超高温变质作用:以华北内蒙古土贵乌拉地区为例

刘守偈， 李江海

北京大学 地球与空间科学学院 造山带与地壳演化教育部重点实验室,北京 100871

Liu Shoujie， Li Jianghai

The Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, Ministry of Education, China; School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, *China*

Liu Shoujie, Li Jianghai. Review of ultrahigh-temperature (UHT) metamorphism study: a case from North China Craton. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14(3): 131-137

Abstract: Ultrahigh-temperature granulites are rocks that underwent extreme metamorphism at temperatures exceeding 900 ℃ and at pressures that can reach 0.7-1.3 Gpa. This extreme metamorphism left imprints on the rocks with UHT mineral assemblages, such as Spr+Qtz, Spl+Qtz, Osm+Grt, Opx+Sil+Qtz, high-F biotite and pargasite, and Crn+Qtz. Up to now, typical UHT granulites in the world have been found in Algeria, South Africa, Eastern Antarctica, Central Brazil, Central Australia, Southern and Southeastern India. Similar to normal granulites, UHT granulites usually produce two types of p-T paths: isothermal decompression (ITD) and isobaric cooling (IBC). In recent years, UHT granulites were found in khondalite belts in Inner Mongolia, North China Craton, which has typical UHT mineral assemblages, including Spl+ Qtz, Spr+Qtz, Opx+Sil+Qtz and Crn+Spl+Grt. These assemblages suggest $T>1\,000$ ℃ and $p>1.0$ Gpa metamorphism. Monazites give the age of metamorphism at (1 927±11) Ma and (1 819±11) Ma. The discovery of UHT rocks of North China Craton provides useful insights in the study of relationship between the North China Craton and the supercontinent Columbia.

Key words: ultrahigh-temperature granulites; UHP mineral assemblages; North China Craton

摘　要:超高温麻粒岩(富 Mg-Al)是指温度高于 900 ℃、压力为 0.7～1.3 GPa 条件下形成的麻粒岩相变质岩,它记录了下地壳超高温极端变质作用的地质信息。富 Mg-Al 典型超高温矿物组合有:假蓝宝石＋石英,尖晶石＋石英,大隅石＋石榴石,斜方辉石＋夕线石＋石英,高氟黑云母和钙镁闪石,刚玉＋石英。目前世界上发现的超高温麻粒岩带(块)地区有非洲阿尔及利亚、南非、东南极、巴西中部、澳大利亚中部、印度南部和东南部等地。我们在华北克拉通北部内蒙古中南部地区孔兹岩区中发现了超高温麻粒岩,岩性主要为灰黑色条带状夕线石榴黑云片麻岩,其中含有尖晶石＋石英、假蓝宝石＋石英、斜方辉石＋夕线石＋石英以及刚玉＋尖晶石＋石榴石等超高温矿物组合,指示温度达 1 000 ℃,压力超过 1.0 GPa 的变质作用。独居石定年获得了(1 927±11) Ma 以及(1 819±11) Ma 两个峰期年龄,代表变质年龄。华北克拉通北部超高温麻粒岩的发现对研究华北克拉通与哥伦比亚超大陆的演化关系有重要意义。

关键词:超高温麻粒岩;变质作用的时空分布;华北克拉通

中图分类号:P588.3　**文献标识码**:A　**文章编号**:1005-2321(2007)03-0131-07

收稿日期:2006-10-30;**修回日期**:2006-12-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40472097)

作者简介:刘守偈(1983—),男,硕士研究生,构造地质学专业。E-mail:jhli@pku.edu.cn

地壳的超高温麻粒岩(富 Mg-Al)指温度高于900～1 150 ℃、压力为 0.7～1.3 GPa 条件下地壳极端变质作用形成的麻粒岩相变质岩[1-2]。超高温变质岩反应了异常高的地温梯度,但是这种异常高地温梯度的成因,以及在地质体抬升过程中是如何保持的,这些问题仍然没有解决。研究这些问题主要从两方面入手:一方面进行指示超高温条件的特征矿物组合研究,以得到变质作用的温压条件(p-T)轨迹,同时从年代学上对变质作用的时代进行限制,从而认识超高温麻粒岩的演化过程(p-T-t);另一方面,基于其演化过程,结合超高温麻粒岩的大地构造背景,解释异常高地温梯度的成因与保存[2]。本文就近年来全球超高温麻粒岩的研究,从其产状、特征矿物组合、分布和时代、p-T 演化方面进行综述,并初步报道华北克拉通北部孔兹岩系-S 型花岗岩中超高温变质岩的发现。

1 超高温麻粒岩基本特征

超高温麻粒岩通常以两种形式产出:一种是以暗色条带状的麻粒岩或片麻岩产于麻粒岩相变质岩(如孔兹岩)或 S 型花岗岩中,这种类型的超高温变质岩通常被认为是地壳熔融残留物质,例如东南极的 Rauer 群[3],华北克拉通北部孔兹岩区中的超高温片麻岩体[4];另一种是成层状产于紫苏花岗岩等特殊侵入岩相关的岩石中,例如南印度 Madurai 麻粒岩带中的 Rajapalaiyam 麻粒岩[5],这种类型可能与特殊的侵入岩体有关。

与富 Mg-Al 麻粒岩相变质岩一样,超高温麻粒岩岩性主要为含石榴石夕线石黑云母片麻岩,颜色比一般的富 Mg-Al 麻粒岩暗,但是超高温麻粒岩中保存有指示超高温变质作用的特殊矿物组合。已发现富 Mg-Al 超高温麻粒岩中的特征矿物组合主要有:假蓝宝石＋石英[5-7]、尖晶石＋石英[4-5,7]、大隅石＋石榴石[8]、斜方辉石＋夕线石＋石英[9-10]、高氟黑云母和钙镁闪石[11]、刚玉＋石英[11-13]。这些矿物组合指示变质温度超过 900℃。由于后期退变质作用,这些矿物组合比较难以保存下来,通常会出现堇青石等退变质矿物或者后成骸晶等退变质反应结构。但是这些矿物组合可以以多相矿物包体的形式存在于石榴石斑晶中,石榴石斑晶可以起屏蔽作用,使这些特殊的矿物组合保存下来[5]。

2 世界超高温麻粒岩分布与时代

目前已发现的超高温麻粒岩地区主要有(表 1,图 1):中太古代:南非林波波带中心地区[12,14];新太古代:东南极恩德比地(Enderby land)[15], 南非 Namaqualand[16];古元古代晚期:阿尔及利亚 Hoggar, Ouzzal[7,13,17];古元古代—中元古代早期:华北克拉通北部孔兹岩区[4], 加拿大拉布拉多(Labrador) Wilson Lake 地区[18]; 中元古代晚期—新元古

表 1 世界典型超高温麻粒岩(富 Mg-Al)区

Table 1 Typical UHT granulites(rich in Mg-Al) area

高温麻粒岩区	特征高温矿物组合	温度和压力	时代	构造过程	资料来源
南非林波波带中心	Crn＋Spr＋Qtz	950℃, 0.8～0.9 GPa	中太古代	造山带伸展垮塌	[12,14]
东南极恩德比地	Spr＋Qtz,Spl＋Qtz	(900±30)℃,(0.7±0.1) GPa	新太古代	造山带	[15]
阿尔及利亚 Ouzzal,Hoggar	Opx＋Sil＋Qtz＋Grt	(970±70)℃,(1.0±0.15) GPa	古元古代晚期	造山带	[7,13,17]
内蒙古华北克拉通北部孔兹岩区	Spl＋Qtz	900～975℃,1.2～0.9 GPa	古—中元古代早期	造山带	[4]
加拿大拉布拉多 Wilson Lake	Spr＋Qtz	900℃, 1.0 GPa	中元古代早期	造山带	[18]
印度东高止	Spl＋Qtz＋Osm, Spr＋Qtz＋Osm,Opx＋Sil＋Qtz＋Osm	(900±60)℃,(0.65±0.07) GPa	中元古代晚期—新元古代早期	碰撞造山-伸展垮塌	[19]
南印度 Madurai Granulite Block	Spr＋Qtz	≥1 050℃, ≥1.0 GPa	新元古代晚期	碰撞造山-伸展垮塌	[5]
巴西巴鲁埃里杂岩	Spl＋Qtz＋Ilm	980℃, 0.79 GPa	新元古代晚期	碰撞造山-伸展垮塌	[20]
东南极 Lützow-Holm 海湾	Opx＋Sil±Qtz	1 000℃,1.1 GPa	新元古代晚期	造山带	[21]

矿物缩写:Crn,刚玉;Spr,假蓝宝石;Qtz,石英;Spl,尖晶石;Osm,大隅石;Grt,石榴石;Opx,斜方辉石;Sil,夕线石;Ged,铝直闪石;Ilm,钛铁矿。

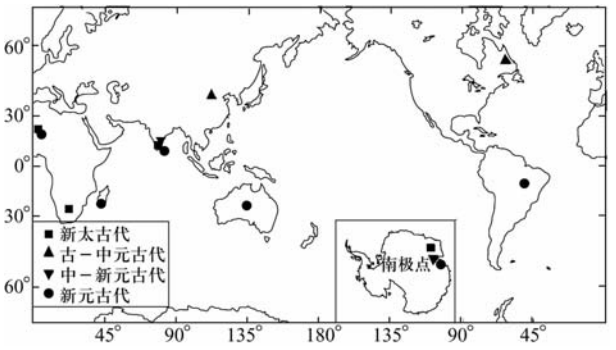


图 1 已发现超高温麻粒岩全球分布

Fig. 1 Distribution of typical UHT granulites found in the world

代早期:印度东高止(Eastern Ghats)带[19];新元古代晚期:南印度 Madurai 麻粒岩块[5],巴西巴鲁埃里(Barro Alto)杂岩[20],东南极 Lützow-Holm 海湾[21],南马达加斯加,澳大利亚 Arunta 麻粒岩带,等等。这些地区的麻粒岩中都含有典型的高温矿物组合,峰期变质温度均超过 900 ℃,属于超高温变质作用。这些地区的超高温变质作用时代主要与地质历史时期几个超大陆的演化过程有成因关系:新太古代超高温变质岩体可能与 2.50 Ga 左右时期的 Kenorland 超大陆相关[22];峰期变质年代为古—中元古代早期的华北克拉通超高温变质岩体与 2.10～1.80 Ga 的 Columbia 超大陆时代一致[4];中元古代晚期到新元古代早期的超高温变质作用则是与 Rodinia 超大陆相关;新元古代晚期的超高温麻粒岩形成时代与 Gondwana 大陆时代一致。

从形成时代以及产出的构造过程来看,超高温麻粒岩的形成与超大陆的演化可能相关。超大陆形成过程中,从大陆板片的聚合到碰撞造山带的形成以及后期的伸展垮塌,这些地质事件都会在不同的地质单元中留下其特征的矿物组合以及 p-T 条件信息。碰撞造山作用可以导致岩石圈的拆沉作用,并造成软流圈热异常[1],抑或在岛弧环境由于岩石圈地幔物质部分熔融造成热异常,抑或造山带伸展垮塌时期,由于地壳均衡作用导致软流圈上涌形成热异常;或者在超大陆裂解时期,由于裂谷作用而导致热异常,这些事件都可以形成超高温变质作用。因此超高温麻粒岩的演化同时也可能反应了超大陆的形成与演化。

3 超高温麻粒岩 p-T-t 轨迹

超高温变质作用反应了地壳异常的地温梯度,那么超高温麻粒岩中的矿物组合则记录了异常的地温梯度条件下地壳物质所经历的 p-T 演化过程的信息。

与一般麻粒岩相岩石一样,超高温麻粒岩记录的 p-T-t 轨迹大致可以分为两类:(1)等温减压(ITD:isothermal decompression),通常为顺时针演化;(2)等压冷却(IBC:isobaric cooling),通常为逆时针演化(图 2)。等温减压过程反应了下地壳的抬升剥露是与下部热源的抬升是同时的,或者快速抬升过程,这样才能保持在抬升过程中保持温度不变,矿物组合的降压反应结构指示了该过程;等压冷却过程反应了下地壳的深度在基本保持不变的情况下,正热异常的降低,表明热源的逐渐冷却,矿物组合的冷却反应结果指示了该过程。p-T 轨迹属于 ITD 演化的主要有:阿尔及利亚 Hoggar,Ouzzal[7,14,18],东南极 Lützow-Holm 海湾[21],东南极 Rauer 群[3](图 2)等;属于 IBC 演化的主要有:加拿大 Labrador、Wilson Lake 地区[19],东南极 Enderby land[9,16],印度 Eastern Ghats 带[19],巴西 Barro Alto 杂岩[20]等。

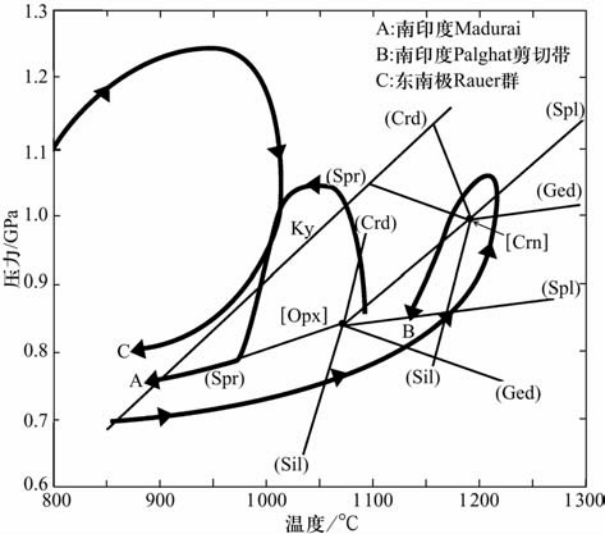


图 2 UHT 麻粒岩 p-T 轨迹

Fig. 2 Typical p-T path of UHT granulites

A—南印度 Madurai 杂岩[5];B—南印度 Palghat 剪切带中的超高温麻粒岩体[23];C—东南极 Rauer 群[3]。FMAS 岩石成因格子据 Toshiaki[5]

但是由于很多地区遭受了不同时期不同性质的变质作用,因此同一地区的 p-T 轨迹也变得非常复杂。例如南印度 Madurai 杂岩的超高温麻粒岩体所记录的 p-T 轨迹更为复杂,被解释为多阶段变质作用(图 2),指示了从碰撞造山过程到后期造山带垮

塌不同阶段的变质作用。

4 华北克拉通北部超高温变质岩的发现

华北克拉通孔兹岩系-S 型花岗岩区大面积出现于华北克拉通北部的集宁—凉城—丰镇、大青山—乌拉山、贺兰山等地。构造上,孔兹岩系向南可以追索到吕梁山一带,向东南地区逐渐消失,被大面积的麻粒岩相 TTG 杂岩取代。孔兹岩系主要岩性有:夕线石榴斜长片麻岩,石榴黑云片麻岩、含石墨片麻岩以及含石榴石的长英质岩石。S 型花岗岩主要为含石榴石花岗岩,与夕线石榴片麻岩的接触呈过渡关系,为孔兹岩部分重熔产物。

华北克拉通超高温麻粒岩发现于华北克拉通北部内蒙古自治区中南部,与山西省交界处的集宁—卓资—土贵乌拉地区的孔兹岩系-S 花岗岩中。研究区主要出露灰色含石榴石夕线石黑云母片麻岩、含石榴石长英质片麻岩以及灰白色含石榴石片麻状花岗岩等。超高温变质岩呈暗色条带状的片麻岩产于孔兹岩系和 S 型花岗岩中,为灰黑色夕线石石榴石黑云母片麻岩,是孔兹岩部分重熔残留[24](图 3)。夕线石石榴石黑云母片麻岩遭受了强烈的构造变形,形成复杂褶皱,S 型花岗岩也遭受了强烈的塑性左行剪切变形。孔兹岩系独居石定年获得了(1 927±11) Ma 以及(1 819±11) Ma 两个峰期年龄,代表变质年龄[4]。此外,工作区还发现有少量古元古代基性侵入岩体侵入到孔兹岩系-S 型花岗岩中。

通过详细的显微镜观测发现,超高温片麻岩中有以下指示超高温变质作用的矿物组合:斜方辉石+夕线石+石英、尖晶石+石英、假蓝宝石+石英以及刚玉+尖晶石+石榴石的矿物组合(图 4)。结合矿物反应结构以及电子探针数据,初步认为超高温变质作用经历了石榴石+夕线石→尖晶石+石英和尖晶石+石英→假蓝宝石、假蓝宝石+石英+石榴石→斜方辉石+夕线石两种不同程度的峰期变质作

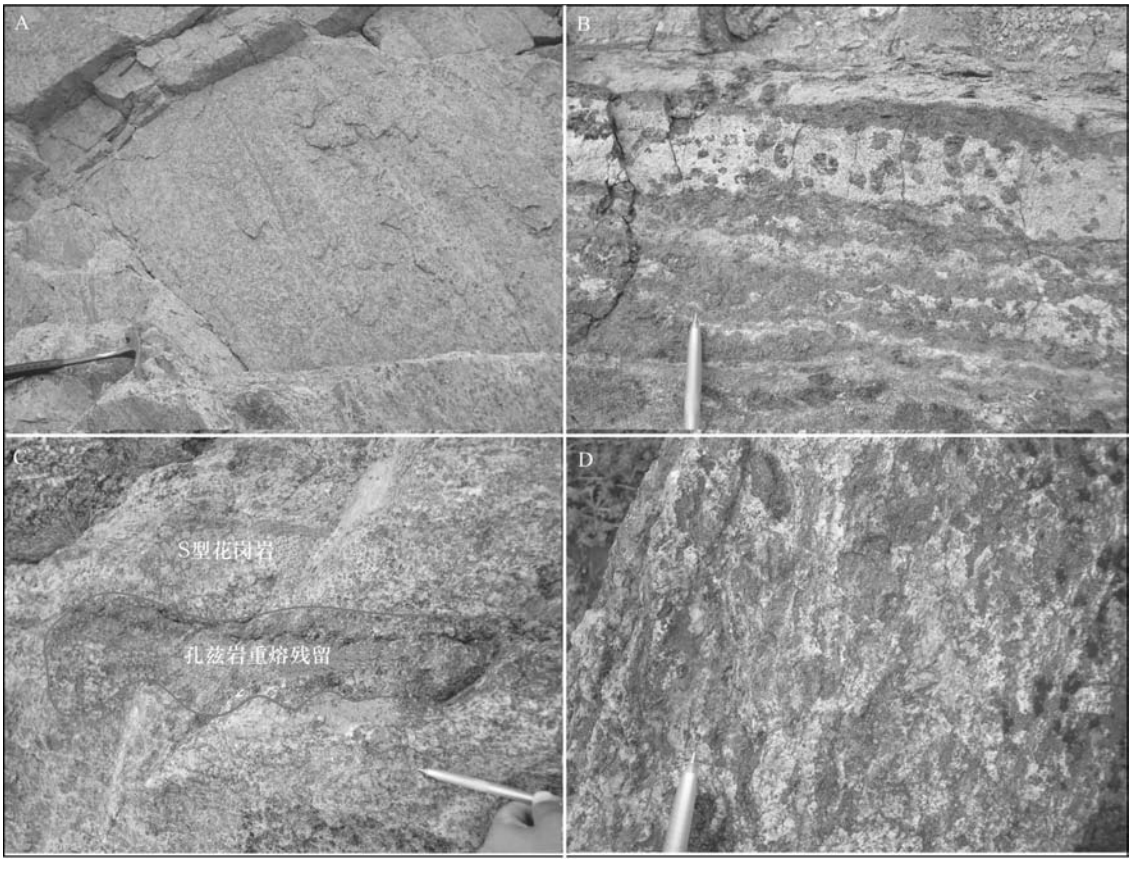


图 3 土贵乌拉孔兹岩系-S 型花岗岩及孔兹岩重熔残留

Fig. 3 S-type granite and relic of khondalites in Tuguiwula khondalite series

A—灰色含石榴石夕线石黑云母片麻岩; B—S 型花岗岩与条带状孔兹岩重熔残留体; C—S 型花岗岩中孔兹岩重熔残留体; D—暗色孔兹岩残留体

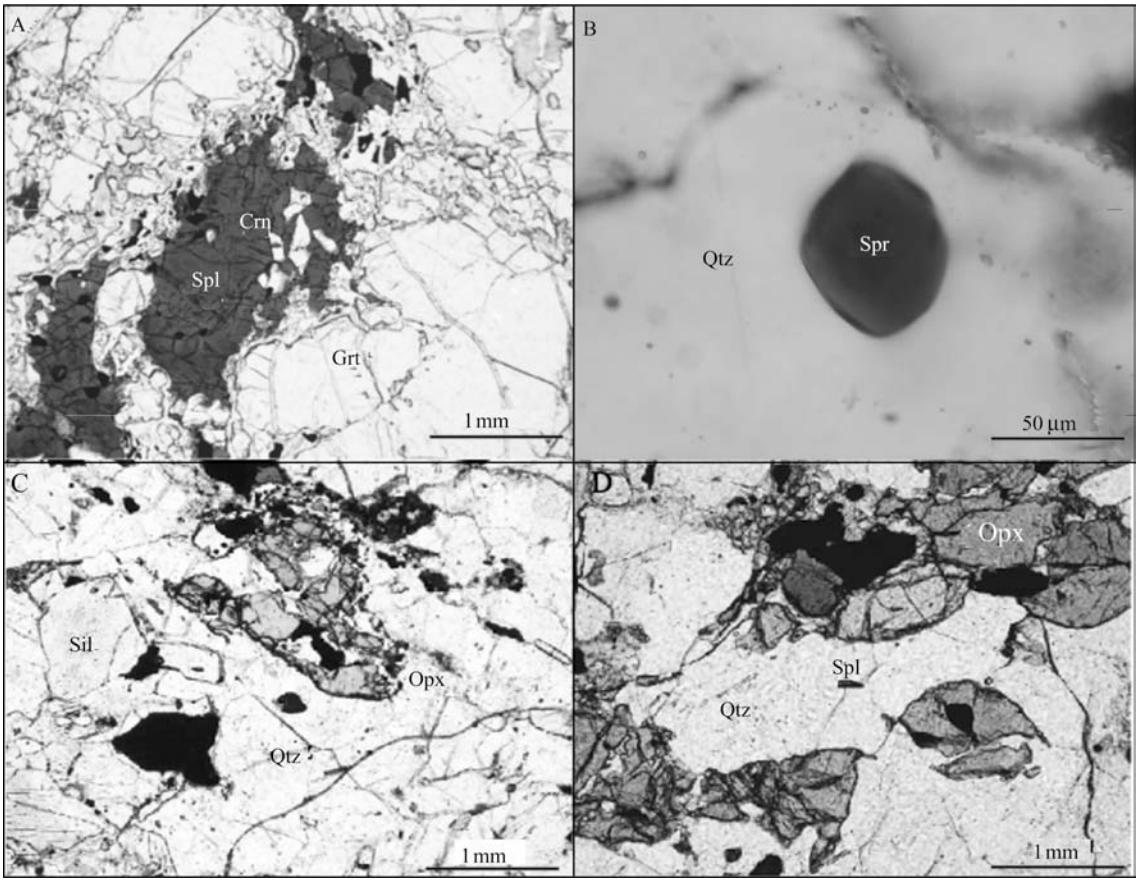


图 4 华北克拉通富 Mg-Al 片麻岩中超高温矿物组合

Fig. 4 UHT mineral assemblages in Mg-Al rich gneisses of North China Craton

A—Spl+Crn+Grt; B—Spr+Qtz 直接接触; C—Sil+Qtz+Opx; D—Spl+Qtz 直接接触

用。岩石中保留了尖晶石与石英直接接触以及假蓝宝石与石英直接接触的反应结构,说明变质温度压力条件分别停留在了尖晶石+石英和假蓝宝石+石英的稳定区,所代表的温度压力条件分别为 950 ℃、1.0 GPa 和>1 050 ℃、1.0 GPa。有关刚玉+尖晶石+石英进变质作用所代表的温度压力条件的实验和计算正在进行。堇青石以及黑云母等矿物指示了尖晶石+石英→堇青石,斜方辉石+夕线石+石英→堇青石,斜方辉石+钾长石+ H_2O →黑云母+石英的退变质反应。通过各阶段的变质反应式,分别获得了尖晶石+石英组合和假蓝宝石+石英组合的 p-T 演化:尖晶石+石英组合的超高温片麻岩经历了由 ITD 转变为 IBC 的顺时针演化过程,而假蓝宝石+石英组合的超高温片麻岩则经历了由 IBC 转变为 ITD 的逆时针演化过程。

研究结果表明,华北克拉通北缘东西向造山带经历了 1.90～1.80 Ga 南北向陆陆碰撞作用后,形成东西向的造山带,随后发生造山带伸展垮塌的事件。研究区麻粒岩相表壳岩系中的古元古代基性侵入岩体表明了伸展事件。因此,华北克拉通超高温麻粒岩所表明的异常高的地温梯度可能与软流圈的上涌有关;基性岩体的侵位可能是造成超高温地壳变质作用的原因。

5 超高温麻粒岩研究问题讨论

富 Mg-Al 超高温麻粒岩指示了地壳地温梯度的极端异常,这种极端的热异常会形成特殊的代表超高温环境的矿物组合,包括假蓝宝石+石英、尖晶石+石英、大隅石+石榴石、斜方辉石+夕线石+石英、高氟黑云母和钙镁闪石、刚玉+石英。根据这些特殊的矿物组合和变质反应结构,可以推断其 p-T 轨迹。超高温麻粒岩的 p-T 轨迹主要分为 ITD 和 IBC 两类退变质过程,分别代表了快速抬升和逐渐冷却两种不同的过程。

超高温麻粒岩形成之后抬升至地表的过程中,会经历不同程度的退变质作用,超高温麻粒岩在峰期变质作用形成的特殊矿物组合通常都会在这种过

程中被改造,形成类似堇青石这样的退变质矿物或形成骸晶的退变质反应结构。但是由于一些大颗粒的斑晶(例如石榴石)和一些特殊矿物(例如锆石)对后期变质作用具有屏蔽作用,因此超高温矿物组合可以以多相包体的形式存在于这些矿物中。因此,寻找具有屏蔽作用的矿物中的多相包体成为解决这个问题的有效方法。

超高温麻粒岩的形成需要极高的温度,因此解释其热源问题成为讨论的热点。问题主要集中在造成下地壳热异常的大地构造原因。造成下地壳热异常的可能原因有以下三种解释:(1)岛弧环境下,由于地幔物质部分熔融而导致的热异常;(2)板块碰撞过程中,由于俯冲板片的拆沉作用而使软流圈上涌造成热异常;或者伸展作用导致造山带垮塌,由于地壳均衡作用使软流圈上涌而造成热异常;(3)由于裂谷作用而导致热异常。进一步确定热异常形成的大地构造环境,还需要更多的痕量元素地球化学、REE以及其大地构造背景方面的证据。

华北克拉通 1.90～1.80 Ga 构造格局一直存在分歧[25-26]。问题焦点集中在华北中央造山带是发生在 2.50 Ga 还是 1.80 Ga 以及华北克拉通北部孔兹岩区是不是造山带作用形成的。华北克拉通超高温麻粒岩的 p-T 演化以及独居石的精确定年表明,华北克通北缘 1.90～1.80 Ga 发生陆陆碰撞造山作用,形成东西向的造山带,随后又经历了造山带伸展垮塌事件。因此华北克拉通超高温麻粒岩的发现更有利于中央 2.50 Ga 造山作用和北缘 1.90～1.80 Ga 造山作用的观点。同时,超高温变质作用时代与哥伦比亚超大陆聚合时代一致。因此华北克拉通超高温麻粒岩的发现成为研究华北克拉通与哥伦比亚超大陆演化关系的重要线索。

综上,对超高温麻粒岩中的矿物组合进行研究,推算其指示的温度压力条件,并结合精确的年代学研究,可以得到超高温麻粒岩演化的过程,结合其大地构造背景,可以解释导致超高温变质作用的热异常成因问题,扩展开来可以研究与超大陆演化相关的科学问题。

感谢日本高知大学 Santosh 教授实验测试以及对本文的指导。参加野外工作的还有张博。

References:

[1] Harley S L. On the occurrence and characterization of ultra-high-temperature crustal metamorphism[J]. Spec Publ Geol Soc Lond, 1998, 138: 81-107.

[2] David E, Kelsey. Ultrahigh-temperature crustal metamorphism[C]//Goldschmidt conference abstract. 2006: A313.

[3] Tong Laixi, Christopher J L, Wilson. Tectonothermal evolution of the ultrahigh temperature metapelites in the Rauer Group, east Antarctica[J]. Precambrian Research, 2006, 149:1-20.

[4] Santosh M, Sajeev K, Li J H. Extreme crustal metamorphism during Columbia supercontinent assembly: evidence from North China Craton[J]. Gondwana Research, 2007(in press).

[5] Toshiaki Tsunogae, Santosh M. Spinel sapphirine quartz bearing composite inclusion within garnet from an ultrahigh-temperature pelitic granulite: implications for metamorphic history and p-T path[J]. Lithos, 2007(in press).

[6] Yasuhito Osanai, Krishnan Sajeev, Masaaki Owada, et al. Metamorphic evolution of high-pressure and ultrahigh-temperature granulites from the Highland Complex, Sri Lanka [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2006, 28:20-3.

[7] Ouzegane K, Boumaza S. An example of ultrahigh-temperature metamorphism: orthopyroxene-sillimanite-garnet, sapphirine-garnet, sapphirine-quartz and spinel-quartz paragenesis in Al-Mg granulites from In Hibaou, In Ouzzal, Hoggar [J]. Journal of Metamorphic Geology, 1996, 14: 693-708.

[8] Audibert N, Hensen B J, Bertrand P. Experimental study of phase relations involving osumilite in the system K_2O-FeO-MgO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O at high pressure and temperature[J]. J Metamorphic Geol, 1995, 13:331-344.

[9] Kelsey D E, White R W, Powell R. Orthopyroxene-sillimanite-quartz assemblages: distribution, petrology, quantitative p-T-X constraints and p-T paths[J]. J Metamorphic Geol, 2003, 21:439-453.

[10] Harley S L. Ultrahigh temperature granulite metamorphism (1 050 ℃, 12 kbar) and decompression in garnet(Mg70)-orthopyroxene-sillimanite gneisses from the Rauer Group, East Antarctica[J]. J Metamorphic Geol, 1998, 16:541-562.

[11] ToshiakiTsunogae, Yasuhito Osanai, Masaaki Owada, et al. High fluorine pargasites in ultrahigh temperature granulites from Tonagh Island in the Archean Napier Complex, East Antarctica[J]. Lithos, 2003, 70(1/2):21-38.

[12] Toshiaki Tsunogae, Dirk D, van Reenen. Corundum+quartz and Mg-staurolite bearing granulite from the Limpopo Belt, southern Africa: implications for a p-T path[J]. Lithos, 2007(in press).

[13] Guiraud M, Kienast J R, Ouzegane K. Corundum-quartz-bearing assemblage in the Ihouhaouene area (In Ouzzal, Algeria)[J]. J Metamorphic Geol, 1996, 14:755-761.

[14] Droop G T R. Reaction history of garnet-sapphirine granulites and conditions of Archean high-pressure granulite-facies metamorphism in the Central Limpopo Mobile Belt, Zimb-

abwe. J Metamorphic Geol, 1989, 7:383-403.

[15] Sandiford M. The metamorphic evolution of granulites at Fyfe Hills, implications for Archaean crustal thickness in Enderby Land, Antarctica[J]. J Metamorphic Geol, 1985, 3:155-178.

[16] Waters D J. Metamorphic evidence for the heating and cooling path of Namaqualand granulites[M]//Daly J S, Cliff R A, Yardley B W D. Evolution of metamorphic belts. Geological Society of London (Special Publication), 1989, 43:357-363.

[17] Bertrand P, Ouzegane Kh, Kienast J R. *p-T-X* relationships in the Precambrian Al-Mg-rich-granulites from In Ouzzal, Hoggar, Algeria[J]. Journal of Metamorphic Geology, 1992, 10:17-31.

[18] Cuurie K L, Gittins J. Contrasting sapphirine paragenesis from Wilson Lake, Labrador and their tectonic implications [J]. J Metamorphic Geol, 1988, 6:603-622.

[19] Bose S, Fukuoka M, Sengupta P, et al. Evolution of high-Mg-Al granulites from Sunkarametta, Eastern Ghats, India: evidence for a lower crustal heating-cooling trajectory[J]. J Metamorphic Geol, 2000, 18:223-240.

[20] Moraes R, Fuck R A. Ultrahigh temperature metamorphism in Central Brazil: the Barro Alto Complex[J]. Journal of Metamorphic Geology, 2000, 18: 345-358.

[21] Kawakami T, Motoyoshi Y. Timing of attainment of the spinel+quartz coexistence in garnet-sillimanite leucogneiss from Skallevikshalsen, Lützow-Holm Complex, East Antarctica [J]. Journal of Mineralogical and Petrological Sciences, 2004, 99: 311-319.

[22] Lawrence B, Aspler Jeffrey R, Chiarenzelli. Two Neoarchean supercontinents? Evidence from the Paleoproterozoic [J]. Sedimentary Geology, 1998, 120:75-104.

[23] Santosh M, Sajeev K. Anticlockwise evolution of ultrahigh-temperature granulites within continental collision zone in southern India[J]. Lithos, 2007(in press).

[24] Qian X L, Wang R M. Geological evolution of northern part of North China Craton granulites[M]. Beijing: Seismological Press, 1994: 26(in Chinese).

[25] Kusky T M, Li J. Paleoproterozoic tectonic evolution of the North China Craton[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2003, 22:383-397.

[26] Zhao G C, Cawood P A, Wilde S A, et al. High-pressure granulites (retrograded eclogites) from the Hengshan Complex, North China Craton: petrology and tectonic implications[J]. Journal of Petrology, 2001, 42:1141-1170.

参考文献:

[24] 钱祥麟, 王仁民. 华北北部麻粒岩带地质演化[M]. 北京: 地震出版社, 1994:26.

三个主题　一年一轮回

主题期刊《地学前缘》从 2007 年起采取每年三个主题、一年一轮回的方式出刊:

每年年初的两期基本固定为"地球物质科学"主题;需提前半年投稿。

每年年中的两期基本固定为"地球结构、构造与动力学"主题;需提前半年投稿。

每年年末的两期基本固定为"地球表层科学"主题;需提前半年投稿。

各期仍将保留"非主题来稿选登"。

各主题详细内容说明如下:

(1)"地球物质科学"主题:主要研究地球物质的组成(元素、矿物、岩石、矿床、流体等)及特征。本刊重点征集岩石学、矿床学、矿物学、结晶学、地球化学等方面的国内外前缘研究成果和发展态势的学术论文。

(2)"地球结构、构造与动力学"主题:主要研究地球的结构、变形、变位及动力学。本刊重点征集构造地质学、大地构造学、板块构造学、大陆动力学、宇宙地质学、地球物理学、地球化学、高温高压岩石实验等方面的国内外前缘研究成果和发展态势的学术论文及相关的应用课题论文。

(3)"地球表层科学"主题:主要探讨地壳、水圈、生物圈、大气圈之间的相互关系,突出以人类的生存和人与地球协调发展为主线,因而包含了大部分地球应用科学及其相关学科。本刊重点征集环境地质学与全球变化、灾害地质学、水文与工程地质学、地貌与第四纪地质学、找矿勘探学、能源地质学、应用地球化学、应用地球物理学、地层古生物学等方面的国内外前缘研究成果和发展态势的学术论文。