

# 柴达木盆地北缘新元古代—早古生代 大洋的形成、发展和消亡

朱小辉<sup>1, 2)</sup>, 陈丹玲<sup>2)</sup>, 王超<sup>1)</sup>, 王红<sup>3)</sup>, 刘良<sup>2)</sup>

- 1) 国土资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室, 中国地质调查局西安地质调查中心, 西安, 710054;
- 2) 西北大学大陆动力学国家重点实验室, 西北大学地质学系, 西安, 710069;
- 3) 河北省地矿局第十一地质大队, 河北邢台, 054000

**内容提要:**柴达木盆地北缘构造带是一条典型的早古生代造山带, 是由陆壳深俯冲形成的高压/超高压变质带, 产于其中高压/超高压变质岩石原岩形成时代普遍大于 750Ma, 原岩的性质为陆壳属性, 但柴北缘东段都兰沙柳河地区出露的含柯石英榴辉岩原岩的形成时代为 516Ma, 原岩的性质为洋壳属性, 证实柴北缘局部地段还存在洋壳深俯冲, 柴北缘地区可能记录了从大洋俯冲到大陆俯冲再到碰撞造山这一完整的演化历史。本文主要从岩石学、年代学、地球化学以及同位素地球化学等方面对柴北缘地区陆壳深俯冲前新元古代—早古生代大洋发展与演化的岩石记录进行了系统总结, 认为柴北缘地区在 700~850Ma 时受 Rodinia 超大陆裂解事件的影响发生了裂解; 535~700Ma 时在裂解事件的基础上形成了一个新元古代—早古生代的大洋, 沿柴北缘连续分布的岩石记录表明该洋盆可能在早古生代已具有一定的规模; 460~535Ma 时该洋壳发生了俯冲消减作用; 450~460Ma 期间洋盆闭合消失。这一认识对全面深入了解柴北缘高压/超高压变质带早古生代构造演化历史具有重要意义。

**关键词:** 新元古代—早古生代; 大洋; 洋壳俯冲; 大陆俯冲碰撞; 高压/超高压变质带; 柴北缘

造山带中的高压/超高压变质岩石是当前固体地球科学研究的热点。早在 20 世纪 80 年代 Chopin(1984)和 Smith(1984)便分别在西阿尔卑斯和挪威西部变质表壳岩中发现了超高压变质矿物柯石英。随后, Reineche (1991) 在西阿尔卑斯的 Zermatt-Saas 地区的洋壳沉积物中发现了柯石英, 继而证实比重较大的洋壳岩石和低密度的地壳均可俯冲到地幔 80km 以上深度并在后期发生折返。前人将这些俯冲带划分成了“大洋型”(B-型或太平洋型)和“大陆型”(A-型或阿尔卑斯型)两种类型 (Maruyama et al., 1996; Ernst, 2001), 其中大洋俯冲的产物为岛弧岩浆岩、蛇绿混杂岩及其上覆沉积物以及低温/高压变质岩(以蓝片岩和含硬柱石榴辉岩为特征), 大陆俯冲带主要由经历了高压/超高压变质作用的正、副片麻岩、片岩以及呈透镜状产于其中的榴辉岩、石榴辉石岩和石榴子石榴橄榄岩等组成 (Zheng Y F et al., 2009; 宋述光等, 2009)。截止到目前, 中外科学家已在全球 22 条变质带中发

了金刚石、柯石英以及一些特殊的矿物出溶结构等高压/超高压变质的证据 (Liou et al., 2004), 但仅有西阿尔卑斯的 Zermatt-Saas 地区和中亚地区的南天山造山带(包括吉尔吉斯斯坦的 Atbashy-Makbal 地区和我国的西南天山)被确认经历了洋壳的深俯冲 (Reineche, 1991; Tagiri et al., 1995; Zhang L F et al., 2002a, 2002b, 2007, 2008)。

近年来, 人们在柴北缘地区发现了多种具陆壳属性的超高压变质岩石 (杨经绥等, 2001; Song S G et al., 2003a, 2005; Zhang J X et al., 2009; Zhang R Y et al., 2009), 详细的年代学研究确定其峰期变质时代介于 420~458Ma 之间 (Song S G et al., 2004, 2006; Mattinson et al., 2006; Chen D L et al., 2009; Zhang G B et al., 2009a; Zhang J X et al., 2010), 原岩的形成时代普遍大于 750Ma (杨经绥等, 2003; Zhang J X et al., 2005, 2010; Chen D L et al., 2009; Song S G et al., 2010), 证实柴北缘是一条在早古生代经历陆壳俯冲碰撞形成

注: 本文为国家基础研究规划项目“973”项目(2009CB825003); 国家自然科学基金项目(41402051、41472053); 中国地质调查局工作项目(12120113013400)联合资助的成果。

收稿日期: 2013-09-02; 改回日期: 2014-10-10; 责任编辑: 郝梓国, 黄敏。

作者简介: 朱小辉, 男, 1986 年生, 工程师, 岩石学专业。Email: zhuxiaohui\_012@163.com。通讯作者: 陈丹玲, 女, 教授, 岩石学、地球化学专业。Email: dlchen@nwu.edu.cn。

的高压/超高压变质带。与此同时,另有学者在柴北缘东段都兰沙柳河地区识别出一套由地幔橄榄岩—堆晶岩—玄武岩组成的洋壳岩石组合。其中堆晶岩及玄武岩现已变质为蓝石榴辉岩、绿帘石榴辉岩和多硅白云母榴辉岩等 3 种不同类型的榴辉岩,人们在蓝石榴辉岩中发现了柯石英包体,其原岩形成时代为 516Ma,变质时代为 440~445Ma,证实柴北缘局部地区在发生陆壳深俯冲前还存在洋壳深俯冲(张贵宾等, 2005, 2011; Zhang G B et al., 2008, 2009a, 2009b),这与其它典型的“大洋型”和“大陆型”高压/超高压变质带又有明显不同,柴北缘地区可能记录了从大洋俯冲到大陆俯冲再到碰撞造山这一完整的演化历史。因此要想正确探讨与反演柴北缘高压/超高压变质带的形成与演化过程,必须对陆壳深俯冲前洋壳的形成、发展和消亡过程有一个清晰的认识。

尽管在柴北缘地区发生了板块的深俯冲作用,

早期洋壳事件的岩石记录较难保存,但近些年来已有了一些零星的报道。本文中,笔者将在系统总结已有研究成果的基础上结合自身所做工作,探讨柴北缘地区新元古代—早古生代大洋的发展与演化,试图为揭示柴北缘高压/超高压变质带的演化历史和重建柴北缘早古生代构造演化过程提供进一步的约束。

### 1 区域地质背景

柴北缘构造带位于青藏高原东北部,沿柴达木盆地北缘呈北西西向展布,绵延超过 700km,其南北分别以柴北缘深断裂及宗务隆—青海南山断裂与柴达木地块和祁连地块相邻,东西则以哇洪山—温泉断裂和阿尔金走滑断裂为界与秦岭造山带和阿尔金高压/超高压变质带相接(图 1)。该构造带以乌兰—鱼卡断裂为界可划分为南北两部分,北带呈 NWW 向分布于乌兰、锡铁山、大柴旦和鱼卡以北地区,长

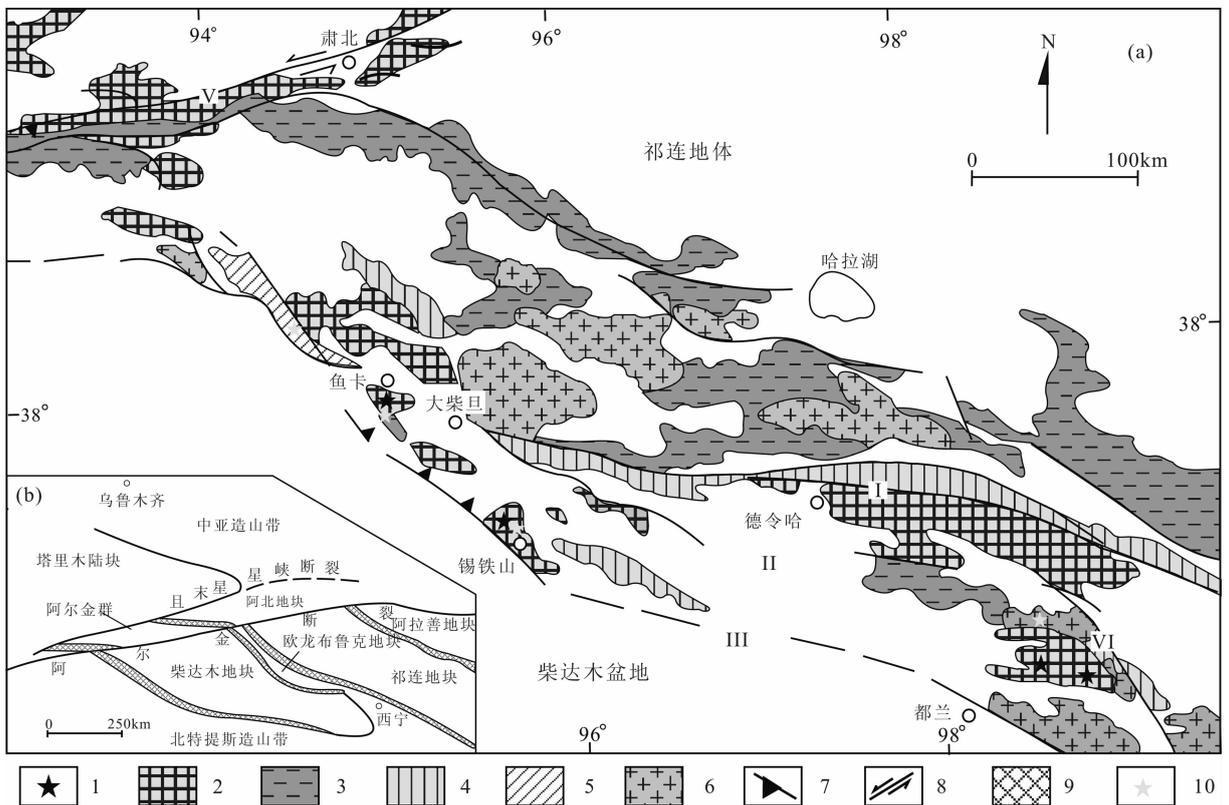


图 1 柴北缘地质简图(据杨经绥等, 2001; 陈能松等, 2007a)

Fig. 1 Geological map of the North Qaidam(modified from Yang J S et al., 2001; Chen N S et al., 2007a)

- 1—榴辉岩; 2—新元古界; 3—下古生界; 4—上古生界; 5—火山岩; 6—花岗岩; 7—逆冲断层; 8—走滑断层; 9—缝合带; 10—采样点
- I—宗务隆—青海南山断裂; II—乌兰—鱼卡断裂; III—柴北缘断裂; IV—哇洪山—温泉断裂; V—阿尔金走滑断裂
- 1—Eclogite; 2—Neoproterozoic; 3—Lower Paleozoic; 4—Upper Paleozoic; 5—volcanic; 6—granite;
- 7—thrust fault; 8—strike-slip fault; 9—suture zone; 10—sampling site
- I—Zongwulong-Qinghainanshan fault; II—Wulan-yuka fault; III—North Qaidam fault; IV—Wahongshan-Wenquan fault;
- V—Altyntagh Strike-slip fault

度在 500km 以上,发育有完整的基底和沉积盖层双层结构,陆松年等(2002)称之为“欧龙布鲁克微板块”。其基底主要由德令哈杂岩和达肯大坂群组成,德令哈杂岩以紫红色二长花岗岩片麻岩为主,含有大量的斜长角闪岩透镜体,达肯大坂群为一套以石英岩、斜长角闪岩、含石榴石矽线石石英片岩和云母片岩为主的表壳岩组合,经历了从高绿片岩相到高角闪岩相的变质作用,年代学研究显示二者的形成时代为古元古代(陆松年等,2002;张建新等,2001;王惠初等,2005),变质基底之上的沉积盖层由中元古代万洞沟群和新元古代全吉群共同构成(辛后田等,2002;郝国杰等,2004)。南带位于柴北缘构造带靠近柴达木盆地一侧,分布在赛什腾山—鱼卡河—锡铁山—都兰沙柳河—哇洪山—一线,为早古生代形成的俯冲碰撞杂岩带,主要由岛弧火山岩、岛弧深成岩和经历了高压/超高压变质作用的深俯冲板片组成,包括中元古代鱼卡河(沙柳河)岩群、中新元古代花岗岩片麻岩、滩间山群火山—沉积岩系、镁铁质—超镁铁质侵入岩、花岗岩以及少量的榴辉岩、石榴子橄榄岩等(王惠初等,2005),目前公认柴北缘的基底由鱼卡河(沙柳河)岩群和侵入其中的变质深成侵入体组成(陈能松等,2007a)。

大洋岩石圈的演化通常经历了一段很长的地质历史时期,包括大陆裂解、初始洋盆的出现;大规模海底扩张;洋内或沿大陆边缘的消减以及洋盆闭合;弧-陆碰撞或陆-陆碰撞、蛇绿岩就位等多个阶段。造山带中的蛇绿岩是古洋盆形成、发展和消亡的地质记录,张旗等(2001)曾在《中国蛇绿岩》一书中分析了柴北缘蛇绿岩的研究情况,认为柴北缘虽然存在地幔橄榄岩、辉长岩和玄武岩(或斜长角闪岩),但由于缺乏详细的研究资料,该地区是否存在蛇绿岩以及哪些岩石单元属于蛇绿岩还需要做进一步的工作。近年来,随着柴达木盆地北缘地区研究工作的不断深入,人们已取得了许多重要进展,但前人对于柴北缘地区早古生代构造环境归属问题的研究多集中在某些地段或某个时间段内,缺乏全面系统的认识,这导致了人们对于柴北缘地区早古生代构造环境存在较大分歧,主要观点有优地槽、大洋盆地、弧后盆地、岛弧环境以及大陆裂谷等(Zhang Z M et al., 1984; 夏林圻等, 1991; 冯益民等, 1996; 赖绍聪等, 1996; 李峰等, 2006; Xu Z Q et al., 2006; 宋述光等, 2009)。为此,本文将从大洋的形成、发育和俯冲闭合等 3 个阶段对柴北缘新元古代—早古生代大洋演化进行论述。

## 2 分析方法

本文涉及的所有分析测试皆在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。主量元素分析在荧光光谱仪(XRF)上测定,元素分析误差 $<5\%$ 。微量元素和稀土元素测定在电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)上进行,Co、Ni、Zn、Ga、Rb、Y、Zr、Nb、Hf、Ta、REE(除 Hf 和 Lu)等元素分析精度优于 $5\%$ ,其它低浓度元素的分析精度为 $5\% \sim 10\%$ 。详细的分析方法见 Gao S 等(1999)。

锆石的 CL 图像分析由加载英国 Gatan 公司的 Mono CL3+型阴极荧光探头的电子显微扫描电镜完成。LA-ICP-MS 分析在 Hewlett Packard 公司的 Agilent 7500a ICP-MS 和德国 Lambda Physik 公司的 ComPex102 Excimer 激光器(工作物质 ArF, 波长 193nm)、MicroLas 公司的 GeoLas 200M 光学系统的联机上进行。实验中采用 He 作为剥蚀物质的载气,锆石年龄采用国际标准锆石 91500 作为外标标准物质,元素含量采用 NIST SRM610 作为外标, $^{29}\text{Si}$  作为内标。锆石 Hf 同位素分析由 Nu Plasma HR 多接收电感耦合等离子质谱仪完成,与锆石 U-Pb 定年及微量元素分析使用同一台剥蚀系统,采用 $^{176}\text{Lu}/^{175}\text{Lu} = 0.02669$  和 $^{176}\text{Yb}/^{172}\text{Yb} = 0.5886$  进行同量异位干扰校正测定样品的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 和 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  比值。详细试验步骤及数据处理方法见 Yuan H L 等(2004, 2008)。

## 3 大洋演化

### 3.1 新元古代超大陆汇聚与裂解(洋壳形成阶段)

杨经绥等(2004)曾在柴北缘西段鱼卡河和绿梁山一带的滩间山群中解体出一套新元古代蛇绿岩组合,岩石类型包括玄武质的枕状熔岩、岩墙群、辉长岩等,并普遍经历了角闪岩相变质,枕状熔岩 Sm-Nd 和 Rb-Sr 等时线年龄分别为  $768 \pm 22\text{Ma}$  和  $780 \pm 39\text{Ma}$ 。但 Rb-Sr 等时线年龄的封闭温度较低,很容易受到后期变质作用的影响。而 Sm-Nd 等时线年龄则容易受到不同程度亏损地幔源及古老地壳混染的影响。另外,该文中并未提及蛇绿岩的重要组成单元——地幔橄榄岩。因此该套岩石能否代表新元古代洋壳还需进一步的研究。

中—新元古代时期发生了一次影响全球构造格局的重要事件,即 Rodinia 超大陆的汇聚与裂解,前人研究结果表明该大陆是由格林威尔造山事件形成的全球性的超大陆,其最终汇聚时限约在 900Ma 并

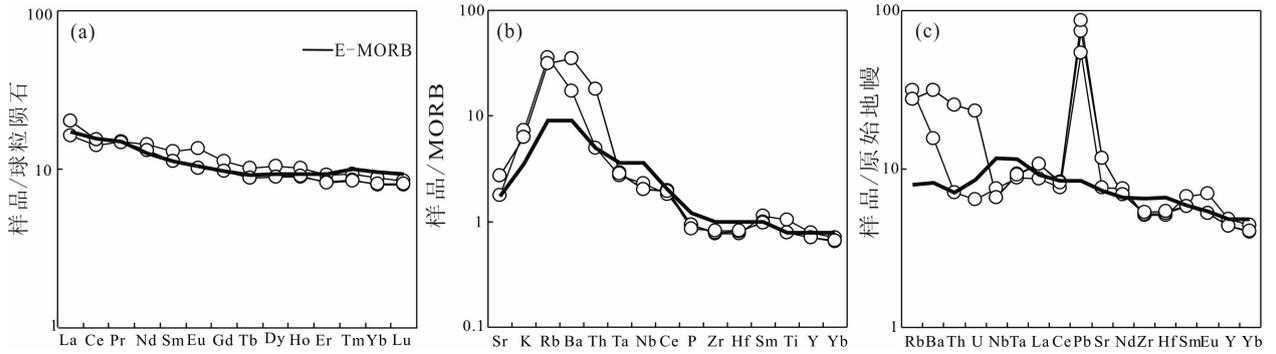


图 2 柴北缘滩间山辉长岩稀土配分图解(a)、MORB 标准化微量元素蛛网图(b)及原始地幔标准化微量元素蛛网图(c)(标准化数据及 E-MORB 值据 Sun et al. , 1989)

Fig. 2 Chondrite-normalized REE-pattern (a), MORB normalized spider diagram (b) and primitive-mantle normalized spider diagram (c) for gabbro from Tanjianshan area in the North Qaidam(normalized and E-MORB data are from Sun et al. , 1989)

在约 830Ma 迅速解体(Hoffman, 1991, 1999; Li Z X et al. , 2008)。人们已在柴北缘地区陆续报道了新元古代花岗岩、辉长岩和火山岩(多为经历高压/超高压变质的榴辉岩透镜体)的存在,其中花岗岩多为与汇聚碰撞事件有关的花岗岩或花岗片麻岩类,形成时代介于 900~1100Ma(李怀坤等, 1999; 郝国杰等, 2001; Wan Y S et al. , 2001; 陆松年等, 2002; 张建新等, 2003; 林慈銮等, 2006; 陈能松等, 2007a, 2007b),这次岩浆热事件可能代表了柴北缘地区深变质基底的固结时代(张建新等, 2003)。包括柴达木、欧龙布鲁克、祁连、阿拉善、塔里木、阿克苏、铁克里克等地块均受到本次汇聚事件的影响,并形成了一个具有统一发展共性的板块(葛肖虹等, 2000; 陆松年等, 2004)。

在新元古代晚期,受罗迪尼亚裂解事件的影响,柴北缘地区发生了局部的拉张与裂解,如在柴北缘全吉山、欧龙布鲁克、石灰沟和大羊头沟等地分布一套形成于边缘裂陷槽环境由河流相沉积、海相沉积为主夹少量中基性火山岩的全吉群,其下部主要为砾岩和含砾长石砂岩,中部主要为石英砂岩,上部为碳酸盐岩夹火山熔岩,顶部则发育一套代表冰川沉积的块状冰碛岩。火山熔岩为钙碱性—碱性玄武岩、玄武安山岩,具有高 K、低 Mg 的特征,同时具有 LREE 富集及大离子亲石元素强烈富集的特点,为大陆板内火山岩,其形成时代为 740Ma(李怀坤等, 2003; 郝国杰等, 2004)。同时,笔者和王惠初(2006)还分别从滩间山和鹰峰地区发现了新元古代时期侵位的辉长岩,其中滩间山地区辉长岩的 SiO<sub>2</sub> 含量变化于 45.94%~51.85%之间, TiO<sub>2</sub> 含量变化于 0.99%~1.33%之间, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 含量介于 0.10%~0.11%(表 1),总体具有轻稀土富集,重稀土平坦的

稀土配分型式,与 E-MORB 曲线形态一致(图 2a),在微量元素 MORB 标准化蛛网图上(图 2b),岩石富集 Sr、K、Rb、Ba、Th、Ta、Nb 和 Ce,亏损 P 以后的所有元素,同 E-MORB 相比,富集 Sr、K、Rb、Ba 和 Th 等大离子亲石元素,亏损 Nb、Ta、Zr、Hf 等高场强元素,说明有陆壳物质的加入。在微量元素原始地幔标准化蛛网图上(图 3c),岩石出现了 Nb 的负异常和明显的 Pb 的正异常,显示了陆壳火山岩的特征(Hofman, 1997),表明该辉长岩可能形成在陆缘裂谷环境。该辉长岩的形成时代为 837±3Ma(表 2,图 3)。

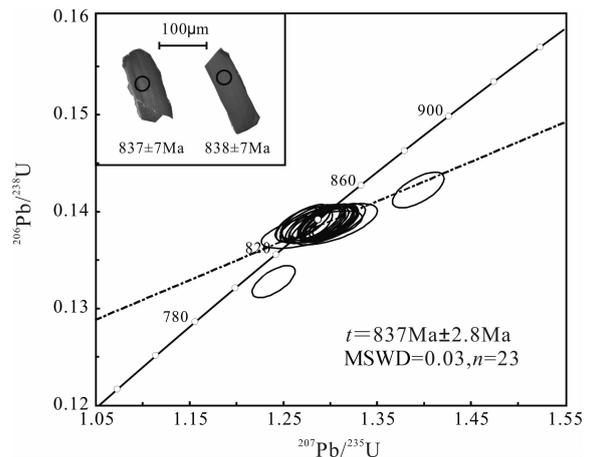


图 3 柴北缘滩间山辉长岩锆石 U-Pb 谐和图  
Fig. 3 U-Pb concordia diagram of zircons in gabbro from Tanjianshan area in the North Qaidam

除此之外,前人已从柴北缘鱼卡河、锡铁山和都兰等地区的超高压榴辉岩锆石中获得了 700~850Ma 的原岩形成年龄(杨经绥等, 2003; Zhang J X et al. , 2005, 2010; Chen D L et al. , 2009; Song S G et al. , 2010),说明其原岩形成在新元古代。其中 Chen D L 等(2009)的研究结果显示鱼卡河榴辉

岩具有高 Ti 的特征,  $\text{TiO}_2$  平均含量为 2.57%, 具有 LREE 富集的稀土配分型式, 同时富集强不相容元素, 呈现隆起型微量元素分布型式,  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值介于  $-5.34 \sim +4.47$ , 应形成于大陆裂谷环境。Song S G 等(2010) 则将鱼卡河榴辉岩分为高 Ti ( $\text{TiO}_2 =$

1.38%~2.50%) 和低 Ti ( $\text{TiO}_2 = 2.50\% \sim 4.04\%$ ) 两组, 并得到了更宽范围的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值 ( $-7.96 \sim +5.07$ ), 提出该榴辉岩有可能为与地幔柱作用相关的大陆溢流玄武岩。锡铁山地区的榴辉岩包括中 Ti ( $\text{TiO}_2 = 1.1\% \sim 1.2\%$ )、低 Ti ( $\text{TiO}_2 = 0.44\% \sim$

表 1 柴北缘新元古代—早古生代岩石主(%)、微量( $\times 10^{-6}$ )元素分析结果

Table 1 Major(%) and trace( $\times 10^{-6}$ ) element compositions of all kinds of Neoproterozoic-Early Paleozoic rocks from North Qaidam

	滩间山辉长岩			托莫尔日特火山岩					锡铁山火山岩				
	09QH19.1	09QH19.2	09QH19.3	10QH1.1	10QH1.3	10QH1.4	10QH1.5	09QH8.1	09QH8.2	09QH8.3	09QH8.4	09QH8.5	
$\text{SiO}_2$	45.94	51.85	51.76	45.70	46.33	47.53	46.30	49.44	41.86	45.75	45.84	49.66	
$\text{TiO}_2$	1.33	0.99	1.00	0.84	1.44	1.01	1.57	2.17	1.47	1.71	1.73	1.82	
$\text{Al}_2\text{O}_3$	15.39	15.45	15.39	11.43	14.00	13.44	13.27	14.66	15.16	15.89	15.14	15.30	
$\text{TFe}_2\text{O}_3$	13.82	11.54	11.48	11.69	14.47	13.68	14.99	11.49	9.77	10.41	11.41	10.51	
MnO	0.18	0.19	0.19	0.18	0.18	0.20	0.21	0.17	0.14	0.15	0.16	0.14	
MgO	7.38	6.02	5.97	13.57	7.79	7.92	7.65	5.07	5.75	8.16	8.8	6.21	
CaO	9.64	8.03	8.00	10.29	9.93	11.17	11.59	10.17	12.58	9.52	9.81	10.31	
$\text{Na}_2\text{O}$	1.62	2.67	2.67	1.39	3.02	2.17	2.05	2.57	3.52	1.93	2.34	2.83	
$\text{K}_2\text{O}$	0.53	0.45	0.45	0.95	0.31	0.62	0.43	0.57	0.29	0.56	0.76	0.28	
$\text{P}_2\text{O}_5$	0.11	0.11	0.10	0.08	0.13	0.09	0.14	0.40	0.25	0.28	0.33	0.25	
LOI	3.58	2.59	2.57	3.44	1.97	1.76	1.37	3.34	9.61	5.46	3.63	2.61	
Total	99.52	99.89	99.58	99.56	99.57	99.59	99.57	100.1	100.4	99.82	99.95	99.92	
Ba	108.0	220.0	220.0	98.40	48.30	13.50	36.80	86.40	89.40	162.1	236.1	77.40	
Rb	19.80	17.40	17.50	254.0	211.0	79.10	63.20	13.60	8.18	12.50	16.70	3.88	
Sr	160.0	247.0	247.0	163.0	259.0	163.0	187.0	301.0	270.0	314.0	450.0	329.0	
Y	22.10	19.80	19.80	19.00	25.00	31.00	37.60	44.10	26.30	29.00	28.30	25.70	
Zr	56.90	58.00	59.90	45.30	46.60	75.10	71.50	235.0	125.0	152.0	151.0	135.0	
Nb	5.39	4.69	4.70	2.47	2.44	3.97	3.92	17.00	12.00	13.50	22.70	15.10	
Th	2.77	2.25	2.20	0.12	0.08	0.15	0.04	1.57	1.63	1.08	1.85	1.17	
Pb	3.84	5.29	6.12	4.19	5.31	1.51	6.72	2.92	2.99	7.72	3.13	1.75	
Ga	18.50	16.30	16.20	13.50	17.30	17.60	19.00	21.60	15.80	17.60	19.10	18.10	
Zn	97.30	86.10	86.60	73.10	97.00	102.0	105.0	90.70	65.30	77.90	88.50	42.60	
Cu	74.50	57.10	57.40	94.90	61.60	262.0	114.0	59.10	62.40	64.60	56.00	16.00	
Ni	89.00	58.20	58.70	281.0	108.0	76.80	114.0	50.60	97.40	156.0	220.0	50.10	
V	352.0	281.0	288.0	255.0	383.0	411.0	472.0	301.0	261.0	242.0	273.0	264.0	
Cr	208.0	127.0	129.0	936.0	242.0	134.0	235.0	125.0	234.0	312.0	321.0	88.50	
Hf	1.58	1.63	1.66	1.26	1.32	2.07	2.03	5.21	2.84	3.35	3.41	3.16	
Cs	2.77	2.25	2.20	1.22	2.49	2.08	2.17	0.87	0.92	1.00	0.61	0.31	
Sc	44.20	37.30	37.30	33.50	53.30	50.20	55.50	34.80	35.80	30.90	30.60	34.30	
Ta	0.36	0.38	0.37	0.16	0.17	0.25	0.26	1.13	0.77	0.88	1.41	0.96	
Co	63.20	75.60	73.70	74.80	80.20	71.40	73.60	54.60	39.10	63.40	56.90	56.40	
Be	0.53	0.64	0.61	0.30	0.64	0.37	0.37	1.71	0.89	1.12	1.11	0.92	
U	0.13	0.49	0.49	0.09	0.13	0.07	0.07	0.50	0.58	0.33	0.56	0.38	
La	5.95	7.43	7.37	2.61	2.45	4.09	2.95	17.10	13.10	12.40	17.70	12.80	
Ce	13.40	14.70	14.60	7.59	7.34	12.30	10.40	37.70	26.70	27.10	34.80	27.60	
Pr	2.05	2.06	2.02	1.17	1.18	1.95	1.80	5.36	3.77	3.92	4.61	4.00	
Nd	10.20	9.39	9.28	6.18	6.61	10.40	10.40	25.20	17.00	17.80	20.30	18.40	
Sm	2.99	2.59	2.58	2.00	2.30	3.35	3.70	6.65	4.39	4.55	4.90	4.72	
Eu	1.18	0.88	0.88	0.74	0.89	1.16	1.25	2.00	1.39	1.47	1.54	1.41	
Gd	3.43	2.99	2.99	2.70	3.26	4.44	5.19	7.15	4.46	4.84	5.13	4.84	
Tb	0.59	0.51	0.51	0.47	0.58	0.77	0.92	1.20	0.74	0.79	0.82	0.77	
Dy	3.97	3.41	3.41	3.10	3.97	5.12	6.23	7.74	4.77	5.11	5.23	4.82	
Ho	0.86	0.76	0.77	0.67	0.88	1.12	1.36	1.70	1.02	1.12	1.13	1.00	
Er	2.28	2.06	2.05	1.96	2.60	3.21	4.01	4.47	2.69	2.90	2.93	2.58	
Tm	0.33	0.31	0.30	0.29	0.39	0.48	0.59	0.65	0.39	0.42	0.42	0.35	
Yb	2.17	1.97	2.01	1.87	2.52	3.02	3.81	4.22	2.52	2.71	2.72	2.30	
Lu	0.32	0.31	0.31	0.28	0.39	0.45	0.57	0.64	0.38	0.42	0.41	0.34	

续表 1

	大平沟变火山岩					大平沟变辉长岩				大平沟斜长花岗岩				
	10QH 36.1	10QH 36.2	10QH 36.3	10QH 36.4	10QH 36.5	09QH 27.1	09QH 27.2	09QH 27.3	09QH 27.4	10QH 35.1	10QH 35.2	10QH 35.3	10QH 35.4	10QH 35.5
SiO <sub>2</sub>	58.93	49.63	49.73	49.99	51.03	49.27	48.44	48.75	48.23	67.43	65.38	66.62	67.62	68.03
TiO <sub>2</sub>	0.25	0.61	0.60	0.44	0.43	0.04	0.04	0.05	0.03	0.17	0.22	0.21	0.19	0.24
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.87	18.01	18.06	13.65	13.86	16.51	16.66	17.36	18.59	17.48	17.02	17.69	17.14	16.18
TFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.92	10.76	10.81	11.19	11.07	4.03	4.32	4.13	3.53	2.13	3.1	2.68	1.96	3.08
MnO	0.14	0.17	0.17	0.23	0.22	0.09	0.09	0.08	0.08	0.04	0.06	0.05	0.04	0.05
MgO	6.98	4.75	4.77	9.69	8.89	11.85	12.64	11.54	10.42	1.09	1.70	1.52	1.25	2.24
CaO	8.70	10.65	10.64	10.66	10.09	14.11	13.42	13.11	14.70	5.57	5.95	5.39	5.25	4.71
Na <sub>2</sub> O	2.35	2.09	2.10	1.75	1.93	1.34	1.44	1.68	1.50	4.43	3.98	4.33	4.69	3.64
K <sub>2</sub> O	0.14	0.37	0.37	0.23	0.24	0.24	0.27	0.25	0.12	0.33	0.33	0.36	0.32	0.42
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.04	0.13	0.13	0.08	0.10	0.01	0.01	0.01	0.01	0.12	0.17	0.12	0.11	0.13
LOI	1.42	2.39	2.36	1.63	1.66	2.06	2.21	2.54	2.35	1.08	1.67	1.34	1.31	0.81
Total	99.74	99.56	99.74	99.54	99.52	99.55	99.54	99.5	99.56	99.87	99.58	100.3	99.88	99.53
Ba	1.90	7.71	7.77	4.44	4.53	54.00	17.40	52.10	24.50	118.0	85.10	108.0	93.40	105.0
Rb	19.50	88.10	88.70	108.0	42.60	5.57	2.30	7.77	3.24	7.85	8.03	8.97	8.14	11.30
Sr	97.70	223.0	224.0	93.70	105.0	140.0	137.0	155.0	158.0	222.0	196.0	216.0	203.0	171.0
Y	11.30	22.50	22.90	22.60	23.00	2.47	2.13	2.43	1.83	2.43	3.31	2.54	2.04	2.32
Zr	27.30	12.80	12.10	25.40	37.20	2.03	1.83	1.15	1.25	38.30	49.70	43.40	28.00	34.9
Nb	0.38	0.24	0.24	0.42	0.42	0.09	0.10	0.06	0.06	0.18	0.22	0.20	0.22	0.25
Th	0.47	0.06	0.06	0.11	0.17	0.03	0.02	0.02	0.02	0.11	0.16	0.10	0.13	0.09
Pb	1.17	2.40	2.41	1.30	1.41	2.52	2.17	2.26	2.92	1.75	2.01	2.19	2.08	1.90
Ga	12.20	18.70	18.80	13.40	13.10	7.85	7.33	7.94	8.27	13.30	12.80	12.90	11.30	11.70
Zn	61.80	53.20	53.60	91.20	90.10	16.10	17.70	16.20	14.00	9.28	14.80	12.60	10.40	18.80
Cu	34.20	92.70	92.40	113.0	32.80	2.95	3.20	2.93	2.55	8.83	11.60	9.29	4.50	11.00
Ni	49.50	14.80	15.50	52.70	63.70	205.0	221.0	198.0	170.0	12.10	9.75	10.50	11.50	22.90
V	197.0	282.0	278.0	254.0	225.0	104.0	100.0	106.0	93.00	25.50	29.40	34.20	25.20	19.40
Cr	246.0	37.60	38.20	352.0	408.0	511.0	629.0	692.0	493.0	19.20	12.20	14.00	14.30	37.20
Hf	0.91	0.56	0.55	1.08	1.29	0.06	0.06	0.04	0.04	0.98	1.29	1.09	0.74	0.88
Cs	0.08	0.19	0.19	0.19	0.12	0.13	0.09	0.21	0.09	0.28	0.31	0.26	0.30	0.32
Sc	36.90	43.50	42.40	55.70	48.50	21.50	19.20	22.90	18.10	2.63	2.95	2.53	2.24	3.08
Ta	0.12	0.09	0.10	0.04	0.07	0.04	0.04	0.04	0.05	0.26	0.22	0.31	0.34	0.23
Co	88.8	74.90	85.50	49.10	70.00	57.40	53.90	51.70	53.80	195.0	177.0	317.0	276.0	203.0
Be	0.32	0.22	0.22	0.19	0.18	0.07	0.05	0.07	0.05	0.26	0.31	0.28	0.26	0.33
U	0.25	0.09	0.09	0.12	0.06	0.07	0.06	0.05	0.06	0.12	0.09	0.12	0.09	0.08
La	1.70	1.36	1.37	1.53	1.52	0.24	0.19	0.28	0.13	1.83	1.80	1.55	1.38	1.52
Ce	4.91	4.60	4.62	6.22	6.04	0.54	0.42	0.57	0.29	3.87	4.22	3.33	2.94	3.41
Pr	0.67	0.82	0.82	1.12	1.09	0.08	0.07	0.08	0.05	0.45	0.51	0.38	0.33	0.40
Nd	3.24	5.14	5.17	6.69	6.54	0.42	0.36	0.43	0.26	2.00	2.34	1.73	1.45	1.82
Sm	1.00	1.98	1.97	2.20	2.20	0.15	0.14	0.17	0.11	0.39	0.50	0.36	0.30	0.37
Eu	0.32	0.73	0.73	0.72	0.65	0.12	0.095	0.14	0.10	0.33	0.42	0.33	0.26	0.32
Gd	1.37	2.88	2.88	2.90	2.93	0.23	0.20	0.24	0.17	0.38	0.51	0.38	0.30	0.36
Tb	0.24	0.52	0.52	0.50	0.51	0.04	0.04	0.05	0.03	0.06	0.08	0.06	0.05	0.05
Dy	1.62	3.59	3.60	3.42	3.45	0.32	0.30	0.38	0.27	0.32	0.47	0.35	0.28	0.32
Ho	0.37	0.80	0.80	0.75	0.78	0.08	0.07	0.09	0.07	0.08	0.10	0.08	0.06	0.07
Er	1.15	2.41	2.39	2.35	2.40	0.23	0.20	0.25	0.19	0.25	0.34	0.26	0.20	0.24
Tm	0.19	0.36	0.37	0.37	0.38	0.04	0.03	0.04	0.03	0.04	0.06	0.04	0.03	0.04
Yb	1.28	2.35	2.33	2.55	2.57	0.25	0.21	0.26	0.21	0.33	0.41	0.33	0.24	0.30
Lu	0.21	0.35	0.35	0.41	0.41	0.04	0.03	0.04	0.03	0.06	0.08	0.07	0.05	0.06

0.54%)两类,岩石的稀土元素和微量元素具有 MORB 的特征,但是又受到陆壳物质的混染,其  $\epsilon_{Nd}(t)$  介于  $-0.48 \sim +9.20$  之间,暗示新元古代的拉张可能达到形成大洋的程度(杨经绥等, 2003; 孟

繁聪等, 2003; Zhang J X et al., 2005)。都兰地区的榴辉岩以沙柳河为界可划分为北带和南带,其中北带榴辉岩原岩的形成时代为 516Ma(Zhang G B et al., 2008),此处暂不做讨论。南带榴辉岩具有

表2 柴北缘新元古代一早古生代岩石 LA-ICP-MS 锆石定年分析结果

Table 2 LA-ICP-MS U-Th-Pb analyses of zircons in Neoproterozoic-Early Paleozoic rocks from North Qaidam

	<sup>232</sup> Th ( $\times 10^{-6}$ )	<sup>238</sup> U ( $\times 10^{-6}$ )	Th/U	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb		<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U		<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U		<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb		<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U		<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	
	比值	1 $\sigma$		比值	1 $\sigma$	比值	1 $\sigma$	年龄(Ma)	1 $\sigma$	年龄(Ma)	1 $\sigma$	年龄(Ma)	1 $\sigma$		
托莫尔日特辉长岩															
1	138.3	250.7	0.55	0.05882	0.0009	0.62802	0.00768	0.0774	0.00043	560	17	495	5	481	3
2	80.85	159.1	0.51	0.06755	0.00103	0.72211	0.00884	0.0775	0.00044	855	16	552	5	481	3
3	180.5	244.8	0.74	0.05746	0.00126	0.61366	0.01298	0.07746	0.00046	509	49	486	8	481	3
4	329.1	376.0	0.88	0.05705	0.00154	0.60461	0.0158	0.07687	0.0005	493	61	480	10	477	3
5	218.3	288.0	0.76	0.05738	0.00117	0.61135	0.01107	0.07724	0.00051	506	28	484	7	480	3
6	613.3	509.3	1.2	0.05745	0.00077	0.61128	0.00614	0.07714	0.0004	509	13	484	4	479	2
7	48.91	123.1	0.4	0.0582	0.00112	0.62063	0.01047	0.07731	0.00049	537	26	490	7	480	3
8	36.82	95.28	0.39	0.06552	0.00137	0.69864	0.01303	0.07731	0.00053	791	28	538	8	480	3
9	131.1	242.4	0.54	0.05896	0.00171	0.62984	0.01767	0.07747	0.00057	566	65	496	11	481	3
10	178.4	302.5	0.59	0.05806	0.00082	0.61959	0.00678	0.07737	0.00042	532	15	490	4	480	3
11	332.1	430.7	0.77	0.05774	0.00074	0.61764	0.00576	0.07756	0.0004	520	12	488	4	482	2
12	179.1	311.0	0.58	0.05677	0.00077	0.61118	0.00629	0.07805	0.00041	483	14	484	4	484	2
13	79.70	150.0	0.53	0.05861	0.00098	0.62698	0.00877	0.07757	0.00046	553	20	494	5	482	3
14	199.5	257.6	0.77	0.05613	0.00097	0.59949	0.00883	0.07745	0.00047	458	22	477	6	481	3
15	182.1	288.9	0.63	0.05735	0.00078	0.61022	0.00639	0.07717	0.00042	505	14	484	4	479	3
16	128.0	201.6	0.63	0.05724	0.00113	0.61046	0.01067	0.07735	0.00051	501	27	484	7	480	3
17	92.08	217.6	0.42	0.05686	0.00085	0.60793	0.00726	0.07754	0.00043	486	17	482	5	481	3
18	156.6	223.3	0.7	0.05843	0.00107	0.62198	0.00981	0.07721	0.00048	546	24	491	6	479	3
19	185.7	252.3	0.74	0.05898	0.00093	0.62872	0.00813	0.07732	0.00045	566	18	495	5	480	3
锡铁山辉长岩															
1	55.47	70.52	0.79	0.06078	0.00226	0.69509	0.02494	0.08294	0.00226	631	36	536	15	514	13
2	27.74	42.46	0.65	0.06357	0.00275	0.73077	0.03053	0.08337	0.00275	727	41	557	18	516	16
3	51.08	58.81	0.87	0.05993	0.00242	0.68936	0.02691	0.08342	0.00242	601	40	532	16	517	14
4	43.87	50.55	0.87	0.05758	0.00254	0.66261	0.02829	0.08346	0.00254	514	46	516	17	517	15
5	43.26	49.58	0.87	0.05616	0.00276	0.64545	0.03077	0.08334	0.00276	459	52	506	19	516	16
6	59.77	75.06	0.8	0.05645	0.00236	0.64891	0.02632	0.08336	0.00236	470	44	508	16	516	14
7	48.18	63.98	0.75	0.0568	0.00248	0.65323	0.02761	0.08339	0.00248	484	46	510	17	516	15
8	36.64	43.25	0.85	0.06226	0.00342	0.71461	0.0381	0.08322	0.00342	683	53	547	23	515	20
9	20.35	31.41	0.65	0.0598	0.00351	0.689	0.03931	0.08354	0.00351	596	59	532	24	517	21
10	68.53	82.06	0.84	0.06105	0.00209	0.70357	0.02312	0.08356	0.00209	641	33	541	14	517	12
11	38.07	47.85	0.8	0.05972	0.00256	0.68893	0.02855	0.08365	0.00256	593	43	532	17	518	15
12	68.64	78.14	0.88	0.05737	0.00188	0.65957	0.02075	0.08337	0.00188	506	33	514	13	516	11
13	19.89	33.16	0.6	0.08208	0.00331	0.94374	0.03642	0.08337	0.00331	1247	35	675	19	516	20
14	45.52	55.96	0.81	0.06246	0.00278	0.72115	0.031	0.08372	0.00278	690	43	551	18	518	17
15	90.1	97.24	0.93	0.05819	0.00179	0.67238	0.0198	0.08378	0.00179	537	31	522	12	519	11
16	44.18	55.45	0.8	0.05804	0.00227	0.67062	0.02539	0.08378	0.00227	531	40	521	15	519	14
17	20.82	35.69	0.58	0.05827	0.00337	0.67176	0.03778	0.08359	0.00337	540	60	522	23	518	20
18	32.28	45.83	0.7	0.05673	0.00251	0.65232	0.02802	0.08337	0.00251	481	47	510	17	516	15
19	41.25	55.95	0.74	0.05897	0.00235	0.67797	0.02612	0.08337	0.00235	566	40	526	16	516	14
20	37.05	45.18	0.82	0.05718	0.00253	0.65801	0.0282	0.08344	0.00253	498	46	513	17	517	15
21	50.63	60.89	0.83	0.05614	0.00219	0.64946	0.02445	0.08389	0.00219	458	41	508	15	519	13
22	60.74	69.44	0.87	0.05688	0.00196	0.65764	0.02189	0.08384	0.00196	487	36	513	13	519	12
23	21.32	33.58	0.63	0.05639	0.00234	0.64826	0.02601	0.08336	0.00234	468	44	507	16	516	14
24	52.87	67.05	0.79	0.05992	0.00266	0.68996	0.0297	0.08351	0.00266	601	44	533	18	517	16
25	22.43	38.49	0.58	0.06801	0.00335	0.78365	0.0373	0.08357	0.00335	869	44	588	21	517	20
大沟沟辉长岩															
1	15.58	49.43	0.32	0.06602	0.00161	0.79174	0.01792	0.08697	0.0008	807	52	592	10	538	5
2	19.00	54.93	0.35	0.05795	0.00145	0.68959	0.01606	0.0863	0.00078	528	56	533	10	534	5
3	12.68	39.61	0.32	0.0668	0.00156	0.80374	0.01773	0.08727	0.00085	832	30	599	10	539	5
4	13.43	43.76	0.31	0.05919	0.0012	0.71184	0.0135	0.08723	0.0008	574	25	546	8	539	5
5	31.82	65.33	0.49	0.05687	0.00108	0.67953	0.01207	0.08666	0.00077	486	24	526	7	536	5
6	17.20	48.82	0.35	0.05863	0.00165	0.69201	0.0183	0.0856	0.00081	554	63	534	11	529	5

续表 2

	<sup>232</sup> Th	<sup>238</sup> U	Th/U	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb		<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U		<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U		<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb		<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U		<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	
	(×10 <sup>-6</sup> )	(×10 <sup>-6</sup> )		比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	年龄(Ma)	1σ	年龄(Ma)	1σ	年龄(Ma)	1σ
7	45.17	105.8	0.43	0.05851	0.00138	0.68651	0.01503	0.08509	0.00074	549	53	531	9	526	4
8	14.30	41.71	0.34	0.05777	0.00141	0.6923	0.01599	0.08691	0.00084	521	34	534	10	537	5
9	8.74	26.70	0.33	0.0599	0.00192	0.70216	0.02138	0.08502	0.00083	600	71	540	13	526	5
10	40.43	79.99	0.51	0.0578	0.00142	0.68814	0.01578	0.08635	0.00076	522	55	532	9	534	5
11	48.44	142.9	0.34	0.05849	0.00127	0.69645	0.01424	0.08634	0.00081	548	28	537	9	534	5
12	12.16	38.40	0.32	0.07328	0.00178	0.87309	0.01999	0.0864	0.00087	1022	30	637	11	534	5
13	15.16	43.12	0.35	0.05857	0.00201	0.71401	0.02334	0.08841	0.00092	551	77	547	14	546	5
14	11.33	39.24	0.29	0.06241	0.00165	0.73846	0.01827	0.08582	0.0008	688	58	562	11	531	5
15	16.79	49.93	0.34	0.0567	0.00121	0.67607	0.01362	0.08646	0.0008	480	28	524	8	535	5
16	14.45	43.12	0.34	0.06167	0.00144	0.739	0.01637	0.08689	0.00084	663	31	562	10	537	5
17	21.11	49.42	0.43	0.06076	0.00114	0.72783	0.01275	0.08686	0.00078	631	23	555	7	537	5
18	15.87	46.18	0.34	0.0585	0.00166	0.69238	0.01849	0.08584	0.00081	548	63	534	11	531	5
19	61.04	128.1	0.48	0.05637	0.00094	0.67729	0.01032	0.08713	0.00075	467	19	525	6	539	4
20	12.61	35.45	0.36	0.06483	0.00162	0.7753	0.01836	0.08671	0.00087	769	33	583	11	536	5
21	24.89	69.78	0.36	0.0591	0.00178	0.70173	0.01996	0.08612	0.00084	571	67	540	12	533	5
22	16.17	50.05	0.32	0.05848	0.00144	0.6921	0.0159	0.08584	0.00077	548	55	534	10	531	5
大平沟斜长花岗岩															
1	163.6	414.8	0.39	0.05403	0.00101	0.60793	0.00988	0.08159	0.00048	372	26	482	6	506	3
2	125.2	256.8	0.49	0.05956	0.00168	0.7302	0.01936	0.08891	0.00065	588	45	557	11	549	4
3	504.8	551.9	0.91	0.06313	0.00291	0.67591	0.03033	0.07765	0.00079	713	100	524	18	482	5
4	141.9	313.6	0.45	0.05903	0.00112	0.70585	0.01167	0.08671	0.00054	568	25	542	7	536	3
5	1020	856.5	1.19	0.05874	0.00165	0.68349	0.01786	0.08437	0.0007	557	42	529	11	522	4
6	103.6	243.2	0.43	0.05599	0.00125	0.55284	0.01135	0.07166	0.00048	452	34	447	7	446	3
7	59.12	153.3	0.39	0.05741	0.00148	0.67435	0.01612	0.08524	0.00068	507	38	523	10	527	4
8	820.6	1648	0.5	0.05762	0.00141	0.64182	0.01457	0.08083	0.00062	515	36	503	9	501	4
9	220.9	397.6	0.56	0.05819	0.00083	0.64193	0.0074	0.08006	0.00043	537	16	504	5	496	3
10	87.80	154.9	0.57	0.0628	0.00167	0.67689	0.0167	0.07821	0.00065	701	38	525	10	485	4
11	164.4	287.3	0.57	0.059	0.00146	0.64994	0.01482	0.07993	0.00062	567	36	508	9	496	4
12	87.58	273.9	0.32	0.05896	0.00236	0.59631	0.02323	0.07335	0.0007	566	89	475	15	456	4
13	18.17	589.0	0.03	0.06099	0.00177	0.63212	0.01785	0.07516	0.00052	639	64	497	11	467	3
14	16.62	540.1	0.03	0.06424	0.00195	0.69851	0.01994	0.07888	0.00073	750	45	538	12	489	4
15	266.6	431.3	0.62	0.0581	0.00112	0.65136	0.01105	0.08133	0.00052	534	26	509	7	504	3
16	842.1	1996	0.42	0.08536	0.0016	0.9539	0.01552	0.08107	0.00056	1324	21	680	8	503	3
17	684.3	1192	0.57	0.05928	0.0024	0.64443	0.02497	0.07886	0.0009	577	64	505	15	489	5
18	450.6	476.1	0.95	0.06493	0.00133	0.69841	0.01268	0.07802	0.00053	772	27	538	8	484	3
19	182.7	282.0	0.65	0.05816	0.00109	0.63943	0.01045	0.07974	0.00049	536	25	502	6	495	3
20	529.1	538.0	0.98	0.0595	0.00101	0.65417	0.00925	0.07973	0.00046	585	21	511	6	495	3
21	134.8	299.5	0.45	0.06063	0.00163	0.71903	0.01792	0.08599	0.00069	626	40	550	11	532	4
22	96.14	225.1	0.43	0.08956	0.00153	1.05096	0.01493	0.08508	0.00054	1416	17	729	7	526	3
23	169.5	387.8	0.44	0.06216	0.00143	0.68873	0.01428	0.08034	0.00057	680	32	532	9	498	3
24	49.26	136.0	0.36	0.06779	0.00324	0.74004	0.03386	0.07914	0.00108	862	72	562	20	491	6
滩间山辉长岩															
1	9580	33406	0.29	0.0675	0.00095	1.29069	0.01605	0.13871	0.00113	853	13	842	7	837	6
2	6537	23134	0.28	0.0664	0.0011	1.27014	0.01916	0.13876	0.00118	819	18	832	9	838	7
3	6268	23968	0.26	0.06647	0.00102	1.27351	0.01762	0.13897	0.00116	821	16	834	8	839	7
4	3778	15035	0.25	0.06722	0.00197	1.28027	0.03553	0.13814	0.00127	845	62	837	16	834	7
5	5390	19515	0.28	0.06709	0.00103	1.28359	0.01763	0.13878	0.00116	841	15	838	8	838	7
6	2401	9684	0.25	0.06748	0.00128	1.28988	0.02263	0.13865	0.00124	853	22	841	10	837	7
7	9609	34838	0.28	0.06632	0.00084	1.26954	0.0138	0.13885	0.00112	816	11	832	6	838	6
8	47516	92427	0.51	0.06771	0.00094	1.23952	0.01507	0.13277	0.00109	860	13	819	7	804	6
9	2900	11951	0.24	0.06686	0.00122	1.27993	0.0215	0.13885	0.00123	833	21	837	10	838	7
10	4671	17990	0.26	0.06711	0.00136	1.28296	0.02417	0.13866	0.00127	841	24	838	11	837	7
11	12763	36947	0.35	0.06769	0.00091	1.2932	0.01516	0.13855	0.00113	859	12	843	7	836	6
12	9428	31096	0.3	0.06742	0.00098	1.29088	0.0167	0.13887	0.00116	851	14	842	7	838	7

续表 2

	<sup>232</sup> Th	<sup>238</sup> U	Th/U	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb		<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U		<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U		<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb		<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U		<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	
	( $\times 10^{-6}$ )	( $\times 10^{-6}$ )		比值	1 $\sigma$	比值	1 $\sigma$	比值	1 $\sigma$	年龄(Ma)	1 $\sigma$	年龄(Ma)	1 $\sigma$	年龄(Ma)	1 $\sigma$
13	8214	27840	0.3	0.0673	0.00096	1.28999	0.01629	0.13899	0.00115	847	13	841	7	839	7
14	5649	18590	0.3	0.06795	0.00115	1.29987	0.02004	0.13871	0.00121	867	18	846	9	837	7
15	6040	21615	0.28	0.06688	0.00097	1.27729	0.01654	0.13848	0.00116	834	14	836	7	836	7
16	4091	16421	0.25	0.06765	0.00106	1.29586	0.01836	0.13889	0.00118	858	16	844	8	838	7
17	10662	35406	0.3	0.06803	0.00088	1.30364	0.01469	0.13894	0.00114	869	11	847	6	839	6
18	5791	22367	0.26	0.06619	0.00092	1.26564	0.01544	0.13863	0.00115	812	13	830	7	837	7
19	6262	25538	0.25	0.06795	0.00095	1.30175	0.01604	0.13889	0.00115	867	13	846	7	838	7
20	2554	10590	0.24	0.0676	0.00109	1.29602	0.01899	0.13896	0.0012	856	17	844	8	839	7
21	4188	16931	0.25	0.06784	0.0011	1.2992	0.01923	0.13881	0.0012	864	17	845	8	838	7
22	4525	16514	0.27	0.06808	0.00121	1.30499	0.0214	0.13893	0.00124	871	20	848	9	839	7
23	5698	20582	0.28	0.06783	0.00111	1.30008	0.01944	0.1389	0.00121	863	17	846	9	838	7
24	1011	6466	0.16	0.06817	0.00166	1.30465	0.03016	0.13869	0.0014	874	31	848	13	837	8
25	4551	19653	0.23	0.07101	0.00104	1.39381	0.01821	0.14222	0.00121	958	14	886	8	857	7

高 Al 低 Ti 的特征 ( $\text{Al}_2\text{O}_3 = 14\% \sim 22\%$ ,  $\text{TiO}_2 = 0.2\% \sim 0.8\%$ ), 富集 LREE, 亏损 Nb、Ta、Zr、Hf 等高场强元素,  $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = 1.7$ , 可能形成于岛弧环境 (Song S G et al., 2003b)。以上论述可以看出, 柴北缘地区原岩形成于新元古代的超高压榴辉岩大部分具有板内玄武岩或 E-MORB 的特征, 因此多数研究者认为这些榴辉岩原岩的形成与 Rodinia 超大陆裂解过程有关 (Zhang J X et al., 2005; Chen D L et al., 2009; Song S G et al., 2010)。

### 3.2 洋壳发育

这一时期的典型代表为柴北缘东段都兰地区的沙柳河蛇绿岩 (张贵宾等, 2005, 2011; Zhang G B et al., 2008, 2009a, 2009b), 该蛇绿岩单元出露较为齐全, 下部层位为蛇纹石化地幔橄榄岩 (方辉橄榄岩) 和异剥钙榴岩, 中部层位为堆晶辉长岩 (蓝晶石榴辉岩和绿帘石榴辉岩), 上部层位为玄武岩 (多硅白云母榴辉岩)。其中地幔橄榄岩的矿物组合为橄榄石 + 斜方辉石 + 铬铁矿, 橄榄石和斜方辉石均具有与大洋地幔橄榄岩一致的地球化学特征, 斜方辉石高 Al 和高 Ca 的特征指示该橄榄岩属于尖晶石相方辉橄榄岩 (张贵宾等, 2005; Zhang G B et al., 2008)。蓝晶石榴辉岩和绿帘石榴辉岩均具有低 Ti 和高 Mg、Al 的特征, 稀土总量普遍较低且大部分具有 LREE 亏损的地球化学特征, 同时显示了 Eu 和 Sr 的正异常, 指示斜长石的堆晶作用, Sr-Nd 同位素结果显示这两类岩石起源于地幔 [ $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.703 \sim 0.704$ ,  $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = 5.9 \sim 8.0$ ]。多硅白云母榴辉岩具有高 Ti 和低 Mg、Al 的特征, 不相容元素特征与 E-MORB 类似, Sr-Nd 同位素结果暗示其可能在后期受到俯冲带的影响 [ $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.705 \sim 0.716$ ,  $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = 1.4 \sim 4.1$ ]。另外在蓝晶石榴辉岩

中存在柯石英包体, 其原岩的形成时代为 516Ma, 变质时代为 445Ma, 证实柴北缘地区在早古生代存在过洋壳并发生了深俯冲 (Zhang G B et al., 2008, 2009a, 2009b)。

另外, 笔者还在都兰托莫尔日特地区的滩间山群火山岩中识别出一套洋中脊玄武岩, 该玄武岩  $\text{SiO}_2$  含量变化于 45.70%~47.53% 之间, 具有较高的 Fe、Mg、K、Ti 含量 ( $\text{TFe}_2\text{O}_3 = 11.69\% \sim 14.99\%$ ;  $\text{MgO} = 7.65\% \sim 13.57\%$ ;  $\text{K}_2\text{O} = 0.31\% \sim 0.95\%$ ;  $\text{TiO}_2 = 0.84\% \sim 1.57\%$ ) (表 1), 稀土配分曲线为 LREE 轻微亏损, Eu 异常不明显 (图 4a), 除 Sr、K、Rb、Ba 等活动性较强的大离子亲石元素由于后期蚀变以及变质作用影响变化较大外, 其它不相容元素富集程度同 N-MORB 相比基本没有变化 (图 4b), REE 配分曲线和微量元素蛛网图的总体形态与 N-MORB 一致, 在 Nb/Th-Nb、La/Nb-La、Th/Yb-Ta/Yb 以及 Nb-Zr-Y 图解中 (图略), 样品点均落在 N-MORB 范围内, 说明该火山岩形成在洋中脊环境下。另获得侵入到该套火山岩中辉长岩的形成时代为  $480 \pm 1\text{Ma}$ , 限定其形成下限为早奥陶世 (表 2, 图 5)。

此外, 在柴北缘中段锡铁山地区还出露一套洋岛成因的镁铁质岩石 (赖绍聪等, 1996; 朱小辉等, 2012), 虽然洋岛玄武岩并不是蛇绿岩的组成部分, 但是人们常将其与深海沉积物等视为蛇绿岩的上覆岩系, 认为古代大洋在俯冲消减过程中, 作为正地形出现的洋岛可以被仰冲拼贴在混杂带中 (Cadet et al., 1987; Volkava et al., 1999)。锡铁山地区镁铁质岩石由同源岩浆演化的玄武岩、辉绿岩和辉长岩组成, 其中玄武岩样品  $\text{SiO}_2$  含量介于 41.86%~49.66% 之间, 具有高 Fe、K、Ti、P 低 Mg 的特征

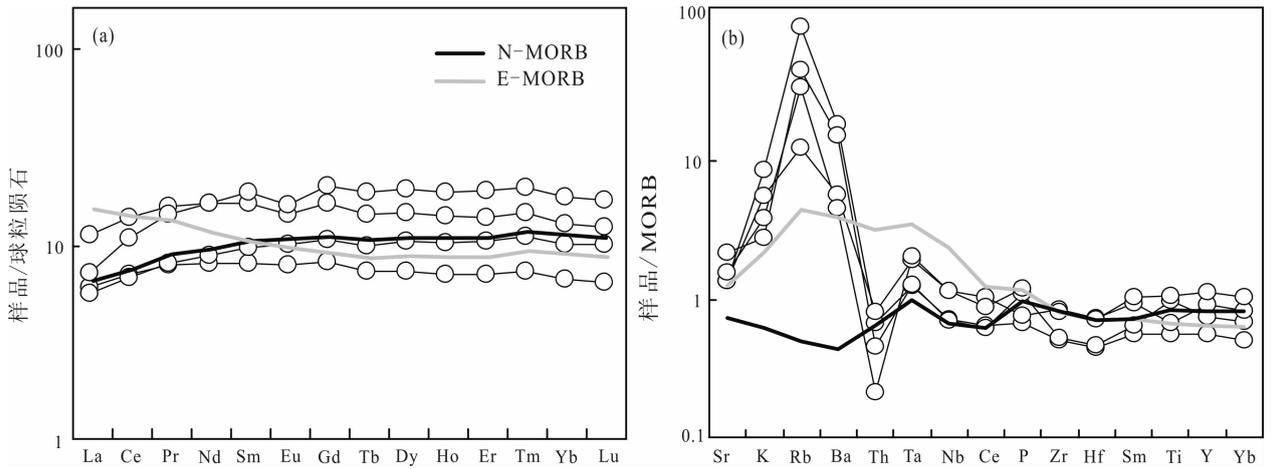


图 4 柴北缘托莫尔日特玄武岩的稀土元素配分图(a)和 MORB 标准化微量元素蛛网图(b)  
(标准化数据、N-MORB 及 E-MORB 值据 Sun et al., 1989)

Fig. 4 Chondrite-normalized REE-pattern (a) and MORB normalized spider diagram (b) for basalt from Tuomoerrite area in the North Qaidam(normalized, N-MORB and E-MORB data are from Sun et al., 1989)

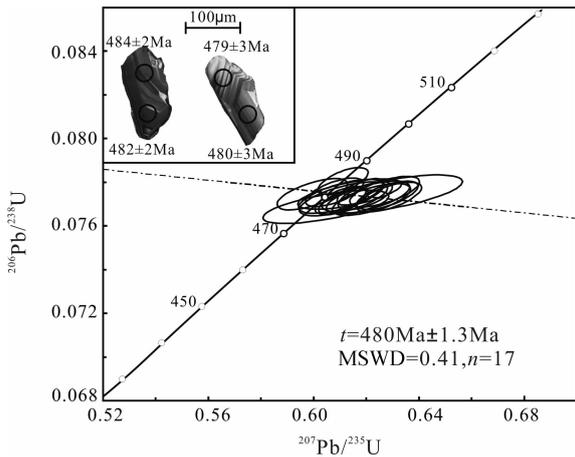


图 5 柴北缘托莫尔日特辉长岩锆石 U-Pb 谐和图

Fig. 5 U-Pb concordia diagram of zircons in gabbro from Tuomoerrite area in the North Qaidam

( $TFe_2O_3 = 9.77\% \sim 11.49\%$ ;  $K_2O = 0.28\% \sim 0.76\%$ ;  $TiO_2 = 1.47\% \sim 2.17\%$ ;  $P_5O_2 = 0.25\% \sim 0.40\%$ ;  $MgO = 5.07\% \sim 8.80\%$ ) (表 1), 同时具有 LREE 富集的稀土配分型式(图 6a), 富集 K、Rb、Ba、Th、Nb、Ta 等不相容元素, 呈现隆起型(驼峰式)分布型式(图 6b), REE 配分曲线和微量元素蛛网图的总体形态与 OIB 一致, 在 Nb/Th-Nb、La/Nb-La、Th/Yb-Ta/Yb 以及 Nb-Zr-Y 图解中(图略), 样品点均落在洋岛火山岩或板内玄武岩范围内, 同时获得辉长岩的结晶时代为  $521 \pm 7Ma$ (表 2, 图 7), 代表了本套镁铁质岩石的形成时代(朱小辉等, 2012)。

### 3.3 大洋的俯冲和闭合

大洋板块俯冲到大陆板块之下会衍生出大洋弧、陆缘弧、弧前以及弧后盆地等多种不同的构造环

境(张旗等, 2001), 同时受地幔楔、俯冲的洋壳物质、深海沉积物以及基底陆壳物质污染等多重物质来源, 以及绝热的减压熔融和脱水部分熔融等复杂形成机制的影响, 活动大陆边缘环境下的岩石类型及岩石组合常具复杂多变的特点(Spiegelman et al., 1993)。在柴北缘地区, 人们已经报道了弧后盆地型蛇绿岩(王惠初等, 2003, 2005; 朱小辉等, 2014)、埃达克岩(史仁灯等, 2003; Shi R D et al., 2006)、岛弧火山岩(王惠初等, 2003; 史仁灯等, 2004; 高晓峰等, 2011)以及岛弧岩浆岩(袁桂邦等, 2002; 吴才来等, 2004, 2008; 朱小辉等, 2010)等多种形成于消减带环境下的岩石组合。

王惠初等(2003, 2005)在柴北缘西段绿梁山石棉矿一带厘定出一套弧后盆地型蛇绿混杂岩, 岩石类型包括变质橄榄岩、辉长岩、辉长辉绿岩、玄武岩(枕状熔岩)和少量硅质岩。玄武岩的  $SiO_2$  含量在 50% 左右,  $K_2O$  含量较低(小于 0.34%),  $TiO_2$  含量较高(介于 1.76%~2.45%), 具有平坦型稀土配分曲线, 认为其与过渡型洋脊玄武岩相似, 应形成在弧后盆地环境, 并给出辉长岩的锆石 TIMS U-Pb 年龄为 496Ma。新近, 笔者在绿梁山附近的大平沟地区同样厘定出一套弧后盆地型蛇绿岩(朱小辉等, 2014), 该套岩石自下而上包括变质橄榄岩、变质的堆晶辉长岩、辉绿岩墙以及变火山岩, 在变火山岩中还发育斜长花岗岩团块。其中变火山岩为拉斑系列火山岩, 具有较高的 Fe、Mg、K 含量( $TFe_2O_3 = 7.92\% \sim 11.19\%$ ,  $MgO = 4.75\% \sim 9.69\%$ ,  $K_2O = 0.14\% \sim 0.37\%$ ),  $TiO_2$ 、 $P_2O_5$  含量较低, 分别为

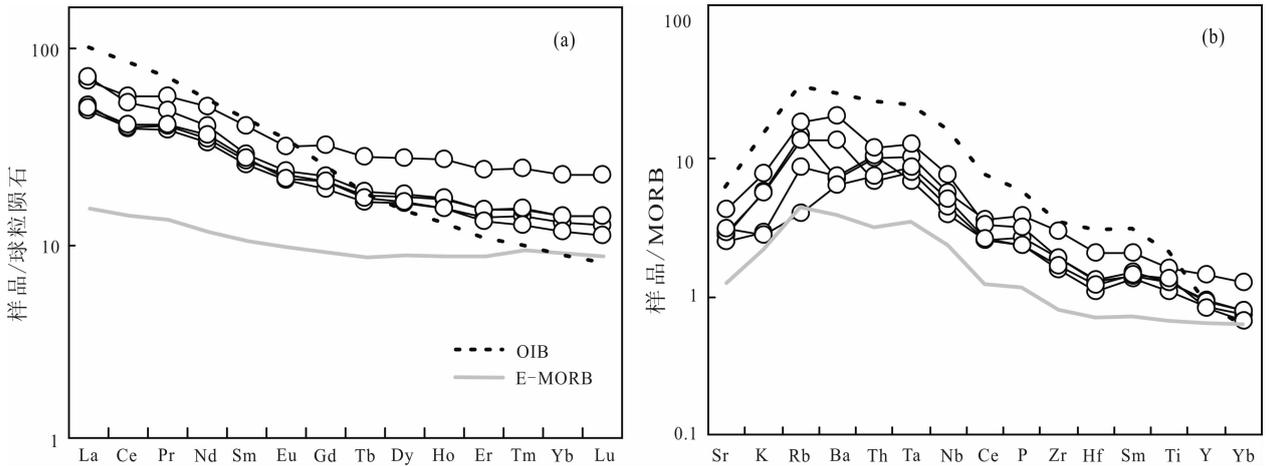


图 6 柴北缘锡铁山玄武岩稀土元素配分图(a)和 MORB 标准化微量元素蛛网图(b)  
(标准化数据、OIB 及 E-MORB 值据 Sun et al., 1989)(据朱小辉等, 2012)

Fig. 6 Chondrite-normalized REE-pattern (a) and MORB normalized spider diagram (b) for basalt from Xitieshan area in the North Qaidam (normalized, OIB and E-MORB data are from Sun et al., 1989)(after Zhu X H et al., 2012)

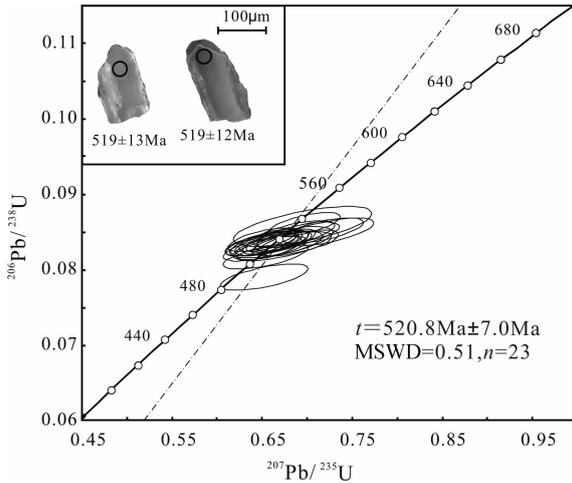


图 7 柴北缘锡铁山辉长岩锆石 U-Pb 谐和图(据朱小辉等, 2012)

Fig. 7 U-Pb concordia diagram of zircons in gabbro from Xitieshan area in the North Qaidam (after Zhu X H et al., 2012)

0.25%~0.61% 和 0.04%~0.13% (表 1), 具有 LREE 亏损, HREE 平坦型稀土配分型式 (图 8a), 与 N-MORB 相似, 表明岩石应起源于一个类似 N-MORB 的亏损地幔源区。但同典型的大洋中脊玄武岩相比, 样品低度富集大离子亲石元素, 亏损高场强元素 (图 8b), 又具有典型的消减带岩浆特征, 应为弧后盆地型玄武岩所特有 (Xu J F et al., 2002)。变辉长岩 SiO<sub>2</sub> 含量介于 48.23%~49.27% 之间, 具有低 Fe、K, 高 Mg 的特征 (TF<sub>e2</sub>O<sub>3</sub> = 3.53%~4.32%, K<sub>2</sub>O = 0.12%~0.27%, MgO = 10.42%~12.64%), TiO<sub>2</sub>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 含量很低, 分别为 0.03%~0.05% 和 0.01% (表 1)。同变火山岩相比, 变辉长

岩的 TiO<sub>2</sub>、K<sub>2</sub>O、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 含量明显偏低, 与典型的洋壳堆晶辉长岩的含量相似, 这是由于原始岩浆经历了橄榄石+斜长石+单斜辉石+斜方辉石的堆晶作用造成的 (Koepke et al., 2007)。斜长花岗岩具有低 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (16.18%~17.69%)、K<sub>2</sub>O (0.32%~0.42%) 和富钠 Na<sub>2</sub>O (3.64%~4.69%) 的特征 (表 1), Hf 同位素特征显示花岗岩中的锆石具有正的 ε<sub>Hf</sub>(t) 值 (表 3, 图 9), 对应二阶段 Hf 模式年龄平均为 527Ma, 与锆石的形成年龄 493±3Ma 相近 (表 2, 图 10a), 反映其具有新生玄武质下地壳或亏损地幔物质来源特征, 说明其为大洋斜长花岗岩, 结合 LREE 富集和 Eu 正异常的稀土配分模式 (图 8a), 以及与变辉长岩形成年龄 535±2Ma (表 2, 图 10b) 相近的结晶年龄和二阶段 Hf 模式年龄, 指示该花岗岩可能为高温韧性剪切带中辉长岩在含水条件下部分熔融形成 (Coleman et al., 1975; Pedersen et al., 1984; David et al., 1981; Flagler et al., 1991)。以上论述可以推断柴北缘绿梁山地区弧后盆地拉张时限至少介于 535~493Ma 之间, 而柴北缘地区古大洋在 535Ma 之前已发生俯冲消减作用。

高晓峰等 (2011) 在结合前人研究成果的基础上对柴北缘滩间山群进行了重新厘定, 认为其中的火山岩形成时限约在 460~514Ma, 其主体为形成在俯冲带环境下的岛弧火山岩, 代表了寒武纪-奥陶纪岩浆作用, 结合袁桂邦等 (2002) 和朱小辉等 (2010) 在绿梁山和都兰地区获得的岛弧型辉长岩的结晶时代 496±6Ma 和 468±2Ma, 说明柴北缘地区早古生代的大洋俯冲持续了一个较长的时间。吴才

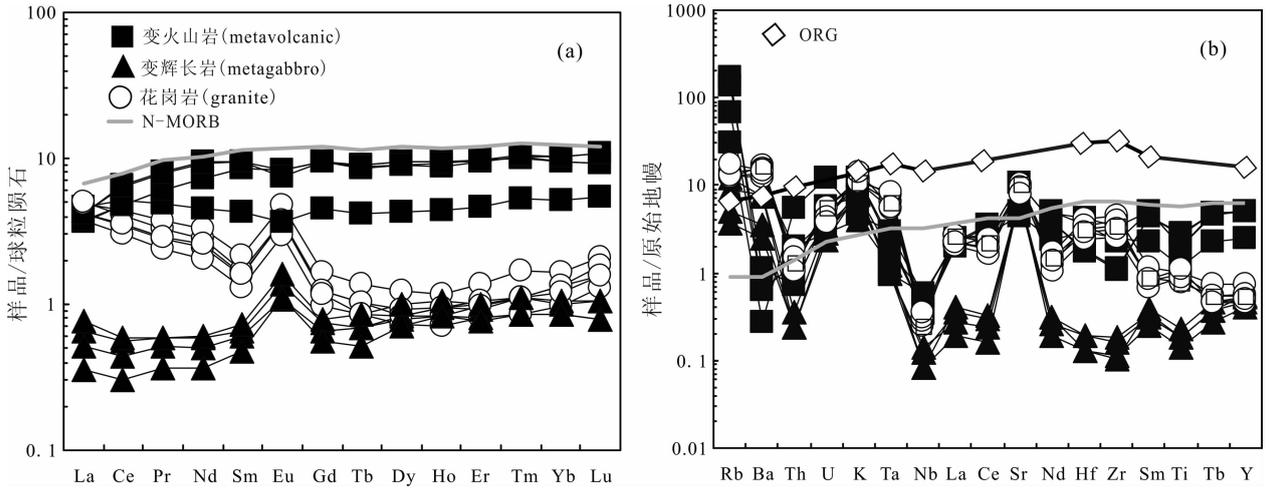


图 8 柴北缘大平沟地区岩石球粒陨石标准化稀土配分模式图(a)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b)  
(标准化数据及 N-MORB 值据 Sun et al. , 1989; ORG 值据 Pearce, 1984)(据朱小辉等, 2014)

Fig. 8 Chondrite-normalized REE-pattern (a) and primitive-mantle normalized spider diagram (b) for rocks from Dapinggou area in the North Qaidam(normalized and N-MORB data are from Sun et al. , 1989; ORG data are from Pearce, 1984)(after Zhu X H et al. , 2014)

表 3 柴北缘大平沟斜长花岗岩锆石 LA-MC-ICP-MS Hf 同位素分析结果

Table 3 Hf isotope compositions of zircons in plagiogranite from Dapinggou area in the North Qaidam

样品号	年龄(Ma)	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$2\sigma$	$\epsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	$2\sigma$	$t_{\text{DM}_2}^c$	$f_{\text{La/Hf}}$
1	492.6	0.097672	0.004144	0.282935	0.000007	-18.7	15.3	0.25	490	-0.88
2	492.6	0.090681	0.004249	0.282937	0.000008	-18.8	15.3	0.30	489	-0.87
3	492.6	0.098131	0.004303	0.282896	0.000010	-14.9	13.8	0.34	564	-0.87
4	492.6	0.011272	0.000598	0.282882	0.000009	-11.7	14.6	0.33	524	-0.98
5	492.6	0.079238	0.003335	0.282884	0.000010	-17.5	13.7	0.34	570	-0.90

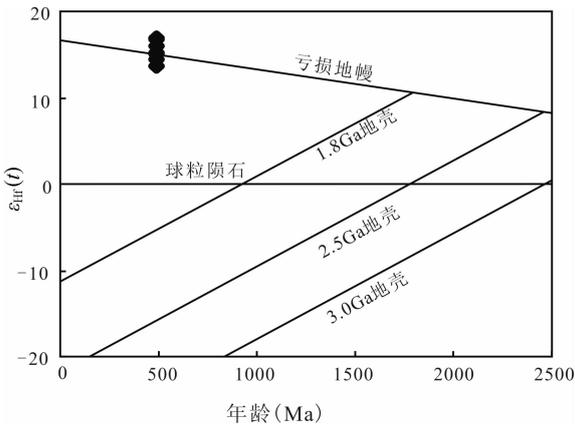


图 9 柴北缘大平沟地区斜长花岗岩锆石 Hf 同位素  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)-t$  图解(据朱小辉等, 2014)

Fig. 9  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)-t$  diagram of zircons in plagiogranite from Dapinggou area in the North Qaidam (after Zhu X H et al. , 2014)

来等(2004, 2008)对柴北缘地区古生代花岗岩的研究结果表明,本地区岩浆活动时代主要有以下几个阶段:460~475Ma、440~450Ma、395~410Ma、370~380Ma 以及 260~275Ma。其中 I 期岩浆活动对应于洋壳俯冲,形成在岛弧或活动大陆边缘环境;II

期为陆陆碰撞形成的同碰撞 S 型花岗岩;III、IV 期形成于碰撞后陆壳减薄阶段,兼具 I 型和 S 型花岗岩的双重特征;V 期则为古特提斯洋盆闭合诱发的又一期 I 型花岗岩活动。另外,年代学研究结果显示柴达木盆地北缘沿鱼卡河—沙柳河一线发育的高压/超高压变质岩石的峰期变质时代介于 420~458Ma(Song S G et al. , 2004, 2006; Mattinson et al. , 2006; 陈丹玲等, 2007; Zhang J X et al. , 2009)。这些研究结果共同指示柴北缘地区的大洋在 450~460Ma 时已完全闭合。

## 4 讨论

### 4.1 滩间山群火山岩的物质组成

都兰托莫尔日特 N-MORB 型玄武岩、锡铁山洋岛玄武岩(赖绍聪等, 1996; 朱小辉等, 2012)、绿梁山弧后盆地型蛇绿岩(王惠初等, 2003, 2005; 朱小辉等, 2014)以及都兰沙柳河蛇绿岩的存在(张贵宾等, 2005; 张贵宾等, 2005, 2011; Zhang G B et al. , 2008, 2009a, 2009b)指示柴达木地块与欧龙布鲁克地块间存在过早古生代的大洋。除沙柳河蛇

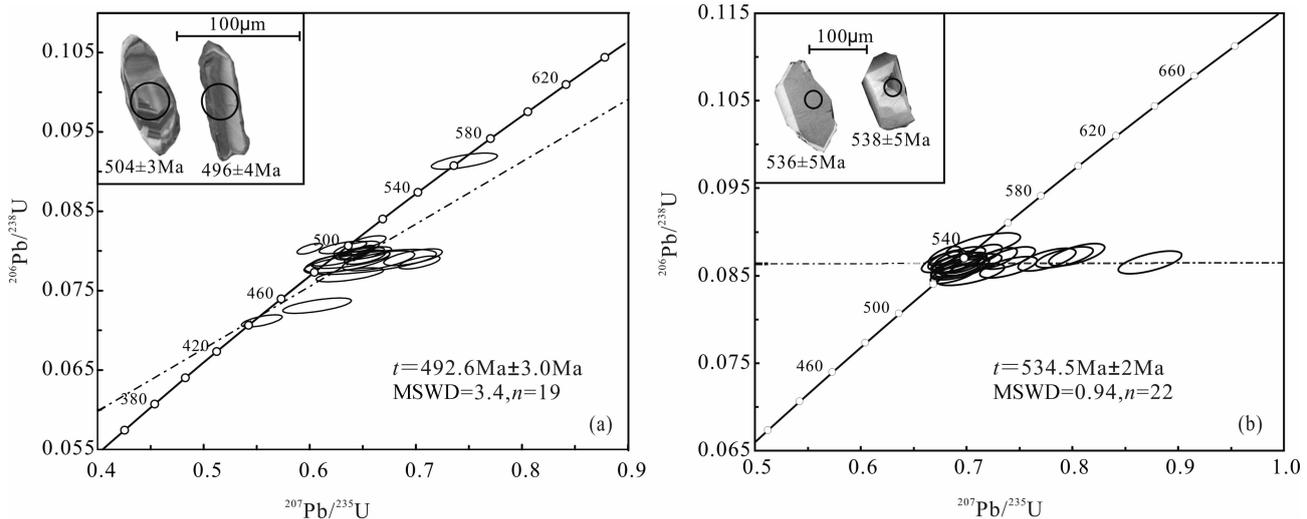


图 10 柴北缘大平沟斜长花岗岩(a)及辉长岩(b)锆石 U-Pb 谐和图(据朱小辉等, 2014)

Fig. 10 U-Pb concordia diagram of zircons in plagiogranite (a) and gabbro (b) from Dapinggou area in the North Qaidam(after Zhu X H et al., 2014)

绿岩外,其余岩石均产自滩间山群,而前人已有的研究表明分布在柴北缘赛什腾山、绿梁山、锡铁山及沙柳河一带的滩间山群火山岩总体上具有岛弧火山岩性质(史仁灯等, 2003, 2004; 王惠初等, 2003; Shi R D et al., 2006; 高晓峰等, 2011),复杂的岩石类型以及跨度较大的形成时代(460~535Ma)指示分布在柴北缘构造带的滩间山群火山岩带为一条复杂的、包含不同成因岩块,为早古生代洋盆在不同发育时期形成的岩石残片经构造拼合形成的混杂岩带。

#### 4.2 柴北缘新元古代—早古生代演化过程

由于柴北缘地区发生了板块的深俯冲作用,早期洋壳事件的记录很难保存下来,因此人们对本地区早古生代是否存在大洋,以及大洋的形成、性质、演化等一系列重要问题仍存在争论:有人认为柴北缘地区存在过早古生代的大洋(南祁连洋),该大洋与北祁连洋有密切联系(Xu Z Q et al., 2006; 宋述光等, 2009),有人认为本地区早古生代为大陆裂谷环境(夏林圻等, 1991),还有人认为本地区早古生代洋盆规模有限,仅仅发育裂陷槽(李峰等, 2006)或有限洋盆(国土资源部矿产资源研究所, 2001)。本文在对分布于柴北缘地区的滩间山群火山岩及镁铁质岩石进行岩石学、地球化学、年代学和同位素地球化学研究的基础上,结合前人已有的研究成果,提出了本地区新元古代—早古生代大洋演化过程(图 11)。

(1)柴北缘地区新元古代的火山岩/辉长岩普遍具有板内玄武岩或 E-MORB 的特征,并显示明显的

陆壳混染(包括原岩年龄为 750~800Ma 的榴辉岩以及部分辉长岩等),同时分布在柴北缘北带欧龙布鲁克板块内的全吉群为一套典型的边缘裂陷槽沉积,时代同样为新元古代(~740Ma),指示本地区在新元古代发生了裂解,柴北缘早古生代大洋可能是在这次裂解事件的基础上发展起来的。

(2)柴北缘地区早期洋壳事件的岩石记录较少,尤其 535~700Ma 期间的岩石记录至今没有报道,这可能是由于本时期主要为大洋扩张阶段,密度较大的洋壳在后期发生俯冲且没有折返到地表造成的。但东段都兰沙柳河大洋型蛇绿岩剖面(~516Ma)、托莫尔日特 N-MORB 型玄武岩(~480Ma)以及中段锡铁山 OIB 型玄武岩(~521Ma)的确定指示该地区至少在 480~521Ma 时仍存在洋壳。

(3)沿柴北缘构造带分布有大量形成于俯冲带环境的岩石组合,这些岩石的形成时代介于 460~535Ma,因此我们可以推断柴北缘地区发生洋壳俯冲的时限早于 535Ma,且可以一直持续到 460Ma。与此同时本地区陆壳岩石发生高压/超高压变质的时代(420~458Ma)以及同碰撞 S 型花岗岩的发育时代(440~450Ma)则暗示柴北缘地区的新元古代—早古生代大洋在约 450~460Ma 期间便已经完全闭合。

由于洋壳的密度较大,柴达木地块在其带动下也发生了俯冲,但仍有部分花岗岩、早期就位的新元古代镁铁质岩石、古生代岛弧火山岩以及少量的洋

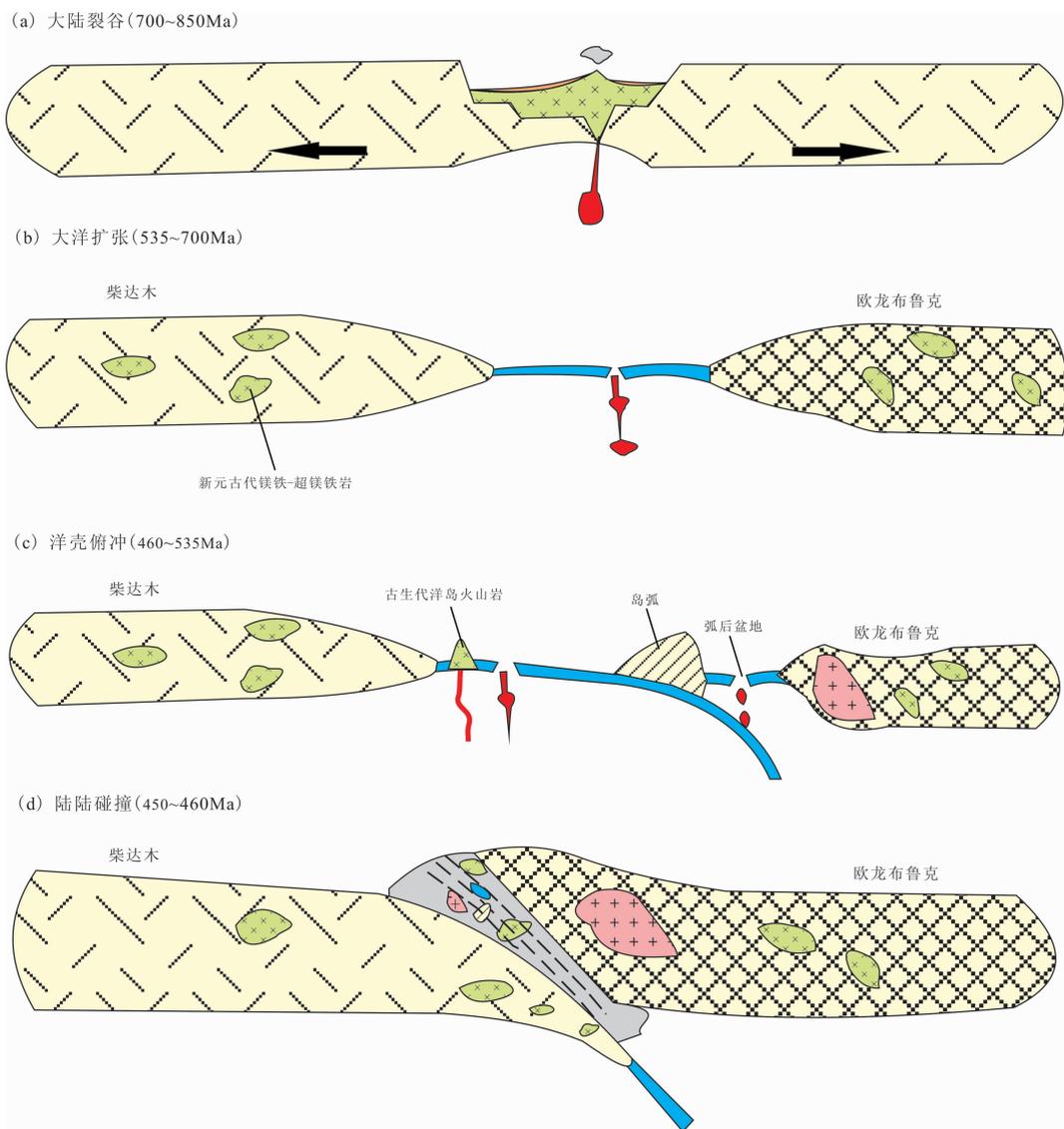


图 11 柴北缘地区新元古代—早古生代大洋演化模式图

Fig. 11 Tectonic evolution model of the Neoproterozoic-Early Paleozoic ocean in the North Qaidam

壳物质被刮削下来保存在混杂带中,其余大部分洋壳以及陆壳物质均发生了深俯冲并在后期有少量折返回地表与早期保留下来的物质一起构成了现今的柴北缘俯冲碰撞杂岩带。

### 5 结论

(1)分布在柴北缘构造带的滩间山群火山岩带为一条复杂的、包含不同成因岩块,为早古生代洋盆在不同发育时期形成的岩石残片经构造拼合形成的混杂岩带。

(2)晋宁运动后柴北缘地区已进入大洋地壳的发育及演化阶段,沿柴达木盆地北缘连续分布的岩石记录表明该洋盆可能在早古生代已具有一定的规模。其中 700~535Ma 为大洋地壳形成发育阶段,

该洋壳可能是在柴北缘地区新元古代 Rodinia 大陆裂解的基础上发育形成的;535~460Ma 时洋盆发生俯冲消减,形成了一系列的岛弧火山岩及岩浆岩;460~450Ma 期间洋盆闭合消失,在俯冲大洋板块的拖曳作用下,柴达木板块发生陆壳深俯冲并形成了超高压变质岩。

**致谢:** 审稿人对本文提出了宝贵的修改意见,在此谨表谢意。

### 注 释

① 国土资源部矿产资源研究所. 2001. 柴达木盆地南北缘成矿地质环境及找矿远景研究.

### 参 考 文 献

陈丹玲, 孙勇, 刘良, 张安达, 林慈鑫. 2007. 柴北缘鱼卡河榴辉岩

- 的超高压变质年龄: 锆石 LA-ICP-MS 微区定年. 中国科学 D 辑, 37(1): 279~287.
- 陈能松, 王勤燕, 陈强, 李晓彦. 2007a. 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. 地质前缘, 14(1): 43~55.
- 陈能松, 王新宇, 张宏飞, 孙敏, 李晓彦, 陈强. 2007b. 柴一欧微地块花岗岩地球化学和 Nd-Sr-Pb 同位素组成: 基底性质和构造属性启示. 地球科学, 32(1): 7~21.
- 冯益民, 何世平. 1996. 祁连山大地构造与造山作用. 北京: 地质出版社.
- 高晓峰, 校培喜, 贾群子. 2011. 滩间山群的重新厘定—来自柴达木盆地周缘玄武岩年代学和地球化学证据. 地质学报, 85(9): 1452~1463.
- 葛肖虹, 刘俊来. 2001. 被肢解的“西域克拉通”. 岩石学报, 16(1): 59~66.
- 郝国杰, 陆松年, 李怀坤, 郑健康. 2001. 柴北缘沙柳河榴辉岩岩石学及年代学初步研究. 前寒武纪研究进展, 24(3): 154~162.
- 郝国杰, 陆松年, 王惠初, 辛后田, 李怀坤. 2004. 柴达木盆地北缘前泥盆纪构造格架及欧龙布鲁克古陆块地质演化. 地质前缘, 11(3): 115~122.
- 赖绍聪, 邓晋福, 赵海玲. 1996. 柴达木北缘古生代蛇绿岩及其构造意义. 现代地质, 10(1): 18~28.
- 李峰, 吴志亮, 李保珠, 汪林峰. 2006. 柴达木盆地北缘滩间山群新厘定. 西北地质, 39(3): 83~90.
- 李怀坤, 陆松年, 赵风清, 李惠民, 于海峰, 郑健康. 1999. 柴北缘新元古代重大地质事件年代格架. 现代地质, 13(2): 224~225.
- 李怀坤, 陆松年, 王惠初, 相振群, 郑健康. 2003. 青海柴北缘新元古代超大陆裂解的地质记录—全吉群. 地质调查与研究, 26(1): 27~37.
- 林慈鑫, 孙勇, 陈丹玲, 第五春荣. 2006. 柴北缘鱼卡河花岗岩质片麻岩的地球化学特征和锆石 LA-ICPMS 定年. 地球化学, 35(5): 489~505.
- 陆松年, 王惠初, 李怀坤, 袁桂邦, 辛后田, 郑健康. 2002. 柴达木盆地北缘“达肯大坂群”的再厘定. 地质通报, 21(1): 19~23.
- 陆松年, 李怀坤, 陈志宏, 于海峰, 金巍, 郭坤一. 2004. 新元古时期中国古大陆与罗迪尼亚超大陆的关系. 地质前缘, 11(2): 515~523.
- 孟繁聪, 张建新, 杨经绥, 许志琴. 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.
- 史仁灯, 杨经绥, 吴才来. 2003. 柴北缘早古生代岛弧火山岩中埃达克质英安岩的发现及其地质意义. 岩石矿物学杂志, 22(3): 229~236.
- 史仁灯, 杨经绥, 吴才来, 史仁灯, 杨经绥, 吴才来, IIZUKA T, HIRATA T. 2004. 柴达木北缘超高压变质带中的岛弧火山岩. 地质学报, 2004, 78(1): 52~64.
- 宋述光, 牛耀龄, 张立飞, 张贵宾. 2009. 大陆造山运动: 从大洋俯冲到大陆俯冲、碰撞折返的时限—以北祁连山、柴北缘为例. 岩石学报, 25(9): 2067~2077.
- 王惠初, 陆松年, 袁桂邦, 辛后田, 张宝华, 王青海, 田琪. 2003. 柴达木盆地北缘滩间山群的构造属性及形成时代. 地质通报, 2(7): 487~493.
- 王惠初, 陆松年, 莫宣学, 李怀坤, 辛后田. 2005. 柴达木盆地北缘早古生代碰撞造山系统. 地质通报, 24(7): 603~612.
- 王惠初. 2006. 柴达木盆地北缘早古生代碰撞造山及岩浆作用. 中国地质大学(北京)博士学位论文.
- 吴才来, 杨经绥, 许志琴, Wooden J, Ireland T, 李海兵, 史仁灯, 孟繁聪, 陈松永, Persing H, Meibom A. 2004. 柴达木盆地北缘古生代超高压带中花岗岩岩浆作用. 地质学报, 78(5): 658~674.
- 吴才来, 郜源红, 吴锁平, 陈其龙, Wooden J L, Mazadab F K, Mattinson C G. 2008. 柴北缘西段花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其岩石地球化学特征. 中国科学 D 辑, 38(8): 930~949.
- 夏林圻, 夏祖春, 任有祥. 1991. 祁连—秦岭山系海相火山岩. 武汉: 中国地质大学出版社, 240~242.
- 辛后田, 郝国杰, 王惠初, 陈能松, 韩英善, 祁生胜. 2002. 柴北缘前震旦纪地层系统的新认识. 前寒武纪研究进展, 25(2): 113~119.
- 杨经绥, 宋述光, 许志琴, 吴才来, 史仁灯, 张建新, 李海兵, 万渝生, 刘焰, 邱海峻, 刘福来, Maruyama S. 2001. 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. 地质学报, 75(21): 175~179.
- 杨经绥, 张建新, 孟繁聪, 史仁灯, 吴才来, 许志琴, 李海兵, 陈松永. 2003. 中国西部柴北缘—阿尔金的超高压变质岩及其原岩性质探讨. 地质前缘, 10(3): 291~313.
- 杨经绥, 史仁灯, 吴才来, 陈松永. 2004. 柴达木盆地北缘新元古代蛇绿岩的厘定—罗迪尼亚大陆裂解的证据?. 地质通报, 23(9-10): 892~898.
- 袁桂邦, 王惠初, 李惠民, 郝国杰, 辛后田, 张宝华, 王青海, 田琪. 2002. 柴北缘绿梁山地区辉长岩的锆石 U-Pb 年龄及意义. 前寒武纪研究进展, 25(1): 37~40.
- 张贵宾, 宋述光, 张立飞, 牛耀龄, 舒桂明. 2005. 柴北缘超高压变质带沙柳河蛇绿岩型地幔橄榄岩的发现及其意义. 岩石学报, 21(4): 1049~1058.
- 张贵宾, 张立飞. 2011. 柴北缘沙柳河地区洋壳超高压变质单元中的异剥钙榴岩的发现及其地质意义. 地质前缘, 18(2): 151~157.
- 张建新, 万渝生, 许志琴, 杨经绥, 孟繁聪. 2001. 柴达木北缘德令哈地区基性麻粒岩的发现及其形成时代. 岩石学报, 17(3): 453~458.
- 张建新, 万渝生, 孟繁聪, 杨经绥, 许志琴. 2003. 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—深俯冲的前寒武纪变质基底?. 岩石学报, 19(3): 443~451.
- 张旗, 周国庆. 2001. 中国蛇绿岩. 北京: 科学出版社, 1~60.
- 朱小辉, 陈丹玲, 刘良, 李涤. 2010. 柴达木盆地北缘都兰地区旺尕秀辉长杂岩的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄及地质意义. 地质通报, 29(2-3): 227~236.
- 朱小辉, 陈丹玲, 刘良, 王超, 杨文强, 曹玉亭, 康磊. 2012. 柴北缘锡铁山地区镁铁质岩石的时代及地球化学特征. 地质通报, 31(12): 2079~2089.
- 朱小辉, 陈丹玲, 刘良, 赵姣, 张乐. 2014. 柴北缘绿梁山地区新元古代—早古生代弧后盆地型蛇绿岩的年代学、地球化学及大地构造意义. 岩石学报, 30(3): 822~834.

- Cadet J P, Kobayashi K, Lallemand S, Jolivet L, Aubouin J, Boulègue J, Shimamura H. 1987. Deep scientific dives in the Japan and Kuril Trenches. *Earth and Planetary Science Letters*, 83(1): 313~328.
- Chen D L, Liu L, Sun Y, Liou J G. 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*, 35(3-4): 259~272.
- Chopin C. 1984. Coesite and pure pyrope in high-grade blueschists of the western Alps: A first record and some consequence. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 86: 107~118.
- Coleman R G, Peterman Z E. 1975. Oceanic plagiogranite. *Journal of Geophysical Research*, 80: 1099~1108.
- David C G, William P L, Hans G A L. 1981. Petrology and geochemistry of plagiogranite in the Canyon Mountain ophiolite, Oregon. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 77: 82~89.
- Ernst W G. 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.
- Flagler P A, Spray J G. 1991. Generation of plagiogranite by amphibolite anatexis in oceanic shear zones. *Geology*, 19(1): 70~73.
- Gao S, Ling W L, Qiu Y M, Zhou L, Gerald H and Klaus S. 1999. Contrasting geochemical and Sm-Nd isotopic compositions of Archean metasediments from the Kongling high-grade terrain of the Yangtze craton: Evidence for cratonic evolution and redistribution of REE during crustal anatexis. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63: 2071~2088.
- Hofmann A. 1997. Mantle geochemistry: the message from oceanic volcanism. *Nature*, 385: 219~228.
- Hoffman P F. 1991. Did the breakout of Laurentia turn Gondwanaland inside-out. *Science*, 252: 1409~1412.
- Hoffman P F. 1999. The break-up of Rodinia, birth of Gondwana, true polar wander and the snowball Earth. *Journal of African Earth Sciences*, 28: 17~33.
- Koepke J, Feig S T, Snow J and Freise M. 2004. Petrogenesis of oceanic plagiogranites by partial melting of gabbros: an experimental study. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 146(4): 414~432
- Li Z X, Bogdanova S V, Collins A S, Davidson A, De Waele B, Ernst R E, Vernikovsky V. 2008. Assembly, configuration, and break-up history of Rodinia: a synthesis. *Precambrian Research*, 160: 179~210.
- Liou J G, Tsujimori T, Zhang R Y, Katayama I, Maruyama S. 2004. Global UHP metamorphism and continental subduction/collision: the Himalaya mode. *International Geology Review*, 46: 1~27.
- Maruyama S, Liou J G, Terabayash M. 1996. Blueschists and eclogites of the world and their exhumation. *International Geology Review*, 38: 485~594.
- Mattinson C G, Wooden J L, Liou J G, Bird D K, Wu C L. 2006. Age and duration of eclogite-facies metamorphism, North Qaidam HP/UHP terrane, western China. *American Journal of Science*, 306: 683~711.
- Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, 25: 956~983.
- Pedersen R B, Malpas J. 1984. The origin of oceanic plagiogranites from the Karmoy ophiolite, western Norway. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 88(1): 36~52.
- Reinecke T. 1991. Very-high-pressure metamorphism and uplift of coesite-bearing metasediments from the Zermatt-Saas zone, Western Alps. *European Journal of Mineralogy*, 3: 7~17.
- Shi R D, Yang J S, Wu C L, IIZUKA T, HIRATA T. 2006. Island arc volcanic rocks in the north Qaidam UHP belt, northern Tibet plateau: evidence for ocean-continent subduction preceding continent-continent subduction. *Journal of Asian Earth Science*, 28(2): 151~159.
- Smith D C. 1984. Coesite in clinopyroxene in the Caledonides and its implications for geodynamics. *Nature*, 310: 641~644.
- Song S G, Yang J S, Xu Z Q, Liou J G, Shi R D. 2003a. 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 S G, Yang J S, Liou J G, Wu C L, Shi R D, Xu Z Q. 2003b. Petrology, geochemistry and isotopic ages of eclogites from the Dulan UHPM terrane, the North Qaidam, NW China. *Lithos*, 70: 195~211.
- Song S G, Niu Y L. 2004. Ultra-deep origin of garnet peridotite from the North Qaidam ultrahigh-pressure belt, Northern Tibetan Plateau, NW China. *American Mineralogist*, 90: 1330~1336.
- Song S G, Zhang L F, Su L, Jian P, Liu D Y. 2005. Geochronology of diamond-bearing zircons in garnet peridotite in the North Qaidam UHPM belt, North Tibetan Plateau: A record of complex histories associated with continental collision. *Earth and Planetary Science Letters*, 234: 99~118.
- Song S G, Zhang L F, Niu Y L, Su L, Song B, Liu D Y. 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 S G, Su L, Li X H, Zhang G B, Niu Y L, Zhang L F. 2010. Tracing the 850-Ma continental flood basalts from a piece of subducted continental crust in the North Qaidam UHPM belt, NW China. *Precambrian Research*, 183: 805~816.
- Spiegelman M, Elliott T. 1993. Consequences of melt transport for uranium series disequilibrium in young lavas. *Earth and Planetary Science Letters*, 118(1): 1~20.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts implication for mantle composition and processes. In: Saunders A D and Norry M J (eds.).

- Magmatism in Oceanic Basins Spec. Publ. Geol. Soc. Lond., 42: 313~345.
- Tagiri M, Yano T, Bakirov A, Nakajima T, Uchiumi S. 1995. Mineral parageneses and metamorphic P-T paths of ultrahigh-pressure eclogites from Kyrghyastan Tien-Shan. *The Island Arc*, 4: 280~292.
- Volkova N I, Budanov V I. 1999. Geochemical discrimination of metabasalt rocks of the Fan-Karategin transitional blueschist/greenschist belt, South Tianshan, Tajikistan: seamount volcanism and accretionary tectonics. *Lithos*, 47 (3): 201~216.
- Wan Y S, Xu Z Q, Yang J S, Zhang J X. 2001. Ages and compositions of the Precambrian high-grade basement of the Qilian Terrane and its adjacent areas. *Acta Geologica Sinica - English Edition*, 75(4): 375~384.
- Xu J F, Castillo P R, Chen F R, Niu H C, Yu X Y and Zhen Z P. 2002. Geochemistry of late Paleozoic mafic igneous rocks from the Kuerti area, Xinjiang, northwest China: Implications for back arc mantle evolution. *Chemical Geology*, 193(1-2): 137~154.
- Xu Z Q, Yang J S, Wu C L, Li H B, Zhang J X, Qi X X, Song S G, Qiu H J. 2006. Timing and mechanism of formation and exhumation of the Northern Qaidam ultrahigh-pressure metamorphic belt. *Journal of Asian Earth Sciences*, 28: 160~173.
- Yuan H L, Gao S, Liu X M, Li H M, Günther D and Wu F Y. 2004. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 11: 357~370.
- Yuan H L, Gao S, Dai M N, Zong C L, Günther D, Fontaine G H, Liu X M and Diwu C R. 2008. Simultaneous determinations of U-Pb age, Hf isotopes and trace element compositions of zircon by excimer laser ablation quadrupole and multiple collector ICP-MS. *Chemical Geology*, 247: 100~117.
- Zhang G B, Song S G, Zhang L F, Niu Y L. 2008. The subducted oceanic crust within continental-type UHP metamorphic belt in the North Qaidam, NW China: Evidence from petrology, geochemistry and geochronology. *Lithos*, 108: 99~118.
- Zhang G B, Ellis D J, Christy A G, Zhang L F, Niu Y L, Song S G. 2009a. UHP metamorphic evolution of coesite-bearing eclogite from the Yuka terrane, North Qaidam UHPM belt, NW China. *European Journal of Mineralogy*, 21 (6): 1287~1300.
- Zhang G B, Zhang L F, Song S G, Niu Y L. 2009b. UHP metamorphic evolution and SHRIMP dating of meta-ophiolitic gabbro in the North Qaidam, NW China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 35:310~322.
- Zhang J X, Yang J S, Mattinson C G, Xu Z Q, Meng F C, Shi R D. 2005. Two contrasting eclogite cooling histories, North Qaidam HP/UHP terrane, western China; Petrological and isotopic constraints. *Lithos*, 84: 51~76.
- Zhang J X, Meng F C, Li J P, Mattinson C G. 2009. Coesite in eclogite from the North Qaidam Mountains and its implications. *Chinese Science Bulletin*, 54(6): 1105~1110.
- Zhang J X, Mattinson C G, Yu S Y, Li J P, Meng F C. 2010. U-Pb zircon geochronology of coesite-bearing eclogites from the southern Dulan area of the North Qaidam UHP terrane, northwestern China: spatially and temporally extensive UHP metamorphism during continental subduction. *Journal of Metamorphic Geology*, 28: 955~978.
- Zhang L F, Ellis D J, Jiang W B. 2002a. Ultrahigh pressure metamorphism in western Tianshan, China, part I: evidences from the inclusion of coesite pseudomorphs in garnet and quartz exsolution lamellae in omphacite in eclogites. *American Mineralogist*, 87:853~860.
- Zhang L F, Ellis D, Williams S, Jiang W. 2002b. Ultrahigh pressure metamorphism in western Tianshan, China, part II: evidence from magnesite in eclogite. *American Mineralogist*, 87: 861~866.
- Zhang L F, Ai Y, Song S, Rubatto D, Song B, Williams S, Liou J G. 2007. Triassic collision of Western Tianshanorogenic belt, China: evidences from SHRIMP U-Pb dating of zircon from eclogitic rocks. *Lithos*, 96: 266~280.
- Zhang L F, Lu Z, Zhang G B, Song S S. 2008. The geological characteristics of oceanic-type UHP metamorphic belts and their tectonic implications: Case studies from Southwest Tianshan and North Qaidam in NW China. *Chinese Science Bulletin*, 53 (20): 3120~3130.
- Zhang R Y, Liou J G, Iizuka Y, Yang J S. 2009. First record of K-cymrite in North Qaidam UHP eclogite, Western China. *American Mineralogist*, 94: 222~228.
- Zhang Z M, Coleman R G, Liou J G. 1984. An outline of the plate tectonics of China. *Geological Society of America Bulletin*, 95 (3), 295~312.
- Zheng Y F, Ye K, Zhang L F. 2009. Developing the plate tectonics from oceanic subduction to continental collision. *Chinese Science Bulletin*, 54: 2549~2555.

## The Initiation, Development and Termination of the Neoproterozoic-Early Paleozoic Ocean in the Northern Margin of Qaidam Basin

ZHU Xiaohui<sup>1, 2)</sup>, CHEN Danling<sup>2)</sup>, WANG Chao<sup>1)</sup>, WANG Hong<sup>3)</sup>, LIU Liang<sup>2)</sup>

1) *Key Laboratory for the Study of Focused Magmatism and Giant Ore Deposits, Xi'an Center of Geological Survey, CGS, Xi'an, 710054;*

2) *State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069;*

3) *No. 11 of Geological Brigade of Hebei Geology and Mineral Exploration Bureau, Xingtai, Hebei, 054000*

### Abstract

The North Qaidam was an Early Paleozoic orogenic belt which was formed from deep subduction of continental crust. The U-Pb zircon ages reveal that most of the protolith ages of HPM/UHPM rocks in the North Qaidam are older than 750Ma, and the protolith belong to continental crust type. But the protolith age of coesite-bearing eclogite from Shaliuhe section in Dulan area is 516Ma, and the protolith belong to oceanic crust type, suggesting the existence of deep subduction of oceanic crust prior to the continental subduction in the North Qaidam. This paper focuses on the progress of petrology, geochronology, geochemistry and isotope geochemistry studies of the evolution about the Neoproterozoic-Early Paleozoic ocean in the North Qaidam, suggesting a continental breakup event occurred during 700~850Ma in this area, which could be related with the breakup of Rodinia, then a Neoproterozoic-Early Paleozoic ocean appears to have developed between Qaidam and Olongbuluck blocks during 535~700Ma on this basis, which was then subducted during 460~535Ma, and disappeared during 450~460Ma at last. It is of great importance to know the evolution of the HP/UHP belt in the North Qaidam.

**Key words:** Neoproterozoic-Early Paleozoic; oceanic subduction; continental collision; HP/UHP metamorphic belt; the North Qaidam