

北祁连山古大洋俯冲带高压变质岩研究评述

宋述光

SONG Shu-guang

造山带和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

Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, Ministry of Education/

School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

摘要:北祁连山是中国研究古板块构造和俯冲带的经典地区,肖序常先生在此进行了开创性的研究工作。该俯冲带记录了 490~440Ma 的高压变质年龄,是目前世界上最老的大洋冷俯冲带之一。较系统地总结了北祁连造山带的研究历史、近年来在高压变质岩及相关岩石研究领域的最新进展,并根据详细的矿物学、岩石学、地球化学和同位素年代学资料,对本区大洋扩张、俯冲和大陆碰撞造山的构造演化过程进行了新的透视和评述。

关键词:高压变质岩;大洋冷俯冲带;早古生代;北祁连山

中图分类号:P588.3;P542^{+.4}

文献标志码:A

文章编号:1671-2552(2009)12-1769-10

Song S G. High-pressure metamorphic rocks in the North Qilian oceanic subduction zone, China: A review. *Geological Bulletin of China*, 2009, 28(12):1769-1778

Abstract: The North Qilian Mountain range is a typical region for paleo-plate tectonics studies in China, and Prof. Xiao Xuchang carried out some innovative works in this field. This orogenic belt is one of the three oldest cold oceanic subduction zone so far recognized in the world with a subduction history from 490 Ma to 440 Ma in rock record. In this paper, we have systematically summarized the research history in North Qilian orogenesis as well as new progresses in terms of high-pressure metamorphic rock and other rock fields during the recent years. By means of detailed mineralogical, petrologic, geochemical and geochronological studies, we've also put forward some new perspectives and review on the tectonic evolution of the North Qilian orogenesis in terms of ocean expansion, subduction and collisional orogeny.

Key words: high-pressure metamorphic rocks; oceanic cold subduction; Early Paleozoic; North Qilian Mountain

1 北祁连山高压变质岩的研究简史

祁连山,其名源自古代匈奴,在古匈奴语中,“祁连”意即“天”,祁连山因此而得名“天山”,大诗人李白的千古佳句《关山月》:“明月出天山,苍茫云海间,长风几万里,吹度玉门关”,这里的天山即为祁连山。又因位于河西走廊以南,故称南山。

北祁连山地处青藏高原北缘,属高寒地带,人烟稀少,交通不便。由于地理条件的限制,自 19 世纪后

期至 20 世纪 20 年代,只有少数国外的旅行家和地理、地质学家曾涉足于北祁连山中段的走廊南山、托勒山、峨博、祁连河、黑河等地进行探险旅行、地理、人文和地质调查。E. Suess(1901)在《地球的面貌》一书中对祁连山地槽作了简要的介绍。

20 世纪 30—40 年代,一些著名的地质学家,包括袁复礼、侯德封、孙健初、李树勋、杨钟健、计荣森、王钰、翁文波、宋叔和、陈梦熊、黄汲清、何春荪等,对北祁连山的地层、古生物、火成岩、冰川地质、变质

收稿日期:2009-09-14;修订日期:2009-11-23

基金项目:国家自然科学基金项目(编号:40825007、40773012、40821002)和国家优秀博士论文作者基金(编号:200531)资助

作者简介:宋述光(1963-),男,教授,从事高压变质作用和造山带演化研究。E-mail: sgsong@pku.edu.cn

岩、大地构造,以及煤、砂金等矿产资源等诸多方面进行了较全面的调查,为以后的地质研究和矿产普查工作打下了基础。

中华人民共和国成立后,随着国民经济的发展和矿产资源的需求,先后有几十个专业地质队涉足北祁连山,投入了大量的地质调查、矿产资源勘查和开发工作,探明了部分煤、铁、铜等有工业价值的矿床。1956—1958年,由中国科学院地质研究所、兰州地质研究室、地质古生物研究所和北京地质学院组成的祁连山队对祁连山的地层、古生物、岩石、构造和矿产进行了全面调查,并分别在1960年和1963年出版了2卷《祁连山地质志》。该书是第一部系统全面地提供有关祁连山区域地质、构造岩相带、地质发展史、矿产分布规律等基础地质材料的综合性经典著作。

20世纪70年代,随着板块构造理论在中国的广泛传播,北祁连山造山带的研究得到飞速发展,许多地质学家从不同角度对北祁连山古板块运动的发生、发展过程和动力学机制进行了分析研究,确定本区是一典型的加里东期板块俯冲缝合带。肖序常等^[1-2]首次报道北祁连山地区发现蓝闪片岩带、蛇绿岩套和混杂堆积,确定了北祁连山是中国境内最典型的古板块俯冲带之一,为推动中国板块构造理论的研究做出了重要贡献。与此同时及之后,王荃等^[3]、董必谦等^[4]、冯益民等^[5-6]、张旗等^[7-8]先后讨论了本区蛇绿岩套的岩石学、地球化学、形成时代和构造意义。李春昱等^[9]、左国朝^[10]、左国朝等^[11]、肖序常等^[12]、冯益民等^[13]探讨了本区造山带的发展演化过程。夏林圻等^[14-17]对北祁连山海相火山岩的岩石学、地球化学、同位素年代学、构造环境等进行了较全面的研究,提出从早古生代早期裂谷到中期有限洋盆、晚期俯冲碰撞的演化模式,并划分出沟-弧-盆体系。

对北祁连山蓝片岩岩石学、矿物学、同位素年代学、构造变形、成因机制等方面的深入研究主要集中在20世纪80—90年代^[18-26]。吴汉泉等^[27]在1990年又发现一条含硬柱石、绿纤石、文石的低温蓝闪片岩带,并与前者进行了对比研究,将其划分为高级蓝片岩带和低级蓝片岩带^[28-29]。因此,2条变质变形特征不同的早古生代蓝片岩带的共存成为北祁连山所独有的特色。Wu等^[30]首次在正式出版的文献中报道了北祁连山榴辉岩的存在,并做了比较详细的岩石学、矿物学和温压条件的研究。近年来,人们对祁连

山高压变质岩石(尤其是榴辉岩)的岩石学、地球化学和同位素年代学的深入研究所取得的进展主要有以下3个方面。

(1)在榴辉岩中发现高压低温、高含水性矿物——硬柱石^[31-33],并在榴辉岩相变质的泥质岩中发现镁纤柱石^[33]。

(2)精确地确定了榴辉岩和蓝片岩的变质年龄^[26,32,34-37],证明祁连山是世界上3个最古老的早古生代大洋冷俯冲带之一。

(3)通过矿物学和相平衡研究,确定了北祁连山高压榴辉岩和蓝片岩变质的温度压力和 $p-T-t$ 轨迹^[33,38-40]。

2 祁连山及其邻区的构造单元

祁连山-北柴达木山系位于青藏高原北部,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。如图1所示,青藏高原北缘由北向南可以划分为5个构造单元:①阿拉善地块;②北祁连山环太平洋型俯冲带(缝合带);③祁连地块;④柴北缘超高压变质带;⑤柴达木地块。这些构造单元在西部被NE向的阿尔金左行走滑断裂所切,而2条高压超高压变质带可以追索到走滑断裂的西部^[41]。

阿拉善地块是中朝克拉通的一部分,主要由前寒武纪基底和早古生代台型沉积盖层组成。其西部为敦煌地块,具有3.6Ga的古老结晶基底^[42]。

北祁连山缝合带是一典型的大洋型俯冲带,该缝合带宽80~100km,呈北西—南东向展布于阿拉善地块和祁连地块之间。其西部被阿尔金左行走滑断裂截断,并且可以与北阿尔金高压变质带相对比^[32]。带内岩石由早古生代蛇绿岩组合、岛弧杂岩及俯冲杂岩(包括蛇绿混杂岩、低温高压蓝片岩和榴辉岩)组成,岩石组合特征反映北祁连山是一典型的大洋型或B型俯冲带,是2个大陆之间的缝合带。志留纪以残余海相复理石建造为特征,早泥盆世为磨拉石建造,中晚泥盆世—三叠纪为稳定盖层沉积^[43]。

祁连地块的前寒武纪基底岩石主要有长英质片麻岩、大理岩、斜长角闪岩和麻粒岩,其南部发育有厚层的早古生代沉积岩系。其中侵入湟源群的花岗岩和花岗片麻岩的锆石年龄为910~940Ma^[44-48]。一些(2470±20)Ma的古元古代花岗质岩石在祁连地块南部的欧龙布鲁克微地块中被发现^[49-50]。变质沉积岩中单颗粒碎屑锆石的年龄分布于0.88~3.09Ga之

间^[48],可与扬子地块的结晶基底相对比。

柴北缘超高压变质带详细的岩石学、矿物学、地球化学等特征可参照参考文献[37,51–52]。花岗质片麻岩原岩的锆石 SHRIMP U–Pb 年龄为 950~1000Ma^[37,53],与祁连地块花岗质片麻岩的年龄一致。

柴达木地块大部分被中生代沉积物所覆盖。张建新等^[54]报道地块南部变质片麻岩的继承碎屑锆石 SHRIMP U–Pb 年龄主要集中在 1600~1800Ma 之间,并认为柴达木地块与扬子克拉通有明显的亲缘性。

3 北祁连山高压变质岩石的分带和岩石组合

根据产出位置和岩石组合,北祁连山高压变质岩石被划分为九个泉低级蓝片岩带和野牛沟–百经寺高级蓝片岩带^[25,30]。

3.1 低级蓝片岩带

低级蓝片岩带位于肃南县九个泉一带,其宽度仅 200~500m,呈北西–南东走向延伸约 20km,其北侧为九个泉蛇绿岩带,主要由蛇纹石化橄榄岩、堆晶辉长岩、枕状熔岩和放射虫硅质岩组成,并发育有典型的塞浦路斯型铜矿床。南侧逆冲到泥盆纪磨拉石之上,进一步向南为平行走向的柴达诺 I 型花岗岩体。

九个泉低级蓝片岩带主要由强片理化硬柱石–绿纤石–蓝闪石片岩和弱片理化的硬柱石蓝闪石岩组成,岩石变形的强度由南向北逐渐减弱,部分蓝片岩保持了玄武岩原岩的结构。蓝片岩的原岩主要为玄武质岩石和少量的长英质岩石。片状蓝片岩的高压变质矿物组合为绿纤石+蓝闪石+硬柱石+绿泥石+钠长石+石英,而块状蓝片岩的矿物组合为蓝闪石+硬柱石+绿纤石。文石偶见于部分蓝片岩中。

利用蓝闪石 $\text{Na}^{\text{M4}}\text{–Al}^{\text{IV}}$ 图解, Wu 等^[30]估算了含硬柱石蓝片岩的形成压力为 0.6~0.7GPa。实验表明,在 H_2O 和 SiO_2 饱和的条件下,硬柱石形成的温度为 170~180℃,压力 $p_{\text{H}_2\text{O}}=p_{\text{Total}}=0.4\sim0.5\text{GPa}$ ^[55]。Maruyama 等^[56]认为 $\text{Arg}(\text{文石})+\text{Lws}(\text{硬柱石})+\text{Qtz}(\text{石英})$ 组合稳定存在的条件为 150℃和 0.4GPa,而硬柱石(Lws)+绿纤石(Pmp)+蓝闪石(Gln)组合为 200~250℃和 0.7GPa。钠长石和文石的存在反应变质的压力介于 $\text{Jd}(\text{硬玉})+\text{Qtz}=\text{Ab}(\text{钠长石})$ 和 $\text{Arg}=\text{Cc}(\text{方解石})$ 两个反应线之间,二者限定的压力范围为 0.6~1.1GPa。作为葡萄石–绿纤石相的标志矿物,绿

纤石通过反应片沸石(Lm)+葡萄石(Prh)+绿泥石(Chl)=绿纤石(Pmp)+石英(Qtz)+ H_2O 出现的温度为 250℃,而通过反应 $\text{Pmp}=\text{Zo}(\text{黝帘石})+\text{Gr}(\text{石榴石})+\text{Chl}+\text{H}_2\text{O}$ 消失的温度约为 350℃^[57–58]。硬柱石在 0.6~1.1GPa 时通过反应 $\text{Lws}+\text{Ab}=\text{Zo}(\text{钠云母})+\text{Qtz}+\text{H}_2\text{O}$ 转变为黝帘石的温度为 350~400℃。因此,九个泉低温蓝片岩的矿物组合很好地限定了其形成的温度和压力条件为 $T=250\sim350^\circ\text{C}$, $p=0.6\sim1.1\text{GPa}$ 。最近, Zhang 等^[41]通过 THERMOCALC 计算获得低温蓝片岩的温压条件为 320~375℃和 0.75~0.95GPa。

3.2 高级蓝片岩带

如图 1 所示,高级蓝片岩带位于青海省祁连县境内的百经寺到野牛沟,呈北西–南东走向延伸约 140km,并呈 3 个构造岩片 A、B、C 产于以中酸性火山岩为主的弧火山岩之中。这些火山岩曾经被认为是新元古代大陆裂谷的产物^[15]。高压构造岩片的岩石主要为典型的大洋俯冲带混杂岩(oceanic subduction–zone mélange),包括蓝片岩相到榴辉岩相变质的蛇绿岩碎片、大理岩、泥质岩、深海硅质岩等岩块,其基质为蓝片岩相变质的硬砂岩。

3.2.1 硬砂岩和滑塌堆积

作为混杂岩的主要基质,变质硬砂岩是典型的增生楔岩石类型,并构成了高级蓝片岩带的主体^[25,30]。变质硬砂岩具有很强的片理化,其蓝片岩相变质矿物组合为蓝闪石(Gln)+多硅白云母(Phn)+钠云母(Pg)+绿帘石(Ep)+钠长石(Ab)+石英(Qtz)±石榴子石(Grt)。在清水沟的岩片 A 中发育一套厚约 200m 的滑塌堆积砾岩层,砾石由大理岩、硅质岩、基性火山岩、酸性火山岩、蛇纹岩等岩块组成,岩块大小混杂,硅质胶结物已片理化,部分滑块已被压扁拉长。Song^[29]将砾岩层解释为海沟相滑塌堆积(olistostrome)。该滑塌堆积层经历了高级蓝片岩相变质作用的改造。滑塌堆积以北以硬砂岩为主,夹中基性火山岩和硅质岩岩块,强烈的蓝片岩相变质和剪切变形使其均一化,难以区分开来。变硬砂岩以高含量的多硅白云母和石英为特征。

3.2.2 榴辉岩和镁铁质蓝片岩

所有的镁铁质蓝片岩和榴辉岩的原岩均为大洋玄武岩或辉长岩,并作为构造岩块或透镜体产于长英质蓝片岩(原岩为硬砂岩)之中。蓝片岩的典型变质矿物组合为石榴子石+蓝闪石+多硅白云母+绿帘石/黝帘石+钠长石+石英。榴辉岩主要产于 A 和 B

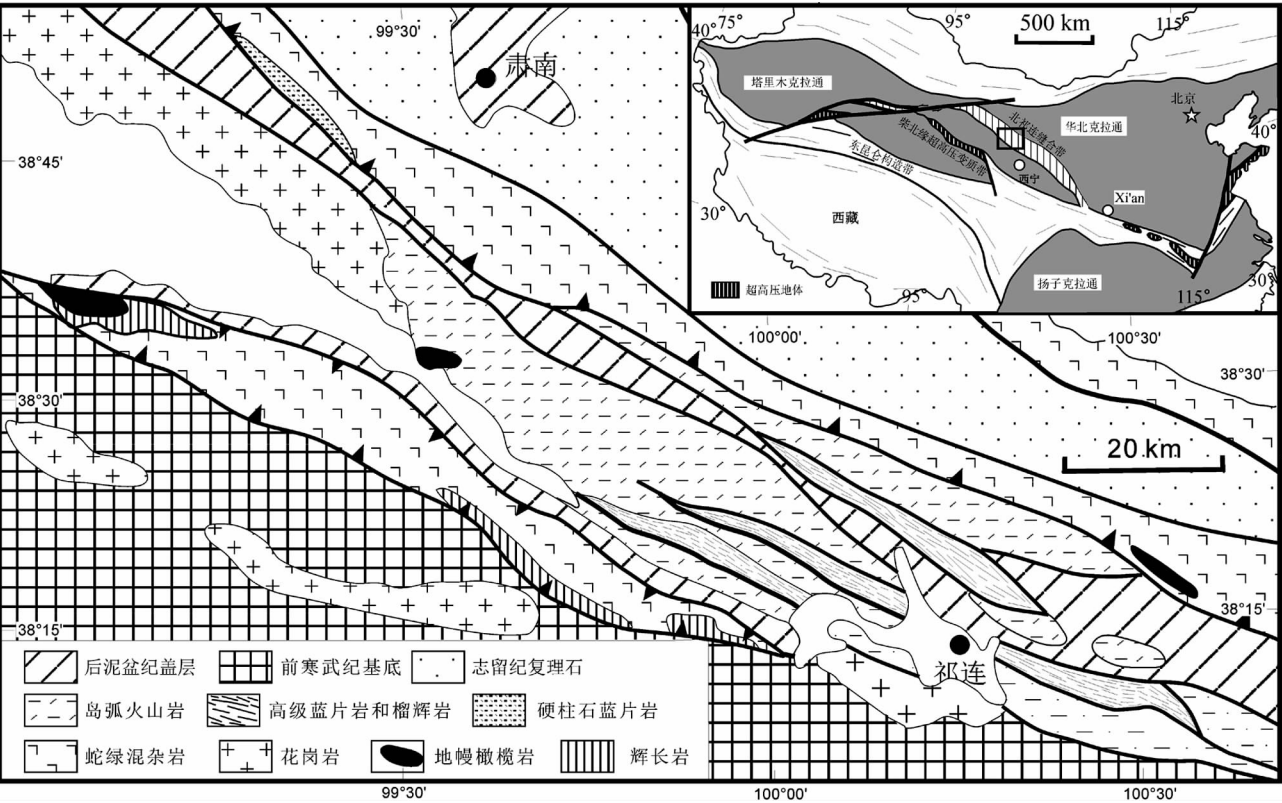


图 1 北祁连山肃南—祁连一带地质略图^[33]

Fig. 1 Geological sketch map of Su'nan-Qilian region in the North Qilian Mountain

两个高压变质岩片中,在清水沟、香子沟、上柳沟、下柳沟、百经寺等地区都有出露。根据矿物组合特征,Song 等^[33]将其划分为多硅白云母榴辉岩和绿帘石榴辉岩。大部分榴辉岩都受到不同程度的蓝片岩相退化变质的叠加改造。部分已完全变为基性石榴子石蓝闪石片岩。

在榴辉岩中,硬柱石和硬柱石假象作为石榴子石的包裹体被发现^[31-33]。这些硬柱石包裹体与绿辉石包裹体共生,反映榴辉岩峰期的矿物组合为石榴子石(Grt)+绿辉石(Omp)+硬柱石(Lws)+多硅白云母(Phn)+金红石(Rt),代表大洋冷俯冲条件下的榴辉岩相变质的典型矿物组合。应用 Grt-Omp-Phn(-Ky(蓝晶石))地质温压计^[59]计算榴辉岩峰期变质条件为 460~510℃和 2.20~2.60GPa,位于硬柱石的稳定域^[32-33,35]。

3.2.3 榴辉岩相变质的泥质片岩

大部分高压变质泥质岩作为榴辉岩的围岩产出,根据不同的矿物组合,Song 等^[33]报道了 2 类泥

质片岩,一类为硬绿泥石-石榴子石-多硅白云母-蓝闪石片岩,另一类为石榴子石-绿辉石-多硅白云母片岩,并首次在第一类高压变质泥质片岩中发现了镁纤柱石(Mg-carpholite),这是一种大洋冷俯冲带中典型的低温高压、高含水性矿物。Wei 等^[38]也报道了滑石硬绿泥石蓝闪石片岩。

含纤柱石泥质片岩产于祁连县西约 30km 的百经寺(白石崖)剖面,主要由富镁纤柱石、富镁硬绿泥石、石榴子石、多硅白云母、石英和少量蓝闪石组成。利用 THERMOCALC^[60]获得含纤柱石泥质片岩的形成条件为: $T=520\sim 580^{\circ}\text{C}$, $p=2.2\sim 2.50\text{GPa}$ ^[33,61]。部分硬绿泥石在折返过程中通过退化变质反应形成绿泥石+叶蜡石。

石榴子石-绿辉石-多硅白云母片岩也发现于百经寺(白石崖)剖面,厚度为 50~100m,其南部为纤柱石-硬绿泥石泥质片岩,北部为榴辉岩岩块。岩石的峰期变质矿物组合为石榴子石+绿辉石+蓝闪石+绿帘石+多硅白云母+石英+金红石。利用 Grt-

Omp-Phn 温压计^[59]计算的温度为 $T=445\sim 496^{\circ}\text{C}$, 压力 $p=2.15\sim 2.25\text{GPa}$ ^[33]。而利用 THERMOCALC 计算的石榴子石-硬绿泥石-滑石片岩的温压条件为 $T=540\sim 580^{\circ}\text{C}$, $p=2.1\sim 23.5\text{GPa}$ ^[38]。

3.2.4 变硅质岩

深海硅质岩是大洋蛇绿岩的组成部分,系远洋沉积的产物。在高级蓝片岩带中,高压变质硅质岩呈大小不等的岩块产于变质硬砂岩和泥质岩中,有的岩块沿构造线延伸可达 $1\sim 2\text{km}$ 。其岩石类型包括:富 Mn 硅质岩、富 Fe 硅质岩、泥硅质岩和纯石英岩。大部分变硅质岩发生强烈褶皱。在泥硅质岩中变质矿物组合为石榴子石+蓝闪石+多硅白云母+石英,在富 Mn 硅质岩中出现锰铝榴石+蔷薇辉石+红帘石+石英组合,在富 Fe 硅质岩中出现硬绿泥石和霓石质硬玉,反映部分硅质岩的变质程度为榴辉岩相。

3.2.5 大理岩

大理岩也呈大小不等的构造岩块分布于硬砂岩质蓝片岩中,部分不纯大理岩发育条带状构造,并出现蓝闪石+绿帘石+霓石质硬玉等高压变质矿物。

3.2.6 变形特征

有关高压变质岩石的变形研究较少,从 20 世纪 90 年代至今只有少量文献^[22,24],并且讨论的主要是蓝片岩和绿片岩的变形。在高级蓝片岩带中,大部分岩石,包括硬砂岩质蓝片岩、基性蓝片岩、硅质岩等都发生了强烈的韧性变形,其褶皱类型包括鞘褶皱、A 型褶皱和同斜褶皱。蓝闪石和多硅白云母构成的拉伸线理平行于 A 型褶皱和鞘褶皱的枢纽,说明它们是同构造变质的产物。这些拉伸线理的优选方向为 NW—SE 向,显示出走滑剪切特征。显微构造和变质温压条件说明蓝片岩的剪切变形发生于高应变状态和深的构造层次。

4 蓝片岩和榴辉岩的化学成分

4.1 低级蓝片岩的地球化学特征

前人的研究认为,九个泉低级蓝片岩带北侧的蛇绿岩形成于弧后扩张脊环境^[6,13,16-17,62]。岩石组合特征,尤其是由辉石岩、辉长岩组成的堆晶杂岩和大面积出露的火山碎屑岩表明,这些蛇绿岩是俯冲带型(SSZ)的,形成于弧后盆地。

Song 等^[63]报道了低温蓝片岩的地球化学特征,其原岩常量元素特征为 $\text{SiO}_2<50\text{wt}\%$, $\text{TiO}_2\ 1.12\text{wt}\%\sim 1.49\text{wt}\%$, MgO 相对较高($7.0\text{wt}\%\sim 9.6\text{wt}\%$),属于亚碱

性拉斑玄武岩。稀土元素配分模式、微量元素蛛网图等显示了典型 N 型洋中脊玄武岩的特征(图 2-a、b)。稀土元素和高场强元素在高压低温变质过程中没有明显的变化。

4.2 高级蓝片岩带中榴辉岩的地球化学特征

根据高级蓝片岩带中榴辉岩的矿物组合, Song 等^[33,63]将其划分为多硅白云母榴辉岩(Type I)和绿帘石榴辉岩(Type II)。地球化学分析表明,大部分多硅白云母榴辉岩(Type I)具有富 TiO_2 、 K_2O 的特征,在 TAS 图解上主要分布于碱性玄武岩的碱玄岩和粗玄岩区;球粒陨石标准化的稀土元素配分模式具有轻稀土元素富集、重稀土元素平坦到中度亏损,微量元素蛛网图与 E-MORB 和 OIB 相似的特征(图 2-c、d)。绿帘石榴辉岩(Type II)的 K_2O 和 TiO_2 含量相对较低, Al_2O_3 含量变化较大($14.64\text{wt}\%\sim 20.83\text{wt}\%$)(图 2-e、f),在 TAS 图解中主要分布于亚碱性的玄武岩区。球粒陨石标准化的稀土元素模式可以将绿帘石榴辉岩进一步划分为 2 组, N-MORB 和辉长岩(图 2-g、h)。在原始地幔标准化的微量元素蛛网图中,辉长岩原岩以 Sr 和 Eu 正异常为特征。

5 高压变质岩石的形成时代和 p - T - t 轨迹

长期以来,根据生物地层学研究,北祁连山被认为是典型的“加里东期”造山带或板块缝合带^[2,9]。高压变质岩的年代学研究开始于 20 世纪 80 年代,主要是用 K-Ar 和 Ar-Ar 方法进行蓝片岩中蓝闪石和多硅白云母的定年^[20-21,26,30,34,36]。近年来,锆石 U-Pb SHRIMP 原位定年技术精确测定了榴辉岩的变质时代。

5.1 榴辉岩相变质年龄

到目前为止,通过 SHRIMP 原位定年技术,从北祁连山高压变质带获得了 5 个榴辉岩的年龄数据^[32,35],百经寺剖面的 2 个榴辉岩样品分别得到了 $(468\pm 13)\text{Ma}$ 和 $(502\pm 11)\text{Ma}$ 2 个年龄,前者为榴辉岩相变质年龄^[35],后者为辉长岩原岩的岩浆结晶年龄^[32]。高压变质带西部的 3 个榴辉岩样品分别获得了 $(463\pm 6)\text{Ma}$ ^[35]、 $(477\pm 16)\text{Ma}$ 和 $(489\pm 7)\text{Ma}$ ^[32] 的年龄,反映不同榴辉岩块体的形成时代有较大的差别。

5.2 高级蓝片岩相变质年龄

相对于榴辉岩,蓝片岩的 Ar-Ar 年龄比较一致, Liou 等^[34]报道清水沟一带蓝片岩的多硅白云母

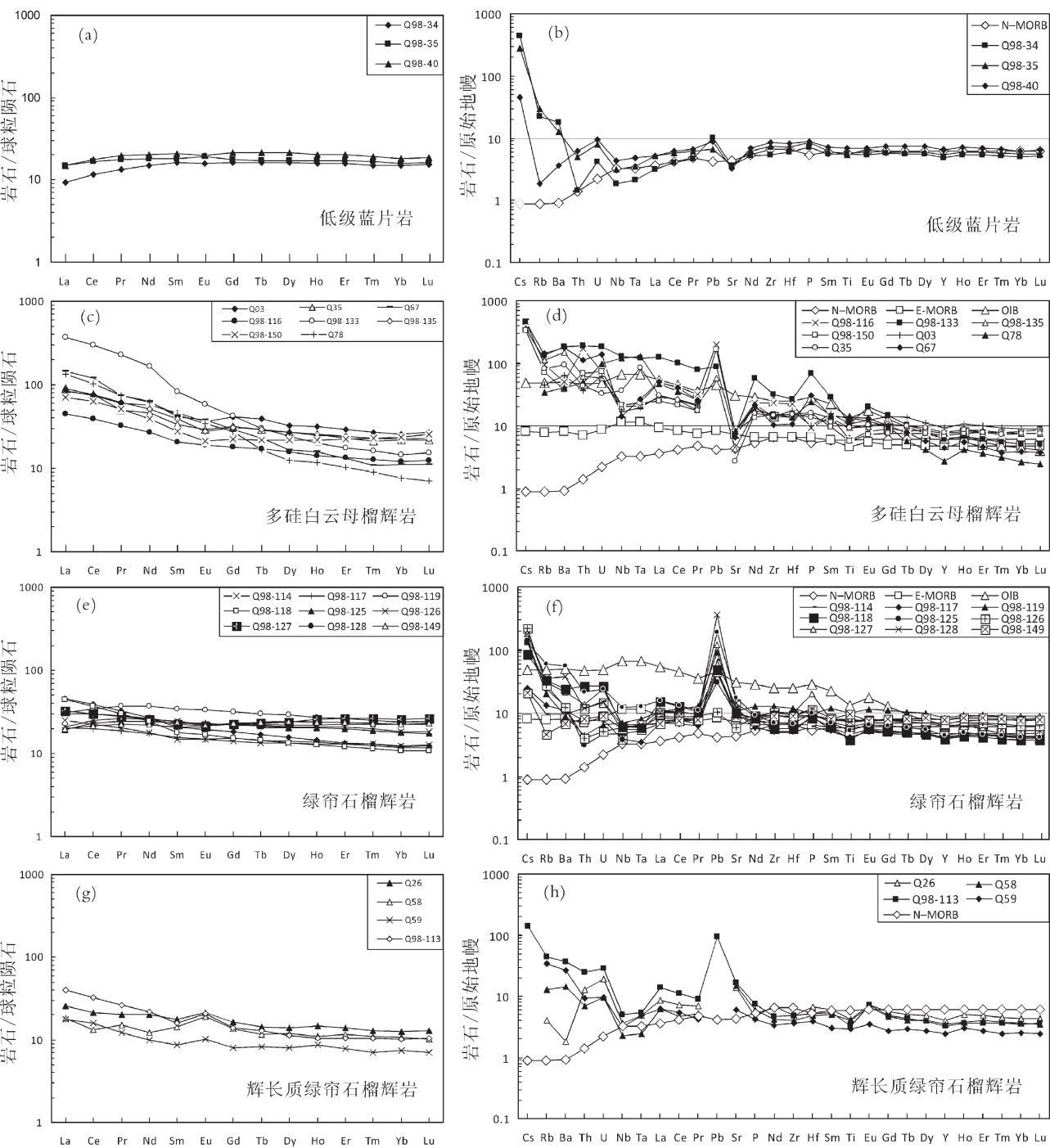


图2 北祁连山榴辉岩、基性蓝片岩的稀土元素配分模式和微量元素蛛网图^[63]

Fig. 2 Chondrite-normalized REE patterns and primitive mantle normalized spidergrams for mafic blueschist and eclogite in the North Qilian Mountain

Ar-Ar 坪年龄为 $(448\pm11)\text{Ma}$,Liu 等^[36]通过清水沟一带蓝片岩的系统研究,获得了 446~454Ma 的坪年龄,张建新等^[26]报道了不同位置蓝片岩蓝闪石和多硅白云母的变质年龄为 450~489Ma,退化变质年龄

为420~410Ma。
通过这些年龄数据的重新评价,发现多硅白云母的 Ar-Ar 坪年龄为 446~462Ma,数据质量明显好于蓝闪石的年龄(420~490Ma)。420~400Ma 纪录了

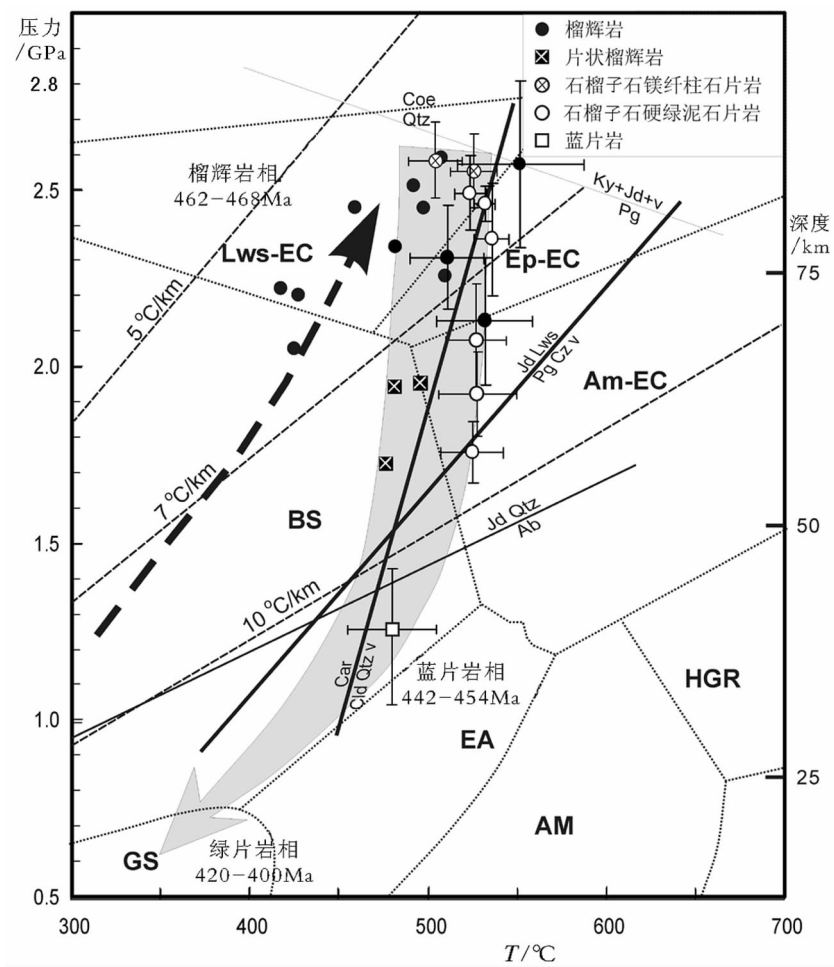


图 3 北祁连山大洋俯冲带高压变质岩的 p - T - t 轨迹^[33]

Fig. 3 p - T - t path of HPM rocks in the North Qilian oceanic subduction zone
Coe—柯石英; Qtz—石英; Ky—蓝晶石; Jd—硬玉; v—水; Pg 钠云母; Lws-EC—硬柱
石榴辉岩; Ep-EC—绿帘石榴辉岩; Am-EC—角闪石榴辉岩; BS—蓝片岩;
EA—绿帘石角闪岩; AM—角闪岩; HGR—高压麻粒岩

北祁连山最后的折返事件的年龄，与泥盆纪早期磨拉石的形成时代一致，代表强烈的造山。

5.3 高压变质作用的 p - T - t 轨迹

根据榴辉岩和蓝片岩的矿物成分、共生关系和变质作用的 p - T 条件，并结合现有的同位素年代学数据，北祁连山缝合带的高压岩石的变质历史可以划分为以下 4 个阶段^[33]， p - T - t 轨迹见图 3。

(1)前榴辉岩相变质阶段(Stage I):主要表现为榴辉岩中石榴子石核部包裹体为绿帘石+钠长石组合，石榴子石的生长过程反映了温压升高的进化变质历史，代表大洋的俯冲过程。

(2)榴辉岩相峰期变质阶段(Stage II):该阶段变质以榴辉岩中出现石榴子石+绿辉石+硬柱石+多硅

白云母+金红石，变质泥质岩中出现镁纤柱石+硬绿泥石+石榴子石+多硅白云母±蓝闪石峰期矿物组合为特征。榴辉岩峰期的 p - T 条件为 460~510℃、2.20~2.60GPa，镁纤柱石泥质片岩为 525~530℃、2.45~2.50GPa，位于榴辉岩的稳定区^[64]。榴辉岩的变质时代为 490~464Ma。

(3)蓝片岩相退化变质阶段，⁴⁰Ar-³⁹Ar 定年确定蓝片岩的变质年龄为 442~460Ma^[26,34,36]。蓝片岩相变质的矿物组合为 Grt+Gln+Ep+Ab+Phn+Pg+Qtz，利用 THERMOCALC 3.23 计算的平均温压条件为 480~495℃和 1.10~1.20GPa。

(4)绿片岩相退化变质阶段，大部分高压变质岩石经历了不同程度的绿片岩相矿物组合绿泥石+阳

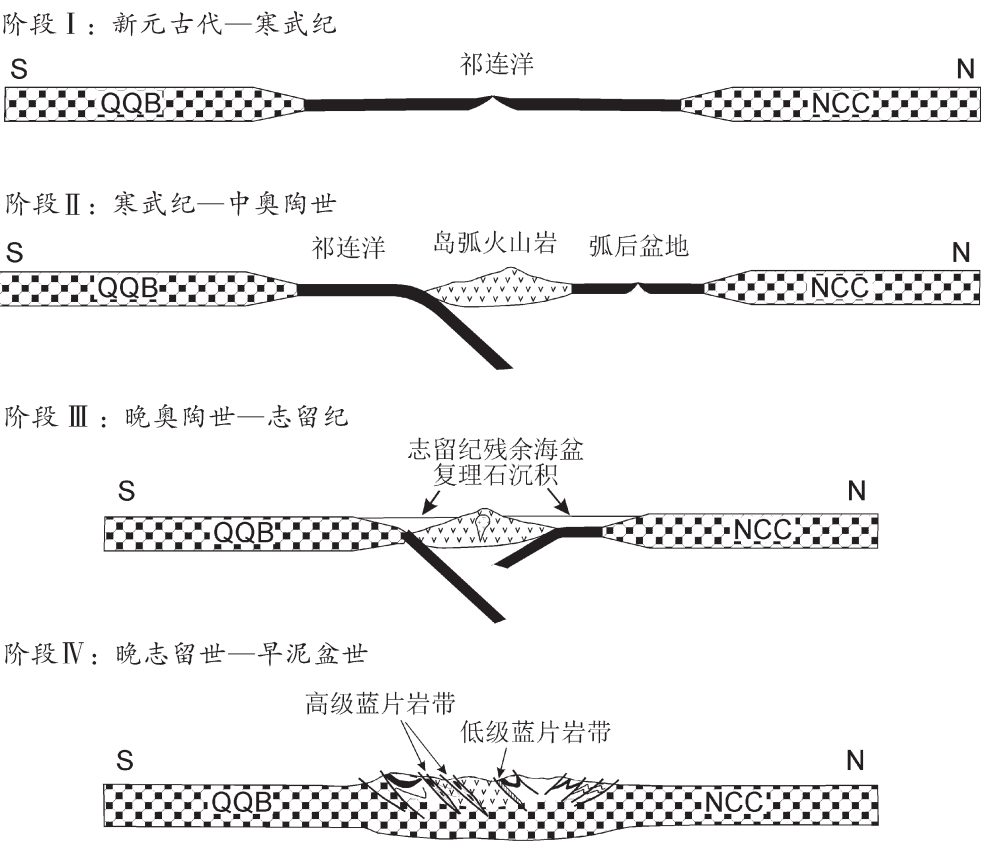


图 4 北祁连山大洋俯冲带早古生代构造演化模式^[63]

Fig. 4 Tectonic evolution model of the North Qilian oceanic subduction-zone during Early Paleozoic

NCC—华北克拉通;QQB—祁连-柴达木地块

起石的叠加改造。420~400Ma 的 Ar-Ar 同位素年龄可能经历了北祁连山高压/低温变质岩的最后折返时代,与泥盆纪早期的隆升造山有关。

6 北祁连山大洋冷俯冲带的构造演化

许多学者对北祁连山古俯冲缝合带的构造演化进行了长期的讨论^[2-3,9-10,14,24-26,30,37,63,65-66]。榴辉岩 460~490Ma 变质时代的确定证明了北祁连高压变质带是目前世界上确定的 3 个最老的大洋冷俯冲带之一^[32-33,63]。岩石学、地球化学和同位素年代学资料揭示祁连山记录了从大洋扩张、俯冲到大陆碰撞和造山的长期演化历史。与高压变质岩石的 p - T - t 轨迹相对应,北祁连山的构造演化也可以划分为 4 个阶段(图 4)。①新元古代—寒武纪大洋扩张阶段(大于 500Ma):新元古代罗迪尼亚超大陆的裂解形成古祁连山大洋。目前获得的北祁连山蛇绿岩中辉长岩的

锆石年龄为 560~495Ma^[67-68],部分研究者将该大洋作为原特提斯洋的一部分^[69],而大洋南侧的祁连-柴达木地块具有扬子克拉通的相似性,可能是罗迪尼亚大陆的碎片。②早中奥陶世的大洋俯冲带发育阶段(500~440Ma):大约从 500Ma 开始,北祁连山古大洋开始向华北地台俯冲,并形成以岛弧岩浆岩带、弧后扩张盆地和含硬柱石-镁纤柱石为特征的高压/低温变质带。③晚奥陶世—志留纪大洋岩石圈消亡阶段(440~420Ma):祁连山大洋在奥陶纪晚期俯冲消亡,而九个泉一带的弧后盆地洋壳向南俯冲,形成硬柱石蓝片岩,在志留纪形成厚层的残余海盆相复理石建造。④早泥盆世碰撞造山阶段:强烈碰撞造山形成早泥盆世山前磨拉石建造,使高压变质岩石折返到地表,并被泥盆纪之后的稳定沉积盖层不整合覆盖。

谨以本文祝贺导师肖序常院士 80 华诞!

参考文献

- [1]肖序常,陈国铭,朱志直.祁连山古板块构造的一些认识[J].地质科技,1974,(3):73-78.
- [2]肖序常,陈国铭,朱志直.祁连山古蛇绿岩的地质构造意义[J].地质学报,1978,54(1):287-295.
- [3]王荃,刘雪亚.我国西部祁连山区的古海洋地壳及其大地构造意义[J].地质科学,1975,(1):42-55.
- [4]董必谦,邱凤歧.北祁连山蛇绿岩套和蛇绿混杂岩的特征及其地质构造意义[C]//青藏高原地质文集.北京:地质出版社,1984,14:217-234.
- [5]冯益民,何世平,闫军.北祁连山中段早中奥陶世蛇绿岩中席状岩墙杂岩的发现及其地质意义[J].地质论评,1994,40(3):252-264.
- [6]冯益民,何世平.北祁连山蛇绿岩地质和地球化学研究[J].岩石学报,1995,11(增刊):125-146.
- [7]张旗,孙晓猛,周德进.北祁连蛇绿岩的特征、形成环境及其构造意义[J].地球科学进展,1997,12:366-393.
- [8]张旗,周国庆.中国蛇绿岩[M].北京:科学出版社,2001:182.
- [9]李春昱,刘仰文,朱宝清,等.秦岭及祁连山构造发展史[C]//国际交流地质学术论文集(1).北京:地质出版社,1978:174-187.
- [10]左国朝.北祁连地区早古生代碰撞缝合作用[C]//中国北方板块构造文集(1).北京:地质出版社,1986:27-35.
- [11]左国朝,刘奇栋.北祁连早古生代大地构造演化[J].地质科学,1987,(1):14-24.
- [12]肖序常,汤耀庆,高延林.再论青藏高原的板块构造[J].中国地质科学院院报,1986,4:7-20.
- [13]冯益民,何世平.祁连山大地构造与造山作用[M].北京:地质出版社,1996.
- [14]夏林圻,夏祖春,任有祥,等.祁连秦岭山系海相火山岩[M].武汉:中国地质大学出版社,1991.
- [15]夏林圻,夏祖春,任有祥,等.北祁连山石灰沟奥陶纪岛弧火山岩系岩浆性质的确定[J].岩石矿物学杂志,1991,(1):1-10.
- [16]夏林圻,夏祖春,徐学义.北祁连山海相火山岩岩石成因[M].北京:地质出版社,1996.
- [17]Xia L Q, Xia Z C, Xu X Y. Magmagenesis in the Ordovician in back basins of the northern Qilian Mountains, China[J]. Geological Society of America Bulletin, 2003, 115: 1510-1522.
- [18]吴汉泉.东秦岭和北祁连山的蓝闪片岩[J].地质学报,1980,54(3):195-207.
- [19]吴汉泉.北祁连山高压变质带的岩石学和矿物学[J].中国地质科学院西安地质矿产研究所所刊,1982,4:5-21.
- [20]吴汉泉.北祁连多硅白云母矿物学和多型特征及对K-Ar年龄的思考[J].中国地质科学院西安地质矿产研究所所刊,1987,15:33-46.
- [21]张之孟.北祁连山的高压低温变质作用.中国地质科学探索[M].北京:地质出版社,1989:273-295.
- [22]宋述光,吴汉泉.北祁连山俯冲杂岩带的韧性剪切作用[J].西北地质科学,1992,13(2):47-60.
- [23]霍有光,吴汉泉,冯益民.北祁连奥陶系地体中蓝片岩、绿片岩岩石矿物学化学特征及地质意义[J].中国地质科学院院报,1992,25:59-70.
- [24]许志琴,徐惠芬,张建新,等.北祁连走廊南山加里东俯冲杂岩增生地体及其动力学[J].地质学报,1994,68(1):1-15.
- [25]宋述光.北祁连山俯冲杂岩带的构造演化[J].地球科学进展,1997,12:351-365.
- [26]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[J].岩石矿物学杂志,1997,16(2):112-119.
- [27]吴汉泉,冯益民,霍有光.北祁连山中段甘肃南变质硬柱石蓝闪片岩的发现及其意义[J].地质论评,1990,36(3):277-280.
- [28]吴汉泉,宋述光.北祁连山两种类型蓝闪片岩及其构造特征[C]//现代地质研究文集(上).南京:南京大学出版社,1992:74-80.
- [29]Song S G. Metamorphic geology of blueschists, eclogites and ophiolites in the North Qilian Mountains[C]//Proceedings of the 30th IGC Field Trip Guide T392. Geological Publishing House, Beijing, 1996:40.
- [30]Wu H Q, Feng Y M, Song S G. Metamorphism and deformation of blueschist belts and their tectonic implications, North Qilian Mountains, China[J]. Journal of Metamorphic Geology, 1993, 11: 523-536.
- [31]Zhang J X, Meng F C. Lawsonite-bearing eclogites in the north Qilian and north Altyn Tagh: evidence for cold subduction of oceanic crust[J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51: 1238-1244.
- [32]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]. Journal of Metamorphic Geology, 2007, 25: 285-304.
- [33]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]. Journal of Metamorphic Geology, 2007, 25: 547-563.
- [34]Liou J G, Wang X M, Coleman R G. Blueschists in major suture zones of China[J]. Tectonics, 1989, 8(3):609-619.
- [35]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[J].科学通报,2004,49:592-595.
- [36]Liu Y J, Neubauer F, Genser J, et al. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages of blueschist facies pelitic schists from Qingshuigou in the Northern Qilian Mountains, western China[J]. Island Arc, 2006, 15: 187-198.
- [37]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]. Journal of Petrology, 2006, 47: 435-455.
- [38]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]. Journal of Metamorphic Geology, 2008, 26(3):301-316.
- [39]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 NCKF-MASHO[J]. Journal of Metamorphic Geology, 2009, 27: 55-70.

- [40]Zhang L F, Wang Q J, Song S G. Lawsonite blueschist in Northern Qilian, NW China: PT pseudosections and petrologic implications [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2009, 35: 354–366.
- [41]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[J]. Lithos, 2001, 56: 187–206.
- [42]李惠民, 陆松年, 郑健康, 等. 阿尔金山东端花岗片麻岩中 3.6Ga 锆石的地质意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2001, 20: 259–262.
- [43]青海省地质矿产局. 青海省区域地质志[M].北京:地质出版社, 1991: 560.
- [44]Wan Y S, Xu Z Q, Yang J S. Ages and compositions of the Precambrian highgradebasement of the Qilian terrance and its adjacent areas[J]. Acta Geologica Sinica, 2001, 75: 375–384.
- [45]万渝生, 许志琴, 杨经绥, 等. 祁连造山带及邻区前寒武纪深变质基底的时代和组成[J]. 地球学报, 2003, 24(4): 319–324.
- [46]郭进京, 赵凤清, 李怀坤. 中祁连东段晋宁期碰撞型花岗岩及其地质意义[J]. 地球学报, 1999, 20: 10–15.
- [47]郭进京, 赵凤清, 李怀坤, 等. 中祁连东段湟源群的年代学新证据及其地质意义[J]. 中国区域地质, 2000, 19(1): 26–31.
- [48]董国安, 杨怀仁, 杨宏仪, 等. 祁连地块前寒武纪基底锆石 SHRIMP U–Pb 年代学及其地质意义[J]. 科学通报, 2007, 52: 1572–1585.
- [49]李晓彦, 陈能松, 夏小平, 等. 莫河花岗岩的锆石 U–Pb 和 Lu–Hf 同位素研究: 柴北欧龙布鲁克微陆块始古元古代岩浆作用年龄和地壳演化约束[J]. 岩石学报, 2007, 23: 513–522.
- [50]陈能松, 王勤燕, 陈强, 等. 柴达木和欧龙布鲁克陆块基底的组成和变质作用及中国中西部古大陆演化关系初探[J]. 地学前缘, 2007, 14(1): 43–55.
- [51]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[J]. Terra Nova, 2002, 14: 397–404.
- [52]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[J]. Lithos, 2003, 70: 195–211.
- [53]陆松年. 青藏高原北部前寒武纪地质初探[M].北京:地质出版社, 2002:125.
- [54]张建新, 孟繁聪, 万渝生, 等. 柴达木盆地南缘金水口群的早古生代构造热事件: 锆石 U–Pb SHRIMP 年龄证据[J]. 地质通报, 2003, 22(6): 397–404.
- [55]Liou J. *P–T* stabilities of laumontite, wairakite, lawsonite, and related minerals in the system $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8\text{--SiO}_2\text{--H}_2\text{O}$ [J]. Journal of Petrology, 1971, 12: 370–411.
- [56]Maruyama S, Liou J G. Clinopyroxene telescoped through the processes of blueschist facies metamorphism [J]. Journal of Metamorphic Geology, 1987, 5: 529–552.
- [57]Schiffman P, Liou J G. Synthesis and stability relations of Mg–Al pumpellyite, $\text{Ca}_4\text{Al}_5\text{MgSi}_6\text{O}_{21}(\text{OH})_7$ [J]. Journal of Petrology, 1980, 21: 441–474.
- [58]Liou J G, Maruyama S, Cho M. Very low–grade metamorphism of volcanic and volcanoclastic rocks – mineral assemblages and mineral facies[C]//Frey M. Very Low–grade Metamorphism. Blackie Published Co., 1987:59–113.
- [59]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]. Journal of Metamorphic Geology, 2004, 22: 579–592.
- [60]Powell R, Holland T J B, Worley B. Calculating phase diagrams involving solid solutions via non –linear equations, with examples using Thermocalc[J]. Journal of Metamorphic Geology, 1998, 16: 577–588.
- [61]于孝宁, 宋述光, 魏春景, 等. 北祁连山含镁纤柱石高压泥质岩及其对古大洋俯冲的意义[J]. 北京大学学报 (自然科学版), 2009, 45: 472–480.
- [62]钱青, 张旗, 孙晓猛. 北祁连九个泉玄武岩的形成环境及地幔源区特征: 微量元素和 Nd 同位素地球化学制约[J]. 岩石学报, 2001, 17(3): 385–394.
- [63]Song S G, Niu Y, Zhang L F, et al. Tectonic evolution of Early Paleozoic HP metamorphic rocks in the North Qilian Mountains, NW China: New perspectives[J]. Journal of Asian Earth Science, 2009, 35: 334–353.
- [64]Okamoto K, Maruyama S. The high pressure stability limits of lawsonite in the MORB+H₂O system[J]. American Mineralogist, 1999, 84: 362–373.
- [65]冯益民, 吴汉泉. 北祁连山及其邻区古生代以来的大地构造演化初探[J]. 西北地质科学, 1992, 13(2): 61–74.
- [66]Xiao W J, Windley B F, Yong Y, et al. Early Paleozoic to Devonian multiple–accretionary model for the Qilian Shan, NW China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2009, 35: 323–333.
- [67]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[J]. 地质学报, 2004, 78(5): 649–657.
- [68]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[J]. 科学通报, 2007, 52(7): 825–835.
- [69]侯青叶, 赵志丹, 张宏飞, 等. 北祁连玉石沟蛇绿岩印度洋 MORB 型同位素组成特征及其地质意义[J]. 中国科学(D 辑), 2005, 35 (8): 710–719.