

·基础地质·

柴达木盆地北缘早古生代碰撞造山系统

王惠初^{1,2}, 陆松年², 莫宣学¹, 李怀坤², 辛后田²

WANG Huichu^{1,2}, LU Songnian², MO Xuanyue¹, LI Huaikun², XIN Houtian²

1. 中国地质大学, 北京 100083;

2. 中国地质调查局天津地质矿产研究所, 天津 300170

1. *China University of Geosciences, Beijing 100083, China;*

2. *Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources, China Geological Survey, Tianjin 300170, China*

摘要:柴达木盆地北缘在早古生代形成了一条碰撞造山带,该造山带结构保存较完整,可分辨出深俯冲板片、火山岛弧带、蛇绿杂岩带、岛弧深成岩带等组成单元。其中,俯冲板片主要由中元古代鱼卡河岩群和中新元古代花岗岩片麻岩构成,在寒武纪末—奥陶纪可能全部或部分俯冲到岩石圈深部,发生了高压—超高压变质作用。火山岛弧主要由中基性火山岩、细碎屑岩等组成,成岩时代为晚寒武世—奥陶纪。蛇绿杂岩带由超镁铁质岩、辉长岩、玄武岩和少量硅质岩组成,形成于弧后扩张脊构造背景,成岩时代为寒武纪—奥陶纪。岛弧深成岩成分变化较大,由闪长岩变化到花岗岩,成岩时代为奥陶纪。而造山带北侧的欧龙布鲁克微陆块则具有双层结构,由德令哈杂岩和达肯大坂岩群构成基底,盖层为全吉群。

关键词:柴达木盆地北缘;早古生代;碰撞造山带

中图分类号:P534.4;P542^{+.4}

文献标识码:A

文章编号:1671-2552(2005)07-0603-10

Wang H C, Lu S N, Mo X X, Li H K, Xin H T. An Early Paleozoic collisional orogen on the northern margin of the Qaidam basin, northwestern China. *Geological Bulletin of China*, 2005, 24(7): 603-612

Abstract: A collisional orogen formed in the Early Paleozoic is well preserved on the northern margin of the Qaidam basin. In this orogenic belt we may distinguish such units as the deep subducted slab, volcanic island-arc zone, ophiolite complex zone and island-arc plutonic zone. The subducted slab consists predominantly of the Mesoproterozoic Iqe Group complex and Meso- and Neoproterozoic granite-gneisses, and was probably all or partly subducted into the deep interior of the lithosphere during the terminal Cambrian-Ordovician and underwent HP-UHP metamorphism. The volcanic island-arc zone is chiefly composed of intermediate-basic volcanic rocks and fine clastic rocks, which formed during the Late Cambrian-Ordovician. The ophiolite complex consists of ultramafic rocks, gabbro, pillow lavas and minor cherts, which formed in a tectonic setting of the back-arc spreading ridge during the Cambrian-Ordovician. Island-arc pluton consists of diorite to granite, which formed in Ordovician. The Olongbruk microblock on the northern side of the orogen has a double-layer structure, i.e. a metamorphic basement composed of the Delingha complex and Daken Daban Group complex and a cover composed of the Quanji Group.

Key words: northern margin of the Qaidam basin; Early Paleozoic; collisional orogen

自柴达木盆地北缘发现石榴橄榄岩和榴辉岩以来^[1-3],柴北缘构造带引起了国内外地学工作者的广泛关注。近几年对榴辉岩及其围岩的年代学研究表明,高压—超高压变质作用发生在早古生代^[4-7]。随着区调填图和研究工作的展开,一条特征明显的早古生代碰撞造山带逐渐显现出来。

1 区域构造格架和碰撞造山带的组成单元

柴达木盆地北缘处于南祁连地块与柴达木地块的拼合部位^图。广义的“柴达木盆地北缘”通常指柴达木盆地北侧边缘断裂带与拉鸡山—中祁连南缘断裂带之间的地质体,东西

收稿日期:2004-12-20;修订日期:2005-04-11

地调项目:中国地质调查局综合研究项目(2001139000070)、基础调查项目(200013000153)资助。

作者简介:王惠初(1963-),男,研究员,构造地质学专业,从事区域地质及前寒武纪地质研究。E-mail:tjwhuichu@cgs.gov.cn

两端分别被哇洪山断裂和阿尔金断裂切断。按《青海省区域地质志》^[9]的构造单元划分,柴北缘构造带内部包括柴北缘残山褶皱带、欧龙布鲁克台隆和柴北缘台缘褶皱带3个次级构造单元。中国地质调查局推荐的《青藏高原及其邻区大地构造单元初步划分方案》^[10]将这3个次级构造单元分别称为柴北缘早古生代结合带、欧龙布鲁克微陆块和宗务隆山晚古生代—早中生代裂陷带(图1)。其中的柴北缘早古生代结合带构成了祁连陆块与柴达木陆块之间碰撞造山带的主体,由于高压—超高压变质岩石组合的存在,其大地构造意义尤显突出,可与秦岭—大别碰撞造山带比拟,被认为是一条重要的大地构造分界线,故其北侧的欧龙布鲁克微陆块不再划归柴达木陆块的范畴,而作为一个独立的微陆块对待。

自分布于柴北缘的变质基底“达肯大坂群”解体后^[5,11],柴北缘早古生代结合带的范围有所改变。除从原“达肯大坂群”中分离出一些新元古代的花岗片麻岩外,变质表壳岩系也被划分为2部分,其中含有高压—超高压榴辉岩的部分称之为鱼卡河岩群(或沙柳河岩群)^[5,12,13],主要分布在靠近柴达木盆地一侧;另一部分仍称为达肯大坂岩群,构造区划暂时并入欧龙布鲁克微陆块。

在青藏高原隆升期间,柴北缘早古生代碰撞造山带遭受了新生代构造运动的强烈改造,其内部组成已残缺不全,相互间多以构造岩片的形式交错叠置在一起。根据详细的野外填图和综合研究,可以大致分辨出该碰撞造山带的几个组成单元:①深俯冲板片——鱼卡河—沙柳河高压—超高压变质

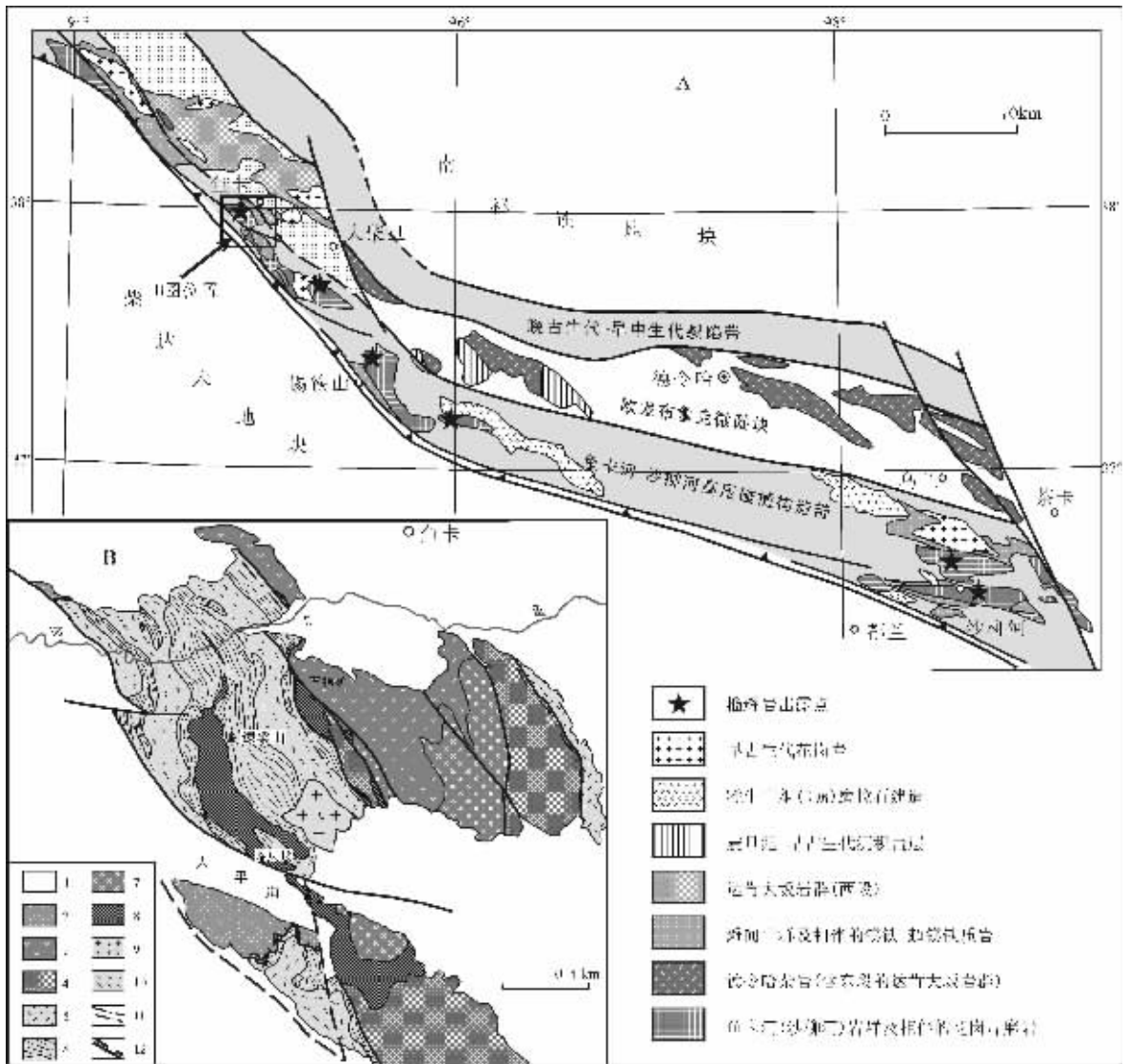


图1 柴北缘地质构造简图

Fig.1 Geological sketch map of the north margin of the Qaidam Basin

B图图例:1—新近纪—第四纪沉积物;2—滩间山群岛弧火山—沉积建造;3—滩间山群玄武岩(蛇绿杂岩组成部分);4—达肯大坂岩群;5—花岗质片麻杂岩(德令哈杂岩?);6—鱼卡河岩群;7—早古生代辉长岩;8—早古生代超镁铁质岩;9—眼球状二长花岗片麻岩;10—白云母花岗片麻岩;11—韧性剪切带;12—断层或推测断层

带、②岛弧火山岩带、③蛇绿混杂带、④岛弧深成岩带。

2 深俯冲板片:鱼卡河-沙柳河高压—超高压变质带

该带主要分布在靠近柴达木盆地一侧,与柴达木盆地多为逆冲推覆断层接触^[14-18],高压—超高压变质带被逆冲推覆到新近系红层之上。

沙柳河-鱼卡河高压—超高压变质带的物质组成除引人瞩目的榴辉岩外,与之相关的岩石组合主要是新元古代花岗质片麻岩和鱼卡河(沙柳河)岩群变质表壳岩,变质表壳岩可呈规模不等的团块产于花岗片麻岩中,两者共同遭受了后期构造变形的强烈改造。榴辉岩既可与变质表壳岩共生,也可呈独立的大小不一的透镜状块体赋存于花岗片麻岩中。因此,沙柳河-鱼卡河高压—超高压变质带在物质组成上具有三元结构特征,其主体是新元古代早期花岗质侵入体和称为鱼卡河岩群(沙柳河岩群)的变质表壳岩^[5,12,13],榴辉岩和石榴子石橄榄岩等虽出露面积很小,但它们指示了这一构造带曾经在早古生代经历过高压和超高压变质作用。

2.1 新元古代花岗片麻岩

新元古代花岗片麻岩在鱼卡河-沙柳河高压—超高压变质带内有广泛的出露。前人已对其做过初步研究^[9],这些花岗片麻岩成分较复杂,有奥长花岗质、英云闪长质、花岗闪长质、二长花岗质和钾长花岗质,以花岗闪长质—二长花岗质为主体。从野外地质关系看,奥长花岗质片麻岩和英云闪长质片麻岩形成相对较早,正长花岗质片麻岩相对较晚。其中绿梁山(鱼卡河)地区主要为白云母花岗闪长质片麻岩、白云母二长花岗质片麻岩和眼球状二云二长花岗片麻岩,后者仍可辨别出深成侵入体形态,侵入到花岗闪长质—二长花岗质片麻岩体中。锡铁山(全吉河)地区以花岗闪长质片麻岩为主,少量二长花岗片麻岩,局部正长花岗质脉体较发育,暗色矿物以黑云母为主,强片麻理部位出现较多白云母。沙柳河(阿尔茨托山)地区花岗片麻岩主体岩石类型为灰白色条带状或眼球状二云花岗闪长片麻岩、白云母花岗闪长质片麻岩,少量英云闪长质和石英闪长质片麻岩,局部岩石钾化较强,演变为条带状二长花岗片麻岩,原岩相当于似斑状花岗闪长岩—中粒花岗闪长岩。

花岗片麻岩样品的化学分析结果显示,岩石中SiO₂含量在67.10%~74.34%之间,Al₂O₃较高,为13.43%~14.97%,铝饱和指数均大于1,碱度指数多介于0.65~0.80之间,K₂O/Na₂O多数大于1,属准铝质—过铝质钙碱性岩。在An-Ab-Or图解上,花岗片麻岩样品多数投在花岗岩区(图2),少部分投在奥长花岗岩和花岗闪长岩区。按Maniar等^[19]的分类,属造山型大陆弧花岗岩(CAG)或大陆碰撞花岗岩(CCG)。在R₁-R₂图解上(图3),多数样品投在同碰撞花岗岩区。

花岗片麻岩的稀土元素含量较高,ΣREE为90.87×10⁻⁶~189.19×10⁻⁶,LREE/HREE=9.11~15.93,(La/Sm)_N=2.47~6.62,(Gd/Yb)_N=1.40~5.03,轻稀土元素分馏程度较好;δEu*

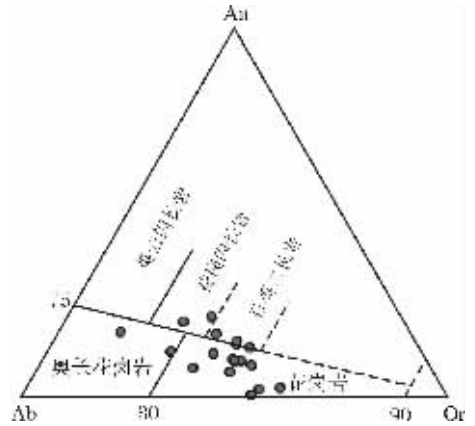


图2 花岗片麻岩An-Ab-Or图解

Fig.2 An-Ab-Or diagram of granite-gneisses

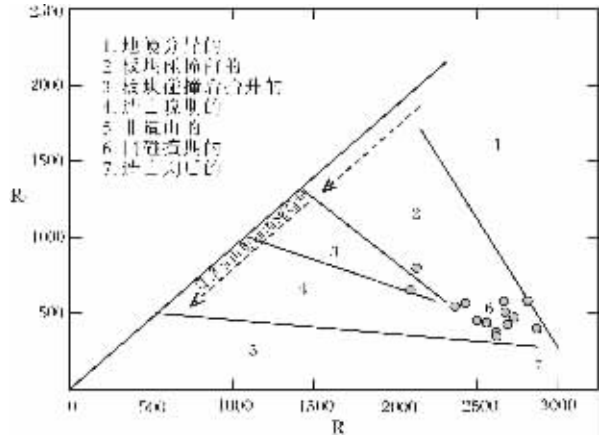


图3 花岗片麻岩R₁-R₂图解

Fig.3 R₁-R₂ diagram of granite-gneisses

=0.32~0.69,显示明显的铕负异常。Sm/Nd=0.19~0.22,岩浆源自硅铝质地壳重熔。

花岗片麻岩微量元素的MORG标准化图谱显示不相容元素K、Rb、Ba、Th等富集,Ta、Nb、Ce略高于洋脊花岗岩,Zr、Hf、Sm、Y轻度亏损,Yb强烈亏损;大多数样品出现Ba、Ta、Nb、Hf、Zr负异常。Ba负异常和较高的Rb含量显示同碰撞花岗岩的地球化学特点,而低的高场强元素和Ta、Nb、Hf、Zr负异常则与岛弧型花岗岩的相似。在Pearce等^[20]的Nb-Y和Rb-(Y+Nb)图解上所有样品均落在火山弧花岗岩和同碰撞花岗岩区(图略),表明柴北缘花岗片麻岩形成于与火山弧和大陆碰撞相关的构造背景。

近年来,利用单颗粒锆石U-Pb同位素稀释法从这些花岗片麻岩中获得了一批新元古代早期的年龄数据,年龄范围为850~1020 Ma^[5,13,21],也得到了SHRIMP法测年数据的证实^[22]。

2.2 鱼卡河(沙柳河)岩群变质表壳岩

沙柳河-鱼卡河高压—超高压变质带中的变质表壳岩由于含有特征的高压—超高压榴辉岩,不同于欧龙布鲁克微陆块上的达肯大坂岩群,在近几年的研究和地质填图中被厘定

为新的岩层单位^[9],以大柴旦绿梁山地区和都兰沙柳河地区保存较好,绿梁山地区称之为鱼卡河岩群^[5,13],都兰地区称之为沙柳河岩群^[5,12]。

绿梁山地区鱼卡河岩群变质表壳岩呈北西向带状分布,部分呈不同规模的团块或条带赋存在白云母花岗片麻岩之中,与花岗片麻岩多为平行片麻理接触,内部见有花岗片麻岩脉状体顺片麻理穿插其中。野外地质关系表现为鱼卡河岩群形成较早,花岗片麻岩形成相对较晚,两者同时卷入了后来的变形变质作用,形成了一致的片理—片麻理构造,总体呈北西向展布。鱼卡河岩群的岩性组合以石榴白云石英片岩、白云石英片岩、石英岩、石榴(蓝晶)白云片岩、二云片岩为主,部分大理岩、黑云变粒岩、石榴斜长角闪岩、黑云角闪斜长片麻岩,夹较多榴辉岩透镜体,是一套以变质泥砂质岩为主的岩石建造。

沙柳河岩群主要分布在野马滩两侧,总体呈近北西西—南东东向展布,被沙柳河花岗片麻岩等变质深成岩侵入,其中沙柳河西侧阿尔茨托山一带出露较好,出露宽度达数千米。主要岩石类型有黑云斜长片麻岩、二云斜长片麻岩(片岩)、二云石英片岩、白云母石英片岩、石英岩、长石石英岩、斜长角闪岩、斜长角闪片岩、大理岩等。岩石中出现石榴子石、蓝晶石、十字石等特征变质矿物。其原岩为泥砂质岩石夹中基性火山岩和碳酸盐岩。野马滩北侧一带的变质表壳岩呈残块状产于花岗片麻岩之中,含较多榴辉岩透镜体,岩石普遍遭受了较强的韧性剪切变形。而在阿尔茨托山一带广泛出露的变质表壳岩中,榴辉岩少见,多见榴闪岩或退变榴辉岩。

鱼卡河(沙柳河)岩群岩石多期变质作用明显,石榴白云母(石英)片岩经常可见石榴子石多期生长的层圈,层圈之间部分被其他矿物分隔,石榴子石成分变化和矿物组合揭示出鱼卡河岩群遭受了2期变质作用的信息(另文阐述)。

根据鱼卡河岩群与花岗片麻岩之间的野外地质关系和从鱼卡河(沙柳河)岩群表壳岩石中获得新元古代早期的变质年龄、物源区的时代信息,将鱼卡河岩群归属于中元古界^[13]。

2.3 榴辉岩

鱼卡河—沙柳河高压—超高压变质带中的榴辉岩近几年已有许多研究成果^[4,6,7,21,23-27]。

野外填图显示榴辉岩主要有2种产出状态:①呈透镜状或似层状产于鱼卡河岩群等变质表壳岩中;②呈透镜状产于新元古代花岗片麻岩中。从结构构造上可分为块状构造、条带状构造和片麻状构造3种类型。其中片麻状构造榴辉岩是块状构造榴辉岩退化变质和变形改造的产物,由角闪石和白云母定向排列构成片麻理。

似层状榴辉岩与石榴白云母片岩、石英片岩等变质表壳岩之间为变质岩中正常接触关系,接触界面无明显应变加强迹象。榴辉岩的条带宽从不足0.5 cm至5 cm不等,并与石榴角闪岩相间出现,走向上延伸可达400 m以上,厚度可达数十米,表明这种榴辉岩是鱼卡河岩群变质表壳岩的组成部

分。块状榴辉岩中有一部分与大理岩共生,走向上出现尖灭再现现象;镜下观察,榴辉岩中的石榴子石往往具有多期生长现象,这些榴辉岩可能也是表壳岩的组成部分。大多数块状榴辉岩呈不同规模的透镜状或团块状赋存于花岗片麻岩或石英片岩、白云母片岩等表壳岩中,沿走向往往有断续分布的迹象。

榴辉岩的岩相学和地球化学研究显示,榴辉岩的原岩的产出背景较复杂,可能包括洋脊玄武岩、岛弧拉斑玄武岩和洋岛玄武岩等^[6], $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 多数为正值,少量为负值^[4-6]。榴辉岩的高压变质时代为早古生代^[4-7],其原岩年龄有800~750 Ma和1000 Ma±Ma两组^[6],表明榴辉岩的原岩有一部分是鱼卡河(沙柳河)岩群的组成部分,一部分可能是新元古代Rodinia超大陆裂解的岩石记录。

榴辉岩中常见的变质矿物组合为石榴子石+绿辉石+角闪石+石英+金红石+多硅白云母±斜黧帘石,部分样品中发现了柯石英(或柯石英假像)等超高压证据^[24,26,27],表明榴辉岩曾经达到了超高压的变质条件。许多榴辉岩中的石榴子石常见多期生长特征,石榴子石内部具层圈构造或生长环带,不同地段变质作用的特点不同,表明榴辉岩的变质作用过程很复杂。其中阿莫尼克山一带的榴辉岩在抬升过程中遭受了高压麻粒岩相变质叠加和后期减压退变质作用。

3 火山岛弧带

3.1 火山岛弧带的岩石组合

柴北缘的火山岛弧带即为滩间山岩群主体,从东部的乌兰县至西部的赛什腾山均有断续分布,岩石组合以变质基性—中性火山岩为主,可见少量酸性火山岩,并有一些变质细碎屑岩和少量碳酸盐岩。对于这套火山岩,前人已做过一些研究工作,曾经被认为是一套裂谷型建造^[28,29],赖绍聪等^[30,31]曾依据滩间山群火山岩具洋岛火山岩性质,推测柴北缘为一蛇绿构造混杂岩带;孙延贵等^[32]也认为柴达木盆地东段托莫尔日特一带的滩间山岩群及其伴生的侵入体具有似蛇绿岩岩石组合特征。最近2年的研究工作表明,这套火山建造具有岛弧火山岩的特点^[33,34],与柴北缘高压碰撞带的形成具有密切的成生联系。

变质火山岩以中基性的玄武岩—安山岩为主,少量英安岩,主要岩石类型有:①变余斑状辉石玄武岩,以含辉石斑晶(辉石假像)为特征,根据矿物成分的相对含量岩性可分为绿泥钠长绿帘阳起石岩、绿帘斜长阳起石岩、绿泥绿帘阳起石岩、阳起斜长绿帘石岩和斜长阳起石岩等。②变余斑状安山岩,以含较多斜长石斑晶为特征。③变玄武岩,与变余斑状辉石玄武岩的主要区别是不含或含极少辉石假像斑晶,可含少量斜长石斑晶。该类岩石矿物成分变化较大,根据矿物成分的相对含量可分为下列几种岩性:含黑云绿帘绿泥斜长石岩、阳起绿泥斜长石岩、绿帘绿泥钠长片岩、含阳起绿帘绿泥片岩、斜长阳起绿帘石岩等。④变火山碎屑岩,主要为变晶屑玻屑凝灰岩。变质碎屑岩主要由粒度细小的石英岩、变粒岩等组成,可见少量大理岩。石英岩(变砾质岩)为细粒粒状镶

嵌变晶结构,薄层条带状构造,矿物成分以石英(70%~90%)为主,次为黑云母和白云母(绢云母)。变粒岩主要为黑云母变粒岩,由石英(40%~45%)、斜长石(25%~30%)、黑云母(8%~15%)、石榴子石(1%~5%)等组成。岩石普遍碳酸盐化,方解石含量最高可达30%。

3.2 岛弧火山岩的地球化学特点

变火山岩的SiO₂含量变化较大,以基性—中性火山岩为主,部分为酸性火山岩^[33,34]。在火山岩分类的TAS图上以亚碱性为主,少量属碱性。由于岩石遭受了绿片岩相的变质作用,岩石中碱质尤其是Na₂O有可能发生强烈交换而使岩石分类出现失真现象。应用微量元素分类的Zr/Ti-Nb/Y图解^[35]判别均落在亚碱性区。在FAM图上样品具有钙碱性系列演化趋势。变火山岩的TiO₂均较低,TiO₂<1%,与岛弧火山岩相似。

变火山岩的稀土元素含量显示,稀土图谱有平坦型和轻稀土富集型2种。其中平坦型的稀土总量低,稀土分馏不明显,基本无铈异常。富集型稀土总量高,稀土分馏强,且轻稀土分馏高于重稀土,铈异常亦不明显^[33,34]。平坦型稀土曲线与岛弧拉斑玄武岩的特点类似,轻稀土富集型稀土曲线与岛弧钙碱性玄武岩的稀土曲线类似。

岛弧变质火山岩多数样品Nb含量低(0.7×10⁻⁶~9.2×10⁻⁶),且Nb相对Th和Ce出现负异常,Zr、Ti、Y出现亏损,具有火山弧玄武岩微量元素的特点。应用微量元素图解判断成岩构造环境,在Hf/3-Th-Nb/15图解上^[36],投点均落入钙碱性岛弧玄武岩区(图4)。

3.3 岛弧火山岩的形成时代

目前从滩间山岩群中已获得了一批同位素年龄数据,如锡铁山地区滩间山岩群的中酸性火山岩的锆石U-Pb年龄为486 Ma±13 Ma^[37];托莫尔日特地区滩间山岩群火山岩Rb-Sr等时线年龄为450 Ma±4 Ma,斜长质花岗岩Rb-Sr等时线年龄为447 Ma±22 Ma^[38],时代均属奥陶纪。锆石U-Pb年龄可视成岩年龄,Rb-Sr等时线年龄很可能反映了变质作用的年代。笔者等在绿梁山的变辉石玄武岩中采样,获得了464.2 Ma的单颗粒锆石U-Pb一致线年龄^①,3个锆石测点均落在一致线上。最近史仁灯等^[34]从赛什腾山吉绿素的变安山岩中取样,应用LA-ICP-MS法对锆石进行了测试,获得了514.2 Ma±8.5 Ma的U-Pb年龄。

根据上述测年结果,结合野外地质关系和区域资料,可以确定该套岛弧火山岩的形成时代为早古生代,与柴北缘高压榴辉岩的形成时代大致相同。

4 蛇绿混杂带

柴北缘是否存在蛇绿岩一直有争议^[31,32,39,40]。近几年通过地质填图和综合分析,笔者等对柴北缘绿梁山地区的滩间山岩群进行了解体,认为主体属岛弧火山岩,但有一部分变玄武岩(石棉矿附近)具拉斑系列演化趋势,层理不发育,无岛

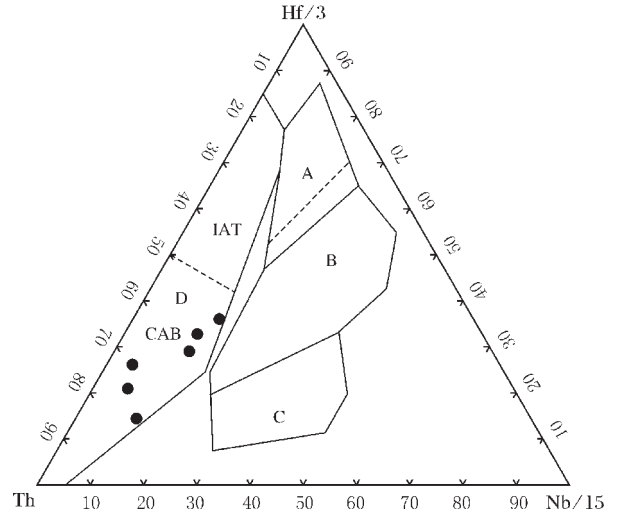


图4 岛弧火山岩的Hf-Th-Nb图解

Fig.4 Hf-Th-Nb diagram of island arc volcanic rocks

A—正常型洋脊玄武岩;B—富集型洋脊玄武岩和板内拉斑玄武岩;C—碱性板内玄武岩;D—火山弧玄武岩;
IAT—岛弧拉斑玄武岩;CAB—钙碱性玄武岩

弧火山岩中的沉积岩或火山碎屑岩夹层,与辉长岩和超镁铁质岩共生,构成蛇绿混杂岩带(图1-B)。区域上蛇绿混杂岩带常与岛弧火山岩呈岩片状叠置在一起,总体上与俯冲带相关,属SSZ型^[41]。辉长岩与超镁铁质岩之间多为侵入接触关系,部分为韧性剪切接触;辉长岩与变玄武岩之间多为断层接触,局部见侵入接触关系。

4.1 蛇绿杂岩的岩石组合

蛇绿杂岩主要由变质橄榄岩、辉长岩、辉长辉绿岩、玄武岩(枕状熔岩)和少量硅质岩组成。

(1)变质橄榄岩。主要岩石类型为强蛇纹石化橄榄岩,部分为蛇纹石化二辉橄榄岩。强蛇纹石化橄榄岩:深灰绿色—深橄榄绿色,中细粒结构、交错纤维—叶片变晶结构。主要矿物成分为蛇纹石(橄榄石,95%~98%),含少量碳酸盐矿物和铬铁矿。蛇纹石化二辉橄榄岩:深黄绿色、暗绿色,中细粒结构、纤状—叶片状变晶结构、网环状结构,块状构造。主要矿物成分有蛇纹石(部分呈橄榄石假像,70%~85%)、橄榄石(5%~15%)、单斜辉石(5%~15%),斜方辉石仅见少量残留体存在,还含少量尖晶石和碳酸盐矿物。

(2)蚀变辉长岩。岩石呈浅灰绿色,因强烈蚀变岩性已变为片状斜长绿帘阳起石岩、含斜长绿帘黝帘阳起石岩、黝帘透闪石岩、黝帘斜长阳起石岩等。野外露头上可分辨出原岩具辉长结构。镜下观察辉石发生阳起石化、透闪石化或次闪石化,大部分辉石已被阳起石或透闪石等取代,局部可见残留的辉石假晶,辉石假像约占45%~69%;斜长石发生绿帘石

① 天津地质矿产研究所.1:5万鱼卡沟幅、西泉幅区域地质调查报告.2003.

化、黝帘石化或绢云母化,多数仍可分辨出斜长石晶形,具隐约的聚片双晶,约占总量的30%~50%;绿帘石、黝帘石含量不等,可见少量绿泥石、方解石,偶见石英。

(3)变玄武岩(枕状熔岩)。岩石呈深灰色—灰绿色,片理不发育,局部可见不十分清晰的枕状构造。主要岩石类型有绿帘阳起石岩、阳起斜长绿帘石岩、绿帘斜长阳起石岩等。野外露头上可见一些细粒的辉长辉绿岩与变玄武岩共生,呈岩脉状产出。

(4)硅质岩。岩石呈暗灰色,粒度细小,显条纹构造,含放射虫碎片。镜下观察岩石已变质重结晶,为微细粒石英岩。

4.2 蛇绿杂岩的地球化学特征

超镁铁质岩的SiO₂含量大于40%,低Ti、富Mg、贫碱,在Al₂O₃-CaO-MgO图解上,样品投在变质橄辉岩区及附近(图5),SiO₂-Al₂O₃图解上,样品投在低铝—铝质区。稀土元素总量很低,为3.05×10⁻⁶~4.75×10⁻⁶,LREE/HREE=3.15~8.22,稀土曲线微向右倾(图6);重稀土明显亏损,部分轻稀土也亏损;轻稀土分馏程度较低;Sm/Nd=0.21~0.29,(La/Sm)_N=2.52~4.99,(La/Yb)_N=2.90~11.57。δEu^{*}=0.62~1.29,显示弱铈正异常或弱铈负异常。

辉长岩具有富Al、Ca和贫Fe、Ti的特征。SiO₂=47.92%~49.63%,CaO=10.17%~14.82%,Al₂O₃=14.46%~18.74%;K₂O+Na₂O=1.56%~3.19%;碱指数为0.13~0.32,铝饱和指数为0.59~0.68,TFeO+MgO+TiO₂=13.84%~18.40%。在Al₂O₃-CaO-MgO图解上,样品均投在镁铁堆积岩区(图5),与洋中脊玄武岩平均成分相近;在SiO₂-(K₂O+Na₂O)图上,样品均落在钙碱性辉长岩区。辉长岩的稀土总量较低,ΣREE=2.99×10⁻⁶~14.97×10⁻⁶;LREE/HREE=1.03~2.16,(La/Sm)_N=0.63~1.58,(La/Yb)_N=0.49~1.79,稀土曲线呈平坦型;稀土分馏程度较低(图6);δEu^{*}=1.12~1.9,显示铈正异常,具有幔源分异产物的特征。稀土曲线由下至上,正铈异常逐渐减弱,这是岩浆分异斜长石堆晶的结果。辉长岩中Nb、Ce、Zr、Hf、Ti、Sm、Yb等元素明显亏损,显示出与过渡型洋脊玄武岩相似的特征,故辉长岩的形成可能与弧后扩张有关。

变玄武岩的SiO₂含量在50%左右,在TAS图上落在玄武岩区。玄武岩中K₂O含量较低,K₂O<0.34%,属低钾系列。TiO₂相对较高,为1.76%~2.45%,与过渡型洋脊玄武岩相似。在FAM图上具拉斑系列演化趋势。玄武岩的稀土曲线为平坦型(图6),但稀土总量相对辉长岩较高(ΣREE=51.72×10⁻⁶~66.1×10⁻⁶),HREE/LREE在1.86~2.06之间,(La/Yb)_N=1.26~1.43,(La/Sm)_N=0.88~1.33,(Gd/Yb)_N=1.13~1.39,轻重稀土分馏程度很低;δEu^{*}=0.82~0.95,微弱负异常,其特点与过渡型洋脊玄武岩相似。

依据上述岩石组合的地球化学特点及其产状,推测蛇绿杂岩很可能形成于弧后扩张脊环境。

4.3 蛇绿杂岩的形成时代

在绿梁山的辉长岩中已获得496.3 Ma±6.2 Ma的单颗粒锆石U-Pb年龄^[2],数据点均落在一致线上。另外变质玄武

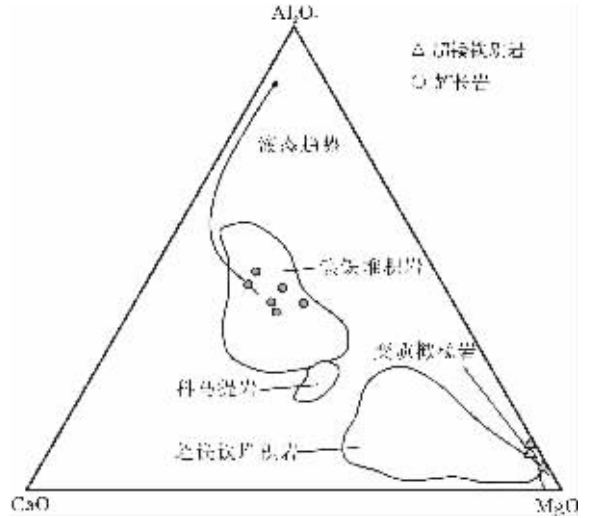


图5 橄辉岩和辉长岩的Al₂O₃-CaO-MgO图解
Fig.5 Al₂O₃-CaO-MgO diagram of gabbro and peridotite

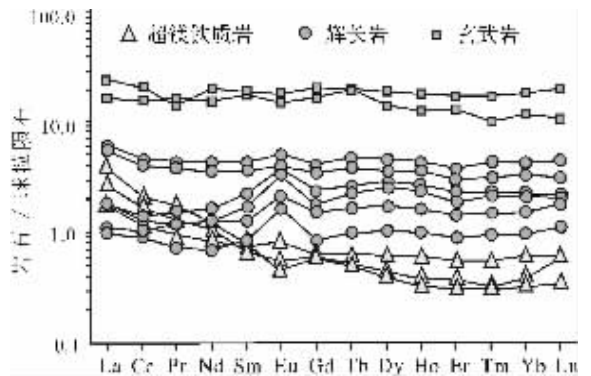


图6 蛇绿杂岩的稀土元素图谱
Fig.6 REE patterns of ophiolite complex

岩中也获得了542 Ma±13 Ma的下交点年龄^[2],其可靠性虽稍逊于辉长岩中获得的年龄数据,但结合辉长岩与变玄武岩的共生关系,该年龄值也具有较大的参考价值。辉长岩与超镁铁岩之间多见为片理化带接触,但辉长岩中见有超镁铁质岩团块,显示超镁铁质岩的形成略早于辉长岩。

由此可见,蛇绿杂岩应形成于早古生代早期,与柴北缘榴辉岩的形成时代相近,两者应是同一构造系统的产物。

5 岛弧深成岩

柴北缘构造带在1:20万区域地质调查工作中已厘定出一些加里东期侵入体,最近几年的填图和研究从中又识别出一些早古生代的花岗质岩石。由于测年技术的提高和柴北缘大地构造性质的明确,早古生代花岗质侵入体的形成构造背景渐趋清晰。这些花岗质侵入体多数出现在欧龙布鲁克微陆块的南侧边缘,与达肯大坂岩群等呈侵入接触关系,以嗽唠山岩体和大柴旦附近的孤山岩体为代表;部分产于岛弧火山岩带

中,往往侵入到滩间山岩群(岛弧火山岩)和超镁铁—镁铁质岩体(蛇绿杂岩)之中,以乌兰附近的托莫尔日特石英闪长岩—花岗闪长岩序列为代表。岩石地球化学特征显示,这些岩石具有岛弧深成岩的特点,而无明显碰撞造山花岗岩的特征。

5.1 岛弧深成岩的岩石特征

岛弧型深成岩主要岩石类型有石英闪长岩、英云闪长岩、奥长花岗岩、花岗闪长岩等,局部见有偏基性的闪长岩和酸性的二长花岗岩,岩体往往具有成分演化的特点。

石英闪长岩:岩石呈灰色,中细粒半自形柱粒状结构,块状构造,主要矿物成分为斜长石(50%~60%)、石英(5%~10%)、钾长石(5%)、角闪石(15%~25%)、黑云母(3%~8%),副矿物有锆石、磷灰石、榍石、钛铁矿等。

英云闪长岩(奥长花岗岩):岩石呈灰白色,不等粒结构或中粒—中粗粒花岗结构,块状构造。主要矿物有斜长石(更长石,55%~70%)、微斜长石(2%~6%)、石英(20%~35%)、白云母(1%~3%)、黑云母(2%~6%),少量角闪石、绿帘石、黝帘石。

花岗闪长岩:岩石呈灰白色—浅肉红色,中粒—中粗粒花岗结构,块状构造,主要矿物成分有斜长石(更长石,50%~60%)、微斜长石(15%~20%,分布不均匀)、石英(25%~30%)、白云母(1%~3%)、黑云母(2%~5%),部分样品中出现角闪石,少量绿帘石、黝帘石。

二长花岗岩:灰白色—浅肉红色,不等粒花岗结构,块状构造。岩石主要矿物成分为斜长石(30%~40%)、石英(25%~35%)、钾长石(25%~30%)、黑云母(2%~5%)、白云母(1%~3%),角闪石少量,暗色矿物分布不均匀。

5.2 岛弧深成岩的地球化学特征

岩石化学成分变化较大, SiO₂含量变化在50%~72%之间。不同岩体地球化学特点相差甚远。其中2个具有代表性的岩体地球化学特征如下。

噶喇山岩体:该岩体出露于柴北缘西段噶喇山一带,侵入到达肯大坂岩群中。1:20万马海幅定为加里东期石英闪长岩体,主体为灰白色,局部灰色和浅肉红色,内部岩性变化较大,但以酸性单元为主,局部显片麻状构造,与北西向的区域性片麻理一致。吴才来等^[43]取样研究显示,岩体的SiO₂含量变化于52.94%~71.9%之间, Na₂O、K₂O含量和Na₂O/K₂O比值变化范围较大,分别在3.70%~4.26%、1.24%~3.67%和1.07~3.70之间。岩石在碱硅图解上均属钙碱性岩系。

噶喇山花岗岩的稀土元素总量变化于77.89×10⁻⁶~135.40×10⁻⁶之间^[43],从稀土元素球粒陨石标准化曲线来看(图7),样品显微弱的负铈异常,岩石的过渡族元素丰度变化不大,但不相容元素的丰度变化较大。在微量元素蛛网图上(图8), Nb、Ta和Zr、Hf出现负异常,明显具有岛弧花岗岩的特点。Ti与岩石酸性程度呈负相关关系,反映了岩浆的分异作用。在R₁-R₂图解上,岩石均落入板块碰撞前花岗岩区(图略),在Nb-Y图解和Rb-(Y+Nb)图解上^[40],样品均落入火山弧型花岗岩区(图略)。

根据其产状和地球化学特点推断,噶喇山花岗岩产出的

构造背景为活动陆缘岛弧。

大柴旦孤山花岗岩体:孤山岩体出露于柴旦湖的北侧,岩性相对较均匀,为灰白色中粗粒英云闪长岩,局部成分相当于花岗闪长岩。岩石样品的SiO₂=70.46%~72.28%, 贫钾富钠, K₂O/Na₂O=0.24~0.58; 铝饱和指数为0.97~1.08, 为次铝质岩石。岩石在碱硅图解上均属钙碱性岩系,在An-Ab-Or图解上,样品投在奥长花岗岩区。

稀土元素总量较低,为24.86×10⁻⁶~52.28×10⁻⁶,重稀土含量更低; Y=3.31×10⁻⁶~5.31×10⁻⁶, Yb=0.33×10⁻⁶~0.58×10⁻⁶。轻重稀土分馏中等, Sm/Nd=0.18~0.28, (La/Sm)_N=2.39~4.58, LREE/HREE=6.59~11.35, (La/Yb)_N=9.23~18.16, 为轻稀土富集型(图7)。岩石样品不相容元素K、Rb、Ba、Th等明显富集, Ta、Nb、Ce、Zr、Hf、Sm等轻度亏损, Y、Yb等强烈亏损(图8)。在R₁-R₂图解上, 岩石均落入板块碰撞前花岗岩区和碰撞型花岗岩区(图略), 在Nb-Y图解和Rb-(Y+Nb)图解上^[40], 样品均落入火山弧型花岗岩区(图略)。但不出现典型的Nb、Hf负异常, 与通常意义上的岛弧花岗岩有一定区别。岩石具有高铝高铈贫重稀土元素的特点, 与埃达克岩特点类似, 在(La/Yb)_N-Yb_N图解和Sr/Y-Y图解(图略)上均落在埃达克岩区, 岩体的形成很可能与消减到欧龙布鲁克陆块之下的大洋板块部分熔融有关。

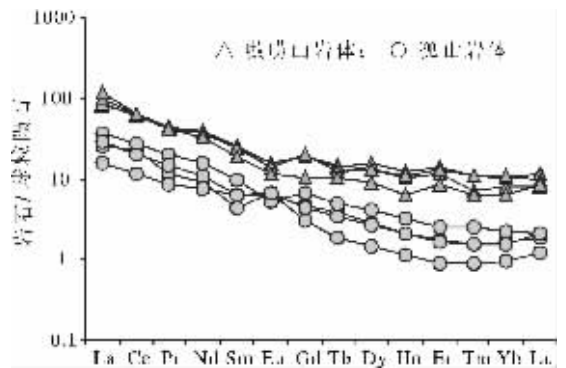


图7 早古生代花岗质岩石的稀土元素图谱
Fig.7 REE patterns of Early Paleozoic granitic rocks

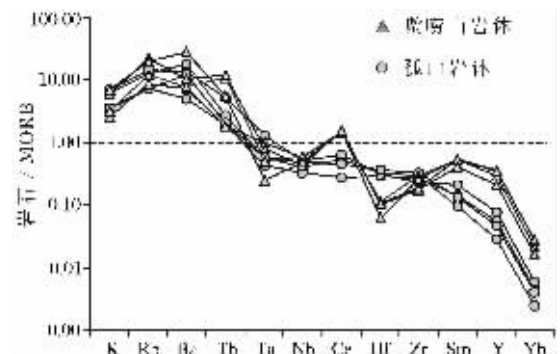


图8 早古生代花岗质岩石的微量元素图谱
Fig.8 MORB-normalized trace element patterns for Early Paleozoic granitic rocks

5.3 岛弧深成岩的形成时代

吴才来等^[43]在嫩岭山花岗岩中采样,对其中的锆石进行了SHRIMP测试,6颗锆石的年龄变化于(445±15.3)~(496±7.6) Ma之间,结合锆石的特征并考虑年龄误差变化范围,得出该岩体的平均年龄为473 Ma,时代属早奥陶世。年龄值的统计出现2个峰值,第1个峰值(495 Ma)与柴北缘榴辉岩的年龄接近,可能反映花岗岩源岩部分熔融作用的时期,第2个年龄峰值(465 Ma)可能反映了花岗质岩浆冷结晶作用的时代。孤山岩体的时代,原1:20万大柴旦幅定为石炭纪—二叠纪。绿梁山地区1:5万西泉幅区域地质调查在孤山单元中采集了1个同位素年龄样品。从中分选出的锆石呈无色—浅黄色、透明、自形柱状晶体。无色透明晶体所获得的U—Pb同位素上交点年龄1661 Ma±120 Ma、下交点年龄值446 Ma±17 Ma。锆石中U、Pb同位素组成不均一,可能存在中元古代继承锆石。测试点靠近下交点,可以将下交点年龄(446 Ma±17 Ma)认做孤山花岗岩岩浆结晶年龄的上限。

6 欧龙布鲁克微陆块

欧龙布鲁克微陆块为造山带活动陆缘一侧的陆块,前泥盆纪的主要岩石单元包括德令哈杂岩、达肯大坂岩群、新元古代全吉群等。

6.1 德令哈杂岩

德令哈杂岩是指分布于德令哈—乌兰一带的一套斜长角闪岩—二长花岗片麻岩—混合岩组合,在德令哈出露得最为清楚。以大面积分布的砖红色二长花岗片麻岩为主,斜长角闪岩以规模不等和形态各异的残块或条带赋存于其中,二者的接触部位常发生条带状混合岩化现象。测得斜长角闪岩和二长花岗片麻岩的单颗粒锆石U—Pb同位素年龄为2412 Ma±14 Ma、2366 Ma±10 Ma^[11]。王毅智等^[44]和张建新等^[45]分别在乌兰和德令哈附近的杂岩中发现了基性麻粒岩包体,并从麻粒岩中获得了Sm—Nd等时线年龄1791 Ma±37 Ma和2519 Ma(Nd模式年龄)^[45],认为前者代表变质年龄,后者可能反映了原岩的年龄信息。

6.2 达肯大坂岩群

重新厘定后的达肯大坂岩群,是指赋存于欧龙布鲁克陆块上以石英岩、含石榴子石砂线石石英片岩、云母片岩和斜长角闪(片)岩为主的一套表壳岩组合。它在空间上与德令哈杂岩共生,在德令哈市黑石山水库附近可见达肯大坂岩群下部的石英岩与德令哈杂岩呈构造接触,原生接触关系已被破坏。该岩群原岩是以碎屑岩为主的火山—沉积岩系,变质程度差异较大,从高绿片岩相变化到高角闪岩相。

柴达木盆地北缘东端仁青伦布、阿穆哈和一棵树一带的达肯大坂岩群被单颗粒锆石U—Pb年龄为2202 Ma±28 Ma的呼德生片麻岩^①所侵入,据此推断达肯大坂岩群的时代为古元古代早期。在乌兰一带达肯大坂岩群中还测得了代表变质深熔作用产物的淡色脉体的锆石U—Pb年龄为1939 Ma±

21 Ma,充分显示达肯大坂岩群普遍遭受了强烈的变质作用和深熔作用的叠加改造。

此外,在柴北缘嫩岭河西侧的鹰峰一带存在1个以奥长环斑花岗岩为主的杂岩体,与附近的达肯大坂岩群呈断裂接触,从中获得的锆石U—Pb同位素年龄为1776 Ma±33 Ma^[46]。李怀坤等(未刊资料)也测得了与之一致的年龄数据,8个U—Pb同位素数据点拟合的不一致线的上、下交点年龄分别为1763 Ma±53 Ma和700 Ma±23 0Ma。测年矿物锆石为浅紫色透明柱状晶体,阴极发光照相显示锆石发育典型的震荡环带,不含早期的锆石核,也没有后期生长的包壳,年龄数据可靠,上交点年龄可代表岩体的形成年龄。这期裂解事件也限定了达肯大坂岩群的时代上限。

需要指出的是,以大柴旦为界,西段的达肯大坂岩群与东段的达肯大坂岩群在岩石建造和变质程度上有较大差异,从绿梁山地区达肯大坂岩群中获得的锆石U—Pb年龄信息多介于580~378 Ma之间,因此对大柴旦以西的达肯大坂岩群的时代归属尚存疑虑,有可能是一套早古生代的弧后盆地建造。

6.3 全吉群

德令哈杂岩和达肯大坂岩群共同构成柴达木盆地北缘欧龙布鲁克陆块的变质基底,全吉群(及其上早古生代早期的地层)则是变质基底上的一套沉积盖层。全吉群分布于柴达木盆地北缘的全吉山、欧龙布鲁克、石灰沟、大头羊沟等地,剖面完整,构造简单,顶底界线清楚,出露良好,尤以全吉山和欧龙布鲁克保存得好。全吉群自下而上可划分为麻黄沟组、苦柏木组、石英梁组、红藻山组、黑土坡组、红铁沟组和皱节山组^[47]。中下部层位主要为砾岩、砂砾岩,上部层位以碳酸盐岩为主,夹砂页岩;石英梁组下部含(碱性)玄武质火山岩,红铁沟组为冰川事件沉积。根据沉积演化特征,可以粗略地将全吉群自下而上划分为2个层序。第1个层序(DS1)包括麻黄沟组—红藻山组4个组;第2个层序(DS2)由黑土坡组—皱节山组3个组构成^[48]。地球化学研究表明,全吉群火山岩为钙碱性—碱性玄武安山岩—玄武岩—苦橄玄武岩类, $K_2O + Na_2O = 2.45\% \sim 8.70\%$, $K_2O/Na_2O = 0.7 \sim 1.92$ 。初步锆石U—Pb同位素年龄研究显示全吉群火山岩形成时代为800 Ma左右。因此,全吉群在年代地层序列上应该相当于南华系—震旦系^[49]。从沉积岩石组合、沉积环境和火山岩地球化学特征分析,全吉群具有典型的裂陷槽沉积特点,是边缘裂陷槽的产物。全吉群之上为下寒武统小高炉群海相沉积所覆盖,二者之间没有明显的不整合间断,整个全吉群基本没有发生变质作用。

正如前述,在欧龙布鲁克地块上有岛弧深成岩侵入到达肯大坂岩群中(主要出现在柴北缘西段),并有早古生代碰撞造山型花岗岩侵位的报道^[49]。

7 造山带的形成演化

综上所述,柴北缘早古生代造山带可以分辨出深俯冲板

① 天津地质矿产研究所.1:25万都兰幅区域地质调查报告.2004.

片、火山岛弧带、蛇绿杂岩、岛弧深成岩带等组成部分。俯冲板块主要由中元古代鱼卡河岩群和新元古代早期的花岗片麻岩构成,在寒武纪末—奥陶纪初期开始俯冲,随着洋壳的消减,大陆地壳俯冲到岩石圈深部,发生了高压—超高压变质作用,形成榴辉岩。火山岛弧主要由中基性火山岩、部分酸性火山岩、细碎屑岩及少量碳酸盐岩组成,发生了绿片岩相变质作用,成岩时代为晚寒武世—奥陶纪。蛇绿杂岩带由超镁铁质岩、辉长岩、辉长辉绿岩、枕状玄武岩及少量硅质岩组成,产出背景具有弧后扩张脊的特点,成岩时代为寒武纪至奥陶纪。岛弧深成岩成分变化较大,由闪长岩变化到花岗岩,岩石和地球化学特点均显示形成于岛弧构造背景,成岩时代为奥陶纪。造山带一侧的欧龙布鲁克陆块则具有双层结构,由德令哈杂岩和达肯大坂岩群构成基底,盖层为全吉群;同位素年龄反映基底是新太古代末—古元古代形成的地质体,在吕梁期遭受了强烈的变形变质作用,中元古代初期发生了第1次裂解(以环斑花岗岩为标志),在新元古代早期可能发生过汇聚事件,800 Ma左右发生了第2次裂解(以全吉群为代表);早古生代造山作用期间出现了岛弧型和碰撞型花岗岩。

综合分析造山带的结构和同位素年龄信息,可以窥视出柴北缘在早古生代经历了如下演化过程:在寒武纪晚期,柴达木陆块与欧龙布鲁克陆块之间的大洋开始封闭,柴达木陆块向欧龙布鲁克陆块之下俯冲,在欧龙布鲁克陆块一侧出现了临近大陆边缘的岛弧,弧后扩张脊形成了一套蛇绿岩组合。随着柴达木陆块一侧的洋壳消减,陆壳开始俯冲,弧后盆地封闭,岛弧与大陆被推挤到一起,俯冲到深部的洋壳脱水,开始发生高压变质作用,其上岩石圈物质部分熔融产生岛弧性质的深成岩;陆壳进一步俯冲,俯冲到岩石圈深部的陆壳板片发生了高压—超高压变质作用。陆陆碰撞后,俯冲作用停止,岩石圈深部的拆沉作用使俯冲板片迅速回返,含榴辉岩的板片抬升到地壳浅部。

新生代强烈的构造运动改造后,造山带展现出十分复杂的构造景观,高压—超高压变质带与岛弧火山岩带、蛇绿杂岩带之间以构造岩片的形式交叉叠置在一起,逆冲推覆于柴达木盆地新近系红层之上。

8 问题讨论

柴北缘早古生代碰撞造山带是一条结构保存较完整的造山带,不同于只残留造山带根部的苏鲁—大别中生代造山带,与造山作用相关的蛇绿杂岩带、岛弧火山岩和岛弧深成岩带或多或少地保存了下来,为柴北缘构造格架的研究提供了重要的物质基础。虽然造山带的初步轮廓已经建立,但一些相关的地质问题仍需进一步研究。

(1) 岛弧火山岩与蛇绿杂岩中玄武岩的区分。新生代构造的强烈改造使岛弧火山岩与蛇绿杂岩中的玄武岩叠置在一起,不易区分。根据野外填图结果,结合室内研究,笔者认为两者之间有如下几条识别标志:①岛弧火山岩以中基性为主,安山岩较发育,可见部分英安岩,其中或多或少地夹有

一些细碎屑岩夹层;蛇绿杂岩中的玄武岩成分较单调,几乎均为玄武岩,但常与辉长岩等共生。②岛弧火山岩往往显示出一些层理构造,而蛇绿杂岩中的玄武岩多呈块状构造。③岛弧火山岩中斑晶矿物较多,尤其是辉石玄武岩中的辉石斑晶甚至可达30%~40%;而蛇绿杂岩中的玄武岩多为细粒结构,斑晶少见。④岛弧火山岩属钙碱性系列,而蛇绿杂岩中的玄武岩属拉斑系列。

(2) 柴北缘基性—超基性岩体的复杂性。柴北缘辉长岩和橄辉岩发育,其中辉长岩可能有中元古代和早古生代2期,中元古代辉长岩产于欧龙布鲁克陆块中,侵入达肯大坂岩群,多呈独立的侵入体产出,被认为是中元古代初期陆块裂解的记录,与环斑花岗岩可构成双峰式岩套^[45,46]。大部分辉长岩是早古生代的产物,多与蛇纹石化橄辉岩共生。超镁铁质岩体根据野外填图,至少有2种类型。一种是蛇绿杂岩的组成部分,是柴北缘超镁铁质岩的主体,主要岩性为强蛇纹石化橄辉岩和二辉橄辉岩,m/f值相对较低,一般为6~9,产石棉矿。另一种侵位到高压—超高压变质带中,被认为来源于地幔楔^[4],多呈小透镜体产出,虽与某些透镜状榴辉岩的产状类似,但两者间似无成生联系,多独立存在;主要岩石类型为蛇纹石化橄辉岩,部分角闪岩(辉石岩)或透闪石岩,少量石榴子石橄辉岩和含榴辉石岩,橄辉岩的m/f值相对较高,一般为10~12,较大规模的岩体中产有铬铁矿。此外,还有一种蛇纹石化橄辉岩呈脉状产于达肯大坂岩群或变质深成岩中,尚不清楚其产出背景和成岩时代。

(3) 造山作用结束的时限。柴北缘早古生代碰撞造山带上有上泥盆统牦牛山组角度不整合覆盖,牦牛山组中的火山岩是陆壳裂解的记录,但这还不足以限定造山作用结束的时限。绿梁山地区和都兰地区的区域地质调查结果显示,由挤压造山向裂解转换的时限大概在430~400 Ma之间。绿梁山地区条带状强退变榴辉岩中测得的单颗粒锆石U—Pb年龄为433.6 Ma±1.5 Ma,数据点落在一致线上。都兰地区具裂解性质的乌龙滩序列花岗岩的形成年龄在400 Ma左右,绿梁山地区具板内产出背景的闪长岩单颗粒锆石U—Pb年龄为396.2 Ma±6.8 Ma,3个测点重叠落在一致线上。由此可见,柴北缘造山事件结束的时限应为志留纪末期。

致谢:参加本项研究工作的还有袁桂邦副研究员、郝国杰高级工程师及周世军、相振群等同志,审稿人对本文的审阅和赐教使笔者受益匪浅,在此谨表诚挚的谢意。

参考文献:

- [1] 杨建军,朱红,邓晋福,等.柴达木北缘石榴子石橄辉岩的发现及其意义[J].岩石矿物学杂志,1994,13(2):97-105.
- [2] 杨经绥,许志琴,李海兵,等.我国西部柴北缘地区发现榴辉岩[J].科学通报,1998,43(14):1544-1548.
- [3] 张雪亭,吕惠庆,陈正兴,等.柴北缘造山带沙柳河地区榴辉岩相高压变质岩石的发现及初步研究[J].青海地质,1999,(2):1-13.
- [4] 张建新,杨经绥,许志琴,等.柴北缘榴辉岩的峰期和退变质年龄:

- 来自U-Pb及Ar-Ar同位素测定的证据[J].地球化学,2000,29(3):217-222.
- [5]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.
- [6]杨经绥,张建新,孟繁聪,等.中国西部柴北缘-阿尔金的超高压变质榴辉岩及其原岩性质探讨[J].地学前缘,2003,10(3):291-314.
- [7]Song S G, Yang J S, Liou J G, et al. Petrology, geochemistry and isotopic ages of eclogites from the Dulan UHPM Terrane, the North Qaidam, NW China[J]. Lithos, 2003,70:195-211.
- [8]Wang Hongzhen, Mo Xuanxue. An outline of the tectonic evolution of China[J]. Episodes, 1995, 18(1-2):6-16.
- [9]青海省地质矿产局,青海省区域地质志[M].北京:地质出版社,1991.662.
- [10]潘桂棠,李兴振,王立全,等.青藏高原及邻区大地构造单元初步划分[J].地质通报,2002,21(11):701-707.
- [11]陆松年,王惠初,李怀坤,等.柴达木盆地北缘“达肯大坂群”的再厘定[J].地质通报,2002,21(1):19-23.
- [12]辛后田,郝国杰,王惠初,等.柴北缘前寒武纪地层新认识[J].前寒武纪研究进展,2002,25(2):113-119.
- [13]王惠初,袁桂邦,辛后田,等.柴北缘鱼卡河岩群的地质特征和时代归属[J].地质通报,2004,23(4):314-321.
- [14]吴功建.格尔木-额济纳旗地质断面综合研究[J].地质学报,1998,72(4):289-300.
- [15]曹运江,陆廷清,徐望国,等.柴达木盆地北缘地区逆冲推覆构造及其油气勘探意义[J].湘潭矿业学院学报,2000,15(2):12-17.
- [16]胡受权,郭文平,曹运江,等.柴达木盆地北缘构造格局及在中、新生代的演化[J].新疆石油地质,2001,22(1):13-16.
- [17]汤良杰,金之钧,戴俊生,等.柴达木盆地及相邻造山带区域断裂系统[J].地球科学,2002,27(6):676-681.
- [18]王根厚,冉书明,李明.柴达木盆地北缘赛什腾-锡铁山左行逆冲断裂及地质意义[J].地质力学学报,2001,7(3):224-230.
- [19]Maniar P D, Piccoli P M. Tectonic discrimination of granitoids[J]. Bull. Geol. Soc. Amer., 1989, 101: 635-643.
- [20]Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. J. Petrol., 1984,25:956-983.
- [21]张建新,万渝生,孟繁聪,等.柴北缘夹榴辉岩的片麻岩(片岩)地球化学、Sm-Nd和U-Pb同位素研究——深俯冲的前寒武纪基底? [J].岩石学报,2003,19(3):443-451.
- [22]陆松年,李怀坤,陈志宏.塔里木与扬子新元古代热-构造事件特征、序列和时代——扬子与塔里木连接(YZ-TAR)假设[J].地学前缘,2003,10(4):321-326.
- [23]杨经绥,许志琴,宋述光,等.青海都兰榴辉岩的发现及对中国中央造山带内高压-超高压变质带研究的意义[J].地质学报,2000,74(2):156-168.
- [24]杨经绥,许志琴,宋述光,等.柴达木盆地北缘早古生代高压-超高压变质带中发现典型超高压矿物——柯石英 [J]. 地质学报,2001,75(2):175-179.
- [25]张建新,孟繁聪,臧学祥.柴达木盆地北缘柴旦和锡铁山榴辉岩中石榴子石环带对比及地质意义[J].地质通报,2002,21(3):123-129.
- [26]宋述光,杨经绥.柴达木盆地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[J].地质学报,2001,75(2):180-185.
- [27]李怀坤,陆松年,赵风清,等.柴达木北缘鱼卡河含柯石英榴辉岩的确定及其意义[J].现代地质,1999,13(1):43-50.
- [28]郭介人,任秉琛,张莓,等.青海锡铁山块状硫化物矿床的类型及地质特征[J].中国地质科学院西安地质矿产研究所刊,1987,(20):1-30.
- [29]熊兴武,陈忆元.柴达木地块北缘早古生代裂陷槽[A].见:王鸿祯,王自强,张玲华等著.中国古大陆边缘中、新元古代及古生代构造演化[C].北京:地质出版社,1994.114-131.
- [30]赖绍聪,邓晋福,赵海玲.柴达木北缘奥陶纪火山作用与构造机制[J].西安地质学院学报,1996,18(3):8-14.
- [31]赖绍聪,邓晋福,赵海玲.柴达木盆地北缘古生代蛇绿岩及其构造意义[J].现代地质,1996,10(1):18-28.
- [32]孙延贵,郝维杰,韩英善,等.柴达木盆地东段托莫尔日特似蛇绿岩岩石组合特征[J].中国区域地质,2000,19(3):258-264.
- [33]王惠初,陆松年,袁桂邦,等.柴达木盆地北缘滩间山群的构造属性及形成时代[J].地质通报,2003,22(7):487-493.
- [34]史仁灯,杨经绥,吴才来,等.柴达木北缘超高压变质带中岛弧火山岩[J].地质学报,2004,78(1):52-64.
- [35]Winchester J A, Floyd P A. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements[J]. Chem. Geol., 1977, 20:325-343.
- [36]Pearce J A. A user's guide to basalt discrimination diagrams[A]. In: Wyman D A ed. Trace element geochemistry of volcanic rocks: Applications for massive sulphide exploration[C]. Geological association of Canada, Short Course Notes, 1996, 12: 79-113.
- [37]赵风清,郭进京,李怀坤.青海锡铁山地区滩间山群的地质特征及同位素年代学[J].地质通报,2003, 22(1):28-31.
- [38]韩英善,孙延贵,郝维杰,等.托莫尔日特蛇绿混杂岩带地质特征及其构造意义[J].青海地质,2000,9(1):18-25.
- [39]邱家骧,曾广策,朱云海,等.北秦岭-南祁连早古生代裂谷造山带火山岩与小洋盆蛇绿岩套特征及纬向对比[J].高校地质学报,1998,4(4):393-405.
- [40]张旗,周国庆.中国蛇绿岩[M].北京:科学出版社,2001.182.
- [41]Pearce J A, Lippard S J, Roberts S. Characteristics and tectonic significance of supra-subduction zone ophiolites[A]. In: Marginal basin geology[C]. Geol. Soc. Lond. Spec. Publ., 1984, 16:77-94.
- [42]袁桂邦,王惠初,李惠民,等.柴北缘绿梁山地区辉长岩的锆石U-Pb年龄及其意义[J].前寒武纪研究进展,2002,25(1):36-40.
- [43]吴才来,杨经绥,Trevor Ireland,等.祁连南缘噶喇山花岗岩SHRIMP锆石年龄及其地质意义[J].岩石学报,2001,17(2):215-221.
- [44]王毅智,梁超云,王桂秀.柴达木盆地北缘麻粒岩的发现及地质特征[J].青海地质,2000,9(1):33-38.
- [45]张建新,万渝生,许志琴,等.柴达木盆地北缘德令哈地区基性麻粒岩的发现[J].中国区域地质,2001,20(3):259-261.
- [46]肖庆辉,卢欣祥,王菲,等.柴达木北缘鹰峰斑花岗岩的时代及其地质意义[J].中国科学(D辑),2003,33(12):1193-1200.
- [47]王云山,庄庆兴,史从彦,等.柴达木北缘的全吉群[A].见:中国震旦亚界[M].天津:天津科学技术出版社,1980.214-230.
- [48]李怀坤,陆松年,王惠初,等.青海柴北缘新元古代超大陆裂解的地质记录——全吉群[J].地质调查与研究,2003,26(1):27-37.
- [49]吴才来,杨经绥,Wooden J,等.柴达木山花岗岩锆石SHRIMP定年[J].科学通报,2001,46(20):1742-1746.