

北祁连中段高压/低温混杂带

——岩石学、地球化学和年代学证据

喻星星^{1,2}, 张建新¹, 毛小红¹, 路增龙¹

(1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 2. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871)

摘要: 详细的野外研究结果表明, 北祁连中段清水沟-香子沟高压低温变质带中出露的变质岩主要有榴辉岩、蓝片岩、多硅白云母石英片岩、变硅质岩、大理岩和蛇纹岩。地球化学测试结果表明, 榴辉岩原岩为大洋中脊玄武岩和洋岛拉斑玄武岩; 蓝片岩有两种类型, 第1种蓝片岩原岩为基性-中基性火山岩, 第2种蓝片岩原岩主要形成环境为大洋岛弧和/或大陆岛弧的沉积岩; 多硅白云母石英片岩的原岩主要形成于大陆边缘环境; 变硅质岩的原岩为形成于远离大陆边缘的沉积环境中的热水成因硅质岩; 大理岩原岩为灰岩。榴辉岩锆石 SHRIMP 定年结果显示其原岩年龄为 500 ± 4 Ma, 第1种蓝片岩原岩年龄为 529 ± 5 Ma。锆石 Lu-Hf 同位素表明, 榴辉岩原岩明显受到了古老地壳的影响, 基性蓝片岩的原岩源区为亏损地幔, 后期没有或者极微弱地受到地壳物质的影响。结合已有研究资料, 认为北祁连高压/低温变质带中变质岩的原岩类型具有明显的多样性特征, 且原岩时代具有多期性特征。上述研究结果表明, 古祁连洋在早古生代向北俯冲过程中, 携带了不同性质和时代的岩石进入俯冲带深部, 形成高压/低温变质条件下的混杂带, 代表了早古生代与洋壳俯冲有关的俯冲隧道。

关键词: 北祁连; 高压/低温变质作用; 混杂岩; 早古生代; 俯冲隧道

中图分类号: P588.3; P597

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2017)02-0196-17

High pressure/low-temperature mélange in the central North Qilian Mountains: Evidence from Petrology, geochemistry and geochronology

YU Xing-xing^{1,2}, ZHANG Jian-xin¹, MAO Xiao-hong¹ and LU Zeng-long¹

(1. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Detailed geological mapping reveals that metamorphic rocks outcropped in Qingshuigou-Xiangzigou area of the North Qilian Mountains mainly consist of eclogite, blueschist, phengite-quartz schist, metachert, marble and serpentinite. Geochemical data show that the protolith of eclogite was composed of MORB or OIB. Two types of blueschists were identified: the protolith of type I was basic volcanic rock, that of type II was sedimentary rock derived from ocean island arc and/or continental arc; phengite-quartz schist was derived from terrigenous clastic rocks formed at continental margin. Protolith of metachert was hydrothermal chert deposited far away from the continental margin. Marble came from limestone. The SHRIMP II zircon U-Pb dating results show the protolith of eclogite and that of type I blueschist are 500 ± 4 Ma and 529 ± 5 Ma, respectively.

收稿日期: 2016-12-18; 接受日期: 2017-02-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(41572180, 41630207); 中国地质调查局项目(12120115027001)

作者简介: 喻星星(1988-), 男, 博士生, 构造地质学专业, E-mail: star2yu@pku.edu.cn; 通讯作者: 张建新(1966-), 男, 研究员, 构造地质学专业, E-mail: zjx66@yeah.net。

Zircon Lu-Hf isotopic values indicate that the protolith of eclogites has been heavily influenced by ancient crust, and the protolith of type I blueschist was derived from depleted mantle. Combined with the previous data, the authors hold that the protolith of metamorphic rocks in the high-pressure and low-temperature metamorphic belt shows heterogeneous features, i. e., with different protolith natures and various protolith ages. These data suggest that the rocks with different protolith natures and various ages were carried into the great depth of the subduction zone during the northward subduction of paleo-Qilian Ocean in early Paleozoic, and formed mélange under the high-pressure/low-temperature condition, thus representing an early Paleozoic subduction channel related to oceanic subduction.

Key words: North Qilian; high pressure/low temperature metamorphism; mélange; Early Paleozoic; subduction channel

Fund support: National Natural Science Foundation of China (41572180, 41630207); Project of China Geological Survey (12120115027001)

古大洋俯冲带中形成的高压/低温(HP/LT)变质岩石很好地记录了洋壳俯冲-折返的动力学过程,这些岩石的研究是反演和重建俯冲-折返过程的直接证据之一。国内外学者对世界上已经发现的典型HP/LT变质带的研究发现,其主要组成为低温榴辉岩、蓝片岩、蛇纹岩和不同类型的变质沉积岩。Shreve 和 Cloos (1986)、Cloos 和 Shreve (1988a, 1988b)通过对现代大洋俯冲带和古俯冲带的研究表明,俯冲带中既可能有来自于俯冲带下盘的大洋板块物质(超基性岩、基性岩、硅质岩、泥质岩和碳酸盐岩等)和海沟沉积物,也可能有通过俯冲剥蚀作用进入俯冲隧道的俯冲带上盘活动大陆边缘(古老变质基底、岛弧、弧前等)的物质,在俯冲带的深部,还可能有上盘地幔楔物质进入俯冲隧道。这些不同来源的物质在俯冲隧道中混杂在一起,并经历 HP/LT 变质作用,从而形成类型多样的变质岩,构成了典型的 HP/LT 混杂带。因此,对 HP/LT 混杂带内变质岩的精细研究,不仅能够追溯进入俯冲隧道中岩石的原岩特征和形成环境,而且可为古大洋消亡历史以及俯冲带发展过程和动力学机制等问题研究提供基本依据。

北祁连 HP/LT 变质带是保存相对较完整的古大洋俯冲增生杂岩带(张建新等,2015 及相关参考文献),主要由榴辉岩、蓝片岩、云母石英片岩、大理岩、变质质岩和蛇纹岩共同组成。在北祁连 HP/LT 变质带西段清水沟-香子沟一带,榴辉岩峰期变质条件为 2.1~2.6 GPa、420~540℃,原岩时代为 503~540 Ma,变质时代为 463~489 Ma(宋述光等,2004;张建新等,2006;Zhang *et al.*, 2007)。Zhang 等(2016)对清水沟中榴辉岩的研究表明,原岩时代为

495 Ma,变质时代为 465 Ma,蓝片岩原岩时代约为 485 Ma。然而,对于这些榴辉岩原岩特征,不同学者在不同或相近采样点获得的榴辉岩样品的地球化学特征则呈现出不同的原岩特征。例如,于胜尧等(2007)根据稀土元素、微量元素和 Sr-Nd 同位素特征,识别出两类榴辉岩,并认为 I 类榴辉岩原岩可能形成于大洋环境且具有长期亏损的地幔源区,II 类榴辉岩原岩形成于大陆边缘或洋陆过渡环境,且其在形成过程中明显地混入了陆壳物质;Song 等(2006,2009)认为富多硅白云母榴辉岩原岩可能为 E 型大洋中脊玄武岩或碱性玄武岩,但不排除也有大洋岛弧玄武岩的可能,富帘石榴辉岩原岩为亚碱性玄武岩和粗面安山岩,并进一步细分为 N 型、E 型大洋中脊玄武岩和辉长岩;Xiao 等(2013)等根据榴辉岩和基性蓝片岩地球化学特征,认为这些变基性岩的原岩为受弧有关物质混染的 N 型 MORB 到 E 型 MORB 玄武岩,或为靠近洋中脊的海山。Zhang 等(2016)通过香子沟榴辉岩和蓝片岩的地球化学、锆石年代学和矿物氧同位素研究认为其原岩形成于弧后盆地环境。喻星星等(2016)对香子沟含绿辉石蓝闪石石榴石多硅白云母片岩的研究表明,其变质条件为 2.0~2.2 GPa、448~467℃;Wei 和 Song (2008)对北祁连上香子沟硬绿泥石蓝闪石片岩进行了相平衡模拟计算,结果显示其峰期温度为 550~560℃,峰期压力为 2.2~2.3 GPa。通过锆石 U-Pb 方法获得的这些榴辉岩的原岩时代为新元古代—早古生代早期。对高压变沉积岩的碎屑锆石 U-Pb 定年和 Hf 同位素特征研究显示,其与祁连地块中一些花岗质片麻岩的继承性锆石和变质沉积岩碎屑锆石特征相似(Yu *et al.*, 2013;张建新等,未出版资料),

而不同于北部以古元古代—新太古代为主的阿拉善地块(Zhang *et al.*, 2013), 形成环境为以陆源碎屑为主的活动大陆边缘或弧前盆地, 而不是深海远洋环境(李金平等, 2009; Zhang *et al.*, 2012; 张建新等, 2015, 2016)。此外, 榴辉岩和蓝片岩多硅白云母的 Ar-Ar 同位素坪年龄主要集中在 440~467 Ma (Wu *et al.*, 1993; 张建新等, 1997; Liu *et al.*, 2006; 张建新等, 未发表资料), 表明这些岩石折返就位于浅部的时间主要在中奥陶世—早志留世。本文在对这些不同类型变质岩研究系统总结基础上, 结合新的野外地质和典型样品的分析结果, 进一步探讨它们的物质来源和形成构造环境, 为反演和重

建北祁连早古生代大洋俯冲隧道的形成以及俯冲折返过程提供依据。

1 地质背景及样品岩石学特征

北祁连早古生代俯冲-增生杂岩带位于青藏高原东北缘, 北西-南东向分布, 长约 200 km, 宽约 20 km, 其北侧为阿拉善地块, 南侧为祁连地块, 西侧延伸可与被新生代阿尔金断裂错断的北阿尔金俯冲增生杂岩带相连(Zhang *et al.*, 2005), 东侧与西秦岭造山带相接(图 1a)。自上世纪 70 年代以来, 国内地质学家对该地区的构造特征做过一系列重要工作

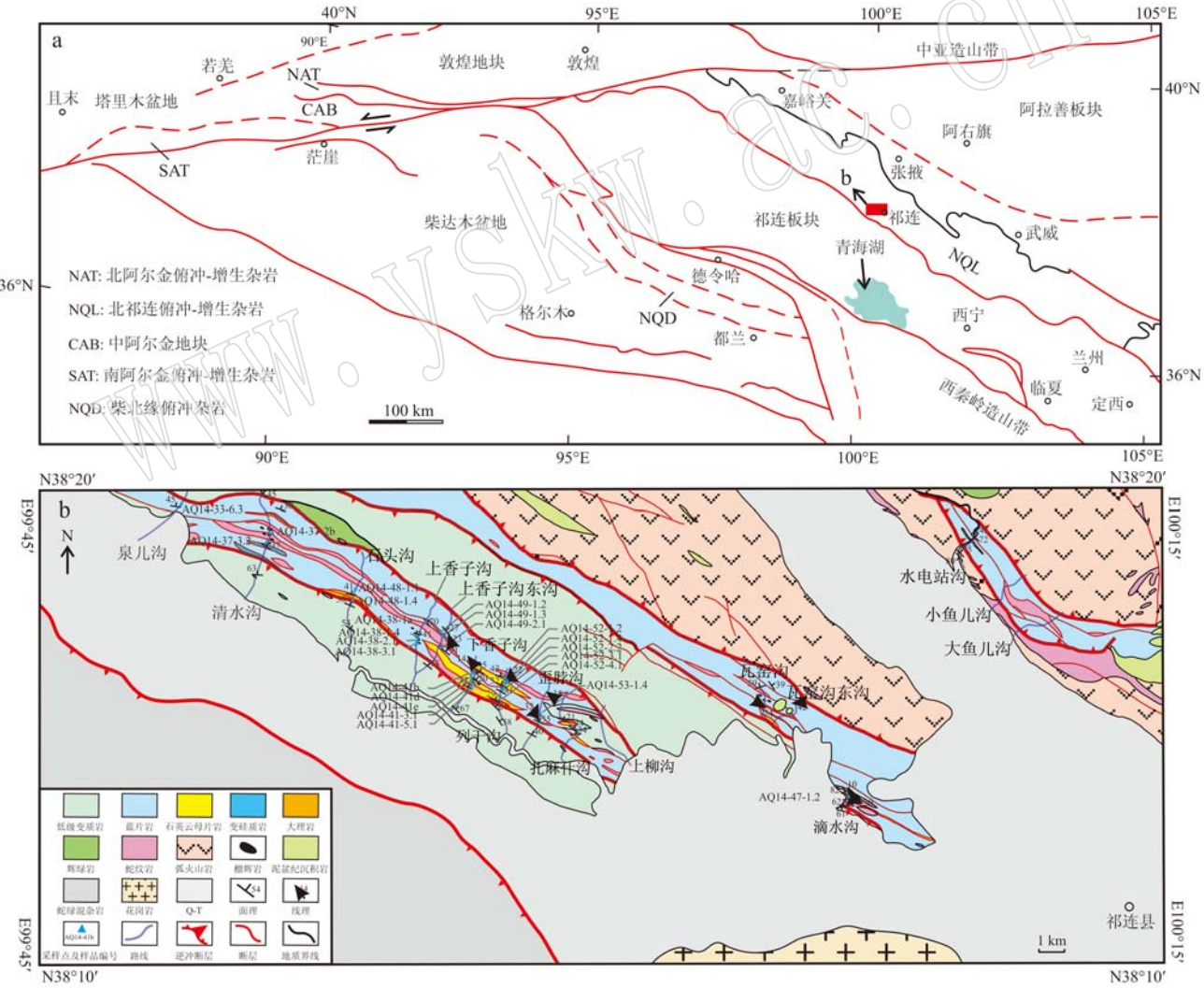


图 1 北祁连 HP/LT 变质带区域构造位置[a, 据 Zhang 等(2015)]及地质简图(b)
Fig. 1 Location (a, modified after Zhang *et al.*, 2015) and geological sketch map (b) of the high pressure and low temperature metamorphic belt, North Qilian Mountains

(王荃等, 1976; 肖序常等, 1978; 许志琴等, 1994; 张建新等, 1995, 1997, 1998), 认为其为原特提斯洋演化的产物, 以与洋壳俯冲及增生造山作用有关的高压-低温变质带、岛弧火山岩、弧后盆地和多条蛇绿岩带等共同构成了经典的“沟-弧-盆”体系(许志琴等, 1994; 张建新等, 1995; 夏林圻等, 1995, 1998)。自 Wu 等(1993)在该地区发现了低温榴辉岩后, 北祁连构造带引起了国内外地学界的广泛关注和深入研究。清水沟-香子沟硬柱石榴辉岩的发现, 进一步表明北祁连高压低温变质带为冷洋壳俯冲的产物(张建新等, 2006; Zhang *et al.*, 2007)。

详细的地质调查结果表明, 清水沟-香子沟 HP/LT 混杂带中变质岩类型相对丰富, 主要有榴辉岩、蓝片岩、多硅白云母石英片岩、变硅质岩、大理岩和蛇纹岩, 其中蓝片岩为该混杂带的主要岩石类型。多硅白云母石英片岩出露面积仅次于蓝片岩。榴辉岩主要以布丁状产出于蓝片岩中, 部分云母石英片岩中可见榴辉岩透镜体。大理岩分布较少, 仅在石头沟、上香子沟东侧沟和扎麻什沟中可见, 呈条带状分布, 围岩为云母石英片岩和/或蓝片岩。变硅质岩露头较多, 但出露面积都较小, 变形明显, 多发育大型的同斜紧闭褶皱及小型次级褶皱, 围岩为蓝片岩和/或云母石英片岩。研究区内出露的超基性岩为蛇纹岩, 局部可见残存的辉石和橄榄石, 岩石成不连续带状顺高压低温变质带近东西走向分布。用于本文研究的样品的具体采样位置和矿物组合特征参见图 1b、表 1 和图 2。

2 分析方法

全岩主量和微量元素测试在中国地质科学院国家地质实验测试中心完成。主量元素按照 GB/T14506.28-2010 标准用 XRF(2100)方法完成, 测试精度为 0.01%; 微量元素按照 GB/T14506.30-2010 标准用 PE300D 完成, 测试精度为 0.05×10^{-6} 。

锆石挑选工作由河北省廊坊市尚艺岩矿检测有限公司完成。样品首先洗净, 切去表皮, 先粗碎, 然后细碎至 200 目, 用电法和磁法分选出锆石。锆石制靶工作在中国地质科学院地质研究所北京离子探针中心完成。锆石 SHRIMP U-Pb 测试在中国地质科学院地质研究所北京离子探针中心 SHRIMP II 仪器上完成。实验加速电压为 10 kV, 离子束电流为 3~6 nA, 离子束直径为 30 μm 。详细的分析步骤和

过程参考刘敦一等(2004)和 Williams(1998)。普通 Pb 校正中的 ^{204}Pb 含量值据 Cumming 和 Richard(1975)。数据处理软件 SQUID 和 ISOPLLOT 据 Ludwig(2001)。

锆石 Hf 同位素分析是在前述锆石 U-Pb 同位素基础上完成的, 测试在中国地质科学院地质研究所国土资源部大陆构造与动力学重点实验室 Neptune Plus 型多接收等离子质谱和 GeoLasPro 193nm 激光剥蚀系统(LA-MC-ICP-MS)上进行的, 实验过程中采用 He 作为剥蚀物质载气, 根据锆石大小, 剥蚀直径采用 44 μm , 测定时使用锆石国际标样 GJ-1 作为参考物质。相关仪器运行条件及详细分析流程见侯可军等(2007)。分析过程中锆石标准 GJ-1 的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 测试加权平均值为 $0.282\,007 \pm 0.000\,025$ (2σ)。计算初始 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 时, Lu 的衰变常数采用 $1.865 \times 10^{-11}/\text{a}$ (Scherer *et al.*, 2001), $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值的计算时采用球粒陨石 Hf 同位素值 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.033\,6$, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.282\,785$ (Bouvier *et al.*, 2008)。在 Hf 的地幔模式年龄计算中, 亏损地幔 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 现在值采用 0.283 25, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 采用 0.038 4 (Griffin *et al.*, 2000), 地壳模式年龄计算时采用平均地壳的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.015$ (Griffin *et al.*, 2002)。

3 测试结果

3.1 全岩主微量测试结果

样品的全岩主微量元素测试分析结果见表 2。两件榴辉岩样品(AQ14-41d 和 AQ14-41e) TiO_2 (<2.0%)、 Na_2O 和 K_2O 含量相对较低, Al_2O_3 、 CaO 、 MgO 和 FeO_t 含量相对较高, 属亚碱性大洋拉斑玄武岩。球粒陨石标准化稀土元素配分图中显示轻稀土元素富集的右倾模式, 具 E-MORB 特征(图 3b)。在 V-Ti/1 000 判别图 (Shervais, 1982) 中落入大洋中脊玄武岩区域(图 4a); 在 $\text{FeO}_t/\text{MgO}-\text{TiO}_2$ 判别图 (Glassley, 1974) 分别落入洋中脊玄武岩以及洋中脊玄武岩与洋岛拉斑玄武岩交汇区外侧(图 4b)。

蓝片岩测试结果显示两种不同类型地球化学特征: 第 1 种类型以 SiO_2 含量较低和 Al_2O_3 、 MgO 、 FeO 、 Fe_2O_3 含量相对较高为特征; 第 2 种类型以 SiO_2 含量较高和相对较低的 TiO_2 、 Al_2O_3 、 MgO 、 FeO 、 Fe_2O_3 含量为特征。在稀土元素配分图中, 第 1

表 1 样品号、岩石名称、采样位置及矿物组合

Table 1 Sample numbers, names, GPS and mineral assemblages

样品号	岩石名称	GPS(东经,北纬)	$\varphi_B/\%$							
			绿帘石	石榴石	白云母	蓝闪石	绿帘石	石英	金红石	方解石
AQ14-33-6.3	含多硅白云母蓝片岩	99°48.88', 38°19.94'	—	—	5	85	3	5	2	—
AQ14-37-2b	大理岩	99°51.21', 38°19.18'	—	—	—	0	—	—	—	100
AQ14-37-3.2	绿帘石石榴石蓝片岩	99°50.93', 38°18.67'	10	10	5	70	2	3	—	—
AQ14-38-1.4	多硅白云母石榴石蓝片岩	99°55.07', 38°16.85'	—	20	10	55	8	5	2	—
AQ14-38-1a	多硅白云母石英片岩	99°55.04', 38°16.90'	—	—	20	—	5	75	—	—
AQ14-38-2.1	蓝闪石岩	99°55.09', 38°16.85'	—	—	—	95	2	3	—	—
AQ14-38-3.1	石榴石蓝片岩	99°56.00', 38°16.80'	—	30	5	60	2	3	—	—
AQ14-41b	含绿帘石石榴石蓝片岩	99°56.58', 38°16.09'	5	15	5	70	2	3	—	—
AQ14-41d	榴辉岩	99°56.46', 38°16.05'	40	40	10	5	3	2	—	—
AQ14-41e	榴辉岩	99°56.46', 38°15.99'	40	40	8	7	3	2	—	—
AQ14-41-3.1	多硅白云母石英片岩	99°56.50', 38°16.08'	—	—	20	—	5	75	—	—
AQ14-41-5.1	多硅白云母石英片岩	99°56.39', 38°15.87'	—	5	15	—	5	75	—	—
AQ14-47-1.2	含石榴石多硅白云母蓝片岩	100°6.65', 38°13.61'	—	5	15	70	5	5	—	—
AQ14-48-1.1	多硅白云母蓝片岩	99°53.34', 38°17.86'	—	—	20	70	3	5	2	—
AQ14-48-1.4	多硅白云母石英片岩	99°53.28', 38°17.75'	—	—	25	—	5	70	—	—
AQ14-49-1.2	含蓝闪石变硅质岩	99°55.73', 38°16.95'	—	—	—	7	3	90	—	—
AQ14-49-1.3	含蓝闪石变硅质岩	99°55.70', 38°16.91'	—	—	—	10	5	85	—	—
AQ14-49-2.1	石榴石多硅白云母蓝片岩	99°55.62', 38°16.77'	—	20	25	50	5	—	—	—
AQ14-52-1.2	石榴石蓝片岩	99°57.33', 38°16.04'	—	30	5	60	2	3	—	—
AQ14-52-1.4	含绿帘石石榴石蓝片岩	99°57.33', 38°16.04'	5	20	5	65	2	3	—	—
AQ14-52-2.2	石榴石多硅白云母石英片岩	99°57.30', 38°15.97'	—	15	25	—	5	50	—	—
AQ14-52-3.1	绿帘石石榴石蓝片岩	99°57.26', 38°15.87'	15	10	15	50	5	5	—	—
AQ14-52-4.1	石榴石多硅白云母石英片岩	99°57.20', 38°15.65'	—	20	25	50	5	—	—	—
AQ14-53-1.4	含石榴石多硅白云母石英片岩	99°57.23', 38°15.29'	—	5	20	—	5	70	—	—

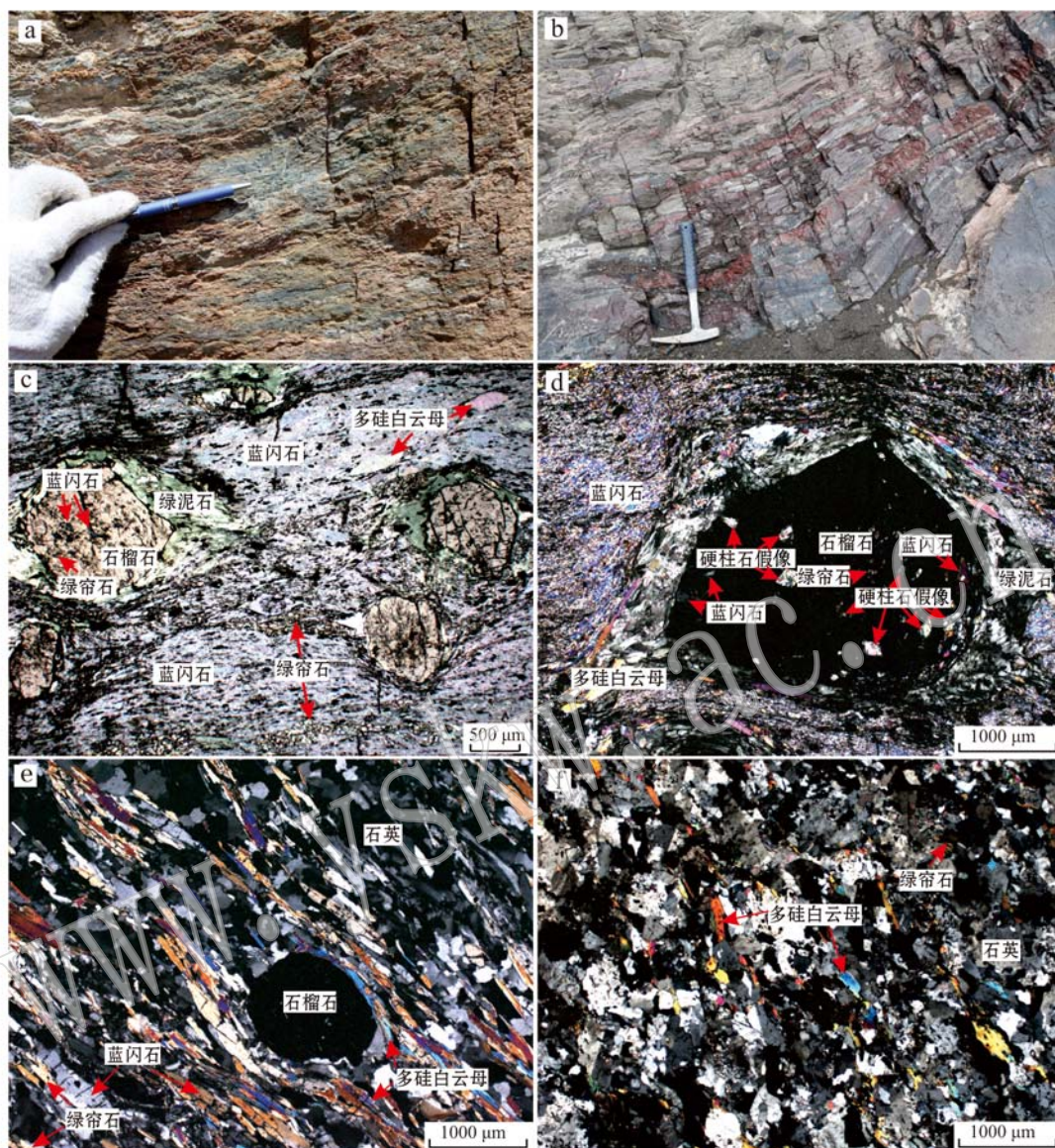


图2 岩石野外露头及显微照片

Fig. 2 Outcrop and microscope photos

a—石榴石蓝片岩中的榴辉岩透镜体; b—红帘石变硅质岩; c—石榴石蓝片岩(单偏光); d—石榴石蓝片岩中石榴石中的硬柱石假象(正交偏光); e—含石榴石多硅白云母石英片岩(正交偏光); f—多硅白云母石英片岩(正交偏光)

a—eclogite lens in garnet-blueschist; b—piedmontite-metachert; c—garnet-blueschist (plain light); d—lawsonite pseudomorph in garnet from garnet-blueschist (crossed nicols); e—garnet-bearing phengite-quartz schist (crossed nicols); f—phengite-quartz schist (crossed nicols)

种类型蓝片岩中 AQ14-37-3.2 具有 N-MORB 特征(图 3b)。结合矿物组合,第 1 种类型蓝片岩原岩为基性岩-中基性火山岩,第 2 种类型蓝片岩原岩为沉积岩。第 1 种类型蓝片岩在 $V - Ti/1\,000$ 判别图(Shervais, 1982)中,除了 1 件样品落入洋岛玄武岩和弧玄武岩区内外,其余样品全部落入大洋中脊玄武岩区内(图 4a); 在 $FeO_L/MgO - TiO_2$ 判别图

(Glassley, 1974)中,除 1 件样品(AQ14-52-1.4)因 FeO_L/MgO 比值较高($FeO_L/MgO = 5.72$)而落在图外,其余有 5 件样品为大洋中脊玄武岩,2 件为岛弧拉斑玄武岩,1 件为洋岛玄武岩(图 4b)。第 2 种类型蓝片岩在 $La - Th - Sc$ 构造环境判别图(Bhatia and Crook, 1986)中,4 件样品落入大洋岛弧区域内,1 件样品在大陆岛弧区域外侧(图 5); 在 $Th - Sc -$

表 2 全岩主量元素($w_B/\%$)和微量元素($w_B/10^{-6}$)分析结果Table 2 Whole-rock composition of major ($w_B/\%$) and trace element ($w_B/10^{-6}$)

样品编号	AQ14-41d	AQ14-41e	AQ14-33-6.3	AQ14-37-3.2	AQ14-38-1.4	AQ14-38-2.1	AQ14-41b	AQ14-47-1.2
SiO ₂	49.77	52.22	67.81	47.83	49.22	48.27	52.30	66.68
TiO ₂	1.06	1.75	0.28	1.34	1.51	1.66	0.89	0.34
Al ₂ O ₃	15.71	13.65	7.05	15.23	14.87	15.80	15.19	10.91
Fe ₂ O ₃	4.33	4.83	7.90	3.22	3.93	5.85	2.91	4.80
FeO	7.19	7.90	4.81	8.19	7.62	4.06	5.32	2.37
MnO	0.19	0.20	3.35	0.17	0.15	0.14	0.27	0.27
MgO	7.19	4.85	1.62	8.28	8.26	7.27	7.68	4.67
CaO	8.83	8.59	3.78	9.01	6.12	9.39	6.69	0.93
Na ₂ O	3.27	2.65	0.96	3.35	3.55	3.48	4.83	2.26
K ₂ O	0.54	0.66	0.41	0.22	1.27	0.69	0.46	3.19
P ₂ O ₅	0.09	0.25	0.40	0.13	0.13	0.26	0.10	0.08
LOI	1.70	1.34	1.22	2.13	2.67	2.48	2.95	2.92
Total	99.87	98.89	99.59	99.10	99.30	99.35	99.59	99.42
Rb	15.20	19.40	17.80	6.20	64.50	30.30	13.70	67.20
Ba	159.00	124.00	477.00	46.70	272.00	225.00	157.00	871.00
Th	1.61	3.76	8.05	0.57	1.69	2.83	1.37	4.90
U	0.82	1.01	1.78	0.17	0.44	0.82	0.38	0.92
Nb	7.75	19.10	3.03	2.11	10.30	19.30	2.63	3.63
Ta	0.63	1.36	0.18	0.20	0.70	1.36	0.20	0.32
Ce	22.00	48.00	46.30	9.01	17.30	37.50	13.10	16.70
Pr	2.92	6.20	6.81	1.47	2.40	4.74	1.77	1.54
Sr	176.00	257.00	217.00	230.00	294.00	408.00	178.00	26.40
Nd	13.00	26.40	28.20	7.90	11.10	19.30	8.12	6.14
Zr	32.60	90.70	25.50	32.20	58.10	91.80	33.00	46.10
Hf	1.11	2.35	0.95	1.09	1.63	2.29	0.92	1.29
Ti	6 174.00	10 488.00	1 857.00	7 627.00	8 988.00	9 788.00	5 283.00	1 888.00
V	291.00	337.00	948.00	315.00	194.00	214.00	207.00	105.00
Sm	3.61	6.19	6.45	2.93	3.43	4.48	2.49	1.71
Eu	0.99	1.73	1.63	1.04	1.24	1.37	0.86	0.26
Gd	3.90	6.15	7.42	4.20	4.01	4.31	2.95	1.10
Tb	0.70	1.06	0.96	0.77	0.74	0.71	0.55	0.20
Dy	4.40	6.12	7.19	4.80	4.44	4.10	3.33	1.22
Y	28.90	39.00	41.20	31.70	28.20	24.20	20.80	8.74
Yb	2.88	3.52	3.62	3.03	2.49	2.18	1.98	1.06
Lu	0.45	0.54	0.43	0.46	0.37	0.32	0.31	0.18
Sc	38.10	33.60	13.60	39.60	29.50	27.20	28.20	21.10
La	9.21	23.20	28.70	3.15	7.44	17.50	5.72	6.34
Ho	0.98	1.34	1.37	1.11	0.94	0.83	0.73	0.28
Er	2.82	3.71	3.94	3.15	2.64	2.32	2.11	0.95
Tm	0.44	0.56	0.63	0.49	0.38	0.33	0.31	0.15
Th/U	1.96	3.72	4.52	3.35	3.84	3.45	3.61	5.33
Th/Sc	0.04	0.11	0.59	0.01	0.06	0.10	0.05	0.23
Nb/Ta	12.30	14.04	16.83	10.55	14.71	14.19	13.15	11.34
(La/Yb) _N	2.29	4.73	5.69	0.75	2.14	5.76	2.07	4.29
(La/Lu) _N	2.19	4.60	7.15	0.73	2.16	5.86	1.98	3.78
(Ce/Yb) _N	2.12	3.79	3.55	0.83	1.93	4.78	1.84	4.38
(La/Sm) _N	1.65	2.42	2.87	0.69	1.40	2.52	1.48	2.39
(Gd/Lu) _N	1.07	1.41	2.13	1.13	1.34	1.67	1.18	0.76
δEu	0.80	0.85	0.72	0.91	1.02	0.94	0.97	0.54
δCe	1.03	0.96	0.79	1.02	1.00	0.99	1.00	1.27
ΣREE	68.30	134.72	143.65	43.51	58.92	99.99	44.33	37.83
LREE	51.73	111.72	118.09	25.50	42.91	84.89	32.06	32.69
HREE	16.57	23.00	25.56	18.01	16.01	15.10	12.27	5.14
LREE/HREE	3.12	4.86	4.62	1.42	2.68	5.62	2.61	6.36

续表 2-1

Continued Table 2-1

样品编号	AQ14-48-1.1	AQ14-49-2.1	AQ14-52-1.2	AQ14-52-1.4	AQ14-52-3.1	AQ14-38-1a	AQ14-38-3.1	AQ14-41-3.1
SiO ₂	55.03	54.43	46.62	47.57	50.59	70.95	70.11	74.09
TiO ₂	1.01	1.47	2.95	2.46	1.49	0.20	0.56	0.52
Al ₂ O ₃	15.22	16.08	13.34	15.37	15.05	14.33	10.54	12.73
Fe ₂ O ₃	5.66	4.53	7.33	10.85	6.78	1.66	2.05	0.38
FeO	5.10	4.49	8.19	6.47	6.61	0.36	3.77	2.37
MnO	0.07	0.16	0.54	0.38	0.17	0.03	0.09	0.02
MgO	5.84	4.06	6.09	2.84	4.83	0.46	3.79	1.47
CaO	1.72	5.39	9.10	5.88	7.79	1.98	2.38	0.50
Na ₂ O	4.91	4.49	3.28	5.14	3.73	7.22	1.82	3.34
K ₂ O	2.16	1.77	0.15	0.70	0.79	0.96	1.70	2.53
P ₂ O ₅	0.12	0.34	0.13	0.28	0.16	0.07	0.13	0.04
LOI	2.69	2.36	1.69	1.67	1.58	2.11	2.33	1.86
Total	99.53	99.57	99.41	99.61	99.57	100.33	99.27	99.85
Rb	74.90	44.50	5.85	22.80	22.90	27.40	56.90	79.30
Ba	368.00	256.00	24.10	173.00	91.10	296.00	312.00	616.00
Th	3.95	6.81	0.71	0.76	0.52	8.80	7.12	10.10
U	0.88	1.95	0.30	0.36	0.18	1.83	1.57	2.32
Nb	9.49	10.30	3.50	5.14	3.00	27.00	7.48	12.10
Ta	0.71	0.74	0.28	0.39	0.25	2.98	0.62	0.83
Ce	28.70	51.00	12.70	18.10	11.80	19.90	29.10	65.10
Pr	3.66	6.72	1.87	2.94	1.79	2.02	3.49	7.29
Sr	105.00	321.00	144.00	284.00	212.00	50.40	60.40	36.50
Nd	15.20	29.00	9.74	15.10	9.45	6.85	13.70	28.30
Zr	50.80	194.00	48.70	29.70	24.00	188.00	84.30	213.00
Hf	1.41	4.83	1.51	0.92	0.73	5.54	2.29	6.69
Ti	5 825.00	8 649.00	16 548.00	13 982.00	8 545.00	1 151.00	3 327.00	2 851.00
V	174.00	142.00	577.00	314.00	252.00	10.10	110.00	39.30
Sm	3.75	7.58	3.51	5.51	3.27	1.29	3.20	5.40
Eu	0.93	2.16	1.35	1.90	1.12	0.21	0.64	0.82
Gd	3.51	7.85	4.72	7.72	4.36	0.83	2.74	3.71
Tb	0.64	1.40	0.91	1.40	0.75	0.17	0.52	0.61
Dy	3.87	8.53	5.74	8.92	5.01	1.04	3.33	3.50
Y	21.80	58.20	35.80	58.70	32.50	5.31	22.10	13.90
Yb	2.21	5.17	3.74	5.52	3.08	0.87	2.07	2.14
Lu	0.34	0.77	0.57	0.82	0.48	0.14	0.33	0.33
Sc	31.70	23.40	42.80	45.80	43.60	0.85	19.40	3.40
La	15.20	22.80	4.38	6.55	4.28	12.60	13.70	29.20
Ho	0.80	1.93	1.30	2.02	1.09	0.23	0.77	0.78
Er	2.29	5.46	3.82	5.89	3.19	0.71	2.14	2.10
Tm	0.35	0.81	0.55	0.84	0.48	0.12	0.33	0.33
Th/U	4.49	3.49	2.37	2.11	2.89	4.81	4.54	4.35
Th/Sc	0.13	0.29	0.02	0.02	0.01	10.35	0.37	2.97
Nb/Ta	13.37	13.92	12.50	13.18	12.00	9.06	12.07	14.58
(La/Yb) _N	4.93	3.16	0.84	0.85	1.00	10.39	4.75	9.79
(La/Lu) _N	4.79	3.17	0.82	0.86	0.96	9.65	4.45	9.48
(Ce/Yb) _N	3.60	2.74	0.94	0.91	1.06	6.35	3.91	8.45
(La/Sm) _N	2.62	1.94	0.81	0.77	0.85	6.31	2.76	3.49
(Gd/Lu) _N	1.28	1.26	1.02	1.16	1.12	0.73	1.03	1.39
δEu	0.32	0.85	1.01	0.89	0.91	0.58	0.64	0.53
δCe	0.91	1.00	1.09	1.01	1.05	0.87	1.01	1.06
ΣREE	81.45	151.18	54.90	83.23	50.15	46.98	76.06	149.61
LREE	67.44	119.26	33.55	50.10	31.71	42.87	63.83	136.11
HREE	14.01	31.92	21.35	33.13	18.44	4.11	12.23	13.50
LREE/HREE	4.81	3.74	1.57	1.51	1.72	10.43	5.22	10.08

续表 2-2

Continued Table 2-2

样品编号	AQ14-41-5.1	AQ14-48-1.4	AQ14-52-2.2	AQ14-52-4.1	AQ14-53-1.4	AQ14-49-1.2	AQ14-49-1.3	AQ14-37-2b
SiO ₂	71.09	64.59	70.82	74.88	67.56	92.30	82.04	5.24
TiO ₂	0.66	0.21	0.58	0.54	0.76	0.01	0.02	0.01
Al ₂ O ₃	14.19	20.35	12.76	11.48	15.41	0.45	0.63	0.26
Fe ₂ O ₃	1.11	0.05	1.29	0.26	0.28	3.73	10.35	4.41
FeO	2.59	0.36	2.08	2.93	4.24	1.65	3.70	1.08
MnO	0.04	<0.01	0.06	0.03	0.02	0.03	0.02	0.22
MgO	1.55	1.72	2.52	2.33	2.84	0.46	1.04	20.91
CaO	1.15	0.45	2.11	0.57	0.13	0.09	0.13	26.54
Na ₂ O	2.77	3.13	1.58	1.04	4.09	0.39	0.82	0.04
K ₂ O	2.99	5.42	3.28	3.45	2.14	0.02	0.03	0.01
P ₂ O ₅	0.06	0.03	0.03	0.03	0.07	0.01	0.03	0.01
LOI	1.81	3.02	2.32	2.01	2.47	0.14	0.12	40.55
Total	100.01	99.33	99.43	99.55	100.01	99.28	98.93	99.28
Rb	99.90	75.20	107.00	106.00	75.60	0.35	0.71	0.17
Ba	606.00	2 030.00	607.00	949.00	448.00	12.30	11.00	3.28
Th	12.30	10.90	12.90	10.30	13.40	0.10	0.07	0.17
U	2.30	5.28	2.04	1.74	2.12	0.24	0.18	0.20
Nb	13.20	7.29	11.80	12.00	15.60	<0.05	<0.05	0.08
Ta	1.05	1.56	0.79	0.95	1.42	<0.05	<0.05	<0.05
Ce	61.20	22.30	64.00	56.80	78.40	0.21	0.44	0.20
Pr	7.10	2.37	7.40	6.72	9.56	0.06	0.09	<0.05
Sr	77.10	49.30	76.30	41.90	31.30	1.27	2.14	211.00
Nd	28.20	8.61	29.10	24.60	39.50	0.25	0.38	0.12
Zr	260.00	172.00	234.00	218.00	266.00	0.73	3.85	0.46
Hf	7.79	5.56	7.10	6.81	8.76	<0.05	<0.05	<0.05
Ti	3 719.00	1 215.00	3 105.00	3 375.00	4 681.00	30.40	47.50	29.20
V	51.70	28.00	47.70	57.70	74.70	33.20	52.90	12.40
Sm	5.72	2.60	5.23	5.17	7.15	0.08	0.11	<0.05
Eu	0.95	0.12	1.00	0.73	1.19	<0.05	<0.05	<0.05
Gd	4.34	0.94	4.12	3.48	5.28	0.09	0.11	<0.05
Tb	0.82	0.14	0.71	0.64	0.87	<0.05	<0.05	<0.05
Dy	5.07	0.78	4.38	4.22	5.14	0.10	0.13	<0.05
Y	28.30	3.99	25.40	24.20	22.90	1.05	1.13	0.47
Yb	3.30	0.53	3.26	2.99	2.93	0.10	0.13	<0.05
Lu	0.52	0.09	0.52	0.48	0.46	<0.05	<0.05	<0.05
Sc	7.22	1.69	6.89	9.41	9.95	4.17	8.16	5.20
La	28.30	13.00	32.60	26.30	39.80	0.25	0.43	0.11
Ho	1.12	0.15	1.01	0.89	1.07	<0.05	<0.05	<0.05
Er	3.19	0.43	3.03	2.78	3.01	0.07	0.10	<0.05
Tm	0.51	0.07	0.48	0.44	0.44	<0.05	<0.05	<0.05
Th/U	5.35	2.06	6.32	5.92	6.32	0.42	0.39	0.85
Th/Sc	1.70	6.45	1.87	1.10	1.35	0.02	0.01	0.03
Nb/Ta	12.57	4.67	14.94	12.63	10.99	2.00	—	—
(La/Yb) _N	6.15	17.59	7.17	6.31	9.74	—	—	—
(La/Lu) _N	5.83	15.48	6.72	5.87	9.27	—	—	—
(Ce/Yb) _N	5.15	11.69	5.45	5.28	7.43	—	—	—
(La/Sm) _N	3.19	3.23	4.02	3.28	3.59	—	—	—
(Gd/Lu) _N	1.03	1.29	0.98	0.90	1.42	—	—	—
δEu	0.56	0.19	0.64	0.50	0.57	1.79	—	—
δCe	1.03	0.91	0.97	1.02	0.95	0.41	0.52	—
ΣREE	150.34	52.13	156.84	136.24	194.80	—	—	—
LREE	131.47	49.00	139.33	120.32	175.60	—	—	—
HREE	18.87	3.13	17.51	15.92	19.20	—	—	—
LREE/HREE	6.97	15.65	7.96	7.56	9.15	—	—	—

说明: $\delta\text{Eu} = \text{Eu}_s/\text{Eu}_{\text{Cl}}/[(\text{Sm}_s/\text{Sm}_{\text{Cl}} + \text{Gd}_s/\text{Gd}_{\text{Cl}})/2]$, $\delta\text{Ce} = \text{Ce}_s/\text{Ce}_{\text{Cl}}/[(\text{La}_s/\text{La}_{\text{Cl}} + \text{Pr}_s/\text{Pr}_{\text{Cl}})/2]$, 其中 Eu_s 、 Sm_s 、 Gd_s 、 Ce_s 、 La_s 、 Pr_s 均为样品检测值, Eu_{Cl} 、 Sm_{Cl} 、 Gd_{Cl} 、 Ce_{Cl} 、 La_{Cl} 、 Pr_{Cl} 均为 C1 球粒陨石值。

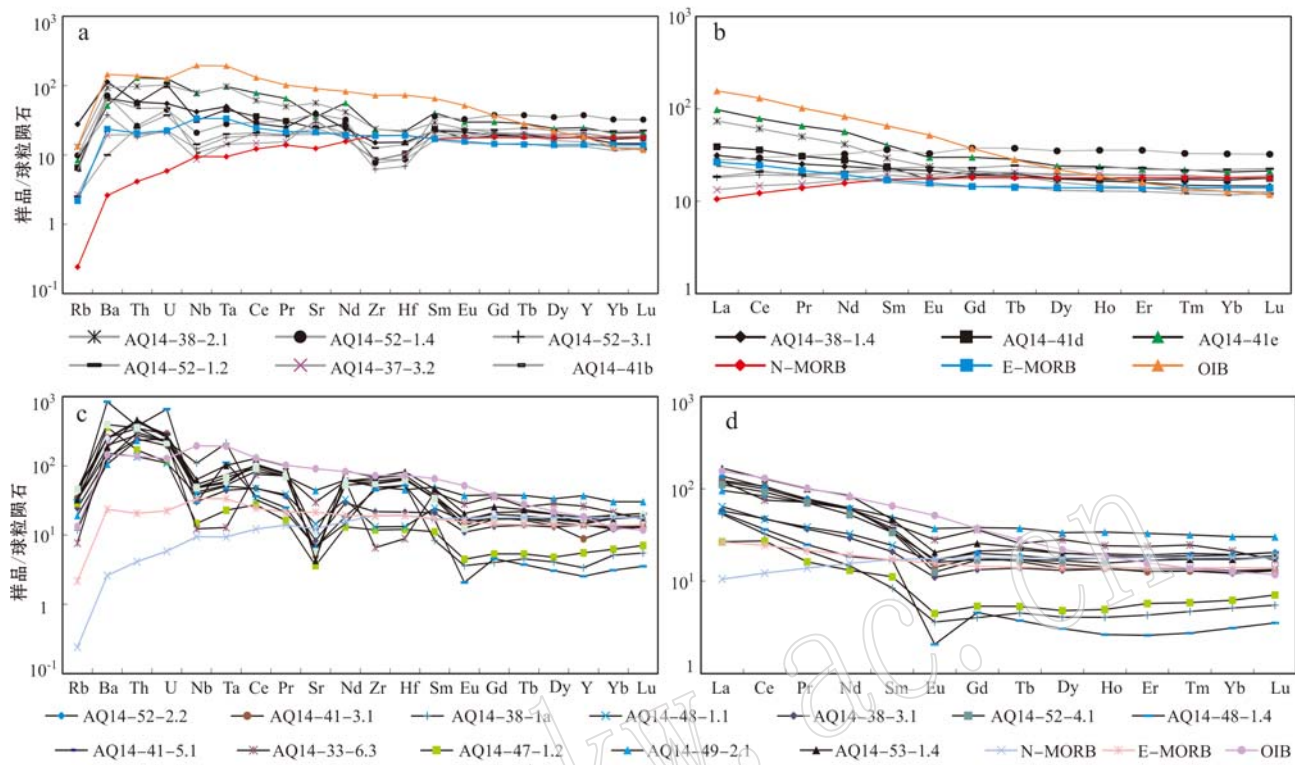


图 3 北祁连俯冲-增生杂岩带中不同类型高压低温岩石的微量元素蛛网图和稀土元素配分图
(球粒陨石标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 3 Chondrite-normalized trace elements spider diagrams and rare earth elements diagrams of different types of high pressure and low temperature rocks from subduction-accretion belt, North Qilian Mountains (chondrite values after Sun and McDonough, 1989)

a 和 b 为榴辉岩和第 1 种类型蓝片岩, c 和 d 为第 2 种类型蓝片岩和多硅白云母石英片岩

a and b are for eclogites and type I blueschists, c and d are for type II blueschists and phengite-quartz schists

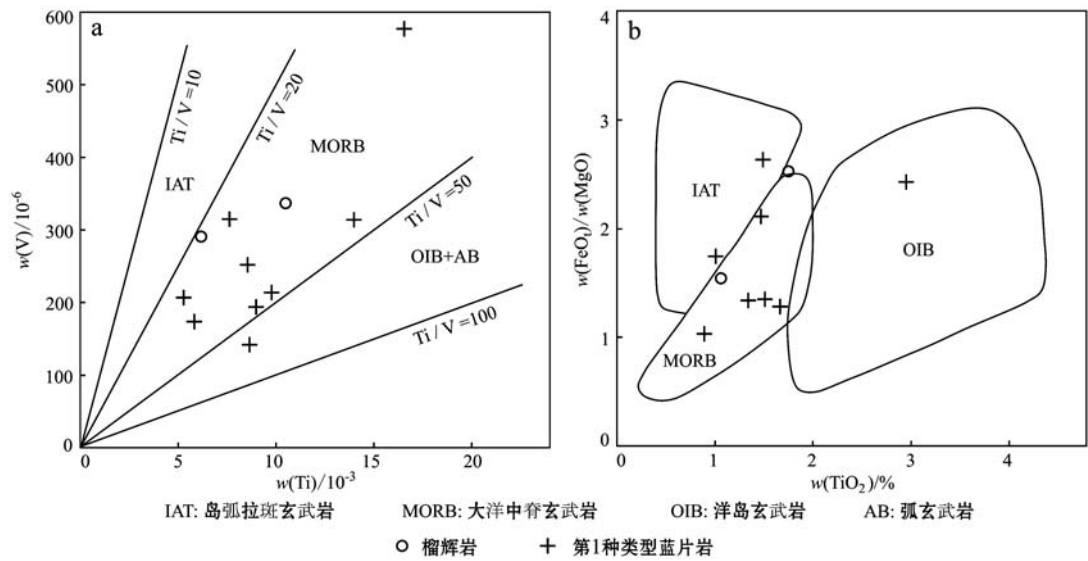


图 4 榴辉岩和第 1 种类型蓝片岩构造环境和原岩类型判别图(a 据 Shervais, 1982, b 据 Glassiey, 1974)

Fig. 4 Tectonic setting and protolith discrimination diagrams of eclogite, type I blueschist (a after Shervais, 1982; b after Glassiey, 1974)

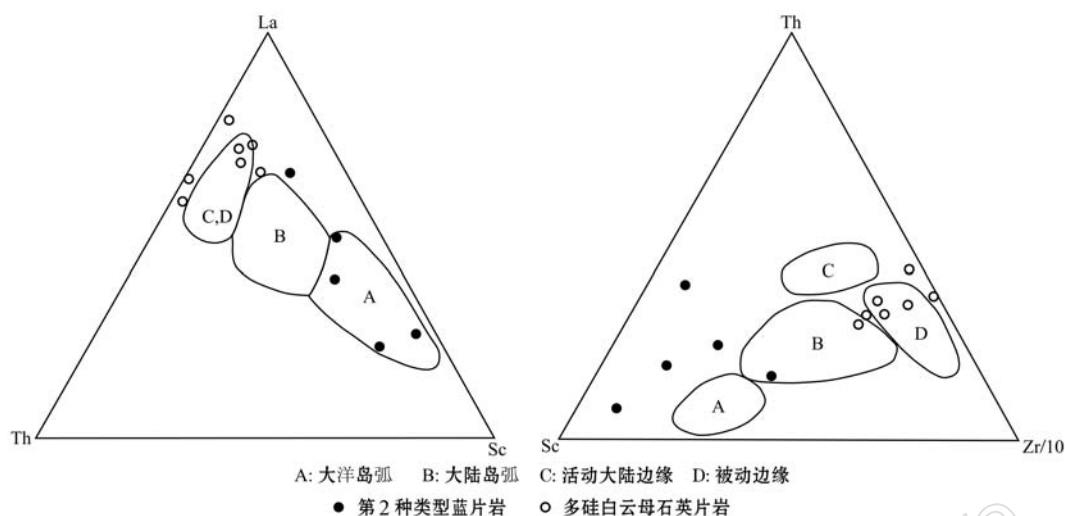


图 5 第 2 种类型蓝片岩和多硅白云母石英片岩构造环境判别图解(据 Bhatia and Crook, 1986)

Fig. 5 Tectonic setting discrimination diagrams of type II blueschist and phengite quartz schist (after Bhatia and Crook, 1986)

Zr/10 构造环境判别图(Bhatia and Crook, 1986)中, 1 件样品落入大陆岛弧区域中, 其余 4 件样品在区域外, 但在大洋岛弧和大陆弧区域周边(图 5)。上述特点暗示了第 2 种类型蓝片岩的原岩主要形成环境为大洋岛弧和/或大陆弧。

多硅白云母石英片岩中 SiO_2 含量为 64.59% ~ 74.88%, 具有高 Al_2O_3 、 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 和低 TiO_2 、 MnO 、 MgO 特征; 球粒陨石标准化微量元素蛛网图和稀土元素配分图中分别具有明显的 Sr 和 Eu 负异常, 轻稀土元素相对重稀土元素富集(图 3c、3d)。结合矿物组合特征, 说明其原岩为沉积岩。在 La-Th-Sc 构造环境判别图(Bhatia and Crook, 1986)中, 有 2 件样品落入活动大陆边缘和被动边缘区域中, 其余样品分布在该区域周边; 在 Th-Sc-Zr/10 构造环境判别图(Bhatia and Crook, 1986)中, 3 件样品落入被动边缘区域内, 1 件样品落入大陆岛弧区域内, 2 件样品分布在被动边缘区域外侧, 1 件样品分布在大陆岛弧和被动边缘区域之间(图 5)。上述分布特点表明云母石英片岩的原岩主要形成于大陆边缘环境。

硅质岩稀土元素含量对岩石构造背景具有指示意义(Murray, 1994)。在远离大陆边缘的沉积环境中形成的硅质岩, 其 Th/Sc 和 Th/U 值都较低, 而靠近大陆边缘的沉积环境中形成的硅质岩的 Th/Sc 值变化范围在 0.01~1 之间, Th/U 值一般也大于 3.8 (Girty *et al.*, 1996)。本文两件变硅质岩样品的 Th/Sc 值(0.024 和 0.009)和 Th/U 值(0.417 和

0.389)都非常低, 表明了其是在远离大陆边缘的沉积环境中形成的。对于硅质岩, 其 Al_2O_3 、 MnO 、 FeO 和 Fe_2O_3 含量可以用来指示岩石为热水成因或生物成因(Adachi *et al.*, 1986)。本文两件变硅质岩样品和 Xiao 等(2013)中一件变硅质岩样品都具有低 Al_2O_3 和 MnO 含量, FeO 和 Fe_2O_3 含量变化较大, 据 Adachi 等(1986)的分类, 原岩属于热水成因硅质岩。

3.2 锆石 U-Pb 年龄测试结果

前人已对研究区内出露的岩石做过较多的锆石 LA-ICP-MS 和 SHRIMP U-Pb 定年分析, 本文选取 1 件榴辉岩样品(AQ14-41d)和 1 件蓝片岩样品(AQ14-37-3.2)进行了锆石 SHRIMP U-Pb 定年, 测试结果见表 3。

榴辉岩样品 AQ14-41d 中, 锆石多为不规则状或浑圆状(图 6)。根据 CL 图像, 可以将其分成两类: 第 1 类锆石 CL 图像较黑, 振荡环带显示具有岩浆锆石特征, 此类锆石具有高 U($917 \times 10^{-6} \sim 2053 \times 10^{-6}$)和高 Th($638.6 \times 10^{-6} \sim 1493 \times 10^{-6}$)含量, Th/U 值在 0.43~1.0 之间; 第 2 类锆石 CL 图像为灰白色或亮白色, U 和 Th 含量都较低, U 含量为 $16 \times 10^{-6} \sim 169 \times 10^{-6}$, Th 含量 $32 \times 10^{-6} \sim 267 \times 10^{-6}$, Th/U 在 1.32~4.32 之间。第 1 类锆石中 7 个测试点获得的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 499.8 ± 4.2 Ma, 为原岩年龄; 第 2 类锆石中 12 个测试点获得的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 479.6 ± 5.8 Ma, 可能为变质重结晶或流体改造的年龄(图 7)。

表 3 榴辉岩 AQ14-41d 和第 1 种类型蓝片岩 AQ14-37-3.2 SHRIMP U-Pb 年龄测试结果
Table 3 The zircon SHRIMP U-Pb results of eclogite AQ14-41d and type I blueschist AQ14-37-3.2

Spot	$w_B/10^{-6}$			Th/U	同位素比值						t/Ma	
	U	Th	$^{206}\text{Pb}^*$		$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$	$1\sigma/\%$	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$	$1\sigma/\%$	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$	$1\sigma/\%$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$
榴辉岩 AQ14-41d												
1	1 109	703	76	0.65	0.056 63	0.9	0.621 4	1.5	0.079 58	1.2	494 ± 6	477 ± 20
2	917	724	63	0.82	0.056 53	1.1	0.625 0	1.6	0.080 16	1.2	497 ± 6	473 ± 24
3	2 053	1 507	144	0.76	0.056 85	0.6	0.639 1	1.3	0.081 53	1.2	505 ± 6	486 ± 14
4	16	56	1	3.50	0.058 60	15.0	0.635 0	15.0	0.078 60	2.7	488 ± 13	551 ± 320
6	1 395	1 193	97	0.88	0.056 04	0.8	0.625 7	1.4	0.080 98	1.2	502 ± 6	454 ± 18
7	1 946	803	134	0.43	0.057 27	0.6	0.633 1	1.3	0.080 17	1.2	497 ± 6	502 ± 14
8	22	42	1	1.95	0.056 80	10.0	0.609 0	10.0	0.077 70	2.4	482 ± 11	485 ± 220
9	41	170	3	4.32	0.056 50	11.0	0.623 0	11.0	0.079 90	2.0	496 ± 10	472 ± 240
10	32	46	2	1.49	0.058 30	16.0	0.620 0	17.0	0.076 90	2.3	477 ± 11	542 ± 360
11	24	33	2	1.43	0.054 70	15.0	0.572 0	15.0	0.075 80	2.4	471 ± 11	400 ± 340
12	1 086	639	75	0.61	0.057 33	0.9	0.636 0	1.5	0.080 46	1.2	499 ± 6	504 ± 20
13	25	32	2	1.32	0.057 00	18.0	0.580 0	18.0	0.073 80	2.5	459 ± 11	504 ± 390
14	1 819	1 493	127	0.85	0.056 59	0.7	0.635 7	1.4	0.081 48	1.2	505 ± 6	475 ± 16
15	169	267	12	1.63	0.056 70	9.5	0.655 0	9.6	0.083 70	1.5	518 ± 8	480 ± 210
16	25	33	2	1.37	0.059 50	5.2	0.633 0	5.7	0.077 20	2.2	479 ± 10	585 ± 110
17	33	71	2	2.20	0.054 80	6.6	0.575 0	6.9	0.076 20	2.0	473 ± 9	403 ± 150
18	26	65	2	2.56	0.057 00	13.0	0.595 0	13.0	0.075 70	2.3	470 ± 10	491 ± 280
19	24	34	2	1.45	0.059 00	19.0	0.630 0	19.0	0.077 50	2.6	481 ± 12	571 ± 420
20	23	44	2	1.93	0.058 80	13.0	0.656 0	13.0	0.080 90	2.7	502 ± 13	559 ± 280
第 1 种类型蓝片岩 AQ14-37-3.2												
1	139	113	10	0.84	0.060 20	7.2	0.701 0	7.3	0.084 5	1.5	523 ± 7	610 ± 150
2	217	252	16	1.20	0.056 80	4.2	0.684 0	4.4	0.087 2	1.3	539 ± 7	485 ± 93
3	81	63	6	0.80	0.061 10	11.0	0.699 0	11.0	0.083 1	1.6	515 ± 8	641 ± 240
12	41	22	3	0.55	0.053 70	6.2	0.642 0	6.5	0.086 7	2.0	536 ± 10	357 ± 140
14	274	101	21	0.38	0.054 00	4.2	0.644 0	4.4	0.086 5	1.3	535 ± 7	373 ± 93
15	24	14	2	0.60	0.065 50	11.0	0.763 0	11.0	0.084 5	2.4	523 ± 12	791 ± 220
16	204	311	15	1.57	0.058 60	3.1	0.685 0	3.4	0.084 7	1.4	524 ± 7	553 ± 68
18	69	43	5	0.64	0.055 70	3.7	0.659 0	4.0	0.085 8	1.6	531 ± 8	440 ± 81

蓝片岩样品 AQ14-37-3.2 中的锆石形态和 CL 图像与 AQ14-41d 中明显不同(图 6), 锆石多为自形-半自形, 具有明显的核边结构, 核部较黑, 振荡环带显示为岩浆锆石; 边部为灰色或灰白色, 无环带。锆石颗粒之间 U 和 Th 含量变化较大, 除第 14 号测试点 Th/U 值(0.38)小于 0.5 外, 其他测试点 Th/U 值(0.55~1.57 之间)均大于 0.5。获得的锆石岩浆核部 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 528.6 ± 5.4 Ma, 为蓝片岩原岩年龄(图 7)。锆石的变质增生边部较窄, 未能进行测试。

3.3 锆石 Lu-Hf 同位素测试结果

在获得锆石 U-Pb 年龄值后, 对相同颗粒锆石年龄测试点进行了锆石 Lu-Hf 同位素测试, 测试结果见表 4。榴辉岩样品 AQ14-41d 中, 除少数测试点(第 1、3、14 测试点) $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值略微偏高, 其他测试点的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值均小于 0.002 7。第 1 类锆石

$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值集中于 0.001 688~0.004 715 之间, 明显高于第 2 类锆石 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值分布区间(0.000 239~0.000 870), 而两类锆石 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 无明显变化, 表明第 2 类锆石为变质重结晶锆石。根据已知 U-Pb 年龄校正计算得到的两类锆石 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值在 -3.11~+1.00 之间, 以负值为主(图 8), 表明原岩明显地受到了古老地壳的影响。第 1 类锆石的两阶段模式年龄为 1 469~1 605 Ma, 第 2 类锆石两阶段模式年龄为 1 390~1 643 Ma。基性蓝片岩样品 AQ14-37-3.2 中, 从第 1 个测试点获得的 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值(17.00)较大、落在亏损地幔线之上外, 其他测试点获得的 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值分布在 +13.16~+15.35 之间, 在 $\epsilon\text{Hf}(t)-t$ 比值图(图 8)中落在亏损地幔线上或下部。所有测试点获得的一阶段模式年龄接近从锆石核部获得的年龄, 表明了原岩源区为亏损地幔, 且在后期没有受到或者极微弱的地壳物质的影响, 为新

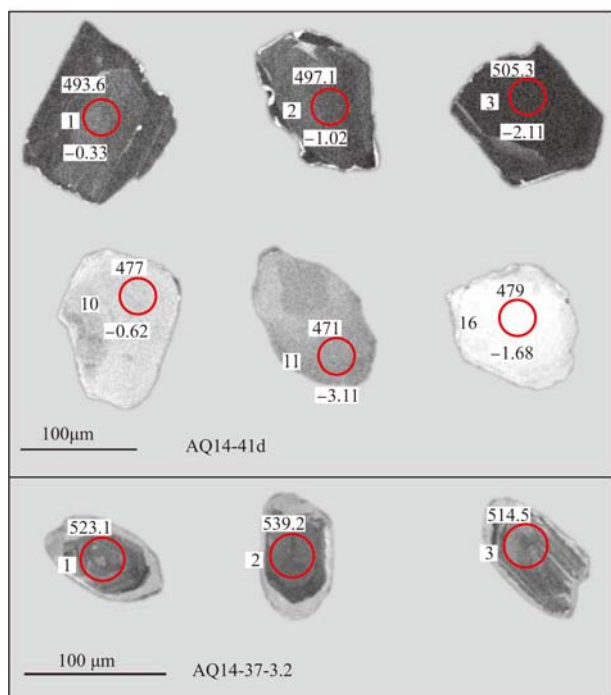


图6 榴辉岩和第1种类型蓝片岩中代表性单颗粒锆石及U-Pb年龄、Lu-Hf同位素测试结果

Fig. 6 Typical zircons from eclogite and type I blueschist and the results of U-Pb dating, Lu-Hf isotope values. Red hollow circles are SHRIMP II U-Pb and LA-ICP-MS Lu-Hf test spots, blue numbers are test spot numbers, red numbers are U-Pb ages, numbers in green are $\epsilon\text{Hf}(t)$ values.

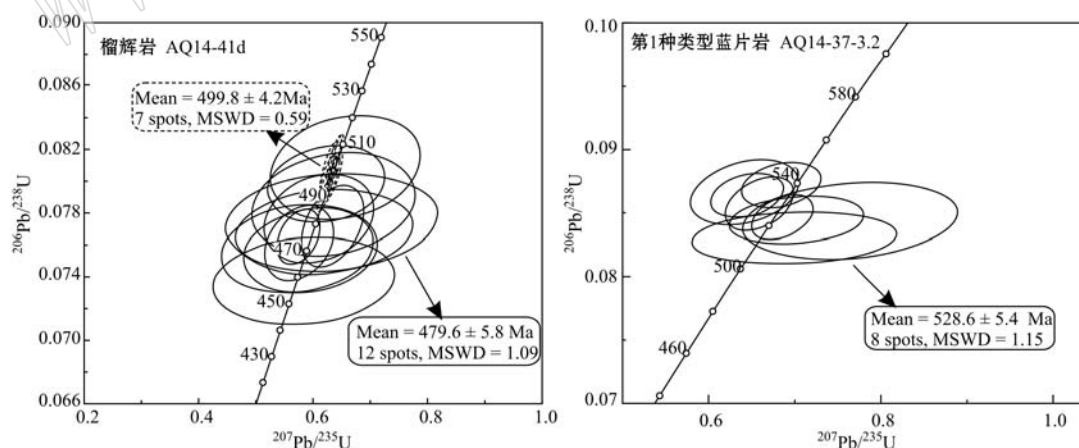


图7 榴辉岩和第1种类型蓝片岩锆石U-Pb谐和图

Fig. 7 U-Pb concordia diagrams of eclogite and type I blueschist

已有的研究表明蓝片岩分为两类类型,第1种类型为基性蓝片岩,第2种类型为变沉积岩形成的蓝片岩。前者的原岩主要为大洋中脊玄武岩,也有洋岛玄武岩和弧玄武岩;后者的原岩主要形成环境

生洋壳组成单元。

4 讨论及结论

4.1 高压/低温变质岩原岩性质及形成构造环境的多样性

地球化学特征显示本文采集的两件榴辉岩样品原岩为亚碱性大洋中脊拉斑玄武岩。结合前人研究成果,研究区内出露的榴辉岩的原岩有以下多种成因:①可能形成于大洋环境,来源于长期亏损地幔的基性岩(于胜尧等,2007);②形成于大陆边缘或洋陆过渡环境并在形成过程中明显地混入了陆壳物质的基性岩(于胜尧等,2007; Zhang *et al.*, 2007);③E型大洋中脊玄武岩或碱性玄武岩,但不排除也有可能为大洋岛弧玄武岩(Song *et al.*, 2006, Song *et al.*, 2009);④N型、E型大洋中脊玄武岩和辉长岩(Song *et al.*, 2006, 2009);⑤受弧有关物质混染的N型到E型MORB玄武岩,或为近洋中脊的海山(Xiao *et al.*, 2013);⑥形成于弧后盆地环境基性岩(Zhang *et al.*, 2016);⑦亚碱性大洋中脊拉斑玄武岩(本文)。这些已有研究成果充分表明了榴辉岩原岩类型的多样性,不同特征的基性岩被俯冲的洋壳携带至深部发生榴辉岩相变质作用形成榴辉岩。

为大洋岛弧和/或大陆岛弧。云母石英片岩的地球化学特征表明原岩主要形成于大陆边缘环境,而不是大洋岛弧环境。变硅质岩的原岩为形成于远离大陆边缘的沉积环境中的热水成因硅质岩。

表 4 榴辉岩 AQ14-41d 和第 1 种类型蓝片岩 AQ14-37-3.2 锆石 Lu-Hf 同位素测试结果

Table 4 The zircon Lu-Hf isotope values of eclogite AQ14-41d and type I blueschist AQ14-37-3.2

Spot	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	2σ	t/Ma	$\epsilon\text{Hf}(t)$	t_{DM}/Ma	t_{DMC}/Ma	f_s
榴辉岩 AQ14-41d											
1	0.282 489	0.000 027	0.003 671	0.000 054	0.139 519	0.002730	494	-0.33	1 161	1 484	-0.89
2	0.282 454	0.000 023	0.002 252	0.000 027	0.087 857	0.001 622	497	-1.02	1 166	1 530	-0.93
3	0.282 442	0.000 025	0.004 715	0.000 035	0.182 646	0.002 154	505	-2.11	1 270	1 605	-0.86
4	0.282 445	0.000 023	0.000 435	0.000 007	0.015 471	0.000 338	488	-0.95	1 123	1 519	-0.99
6	0.282 487	0.000 023	0.003 010	0.000 036	0.115 982	0.001 997	502	-0.03	1 143	1 471	-0.91
7	0.282 452	0.000 019	0.001 688	0.000 006	0.057 754	0.000 365	497	-0.92	1 151	1 524	-0.95
8	0.282 487	0.000 027	0.000 514	0.000 010	0.017 956	0.000 310	482	0.38	1 067	1 430	-0.98
9	0.282 463	0.000 023	0.000 870	0.000 001	0.032 377	0.000 199	496	-0.32	1 112	1 485	-0.97
10	0.282 460	0.000 026	0.000 239	0.000 001	0.008 098	0.000 043	477	-0.62	1 098	1 490	-0.99
11	0.282 394	0.000 023	0.000 368	0.000 006	0.012 560	0.000 191	471	-3.11	1 192	1 643	-0.99
12	0.282 483	0.000 022	0.002 387	0.000 019	0.087 285	0.001 237	499	-0.03	1 129	1 469	-0.93
13	0.282 485	0.000 022	0.000 461	0.000 004	0.016 346	0.000 199	459	-0.17	1 069	1 448	-0.99
14	0.282 481	0.000 026	0.003 571	0.000 004	0.133 284	0.001 032	505	-0.36	1 170	1 494	-0.89
15	0.282 431	0.000 026	0.000 474	0.000 003	0.015 431	0.000 032	518	-0.80	1 144	1 533	-0.99
16	0.282 431	0.000 022	0.000 497	0.000 003	0.017 780	0.000 178	479	-1.68	1 145	1 558	-0.99
17	0.282 408	0.000 025	0.000 393	0.000 009	0.013 052	0.000 294	473	-2.58	1 174	1 611	-0.99
18	0.282 467	0.000 030	0.000 603	0.000 005	0.022 081	0.000 370	470	-0.64	1 099	1 486	-0.99
19	0.282 506	0.000 024	0.000 640	0.000 003	0.023 584	0.000 220	481	1.00	1 045	1 390	-0.99
20	0.282 418	0.000 027	0.000 483	0.000 005	0.016632	0.000 115	502	-1.63	1 163	1 572	-0.99
第 1 种类型蓝片岩 AQ14-37-3.2											
1	0.282 954	0.000 024	0.002 806	0.000 136	0.114 928	0.006 744	523	17.00	444	402	-0.92
2	0.282 896	0.000 027	0.002 603	0.000 306	0.110 713	0.014 068	539	15.35	527	521	-0.92
3	0.282 855	0.000 026	0.003 225	0.000 016	0.136 781	0.000 606	515	13.18	598	640	-0.90
12	0.282 849	0.000 024	0.001 301	0.000 033	0.052 339	0.001 088	536	14.09	576	599	-0.96
14	0.282 839	0.000 021	0.000 566	0.000 014	0.020 233	0.000 259	535	13.96	579	606	-0.98
15	0.282 874	0.000 023	0.001 418	0.000 002	0.056 927	0.000 354	523	14.64	543	554	-0.96
16	0.282 838	0.000 027	0.002 144	0.000 126	0.090 035	0.005 859	524	13.16	605	649	-0.93
18	0.282 839	0.000 025	0.001 525	0.000 009	0.063 512	0.000 699	531	13.53	594	631	-0.95

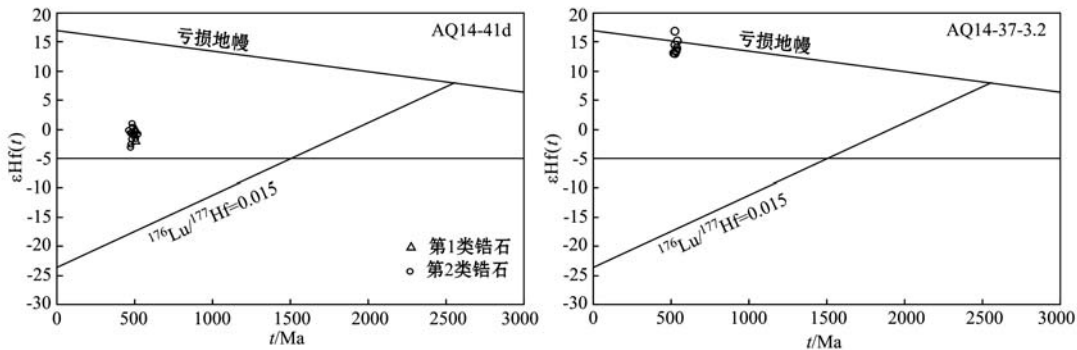


图 8 榴辉岩和第 1 种类型蓝片岩锆石 $\epsilon\text{Hf}(t)$ - t 比值图(据 Gerdes *et al.*, 2006)

Fig. 8 Zircon $\epsilon\text{Hf}(t)$ - t diagrams of eclogite and type I blueschist (after Gerdes *et al.*, 2006)

4.2 高压/低温岩石原岩时代的多期性

前人对研究区内出露的高压低温岩石的研究表明了岩石原岩具有多源性,同时不同类型岩石的原岩时代也不尽相同。对榴辉岩样品 AQ14-41d 的测

年工作获得的原岩年龄为 500 ± 4 Ma,绿辉石-石榴石蓝片岩样品 AQ14-37-3.2 获得的原岩年龄为 529 ± 5 Ma; Zhang 等(2016)认为清水沟榴辉岩的原岩时代为 495 Ma,基性蓝片岩原岩时代约为 485 Ma;

喻星星等(2016)获得清水沟-香子沟地区榴辉岩相变沉积岩碎屑锆石核部 U-Pb 年龄为 532 ~ 2 700 Ma, 大部分集中在中元古代和晚古元古代之间。Zhang 等(2007)获得香子沟榴辉岩相变基性岩岩浆核部年龄约为 700 Ma 左右, 不排除其原岩形成于新元古代的可能。上述已有研究表明研究区内不同类型变质岩的原岩时代明显不同, 即使是同一类型变质岩, 其原岩时代也有差别。高压低温岩石原岩的多时性这一特点表明被洋壳携带发生俯冲的物质的复杂性。

4.3 北祁连 HP/LT 混杂岩: 早古生代的大洋俯冲隧道

在相对较为狭窄的北祁连高压/低温变质带中, 不同类型高压低温变质岩的原岩性质和形成时代具有明显的多样性和多期性特征, 从而构成了经历 HP/LT 变质作用的混杂岩带。这一事实表明, 古祁连洋(原特提斯洋)在向北俯冲过程中, 携带来自 N 型和 E 型特征的大洋中脊玄武岩、洋岛海山、弧后盆地基性岩、大陆边缘或洋陆过渡环境的基性岩、大洋岛弧和、大陆岛弧的沉积岩、远离大陆边缘的沉积环境中的热水成因硅质岩等共同进入俯冲带深部, 进而经历高压-低温变质作用再折返至地表。这些 HP/LT 混杂带岩石组合的形成可用俯冲隧道模式来解释, 即随着洋壳向北俯冲, 在洋壳俯冲或俯冲剥蚀作用下, 洋壳和俯冲带上盘物质(如岛弧、弧前或活动大陆边缘物质)被携带并进入俯冲隧道。不同类型的岩石由于其自身密度、俯冲隧道中力学特征等因素, 部分岩石能到达榴辉岩相变质级深度或更深, 部分岩石可能仅到达蓝片岩相条件的深度, 还有部分岩石在俯冲带浅部形成了增生楔。进入俯冲隧道中不同类型的岩石, 由于原岩特征、俯冲深度等因素而最终形成了具有不同变质时代和变质温压条件的变质岩。当然, 对于不同岩石形成的温压条件和变质演化仍需进一步工作来限定。

致谢 中国地质科学院地质研究所国土资源部大陆与构造动力学重点实验室王铮工程师在锆石 Lu-Hf 同位素测试和数据处理中提供了帮助, 施彬工程师在锆石 CL 拍照工作中提供了帮助, 中国地质科学院地质研究所北京离子探针中心谢士稳助理研究员协助完成了 SHRIMP 测试并完成了数据处理, 在此一并致谢。

References

- Adachi M, Yamamoto K and Sugisaki R. 1986. Hydrothermal chert and associated siliceous rocks from the northern Pacific their geological significance as indication of ocean ridge activity[J]. *Sedimentary Geology*, 47(1~2): 125~148.
- Bhatia M R and Crook K A W. 1986. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 92: 181~193.
- Bouvier A, Vervoot J D and Patchett P J. 2008. The Lu-Hf and Sm-Nd isotopic composition of CHUR: Constraints from unequilibrated chondrites and implications for the bulk composition of terrestrial planets[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 273: 48~57.
- Cloos M and Shreve R L. 1988a. Subduction-channel model of prism accretion, mélange formation, sediment subduction, and subduction erosion at convergent plate margins: 1. Background and description [J]. *Pure and Applied Geophysics*, 128(3~4): 455~500.
- Cloos M and Shreve R L. 1988b. Subduction-channel model of prism accretion, mélange formation, sediment subduction, and subduction erosion at convergent plate margins: 2. Implications and discussion [J]. *Pure and Applied Geophysics*, 128(3~4): 501~545.
- Cumming G L and Richarda J R. 1975. Ore lead isotope rations in a continuously changing earth[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 28: 155~171.
- Gerdas A and Zeh A. 2006. Combined U-Pb and Hf isotope LA-(MC) ICP-MS analyses of detrital zircons: Comparison with SHRIMP and new constraints for the provenance and age of an Armorican metasediment in Central Germany[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 249: 47~61.
- Girty G H, Ridge D L, Knaack C, *et al.* 1996. Provenance and depositional setting of Paleozoic chert and argillite, Sierra Nevada, California[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 66(1): 107~118.
- Glassley W. 1974. Geochemistry and tectonics of the crescent volcanic rocks, Olympic Peninsula, Washington[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 85(5): 785~794.
- Griffin W L, Pearson N J, Belousova E, *et al.* 2000. The Hf isotope composition of cartonic mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(1): 133~147.
- Griffin W L, Wang X, Jackson S E, *et al.* 2002. Zircon chemistry and magma mixing, SE China: In-situ analysis of Hf isotope, Tonglu and Pingtan igneous complexes[J]. *Lithos*, 61: 237~269.

- Hou Kejun, Li Yanhe, Zou Tianren, *et al.*. 2007. Laser ablation-MC-ICP-MS technique for Hf isotope microanalysis of zircon and its geological applications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2 595 ~ 2 604(in Chinese with English abstract).
- Li Jingping, Zhang Jianxin, Yu Shengyao, *et al.*. 2009. Characteristic of eclogitic metasedimentary rocks in the North Qilian Mountains and its geodynamic implications[J]. *Acta Geologica Sinica*, 83(11): 1 667 ~ 1 686(in Chinese with English abstract).
- Liu Dunyi and Jian Ping. 2004. 243 Ma UHP and 228 Ma retrograde events of the Shuanghe jadeite quartzite, eastern Dabie mountains-SHRIMP dating, mineral inclusions and zircon REE patterns[J]. *Acta Geologica Sinica*, 78(2): 211 ~ 217(in Chinese with English abstract).
- Liu Yongjiang, Franz Neubauer, Johann Genser, *et al.*. 2006. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages of blueschist facies polytic schists from Qingshuigou in the Northern Qilian Mountains, western China[J]. *Island Arc*, 15: 187 ~ 198.
- Ludwig K R. 2001. A User's Manual. 2nd edition[M]. Berkeley Geochronology Center, Special Publication.
- Murray R W. 1994. Chemical criteria to identify the depositional environment of chert: general principles and applications[J]. *Sedimentary Geology*, 90: 213 ~ 232.
- Scherer E, Munker C and Mezger K. 2001. Calibration of the lutetium-hafnium clock[J]. *Science*, 293: 683 ~ 687.
- Servais J W. 1982. Ti-V plots and the petrogenesis of modern and ophiolitic lavas[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 59: 101 ~ 118.
- Shreve R L and Cloos M. 1986. Dynamics of sediment subduction, mélange formation, and prism accretion[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 91(B10): 10 229 ~ 10 245.
- Song Shuguang, Niu Yaoling, Zhang Lifei, *et al.*. 2009. Tectonic evolution of early Paleozoic HP metamorphic rocks in the North Qilian Mountains, NW China: New perspectives[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 35: 334 ~ 353.
- Song Shuguang, Zhang Lifei, Niu Yaoling, *et al.*. 2004. Zircon U-Pb SHRIMP ages of eclogites from the North Qilian Mountains, NW China and their tectonic implication[J]. *Chinese Science Bulletin*, 47(6): 592 ~ 595(in Chinese).
- Song Shuguang, Zhang Lifei, Niu Yaoling, *et al.*. 2006. Evolution from oceanic subduction to continental collision: A case study from the northern Tibetan Plateau based on geochemical and geochronological data[J]. *Journal of Petrology*, 47(3): 435 ~ 455.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 42: 313 ~ 345.
- Wang Quan and Liu Xueya. 1976. Paleo-oceanic crust of the Chilianshan region, western China and its tectonic significance[J]. *Chinese Journal of Geology*, 11(1): 42 ~ 55(in Chinese with English abstract).
- Wei Chunjing and Song Shuguang. 2008. Chloritoid-glaucophane schist in the north Qilian orogen, NW China: phase equilibria and *p-T* path from garnet zonation[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 26(3): 301 ~ 316.
- Williams I S. 1998. U-Th-Pb geochronology by ion microprobe[A]. Mckibben M A, Shanks W C and Ridley W I. Applications of Microanalytical Techniques to Understanding Mineralizing Processes [C]. *Rev. Econ. Geol.*, 7: 1 ~ 35.
- Wu Hanquan, Feng Yimin and Song Shuguang. 1993. Metamorphic and deformation of blueschist belts and their tectonic implications, North Qilian mountains, China[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 11: 523 ~ 536.
- Xia Linqi and Xia Zuchun. 1998. Early Paleozoic mid-ocean ridge-ocean island and back-arc basin volcanism in the North Qilian Mountains [J]. *Acta Geologica Sinica*, 72(4): 301 ~ 312(in Chinese with English abstract).
- Xia Linqi, Xia Zuchun and Xu Xueyi. 1995. Dynamics of tectono-volcano-magmatic evolution from North Qilian Mountains, China[J]. *Northwest Geoscience*, 16(1): 1 ~ 28(in Chinese with English abstract).
- Xiao Xuchang, Chen Guoming and Zhu Zhizhi. 1978. A preliminary study on the tectonics of ancient ophiolites in the Qilian Mountain, Northwest China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 52(4): 281 ~ 295(in Chinese with English abstract).
- Xiao Yuanyuan, Niu Yaoling, Song Shuguang, *et al.*. 2013. Elemental responses to subduction-zone metamorphism: Constraints from the North Qilian Mountain, NW China[J]. *Lithos*, 160 ~ 161: 55 ~ 67.
- Xu Zhiqin, Xu Huifen, Zhang Jianxin, *et al.*. 1994. The Zoulangnashan Caledonian subductive complex in the Northern Qilian Mountains and its dynamics[J]. *Acta Geologica Sinica*, 68(1): 1 ~ 15(in Chinese with English abstract).
- Yu Shengyao, Zhang Jianxin, Meng Fancong, *et al.*. 2007. Geochemical characteristics of low-temperature eclogites from the subduction-accretionary complex in the North Qilian Mountain[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 26(2): 101 ~ 108(in Chinese with English abstract).
- Yu Shengyao, Zhang Jianxin, Pablo G del R, *et al.*. 2013. The Grenvillian orogeny in the Altun-Qilian-North Qaidam mountain belts of northern Tibet Plateau: Constraints from geochemical and zircon U-Pb age and Hf isotopic study of magmatic rocks[J]. *Journal of Asia Earth Sciences*, (73): 372 ~ 395.
- Yu Xingxing and Zhang Jianxin. 2016. Zircon U-Pb geochronology and

- Hf-isotope compositions of the eclogitic metasedimentary rocks in Xiangzigou, North Qilian Mountains and their geological implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 32(5): 1 437~1 451(in Chinese with English abstract).
- Zhang Jianxin, Gong Jianghua, Yu Shengyao, *et al.* 2013. Neoproterozoic multiple tectonothermal events in the western Alxa block, North China Craton and their geological implication: Evidence from zircon U-Pb ages and Hf isotopic composition[J]. *Pre-cambrian Research*, 235: 36~57.
- Zhang Jianxin, Li Jinping, Yu Shengyao, *et al.* 2012. Provenance of eclogitic metasediments in the north Qilian HP/LT metamorphic terrane, western China: Geodynamic implications for early Paleozoic subduction-erosion[J]. *Tectonophysics*, 570~571: 78~101.
- Zhang Jianxin and Meng Fancong. 2006. Lawsonite-bearing eclogites from north Qilian and north Altyn: evidence for the cold oceanic crust subduction[J]. *Chinese Science Bulletin*, 51(14): 1 683~1 688(in Chinese).
- Zhang Jianxin, Meng Fancong and Wan Yusheng. 2007. A cold Early Paleozoic subduction zone in the North Qilian Mountains, NW China: petrological and U-Pb geochronological constraints[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 25: 285~304.
- Zhang Jianxin, Meng Fancong and Yang Jingsui. 2005. A New HP/LT metamorphic terrane in the northern Altyn Tagh, western China [J]. *International Geology Review*, 47(4): 371~386.
- Zhang Jianxin and Xu Zhiqin. 1995. Caledonian subduction-accretionary complex/volcanic arc zone and its deformation features in the middle sector of North Qilian Mountains[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 16(2): 153~163(in Chinese with English abstract).
- Zhang Jianxin, Xu Zhiqin, Chen Wen, *et al.* 1997. A tentative discussion on the ages of the subduction-accretionary complex/volcanic arcs in the middle sector of North Qilian Mountain[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 16(2): 112~119(in Chinese with English abstract).
- Zhang Jianxin, Xu Zhiqin, Xu Huifen, *et al.* 1998. Framework of North Qilian Caledonian subduction-accretionary wedge and its deformation dynamics[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 33(3): 290~299(in Chinese with English abstract).
- Zhang Jianxin, Yu Shengyao, Li Yunshuai, *et al.* 2015. Subduction, accretion and closure of Proto-Tethyan Ocean: Early Paleozoic accretion/collision orogeny in the Altun-Qilian-North Qaidam orogenic systems[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(12): 3 531~3 554(in Chinese with English abstract).
- Zhang Jianxin, Yu Shengyao and Mattinson C G. 2015. Early Paleozoic polyphaser metamorphism in northern Tibet, China[J]. *Gondwana Research*, 41: 267~289.
- Zhang Long, Chen Renxu, Zheng Yongfei, *et al.* 2016. Geochemical constraints on the protoliths of eclogites and blueschists from North Qilian, northern Tibet[J]. *Chemical Geology*, 421: 26~43.

附中文参考文献

- 侯可军, 李延河, 邹天人, 等. 2007. LA-MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素的分析方法及地质应用[J]. *岩石学报*, 23(10): 2 595~2 604.
- 李金平, 张建新, 于胜尧, 等. 2009. 北祁连山榴辉岩相变沉积岩的特征及其构造意义[J]. *地质学报*, 83(11): 1 667~1 686.
- 刘敦一, 简平. 2004. 大别山双河硬玉石英岩的超高压变质和退变质事件——SHRIMP 测年的证据[J]. *地质学报*, 78(2): 211~217.
- 宋述光, 张立飞, Niu Y, 等. 2004. 北祁连山榴辉岩锆石 SHRIMP 定年及其构造意义[J]. *科学通报*, 47(6): 592~595.
- 王荃, 刘雪亚. 1976. 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*, 11(1): 42~55.
- 夏林圻, 夏祖春. 1998. 北祁连山早古生代洋脊-洋岛和弧后盆地火山作用[J]. *地质学报*, 72(4): 301~312.
- 夏林圻, 夏祖春, 徐学义. 1995. 北祁连山构造-火山岩浆演化动力学[J]. *西北地质科学*, (1): 1~28.
- 肖序常, 陈国铭, 朱志直. 1978. 祁连山古蛇绿岩带的地质构造意义[J]. *地质学报*, 52(4): 281~295.
- 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[J]. *地质学报*, 68(1): 1~15.
- 于胜尧, 张建新, 孟繁聪, 等. 2007. 北祁连俯冲-增生杂岩带中低温榴辉岩的地球化学特征[J]. *岩石矿物学杂志*, 26(2): 101~108.
- 喻星星, 张建新. 2016. 北祁连香子沟榴辉岩相变沉积岩的锆石 U-Pb 年代学、Hf 同位素特征及其地质意义[J]. *岩石学报*, 32(5): 1 437~1 451.
- 张建新, 孟繁聪. 2006. 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[J]. *科学通报*, 51(14): 1 683~1 688.
- 张建新, 许志琴. 1995. 北祁连中段加里东俯冲-增生杂岩/火山弧带及其变形特征[J]. *地球学报*, 16(2): 153~163.
- 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[J]. *岩石矿物学杂志*, 16(2): 112~119.
- 张建新, 许志琴, 徐惠芬, 等. 1998. 北祁连加里东期俯冲-增生楔结构及动力学[J]. *地质科学*, 33(3): 290~299.
- 张建新, 于胜尧, 李云帅, 等. 2015. 原特提斯洋的俯冲、增生及闭合: 阿尔金-祁连-柴北缘造山系早古生代增生/碰撞造山作用[J]. *岩石学报*, 31(12): 3 531~3 554.