科学通报 2013 年 第 58 卷 第 23 期：2240 ~ 2245
进 展 www.scichina.com csb.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

大洋俯冲和大陆碰撞的动力学过程：北祁连-柴北缘高压-超高压变质带的岩石学制约

宋述光*, 张贵宾, 张聪, 张立飞, 魏春景

造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871
* 联系人, E-mail: sgsong@pku.edu.cn

2013-05-17 收稿, 2013-06-19 接受, 2013-08-07 网络版发表
国家重点基础研究发展计划(2009CB825007)、国家自然科学基金(40825007, 41121062)和国土资源大调查项目(1212011121258)资助

摘要 青藏高原北缘发育两条不同类型、平行展布、时代相近的早古生代高压和超高压变质带, 构成了大洋俯冲带和大陆俯冲带沿北西走向平行展布的构造格局. 北部的北祁连高压蓝片岩-榴辉岩相变质带是典型的大洋型俯冲带, 南部的柴北缘超高压榴辉岩相变质带是大陆深俯冲的产物. 研究表明, 这两条类型不同的变质带分别代表同一俯冲带体系大洋俯冲和大陆碰撞的不同结果, 并反映了大洋冷俯冲和大陆深俯冲的不同折返轨迹和路径, 记录了阿拉善-塔里木地块与祁连-柴达木地块之间在早古生代时期的聚合和大陆碰撞造山带的形成和垮塌过程.

关键词
复合造山带
大洋俯冲
弧后盆地转换
大陆俯冲
祁连山
柴北缘

大陆造山带都经历了长期而复杂的演化历史, 包括大陆裂解、洋中脊扩张和大洋的形成, 大洋岩石圈俯冲、大陆俯冲/碰撞, 山脉的形成和造山带的垮塌等一系列过程. 因此, 大陆造山带的研究是了解大陆形成和演化的关键. 青藏高原北缘祁连山-柴北缘是大型的早古生代复合造山带[1], 它从北向南主要由北祁连大洋缝合带、祁连地块和柴北缘超高压变质带三个构造单元组成, 其西部被阿尔金左行走滑断裂所切(图 1). 北侧的北祁连山大洋俯冲带主要由蛇绿岩、岛弧岩浆岩、低温/高压变质岩、志留纪复理石和泥盆纪磨拉石等组成, 柴北缘超高压变质带是大陆地壳深俯冲的产物. 该复合造山带的研究对了解早古生代以来遵循威尔逊旋回的板块运动过程、大洋的发展、俯冲带的形成、岛弧和弧后盆地的演化过程以及成矿作用、大陆俯冲-碰撞和造山带的形成等方面具有重要意义[2].

1 北祁连大洋缝合带

北祁连发育的南北两条蛇绿岩带分别形成于大洋和弧后盆地环境, 其中南部大洋蛇绿岩的形成时代为 500~560 Ma[2~4], 北部弧后盆地型蛇绿岩的时代为 490~445 Ma[2,5]. 地幔橄榄岩中 CH_4+C+H_2 流体包裹体证明俯冲带流体与地幔楔之间的相互作用[6,7]. 弧岩浆作用包括基性-酸性火山岩和 I 型和 S 型花岗岩, 其发育的时代为 520~440 Ma, 并经历了从活动大陆边缘到弧后扩张的过程, 并发现板片熔融形成的埃达克岩[8]. 大岔大坂玻安岩系是中国保持最好的玻安岩地体之一, 主要由下部拉斑质玄武岩和上部玻安岩两个单元组成. 拉斑玄武岩单元整体上具有类似洋中脊玄武岩(MORB)的地球化学特征, 微量元素模拟结果显示其可能代表了富集的 MORB 地幔 5%~6%的部分熔融产物. 矿物化学、主量和微量元素地球化学研究表明, 上部的玻安岩单元明显具有类似于弧后盆地玻安岩的地球化学特征. 定量计算结果显示, 上部玻安岩代表在更高地幔潜温(1380~1460℃)和更小的深度范围内(42~66 km)亏损的弧下地幔楔第二阶段的熔融产物[9]. 火山弧岩浆作用揭示, 祁连山大洋俯冲带的初始俯冲发生于~520 Ma, 在

引用格式: 宋述光, 张贵宾, 张聪, 等. 大洋俯冲和大陆碰撞的动力学过程: 北祁连-柴北缘高压-超高压变质带的岩石学制约. 科学通报, 2013, 58: 2240–2245
Song S G, Zhang G B, Zhang C, et al. Dynamic process of oceanic subduction and continental collision: petrological constraints of HP-UHP belts in Qilian-Qaidam, the northern Tibetan Plateau. Chin Sci Bull, 2013, 58: 2240–2245, doi: 10.1360/972013-586

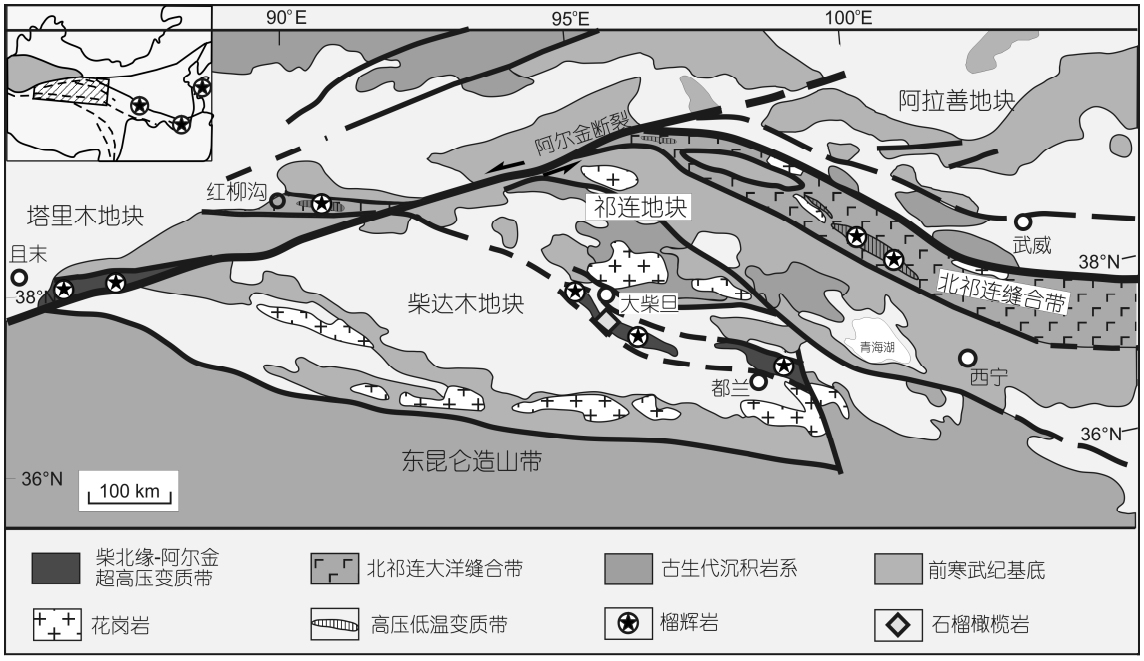

图 1　祁连山-柴北缘地质构造简图

520~490 Ma 为安第斯型岩浆弧(即活动大陆边缘弧), 通过 490~445 Ma 弧后盆地的扩张和前弧分离, 形成了日本海型沟-弧-盆体系的转换[2,9].

北祁连山缝合带中高压变质岩可划分为高级蓝片岩带和低级蓝片岩带[10,11]. 高级蓝片岩带呈 3 个构造岩片产于岛弧火山岩带中, 高压变质岩包括含硬柱石的榴辉岩、硬柱石蓝片岩、镁纤柱石-石榴石-多硅白云母片岩、各类蓝片岩和远洋沉积的富 Fe-Mn 硅质岩, 榴辉岩的原岩包括辉长岩、N 和 E-型洋中脊玄武岩(MORB)和洋岛玄武岩(OIB), 代表典型的大洋冷俯冲的产物(地热梯度为 6~7℃/km)[11~18]. 锆石 U-Pb 定年获得的榴辉岩相变质年龄为 462~490 Ma[1,13,19], 多硅白云母 Ar-Ar 法定年获得的蓝片岩相变质年龄为 445~460 Ma[20,21]. 低级蓝片岩带位于肃南九个泉一带, 特征变质矿物组合为: Lws+Gln+Pmp+Arg+Ab+Q, 变质温压条件为 T=250~350℃, P=6~10 kbar[11,22] (1 bar=10^5 Pa, 下同). 蓝闪石的 Ar-Ar 年龄为 415~417 Ma[23], 可能代表弧后盆地蛇绿岩俯冲的产物[2].

2　柴北缘超高压变质带

柴北缘超高压变质带夹持于南祁连褶皱带-中祁连地块与柴达木地块之间, 由都兰、锡铁山和绿梁山-鱼卡 3 个超高压变质地体组成, 带内的岩石组合为花岗质片麻岩、沉积岩变质的副片麻岩、大理岩、榴辉岩和石榴橄榄岩等, 其中花岗质片麻岩和部分泥质片麻岩占高压-超高压变质带岩石总体积的 85%以上, 榴辉岩和石榴橄榄岩都以大小不等的岩块分布于两种片麻岩中. 因此, 柴北缘超高压变质带的岩石组合以大陆地壳为主要成分, 是典型的大陆型俯冲碰撞带.

花岗质片麻岩原岩主要是 900~1000 Ma 的 Grenville 期造山旋回形成的花岗岩[24], 而泥质片麻岩的原岩可以划分为两种: (1) Grenville 期造山旋回高级变质形成的泥质片麻岩, 其变质年龄(910~950 Ma)与花岗片麻岩的原岩岩浆结晶年龄一致[24~26], 在后期超高压变质过程中, 格林威尔期岩浆锆石基本上没有被改造, 说明大陆地壳深俯冲过程中缺少流体和 Zr 的来源[27]; (2) 记录超高压变质的泥质片麻岩, 这些片麻岩的锆石含有柯石英(如都兰野马滩地区[1,28~30]), 主要是 430~420 Ma 超高压变质期间结晶的, 说明在变质过程中岩石富含流体, 并且没有经历早期变质作用. 我们认为, 该类型沉积岩可能是被动大陆边缘的沉积物, 在大陆俯冲过程中被携带到 100~200 km 的地幔深度发生变质重结晶.

榴辉岩的原岩也由两部分组成: (1) 850~820 Ma 玄武岩[31~35], 其微量地球化学特征显示是具有 OIB 型特征的大陆溢流玄武岩[32,36]; (2) 早古生代大洋蛇

绿岩[1,30,37~41], 主要由超高压变质的方辉橄榄岩、超镁铁和辉长岩堆晶岩及玄武岩组成, 辉长岩变质为蓝晶石榴辉岩, 其残留的锆石岩浆核年龄为 540~500 Ma[38]. 矿物学、Sm-Nd 及锆石年代学研究揭示, 榴辉岩经历了两期榴辉岩相变质, 早期榴辉岩相时代>440 Ma, 与大洋板片俯冲有关; 晚期榴辉岩相变质约 435~420 Ma, 为大陆俯冲[1,42].

柴北缘超高压变质带唯一的石榴橄榄岩体出露于绿梁山的胜利口地区. 其主要岩石类型包括: 含铬尖晶石纯橄岩、石榴石方辉橄榄岩、石榴石二辉橄榄岩和石榴石辉石岩. 橄榄石的 *Fo* 值变化范围为 84~93, 石榴石、单斜辉石和斜方辉石的 Mg#都随全岩的 MgO 含量增加而升高. 根据全岩和矿物的成分特征, Song 等人[43,44]认为该石榴橄榄岩的原岩是岛弧环境下高镁岩浆堆晶的产物, 与阿拉斯加型超镁铁岩体类似. Yang 和 Powell[45]认为是蚀变的大洋地幔橄榄岩经过超高压变质的结果, Shi 等人[46]及 Xiong 等人[47]根据 Re-Os 同位素和 Hf 同位素认为来自古老地幔楔. 结合 *P-T* 条件计算、锆石中金刚石包裹体以及石榴石、橄榄石和辉石中的出溶片晶, 该石榴橄榄岩的形成深度可达 200 km[44,48~50]. 锆石 U-Pb 定年确定石榴橄榄岩的超高压变质年龄为 420~430 Ma[47,48], 锆石 Hf 同位素都给出了亏损地幔的模式年龄(T_{DM})为 0.90~1.3 Ga[47], 说明交代这些橄榄岩的物质源区是来自 Grenville 期形成的新生地壳.

对柴北缘超高压变质带岩石学及锆石 U-Pb 年代学的系统分析表明, 超高压变质带记录了大洋俯冲、大陆俯冲/碰撞和造山带垮塌的过程. 445~475 Ma 的榴辉岩相变质年龄记录了早期大洋俯冲有关的高压变质, 与北祁连高压变质的时代基本一致[1]; 第二期变质时代为 435~420 Ma, 为大陆深俯冲引起的超高压变质, 以出现柯石英和金刚石等标志性矿物组合; 第三期变质时代为 410~400 Ma, 与超高压变质岩在折返过程中的退化变质有关. 与大陆深俯冲和折返有关的岩浆作用可以划分为同碰撞期(435~410 Ma)和碰撞后(405~360 Ma)两个阶段, 分别代表超高压变质带大陆俯冲折返和造山带垮塌过程中大陆地壳的深熔作用. 因此, 柴北缘和北祁连是研究大陆造山旋回从大洋俯冲到大陆俯冲/碰撞、造山带形成和垮塌的重要地区.

3 北祁连-柴北缘复合造山带的构造演化

综上所述, 我们认为北祁连-柴北缘复合造山带从前寒武纪到早古生代经历了从大洋形成-扩张-俯冲-闭合到大陆俯冲/碰撞造山和造山带垮塌等 6 个阶段的构造演化, 图 2 简要概括了这个过程.

第 I 阶段(约 710~520 Ma): 祁连洋的打开和扩张. 自 Rodinia 超大陆裂解之后, 祁连洋大约在晚元古代(约 710 Ma)开始打开, 并作为世界广泛的 Iapetus 大洋的一部分或分支, 而不是原特提斯洋构造域[2]. 该大洋到 520 Ma 一直稳定扩张.

第 II 阶段(约 520~490 Ma): 大洋初始俯冲和初始岛弧岩浆作用. 当祁连洋岩石圈扩张到一定程度, 大洋岩石圈在大约 520 Ma 时向北部的阿拉善地块俯冲. 由于俯冲作用造成的地幔扰动和上涌, 使地幔楔发生部分熔融, 形成具有 517~505 Ma 的初始岛弧(infant arc)玄武岩, 而上升的地幔岩浆使大陆地壳发生熔融, 形成 I 型和 S 型花岗岩(516~500 Ma), 从而形成安第斯型活动大陆边缘. 当地幔楔部分熔融程度的增加, 更难熔的玻安岩在 490 Ma 开始产生, 并导致弧后伸展和弧后盆地的形成.

第 III 阶段(约 490~450 Ma): 弧后盆地扩张和 SSZ 型蛇绿岩的形成. 大约在 490 Ma, 玻安岩的形成标志弧后盆地伸展和扩张的开始, 并形成弧后盆地的洋壳(即祁连山 490~450 Ma 的蛇绿岩), 同时伴随有早期活动大陆边缘的一部分从阿拉善地块中分离出来, 从而完成从安第斯型活动大陆边缘到西太平洋型沟-弧-盆体系的转换, 同时, 大洋冷俯冲作用形成了低温/高压变质带, Cu-Pb-Zn 及斑岩 Mo 矿床的发育与岛弧岩浆作用有密切关系. 弧后盆地的扩张一直持续到祁连大洋岩石圈闭合的时间.

第 IV 阶段(约 440~420 Ma): 祁连洋的闭合及志留纪残余海盆复理石建造. 祁连洋的闭合和弧后盆地扩张的停止发生在奥陶纪的末期(约 440 Ma), 大陆地块开始碰撞, 而大洋岩石圈的持续下沉导致祁连-柴达木地块被拖曳到阿拉善地块之下 100~200 km 的深度, 并发生超高压变质(440~420 Ma), 但在地表残余海盆沉积了志留纪复理石建造.

第 V 阶段(晚志留纪-早泥盆纪): 祁连山山脉的隆升和俯冲的大陆地壳的折返. 俯冲的大陆地壳随大洋岩石圈的断离而开始折返, 同时在晚志留纪-早泥盆纪期间发生强烈的造山作用, 导致山脉的隆升、超高压变质岩石的折返和区内广泛发育的泥盆纪磨拉石.

第 VI 阶段(<400 Ma): 造山后的伸展和剥蚀. 从晚泥盆纪, 祁连造山带开始垮塌, 持续的伸展作用引

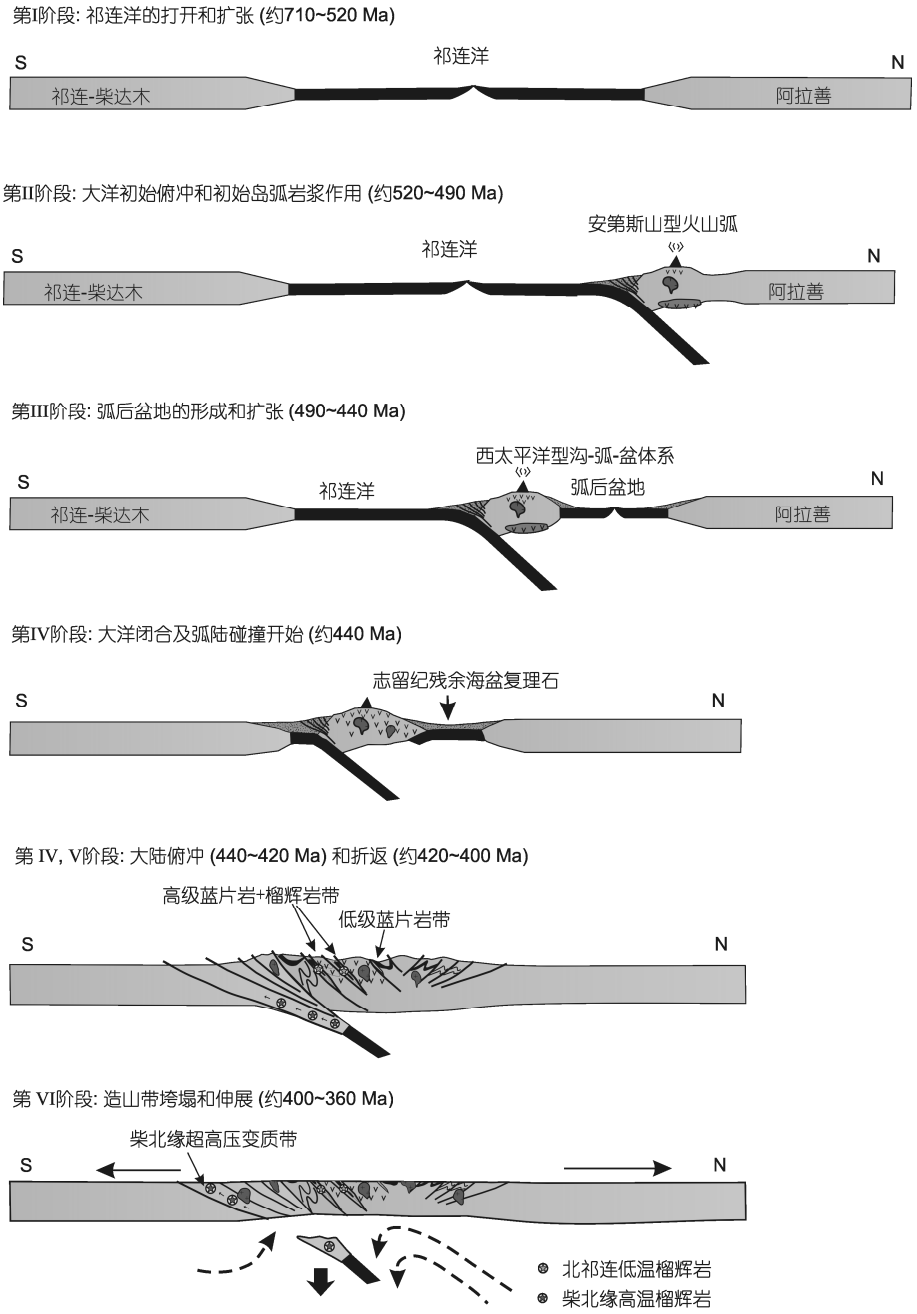

图 2　祁连山造山带的构造演化模式

据文献[2]修改. I, 祁连洋的打开和扩张(约 710~520 Ma); II, 大洋初始俯冲和初始岛弧岩浆作用(约 520~490 Ma); III, 弧后盆地扩张和 SSZ 型蛇绿岩的形成(约 490~450 Ma); IV, 祁连洋的闭合及志留纪残余海盆复理石建造(约 440~420 Ma); V, 祁连山山脉的隆升和俯冲的大陆地壳的折返(晚志留纪-早泥盆纪); VI, 造山后的伸展和剥蚀, 并发育造山后岩浆作用(<400 Ma)

起造山带的去根和地幔软流圈的上涌并发生部分熔融, 造成地壳岩石的熔融, 形成祁连与阿拉善之间出露的造山后花岗岩. 在石炭纪, 造山作用完全停止, 海相到海陆交互相沉积层完全覆盖了整个祁连加里东期造山带. 新的山脉的隆起与新生代喜马拉雅造山带的活动有密切关系.

参考文献

1 Song S G, Zhang L F, Niu Y L, 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
2 Song S G, Niu Y L, Su L, et al. Tectonics of the North Qilian orogen, NW China. Gondwana Res, 2013, 23: 1378–1401
3 史仁灯, 杨经绥, 吴才来, 等. 北祁连玉石沟蛇绿岩形成于晚震旦世的 SHRIMP 年龄证据. 地质学报, 2004, 78: 649–657
4 曾建元, 杨怀仁, 杨宏仪, 等. 北祁连东草河蛇绿岩: 一个早古生代的洋壳残片. 科学通报, 2007, 52: 825–835
5 夏小洪, 宋述光. 北祁连山肃南九个泉蛇绿岩形成年龄和构造环境. 科学通报, 2010, 55: 1465–1473
6 苏犁, 宋述光, 王志海. 北祁连山玉石沟地幔橄榄岩中 CH_4 流体包裹体的发现及其意义. 科学通报, 1999, 44: 855–858
7 Song S G, Su L, Niu Y L, et al. CH_4 inclusions in orogenic harzburgite: Evidence for reduced slab fluids and implication for redox melting in mantle wedge. Geochim Cosmochim Acta, 2009, 73: 1737–1754
8 陈育晓, 夏小洪, 宋述光. 北祁连山西段志留纪高硅埃达克岩: 洋壳减压熔融的证据. 科学通报, 2012, 57: 2072–2085
9 Xia X H, Song S G, Niu Y L. Tholeiite-Boninite terrane in the North Qilian suture zone: Implications for subduction initiation and back-arc basin development. Chem Geol, 2012, 328: 259–277
10 Wu H Q, Feng Y M, Song S G. Metamorphism and deformation of blueschist belts and their tectonic implications, North Qilian Mountains, China. J Metamorph Geol, 1993, 11: 523–536
11 Song S G, Niu Y L, Zhang L F, et al. Tectonic evolution of Early Paleozoic HP metamorphic rocks in the North Qilian Mountains, NW China: New perspectives. J Asian Earth Sci, 2009, 35: 334–353
12 张建新, 孟繁聪. 北祁连和北阿尔金含硬柱石榴辉岩: 冷洋壳俯冲作用的证据. 科学通报, 2006, 51: 1683–1688
13 Zhang J X, Meng F C, Wan Y S. A cold early Palaeozoic subduction zone in the North Qilian Mountains, NW China: Petrological and U-Pb geochronological constraints. J Metamorph Geol, 2007, 25: 285–304
14 Song S G, Zhang L F, Niu Y L, et al. Eclogite and carpholite-bearing meta-pelite in the North Qilian suture zone, NW China: Implications for Paleozoic cold oceanic subduction and water transport into mantle. J Metamorph Geol, 2007, 25: 547–563
15 Wei C J, Song S G. Chloritoid-glaucophane schist in the north Qilian orogen, NW China: Phase equilibria and *P-T* path from garnet zonation. J Metamorph Geol, 2008, 26: 301–316
16 Wei C J, Yang Y, Su X L, et al. Metamorphic evolution of low-*T* eclogite from the North Qilian orogen, NW China: Evidence from petrology and calculated phase equilibria in the system NCKFMASHO. J Metamorph Geol, 2009, 27: 55–70
17 Cao Y, Song S G, Niu Y L, et al. Variation of mineral composition, fabric and oxygen fugacity from massive to foliated eclogites during exhumation of subducted ocean crust in the North Qilian suture zone, NW China. J Metamorph Geol, 2011, 29: 699–720
18 林宜慧, 张立飞. 北祁连山清水沟蓝片岩带中含硬柱石蓝片岩和榴辉岩的岩石学、$^{40}Ar/^{39}Ar$ 同位素年代学研究及其大地构造意义. 地质学报, 2013, 86: 1503–1524
19 宋述光, 张立飞, 牛耀龄, 等. 北祁连山高压变质带榴辉岩的锆石 SHRIMP 定年及其构造意义. 科学通报, 2004, 49: 592–595
20 张建新, 许志琴, 陈文, 等. 北祁连中段俯冲-增生杂岩/火山弧的时代探讨. 岩石矿物学杂志, 1997, 16: 112–119
21 Liu Y J, Neubauer F, Genser J, et al. $^{40}Ar/^{39}Ar$ ages of blueschist facies pelitic schists from Qingshuigou in the Northern Qilian Mountains, western China. Isl Arc, 2006, 15: 187–198
22 Zhang L F, Wang Q J, Song S G. Lawsonite blueschist in Northern Qilian, NW China: *PT* pseudosections and petrologic implications. J Asian Earth Sci, 2009, 35: 354–366
23 林宜慧, 张立飞, 季建清, 等. 北祁连山九个泉硬柱石蓝片岩 ^{40}Ar-^{39}Ar 年龄及其地质意义. 科学通报, 2010, 55: 1710–1716
24 Song S G, Su L, Li X H, et al. Grenville-age orogenesis in the Qaidam-Qilian block: The link between South China and Tarim. Precambrian Res, 2012, 220: 9–22
25 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
26 Zhang C, van Roermund H, Zhang L F, et al. A polyphase metamorphic evolution for the Xitieshan paragneiss of the north Qaidam UHP metamorphic belt, western China: *In-situ* EMP monazite- and U-Pb zircon SHRIMP dating. Lithos, 2012, 136-139: 27–45
27 Zheng Y F. Fluid regime in continental subduction zones: Petrological insights from ultrahigh-pressure metamorphic rocks. J Geol Soc London, 2009, 166: 763–782
28 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: 397–404
29 Song S G, Yang J S, Xu Z Q, et al. Metamorphic evolution of coesite-bearing UHP terrane in the North Qaidam, northern Tibet, NW China. J Metamorph Geol, 2003, 21: 631–644

30 Song S G, Yang J S, Liou J G, et al. Petrology, Geochemistry and isotopic ages of eclogites in the Dulan UHPM terrane, the North Qaidam, NW China. Lithos, 2003, 70: 195–211
31 Chen D L, Liu L, Sun Y, et al. Geochemistry and zircon U-Pb dating and its implications of the Yukahe HP/UHP terrane, the North Qaidam, NW China. J Asian Earth Sci, 2009, 35: 259–272
32 Song S G, Su L, Li X H, et al. Tracing the 850-Ma continental flood basalts from a piece of subducted continental crust in the North Qaidam UHPM belt, NW China. Precambrian Res, 2010, 183: 805–816
33 Zhang G B, Ellis D J, Christy A G, et al. UHP metamorphic evolution of coesite-bearing eclogite from the Yuka terrane, North Qaidam UHPM belt, NW China. Eur J Mineral, 2009, 21: 1287–1300
34 Zhang C, Zhang L F, van Roermund H, et al. Petrology and SHRIMP U-Pb dating of Xitieshan eclogite, North Qaidam UHP metamorphic belt, NW China. J Asian Earth Sci, 2011, 42: 752–767
35 Zhang J X, Mattinson C G, Yu S Y, et al. U-Pb zircon geochronology of coesite-bearing eclogites from the southern Dulan area of the North Qaidam UHP terrane, northwestern China: Spatially and temporally extensive UHP metamorphism during continental subduction. J Metamorph Geol, 2010, 28: 955–978
36 Zhang C, Zhang L F, Bader T, et al. Geochemistry and trace element behaviors of eclogite during its exhumation in the Xitieshan terrane, North Qaidam UHP belt, NW China. J Asian Earth Sci, 2013, 63: 81–97
37 Song S G, Niu Y L, Zhang G B, et al. Two types of peridotite in North Qaidam UHPM belt and their tectonic implications for oceanic and continental subduction: A review. J Asian Earth Sci, 2009, 35: 285–297
38 Zhang G B, Song S G, Zhang L F, 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
39 Zhang G B, Zhang L F, Song S G. UHP metamorphic evolution and SHRIMP geochronology of a metaophiolitic gabbro in the North Qaidam, NW China. J Asian Earth Sci, 2009, 35: 310–322
40 Zhang G B, Ellis D J, Christy A G, et al. Zr-in-rutile thermoetry in eclogites from Western China. Contrib Mineral Petrol, 2010, 160: 427–439
41 Zhang G B, Zhang L F, Christy A G. From oceanic subduction to continental collision: An overview of HP-UHP metamorphic rocks in the North Qaidam UHP belt, NW China. J Asian Earth Sci, 2013, 63: 98–111
42 宋述光, 牛耀龄, 张立飞, 等. 大陆造山运动: 从大洋俯冲到大陆俯冲、碰撞、折返的时限——以北祁连山、柴北缘为例. 岩石学报, 2009, 25: 2067–2077
43 Song S G, Su L, Niu Y L, et al. Petrological and geochemical constraints on the origin of garnet peridotite in the North Qaidam Ultrahigh-pressure metamorphic belt, Northwestern China. Lithos, 2007, 96: 243–265
44 Song S G, Niu Y L, Zhang L F. The Lüliangshan garnet peridotite massif of the North Qaidam UHPM belt, NW China—A review of its origin and metamorphic evolution. J Metamorph Geol, 2009, 27: 621–638
45 Yang J J, Powell R. Ultrahigh-pressure garnet peridotites from the devolatilization of sea-floor hydrated ultramafic rocks. J Metamorph Geol, 2008, 26: 695–716
46 Shi R D, Griffin W L, O'Reilly S Y, et al. Evolution of the Lüliangshan garnet peridotites in the North Qaidam UHP belt, Northern Tibetan Plateau: Constraints from Re-Os isotopes. Lithos, 2010, 117: 307–321
47 Xiong Q, Zheng J, Griffin W L, et al. Zircons in the Shenglikou ultrahigh-pressure garnet peridotite massif and its country rocks from the North Qaidam terrane (western China): Meso-Neoproterozoic crust-mantle coupling and early Paleozoic convergent plate-margin processes. Precambrian Res, 2011, 187: 33–57
48 Song S G, Zhang L F, Niu Y. Ultra-deep origin of garnet peridotite from the North Qaidam ultrahigh-pressure belt, Northern Tibetan Plateau, NW China. Am Miner, 2004, 89: 1330–1336
49 Song S G, Zhang L F, Chen J, et al. Sodic amphibole exsolutions in garnet from garnet- peridotite, North Qaidam UHPM belt, NW China: Implications for ultradeep-origin and hydroxyl defects in mantle garnets. Am Miner, 2005, 90: 814–820
50 Song S G, Zhang L F, Niu Y L, 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