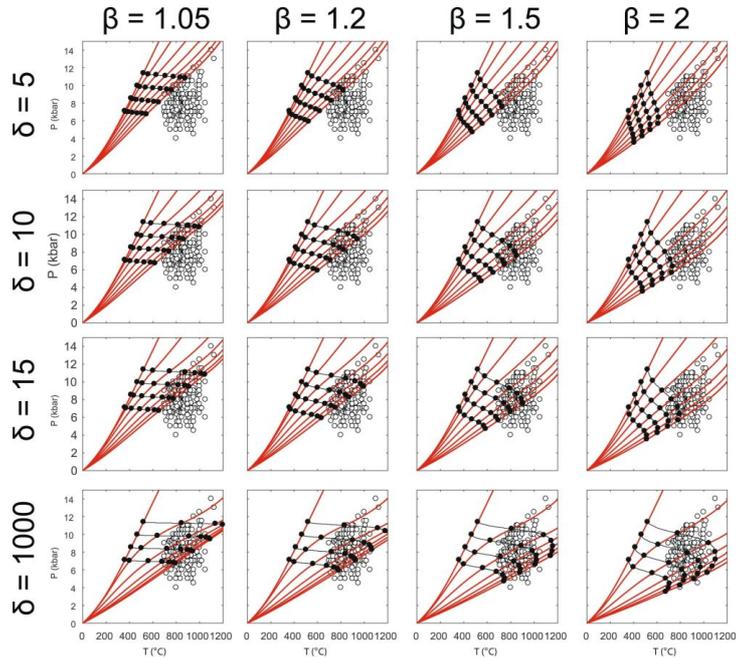


图3 热-动力学计算显示不同的岩石圈伸展过程中（ δ 表示地幔减薄量， β 表示地壳减薄量）地温梯度的变化（红色线）以及相应的最初深度为25、30、35、和40 km处岩石所经历的 $P-T$ 轨迹（黑色点显示）。伸展的持续时间设定为30 Myr，每个地温梯度的间隔为5Myr。图中白色圈为搜集到的全球麻粒岩的温压条件（Cipar et al., 2020）

这篇文章的重要性在于：（1）这是对全球第一个现代正在进行的UHT变质作用实例的报道，其中大陆张裂引起的伸展构造背景明确，因此具有重要的科学意义；（2）该文将多学科的证据融合到一起，共同指示了现代正在进行的大陆张裂伸展构造机制可以形成UHT变质作用，并且成功地模拟出这类UHT变质作用发育的 $P-T$ 轨迹样式。这些突出进展，对研究地质历史上UHT麻粒岩的形成过程有重要的参考价值。如果UHT变质岩是大陆张裂带岩石圈伸展构造作用的产物，那么大陆地壳内部岩石学和化学分异是其成分变化的主要因素，高温（HT）-UHT麻粒岩是壳内分异的深部残留体，而花岗岩则是壳内分异的岩浆侵位产物。

众所周知，在大陆碰撞造山带发现超高压（UHP）榴辉岩相变质岩，证明大陆地壳可以俯冲到岩石圈地幔深度，已经导致二十世纪末板块构造的第一次革命。但是，自UHT变质岩在二十世纪六十年代发现以来，对其形成背景的认识一直处于争论之中。岩石圈俯冲引起挤压加热，形成高压（HP）-UHP榴辉岩相变质岩；与此相反，岩石圈张裂引起伸展加热，产生HT-UHT麻粒岩相变质岩（Zheng, 2021）。Zheng and Zhao (2020)认为，这两种构造应力过程都是板块构造不同的表现形式，只是在显生宙时期前者显著，而在前寒武纪时期（特别是太古宙和古元古代）后者突出。地球早期高热流环境更易于形成UHT麻粒岩，这个高热流背景可能与伸展构造过程相关。

不过，本文的不足之处是没有考虑伸展之前挤压构造作用对地壳热结构的影响及其对升温的贡献。作者也没有提到文中的变质岩捕虏体是否记录了类似模拟的减压升温过程。文中也没有讨论目前正在进行的太平洋板块洋脊俯冲是否可能带来高的热流。

【致谢：该报道和评述得益于与郑永飞院士的交流讨论，郑永飞院士对本文进行了有益的修改、补充和提升；郭敬辉研究员、万博研究员和陈意研究员都对本文提出了宝贵的修改意见。Ross N Mitchell研究员参与了本文的讨论，提出了有益的建议。对他们的诚恳帮助表示衷心的感谢。】

主要参考文献

Brown M. Metamorphic conditions in orogenic belts: a record of secular change[J]. *International Geology Review*, 2007, 49(3): 193-234. (链接)

Cipar J H, Garber J M, Kylander-Clark A R C, et al. Active crustal differentiation beneath the Rio Grande Rift[J]. *Nature Geoscience*, 2020, 13(11): 758-763. (链接)

Guo J H, Peng P, Chen Y, et al. UHT sapphirine granulite metamorphism at 1.93 - 1.92 Ga caused by gabbroite intrusions: implications for tectonic evolution of the northern margin of the North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 2012, 222-223: 124-142. (链接)

Harley S L. On the occurrence and characterization of ultrahigh-temperature crustal metamorphism[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1998, 138(1): 81-107. (链接)

He Q, Zhang S B, Zheng Y F. Evidence for regional metamorphism in a continental rift during the Rodinia breakup[J]. *Precambrian Research*, 2018, 314: 414-427. (链接)

Jiao S, Fitzsimons I C W, Guo J. Paleoproterozoic UHT metamorphism in the Daqingshan Terrane, North China Craton: New constraints from phase equilibria modeling and SIMS U-Pb zircon dating[J]. *Precambrian Research*, 2017, 303: 208-227. (链接)

Jiao S, Guo J. Paleoproterozoic UHT metamorphism with isobaric cooling (IBC) followed by decompression-heating in the Khondalite Belt (North China Craton): New evidence from two sapphirine formation processes[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2020, 38(4): 357-378. (链接)

Jiao S, Fitzsimons I C W, Zi J W, et al. Texturally-controlled U-Th-Pb monazite geochronology reveals Paleoproterozoic UHT metamorphic evolution in the Khondalite Belt, North China Craton[J]. *Journal of Petrology*, 2020. (链接)

Jiao S, Guo J, Evans N J, et al. The timing and duration of high-temperature to ultrahigh-temperature metamorphism constrained by zircon U-Pb-Hf and trace element signatures in the Khondalite Belt, North China Craton[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2020, 175(7): 1-23. (链接)

Jiao S J, Evans N J, Guo J H, et al. Establishing the P-T path of UHT granulites by geochemically distinguishing peritectic from retrograde garnet[J]. *American Mineralogist*. 2021. (链接)

Peng P, Guo J H, Windley B F, et al. Halaqin volcano-sedimentary succession in the central-northern margin of the North China Craton: products of Late Paleoproterozoic ridge subduction[J]. *Precambrian Research*, 2011, 187(1-2): 165-180. (链接)

Zhang Q Q, Gao X Y, Chen R X, et al. Granulites record the tectonic evolution from collisional thickening to extensional thinning of the Tongbai orogen in central China[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2020, 38(3): 265-295. (链接)

Zheng Y F. Metamorphism in subduction zones // *Encyclopedia of Geology* (Second Edition). 2021:612-622.

Zheng Y F, Chen R X. Regional metamorphism at extreme conditions: Implications for orogeny at convergent plate margins[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2017, 145: 46-73. (链接)

Zheng Y F, Zhao G. Two styles of plate tectonics in Earth's history[J]. *Science Bulletin*, 2020, 65(4): 329-334. (链接)

(撰稿: 焦淑娟, 齐扬/岩石圈室)

