

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^{*}

宋述光¹ 牛耀龄² 张立飞¹ 张贵宾¹

SONG ShuGuang¹, NIU YaoLing², ZHANG LiFei¹ and ZHANG GuiBin¹

1. 造山带与地壳演化教育部重点实验室,北京大学地质学系,北京 100871

2. Department of Geosciences, Durham University, Durham DH1 3LE, UK

1. MOE Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, Department of Geology, Peking University, Beijing 100871, China

2. Department of Geosciences, Durham University, Durham DH1 3LE, UK

2009-01-10 收稿,2009-03-20 改回.

Song SG, Niu YL, Zhang LF and Zhang GB. 2009. Time constraints on orogenesis from oceanic subduction to continental subduction, collision, and exhumation: An example from North Qilian and North Qaidam HP-UHP belts. *Acta Petrologica Sinica*, 25(9):2067–2077

Abstract Two end-member subduction zones of the Early Paleozoic are preserved in the Qilian-Qaidam mountain systems at the northern edge of the Tibetan Plateau. One is the North Qilian oceanic-type suture zone and the other is the North Qaidam continental-type subduction zone. The North Qilian suture zone records a series of temporal events from seafloor spreading in the Neo-Proterozoic/Cambrian, to the cold oceanic subduction in the Ordovician, and to the strong mountain building in the Early Devonian. Metamorphic ages of the high-pressure rocks range from 490 to 440 Ma, suggesting that the Qilian seafloor subduction continued for at least 50 m. y. The North Qaidam UHP belt is the product of continental subduction. The petrology, geochemistry and geochronology reveal that protoliths of the eclogites are of both continental and oceanic origins. The HP-UHP metamorphosed ophiolite assemblage of 517 ± 11 Ma is coeval with the ophiolite suites in the North Qilian suture zone. The early stage of eclogite-facies metamorphism took place at $443 \sim 473$ Ma, the same age as that of the HP rocks in the North Qilian oceanic suture zone, representing the early stage of seafloor subduction. Coesite-bearing zircons from the metapelitic and diamond-bearing zircons from garnet peridotites constrain the UHP metamorphic ages to be ca. $420 \sim 426$ Ma, which represents the timing of continental deep subduction and is ~ 20 m. y. younger than the early stage of the Qilian seafloor subduction. At ~ 420 Ma, the UHPM rocks started to exhume with strong orogenic movement in the North Qilian-Qaidam region. These two end-member subduction belts illustrate a complete mountain-building progression from seafloor spreading/subduction to continental subduction, to continental collision, and to the ultimate uplift with the accompanied exhumation in the Early Paleozoic.

Key words HP-UHP metamorphic belts; Oceanic subduction; Continental subduction; Metamorphic ages; North Qilian; North Qaidam

摘要 北祁连山和柴北缘是典型的早古生代大陆造山带,分别发育有北祁连山大洋型俯冲缝合带和柴北缘大陆型俯冲碰撞带。作为早古生代大洋冷俯冲的典型代表,北祁连山经历了从新元古代-寒武纪大洋扩张、奥陶纪俯冲和闭合及早泥盆世隆升造山的过程。高压变质岩变质年龄为 $490 \sim 440$ Ma,证明古祁连洋经历了至少 50 m. y. 的俯冲过程。柴北缘超高压变质带是大陆深俯冲的结果,岩石学、地球化学和同位素年代学表明,柴北缘超高压变质带中榴辉岩的原岩分别来自洋壳和陆壳两种环境。高压/超高压变质的蛇绿岩原岩的年龄为 517 ± 11 Ma,与祁连山蛇绿岩年龄一致。榴辉岩早期的变质年龄为 $443 \sim 473$ Ma,与祁连山高压变质年龄一致,代表大洋地壳俯冲的时代,而柯石英片麻岩和石榴橄榄岩所限定的超高压变质时代为 $420 \sim 426$ Ma,代表大陆俯冲的年龄。从大洋俯冲结束到大陆俯冲最大深度的转换时间最少需要 20 m. y.。自 420 Ma 起,俯冲

* 国家自然科学基金(40825007, 40821002, 40773012)、国家基础科学发展规划项目(2009CB825007)以及全国博士学位论文作者专项资金项目(200531)资助。

第一作者简介:宋述光,男,1963 年生,教授,博导,岩石学研究方向,E-mail: sgsong@pku.edu.cn

大洋岩石圈与跟随俯冲的大陆岩石圈断离,大陆地壳开始折返,发生隆升和造山。北祁连山和柴北缘两个不同类型的高压-超高压变质带反映了早古生代从大洋俯冲到大陆俯冲、隆升折返的造山过程。

关键词 高压-超高压变质带;大洋俯冲;大陆俯冲;变质时代;北祁连山;柴北缘

中图法分类号 P542.2;P597.3

显生宙以来,大陆上的造山带是大陆拼贴、增生的表现,也是古板块运动的结果和地球内部运动在地表的反映。造山带的形成一般都经历了早期大洋俯冲、闭合,以及大陆俯冲折返,隆升造山的过程。根据岩石组合,造山带中识别出的古俯冲带可以划分为“大洋型”(B型或太平洋型)和“大陆型”(A型或阿尔卑斯型)两种端员类型(Maruyama *et al.*, 1996; Ernst, 2001; Song *et al.*, 2006)。基本的设想是,在大洋岩石圈完全消亡之后,跟随的大陆岩石圈在大洋岩石圈的拖曳之下继续俯冲到地幔100~300km的深度,当大陆和大洋岩石圈断离后,俯冲的大陆地壳由于浮力的作用折返到地表(Davies and Blanckenburg, 1995; Song *et al.*, 2006, 2009a)。因此,大陆地壳发生深俯冲的必要条件为:(1)早期大洋岩石圈的俯冲;(2)大陆和大洋岩石圈相连,即,被动大陆边缘。新生代的阿尔卑斯、喜马拉雅造山带和早古生代的祁连—柴北缘造山带给我们展示了很好的例证。

大洋型俯冲带的岩石组合代表了大洋岩石圈俯冲过程中的产物,其岩石类型主要包括:大洋岩石圈残片构成的蛇绿混杂岩、低温高压变质形成的蓝片岩和榴辉岩(尤其是以含硬柱石的榴辉岩为特征——反映大洋冷俯冲过程)、岛弧岩浆杂岩以及相应的残余海盆相复理石,其中代表性的例子

有环太平洋俯冲带、我国的北祁连山和西天山等古板块缝合带。大陆型俯冲碰撞带的岩石组合与大洋型明显不同,主要包括:具有大陆地壳成分的长英质片麻岩及其内部呈透镜体或构造块体产出的榴辉岩、大理岩和石榴辉石岩和石榴橄榄岩等,典型的地区包括我国的大别-苏鲁超高压变质带,挪威的Western Gneiss Region,哈萨克斯坦的Kokchetav超高压地体等。

大洋俯冲的作用已经被广泛讨论(如, Ernst, 1972; Maruyama *et al.*, 1996),但大洋俯冲与大陆俯冲和造山过程的时空关系并不十分清晰,例如:大陆俯冲的最大深度,持续的时间,折返过程,造山作用何时开始。本文通过对北祁连山—柴北缘典型造山带的剖析,试图建立造山带从大洋俯冲、大陆俯冲、碰撞、隆升造山的时空演化规律。

1 祁连山—柴北缘大洋冷俯冲到大陆碰撞

祁连山—柴北缘位于青藏高原的北部,在大地构造上是阿拉善地块与柴达木地块之间的巨型复合造山带。由北向南,该复合造山带可以划分为5个构造单元(图1):(1)阿拉善地块;(2)北祁连山大洋型俯冲带(缝合带);(3)祁连地

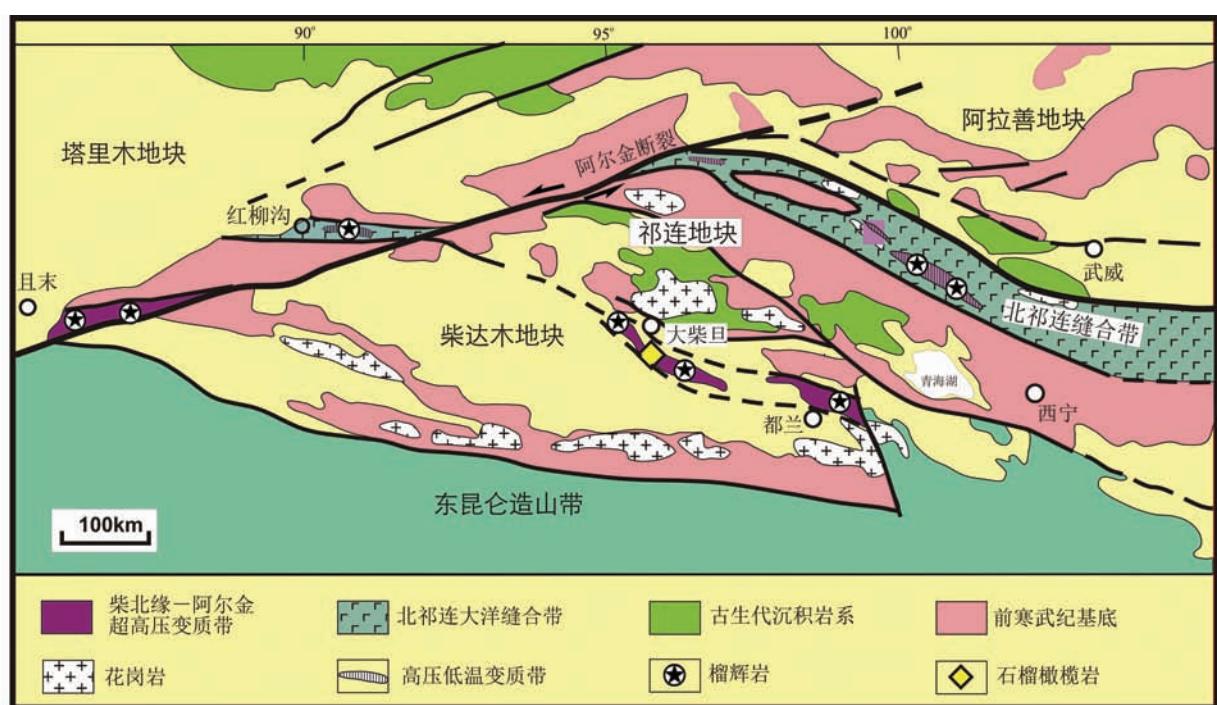


图1 祁连山—柴北缘地区地质简图

Fig. 1 Geological map of the Qilianshan-Qaidam regions

块;(4)柴北缘大陆型超高压变质带;(5)柴达木地块。这些构造单元在西部被北东-南西向阿尔金左行走滑断裂所切,而北祁连山和柴北缘两条高压超高压变质带可以追索到走滑断裂的西部,其中包括南阿尔金地体的榴辉岩和石榴橄榄岩(如,Liu et al., 1997, 2002; Zhang J et al., 2005)、北阿尔金的榴辉岩和蓝片岩(Zhang J et al., 2005, 2007)。两条时代相近、类型不同的高压~超高压变质带的平行展布构成了青藏高原北缘独有的地质特征。

2 北祁连山大洋缝合带的时空演化

北祁连山古大洋缝合带位于中国西北部甘肃、青海两省交界,是世界上三个最为典型的早古生代大洋冷俯冲带之一。如图1所示,其北部为华北地台西端的阿拉善地块,南部为祁连地块和柴北缘超高压变质带。北祁连山缝合带经历了大洋扩张和俯冲,发育沟-弧-盆体系和高压变质带(李春昱等,1978;肖序常等,1978;冯益民和何世平,1995; Xia et al., 2003; Wu et al., 1993; 许志琴等,1994; Song, 1996; 宋述光,1997; 张旗等,1997)。根据目前现有可靠的同位素年龄,北祁连山古大洋岩石圈的生长发育的记录为晚元古代末期到整个寒武纪 560~495Ma (史仁灯等,2004; Tseng et al., 2007)。

低温高压变质岩石组合是北祁连山大洋俯冲缝合带的重要特征。根据产状和变质程度,Wu et al. (1993) 和宋述光(1997) 将北祁连山高压变质岩划分为高级蓝片岩带和低级蓝片岩带。高级蓝片岩带呈3个构造岩片分布于祁连县东西两侧岛弧火山杂岩之中,其延伸长度约100km,以蓝片岩为主构成基质,榴辉岩呈构造透镜体零散分布。高压变质岩的原岩主要有海沟相复理石建造、大洋蛇绿岩碎片(包括蛇纹岩、变质的辉长岩和枕状玄武岩)、硅质岩、大理岩、泥质岩等(详见 Song et al., 2009a)。榴辉岩的地球化学特征表明其原岩是以 MORB、OIB 以及堆晶辉长岩为特征的俯冲洋壳残片(Song et al., 2009a)。榴辉岩中硬柱石包体和假象以及榴辉岩相变质泥质岩中镁纤柱石的发现证明北祁连山是典型的大洋冷俯冲带(Zhang J et al., 2007; Song et al., 2007b; Wei and Song, 2008)。低级蓝片岩带出露于甘肃肃南县境内的九个泉一带,主要为火山岩和少量沉积岩变质的绿纤石-硬柱石-蓝闪石片岩,变质温压条件为: $T = 250 \sim 350^\circ\text{C}$, $P = 0.6 \sim 1.1\text{GPa}$ (Song et al., 2009a; Zhang L et al., 2009)。

2.1 榴辉岩相变质年龄

到目前为止,北祁连山高压变质带中已经报道了5个榴辉岩的锆石SHRIMP年龄(Song et al., 2004a, 2006; Zhang J et al., 2007)。来自百经寺剖面的两个榴辉岩样品分别获得了榴辉岩相变质年龄为 $468 \pm 13\text{Ma}$ (Song et al., 2004b) 和辉长质原岩年龄为 $502 \pm 11\text{Ma}$ (Zhang J et al., 2007)。在

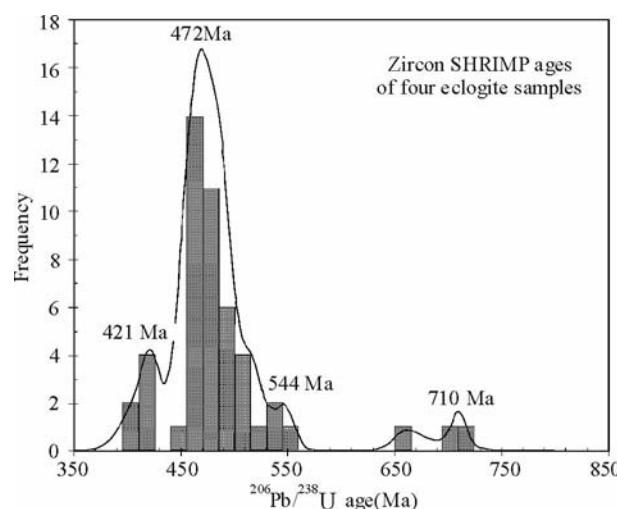


图2 北祁连山缝合带榴辉岩锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ SHRIMP 年龄直方图

Fig. 2 Histogram of apparent $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age of all zircon analyses of eclogites from North Qilian suture zone
Plots generated using ISOPLOT developed by Ludwig (2001)

高压变质带西部(香子沟一带),三个榴辉岩样品分别给出了榴辉岩相变质年龄为 $463 \pm 6\text{Ma}$ (Song et al., 2004b), $477 \pm 16\text{Ma}$ 和 $489 \pm 7\text{Ma}$ (Zhang J et al., 2007)。这些年龄相差大约 26m. y. ,可能反映了相同变质带中不同榴辉岩岩块榴辉岩相变质年龄的差别,并记录了祁连山大洋地壳至少经历了 26m. y. 以上的持续俯冲。

将所有锆石年龄投到直方图上(图2),我们可以获得4个加集年龄峰分别为710~650, 544, 472 和 421Ma。老的锆石核部年龄710~650Ma解释为俯冲前地壳混染(Zhang J et al., 2007),继承岩浆核部544Ma年龄峰代表古“祁连洋”洋壳的形成年龄,与北祁连山蛇绿岩组合中辉长岩的年龄一致(史仁灯等,2004; Tseng et al., 2007)。472Ma年龄峰代表了榴辉岩相变质年龄,而421Ma($404 \sim 424\text{Ma}$)是一明显的年龄峰,但比蓝片岩相变质或冷却年龄年轻约20~30m. y. ,可能代表了强烈造山事件的年龄,与晚志留纪-早泥盆纪磨拉石的形成时代一致,并且与柴北缘大陆型俯冲带的超高压变质时代相同(Song et al., 2005a,b, 2006)。

2.2 蓝片岩相变质年龄

北祁连山高级蓝片岩已报道的蓝闪石和多硅白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄分别为 $448 \pm 11\text{Ma}$ (Liou et al., 1989), $446 \sim 454\text{Ma}$ (Liu et al., 2006) 和 $450 \sim 489\text{Ma}$ 以及 $420 \sim 410\text{Ma}$ (张建新等, 1997)。

通过这些坪年龄的重新评估,我们发现多硅白云母的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄($446 \sim 462\text{Ma}$)比蓝闪石年龄($420 \sim 490\text{Ma}$)更为可靠合理,这些多硅白云母 Ar-Ar 年龄应该代表蓝片岩相主要的变质时代。部分年轻的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄 $420 \sim 400\text{Ma}$

(Wu et al., 1993; 张建新等, 1997) 很可能反映了北祁连山高压变质岩最晚的折返时代, 相当于造山隆升形成早泥盆纪磨拉石的时代。

3 柴北缘大陆型高压-超高压变质带

柴达木盆地北缘, 简称柴北缘超高压变质带位于青藏高原北部, 柴达木与祁连两个前寒武纪结晶基底所组成的地块之间, 由西至东为大柴旦的鱼卡河含榴辉岩地体、绿梁山含石榴橄榄岩地体、锡铁山榴辉岩地体和都兰含榴辉岩地体, 沿 WNW-ESE 方向延伸达 400km, 其西端被阿尔金左行走滑断裂所切。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, 其中花岗质片麻岩占高压-超高压变质带岩石总体积的 80% 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。

榴辉岩和副片麻岩中柯石英及其假象 (Yang et al., 2001, 2002a,b; Song et al., 2003a, b; Zhang G et al., 2009) 以及石榴橄榄岩中金刚石包裹体和石榴石中两种辉石、金红石和钠质闪石出溶片晶等的发现等 (Song et al., 2004a, b, 2005a, b, 2007a, b) 均表明带内至少部分岩石经历了 100 ~ 200km 地幔深度的超高压变质作用, 可与世界其它经典地区 (如大别—苏鲁超高压带) 与大陆碰撞有关的超高压变质带对比。

3.1 鱼卡地体高压-超高压变质年龄

鱼卡榴辉岩地体位于柴北缘超高压变质带的西部鱼卡河一带, 杨经绥等 (1998) 最先报道榴辉岩的存在。Zhang J et al. (2005) 通过单颗粒锆石 TIMS 方法获得鱼卡地体中榴辉岩的年龄为 486 ~ 488 Ma, 而其中多硅白云母和角闪石的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄分别为 466 和 476 Ma。陈丹玲及其合作者 (陈丹玲等, 2005, 2007a, b) 通过激光等离子质谱仪 (LA-ICP-MS) 对鱼卡地体中的榴辉岩和副片麻岩锆石的年代学进行了详细研究, 其结果如表 1 所示, 榴辉岩和副片麻岩的峰期变质年龄为 430 ~ 435 Ma, 在 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄直方图中 (图 3), 所有锆石年龄值在 433 Ma 形成主要的峰值, 代表鱼卡高压-超高压变质地体的峰期变质年龄。

3.2 绿梁山石榴橄榄岩超高压变质年龄

作为大陆型深俯冲带的标志性岩石类型, 石榴橄榄岩在研究大陆深俯冲和壳幔相互作用等方面至关重要 (杨建军等, 1994; Song et al., 2004a, 2005a, b)。柴北缘超高压变质带中石榴橄榄岩主要分布于青海省大柴旦镇以北的绿梁山一带, 以构造岩块产于花岗质片麻岩中。岩石类型主要有: 石榴二辉橄榄岩 (占岩体的 70% ~ 80%)、石榴方辉橄榄岩、

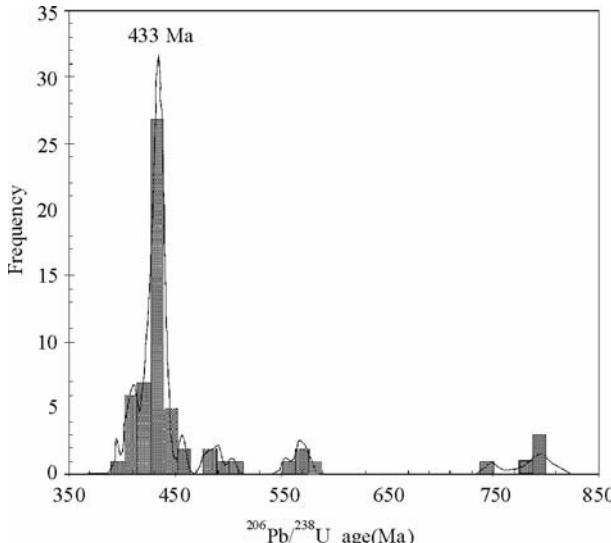


图 3 柴北缘鱼卡榴辉岩锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ SHRIMP 年龄直方图 (据 Chen et al., 2009)

Fig. 3 Histogram of apparent $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age of all zircon SHRIMP analyses from Yuka eclogite, North Qaidam UHP belt (data from Chen et al., 2009)

纯橄岩和石榴辉石岩。前三类岩石互层产出, 石榴辉石岩呈脉状或薄层状。岩石学、矿物成分和地球化学特征证明该石榴橄榄岩的原岩是岛弧环境下高镁岩浆在壳幔过渡带由橄榄石和辉石堆晶的产物 (Song et al., 2007a, 2009b), 并不是直接来自于上地幔的地幔橄榄岩, 或洋壳底部深海橄榄岩 (如 Yang and Powell, 2008)。

石榴二辉橄榄岩的石榴石和橄榄石中发育有大量的出溶片晶。其中, 石榴石的出溶片晶包括高密度的斜方辉石、单斜辉石, 钠质闪石 + 金红石出溶片晶, 说明石榴石的原始成分具有高 Si、高 Ti 和高 Na 的特征。石榴石中辉石的出溶说明柴北缘超高压变质带石榴橄榄岩曾存在超硅石榴石, 而超硅石榴石被认为是大陆岩石圈俯冲到大于 180 ~ 200 km 地幔深度的重要证据。而石榴石中富钠角闪石出溶的意义主要有两个方面: (1) 原始石榴石中含有大量的 OH-, 根据闪石的出溶量估算 OH 的含量可达 1000×10^{-6} , 对于揭示地幔楔物质的含水性以及俯冲带中 H₂O 的赋存状态具重要意义; (2) 原始石榴石中含有高含量的 Na, Ti, 和 Si, 在超高压条件下, $\text{Na} + \text{Ti} (\text{Si}) \rightarrow \text{Ca} + \text{Al}$ 。橄榄石的出溶片晶主要为钛铁矿 ($[\text{Fe}, \text{Mg}] \text{TiO}_3$) 棒状体。结合温压条件计算和锆石中金刚石包裹体的发现等, 我们确定柴北缘石榴橄榄岩的形成压力 $P \geq 7 \text{ GPa}$, 形成深度大于 200 km (Song et al., 2004a, 2005a, b)。

为了确定柴北缘超高压变质的时代, 我们选择了绿梁山石榴橄榄岩岩块中的石榴二辉橄榄岩和含石榴石纯橄岩两个样品进行了锆石的分选和 SHRIMP 定年 (Song et al., 2005b)。阴极发光图像显示锆石具有明显的核-幔-边结构,

表 1 柴北缘超高压变质带的同位素年龄表

Table 1 Isotopic ages of HP-UHP rocks from the North Qaidam UHP belt

位置	岩石	原岩年龄(Ma)	榴辉岩相 变质年龄(Ma)	退化 变质年龄(Ma)	同位素方法	数据来源
鱼卡	榴辉岩	750~800	431~435		LA-ICP-MS	Chen <i>et al.</i> , 2009
	副片麻岩		431~432		LA-ICP-MS	陈丹玲等, 2007b
绿梁山	石榴橄榄岩	456±22	420~423	~400	SHRIMP	Song <i>et al.</i> , 2005b
	Grt-Ky 片麻岩		427±5		LA-ICP-MS	马旭东和陈丹玲, 2006
	退变榴辉岩		448±3 421±5		SHRIMP	张建新等, 2007
锡铁山	榴辉岩	~800	~480(?)		TIMS & SHRIMP	Zhang J <i>et al.</i> , 2005
	变基性岩 (榴辉岩)		452±12 430±4		SHRIMP	Zhang J <i>et al.</i> , 2009
	Grt-Ky 片麻岩		451~461 423±12	409±12		
都兰 野马滩	榴辉岩		457~458		Sm-Nd 等时线	Song <i>et al.</i> , 2003b
	榴辉岩		457±7 ~426		SHRIMP	Song <i>et al.</i> , 2006
	榴辉岩		422±4.3, 432.5±5, 442~449		SHRIMP	Mattinson <i>et al.</i> , 2006
都兰 沙柳河	柯石英片麻岩		423±6	403±7	SHRIMP	Song <i>et al.</i> , 2006
	Grt-Ky 片麻岩		426±4 430±5		SHRIMP	Mattinson <i>et al.</i> , 2009
	花岗片麻岩	930~1100		400	⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar	Song <i>et al.</i> , 2006
都兰 沙柳河	蓝晶石榴辉岩	500~544	445±7		SHRIMP	Zhang G <i>et al.</i> , 2008

其核部发育岩浆结晶的振荡环带,说明其原岩是岩浆结晶的产物,而幔部和边部是变质过程中生长或受流体改造。锆石 SHRIMP 定年结果显示石榴二辉橄榄岩中锆石主要由四组年龄(图 4a):(a) 具岩浆结构的核部年龄为 457±22Ma, 是与早期大洋俯冲有关的高镁熔体结晶的产物;(b) 锆石幔部具有石榴石、金刚石、辉石等包裹体,其 11 个测点的平均年龄为 423±5Ma, 代表大陆碰撞过程中约 150~200km 深度条件下超高压变质作用形成的;(c) 锆石边部平均年龄为 397±6Ma, 代表折返过程中退化变质年龄;(d) 最外部的年龄为 349~368Ma, 可能为流体改造的结果,可以解释为造山期后热事件的叠加。形态学和阴极发光图像显示纯橄岩和石榴辉石岩的锆石是变质成因的,其内部结构非常均匀。部分锆石具有与石榴二辉橄榄岩锆石核部年龄一致的残核。石榴纯橄岩锆石的加权平均年龄为 420±5Ma, 在直方图(图 4b)中峰值年龄为 421Ma, 与石榴二辉橄榄岩锆石的幔部年龄吻合,并与都兰地体含柯石英泥质片麻岩锆石的年龄(Song *et al.*, 2006)一致,代表陆壳俯冲到约 200 千米发生变质的年龄。

张建新等(2007)在绿梁山退化变质榴辉岩(基性麻粒岩)获得 448±3Ma 和 421±5Ma 两组年龄,但作者将其分别解释为榴辉岩之后高压麻粒岩相变质和低压麻粒岩相变质

的年龄。而作者确定高压麻粒岩的根据是后生合晶结构的 Cpx+Pl+Qtz (+Grt) 组合。但该组合不能称之为高压麻粒岩,而只是一种绿辉石降压分解的产物,这种现象在所有大陆型超高压变质带榴辉岩中广泛发育。锆石应该主要在榴辉岩相进化变质期间生长的,因此,这些年龄应该代表高压-超高压变质年龄。

3.3 锡铁山榴辉岩地体变质年龄

锡铁山地体中,榴辉岩岩块呈透镜状分布于花岗质和泥质片麻岩中。大部分榴辉岩岩块都经历了强烈的角闪岩相退化变质叠加改造。地球化学分析表明榴辉岩的原岩具有 MORB 特征(孟繁聪等, 2003; Yang *et al.*, 2006)。在锡铁山地体中零星出露的不含石榴石的蛇纹岩岩块与榴辉岩岩块共生,可能代表古大洋蛇绿岩的碎片。虽然 Zhang J *et al.* (2005) 对锡铁山榴辉岩及其围岩的年代学进行了研究,但获得榴辉岩的变质年龄不甚理想,为 ~480Ma。最近,Zhang J *et al.* (2009) 通过石榴石-蓝晶石片麻岩和变质基性岩锆石年龄的进一步研究,分别获得了 451~461Ma、423~430Ma 和 409Ma 三组年龄,与都兰超高压地体的年龄谱一致 (Song *et al.*, 2006; Mattinson *et al.*, 2006)。作者将第一组年龄解

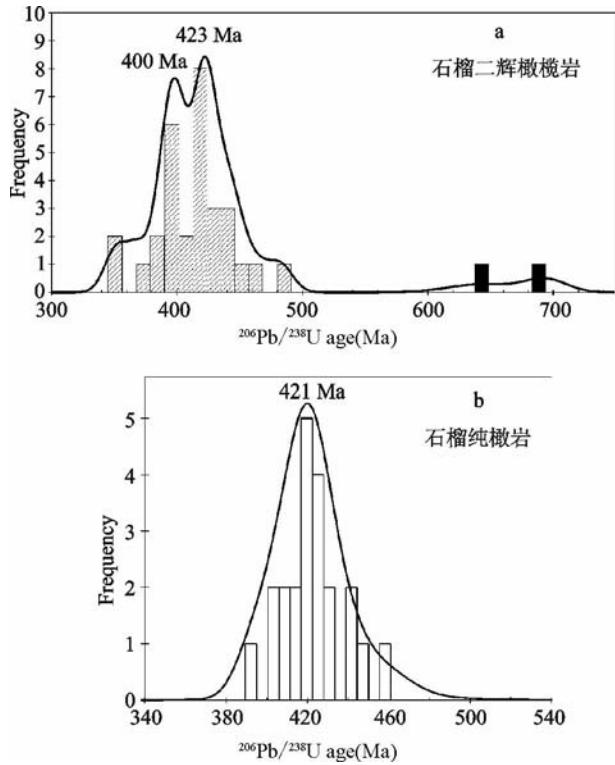


图4 绿梁山石榴橄榄岩锆石U-Pb年龄直方图(数据
据Song et al., 2005b)

Fig. 4 Histogram of apparent zircon $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age of garnet peridotite from Luliangshan, North Qaidam UHP belt (data from Song et al., 2005b)

释为高压麻粒岩相退变质年龄(锆石中含石榴石和金红石包裹体),将第二组年龄解释为低压麻粒岩相-高角闪岩相退化变质叠加年龄。但这种解释与鱼卡榴辉岩地体和都兰榴辉岩地体的年龄结构相矛盾。如前所述,变基性岩(退变榴辉岩)中交互生长的单斜辉石-斜长石组合为后生合晶,系绿辉石降压过程中自身分解的产物,与石榴石之间并不平衡,不能用后生合晶结构的Cpx+Pl与Grt进行温压计算。锆石的生长主要发生在进化的榴辉岩相变质过程中,其年龄应代表榴辉岩相变质年龄而不是角闪岩相改造年龄。对于泥质片麻岩,白云母是稳定矿物,没有出现 Al_2SiO_5 +钾长石组合,不应该代表高角闪岩相和麻粒岩相变质。黑云母与石榴石之间也是不平衡的,其温度计算意义不大,而且蓝晶石退化变质形成夕线石可以发生在低角闪岩相。因此,与绿梁山相同,451~461 Ma 和 423~430 Ma 两组年龄应分别代表锡铁山榴辉岩地体的高压和超高压变质年龄。

3.4 都兰榴辉岩地体变质年龄

都兰榴辉岩地体位于都兰县境内,是迄今为止柴北缘(包括南阿尔金)唯一发现柯石英包裹体的超高压地体(Yang et al., 2000, 2001; Song et al., 2005b; Zhang et al., 2008, 2009)。根据岩石学、矿物学及地球化学的特征,Song et al. (2003a) 将都兰超高压变质地体划分为南、北两带(图2),岩石组合主要由榴辉岩、石榴角闪岩(退变榴辉岩),正片麻岩和副片麻岩,以及少量大理岩和超基性岩等组成,其中花岗质片麻岩占整个变质地体的70%~80%。榴辉岩的典型矿物组合为Grt+Omp+Phn+Rt和Grt+Omp+Ky+Rt±Phn。石榴石和绿辉石中透长石+石英包裹体、柯石英假象以及绿辉石中大量石英出溶片晶的发现表明都兰榴辉岩峰期变质条件位于柯石英的稳定域,与Grt-Omp-Phn温压计计算的温压条件($P=2.8\sim3.3\text{GPa}$, $T=620\sim740^\circ\text{C}$)一致。

在都兰北带野马滩剖面和沙柳河剖面中,块状榴辉岩、条带状堆晶辉长岩变质的蓝晶石榴辉岩与蛇纹石化方辉橄榄岩以及和含石榴石辉石岩构成一套从地幔橄榄岩到堆晶岩到玄武岩较为完整的蛇绿岩组合(Song et al., 2003b, 2006, 2009a, b; 张贵宾等, 2005; Zhang G et al., 2008, 2009)。方辉橄榄岩的岩石学和矿物学特征证明是大洋地壳底部的深海地幔橄榄岩,与绿梁山石榴橄榄岩有着本质的不同(Song et al., 2009)。地球化学分析表明都兰块状榴辉岩的原岩包括LREE亏损的N-MORB, LREE富集的E-MORB以及成分上类似海山的洋岛玄武岩的(OIB),与北祁连山榴辉岩的地球化学特征基本一致,反映柴北缘大陆型超高压变质带中榴辉岩的原岩部分来自早期俯冲的洋壳。

3.4.1 野马滩榴辉岩和柯石英片麻岩变质年龄

利用阴极发光和SHRIMP定年技术,我们对都兰超高压变质地体的榴辉岩2D155的锆石进行了详细研究(Song et al., 2006)。锆石的形态呈卵圆形,粒度为80~200 μm 。阴极发光图像反映锆石是典型的变质成因,15颗锆石SHRIMP测试所获得的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄区间为440~482 Ma,其加权平均年龄为 $458\pm7\text{ Ma}$ (MSWD=0.97),与Song et al.(2003b)报道的两个样品Sm-Nd全岩~矿物内部等时线年龄($458\pm10\text{ Ma}$ 和 $459\pm2.6\text{ Ma}$)相同,锆石中石榴石+绿辉石包裹体的存在证明了榴辉岩相变质。该年龄与北祁连山榴辉岩的形成年龄基本一致,说明二者具有相同的变质时代。含柯石英等超高压变质矿物的幔部的年龄为 $423\pm7\text{ Ma}$,与上述石榴二辉橄榄岩和石榴纯橄岩锆石变质年龄相同,应代表大陆地壳物质深俯冲发生超高压变质的年龄,比榴辉岩的变质时代年轻约30 Myr。

与此同时,Mattinson et al. (2006)进行了3个野马滩榴辉岩样品的锆石SHRIMP定年,其中一个样品从锆石核到边的年龄数据分别获得了410~474 Ma(核和幔的加权平均为 $452\pm4\text{ Ma}$),一个样品为418~459 Ma(加权平均 $442\pm4\text{ Ma}$ 和 $432.5\pm5\text{ Ma}$ 两组),第3个样品为415~437 Ma(加权平均 $423\pm4\text{ Ma}$)等年龄数据。从整体数据来看,这些年龄可以划分为两组,即442~452 Ma和432~423 Ma,但作者将这些年龄数据解释为一个长时间榴辉岩相变质的事件。将Song et al. (2006)和Mattinson et al. (2006)所有榴辉岩年龄数

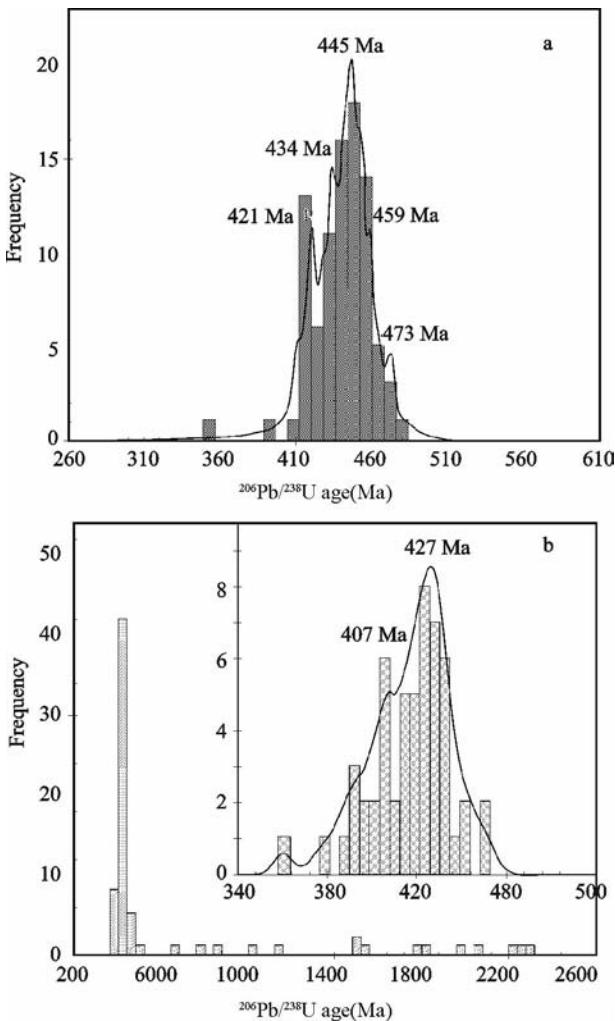


图5 都兰野马滩榴辉岩(a)和含柯石英片麻岩(b)锆石U-Pb年龄直方图(数据据Song et al., 2006; Mattinson et al., 2006, 2009)

Fig. 5 Histograms of zircon apparent $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages of eclogite and ceosite-bearing paragneiss from Dulan terrane (data from Song et al., 2006; Mattinson et al., 2006, 2009)

据进行直方图分析(图5a),我们可以发现,都兰野马滩榴辉岩的锆石年龄在443Ma和421Ma的位置上形成两个主要的峰值,在两个主峰之间出现434Ma次峰,在大于443Ma峰值的一侧出现了459Ma和473Ma两个次峰。因此,我们可以将锆石的生长期划分为473~443Ma和434~421Ma两个阶段,第二个阶段与含柯石英片麻岩的超高压变质年龄一致。

对于含柯石英片麻岩(石榴石-蓝晶石白云母片岩),Mattinson et al. (2009)虽然在锆石中没有发现柯石英,但也获得了 426 ± 4 和 430 ± 5 Ma两个年龄数据,与Song et al. (2006)报道的含柯石英锆石的年龄一致。在所有副片麻岩锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄的直方图上(图5b)形成426Ma主峰和407Ma次峰,分别代表超高压变质年龄和退化变质年龄。

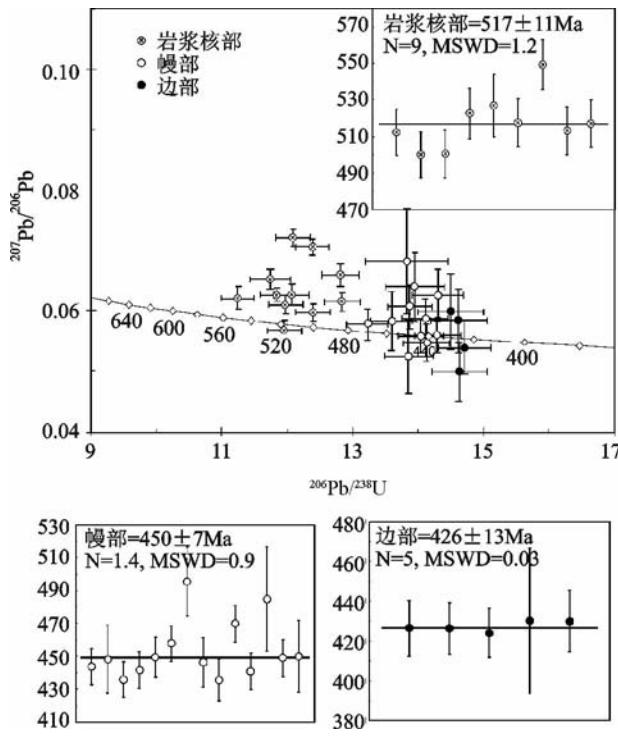


图6 都兰沙柳河蓝晶石榴辉岩的年龄图解(数据据Zhang G et al., 2008)

Fig. 6 Tera-Wasserburg (TW) diagrams for zircons from Shaliuhe kyanite eclogite (data from Zhang G et al., 2008)

花岗质片麻岩中白云母的Ar-Ar年龄为401Ma (Song et al., 2006),代表超高压变质地体折返到中浅部地壳的冷却年龄。

3.4.2 沙柳河蛇绿岩的原岩和榴辉岩相变质年龄

如前所述,沙柳河剖面中,蛇纹石化方辉橄榄岩、条带状石榴橄榄辉石岩、条带状蓝晶石榴辉岩和块状榴辉岩构成了完整的蛇绿岩组合。蓝晶石榴辉岩中柯石英的发现(Zhang G et al., 2009)表明该蛇绿岩组合经历了超高压变质作用。Zhang G et al. (2008)报道了沙柳河蓝晶石榴辉岩(变质堆晶辉长岩)的锆石SHRIMP年龄,如图6所示,具有岩浆结晶环带的锆石核部 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 平均年龄为 517 ± 11 Ma,代表古大洋地壳的形成年龄,锆石幔部主要的榴辉岩相变质年龄为 450 ± 7 Ma,而5个锆石边部的年龄为 426 ± 13 Ma,与柯石英片麻岩的变质年龄一致。

4 讨论和结论

4.1 北祁连山大洋冷俯冲和闭合过程

高压低温变质岩和蛇绿岩组合代表了古大洋俯冲缝合带的存在,而硬柱石和纤镁柱石等高含水性矿物只能稳定于很低地温梯度的大洋冷俯冲带环境,而这种环境需要足够大和足够老的大洋岩石圈板块和较快的俯冲速率。因此,古祁

连洋在新元古代到早古生代应该是一规模较大的大洋。高压变质岩的同位素年龄($440 \sim 490\text{ Ma}$)证明古祁连洋经历了至少 50 m.y. 的俯冲过程,也是目前世界上发现的3个最古老的大洋冷俯冲带之一。根据岩石学、地球化学和年代学资料,北祁连山大洋缝合带的构造演化可以划分为4个阶段:(1)新元古代-寒武纪($>560\text{ Ma}$ 至 495 Ma),华北地台与祁连-柴达木地块之间古祁连洋的发育阶段,而祁连-柴达木地块为分离的罗迪尼亞超大陆的碎片(Song *et al.*, 2006);(2)奥陶纪($490 \sim 440\text{ Ma}$),大洋岩石圈从奥陶纪初开始沿约 $6 \sim 7^\circ/\text{km}$ 低温梯度向华北地台俯冲,形成北祁连山蛇绿岩、岛弧岩浆岩带和高压低温变质带,大洋在奥陶纪末期闭合;(3)志留纪($440 \sim 420\text{ Ma}$)形成残余海盆相复理石建造,此阶段是相对平静期,无大规模岩浆活动和造山;(4)早泥盆纪($420 \sim 400\text{ Ma}$),强烈造山并形成磨拉石建造,但在北祁连地区没有相应的同造山岩浆作用发生,中晚泥盆世之后为剥蚀夷平期,形成稳定的盖层沉积。

4.2 柴北缘从大洋俯冲到大陆俯冲碰撞和折返造山的演化过程

柴北缘超高压带主要由正片麻岩、副片麻岩及其少量榴辉岩和石榴橄榄岩透镜体组成,该岩石组合说明柴北缘超高压带是典型的大陆型(或阿尔卑斯型)大陆碰撞带,并且可以与世界其它超高压变质带,如我国东部地区的大别-苏鲁超高压带、挪威 West Gneiss Region 超高压地体等相对比。

岩石学、地球化学和同位素年代学表明,柴北缘超高压变质带中榴辉岩的原岩分别来自洋壳和陆壳两种环境,其形成时代有明显差别。已发表关于柴北缘高压-超高压变质岩的比较可靠的同位素年龄如表1所示。在都兰超高压地体中,岩石学和地球化学特征证明有大洋蛇绿岩组合的存在(Song *et al.*, 2003b, 2006, 2009a,b; Zhang G *et al.*, 2008, 2009),其堆晶辉长岩变质的蓝晶石榴辉岩锆石的岩浆核部年龄为 $517 \pm 11\text{ Ma}$,代表俯冲的大洋地壳的形成年龄,与北祁连山蛇绿岩的年龄一致。榴辉岩锆石的变质年龄可以分为两个阶段,早期阶段包括野马滩榴辉岩锆石 SHRIMP 年龄 $458 \pm 7\text{ Ma}$ (Song *et al.*, 2006)、 $442 \sim 449\text{ Ma}$ (Mattinson *et al.*, 2006)以及矿物-全岩 Sm-Nd 内部等时线年龄($458 \pm 10\text{ Ma}$, $459 \pm 2.6\text{ Ma}$, Song *et al.*, 2003b),在锆石年龄直方图上(图5a), $443 \sim 473\text{ Ma}$ 的年龄与北祁连山洋壳低温/高压岩石的变质年龄 $440 \sim 490\text{ Ma}$ 近于一致,代表了柴北缘早期大洋地壳俯冲变质的时代。都兰榴辉岩晚期阶段变质年龄为 $434 \sim 421\text{ Ma}$,与含柯石英片麻岩和石榴橄榄岩锆石的 SHRIMP 峰期变质年龄 $423 \sim 420\text{ Ma}$ 一致,该组年龄比早期阶段最低年龄(443 Ma)年轻约 20 m.y. ,代表大陆地壳岩石俯冲到 $100 \sim 200\text{ km}$ 的峰期超高压变质年龄。在鱼卡地体(可能包括部分锡铁山地体),大部分榴辉岩的原岩年龄为 $750 \sim 800\text{ Ma}$ (Chen *et al.*, 2009; Zhang J *et al.*, 2005),而且具有大陆溢流玄武岩的地球化学特征(Chen *et al.*, 2009)。

这些榴辉岩的峰期变质年龄为 $430 \sim 435\text{ Ma}$,略大于含柯石英片麻岩和石榴橄榄岩锆石的 SHRIMP 峰期变质年龄 $423 \sim 420\text{ Ma}$,但没有大于 440 Ma 的变质年龄,可能代表大陆俯冲的较早阶段榴辉岩相变质(亚柯石英稳定域)的时代。

含柯石英副片麻岩锆石的统计年龄(图5b)显示 426 Ma 为其主要的峰期变质年龄,而 407 Ma 和 398 Ma 则分别代表了角闪岩相(部分麻粒岩相)退化变质时代和折返到地壳浅部的时代,后者与花岗片麻岩中白云母的 Ar-Ar 年龄一致。

综上所述,柴北缘超高压变质带的构造演化历史可以划分为5个阶段:(1)大洋地壳发育阶段,形成 $500 \sim 540\text{ Ma}$ 的蛇绿岩,与北祁连山蛇绿岩时代一致;(2)大洋俯冲阶段,并发生 $>460 \sim 440\text{ Ma}$ 的榴辉岩相变质;(3)该大洋大约在 440 Ma 闭合,祁连-柴达木地块与华北克拉通发生碰撞,在俯冲大洋岩石圈的拖曳作用下,祁连-柴达木大陆地块开始向华北克拉通之下俯冲,并在 $420 \sim 430\text{ Ma}$ 到达约 200 km 的深度,发生超高压变质作用;(4)在 420 Ma 之后,俯冲的大洋岩石圈与大陆岩石圈断离,大陆地壳开始折返,发生隆升和造山,以及与造山有关的麻粒岩相~角闪岩相变质作用,并形成广泛发育的早泥盆纪磨拉石建造。

4.3 大洋俯冲和大陆俯冲碰撞的关系

作为典型的早古生代大洋型俯冲缝合带,北祁连山记录了从大洋岩石圈俯冲、消亡和闭合到造山的过程。然而,早泥盆纪的隆升造山过程虽然有标志性的磨拉石建造,但带内并没有造成大陆地壳的加厚、中高温变质和深熔岩浆岩的形成。一般来说,大洋俯冲到闭合的过程能够形成岩浆弧,但不会发生大陆的强烈造山和隆升,如果大洋的两侧或四周都发育俯冲带的话(如现今的太平洋板块),大洋消亡之后,两个大陆之间就不会有陆壳的深俯及由折返带来的“超高压变质带”,也就不会发生像喜马拉雅造山带那样的强烈挤压造山作用,磨拉石建造和同碰撞-碰撞后岩浆活动就不发育。北祁连山缝合带发育大量的岛弧火山岩(并形成硫化物多金属矿床成矿带)和 I型花岗岩,与大洋俯冲有密切关系。然而,北祁连山在志留纪以后(即 $\leq 440\text{ Ma}$)岩浆活动基本停止,在晚志留—早泥盆隆升造山过程中没有相应的岩浆作用,这种隆升造山机制从其自身来说并不清楚。

如前所示,大洋冷俯冲必须有足够大和足够老的大洋岩石圈板块,而大陆地壳发生深俯冲则必须有前期的俯冲大洋岩石圈的拖曳作用。对于北祁连山大洋型缝合带和柴北缘大陆型碰撞带之间最近距离小于 300 km ,由于印度板块向北的挤压作用和阿尔金左行走滑断裂的影响,造成两条变质带的旋转和距离增大,而在阿尔金断裂的西侧,两条带的垂直距离小于 100 km 。在此如此近的距离内出现时代相同的两个大洋是令人费解的。Yang *et al.* (2002b)认为是两条互不相关的俯冲带,而 Song *et al.* (2006)推断北祁连山低温高压变质带和柴北缘超高压变质带是一个板块俯冲带不同阶段的产物,即柴北缘超高压带是北祁连山大洋俯冲消亡之后柴达

木-祁连大陆向华北克拉通俯冲碰撞的结果。其关键性证据主要有以下几个方面:(1)两个带中大洋蛇绿岩组合的形成时代相同;(2)柴北缘洋壳榴辉岩相变质的年龄与北祁连山高压变质岩的时代相同;(3)前寒武纪基底的同位素年代学研究表明北祁连山缝合带是两个大陆板块的主要边界(见Song *et al.*, 2006, 2009a,b),该边界分隔了北部以早前寒武纪基底为主的阿拉善-敦煌地块和南部以晚前寒武纪基底为主的祁连-柴达木地块。然而,柴北缘超高压变质带两侧的前寒武纪基底并不存在重要差别,暗示柴达木地块和祁连地块属于一个克拉通,其基底年龄和沉积盖层特征反映与扬子克拉通有亲缘性,可能是Rodinia超大陆裂解的碎块,而柴北缘超高压变质带现在所处的位置并不代表两个大陆的汇聚边界。片麻岩锆石残核年龄反映超高压岩石是祁连-柴达木克拉通基底岩石向北俯冲到华北克拉通之下变质的产物。因此,我们可能推断,北祁连山泥盆纪的造山作用与柴北缘大陆碰撞和隆升有关。

谨以此文献给卢良兆教授八十寿辰,祝先生健康长寿!在长春地质学院学习期间,第一作者得到了卢老师的指导和帮助,受益匪浅,在此深表谢意。

References

- Chen DL, Sun Y, Liu L, Luo JH, Wang Y and Zhang AD. 2005. The metamorphic evolution of the Yuka eclogite in the North Qaidam, NW China: Evidences from the compositional zonation of garnet and reaction texture in the rock. *Acta Petrologica Sinica*, 21: 1039 – 1048 (in Chinese with English abstract)
- Chen DL, Sun Y and Liu L. 2007a. In situ LA-ICP-MS zircon U-Pb age of ultrahigh-pressure eclogites in the Yukahe area, northern margin of the Qaidam basin. *Science in China (Series D)*, 37 (Suppl.): 279 – 287 (in Chinese)
- Chen DL, Sun Y and Liu L. 2007b. The metamorphic ages of the country rock of the Yukahe eclogites in the North Qaidam and its geological significance. *Earth Science Frontiers*, 14: 108 – 116 (in Chinese with English abstract)
- Chen DL, Liu L and Sun Y. 2009. Geochemistry and zircon U-Pb dating and its implications of the Yukahe HP/UHP terrane, the North Qaidam, NW China. *Journal of Asian Earth Sciences*, in press
- Davies JH and von Blanckenburg F. 1995. Slab breakup: A model of lithosphere detachment and its test in the magmatism and deformation of collisional orogens. *Earth and Planetary Science Letters*, 129: 85 – 102
- Ernst WG. 1972. Occurrence and mineralogical evolution of blueschist belts with time. *American Journal of Science*, 272: 657 – 668
- Ernst WG. 2001. Subduction, ultrahigh-pressure metamorphism, and regurgitation of buoyant crustal slices: Implications for arcs and continental growth. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 127: 253 – 275
- Feng YM and He SP. 1995. Research for geology and geochemistry of several ophiolites in the North Qilian Mountains, China. *Geological Review*, 40: 252 – 264 (in Chinese with English abstract)
- Li CY, Liu YW, Zhu BC, Feng YM and Wu HQ. 1978. Structural evolutions of Qinling and Qilian. In: Editorial Office of Chinese Geological Bureau (eds.). *Scientific Papers on Geology for International Exchange*. Beijing: Geological Publishing House, 174 – 189 (in Chinese with English abstract)
- Liou JG, Wang X and Coleman RG. 1989. Blueschists in major suture zones of China. *Tectonics*, 8: 609 – 619
- Liu L, Che ZC and Luo JH. 1997. Recognition and implication of eclogite in the western Altun Mountains, Xinjiang. *Chinese Science Bulletin*, 42: 931 – 934
- Liu L, Sun Y and Xiao PX. 2002. Discovery of ultrahigh-pressure magnesite-bearing garnet lherzolite (>3.8 GPa) in the Altyn Tagh, Northwest China. *Chinese Science Bulletin*, 47: 881 – 886
- Liu YJ, Neubauer F, Gensler J, Takasu A, Ge XH and Handler R. 2006. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages of blueschist facies pelitic schists from Qingshuiogou in the Northern Qilian Mountains, western China. *Island Arc*, 15: 187 – 198
- Ludwig KR. 2001. ISOPLOT 2.49: A geochronological toolkit for Microsoft excel. Berkeley Geochronology Centre. Special Publication, 1a, 58
- Ma XD and Chen DL. 2006. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of quartz-feldspathic gneisses: The country rocks of ultrahigh-pressure metamorphic rocks on the northern margin of the Qaidam basin, Northwest China. *Geological Bulletin of China*, 25: 99 – 103 (in Chinese with English abstract)
- Maruyama S, Liou J G and Terabayashi M. 1996. Blueschists and eclogites of the world and their exhumation. *International Geology Review*, 38: 485 – 594
- Mattinson CG, Wooden JL, Liou JG, Bird DK and Wu CL. 2006. Age and duration of eclogite-facies metamorphism, North Qaidam HP/UHP terrane, western China. *American Journal of Science*, 306: 683 – 711
- Mattinson CG, Wooden JL, Zhang JX and Bird DK. 2009. Paragneiss zircon geochronology and trace element geochemistry, North Qaidam HP/UHP terrane, western China. *Journal of Asian Earth Sciences*, in press
- Meng FC, Zhang JX, Yang JS and Xu ZQ. 2003. Geochemical characteristics of eclogites in Xitieshan area, North Qaidam of northwestern China. *Acta Petrologica Sinica*, 19: 435 – 442 (in Chinese with English abstract)
- Shi RD, Yang JS, Wu CL and Wooden J. 2004. First SHRIMP dating for the formation of the Late Sinian Yushigou ophiolite, North Qilian Mountains. *Acta Geologica Sinica*, 78: 649 – 657 (in Chinese with English abstract)
- Song SG. 1996. Metamorphic geology of blueschists, eclogites and ophiolites in the North Qilian Mountains. 30th IGC Field Trip Guide T392. Beijing: Geological Publishing House, 40
- Song SG. 1997. Tectonic evolution of subductive complex belts in the North Qilian Mountains. *Advance in Earth Sciences*, 12: 351 – 365 (in Chinese with English abstract)
- Song SG, Yang JS, Liou JG, Wu CL, Shi RD and Xu ZQ. 2003a. Petrology, geochemistry and isotopic ages of eclogites in the Dulan UHPM terrane, the North Qaidam, NW China. *Lithos*, 70: 195 – 211
- Song SG, Yang JS, Xu ZQ, Liou JG and Shi RD. 2003b. Metamorphic evolution of the coesite-bearing ultrahigh-pressure terrane in the North Qaidam, northern Tibet, NW China. *Journal of Metamorphic Geology*, 21: 631 – 644
- Song SG, Zhang LF and Niu YL. 2004a. Ultra-deep origin of garnet peridotite from the North Qaidam ultrahigh-pressure belt, Northern Tibetan Plateau, NW China. *American Mineralogist*, 89: 1330 – 1336
- Song SG, Zhang LF, Niu YL, Song B, Zhang GB and Wang QJ. 2004b. Zircon U-Pb SHRIMP ages of eclogites from the North Qilian Mountains, NW China and their tectonic implication. *Chinese Science Bulletin*, 49: 848 – 852

- Song SG, Zhang LF, Chen J, Liou JG and Niu Y. 2005a. Sodium amphibole exsolutions in garnet from garnet-peridotite, North Qaidam UHPM belt, NW China: Implications for ultradepth-origin and hydroxyl defects in mantle garnets. *American Mineralogist*, 90: 814 – 820
- Song SG, Zhang LF, Niu YL, Su L, Jian P and Liu DY. 2005b. Geochronology of diamond-bearing zircons from garnet-peridotite in the North Qaidam UHPM belt, North Tibetan Plateau: A record of complex histories associated with continental collision. *Earth Planetary Science Letters*, 234: 99 – 118
- Song SG, Zhang LF, Niu YL, Su L, Song B and Liu DY. 2006. Evolution from oceanic subduction to continental collision: A case study of the northern Tibetan Plateau inferred from geochemical and geochronological data. *Journal of Petrology*, 47: 435 – 455
- Song SG, Su L, Niu Y and Zhang LF. 2007a. Petrological and geochemical constraints on the origin of garnet peridotite in the North Qaidam ultrahigh-pressure metamorphic belt, northwestern China. *Lithos*, 96: 243 – 265
- Song SG, Zhang LF, Niu YL, Wei CJ, Liou JG and Shu GM. 2007b. 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. *Journal of Metamorphic Geology*, 25: 547 – 563
- Song SG, Niu Y, Zhang LF, Wei CJ, Liou JG and Su L. 2009a. Tectonic evolution of Early Paleozoic HP metamorphic rocks in the North Qilian Mountains, NW China: New perspectives. *Journal of Asian Earth Science*, 35: 334 – 353
- Song SG, Su L, Niu Y, Zhang GB and Zhang LF. 2009b. Two types of peridotite in North Qaidam UHPM belt and their tectonic implications for oceanic and continental subduction: A review. *Journal of Asian Earth Science*, 35: 285 – 297
- Song SG and Yang JS. 2001. Sanidine + quartz inclusions in Dulan eclogites: Evidence for UHP metamorphism on the north margin of the Qaidam basin, NW China. *Acta Geologica Sinica*, 75 (2): 180 – 185 (in Chinese)
- Tseng CY, Yang HJ, Yang HY, Liu DY, Tsai CL, Wu HQ and Zuo GC. 2007. The Dongcaoho ophiolite from the North Qilian Mountains: A fossil oceanic crust of the Paleo-Qilian Ocean. *Chinese Science Bulletin*, 52: 2390 – 2401
- Wei CJ and Song SG. 2008. Chloritoid-glaucophane schist in the north Qilian orogen, NW China: Phase equilibria and *P-T* path from garnet zonation. *Journal of Metamorphic Geology*, 26: 301 – 316
- Wu HQ, Feng YM and Song SG. 1993. Metamorphism and deformation of blueschist belts and their tectonic implications, North Qilian Mountains, China. *Journal of Metamorphic Geology*, 11: 523 – 536
- Xia LQ, Xia ZC and Xu XY. 2003. Magmagenesis in the Ordovician in back basins of the northern Qilian Mountains, China. *Geological Society of America Bulletin*, 115: 1510 – 1522
- Xiao XC, Chen G and Zhu ZZ. 1978. A preliminary study on the tectonics of ancient ophiolites in the Qilian Mountain, Northwest China. *Acta Geologica Sinica*, 54: 281 – 295 (in Chinese with English abstract)
- Xu ZQ, Xu HF, Zhang JX, Li HB, Zhu ZZ, Qu JC and Yang KC. 1994. The Zhoulangnanshan Caledonian subductive complex in the Northern Qilian Mountains and its dynamics. *Acta Geologica Sinica*, 68: 1 – 15 (in Chinese with English abstract)
- Yang JJ, Zhu H, Deng JF, Zhou TZ and Lai SC. 1994. Discovery of garnet-peridotite at the northern margin of the Qaidam Basin and its significance. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 13: 97 – 105 (in Chinese with English abstract)
- Yang JJ and Powell R. 2008. Ultrahigh-pressure garnet peridotites from the devolatilization of sea-floor hydrated ultramafic rocks. *Journal of Metamorphic Geology*, 26: 695 – 716
- Yang JS, Xu ZQ, Li HB, Wu CL, Cui JW, Zhang JX and Chen W. 1998. Discovery of eclogite at northern margin of Qaidam basin, NW China. *Chinese Science Bulletin*, 43: 1755 – 1760
- Yang JS, Xu ZQ, Song SG, Wu CL, Shi RD, Zhang JX, Wan YS, Li H, Jin X and Jolivet M. 2000. Discovery of eclogite in Dulan, Qinghai Province and its significance for studying the HP-UHP metamorphic belt along the Central Orogenic Belt of China. *Acta Geologica Sinica*, 74: 156 – 168 (in Chinese with English abstract)
- Yang JS, Xu ZQ, Song SG, Zhang J, Wu C, Shi R, Li H and Brunel M. 2001. Discovery of coesite in the North Qaidam Early Palaeozoic ultrahigh pressure (UHP) metamorphic belt, NW China. *Comptes Rendus De L Academie Des Sciences Serie II Fascicule A-Sciences De La Terre et Des Planetes*, 333 (11): 719 – 724
- Yang JS, Xu ZQ, Song SG, Zhang JX, Wu CL, Shi RD, Li HB, Brunel M and Tapponnier P. 2002a. Subduction of continental crust in the Early Paleozoic North Qaidam ultrahigh-pressure metamorphism belt, NW China: Evidence from the discovery of coesite in the belt. *Acta Geologica Sinica*, 76: 63 – 68
- Yang JS, Xu ZQ, Zhang JX, Song SG, Wu CL, Shi RD, Li HB and Brunel M. 2002b. Early Palaeozoic North Qaidam UHP metamorphic belt on the north-eastern Tibetan plateau and a paired subduction model. *Terra Nova*, 14 (5): 397 – 404
- Yang JS, Wu CL, Zhang JX, Shi RD, Meng FC, Wooden J and Yang HY. 2006. Protolith of eclogites in the north Qaidam and Altun UHP terrane, NW China: Earlier oceanic crust? *Journal of Asian Earth Sciences*, 28: 185 – 204
- Yang JS, Song SG, Xu ZQ, Wu CL, Shi RD, Zhang JX, Li HB, Wang YS, Liu Y, Qiu HJ, Liu FL and Maruyama S. 2001. Discovery of coesite in the north Qaidam Early Paleozoic ultrahigh-pressure (UHP) metamorphic belt, NW China. *Acta Geologica Sinica*, 75 (2): 175 – 179 (in Chinese)
- Zhang GB, Song SG, Zhang LF, Niu Y and Shu GM. 2005. Ophiolite-type mantle peridotite from Shaliuhe, North Qaidam UHPM belt, NW China and its tectonic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 21: 1049 – 1058 (in Chinese with English abstract)
- Zhang GB, Song SG, Zhang LF and Niu Y. 2008. The subducted oceanic crust within continental-type UHP metamorphic belt in the North Qaidam, NW China: Evidence from petrology, geochemistry and geochronology. *Lithos*, 104: 99 – 108
- Zhang GB, Zhang LF, Song SG and Niu YL. 2009. UHP metamorphic evolution and SHRIMP dating of meta-ophiolitic gabbro in the North Qaidam, NW China. *Journal of Asian Earth Sciences*, doi: 10.1016/j.jseas.2008.11.013
- Zhang JX, Xu ZQ, Chen W and Xu HF. 1997. A tentative discussion on the ages of the subduction: Accretionary complex/volcanic arcs in the middle sector of North Qilian Mountain. *Acta Petrologica et Mineralogica* 16: 112 – 119 (in Chinese with English abstract)
- Zhang JX, Yang JS, Mattinson CG, Xu ZQ, Meng FC and Shi RD. 2005. Two contrasting eclogite cooling histories, North Qaidam HP/UHP terrane, western China: Petrological and isotopic constraints. *Lithos*, 84: 51 – 76
- Zhang JX, Meng FC and Wan YS. 2007. A cold Early Palaeozoic subduction zone in the North Qilian Mountains, NW China: Petrological and U-Pb geochronological constraints. *Journal of Metamorphic Geology*, 25: 285 – 304
- Zhang JX, Meng FC, Yu SY and Qi XX. 2007. Metamorphic history recorded in high pressure mafic granulites in the Luliangshan Mountains to the north of Qaidam Basin, northwest China: Evidence from petrology and zircon SHRIMP geochronology. *Earth Science Frontiers*, 14: 85 – 97 (in Chinese with English abstract)
- Zhang JX, Mattinson CG, Meng FC, Yang HJ and Wan YS. 2009. U-Pb geochronology of paragneisses and metabasite in the Xitieshan area, north Qaidam Mountains, western China: Constraints on the exhumation of HP/UHP metamorphic rocks. *Journal of Asian Earth Sciences*, doi: 10.1016/j.jseas.2008.08.008

Zhang LF, Wang QJ and Song SG. 2009. Lawsonite blueschist in Northern Qilian, NW China: $P-T$ pseudosections and petrologic implications, *Journal of Asian Earth Sciences*, doi: 10.1016/j.jseaes. 2008. 11. 007

Zhang Q, Sun XM, Zhou DJ, Qian Q, Chen Y, Wang Y, Jia X and Han S. 1997. The characteristics of North Qilian ophiolites, forming settings and their tectonic significance. *Advance in Earth Sciences*, 12: 366–393 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

陈丹玲, 孙勇, 刘良等. 2005. 柴北缘鱼卡河榴辉岩的变质演化——石榴石成分环带及矿物反应结构的证据. *岩石学报*, 21 (4): 1039–1048

陈丹玲, 孙勇, 刘良等. 2007a. 柴北缘鱼卡河榴辉岩的超高压变质年龄: 镐石 LA-ICP-MS 微区定年. *中国科学 (D 辑)*, 增刊: 279–287

陈丹玲, 孙勇, 刘良. 2007b. 柴北缘鱼卡河榴辉岩围岩的变质时代及其地质意义. *地学前缘*, 14: 108–116

冯益民, 何世平. 1995. 北祁连山蛇绿岩地质和地球化学研究. *岩石学报*, 11 (增刊): 125–146

李春昱, 刘仰文, 朱宝清等. 1978. 秦岭及祁连山构造发展史. 国际交流地质学术论文集, (1): 174–187

马旭东, 陈丹玲. 2006. 柴达木盆地北缘超高压变质岩的围岩长英质片麻岩锆石 LA-ICP-MS 定年. *地质通报*, 25: 99–103

孟繁聪, 张建新, 杨经绥等. 2003. 柴北缘锡铁山榴辉岩的地球化学特征. *岩石学报*, 19 (3): 435–442

宋述光. 1997. 北祁连山俯冲杂岩带的构造演化. *地球科学进展*, 12 (4): 351–365

宋述光, 杨经绥. 2001. 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*, 75 (2): 180–185

史仁灯, 杨经绥, 吴才来等. 2004. 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*, 78 (5): 649–657

肖序常, 陈国铭, 朱志直. 1978. 祁连古蛇绿岩的地质构造意义. *地质学报*, 52: 287–295

许志琴, 徐惠芬, 张建新等. 1994. 北祁连走廊南山加里东俯冲杂岩增生地体及其动力学. *地质学报*, 68 (1): 1–15

杨建军, 朱红, 邓晋福等. 1994. 柴达木北缘石榴石橄榄岩的发现及其意义. *岩石矿物学杂志*, 13 (2): 97–104

杨经绥, 许志琴, 李海兵等. 1998. 我国西部柴北缘地区发现榴辉岩, *科学通报*, 43: 1544–1548

杨经绥, 许志琴, 宋述光等. 2000. 青海都兰榴辉岩的发现: 试论我国中央造山带中的高压-超高压变质带的分布及构造意义, *地质学报*, 74 (2): 156–168

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

张贵宾, 宋述光, 张立飞等. 2005. 柴北缘超高压变质带沙柳河蛇绿岩型地幔橄榄岩及其意义. *岩石学报*, 21: 1049–1058

张建新, 许志琴, 陈文等. 1997. 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*, 16: 112–119

张建新, 孟繁聪, 于胜尧等. 2007. 柴北缘绿梁山高压基性麻粒岩的变质演化历史: 岩石学及锆石 SHRIMP 年代学证据. *地学前缘*, 85–97

张旗, 孙晓猛, 周德进等. 1997. 北祁连蛇绿岩的特征、形成环境及其构造意义. *地球科学进展*, 12 (4): 366–393