科学通报 2009 年 第 54 卷 第 5 期: 618 ~ 623
论 文
《中国科学》杂志社
SCIENCE IN CHINA PRESS

柴达木北缘榴辉岩中的柯石英及其意义

张建新[①], 孟繁聪[①], 李金平[①], Mattinson C. G.[②]

① 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037;
② Department of Geological Sciences, Central Washington University, 400 E. University Way, Ellensburg, WA 98926, USA
E-mail: zjx66@yeah.net

2008-09-03 收稿, 2008-12-22 接受
国家自然科学基金项目(批准号: 40772138, 40472102, 40272095)、国土资源部百名优秀青年人才计划及中国地质调查局地质调查项目(编号: 1212010611811)资助

Zhang J X, Meng F C, Li J P, et al. Coesite in eclogite from the North Qaidam Mountains and its implications. Chinese Science Bulletin, 2009, 54, doi: 10.1007/s11434-009-0074-x

摘要 柯石英是超高压变质作用的直接标志. 柴北缘副片麻岩的锆石中已报道有柯石英包体的存在, 但在榴辉岩中还没有发现柯石英保存. 通过详细的岩相学观察和拉曼光谱的测定, 在柴北缘阿尔茨托山(都兰超高压变质单元南带)的榴辉岩中发现柯石英, 这些柯石英在石榴子石中呈包体分布, 部分被具有栅状结构的石英替代. 这是柴北缘地区首次在榴辉岩中发现柯石英, 也与榴辉岩 670 ~ 730℃和 2.7~3.25 GPa 的温压估算相符合. 除柴北缘都兰超高压单元之外, 柴北缘其他单元的榴辉岩及相关岩石中还没有发现柯石英及其假象, 是否柴北缘普遍经历过超高压变质作用还需进一步研究.

关键词
柴北缘
榴辉岩
柯石英

超高压(UHP)变质作用是指变质条件稳定在柯石英-石英转变线之上的变质作用, 因此, 虽然近年来新发展出许多用于判定岩石是否经历了超高压变质作用的标志, 但柯石英仍然是 UHP 变质作用的最主要和最直接的标志之一.

柴北缘HP/UHP变质带是近 10 年来在中国西部所新厘定[1~13], 它向西越过阿尔金断裂延至南阿尔金, 被认为是继大别-苏鲁之后, 在中国出露的又一个被巨型走滑断裂所切割的HP/UHP变质带[14~21]. 然而, 与大别-苏鲁地区不同, 在柴北缘和南阿尔金地区, 目前所发现的UHP变质作用证据还相对较少, 到目前为止, 仅仅在柴北缘东段都兰地区角闪岩相副片麻岩的锆石中发现有少量柯石英包体, 而在榴辉岩中, 除在南阿尔金江尕勒萨依和柴北缘的都兰地区报道有多晶石英的包体存在外[11,22,23], 还没有发现确切的柯石英存在. 虽然多晶石英包体普遍被认为是柯石英的假象, 但由于南阿尔金和在柴北缘发现的多晶石英集合体中还有少量的钾长石, 一些学者认为其不能简单解释成柯石英假象[24,25].

最近, 我们通过对柴北缘都兰地区阿尔茨托山北坡新发现榴辉岩的详细薄片观察, 在榴辉岩中的石榴子石中发现了典型的柯石英包体残留, 这是在柴北缘 HP/UHP 带中, 第一次在榴辉岩中发现柯石英.

1 地质背景

柴北缘HP-UHP变质带的分布西起绿梁山西端的鱼卡-落凤坡地区, 东至都兰北部的野马滩-沙柳河地区, 从西向东可分为鱼卡-落凤坡榴辉岩-片麻岩单元、绿梁山石榴橄榄岩-高压麻粒岩单元、锡铁山榴辉岩-片麻岩单元、都兰榴辉岩-片麻岩单元[21]. 都兰榴辉岩-片麻岩单元主要由花岗质片麻岩、副片麻岩(片岩)、呈透镜状产在片麻岩中的榴辉岩和少量蛇纹石化超基性岩所组成. 根据岩石组合和形成的*P-T*条件等进一步分为北亚带和南亚带[3,11], 两者之间被野马滩花岗岩体所分隔. 北亚带的榴辉岩研究较多, 其

主要由石榴子石+绿辉石+金红石±多硅白云母所组成，石榴子石中具有多晶石英+钾长石(透长石)组成的包体(柯石英假像)，绿辉石中有石英棒的出溶结构[23]，这些结构特征被认为是超高压变质作用的标志，估算的榴辉岩峰期变质条件为P > 2.8 GPa, T = 600 ~ 750℃[11]；在北亚带的副片麻岩锆石中发现有少量柯石英包体[4,11,13]. 南亚带的榴辉岩研究较少，目前所发现的榴辉岩以含蓝晶石为特征，部分榴辉岩含有多硅白云母[11,15]，所估算的榴辉岩形成的温压条件也在柯石英稳定线之上，并有少量柯石英假象的报道[15]，但在本文之前，还没有发现柯石英.

2 含柯石英榴辉岩的基本特征

具有柯石英的榴辉岩取自于柴北缘东段的阿尔茨托山(图 1)，属于柴北缘都兰HP/UHP变质单元的南亚带[3,11]. 榴辉岩呈透镜状产在含白云母的长英质片麻岩中，通过对近20个榴辉岩样品的详细岩相学观察，在其中两个新鲜榴辉岩样品(Q07-8-2.2 和Q07-8-2.3)中发现有柯石英残留，这两个样品榴辉岩主要由石榴子石、绿辉石、多硅白云母和金红石组成，具有微量的磷灰石和锆石，其含量达 3%~5%的多硅白云母明显不同于都兰HP/UHP单元的其他榴辉岩. 含柯石英榴辉岩具有明显的叶理，由定性分布的石榴子石、绿辉石、多硅白云母所构成，其中石榴子石具不规则椭圆状，电子探针分析表明其没有明显的成分环带，样品Q07-8-2.3 的石榴子石成分为: $Prp_{16\text{-}18}Alm_{53\text{-}55}Gro_{28\text{-}30}Sps_{1\text{-}1.2}$ (除标注外，本文的矿物英文缩写据文献[26])，样品Q07-8-2.2 的石榴子石成分为: $Prp_{20\text{-}23}Alm_{47\text{-}50}Gro_{27\text{-}30}Sps_{1\text{-}1.3}$；绿辉石的硬玉分子含量为37mol%~50 mol%，其中样品Q07-8-2.3 中绿辉石的硬玉分子含量明显大于样品Q07-8-2.2；多硅白云母的硅原子数为 6.88~7.03(基于 22 个氧原子)(表 1).

3 柯石英的显微结构特征及拉曼光谱分析

图 2 展示了榴辉岩中石榴子石保存的柯石英残留和绿辉石中保存的柯石英假象. 从图 2 中可以看出，高突起的柯石英呈残晶保存在石榴子石包体的中心，而边部已变成低突起的石英，且边部具有典型的栅状结构特征. 我们对不同保存程度的柯石英的进行了详细的拉曼光谱分析，拉曼光谱分析在国土资源部大陆动力学实验室进行，所用仪器型号为RENISHAW RM1000，激光器为 514 nm. 分析结果展示在图 3 中，可以看出颗粒较大、保存较好的柯石英的拉曼光谱的柯石英峰(522 和 271)非常强，而石英的峰相对较弱；而颗粒细小的柯石柯石英残晶的拉

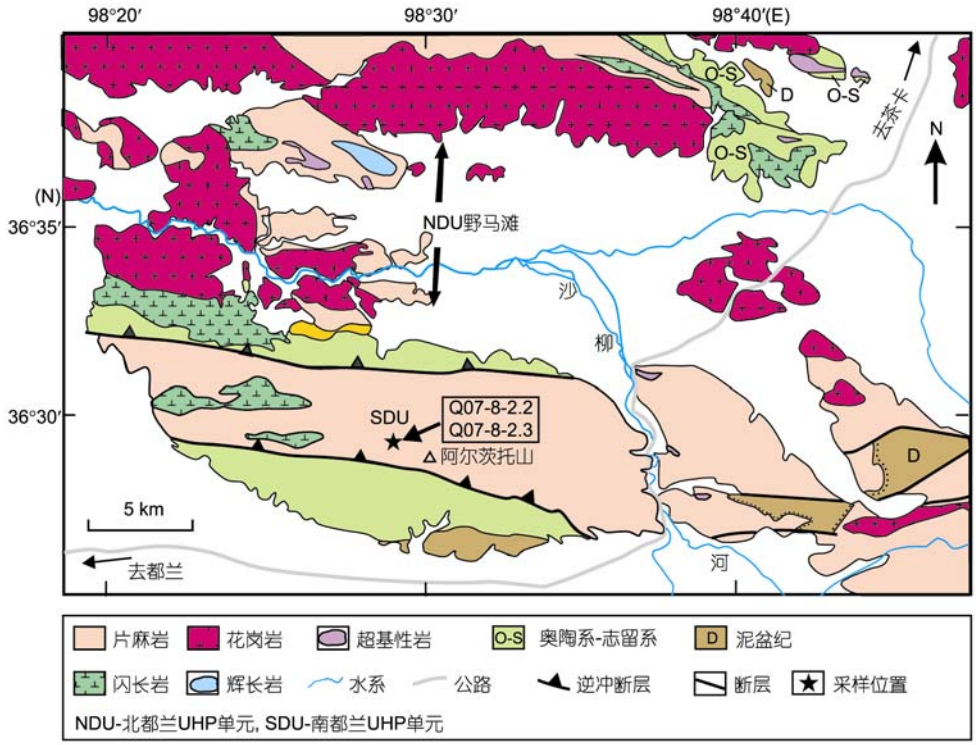


图 1 都兰 UHP 变质单元地质简图及取样位置

表 1 含柯石英榴辉岩的代表性矿物成分 a)

样品	Q07-8-2.3									Q07-8-2.2								
矿物	Grt	Omp	Phe	Grt	Omp	Phe	Grt	Omp	Phe	Grt	Omp	Phe	Grt	Omp	Phe	Grt	Omp	Phe
SiO_2	37.64	55.46	53.89	37.97	54.79	52.66	37.49	55.28	51.92	38.45	55.46	52.65	38.79	54.78	52.46	38.04	55.1	51.86
TiO_2	0.25	0.16	0.73	0.12	0.19	0.72	0.05	0.20	0.68	0.03	0.05	0.71	0.03	0.08	0.77	0.08	0.09	0.79
Al_2O_3	21.62	10.87	25.24	21.50	10.50	25.05	21.44	11.05	26.23	21.57	9.23	24.91	21.64	9.75	25.48	21.47	9.41	25.45
Cr_2O_3	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0 .00	0.04	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.02
FeO	25.54	5.91	2.67	25.09	6.24	2.82	25.54	6.15	2.94	22.38	4.05	1.43	22.79	4.43	1.62	22.87	4.31	1.49
MnO	0.43	0.06	3.99	0.50	0.00	0.00	0.47	0.00	0.01	0.47	0.04	0.00	0.40	0.05	0.00	0.48	0.00	0.00
MgO	4.43	7.25	0.00	4.00	7.15	3.90	4.13	7.32	3.66	5.68	9.26	4.21	5.95	9.57	4.14	5.78	9.34	4.42
CaO	9.80	12.82	0.02	10.75	12.59	0.01	10.03	12.92	0.00	10.46	15.41	0.02	9.58	16.05	0.00	10.31	15.70	0.03
Na_2O	0.00	7.22	0.00	0.00	7.32	0.29	0.00	7.30	0.31	0.00	5.76	0.30	0.00	5.41	0.33	0.00	5.89	0.35
K_2O	0.00	0.00	10.28	0.00	0.00	10.6	0.00	0 .00	10.31	0.00	0.00	10.44	0.00	0.00	10.62	0.00	0.00	10.75
总量	99.71	99.75	97.13	99.96	98.78	96.05	99.19	100.24	96.06	99.04	99.26	94.67	99.18	100.12	95.42	99.03	99.88	95.16
Si	2.958	1.982	7.033	2.977	1.977	6.983	2.970	1.965	6.880	2.999	1.994	7.026	3.014	1.956	6.963	2.977	1.967	6.915
Al	2.002	0.458	3.883	1.987	0.446	3.915	1.999	0.464	4.096	1.983	0.391	3.819	1.982	0.410	3.986	1.980	0.396	4.000
Ti	0.015	0.004	0.072	0.007	0.005	0.072	0.003	0.005	0.068	0.002	0.001	0.071	0.002	0.002	0.077	0.005	0.002	0.079
Cr	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000	0.003	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.002
Fe^{3+}	0.000	0.043	0.000	0.000	0.066	0.000	0.000	0.040	0.000	0.000	0.010	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.011	0.000
Fe^{2+}	1.678	0.134	0.291	1.645	0.123	0.313	1.690	0.143	0.326	1.460	0.111	0.160	1.481	0.132	0.180	1.497	0.118	0.166
Mn	0.029	0.002	0.000	0.033	0.000	0.000	0.031	0.000	0.001	0.031	0.001	0.000	0.026	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000
Mg	0.519	0.386	0.776	0.467	0.385	0.771	0.487	0.388	0.723	0.660	0.496	0.837	0.689	0.509	0.819	0.674	0.497	0.878
Ca	0.825	0.491	0.003	0.903	0.485	0.001	0.850	0.492	0.000	0.874	0.595	0.003	0.798	0.614	0.000	0.864	0.600	0.000
Na	0.000	0.500	0.081	0.000	0.512	0.075	0.000	0.503	0.080	0.000	0.401	0.078	0.000	0.375	0.085	0.000	0.408	0.090
K	0.000	0.000	1.710	0.000	0.000	1.793	0.000	0.000	1.743	0.000	0.000	1.777	0.000	0.000	1.798	0.000	0.000	1.829
总量	8.026	4.000	13.849	8.002	4.000	13.922	8.030	4.000	13.916	8.008	4.000	13.871	7.993	4.000	13.908	8.029	4.000	13.964

a) 矿物成分分析在中国科学院地质与地球物理研究所 CAME-CAUSX-51 型和 JXA-8100 型电子探针上完成，分析条件均为为 15 kV 加速电压, 20 nA 电子束. 石榴子石、绿辉石和多硅白云母的阳离子数分别以 12, 6 和 22 个氧原子计算，其中绿辉石按 Fe^{3+}=Na–(Al+Cr)计算

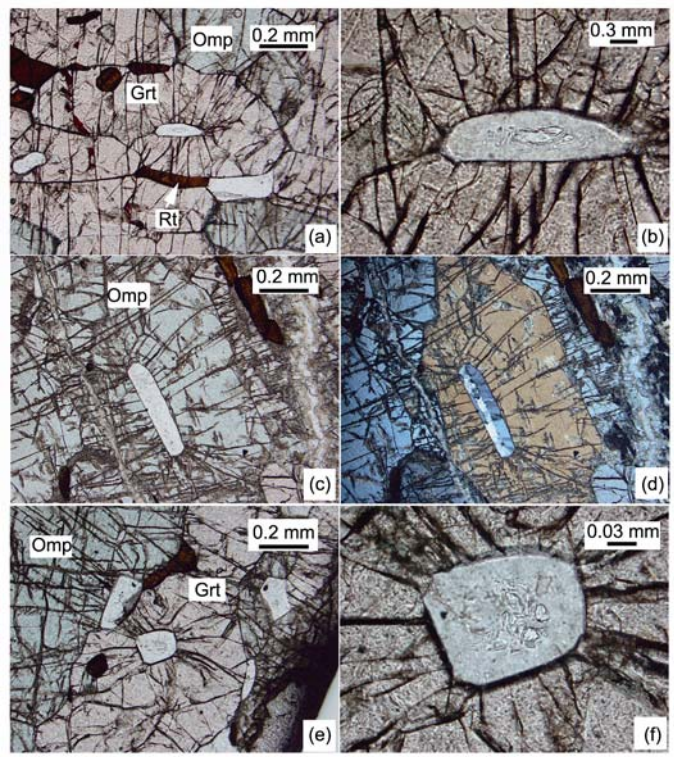


图 2 榴辉岩中柯石英和柯石英假象的显微结构特征

(a)和(b) 榴辉岩石榴子石中的柯石英包体，中心高突起的柯石英被石英所围绕，(b)是(a)的局部放大(样品 Q07-8-2.3). (c)和(d) 榴辉岩绿辉石中的多晶石英包体，具有典型的栅状结构，代表柯石英假象(样品 Q07-8-2.3). (e)和(f) 榴辉岩石榴子石中的柯石英包体，柯石英残留被石英所围绕(样品 Q07-8-2.2)

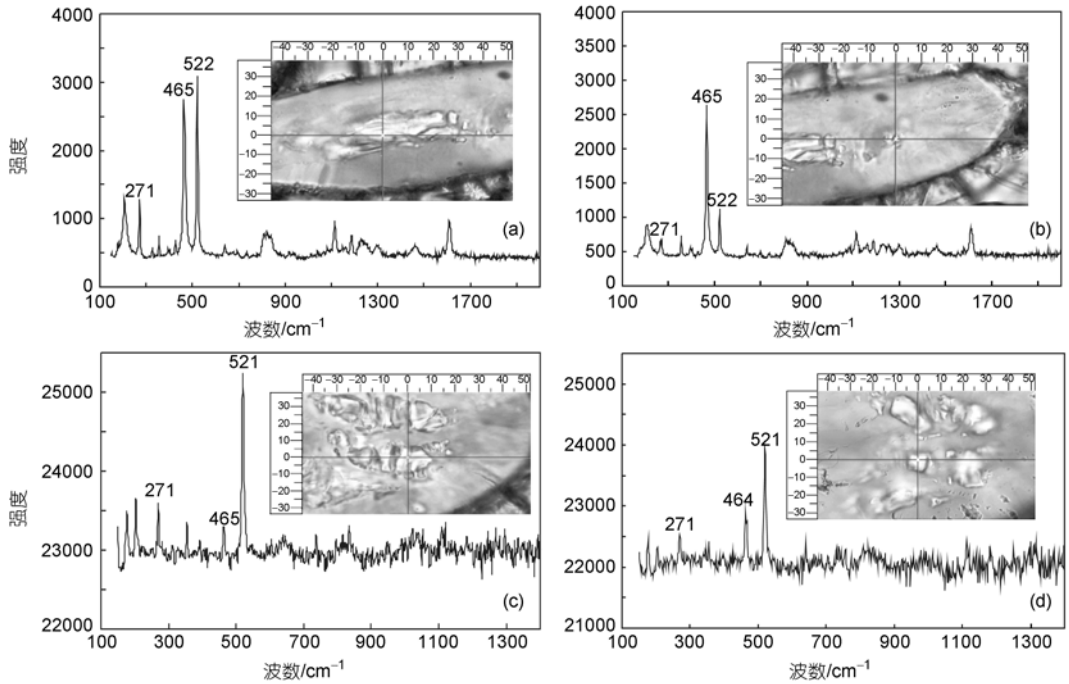


图 3　柯石英残留的拉曼光谱分析

(a)和(b)为样品 Q07-8-2.3; (c)和(d)为样品 Q07-8-2.2

曼光谱柯石英的峰相对变弱，而石英峰较强(图 3).

4　温压计算

利用Grt-Cpx-Phe矿物压力计[27]和Grt-Cpx矿物温度计[28]，估算了两个榴辉岩样品峰期温压条件，样品Q07-8-2.3 的峰期温压条件为 670~705℃和 2.7~3.05 GPa; 样品Q07-8-2.2 的温压条件为 680~730℃和 2.85~3.25 GPa (图 4), 比前者略高，但总体上，两个样品的*P-T*估算结果与榴辉岩中柯石英稳定存在一致.

5　讨论

在所研究的两个样品中，除柯石英残晶的包体外，还具有大量多晶石英包体，且柯石英残晶的包体和多晶石英包体可在同一薄片中出现(图 2)，能谱分析显示它们均为纯的SiO_2，围绕柯石英分布的多晶石英和没有柯石英残留的多晶石英包体具有类似的栅状结构特征，这进一步说明这些纯的多晶石英包体(不含钾长石)应为柯石英转变而成. 然而，值得注意的是，除了由纯的SiO_2组成的多晶石英包体外，在同一样品中，还发现一些在母矿物中形成典型放射状裂纹的包体，在这些包体中，除多晶石英外，还共生有细粒的钾长石集合体，早期在柴北缘都兰地区和南阿尔金地区所报道的多晶石英包体多是这种类型，并也被认为是柯石英假象[22,23]. Massonne[24]认为这种由石英和钾长石集合体组成的包体不能简单看成是柯石英的假象，而解释其为先前的K-cymrite转变而成. 无论如何，石英-钾长石集合体包体与含柯石英残留的包体同时出现说明前者也可能是早期超高压变质相转变而成，但其转变前的矿物特征及其转变过程还需进一步研究.

在柴北缘地区，除都兰榴辉岩-片麻岩单元外，在其西端的鱼卡-落凤坡和锡铁山榴辉岩-片麻岩单元的榴辉岩和其围岩中，还没有发现任何柯石英及具有柯石英假象特征的多晶石英包体，甚至也没有多晶石英+钾长石的包体存在，我们柴北缘西端含多硅白云母榴辉岩所进行的温压计算显示其峰期变质条件总体上稳定在柯石英/石英转变线以下[8,9]. 到目前为止，在柴北缘地区具有明确的超高压变质作用证据仅发现在都兰地区的榴辉岩和片麻岩以及绿梁山地区的石榴橄榄岩中. 因此，柴北缘地区很可能并

不像中国东部的大别-苏鲁超高压变质带那样存在巨量物质的深俯冲，可能仅仅少量的岩石经历过UHP变质作用，而大部分岩石仅仅经历过HP变质作用. 当然，这还需要进一步详细的研究工作来确认.

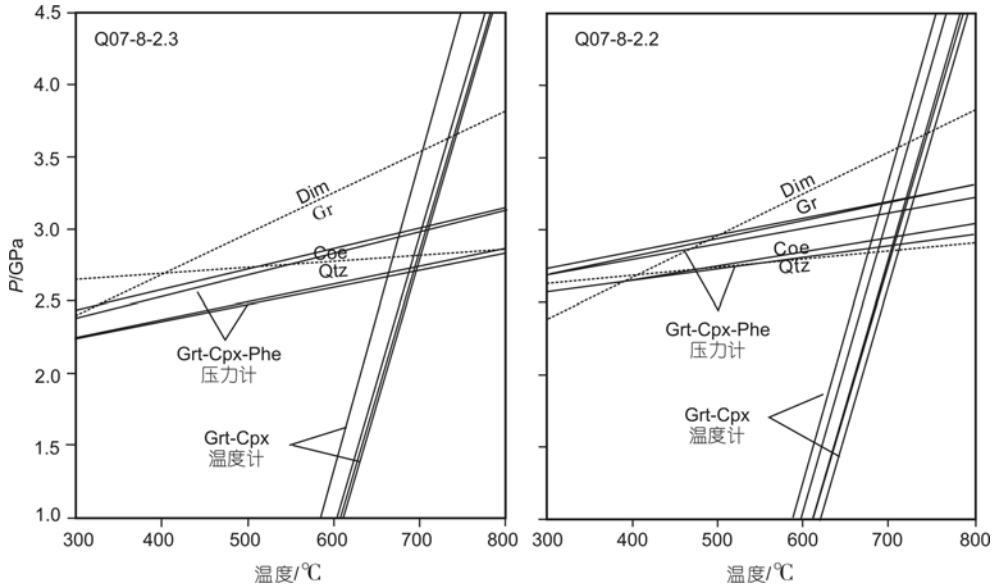


图 4 含柯石英榴辉岩的温压估算结果

Grt-Cpx-Phe压力计据文献[27]; Grt-Cpx温度计据文献[28]

致谢 审稿人提出了建设性修改意见，在此表示感谢.

参考文献

1 Yang J J, Deng J F. Garnet peridotites and eclogites in the Northern Qaidam Mountains, Tibetan plateau: A first record. In: Ernst W G, Liou J G, eds. First Workshop on UHP Metamorphism and Tectonics. Stanford: ILP Task Group III-6, Stanford University, 1994. A-20

2 杨经绥, 许志琴, 李海兵, 等. 柴北缘地区榴辉岩的发现及潜在的地质意义. 科学通报, 1998, 43(14): 1544—1549

3 杨经绥, 宋述光, 许志琴, 等. 柴北缘早古生代高压-超高压变质带发现典型超高压矿物——柯石英. 地质学报, 2001, 75(2): 175—179

4 Yang J S, Xu Z Q, Zhang J X, et al. Early Palaeozoic North Qaidam UHP metamorphic belt on the north-eastern Tibetan plateau and a paired subduction model. Terra Nova, 2002, 14(5): 397—404[doi]

5 Yang J S, Liu F L, Wu C L, et al. Two Ultrahigh-pressure metamorphic events recognized in the central orogenic belt of China: Evidence from the U-Pb dating of coesite-bearing zircons. Int Geol Rev, 2005, 47: 327—343[doi]

6 张建新, 杨经绥, 许志琴, 等. 柴北缘榴辉岩的峰期和退变质年龄: 来自 U-Pb 及 Ar-Ar 同位素测定的证据. 地球化学, 2000, 29(3): 217—222

7 张建新, 孟繁聪, 杨经绥. 柴北缘西段榴辉岩相的变质泥质岩: 榴辉岩与围岩"原地"关系的证据. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2004, 34(9): 825—834

8 张建新, 孟繁聪, 杨经绥. 柴北缘榴辉岩的 PT 演化历史. 岩石矿物学杂志, 2005, 24 (4): 245—254

9 Zhang J X, Yang J S, Mattinson C G, et al. Two contrasting eclogite cooling histories, North Qaidam HP/UHP terrane, western China: Petrological and isotopic constraints. Lithos, 2005, 84: 51—76[doi]

10 Zhang J X, Yang J S, Meng F C, et al. U-Pb isotopic studies of eclogites and their host gneisses in the Xitieshan area of the North Qaidam Mountains, western China: New evidence for an early Paleozoic HP-UHP metamorphic belt. J Asian Earth Sci, 2006, 28: 143—150[doi]

11 Song S G, Yang J S, Xu Z Q, et al. Metamorphic evolution of the coesite-bearing ultrahigh-pressure terrane in the north Qaidam, northern Tibet, NW China. J Metamorph Geol, 2003, 21: 631—644[doi]

12 Song S, Zhang L, Niu Y, et al. Geochronology of diamond-bearing zircons from garnet peridotite in the North Qaidam UHPM belt, Northern Tibetan Plateau: A record of complex histories from oceanic lithosphere subduction to continental collision. Earth Planet Sci Lett, 2005, 234: 99—118[doi]
13 Song S, Zhang L, Niu Y, et al. Evolution from oceanic subduction to continental collision: A case study of the Northern Tibetan Plateau inferred from geochemical and geochronological data. J Petrol, 2006, 47: 435—455[doi]
14 Song S, Zhang L, Niu Y. Ultra-deep origin of garnet peridotite from the North Qaidam ultrahigh-pressure belt, Northern Tibetan Plateau, NW China. Am Mineral, 2004, 89: 1330—1336
15 Zhang G, Song S, Zhang L, et al. The subducted oceanic crust within continental-type UHP metamorphic belt in the North Qaidam, NW China: Evidence from petrology, geochemistry and geochronology. Lithos, 2008, 104: 99—118[doi]
16 刘良, 车自成, 罗金海, 等. 阿尔金山西段榴辉岩的确定及地质意义. 科学通报, 1996, 41(14): 1485—1488
17 刘良, 孙勇, 校培喜, 等. 阿尔金发现超高压(>3.8 Ga)石榴二辉橄榄岩. 科学通报, 2002, 47(9): 657—662
18 刘良, 陈丹玲, 张安达, 等. 阿尔金超高压(>7 GPa)片麻状(含)钾长石辉石岩——石榴子石出熔单斜辉石的证据. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2005, 35(2): 105—114
19 Zhang J X, Zhang Z M, Xu Z Q, et al. Petrology and geochronology of eclogites from the western segment of the Altyn Tagh, northwestern China. Lithos, 2001, 56: 189—208
20 Zhang J X, Mattinson C G, Meng F C, et al. An Early Palaeozoic HP/HT granulite-garnet peridotite association in the south Altyn Tagh, NW China: P-T history and U-Pb geochronology. J Metamorph Geol, 2005, 23: 491—510[doi]
21 Zhang J X, Mattinson C G, Meng F C, et al. Polyphase tectonothermal history recorded in granulitized gneisses from the North Qaidam HP/UHP metamorphic terrane, Western China: Evidence from zircon U-Pb geochronology. Geol Soc Am Bull, 2008, 120: 732—749[doi] ～
22 张建新, 杨经绥, 许志琴, 等. 阿尔金榴辉岩中超高压变质作用证据. 科学通报, 2002, 47(3): 231—234
23 宋述光, 杨经绥. 柴北缘都兰地区榴辉岩中透长石＋石英包裹体: 超高压变质作用的证据. 地质学报, 2001, 75(2): 180—185
24 Massonne H J. First find of coesite in the ultrahigh-pressure metamorphic area of the central Erzgebirge, Germany. Eur J Mineral, 2001, 13: 565—570[doi]
25 Yang J J, Godard G, Simth D C. K-feldspar-bearing coesite pesudomorphs in an eclogite from Lanshantou (Eastern China). Eur J Mineral, 1998, 10: 969—985
26 Kretz R. Symbols for rock-forming mineral. Am Mineral, 1983, 68: 277—279
27 Ravna E J K, Terry M P. Geothermobarometry of UHP and HP eclogites and schists——An evaluation of equilibria among garnet-clinopyroxene-kyanite-phengite-coesite/quartz. J Metamorph Geol, 2004, 22: 579—592[doi]
28 Ravna E K. The garnet-clinopyroxene Fe^{2+}-Mg geothermometer: An updated calibration. J Metamorph Geol, 2000, 18: 211—219[doi]