

西准噶尔晚古生代岩浆活动和构造背景*

高睿¹ 肖龙^{2**} 王国灿^{2,3} 贺新星⁴ 杨刚² 鄢圣武⁵

GAO Rui¹, XIAO Long^{2**}, WANG GuoCan^{2,3}, HE XinXing⁴, YANG Gang² and YAN ShengWu⁵

1. 成都理工大学地球科学学院, 成都 610059

2. 中国地质大学地球科学学院, 武汉 430074

3. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 武汉 430074

4. 江苏省地质调查研究院, 南京 210018

5. 陕西省地质矿产勘查开发总公司, 西安 710054

1. College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

2. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

4. Geological Survey of Jiangsu Province, Nanjing 210018, China

5. Shaanxi Geological and Mineral Survey and Development Corporation, Xi'an 710054, China

2012-04-17 收稿, 2013-06-25 改回.

Gao R, Xiao L, Wang GC, He XX, Yang G and Yan SW. 2013. Paleozoic magmatism and tectonic setting in West Junggar. *Acta Petrologica Sinica*, 29(10):3413–3434

Abstract West Junggar, as a crucial part of the Central Asian Orogenic Belt (CAOB), has been paid a lot of attention by numerous scholars. Six ophiolitic mélangé belts, numerous granitoids and mafic-intermediate dyke swarms outcrop in West Junggar, indicating how complex the Paleozoic tectonic evolution of West Junggar is. Although a great of improvements has been made, there are still many controversies, such as the formation time, rock assemblages and petrogenesis of diverse ophiolitic mélangés, the petrogenesis, tectonic setting and thermal mechanism of the I-type and A-type granitoids, the geochronology, petrogenesis, tectonic background and paleo-stress regime of mafic-intermediate dyke swarms, the Paleozoic geochronological structure, the tectonic setting, the Phanerozoic crustal growth, the basement and tectonic evolution of West Junggar, and so on. The author collects the reported data and summarizes on the ophiolitic mélangé, Paleozoic granitoids and intermediate-mafic dyke swarms in West Junggar. Combining with the geological survey and geochemical work, we put forward several cognitions: (1) Daerbute and Karamay ophiolitic mélangés that are derived from high degree partial melting of spinel-bearing Iherzolite, are formed in back-arc tectonic setting related with subduction. (2) C₁ granitoids are the outcomes of subduction, C₂-P₁ are generated in post-collisional background, while P₂ granitoids are formed in within-plate setting. (3) The petrogenesis of I-type granitoids are subduction-related, while the A-type granitoids and mafic-intermediate dyke swarms are post-collisional background-related. (4) The A-type granitoids are derived from the high degree of fractionated crystallization after the lower crust partial melting induced by upwelling mantle. Geochemically, the mafic-intermediate dyke swarms are featured as adakitic rocks or sanukite, which are most possibly from partial melting of remnant oceanic slab metasomatized by fluids or melts. (5) The mafic-intermediate dyke swarms are formed a little later than that of the host granitoid, both of which are formed in post-collisional background in C₂-P₁, suggesting a Paleozoic stress regime with near North-South direction extension. (6) The Paleozoic tectonic settings of West Junggar are oceanic basin system in Devonian, subduction in Early Carboniferous, post-collisional setting in Late Carboniferous-Early Permian and within-plate setting in Middle-Late Permian.

Key words West Junggar; Paleozoic; Tectonic setting; Magmatic rock

摘要 西准噶尔作为中亚造山带的一部分,吸引了大量学者的关注。蛇绿混杂岩带、花岗岩、中基性岩墙在本地区广泛出现,表明西准噶尔晚古生代构造演化极为复杂。但是在许多方面仍存在很多争议,例如西准噶尔蛇绿混杂岩带的形成时

* 本文受国家重点基础研究发展计划项目(2010CB808906)和中国地质调查项目(101-G111906)联合资助。

第一作者简介:高睿,男,1985年生,博士,矿物学、岩石学、矿床学专业,E-mail:jingxingaorui@163.com

** 通讯作者:肖龙,男,1963年生,博士,教授,岩石学专业,E-mail:longxiao@cug.edu.cn

代、岩石组合和岩石成因;I型和A型花岗岩的岩石成因,构造背景和热机制;中基性-酸性岩墙群的年代学、岩石成因、构造背景和古应力场;西准噶尔晚古生代年代学格架和构造背景;西准噶尔显生宙地壳增生;西准噶尔基底特征和西准噶尔晚古生代构造演化等。笔者通过搜集前人的资料和数据,对西准噶尔区域发育的蛇绿混杂岩带、地层、古地理环境、花岗岩体和 中基性岩墙群的总结,结合项目组野外与室内数据的研究,得到以下认识:(1)达尔布特和克拉玛依蛇绿混杂岩的形成环境与俯冲相关的弧后盆地,源区来自含尖晶石二辉橄榄岩高程度部分熔融作用;(2)早石炭世花岗岩形成于俯冲环境,晚石炭世-早二叠世花岗岩形成于后碰撞环境,中二叠世花岗岩形成于板内环境;(3)I型花岗岩的成因与俯冲密切相关,而A型花岗岩和中基性岩墙产于后碰撞环境下;(4)A型花岗岩是下地壳受地幔底侵发生部分熔融并高度分离结晶的产物,中基性岩墙群普遍具有埃达克质岩的地球化学特点,可能产于受流体(或熔体)交代的残余洋壳板片的部分熔融;(5)中基性岩墙群稍晚于寄主岩体而形成,但两者均形成于后碰撞构造背景。在晚石炭世-早二叠世,西准噶尔处于近南北向的拉张应力体系;(6)西准噶尔在泥盆纪为洋盆体系;早石炭世,俯冲-碰撞过程结束;晚石炭世-早二叠世属于后碰撞环境;中晚二叠世处于板内环境。

关键词 西准噶尔;晚古生代;大地构造;岩浆岩

中图法分类号 P542.4

中亚造山带(图1)位于东欧地台-卡拉库姆地台-塔里木地台-中朝地台和西伯利亚地台之间,是全球显生宙地壳增生与改造最显著的地区,也是全球最大的增生造山带与大陆成矿域(Sengör *et al.*, 1993; Hu *et al.*, 2000; Chen and Jahn, 2004; Jahn *et al.*, 2004; Xiao and Kusky, 2009)。它被认为是一条典型的由一系列俯冲-增生作用而形成的复合造山带(Sengör *et al.*, 1993; Windley, 2002; Buckman and Aitchison, 2004; Xiao *et al.*, 2004; Xiao and Kusky, 2009)。地壳增生主要有侧向增生和横向增生两种(Kay and Kay, 1988;

Rudnick, 1990)。侧向增生发生在板块边界,与俯冲增生密切相关,以蛇绿混杂岩和增生杂岩体等为特征(Feng *et al.*, 1989; Kwon *et al.*, 1989; Wang *et al.*, 2003; Xiao and Kusky, 2009; Zhang *et al.*, 2011a);垂向增生则与后碰撞背景紧密联系,由幔源物质底侵导致新生地壳生长(Han *et al.*, 1997; Chen and Jahn, 2004; Jahn *et al.*, 2004; Chen *et al.*, 2010; Han *et al.*, 2011)。最近,有学者提出早期洋陆俯冲阶段岛弧物质的侧向添加和晚期后碰撞幔源物质垂向地垫的两阶段模型解释中亚造山带显生宙大规模的地壳生长(高俊

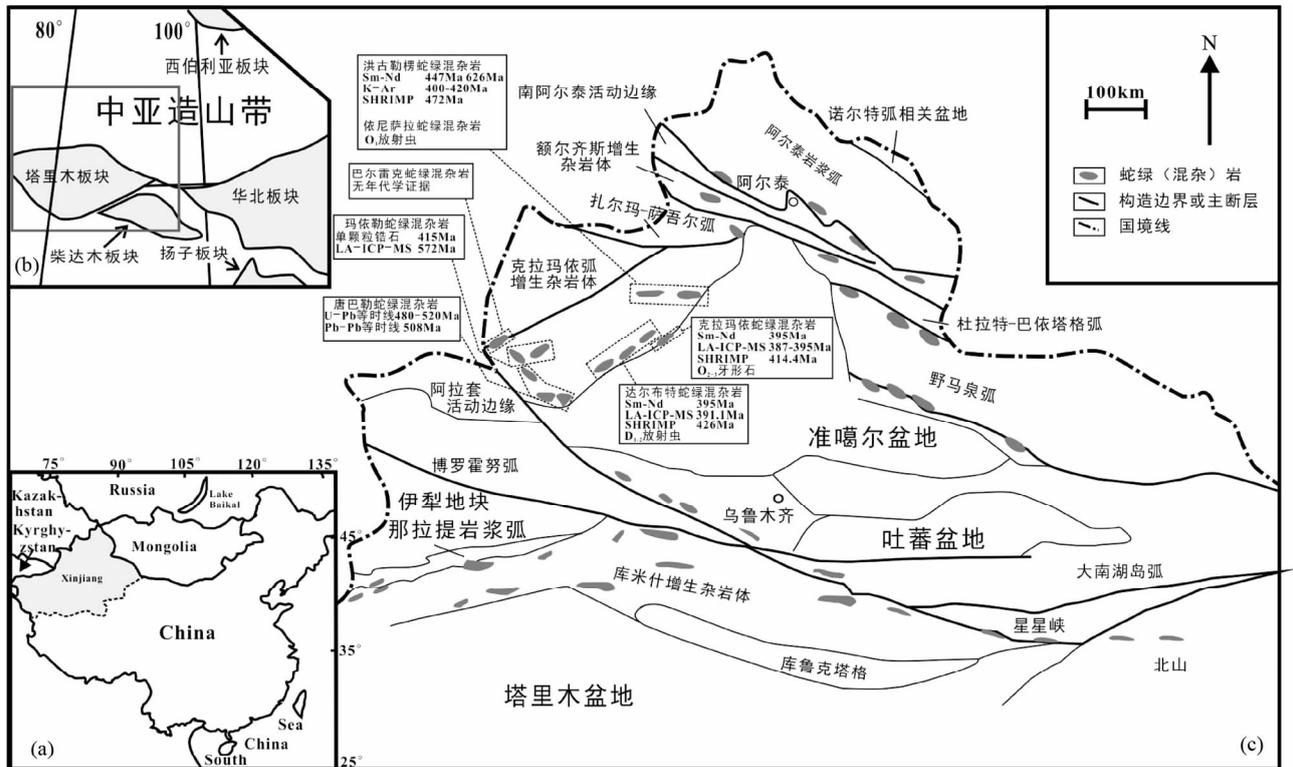


图1 北疆蛇绿(混杂)岩带分布图及相关年代信息(据 Xiao *et al.*, 2008 修改)

Fig. 1 Distribution map and related age information of ophiolites or ophiolitic mélanges in Northern Xinjiang (modified after Xiao *et al.*, 2008)

等, 2012)。

西准噶尔作为中亚造山带的一部分,吸引了大量学者的关注(韩宝福等, 2006; Geng *et al.*, 2009; Chen *et al.*, 2010; Zhang *et al.*, 2011a, b; Ma *et al.*, 2012; Yang *et al.*, 2012a)。西准噶尔夹持于西伯利亚板块、哈萨克斯坦和塔里木板块,在古生代期间经历了洋内俯冲增生,残留多条蛇绿混杂岩带和古大陆边缘增生体系(Feng *et al.*, 1989; Kwon *et al.*, 1989; Wang *et al.*, 2003; Zhang *et al.*, 2011a, b; Xu *et al.*, 2012)。在古生代洋陆转化过程中和后期陆内演化阶段,形成复杂的岩浆体系,包括古洋盆、洋岛、岛弧、后碰撞等多种不同类型构造背景下的岩浆活动(Xiao *et al.*, 2004, Xiao and Kusky, 2009; Zhou *et al.*, 2008; Geng *et al.*, 2009; Chen *et al.*, 2010; Yang *et al.*, 2012a)。蛇绿混杂岩带、花岗岩、中基性岩墙在本地区广泛出现,表明西准噶尔晚古生代构造演化极为复杂。晚古生代频繁、大规模的岩浆活动加多期次的构造变形、叠加改造作用,使得西准噶尔地区发育包古图、萨尔托海、哈图、宝贝等铜、金等多金属矿床(肖文交等, 2006; 赵振华等, 2006; Tang *et al.*, 2010; Ma *et al.*, 2012)。对西准噶尔的研究已经很深入,但是在许多方面仍存在很多争议,例如西准噶尔蛇绿混杂岩带的形成时代、岩石组合和岩石成因(Feng *et al.*, 1989; Wang *et al.*, 2003; 雷敏等, 2008; 辜平等, 2009, 2011; 陈石和郭召杰, 2010; 陈博和朱永峰等, 2011; Yang *et al.*, 2012a, b; Xu *et al.*, 2012); I型和A型花岗岩的岩石成因、构造背景和热机制(苏玉平等, 2006; 韩宝福等, 2006; 袁峰等, 2006; 周涛发等, 2006; Zhou *et al.*, 2008; Geng *et al.*, 2009; Chen *et al.*, 2010); 中基性-酸性岩墙群的年代学、岩石成因、构造背景和古应力场(李辛子等, 2005; Yin *et al.*, 2010; Zhang *et al.*, 2011a, b; Ma *et al.*, 2012); 西准噶尔晚古生代年代学格架和构造背景(童英等, 2010; Chen *et al.*, 2010; 陈家富等, 2010); 西准噶尔显生宙地壳增生(韩宝福等, 2006; Chen and Jahn, 2004; Hu *et al.*, 2000); 西准噶尔基底特征(Zhang *et al.*, 1984; Coleman, 1989; Feng *et al.*, 1989; Kwon *et al.*, 1989; Hu *et al.*, 2000; Chen and Jahn, 2004; Chen and Arakawa, 2005; Zheng *et al.*, 2007)和西准噶尔晚古生代构造演化(Zhou *et al.*, 2008; Xiao and Kusky, 2009; Chen *et al.*, 2010; Tang *et al.*, 2010, 2012a, b; Ma *et al.*, 2012; Xu *et al.*, 2012; Yang *et al.*, 2012a, b)。笔者将重点根据西准噶尔石炭纪-二叠纪花岗岩的地质学、年代学和地球化学,结合蛇绿混杂岩带和中基性岩墙群相关的证据对西准噶尔晚古生代构造背景进行论述。

1 西准噶尔蛇绿混杂岩带

新疆发育多条蛇绿混杂岩带,其年代从晚二叠世到前寒武(Kwon *et al.*, 1989; Xiao *et al.*, 1994, 2008; Jian *et al.*, 2003; Zhou *et al.*, 2004; Jian *et al.*, 2005; 肖文交等, 2006;

吴波等, 2006; Yang *et al.*, 2012a, b; Xu *et al.*, 2012),其中最年轻的为西南天山蛇绿混杂岩(晚二叠世放射虫硅质岩,李辛子等, 2005),最老的为西准噶尔玛依勒蛇绿混杂岩(LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄 572Ma, Yang *et al.*, 2012b)。西准噶尔地区发育多条蛇绿混杂岩带,对西准噶尔古生代构造演化的构建至关重要。

1.1 年代学

西准噶尔发育有唐巴勒、玛依勒、达尔布特、巴尔雷克、克拉玛依和洪古勒楞,共6条古生代蛇绿(混杂)岩带,已报道的年龄范围从 $572 \pm 9\text{Ma}$ 到 $332 \pm 14\text{Ma}$ (Xiao *et al.*, 1994; Kwon *et al.*, 1989; 徐新等, 2006; 何国琦等, 2007; Yang *et al.*, 2012a, b; Xu *et al.*, 2012),但是对巴尔雷克蛇绿混杂岩带确定的形成年代还没有锆石年代学的证据,只是简单地从地层接触关系判断, Jian *et al.* (2005)对玛依勒蛇绿混杂岩中辉长岩进行研究并得到 415Ma 的单颗粒锆石 U-Pb 年龄。而 Yang *et al.* (2012b)对辉长岩进行锆石 U-Pb LA-ICP-MS 定年得到 572Ma。唐巴勒蛇绿岩的年代主要依据寒武纪-奥陶纪化石和一些年代学数据,包括淡色辉长岩中楣石的 Pb-Pb 同位素年龄 $523 \pm 7\text{Ma}$ (Kwon *et al.*, 1989),斜长花岗岩中的楣石与斜长石的 Pb-Pb 同位素年龄为 $508 \pm 20\text{Ma}$ 和斜长花岗岩中斜长石的 U-Pb 等时线年龄 480 ~ 520Ma (肖序常等, 1992)。另外,对克拉玛依蛇绿混杂岩带的研究程度也比较低,锆石 U-Pb SHRIMP 给出 414.4Ma 和 332Ma,认为前者代表古亚洲洋闭合的时间,后者代表西准噶尔地区残余洋盆持续到早石炭世(徐新等, 2006)。朱永峰等(2008)通过研究蛇绿混杂岩中白云石大理岩和石榴角闪岩,认为白云石大理岩是蛇绿岩套中二辉橄辉岩的变质反应产物,笔者认为上述两期辉长岩的锆石 U-Pb SHRIMP 年龄与蛇绿混杂岩的形成与变质改造相对应,即克拉玛依蛇绿岩在 414.4Ma 形成,并在 332Ma 通过俯冲发生变质反应并折返到地表。结合克拉玛依蛇绿混杂岩顶部断层接触下-上石炭统太勒古拉组地层等信息,认为克拉玛依蛇绿混杂岩形成于中奥陶世至早泥盆世,并于早石炭早期俯冲侵入。Yang *et al.* (2012c)对蛇绿岩套中的 OIB 型玄武岩和 MORB 型辉长岩进行锆石 U-Pb LA-ICP-MS,结果分别为 395Ma 和 387Ma,认为其形成于中泥盆世的俯冲消减过程。最近,项目组在克拉玛依蛇绿混杂岩中的硅质岩中发现晚泥盆世的放射虫,对其确切的形成时代有了更多的支持,即克拉玛依蛇绿混杂岩形成于中奥陶世-晚泥盆世。达尔布特蛇绿混杂岩作为西准噶尔地区乃至北疆规模最大的一条蛇绿混杂岩带,研究程度相对较高,其可能代表了古亚洲洋壳的残余,对探讨古亚洲洋的构造演化具有重要的意义(Feng *et al.*, 1989; 肖序常等, 1992; Wang *et al.*, 2003; 刘希军等, 2009; Yang *et al.*, 2012a, b)。关于达尔布特蛇绿混杂岩的形成时代与构造环境一直存在争议。肖序常等(1992)、Zhang and Zhai (1993)发现蛇绿混杂岩上部的硅质岩有早-中泥盆世放射虫化石。

张弛和黄莹(1992)获得辉长岩的 Sm-Nd 等时线年龄为 $395 \pm 12\text{Ma}$; 辜平阳等(2009)和 Yang *et al.* (2012a) 运用 LA-ICP-MS 法测得辉长岩中的锆石 U-Pb 年龄为 $391.1 \pm 6.8\text{Ma}$ 。刘希军等(2009)测得辉长岩的锆石 U-Pb LA-ICP-MS 年龄为 $302 \pm 1.7\text{Ma}$, 考虑到该年龄与西准噶尔乃至北疆范围内 300Ma 左右大规模的岩浆活动重叠, 该年龄极可能是侵入达尔布特蛇绿混杂岩中辉长岩脉的年代。最近, 陈博和朱永峰(2011)获得辉长岩中锆石 U-Pb 的 SHRIMP 年龄为 426Ma。根据以上化石与同位素年代学的限制, 基本可以判定达尔布特蛇绿混杂岩在中志留世就已经形成, 并至少一直延续到中泥盆世。洪古勒楞蛇绿混杂岩是西准噶尔最北边的一条蛇绿混杂岩, 向东可与东准噶尔的扎河坝、兔子泉蛇绿岩相连(张元元和郭召杰, 2010), 前人对洪古勒楞蛇绿混杂岩带进行了年代测定, 得到 400 ~ 420Ma (堆晶岩上部角闪石安山玢岩中的角闪石 K-Ar 法, 白文吉等, 1986), 626Ma(斜长花岗岩、斜长岩、橄长岩和辉长岩的 Sm-Nd 等时线年龄, 黄建华等, 1999), 447Ma(堆晶辉长岩、橄榄岩、斜长岩与玄武岩的 Sm-Nd 等时线年龄, 张弛和黄莹, 1992), 最近张元元和郭召杰(2010)测得其中堆晶辉长岩 SHRIMP 年龄为 472Ma, 认为其形成与早奥陶世。项目组在新疆北部的依尼萨拉发现一套岩石组合为蛇纹岩 + 玄武岩 + 玄武安山岩 + 硅质岩的蛇绿混杂岩, 正好位于洪古勒楞蛇绿混杂岩的西边延长线上, 两者完全可以连成一条蛇绿混杂岩带, 项目组同样在其中的硅质岩中发现放射虫, 时代为早奥陶世(笔者项目组, 待发表数据)。根据以上年代学证据, 认为依尼萨拉-洪古勒楞绿混杂岩的形成于早奥陶世, 可能一直持续到早泥盆世。因为克拉玛依和达尔布特两条蛇绿混杂岩带形成时代有确切的年代学和微体化石证据支持, 能够一直延续到泥盆纪, 下文论述主要以这两条蛇绿混杂岩带为主。

1.2 岩石成因

辉长岩与玄武岩都富集大离子亲石元素, 尤其是 Ba、Th、U、Pb, 且亏损高场强元素, Nb-Ta 负异常明显, 没有 Eu 的负异常, 稀土配分模式类似于 N-MORB 或 E-MORB, 源区可能受到流体交代的影响导致其具有上述微量元素特征(Feng *et al.*, 1989; Yang *et al.*, 2012a)。对于 E-MORB 型岩石的成因通常形成于洋中脊, 由亏损地幔的软流圈地幔受富集组分的影响而形成。然而 E-MORB 与 N-MORB 型岩石同样能形成于弧后盆地环境(Gribble *et al.*, 1998), 其形成是由于洋壳俯冲与板片的折返作用引起地幔对流, 是周围富集的地幔上涌发生部分熔融而形成。这些样品具有低的全碱含量, 亏损 Mg 和 Ti, 富集 LILEs, 亏损 Nb-Ta, 高 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值, 高 La/Nb, Ba/Nb, Nb/La, Ba/Th 和 Zr/Nb 比值都表明其成因与俯冲有关(Yang *et al.*, 2012a; 辜平阳等, 2009, 2011)。

克拉玛依带中的样品在 Nb/La-Mg[#] 图解中(图 2)基本呈不变化的近水平状, 反映岩浆演化主要受结晶分异作用的控制, 并未受到同化混染。Nb/La 比值会系统的发生变化以区

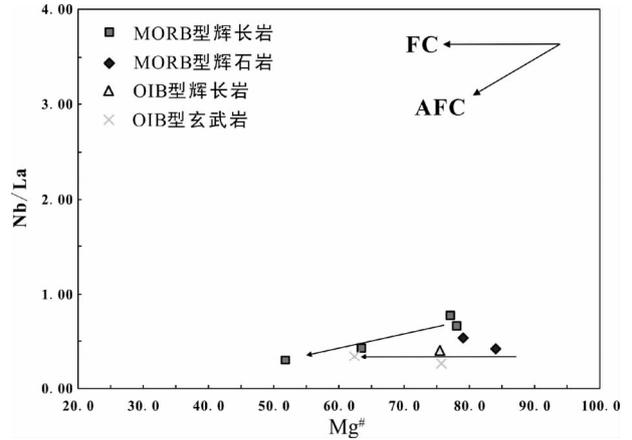


图 2 克拉玛依蛇绿混杂岩 Nb/La-Mg[#] 图解

Fig. 2 Nb/La-Mg[#] diagram of Karamay ophiolitic mélange

分同化混染分离结晶作用和单纯的分离结晶作用。MORB 型辉长岩和辉石岩的 Nb/La 比值随着 Mg[#] 值的降低有逐渐降低的趋势, 但变化范围不大, 可能受到很弱的同化混染作用, OIB 型的玄武岩和辉长岩的 Nb/La 比值基本未变化, 说明未受到同化混染作用。克拉玛依辉石岩类似于 MORB, 辉长岩类似于 MORB 或 OIB, 而玄武岩类似于 OIB。玄武岩富含全碱和 TiO₂, 富集轻稀土元素和大离子亲石元素, 亏损重稀土元素, 没有或弱负 Eu 异常, 没有明显的 Nb, Ta 和 Ti 的负异常, 其成因与热点或地幔柱相关(Yang *et al.*, 2012a)。辉石岩亏损 Rb, Th, U, Ce, 富集 Ba, Pb。辉长岩富集 Ba, Th, U, Pb, Hf, 亏损 Nb, Ta, 总体来说, 富集大离子亲石元素, 亏损高场强元素, 不具 Eu 的负异常, 辉长岩的稀土配分模式类似于 N-MORB, 辉石岩的稀土配分模式则类似 E-MORB。辉石岩和辉长岩在其形成过程中同样受到流体交代的影响, 体现在高 Th/Yb 和 Zr/Nb 和低 Nb/Th 比值。

1.3 岩石组合和构造环境

裂谷型蛇绿岩由于强烈的伸展作用, 岩石组合以大量的蛇纹石化橄榄岩为特点, 伴有少量到中等规模的枕状玄武岩和辉长岩, 席状杂岩墙缺乏。橄榄岩为尖晶石二辉橄榄岩和斜长石二辉橄榄岩。辉长岩包括堆晶和块状辉长岩。玄武岩常见枕状玄武岩和块状玄武岩, 地化特点类似典型的 MORB 的性质(Dilek, 2003; Dilek and Harald, 2011)。MORB 型蛇绿岩一般都具有完整的蛇绿岩层序, 具有远洋沉积物, 地幔橄榄岩与地壳单元之间有成因联系, 是 MORB 部分熔融后的残留物。地幔橄榄岩包括二辉橄榄岩和方辉橄榄岩, 带上一般不见大型的铬铁矿床(Pearce *et al.*, 1984)。超基性岩-基性岩组合为纯橄榄岩-橄长岩-辉长岩, 矿物结晶顺序为 Ol-Pl-Cpx(Pearce *et al.*, 1984), 基性熔岩具有典型 MORB 特点的大洋拉斑玄武岩, 包括 E-MORB 或 N-MORB。SSZ 型蛇绿岩可分为两类: 特提斯型和科迪勒拉型。前者除大洋岩石圈组分, 还具有大量岛弧性质拉斑玄武岩、基性岩墙和深

成岩,发育玻安岩这一类标志岩石,呈现完整的岩片仰冲于大陆边缘;后者由被肢解破坏的大洋岩石圈残片和具有拉斑-钙碱性岩浆亲缘性的弧火山岩和深成岩组成,具有酸性岩浆分异作用。地幔橄榄岩为方辉橄榄岩、大型铬铁矿易于该类蛇绿岩中。矿物结晶顺序为 Ol-Cpx-Opx-Pl (Pearce *et al.*, 1984; Elthon, 1992)。基性熔岩兼具 MORB 型和 IAT 型特点,时序上显示从 IAT 向 MORB 变化的特点 (Leat *et al.*, 2000; Fretzdorff *et al.*, 2002)。

关于达尔布特蛇绿岩带的形成环境研究很多,但仍存在许多争议,霍有光在 1985 年首先提出达尔布特蛇绿岩产于大洋环境,张弛和黄萱(1992)也将达尔布特蛇绿岩带归结为大洋中脊环境下形成的蛇绿岩,新疆地质矿产局(1993)和何国琦等(1994)认为达尔布特蛇绿岩形成于弧后盆地、边缘海盆环境;姜勇等(2003)认为形成于弧后盆地或大陆边缘洋扩张脊构造环境;雷敏等(2008)通过对达尔布特蛇绿岩带中阿克巴斯套和大棍的玄武岩进行详细的化学特征分析,得出达尔布特蛇绿岩带可能形成于大洋中脊环境;辜平平等(2009, 2011)利用不活动元素协变关系判别图得出的结果认为达尔布特蛇绿岩在中泥盆世为一个不成熟的弧后盆地,不具有现今成熟大洋或成熟盆地的洋壳-上地幔结构。刘希军等(2009)认为达尔布特蛇绿岩带可能是弧后盆地扩张后期的产物。Yang *et al.* (2012a) 则用洋脊俯冲解释达尔布特洋盆的关闭。对达尔布特蛇绿混杂岩多条实剖面的测制,发现具有橄榄岩-辉长岩-玄武岩-硅质岩-火山角砾岩-熔结凝灰岩组合,玄武岩具有 N-MORB 和 OIB 性质,辉长岩具有类似 MORB 的地化特点。该岩石组合基本反映出蛇绿岩套的层序。根据辉长岩和玄武岩的岩浆演化过程,辉长岩和玄武岩可能是来自同一源区但经历了不同的演化过程。辉长岩兼具类似 MORB 和 IAT 亲缘性的特点。因此达尔布特蛇绿混杂岩可能与俯冲消减环境有关。

克拉玛依蛇绿混杂岩分布在百口泉、白碱滩和克拉玛依西三处,岩石组合为辉长岩、枕状玄武岩、蛇纹岩、硅质泥岩、硅质岩、凝灰质粉砂岩和少量辉石岩、橄榄岩。橄榄岩与辉石岩则只见于白碱滩与百口泉。何国琦等(2007)综合考虑西准噶尔整体的构造格局,认为将唐巴勒、克拉玛依和洪古勒蛇绿混杂岩连成一体。克拉玛依蛇绿混杂岩带的保留,早奥陶世的放射虫,中晚奥陶世的牙形石,混杂岩带中玄武岩与辉长岩的年龄(395Ma 和 387Ma)和厚度很大的石炭纪浊积岩序列说明准噶尔洋可能最早从早奥陶世出现,到中泥盆世仍然存在,晚古生代演变为残余洋盆(徐新等, 2006; 何国琦等, 2007; Yang *et al.*, 2012c)。克拉玛依蛇绿混杂岩向准噶尔盆地内部延伸,可能意味着准噶尔盆地西缘在晚古生代时期还具有洋盆性质(徐新等, 2006)。Yang *et al.* (2012c) 认为克拉玛依蛇绿混杂岩带形成于俯冲增生环境,受到流体交代作用。笔者根据克拉玛依蛇绿混杂岩的地化数据源(内部资料),识别出 MORB 型辉长岩和具有 OIB 形特点的玄武岩和辉长岩,与 Yang *et al.* (2012c) 对基性岩石

类型的基本判断一致。克拉玛依蛇绿混杂岩属于 SSZ 型蛇绿岩,形成环境与俯冲环境密切相关。

1.4 源区性质

达尔布特蛇绿混杂岩带中的地幔岩富 Cr, 萨尔托海铬铁矿床位于该蛇绿混杂岩带内,且地幔岩中普遍存在铬尖晶石与辉石的共生连晶(陈博和朱永峰, 2011)。Yang *et al.* (2012a) 认为辉长岩与玄武岩来自于 5% ~ 30% 程度的含铬尖晶石二辉橄榄岩石亏损地幔的部分熔融作用;陈博和朱永峰(2011)认为二辉橄榄岩发生 10% ~ 15% 部分熔融形成方辉橄榄岩残留体。亏损的二辉橄榄岩经过较高级度的部分熔融作用形成方辉橄榄岩残留体与基性岩浆应该是达尔布特蛇绿岩的形成条件与过程。笔者同样对达尔布特蛇绿混杂岩带中辉长岩进行 REE 反演计算。经过计算有两种源区组合满足条件:(1) 尖晶石二辉橄榄岩或(2) 尖晶石二辉橄榄岩和斜长石二辉橄榄岩,两种情况下部分熔融程度都为 22%。情况(1)下,矿物组合为 Ol + Opx + Cpx + Sp, 比例为 57.8 : 27 : 11.9 : 3.3;情况(2), Sp : Pl = 80 : 20, 矿物组合为 Ol + Opx + Cpx + Pl + Sp, 比例为 58.96 : 26.86 : 9.76 : 1.78 : 2.64。情况(2)的标准差为 0.038215, 明显小于情况(1)下的标准差 0.039113, 但是这并不能作为唯一的判断条件,要想确定哪一种解释正确,必须结合实际地质情况。考虑到前人的研究成果,认为含铬尖晶石二辉橄榄岩作为源区;另外在情况(2)下,尖晶石与斜长石通过反演计算出的比例为 2.64 : 1.78, 和尖晶石二辉橄榄岩与斜长石二辉橄榄岩 4 : 1 的比例差别相对较大。因此笔者认为情况(1)最有可能。

克拉玛依蛇绿混杂岩带中的玄武岩具有 OIB 性质,来源于含有 2% ~ 5% 石榴子石和 5% 尖晶石的富集地幔,其成因可能与地幔柱或热点有关,而辉长岩来自与亏损地幔,且形成过程中受到板片流体交代(Yang *et al.*, 2012a)。笔者对克拉玛依蛇绿混杂岩带中的辉石岩进行 Sr-Nd 同位素测试,其初始⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值为 0.703395 ~ 0.704799, 根据硅质岩中的放射虫,限定其形成时代为晚泥盆世,取年龄 $t = 374.5\text{Ma}$, 计算得到 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 9.64 ~ 10.05, 辉石岩和辉长岩的源区应来自于 MORB 型亏损地幔,受到后期流体交代。

1.5 演化模型

由于对达尔布特蛇绿混杂岩带的研究程度最高,有大量的年代学和地球化学方面的数据支持,故本文着重对达尔布特蛇绿混杂岩的演化模型进行论述,主要有以下三种:洋脊俯冲模式、增生楔模式和残余洋盆模式。

洋脊俯冲模式:该模式主要依据是西准噶尔地区发育 A 型花岗岩体、中基性高镁闪长岩墙、埃达克质岩(Geng *et al.*, 2009; Tang *et al.*, 2010, 2012a, b; 尹继元等, 2012; Yin *et al.*, 2010; Ma *et al.*, 2012)。认为西准噶尔地区在晚石炭世-二叠纪存在大洋中脊俯冲消减,致使板片窗形成,软流圈

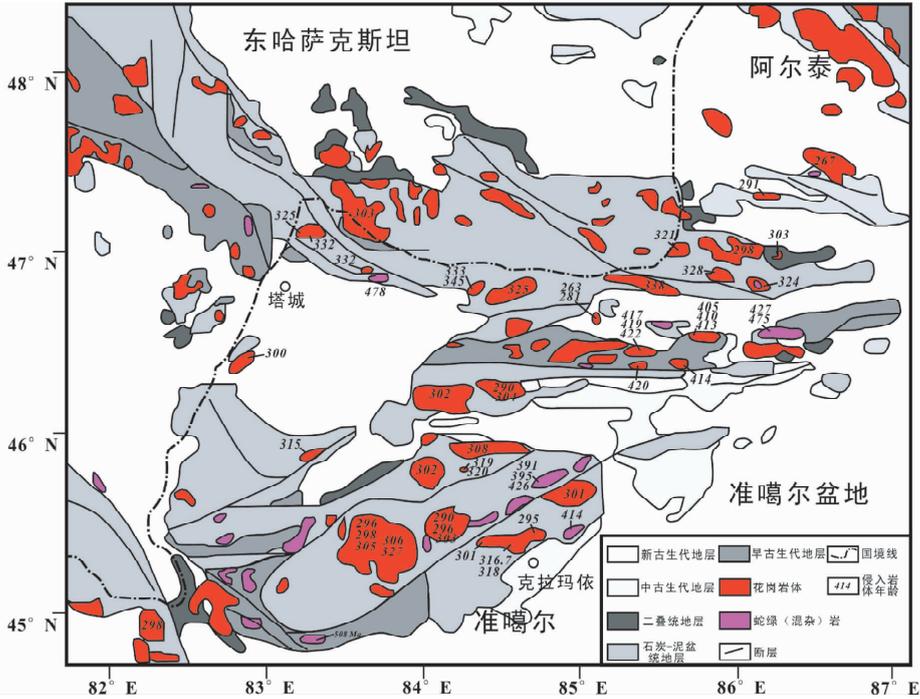


图3 西准噶尔地区晚古生代花岗岩分布及年龄示意图

Fig. 3 Distribution and age of the Late Paleozoic granitoids in the western Junggar

地幔上涌形成不同的岩浆组合。然而,该模式存在以下缺陷:(1) A型花岗岩成因与构造背景的多解性(Zhou *et al.*, 2008; Chen *et al.*, 2010)。(2) 达尔布特蛇绿混杂岩带两侧可对比的地质层。地层以下-上石炭统太勒古拉组地层为主,部分为包古图组地层,岩石主要为凝灰质粉砂岩,凝灰岩和沉凝灰岩等,产状不稳定,岩石类型多样,并不类似于俯冲带背景下的地层特点(陈石和郭召杰, 2010; Han *et al.*, 2010, 韩宝福等, 2010)。(3) 不存在更新的洋壳。如果是俯冲环境,必定会存在洋壳消减,那么蛇绿混杂岩带中必定出现更新的洋壳(Han *et al.*, 2010, 韩宝福等, 2010)。(4) E-MORB 和 OIB 岩石组合同样能在弧后盆地环境中出现(辜平阳等, 2009; 2011)。(5) 石棉矿达尔布特蛇绿混杂岩剖面可见火山角砾岩、熔结凝灰岩、玄武岩、安山岩、硅质岩、辉长岩、橄辉岩等岩石组合,表明弧后盆地同样可能。另外,关于俯冲极性也有争议,一部分认为向南俯冲(Ma *et al.*, 2012),一部分则向北(Geng *et al.*, 2009; Yin *et al.*, 2010; Yang *et al.*, 2012a, b),还有双向俯冲(Zhang *et al.*, 2011a)。增生楔模式:认为西准噶尔地区发育晚古生代洋内弧,伴有俯冲增生过程,且俯冲持续至二叠纪末期(Xiao *et al.*, 2008, 2009; 张继恩等, 2009)。对达尔布特蛇绿混杂岩带附近发育的地层中所夹火山岩进行锆石 U-Pb LA-ICP-MS 或 SHRIMP 定年,得到的年龄范围是 326.3 ~ 357.5Ma(安芳和朱永峰, 2009; 佟丽莉等, 2009; 郭丽爽等, 2010; 王瑞和朱永峰, 2007)。俯冲增生楔中卷入的最年轻地层为下石炭统地层。达尔布特蛇绿混杂岩带附近野鸭沟地区识别出褶皱

冲构造,顶端指向北西的褶皱组合揭示达尔布特古洋盆发生俯冲消减(张继恩等, 2009; Zhang *et al.*, 2011a)。残余洋盆模式:达尔布特蛇绿混杂岩带两侧均为下石炭统包古图组凝灰质粉砂岩,岩石组合单一,沉积稳定。陈石和郭召杰(2010)指出地层为残余洋盆充填序列,达尔布特古洋盆以被动滑塌充填而闭合。笔者更倾向此种模式,主要是与野外地质事实相符合,达尔布特蛇绿混杂岩带两侧以-上下石炭统太勒古拉组($C_{1,2t}$)地层为主,伴有下石炭统包古图组(C_{1b})地层,具有可比性。通过对达尔布特断裂和达尔布特蛇绿混杂岩带的重点解剖,发现达尔布特断裂是由一组倾向北西的上陡下缓的犁状断层组成,被后期构造变形叠加改造,具有左行陡倾走滑断层的特点。断裂两侧石炭纪地层具有可比性,而非重要的岩相古地理、生物组合、变质作用、岩浆活动的分界线,说明达尔布特断裂不是洋盆闭合后的板块缝合带,可以明确达尔布特断裂不能代表原始的以蛇绿混杂岩带为标志的缝合带的延伸方向。

2 西准噶尔花岗岩

西准噶尔的岩浆岩极为发育,数量很多,呈面状分布(图3),按形成时代分为早石炭世(340 ~ 320Ma)和晚石炭-早二叠世(310 ~ 290Ma)两期(童英等, 2010),且后一期较强,之后岩浆活动明显减弱。谢米斯台和萨吾尔地区晚志留世-早泥盆世(422 ~ 405Ma)花岗岩的发现将西准噶尔晚古生代年代格架由 2 期增加为 3 期(Chen *et al.*, 2010)。晚志留世-早

泥盆世花岗岩以含有霓石、钠角闪石等碱性矿物的 A 型花岗岩为特点,岩石类型则以花岗岩为主,伴有闪长岩和钾长花岗岩(陈家富等, 2010; Chen *et al.*, 2010);早石炭世花岗岩主要分布与扎尔玛、萨吾尔、塔尔巴哈台、森塔斯地区,岩石类型基本为 I 型,岩石类型包括二长闪长岩、花岗闪长岩、二长花岗岩和钾长花岗岩。晚石炭-早二叠世岩体在西准噶尔地区尤为发育,遍布西准噶尔,岩石类型多样,包括石英闪长岩,钾长花岗岩,紫苏花岗岩和碱长花岗岩等,以钾长花岗岩为主,大量的 A 型花岗岩在该时期集中发育(Chen and Jahn, 2004; 苏玉平等, 2006; Geng *et al.*, 2009; 童英等, 2010; Chen *et al.*, 2010; 陈家富等, 2010)。后两期的晚古生代花岗岩具有高的正 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值和年轻的一阶段 Nd 模式年龄 t_{DM} (Chen and Jahn, 2004; 韩宝福等, 2006; 袁峰等, 2006; Geng *et al.*, 2009; Chen *et al.*, 2010)。

目前对于西准噶尔晚古生代花岗岩存在以下争议:(1) I 型和 A 型花岗岩的岩石成因;(2) I 型和 A 型花岗岩形成的构造背景;(3) 热机制问题;(4) 年代学格架中,各岩浆期次对应何种大地构造背景。对西准噶尔 I 型花岗岩形成机制有两种认识,第一种是底侵导致基性下地壳或上地幔发生部分熔融(韩宝福等, 2006; 周涛发等, 2006; Zhou *et al.*, 2008; Chen *et al.*, 2010),第二种是洋脊俯冲过程中板片拆离引发幔源岩浆上升并与岩浆房内岩浆作用(Geng *et al.*, 2009; Yin *et al.*, 2010; Tang *et al.*, 2010, 2012a, b; 尹继元等, 2012)。在第一种认识中,虽都是底侵机制,但是具体的岩浆演化过程有差异。韩宝福等(2006)认为幔源岩浆底侵下地壳且熔体后期受到混染并分异而形成(AFC);袁峰等(2006)、苏玉平等(2006)和 Zhou *et al.* (2008)认为是上地幔或基性下地壳减压作用下发生部分熔融而形成的产物;Chen *et al.* (2010)认为是幔源岩浆底侵而引发脱水部分熔融。A 型花岗岩的成因主要有三种模式:地幔玄武质岩浆的高度结晶分异并混染地壳物质(Turner *et al.*, 1992; 韩宝福等, 2006; Zhou *et al.*, 2008);已亏损熔体的麻粒岩相岩石或英云闪长岩-花岗闪长岩的部分熔融(Collins *et al.*, 1982)和地幔交代作用(Whalen *et al.*, 1987)。西准噶尔晚古生代花岗岩形成的构造环境主要有以下观点:俯冲有关的岛弧环境(Feng *et al.*, 1989; 肖文交等, 2006)、洋脊俯冲环境(Geng *et al.*, 2009; Yin *et al.*, 2010; Tang *et al.*, 2010, 2012a, b; 尹继元等, 2012; Yang *et al.*, 2012a, b; Ma *et al.*, 2012)和后碰撞环境(Wang *et al.*, 2003; Chen and Arakawa, 2005; 韩宝福等, 2006; 苏玉平等, 2006; Zhou *et al.*, 2008; Chen *et al.*, 2010)。热机制机制则包括洋脊俯冲(Geng *et al.*, 2009; Yin *et al.*, 2010; Tang *et al.*, 2010, 2012a, b),热地幔底侵(Chen and Jahn, 2004; 韩宝福等, 2006; 苏玉平等, 2006; 袁峰等, 2006; Zhou *et al.*, 2008; Chen *et al.*, 2010)和地幔柱上涌(张立飞等, 2004)。前两种观点的提出由来已久,地幔柱上涌机制作为新提出的认识还未被广泛接受,天山和塔里木大火成岩省的提出(Yang *et al.*, 2007; Zhang

et al., 2010; Li *et al.*, 2012)、北疆大量石炭纪-二叠纪花岗岩(Wang *et al.*, 2006, 2009; Geng *et al.*, 2009)和大量中性岩墙群发育在东天山-北山、塔里木和西天山(Zhang *et al.*, 2010; Su *et al.*, 2011a, b; Yu *et al.*, 2011; Li *et al.*, 2012),都表明地幔柱机制有其可能性。西准噶尔晚古生代岩浆岩被划分为 3 期,是否后两期分别对应俯冲环境和后碰撞环境?笔者搜集了西准噶尔地区石炭纪-二叠纪花岗岩的年代学与地球化学数据,拟根据这些花岗岩的数据对以上问题进行简单的探讨,以构建西准噶尔晚古生代构造演化过程。

2.1 岩石类型

西准噶尔地区从超基性岩至酸性岩均有出露,主要是晚古生代岩浆活动的产物。其中,中酸性侵入岩既有深成相的巨大岩基和中小型岩株,也有超浅成相的岩枝或岩脉(尹继元等, 2011)。对所搜集的数据进行标准矿物 CIPW 计算,将其计算结果计算出 Q, A 和 P 三个端元的含量,投影至侵入岩 QAP 分类图(图 4),早石炭世花岗岩对应二长花岗岩、花岗闪长岩、石英二长闪长岩和石英二长岩;晚石炭世-早二叠世花岗岩对应于二长花岗岩、花岗闪长岩、石英二长闪长岩、石英二长岩、石英闪长岩和(二长)闪长岩。晚石炭世-早二叠世花岗岩较早石炭世花岗岩更富石英和碱性长石,而斜长石含量更低。

早石炭世花岗岩的 Na_2O/K_2O 比值为 0.92 ~ 8.03,平均为 1.87,晚石炭世-中二叠世花岗岩为 0.63 ~ 2.58,平均为 1.21,图 5a 为西准噶尔花岗岩 K_2O-Na_2O 图解,发现两个时代的花岗岩比较容易区分,早石炭世花岗岩基本富 Na,其分布范围基本对应于准噶尔 I 型花岗岩范围(金成伟和张秀棋, 1993; Han *et al.*, 1997; Chen and Jahn, 2004; Zhou *et al.*,

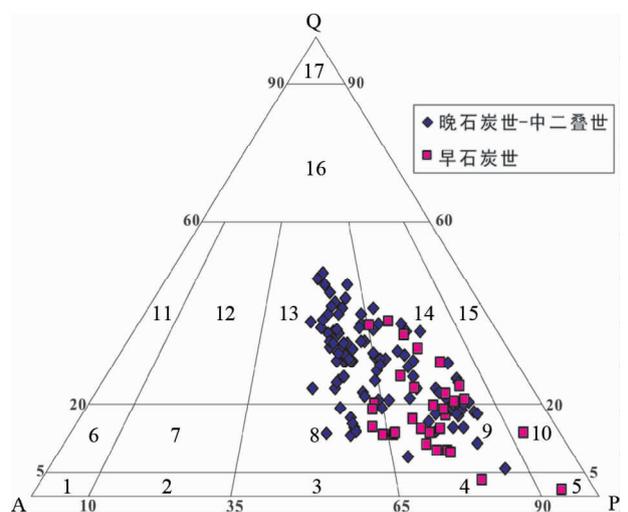


图 4 西准噶尔花岗岩 QAP 分类图

Fig. 4 QAP classification diagram for granitoids in western Junggar

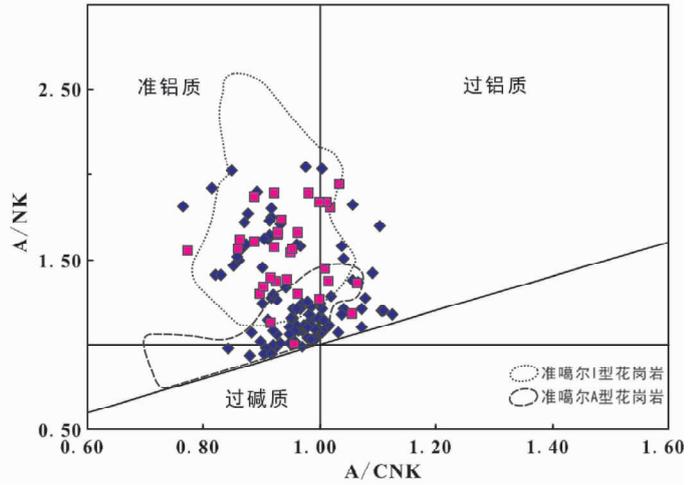
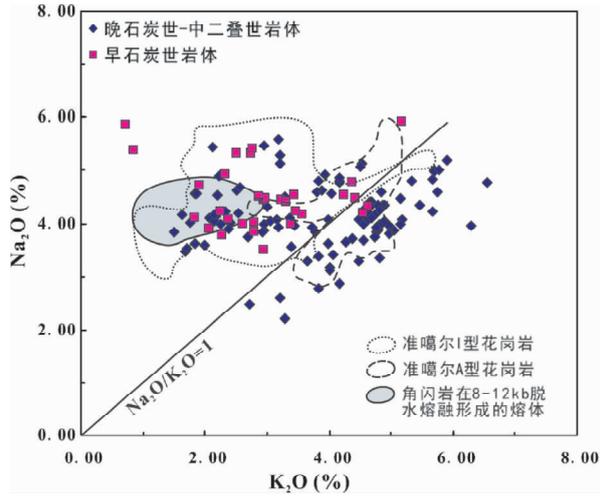


图5 西准噶尔花岗岩 K_2O-Na_2O 和 $A/CNK-A/NK$ 图解

数据来源:准噶尔I型与A型花岗岩范围据 Chen and Jahn, 2004; 角闪岩在8~12kb脱水熔融形成的熔体来自 Rapp and Watson, 1995

Fig.5 K_2O-Na_2O and $A/CNK-A/NK$ diagrams of the granitoids in western Junggar

Data source: the field of the I-type and A-type granitoids in western Junggar is from Chen and Jahn, 2004; the field of experimental liquids generated by dehydration melting of amphibolites at 8~12 kb is from Rapp and Watson, 1995

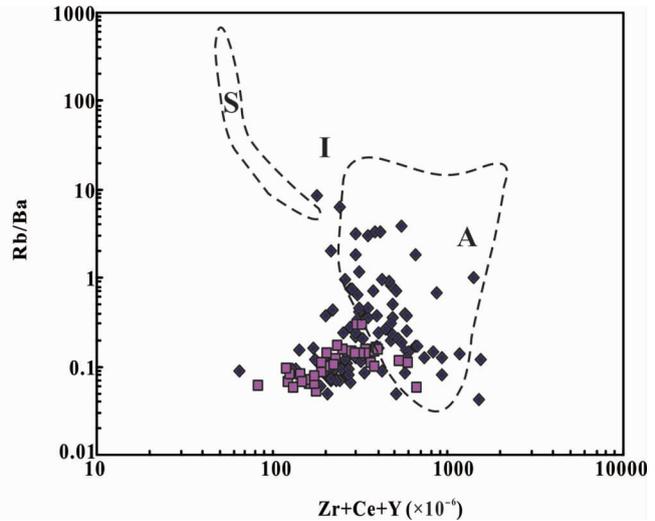
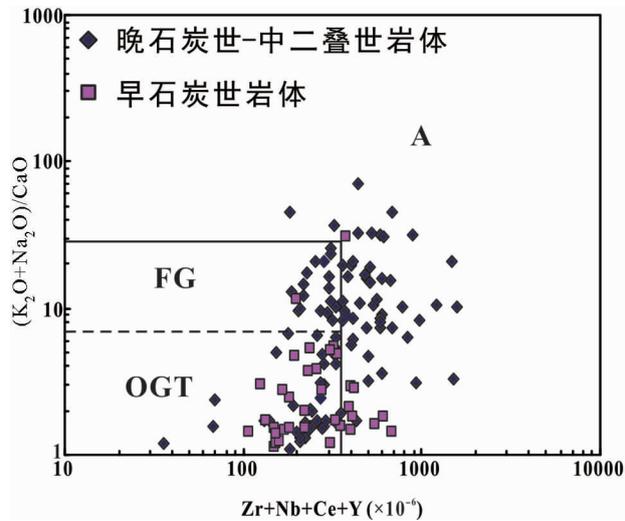


图6 西准噶尔花岗岩 $(K_2O + Na_2O)/CaO-Zr + Nb + Ce + Y$ 和 $Rb/Ba-Zr + Ce + Y$ 图解 (据 Whalen *et al.*, 1987)

Fig.6 $(K_2O + Na_2O)/CaO-Zr + Nb + Ce + Y$ and $Rb/Ba-Zr + Ce + Y$ diagrams of the granitoids in western Junggar (after Whalen *et al.*, 1987)

2008)。晚石炭世-中二叠世花岗岩则明显分为A型花岗岩和I型花岗岩两类。其中部分I型花岗岩落入角闪岩在8~12kb压力条件下脱水部分熔融而产生的熔体范围之内 (Rapp and Watson, 1995)。图5b中,早石炭世花岗岩的 $A/CNK = 0.77 \sim 1.07$, 平均为 0.95, $A/NK = 1.00 \sim 1.94$, 平均值为 1.55, 绝大部分为准铝质花岗岩, 少量为弱过铝质花岗岩; 晚石炭世-中二叠世花岗岩 $A/CNK = 0.81 \sim 1.13$, 平均为 0.97, $A/NK = 0.94 \sim 2.27$, 平均值为 1.31, 大部分为准铝质花岗岩, 少量为过碱质和(弱)过铝质花岗岩。两类岩石分别与前人勾画的I型和A型花岗岩区域相吻合。笔者为了进

一步检验,通过 $(K_2O + Na_2O)/CaO-Zr + Nb + Ce + Y$ 和 $Rb/Ba-Zr + Ce + Y$ 图解 (图6) (Whalen *et al.*, 1987; Eby, 1992), 判断西准噶尔石炭纪-二叠纪花岗岩的具体岩石类型。早石炭世花岗岩基本落入 OGT 区域, 即非分离结晶过程形成的 I 型花岗岩, 而晚石炭世-中二叠世花岗岩包含 A 型, FG 型和 OGT 型三种, 说明该阶段岩石成因比较复杂。

2.2 岩浆演化

关于西准噶尔的 I 型和 A 型花岗岩的岩石成因和岩浆

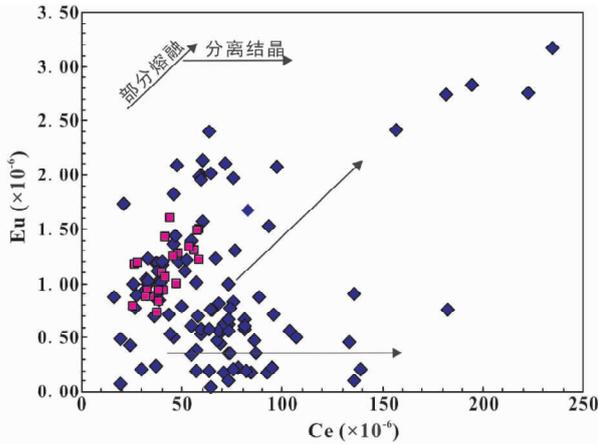
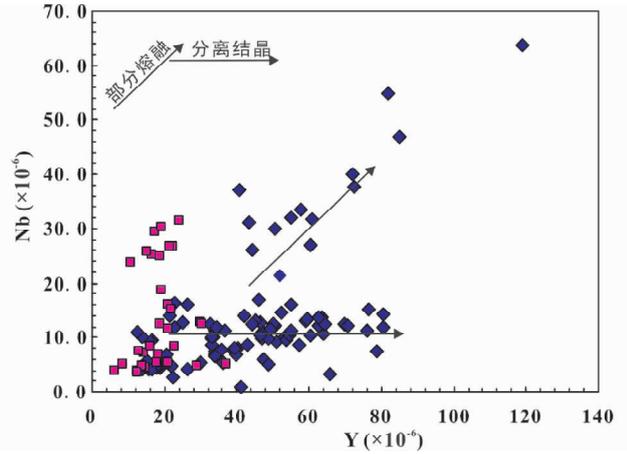


图7 西准噶尔花岗岩 Eu-Ce 和 Nb-Y 图解(据 Treuil and Joron, 1975)

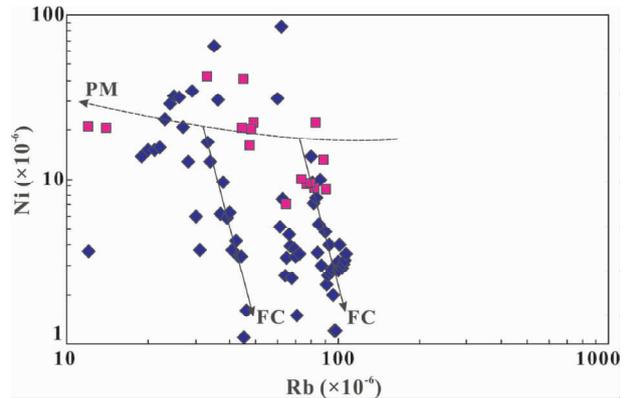
Fig.7 Eu-Ce and Nb-Y diagrams of the granitoids in western Junggar (after Treuil and Joron, 1975)



演化过程具有非常多的认识和争议,已在前面论述。对某一个特定的花岗岩体肯定有其对应的岩浆演化过程,但是西准噶尔在石炭纪-二叠纪分布如此巨量的花岗岩,这么多的花岗岩体在岩浆演化和成因方面是否有相联系的地方。运用 M-H 图解来判断部分熔融和分离结晶中元素浓度的变异 (Treuil and Joron, 1975), H 为过亲岩浆元素 (如 La、Ce、Ta 等), M 为亲岩浆元素 (如 Zr、Cr、Ni、Eu 等)。在 Eu-Ce 和 Nb-Y 图解中 (图 7), 早石炭世花岗岩表现出部分熔融为主的岩浆岩化趋势, 而晚石炭世-中二叠世花岗岩则为部分熔融和分离结晶两种岩浆演化方式。不相容元素 Rb 与相容元素 Ni 作图能够反映分离结晶和部分熔融的趋势 (Nielsen, 2006), 在 Ni-Rb 图解 (图 8) 中, 早石炭世花岗岩表现出部分熔融为主的演化趋势, 而晚石炭世-中二叠世花岗岩以分离结晶为主, 但也存在部分熔融作用。但实际上, 以上微量元素图解对判断花岗岩的成因过程仅具有参考意义, 实际过程仍极为复杂, 在西准噶尔地区分布的很多晚石炭世-早二叠世的 I 型花岗岩体都具有暗色包体, 例如克拉玛依岩体、包古图岩体、别鲁阿嘎希岩体等等, 这说明同化混染在成岩过程中与分离结晶同样起到重要的作用。

2.3 构造背景与年代格架

前人通过锆石年代学的研究 (表 1), 积累了一定数量的年代学数据, 除少量数据由于早期分析方法, 尤其是 Rb-Sr、Sm-Nd 和 K-Ar 等时线方法的限制而不准确, 与真正的岩体侵位结晶年龄相差很大外, 运用 SHRIMP、LA-ICP-MS 和 TIMS 方法得到的年龄结果还是比较可信的, 表 1 是对西准噶尔已报道的花岗岩年龄信息的总结, 所采用的测试方法限于以上三种方法。西准噶尔曾经出现过 3 期岩浆活动, 分别是晚志留世-早泥盆世, 早石炭世和晚石炭世-早二叠世 (童英等, 2010; Chen *et al.*, 2010)。参考前人资料与内部年龄测试结果, 对西准噶尔地区发育的中酸性岩体进行直方图统计 (N1 = 71, 其中前人资料 52 个, 本文数据 19 个, 笔者项目

图8 西准噶尔花岗岩岩浆演化判别图 (据 Li *et al.*, 2009)

PM-部分熔融; FC-分离结晶

Fig. 8 Magma evolutionary classification diagram of the granitoids in western Junggar (after Li *et al.*, 2009)

PM-partial melting; FC-fractionated crystallization

组, 未发表数据), 得到西准噶尔花岗岩年龄统计直方图 (图 9), 清楚地表明这些岩体分为四个阶段, 早志留世-早泥盆世 (436 ~ 405Ma)、早石炭世 (345 ~ 321Ma)、晚石炭世-早二叠世 (318 ~ 276Ma) 和中二叠世 (276 ~ 263Ma)。笔者认为早石炭世与俯冲消减相关, 而晚石炭世-早二叠世转为后碰撞环境, 晚古生代构造背景讨论见后述讨论。

2.4 源岩与地壳增生

鉴于前人对该地区晚古生代岩浆岩详细地研究大量的 Sr-Nd 同位素数据, 西准噶尔石炭纪-二叠纪 A 型和 I 型花岗岩体以变化范围广的低初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值和高 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为特征, 源区为亏损地幔 (图 10a)。西准噶尔地区发育的其他一些岩石, 包括埃达克质岩和高 Mg 闪长岩均具有低初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值和高的正 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值和相对年轻的 Nd 亏损模式

表1 西准噶尔花岗岩体年龄及相关信息

Table 1 The geochronological information of the granitoids in the western Junggar

名称	岩性	年龄 (Ma)	1 σ	方法	数据来源
托落盖	花岗岩	263	6	LA-ICP-MS	Chen <i>et al.</i> , 2010
托落盖	花岗岩	281	4	LA-ICP-MS	Chen <i>et al.</i> , 2010
塔尔根	钾长花岗岩	287	6	SHRIMP	韩宝福等, 2006
克拉玛依	钾长花岗岩	276	5	SHRIMP	韩宝福等, 2006
赛力克	钾长花岗岩	290	4	LA-ICP-MS	Chen <i>et al.</i> , 2010
恰其海	碱长花岗岩	290.7	9.3	SHRIMP	周涛发等, 2006
拉巴	花岗闪长岩	295.1	2.3	单颗粒锆石	魏荣珠, 2010
卡桑布拉克	花岗岩	292.4	4.9	LA-ICP-MS	刘志强等, 2005
庙尔沟	紫苏花岗岩	296	3	LA-ICP-MS	Geng <i>et al.</i> , 2009
阿克巴斯陶	碱长花岗岩	296	7	LA-ICP-MS	Geng <i>et al.</i> , 2009
小西湖	碱长花岗岩	296	4	TIMS	苏玉平等, 2006
阔依塔斯	碱长花岗岩	297.9	4.6	SHRIMP	周涛发等, 2006
庙尔沟	碱长花岗岩	298	4	LA-ICP-MS	Geng <i>et al.</i> , 2009
孔吾萨依	花岗岩	298.4	5.7	LA-ICP-MS	刘志强等, 2005
夏尔普	二长花岗岩	299	6	LA-ICP-MS	康磊等, 2009
托斯特	花岗岩	299	4	SHRIMP	韩宝福等, 2006
多拉那勒	闪长岩	300	4	SHRIMP	韩宝福等, 2006
红山	碱长花岗岩	301	4	TIMS	苏玉平等, 2006
哈图	钾长花岗岩	302	4	SHRIMP	韩宝福等, 2006
库鲁木苏	钾长花岗岩	302	2	LA-ICP-MS	Chen <i>et al.</i> , 2010
喀尔交	钾长花岗岩	302.6	7.6	SHRIMP	Zhou <i>et al.</i> , 2008
塔城	钾长花岗岩	303	4	SHRIMP	韩宝福等, 2006
阿克巴斯陶	碱长花岗岩	303	3	TIMS	苏玉平等, 2006
赛力克	钾长花岗岩	304	2	LA-ICP-MS	Chen <i>et al.</i> , 2010
庙尔沟	紫苏花岗岩	305	3	LA-ICP-MS	Geng <i>et al.</i> , 2009
庙尔沟	紫苏花岗岩	305	3	LA-ICP-MS	Geng <i>et al.</i> , 2009
阿克巴斯陶	碱长花岗岩	305	4	LA-ICP-MS	Geng <i>et al.</i> , 2009
庙尔沟	碱长花岗岩	305	2	TIMS	苏玉平等, 2006
庙尔沟	花岗岩	306	8.8	LA-ICP-MS	高山林等, 2006
庙尔沟	碱长花岗岩	308	6	LA-ICP-MS	Geng <i>et al.</i> , 2009
克拉玛依北	闪长岩	308	7	SHRIMP	韩宝福等, 2006
铁厂沟	钾长花岗岩	308	4	SHRIMP	韩宝福等, 2006
扎斯喀拉尕依	石英闪长岩	315	5	SHRIMP	范裕等, 2007
克拉玛依	花岗岩	316.7	3.6	LA-ICP-MS	高山林等, 2006
阿克巴斯陶	花岗岩	318	29	LA-ICP-MS	高山林等, 2006
小西湖	花岗岩	318	5	SHRIMP	韩宝福等, 2006
拉斯特	钾长花岗岩	321	5	LA-ICP-MS	Chen <i>et al.</i> , 2010
沃肯萨拉	二长花岗岩	323.8	6.2	SHRIMP	袁峰等, 2006
沃肯萨拉	二长花岗岩	323.8	6.2	SHRIMP	Zhou <i>et al.</i> , 2008
巴依木札	花岗闪长岩	325	4	SHRIMP	韩宝福等, 2006
朱青山	钾长花岗岩	325	3	LA-ICP-MS	Chen <i>et al.</i> , 2010
活吉尔	二长闪长岩	325	4	SHRIMP	陈家富等, 2010
庙尔沟	花岗岩	327	7	SHRIMP	韩宝福等, 2006
森塔斯	二长花岗岩	328.2	5.7	SHRIMP	袁峰等, 2006
森塔斯	二长花岗岩	328.2	5.7	SHRIMP	Zhou <i>et al.</i> , 2008
布尔干	花岗闪长岩	332	3	LA-ICP-MS	Chen <i>et al.</i> , 2010
阿布杜拉	花岗闪长岩	332	3	LA-ICP-MS	Chen <i>et al.</i> , 2010
达因苏	辉石闪长岩	333	2	LA-ICP-MS	Chen <i>et al.</i> , 2010
塔斯特	二长花岗岩	337	4	LA-ICP-MS	陈晔等, 2006
木斯岛山南	钾长花岗岩	338	4	SHRIMP	韩宝福等, 2006
萨乌尔	二长花岗岩	338	4	SHRIMP	Chen <i>et al.</i> , 2010
达因苏	二长花岗岩	345	3	LA-ICP-MS	Chen <i>et al.</i> , 2010

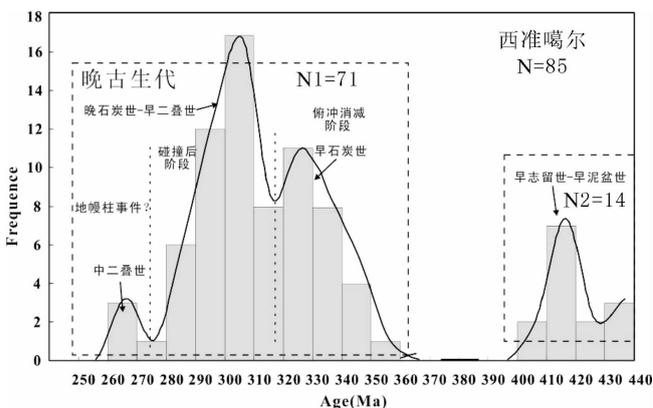


图9 西准噶尔花岗岩年龄统计直方图
Fig.9 Age histogram of the granitoids in the western Junggar

地幔模式年龄。这些特点表明西准噶尔基底由相对年轻的残余洋壳物质组成,少量 t_{DM} 年龄较老的样品则表明基底属性确实不均一,混有少量前寒武基底。西准噶尔花岗岩的 $f_{Sm/Nd}$ 介于 -0.2 至 -0.6 之间(图 10b),因此这些花岗岩的一阶段模式年龄非常意义,既不会由于高度分离结晶使得 t_{DM} 太年轻而不准或 t_{DM} 没有意义。具有正高 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值的花岗

岩可以认为:1)花岗岩的源岩是地幔起源的年轻古生代岩石,例如岛弧,蛇绿(混杂)岩,增生楔和基性杂岩体等,同时伴有少量前寒武基底。这是发育在中亚造山带的花岗岩普遍的源区(Hu *et al.*, 2000; Jahn *et al.*, 2000; Chen and Jahn, 2004; Han *et al.*, 2011)。2)源岩来自早期增生体的再循环,以变化的 Nd 模式年龄为特点,源区呈现不均一性(Zheng *et al.*, 2007)。对于西准噶尔花岗岩而言,以下证据更支持第一种观点:(1)大量古生代花岗岩出露,伴有岛弧,蛇绿(混杂)岩,增生杂岩和基性岩墙等;(2)研究区缺乏前寒武发生俯冲增生的证据;(3)前寒武岩石或老的片岩、片麻岩等未见。

西准噶尔花岗岩 Nd 同位素表明,其 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值远远高于元古宙和太古代地壳,较高于准噶尔古生代区域变质岩(Hu *et al.*, 2000),说明花岗岩的源岩不可能直接来源于古生代地壳。同时, $\epsilon_{Nd}(t)$ 值与研究区内的古生代洋壳物质相近,说明年轻的洋壳(包括增生楔等)是西准噶尔花岗岩的源岩,这一认识支持西准噶尔地区基底可能为洋壳等年轻物质。

西准噶尔大规模的正 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值花岗岩表明生宙大规模的地壳生长(Jahn *et al.*, 2000; Chen and Jahn, 2004; 韩宝福等, 2006),为了更进一步认识地壳增生,可以对其生长方

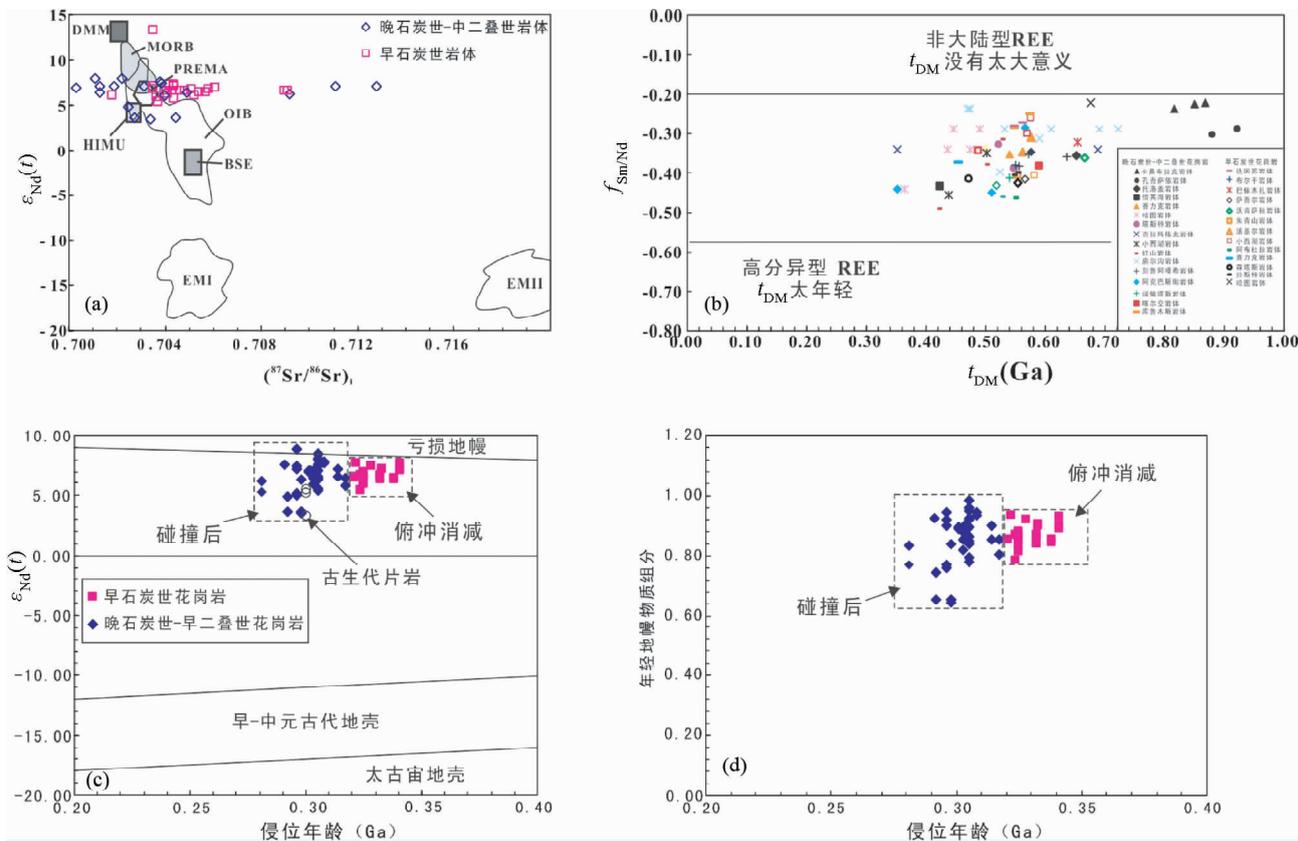


图 10 西准噶尔晚古生代花岗岩 $\epsilon_{Nd}(t)$ - $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ (a), $f_{Sm/Nd}$ - t_{DM} (b), $\epsilon_{Nd}(t)$ -侵位年龄 (c) 和幔源组分-侵位年龄 (d) 图解
Fig.10 The $\epsilon_{Nd}(t)$ - $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ (a), $f_{Sm/Nd}$ - t_{DM} (b), $\epsilon_{Nd}(t)$ -intrusive age (c) and mantle component-intrusive age (d) diagrams of the Late Paleozoic granitoids in the western Junggar

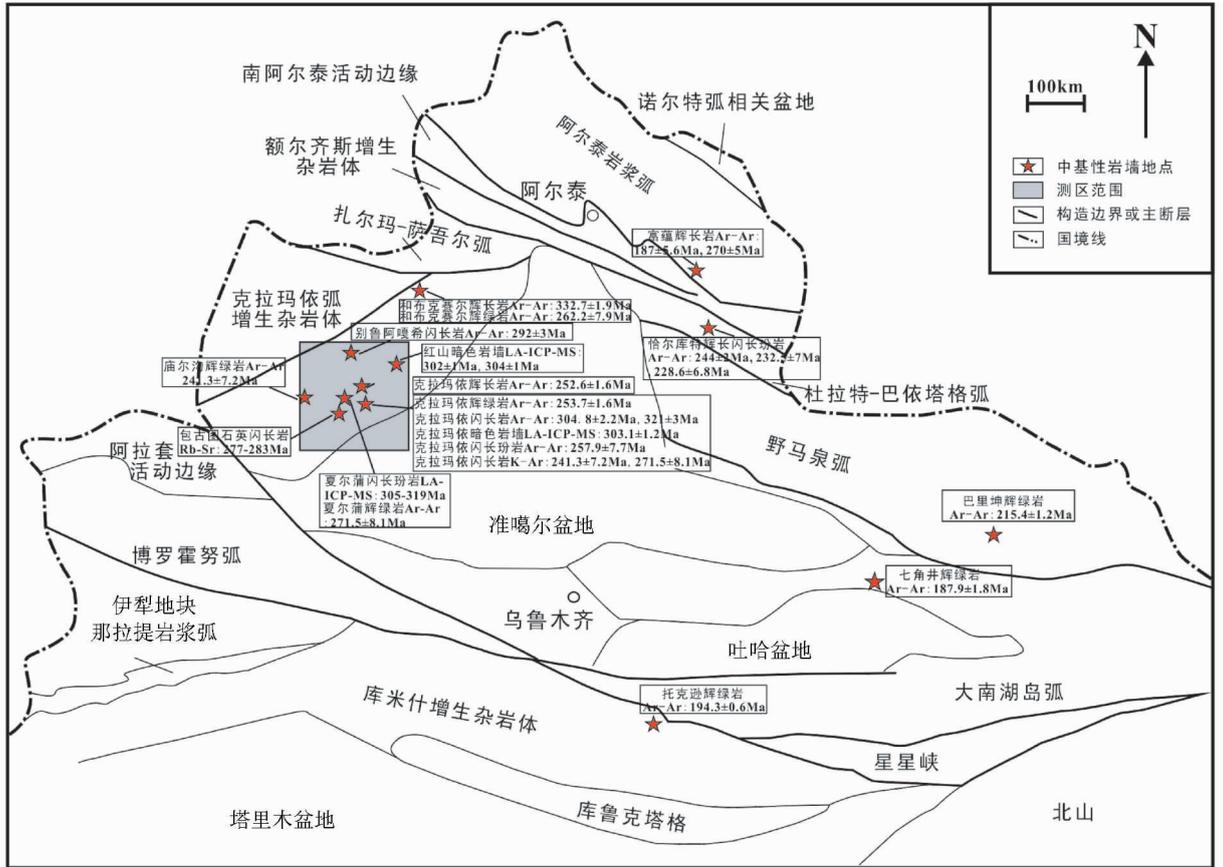


图 11 西准噶尔中基性岩脉分布和年龄简图 (据 Xiao *et al.*, 2008 修改; 数据来源李辛子等, 2004; 周晶等, 2008; 徐芹芹等, 2008; 尹继元等, 2009; Yin *et al.*, 2010)

Fig. 11 Distribution and age diagram for mafic-intermediate dyke swarms in the western Janggag (modified after Xiao *et al.*, 2008. Data from Li *et al.*, 2004; Zhou *et al.*, 2008; Xu *et al.*, 2008; Yin *et al.*, 2009, 2010)

式、生长量进行讨论。假设西准噶尔花岗岩由两种端元组分以不同比例混合形成。这两种端元分别是来自地幔的玄武质岩石和地壳岩石。所有花岗岩体的混合比例能通过以下的公式计算出来: $X_m = (\epsilon^c - \epsilon^s) * Nd_c / (\epsilon^s * (Nd_m - Nd_c) - (\epsilon^m Nd_m - \epsilon^c Nd_c))$ (Jahn *et al.*, 2004), 其中 X_m (%) 代表来自地幔年轻组分百分比, $\epsilon^c, \epsilon^s, \epsilon^m$ 分别代表地壳、样品和地幔的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值; Nd_c, Nd_m 分别代表地壳和地幔的丰度。本文中 $\epsilon^c = -4, Nd_c = 25 \times 10^{-6}$ (Jahn *et al.*, 2004), $\epsilon^m = -8.8, Nd_c = 19.5 \times 10^{-6}$ (Zheng *et al.*, 2007)。通过二元混合计算, 可以估算出早石炭世花岗岩和晚石炭世-早二叠世花岗岩的年轻组分为 64% ~ 98% 和 78% ~ 94% (图 10c, d)。

岛弧型花岗岩往往揭示陆壳水平增生。西准噶尔岛弧型花岗岩具有较高的正 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值, 计算得到有 64% ~ 98% 的年轻地幔物质参与花岗岩浆的形成 (图 10c), 导致地壳水平生长。板块边缘通过汇聚作用形成岛弧和大量岩浆作用。以中国同造山花岗岩总面积为 13400 km² 计算 (Wang *et al.*, 2009), 年轻组分按 64% ~ 98%, 最少将有 8576 km² 面积的物质加入到地壳, 占造山带面积的 23%。想要计算碰撞后阶段产生的垂向地壳生长量, 需要判断年轻物质的来源, 因为有

三种方式均可以提供: 底慢源物质, 洋壳、增生楔等再循环物质和基性下地壳重熔物质 (Xia *et al.*, 2003, 2004)。西准噶尔地层和花岗岩体常见定向排列的基性岩墙发育, 其中一些岩墙具有高镁闪长岩的特点, 年龄为 321 ~ 292 Ma (Yin *et al.*, 2010)。而早石炭世俯冲阶段, 并未发现有该时代的岩脉发育。幔源岩浆底侵作用为碰撞后岩浆活动提供了大量的物源和热源。这些都表明有大量的年轻幔源物质贡献给地壳, 导致地壳垂向增生。

3 西准噶尔中基性岩墙

岩墙是一种特殊的岩浆岩, 既包含岩浆演化信息, 也包含地壳应变动力学的信息, 对恢复和探讨地球动力学背景有至关重要的作用。塔里木盆地内部及周缘地区、北山地区和北疆地区 (西天山, 东天山和准噶尔地区) 发育大量的中基性岩墙群和少量的酸性岩墙群 (Yin *et al.*, 2010; Zhang *et al.*, 2010; Su *et al.*, 2011a, b; Yu *et al.*, 2011)。西准噶尔作为中亚造山带重要的一环, 发育大量的中基性岩墙群 (图 11), 对解决其地幔源区性质, 热机制及演化过程有很强的指示意

义。目前对于西准噶尔中基性岩墙群的争议有以下几点:(1)岩墙群年代学;(2)岩墙群的岩石类型和成因;(3)晚古生代应力场情况;(4)岩墙群构造背景等。

3.1 岩石类型

西准噶尔中基性岩墙群包括主要以中性闪长(玢)岩和辉长岩和辉绿岩为主,并且以前者占主要部分,在阿克巴斯陶、克拉玛依、和布克赛尔、哈图、铁厂沟和扎伊尔山等地都有大量出露。少量花岗岩晶岩脉侵入于西准噶尔北部的活基尔等地。闪长岩墙群按 $Mg^{\#}$ 值和 Sr/Y 比值分类可以分为高镁埃达克质闪长岩系列($Mg^{\#} > 45$; 高 Sr/Y 比值,低 Yb, Y 值),高镁闪长岩($Mg^{\#} > 45$, 低 Sr/Y 比值)和低镁(普通)闪长岩(李辛子等, 2004; 尹继元等, 2009; Yin *et al.*, 2010; Ma *et al.*, 2012)。项目组根据野外地质特点和室内地球化学数据认为:夏尔蒲岩墙群(闪长玢岩,少量辉绿岩)包括高 $Mg^{\#}$ 埃达克质闪长玢岩和个别辉绿岩;小西湖岩墙群(闪长玢岩,少量辉长岩和辉绿岩)包括高 $Mg^{\#}$ 埃达克质闪长岩和少量镁闪长岩、辉长岩和辉绿岩;别鲁阿嘎希岩墙群(角闪辉绿岩、角闪闪长岩和闪长岩)包含高镁闪长岩和镁闪长岩。

3.2 年代学

西准噶尔出露的中基性岩墙群由于锆石因素的限制,测试结果往往不尽人意,现有的年代学数据基本来自于 K-Ar 和 $^{40}Ar-^{39}Ar$ 法测年。李辛子等(2004)通过 K-Ar 法测得克拉玛依基性岩墙形成年代为 241.3Ma 和 271.5Ma,徐芹芹等(2008)对阿克巴斯陶、克拉玛依、红山岩体内和附近地层中出露基性岩墙进行 K-Ar 法,得到 187~271Ma,其中克拉玛依岩墙 257.9 ± 7.7 Ma。周晶等(2008)对同一范围内的辉长岩和辉绿岩墙测得 $^{40}Ar-^{39}Ar$ 年龄为 174~322Ma,其中克拉玛依辉长和辉绿岩墙年龄分别为 252.6 ± 1.6 Ma 和 253.7 ± 1.6 Ma。Yin *et al.* (2010)对克拉玛依岩体及东边下石炭统地层内的高镁闪长岩墙 $^{40}Ar-^{39}Ar$ 定年,并得到 321 ± 3 Ma 的结果。别鲁阿嘎希和克拉玛依岩体中的闪长岩墙的全岩 $^{40}Ar-^{39}Ar$ 年龄分别为 292 ± 3 Ma 和 304.8 ± 2.2 Ma (尹继元等, 2012)。冯乾文等(2012)对克拉玛依和红山闪长(玢)岩墙进行 LA-ICP-MS 定年,分别为 303.1 ± 1.2 Ma ~ 319 ± 1.0 Ma 和 302 ± 1 Ma ~ 304 ± 1 Ma。从年龄结果来看, K-Ar、 $^{40}Ar-^{39}Ar$ 和 LA-ICP-MS 三种方法获得的年代结果差异明显,以克拉玛依岩墙为例,测得的结果分别为 241.3~257.9Ma, $252.6 \sim 321$ Ma 和 $303.1 \sim 319$ Ma,这三种方法结果相差非常大。那么哪种方法测得的年龄更准,年龄数据更可信? 由于 $^{40}Ar-^{39}Ar$ 体系的封闭温度较锆石要低,那么 $^{40}Ar-^{39}Ar$ 年龄受到热扰动或变质作用的影响会非常不准;同样,锆石成因类型的确定与是否继承了围岩的锆石都会导致错误结论的出现。因此还需要更进一步的研究。但是,笔者认为近两年有关西准噶尔岩墙群年代的数据,无论是 $^{40}Ar-^{39}Ar$ 法还是 LA-ICP-MS 法得到的结果还是比较可信的。

3.3 地化特点

克拉玛依高镁埃达克质闪长岩富 Si、Mg 和 Na 元素,高 $Mg^{\#}$ 值 (> 60),富集 Cr、Ni、Sr、Ba 元素,贫 K、Yb、Y 等元素,轻重稀土分异明显,富集大离子亲石元素,亏损高场强元素,具有高 Sr/Y 比值,类似于赞岐岩(尹继元等, 2009; Yin *et al.*, 2010)。项目组对夏尔蒲岩墙、别鲁阿嘎希岩墙和小西湖岩墙进行地球化学测试(笔者项目组待发表数据),发现夏尔蒲岩墙群和小西湖岩墙群具有较高 SiO_2 含量(接近或 $\geq 56\%$), $Al_2O_3 \geq 15\%$,普遍具有较高的 $Mg^{\#}$, MgO 含量多大于 3%; $Yb < 1.9 \times 10^{-6}$, $Y < 18 \times 10^{-6}$ (样品均小于 10×10^{-6}),具有较高 Sr ($> 500 \times 10^{-6}$) 和 Ba 含量, Sr/Y 比值在 44~95 之间(图 12),无明显 Eu 和 Sr 的负异常,明显亏损 Nb、Ta、Ti 和 Th 等高场强元素,与典型的埃达克质岩石地化特点类似(Defant and Drummond, 1990)。别鲁阿嘎希岩墙具有较高的 MgO (普遍 $> 6\%$)、高 $Mg^{\#}$ (59~72)、较低 FeO^T/MgO 比值(基本 < 1),相容元素 Cr、Ni 和 Co 含量很高,亏损高场强元素 Nb、Ta、Ti 和 Zr,富集大离子亲石元素 K、Rb、Ba 和 Sr 的特征,这些特点类似高镁安山岩(闪长岩)或赞岐岩的地球化学特点(Tatsumi and Ishizaka, 1982)。别鲁阿嘎希安山岩具有较低的 MgO 含量(多 $< 3\%$)、 $Mg^{\#}$ 值(47~62)和较低的相容元素 Cr、Ni 和 V 含量,这表明地幔组分在其源区的比重减少。与夏尔蒲和小西湖岩墙群中高镁埃达克质岩墙相比,具有低的 MgO 、Sr、Ba 含量以及 Sr/Y 比值,在 Sr/Y -Y 图解(图 12)中主要落入埃达克质岩石与岛弧岩石的交界区域。

3.4 岩石成因

关于西准中基性岩墙群的成因主要有以下认识:岩浆混

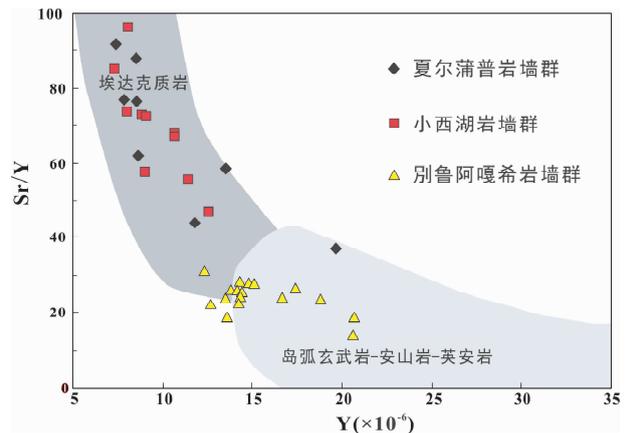


图 12 西准噶尔中基性岩墙群 Sr/Y -Y 图解(据 Defant and Drummond, 1990)

数据来源于项目内部资料

Fig. 12 The Sr/Y -Y diagram of the dyke swarms in the western Junggar (after Defant and Drummond, 1990)

Data from internal data in the program

合(康磊等, 2009; 张洪伟等, 2011)、残余洋壳或大洋岩石圈低程度部分熔融(李辛子等, 2004; 徐芹芹等, 2008; 周晶等, 2008)和橄榄岩地幔受俯冲流体交代部分熔融(尹继元等, 2009; Yin *et al.*, 2010; Ma *et al.*, 2012)。在野外可观察到夏尔蒲岩体、别鲁阿嘎希岩体局部地区密集发育暗色中性包体,表明存在局部的岩浆混合作用,这只能解释这些暗色包体的成因,但无法释大规模岩墙群的成因(Yin *et al.*, 2010; 冯乾文等, 2012)。岩浆混合对解释高镁埃达克质岩石和赞岐岩具有高 $Mg^{\#}$ 值、Sr/Y 比值和 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值的特点存在不足。夏尔蒲辉绿岩墙与高镁埃达克质闪长玢岩的初始 Sr 同位素比值均为 0.70379, $\epsilon_{Nd}(t)$ 值则分别为 +5.8 和 +5.9, 略低于徐芹芹等(2008)获得的西准噶尔岩墙群的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值(5.91 ~ 8.10), 考虑到其所采用 $^{40}Ar-^{39}Ar$ 法所测得的年龄普遍较年轻, 有此差异比较正常, 两者具有一定的可比性。另外岩墙群的高 $Mg^{\#}$ 值(普遍 > 40), 表明源区有地幔组分的参与或者直接来源于地幔, 玄武质下地壳部分熔融形成的熔体 $Mg^{\#}$ 值小于 40(Rapp and Watson, 1995)。通过对西准噶尔晚古生代花岗岩的 Sr-Nd 同位素的统计和研究, 发现花岗岩的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值基本大于 5, 最大能至 8, 这表明幔源的贡献非常大。计算出西准噶尔花岗岩的一阶段 Nd 模式年龄 t_{DM} 非常年轻, 介于 0.35 ~ 0.94Ga, 除去 4 个 t_{DM} 非常高的样品, 其余均介于 0.35 ~ 0.70Ga。西准噶尔地区基底可能为洋壳等年轻物质, 使得形成的岩浆具有俯冲板片的印记(Hu *et al.*, 2000; Zheng *et al.*, 2007)。因此, 西准噶尔地区的高镁埃达克质闪长岩有可能是残余洋壳板片受到软流圈地幔物质的交代而形成, 造成其具有高 $Mg^{\#}$, 轻重稀土分异明显, 富集大离子亲石元素, 亏损高场强元素, 具有高 Sr/Y 比值的类似埃达克质岩特点。高镁闪长岩同样能形成于后碰撞拉张伸展背景, 岩石圈地幔受到早期俯冲流体或熔体交代发生部分熔融(Smithies and Champion, 2000)。包古图埃达克质(石英)闪长斑岩的年代为 $310 \pm 3Ma \sim 314 \pm 4Ma$ (Tang *et al.*, 2010), 克拉玛依及周边中基性岩墙群年龄范围为 $292 \pm 3Ma \sim 321 \pm 3Ma$ (年龄来源选择近两年的文献: Yin *et al.*, 2010; 尹继元等, 2012; 冯乾文等, 2012), 说明两者形成时代相近, 两者应是同一构造背景下的产物。洋脊俯冲-板片窗模式从地球化学证据方面能很好的解释西准噶尔 I 型和 A 型花岗岩、高镁埃达克质闪长岩、高镁闪长岩和镁闪长岩的岩石成因和构造背景, 但是存在缺陷: (1) 达尔布特蛇绿混杂岩带附近野鸭沟地区识别出褶皱冲断构造, 顶端指向北西的褶皱组合揭示达尔布特古洋盆发生向南的俯冲消减(Zhang *et al.*, 2011a; Ma *et al.*, 2012); (2) 不仅局限在克拉玛依, 西准噶尔大范围的 I 型和 A 型花岗岩体和基性岩强群的出现(韩宝福等, 2006; Chen *et al.*, 2010; 陈家富等, 2010; 童英等, 2010; 徐芹芹等, 2008; 周晶等, 2008); (3) 达尔布特蛇绿混杂岩两侧同一套、具可对比性的下石炭统地层(辜平阳等, 2009, 2011); (4) 西准噶尔克拉玛依附近缺失上石炭统地层(新疆地质矿产局, 1993)。

3.5 古应力场

岩墙群对重建古地理构造格架有着重要的作用, 来自幔源区的岩墙群不仅能提供岩石圈的拉张背景信息, 根据岩墙群的实测剖面估算区域主伸长度, 了解幔源物质对地壳垂向生长的贡献(Windley, 1984; Hall *et al.*, 1987), 如果其产状也能知道, 就能恢复古应力场及区域构造应力方向(Lefort *et al.*, 2005; Ma *et al.*, 2012)。

中基性岩墙群在西准噶尔地区广泛出露。克拉玛依岩体具有不连续分段和连续分段两种类型的岩墙, 总体以北西-南东($280^{\circ} \sim 300^{\circ}$), 少量为北东-南西($30^{\circ} \sim 50^{\circ}$)(李辛子等, 2005)。西准噶尔北部侵入到石炭统地层的和布克赛尔闪长岩墙整体走向为 220° , 克拉玛依闪长岩墙走向为 $40^{\circ} \sim 50^{\circ}$ (徐芹芹等, 2008)。冯乾文等(2012)将克拉玛依闪长岩墙划分为三组, 各组走向分别为 $280^{\circ} \sim 310^{\circ}$, $30^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 和近南北向, 其中第一组占绝大多数。在野外露头, 北东-南西向的岩墙切割北西-南东向的岩墙, 即前者形成时间晚于后者(Ma *et al.*, 2012)。项目组对西准噶尔夏尔蒲中基性岩墙、别鲁阿嘎希中基性岩墙、小西湖中基性岩墙和活基尔中酸性岩墙进行了产状测量: 夏尔蒲岩墙走向分为 3 组: 北西-南东东($280^{\circ} \sim 300^{\circ}$), 近东西向($265^{\circ} \sim 275^{\circ}$) 和北东-南西向($50^{\circ} \sim 55^{\circ}$); 别鲁阿嘎希岩墙分为 2 组: 北东东-南西西向($236^{\circ} \sim 255^{\circ}$) 和近东西向($265^{\circ} \sim 269^{\circ}$); 小西湖岩墙分为 4 组: 近南北向($356^{\circ} \sim 11^{\circ}$), 近东西向($265^{\circ} \sim 276^{\circ}$), 北西-南东东向($280^{\circ} \sim 305^{\circ}$) 和北东-南西向($20^{\circ} \sim 83^{\circ}$)。

为了研究西准噶尔区域的古应力场情况, 笔者采用 TENSOR 软件对所测得的岩墙群的一系列产状进行分析, 该软件的限制条件请见前人文献(Delvaux and Sperner, 2003; Ma *et al.*, 2012)。应力体系被定义和划分成不同类型的应力, 且能够被指数 R' 量化, 其变化范围从 0 ~ 3。 σ_1 , σ_2 和 σ_3 分别是体系中的最大应力, 中等应力和最小应力。当 σ_1 垂直时, $R' = R$ (其中 $R = (\sigma_2 - \sigma_3)/(\sigma_1 - \sigma_3)$), 代表拉张应力体系; 当 σ_2 垂直时, $R' = 2 - R$, 代表走滑应力体系; 当 σ_3 垂直时, $R' = 2 + R$, 代表挤压应力体系(Delvaux *et al.*, 1997; Delvaux and Sperner, 2003; Ma *et al.*, 2012)。夏尔蒲中基性岩墙、别鲁阿嘎希中基性岩墙、小西湖中基性岩墙和活基尔中酸性岩墙的应力场分析结果请见图 13 和表 2。夏尔蒲岩墙恢复的古应力场特征为: 近垂直的 σ_2 和近水平的 σ_3 和 σ_1 , 主应力轴 σ_1 的平均方位为 $23^{\circ}/280^{\circ}$, σ_2 为 $67^{\circ}/88^{\circ}$, σ_3 为 $4^{\circ}/188^{\circ}$; 应力指数 $R' = 1.11$, 指示走滑体系。别鲁阿嘎希中基性岩墙具有近垂直的 σ_1 和近水平的 σ_3 和 σ_2 , 主应力轴 σ_1 的平均方位为 $42^{\circ}/97^{\circ}$, σ_2 为 $38^{\circ}/230^{\circ}$, σ_3 为 $25^{\circ}/341^{\circ}$; 应力指数 $R' = 1.0$, 指示一个拉张应力体系。小西湖中基性岩墙具有近垂直的 σ_1 和近水平的 σ_3 和 σ_2 , 主应力轴 σ_1 的平均方位为 $85^{\circ}/135^{\circ}$, σ_2 为 $4^{\circ}/275^{\circ}$, σ_3 为 $3^{\circ}/5^{\circ}$; 应力指数 $R' = 0.67$, 指示拉张应力体系。活基尔中酸性岩墙具有近垂直的 σ_2 和近水平的 σ_3 和 σ_1 , 主应力轴

表 2 西准噶尔岩墙群古应力场相关特征指标

Table 2 The paleostress tensors from the dykes in the western Junggar

岩墙名称	n	nt	σ_1	σ_2	σ_3	R	R'	应力体系
夏尔蒲	20	20	23°/280°	67°/88°	4°/188°	0.89	1.11	走滑体系
别鲁阿嘎希	12	13	42°/97°	38°/230°	25°/341°	1	1	拉张体系
小西湖	58	58	85°/135°	4°/275°	3°/5°	0.67	0.67	拉张体系
活基尔	11	11	20°/64°	66°/279°	13°/159°	0.72	1.28	走滑体系

注:n 代表参与计算的岩墙数;nt 代表测量产状的岩墙总数; σ_1 、 σ_2 和 σ_3 分别代表主应力轴的倾角和方位角

σ_1 的平均方位为 20°/64°, σ_2 为 66°/279°, σ_3 为 13°/159°; 应力指数 $R' = 1.28$, 指示一个过渡应力体系, 即走滑体系。

4 西准噶尔晚古生代构造背景

西准噶尔晚古生代构造背景主要有洋盆阶段、俯冲增生阶段和后碰撞三个阶段。克拉玛依和达尔布特蛇绿混杂岩的形成时代分别为中奥陶世-早泥盆世(徐新等, 2006; 何国琦等, 2007; 笔者项目组, 未发表数据)和中志留世-中泥盆世(Feng *et al.*, 1989; 张弛和黄莹, 1993; 辜平阳等, 2009; Yang *et al.*, 2012a, c; 陈博和朱永峰, 2011)。表明一直到中泥盆世, 西准噶尔是处于洋盆阶段(Wang *et al.*, 2003; Yang *et al.*, 2012a, b)。早石炭世大量的 I 型花岗岩, 富集大离子亲石元素, 亏损高场强元素, 形成于岛弧构造背景, 岩石成因主要为下地壳的部分熔融作用。达尔布特蛇绿混杂岩带各构造岩片以低角度逆冲断层关系接触。以上表明在早石炭世, 西准噶尔发生俯冲-增生作用(Xiao *et al.*, 2008; Geng *et al.*, 2009; Tang *et al.*, 2010, 2012a, b)。晚石炭世后期, 西准噶尔已经进入后碰撞环境, 且该构造背景一直持续到早二叠世(韩宝福等, 2006; Zhou *et al.*, 2008; Chen *et al.*, 2010; 陈家富等, 2010; 童英等, 2010)。主要由以下证据支持:

(1) 西准噶尔克拉玛依地区的地层主要为石炭统地层, 在大量实测剖面及路线调查基础上, 通过对下石炭统三个组之间的接触界线进行详细的观察, 发现界线附近发育典型的冲刷构造和粒序层理, 因此将下石炭统地层由老到新的顺序定为希贝库拉斯组(C_{1xb})-包古图组(C_{1b})-太勒古拉组($C_{1.2t}$)。根据碎屑锆石年龄和化石, 确定前两个组为早石炭世, 太勒古拉组跨入晚石炭世(王国灿等, 2012)。下石炭统地层沉积相为半深海-深海相, 太勒古拉组发育浊流沉积特点的层序, 而西准噶尔北部上石炭统为吉木乃组(C_{2jm})和塔克台组($C_{1.2tk}$)为河流湖泊相, 表明晚石炭世同样为半深海-深海相(笔者项目组, 未发表数据)。虽然不肯定西准噶尔在早二叠世已全面进入陆相沉积环境, 但说明西准噶尔地区已经有陆相沉积, 整体发生快速抬升。(2) 碎屑锆石: 太勒古拉组的碎屑锆石年龄范围在 300~418Ma, 集中在 320~344Ma(峰期为 330Ma); 希贝库拉斯组碎屑锆石年龄范围是 320~422Ma, 集中在 330~396Ma(峰期为 360Ma)(笔者项目组, 未

发表数据)。晚石炭世岩浆活动记录基本没有, 有可能是西准噶尔已抬升为后碰撞阶段, 剥蚀速度明显大于沉积速度。(3) 达尔布特蛇绿混杂岩被阿克巴斯陶岩体(296~316Ma)(苏玉平等, 2006; Geng *et al.*, 2009; 高山林等, 2006)和也格孜卡拉花岗岩体(308Ma)(陈石和郭召杰, 2010)切割, 能被认为是“钉合岩体”(韩宝福等, 2010), 说明在 308~316Ma, 达尔布特蛇绿混杂岩已经完成构造侵位, 俯冲增生作用可能已结束。(4) 西准噶尔基性岩群具有张性特点(李辛子等, 2004), 与野外观察到的岩墙(脉)侵入寄主岩体的边界平直现象一致。无论是野外地质情况还是岩墙群的年代学都表明至少高镁埃达克质闪长岩墙稍晚于寄主岩体而形成。岩脉都是在有裂隙出现时侵入, 反映的是拉张环境(Williams *et al.*, 2001)。大量 A 型花岗岩形成于晚石炭世-中二叠世, 应该对应后碰撞环境(Eby, 1992; 韩宝福等, 2006; 袁峰等, 2006; Zhou *et al.*, 2008; Chen *et al.*, 2010)。(5) 通过对构造线和构造时序关系分析, 晚古生代古应力场具有近东西向挤压-北东-南西向挤压-近南北向挤压-近南北向伸展的规律性变化特点(王国灿等, 2012)。俯冲增生阶段对应挤压阶段, 后碰撞环境对应近南北向伸展。西准噶尔中基性岩墙群的古应力方向的确指示近南北向的拉张应力。夏尔蒲闪长玢岩和辉长岩的年龄数据不太好, 采用其寄主岩体的年龄 299Ma 代替(岩浆混合成因, 康磊等, 2009), 克拉玛依和别鲁阿嘎希岩墙则选择比较可信的年龄结果, 分别为 292 ± 3 Ma 和 303.1 ± 1.2 Ma ~ 321 ± 3 Ma。表明在早石炭世末期-早二叠世, 西准噶尔可能一直受近南北向的拉张应力体系控制(图 13)。(6) 西准噶尔 I 型和 A 型花岗岩在区域上呈面状分布, 数量众多, 类型多样。与洋脊俯冲-板片窗模式形成花岗岩的局部区域分布的特点并不吻合。这些花岗岩具有高的正 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值, 年轻的 Nd 模式年龄 t_{DM} , 西准噶尔基底以残余洋壳(与岛弧、增生楔等物质)组成(Hu *et al.*, 2000; Chen and Jahn, 2004; Zheng *et al.*, 2007), 完全能够在后碰撞环境下, 岩石圈地幔受流流体(或熔体)交代或软流圈底侵加热发生部分熔融或是下地壳玄武之岩浆高程度的分离结晶而形成(Han *et al.*, 1997; Smithies and Champion, 2000; Chen and Jahn, 2004)。(7) 埃达克质岩同样能形成于滞留洋壳的部分熔融(Desonie, 1992; Hou *et al.*, 2004; Qu *et al.*, 2004)。(8) 中亚造山带西段在石炭纪晚期就已形成统一的大陆, 阿尔泰和塔里木板块在此时期碰撞拼贴在一起。北疆并未见到年龄晚于 320Ma 的蛇绿岩或蛇绿混杂岩,

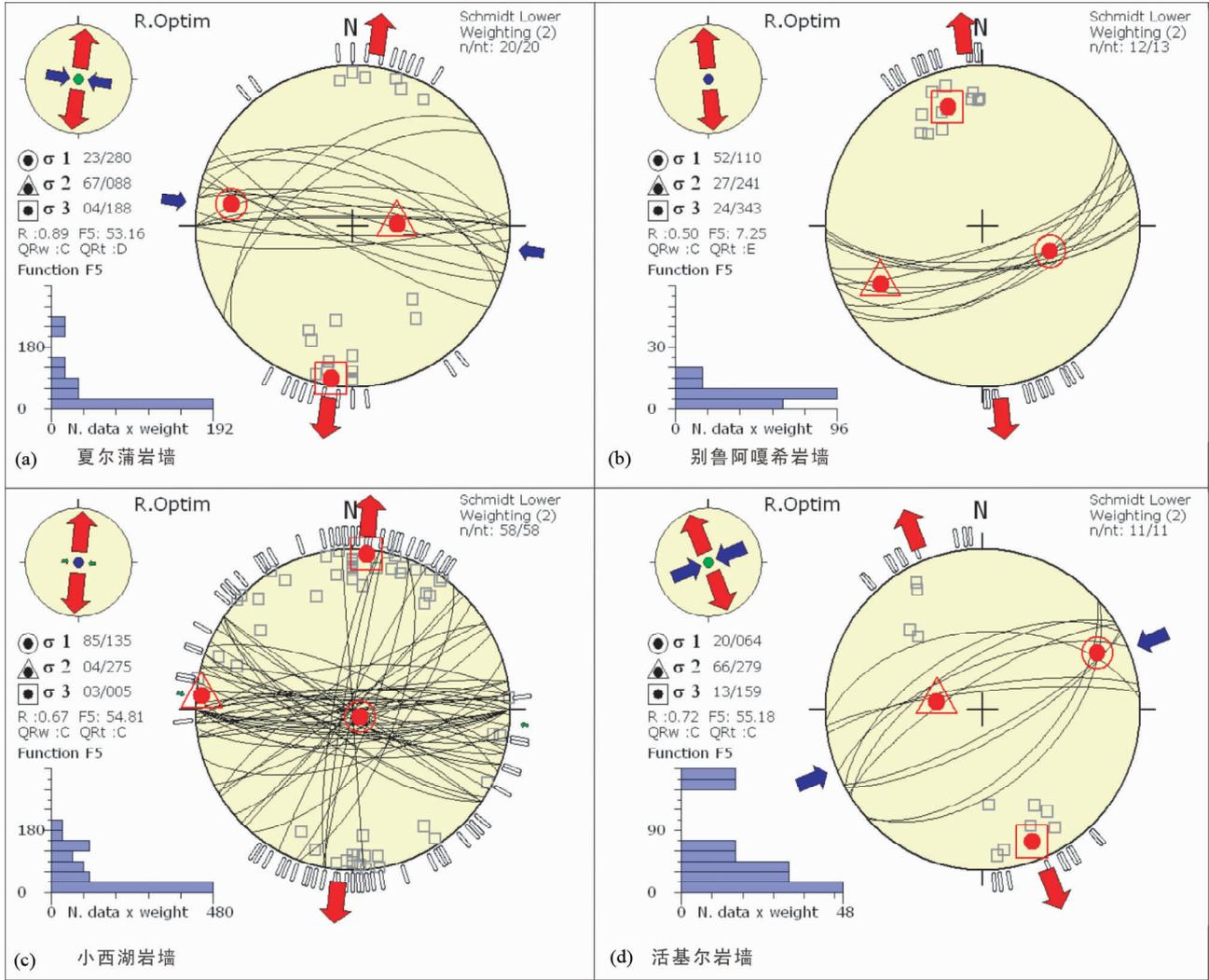


图 13 西准噶尔岩墙群下半球等面积投影图(图 a、b、c 和 d 分别为夏尔蒲岩墙群、别鲁阿嘎西岩墙群、小西湖岩墙群和活基尔岩墙群)(据 Delvaux and Sperner, 2003; Ma *et al.*, 2012)

应力结果用三条主应力轴的方位表示, 实心点被圆, 三角形和正方形包围的标记分别代表 σ_1 , σ_2 和 σ_3 . 相关的水平最大主应力轴 (S_{hmax}) 和最小主应力轴 (S_{hmin}) 用应力图外的大箭头表示. 它们的类型、常数和颜色代表相对于等方性应力 σ_1 的水平偏应力的的大小以及应力比值 $R = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$. 红色实心箭头表示 σ_3 总是最接近近水平方向时(即最小主应力轴 S_{hmin}). 箭头朝外表明拉张体系, 箭头朝内代表挤压体系. 垂向应力 σ_v 见左上角, 用圆和应力箭头表示, 其中实心圆代表拉张体系 (σ_1 接近于 σ_v), 空心圆代表走滑体系 (σ_2 接近于 σ_v)

Fig. 13 The lower hemisphere equal area projections of dyke swarms in Xiaerpu (a), Bielaagaxi (b), Xiaoxihu (c) and Huojier (d) pluton areas (after Delvaux and Sperner, 2003; Ma *et al.*, 2012)

Stress inversion results are represented by the orientation of the three principal stress axes, solid dot surrounded by a circle for σ_1 , a triangle for σ_2 and a square for σ_3 . The related horizontal principle stress axes (S_{hmax}) and horizontal minimum stress axes (S_{hmin}) are marked by large arrows outside the stereogram. Their type, length and color indicate the horizontal deviatoric stress magnitude relative to the isotopic stress (σ_1) and are a function of the stress regime and the stress ratio $R = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$. Red arrows when σ_3 is sub-horizontal (S_{hmin}), blue arrows when σ_2 is sub-horizontal (either S_{hmin} or S_{hmax}), and the green arrows when σ_1 is sub-horizontal (always S_{hmax}). Outward arrows indicate extensional deviatoric stress ($< \sigma_1$) and inward arrows indicate compressional deviatoric stress ($> \sigma_1$). The vertical stress (σ_v) is expressed in the small circle with stress arrows in the upper left corner of the figures by a solid circle for an extensional regime ($\sigma_1 \approx \sigma_v$), and an open circle for a strike-slip regime ($\sigma_2 \approx \sigma_v$)

因此表明晚石炭, 中亚造山带已拼合(徐学义等, 2005)。晚古生代, 新疆北部已经进入陆内演化过程, 现代地壳结构的

轮廓在二叠纪基本奠定格局, 天山地壳主体是在二叠纪以前就已形成(李锦铁和肖序常, 1999, 李锦铁等, 2006)。阿尔

泰南缘在二叠纪已是陆相沉积(Zhang *et al.*, 2007)。中亚造山带的拼合发生于晚石炭世-早二叠世,从碰撞后环境转变为板内环境(Pirajno *et al.*, 2010; Zhang *et al.*, 2010)。因此,中晚二叠世,西准噶尔已完全转为板内环境。

5 结论

中亚造山带是全球显生宙地壳增生与改造最显著的地区。西准噶尔作为中亚造山带的一部分,吸引了大量学者的关注。蛇绿混杂岩带、花岗岩、中基性岩墙在西准噶尔地区广泛出现,其晚古生代构造演化过程极为复杂,因而存在很多争议。通过对西准噶尔区域发育的蛇绿混杂岩带、地层、古地理环境、花岗岩体和基性岩墙群的总结,结合项目组野外与室内数据的研究,得到以下认识:

(1) 达尔布特和克拉玛依蛇绿混杂岩的形成环境与俯冲相关的弧后盆地,源区来自含尖晶石二辉橄辉岩高程度部分熔融作用;

(2) 早石炭世花岗岩形成于俯冲环境,晚石炭世-早二叠世花岗岩形成于后碰撞环境,中二叠世花岗岩可能形成于板内环境;

(3) I型花岗岩的成因与俯冲密切相关,而A型花岗岩和中基性岩墙则更可能产自后碰撞环境;

(4) A型花岗岩是下地壳受地幔底侵发生部分熔融并高度分离结晶的产物,中基性岩墙群普遍具有埃达克质岩的地球化学特点,可能产于受流体(或熔体)交代的残余洋壳板片的部分熔融;

(5) 中基性岩墙群形成稍晚于寄主岩体,均形成于后碰撞构造背景。在晚石炭世-早二叠世,西准噶尔处于近南北向的拉张应力体系;

(6) 西准噶尔在泥盆纪为洋盆体系;早石炭世,俯冲-碰撞过程结束;晚石炭世-早二叠世属于后碰撞环境;中晚二叠世处于板内环境。

致谢 对成文中给予过帮助的纵瑞文、伍文湘和张雷表示感谢!对匿名评审提出的宝贵建议表示感谢!

References

An F and Zhu YF. 2009. SHRIMP U-Pb zircon ages of tuff in Baogutu Formation and their geological significances. *Acta Petrologica Sinica*, 25(6): 1437-1445 (in Chinese with English abstract)

Bai WJ, Ren YX, Wang SR and Lebel L. 1986. Petrology mineralogy of Hongguleng ophiolite and genesis of chromitites in Hongguleng ophiolite. *Publication of Institute of Geology, CAGS*, 14: 1-49 (in Chinese)

Bureau of Geology and Mineral Resource of Xinjiang Uygur Autonomous Region. 1993. *Regional Geology of Xinjiang Uygur Autonomous Region*. Beijing: Geological Publishing House, 1-841 (in Chinese)

Buckman S and Aitchison JC. 2004. Tectonic evolution of Palaeozoic

terraces in West Junggar, Xinjiang, NW China. In: Malpas JG, Fletcher CJN, Ali JT and Aitchison JC (eds.). *Aspects of the Tectonic Evolution of China*. Geological Society, London, Special Publications, 226(1): 101-129

Chen B and Jahn BM. 2004. Genesis of post-collisional granitoids and basement nature of the Junggar Terrane, NW China: Nd-Sr isotope and trace element evidence. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23(5): 691-703

Chen B and Arakawa Y. 2005. Elemental and Nd-Sr isotopic geochemistry of granitoids from the West Junggar foldbelt (NW China), with implications for Phanerozoic continental growth. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(5): 1307-1320

Chen B, Zhu YF, Wei SN and Xu X. 2008. Garnet amphibolite found in Keramay ophiolitic mélange, western Junggar, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 24(5): 1034-1040 (in Chinese with English abstract)

Chen B and Zhu YF. 2011. Petrology, Geochemistry and zircon U-Pb chronology of gabbro in Darbut ophiolitic mélange, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 27(6): 1746-1758 (in Chinese with English abstract)

Chen JF, Han BF, Ji JQ, Zhang L, Xu Z, He GQ and Wang T. 2010. Zircon U-Pb ages and tectonic implications of Paleozoic plutons in northern West Junggar, North Xinjiang, China. *Lithos*, 115(1-4): 137-152

Chen JF, Han BF and Zhang L. 2010. Geochemistry, Sr-Nd isotopes and tectonic implications of two generations of Late Paleozoic plutons in northern West Junggar, Northwest China. *Acta Petrologica Sinica*, 26(8): 2317-2335 (in Chinese with English abstract)

Chen S and Guo ZJ. 2010. Time constraints, tectonic setting of Dalabute ophiolitic complex and its significance for Late Paleozoic tectonic evolution in West Junggar. *Acta Petrologica Sinica*, 26(8): 2336-2344 (in Chinese with English abstract)

Chen Y, Sun MX and Zhang XL. 2006. SHRIMP U-Pb dating of zircons from quartz diorite at the southeast side of the Ba'erlue fault, western Junggar, Xinjiang, China. *Geological Bulletin of China*, 25(8): 992-994 (in Chinese with English abstract)

Coleman RG. 1989. Continental growth of Northwest China. *Tectonics*, 8(3): 621-635

Collins WJ, Beams SD, White AJR and Chappell BW. 1982. Nature and origin of A-type granites with particular reference to southeastern Australia. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 80(2): 189-200

Defant MJ and Drummond MS. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature*, 347(6294): 662-665

Delvaux D, Moeys R, Stapel G, Petit C, Levi K, Miroshnichenko A, Ruzhich V and San'kov V. 1997. Paleostress reconstructions and geodynamics of the Baikal region, Central Asia, part 2. Cenozoic rifting. *Tectonophysics*, 282(1-4): 1-38

Delvaux D and Sperner B. 2003. New aspects of tectonic stress inversion with reference to the TENSOR program. In: Nieuwland DA (ed.). *New Insights into Structural Interpretation and Modeling*. Geological Society of London, Special Publication, 212: 75-100

Desonie DL. 1992. Geologic and geochemical reconnaissance of Isla San Esteban: Post-subduction orogenic volcanism in the Gulf of California. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 52(1-3): 123-140

Dilek Y. 2003. Ophiolite concept and its evolution. *Geological Society of America Special Papers*, 373: 1-16

Dilek Y and Harald F. 2011. Ophiolite genesis and global tectonics: Geochemical and tectonic fingerprinting of ancient oceanic lithosphere. *Geological Society of America Bulletin*, 123(3-4): 387-411

Eby GN. 1992. Chemical subdivision of the A-type granitoids: Petrogenetic and tectonic implications. *Geology*, 20(7): 641-644

Elthon D, Stewart M and Ross DK. 1992. Compositional trends of minerals in oceanic cumulates. *Journal of Geophysical Research*, 97(B11): 15189-15199

- Fan Y, Zhou TF, Yuan F, Tan LG, Cooke D, Meffre S, Yang WP and He LX. 2007. LA-ICP-MS zircon age of Tasite pluton in Sawuer region of West Junggar, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 23(8): 1901–1908 (in Chinese with English abstract)
- Feng QW, Li JY, Liu JF, Zhang J and Qu JF. 2012. Late Carboniferous geodynamic setting in West Junggar, Xinjiang: Evidence from dark dyke swarms. Wuhan: Abstracts of the 5th National Symposium on Structural Geology and Geodynamics, 80–81 (in Chinese)
- Feng Y, Coleman RG, Tilton G and Xiao X. 1989. Tectonic evolution of the West Junggar region, Xinjiang, China. *Tectonics*, 8(4): 729–752
- Fretzdorff S, Livermore RA, Devey CW, Leat PT and Stoffers P. 2002. Petrogenesis of the Back-arc East Scotia Ridge, South Atlantic Ocean. *Journal of Petrology*, 43(8): 1435–1467
- Gao J, Long LL, Qian Q, Zhang X and Jiang T. 2012. Two-stage model of Paleozoic crustal growth in CAO: Example of the West Tianshan. Wuhan: Abstracts of the 5th National Symposium on Structural Geology and Geodynamics, 82 (in Chinese)
- Gao SL, He ZL and Zhou ZY. 2006. Geochemical characteristics of the Karamay granitoids and their significance in West Junggar, Xinjiang. *Xinjiang Geology*, 24(2): 125–130 (in Chinese with English abstract)
- Geng HY, Sun M, Yuan C, Xiao WJ, Xian WS, Zhao GC, Zhang LF, Wong K and Wu FY. 2009. Geochemical, Sr-Nd and zircon U-Pb-Hf isotopic studies of Late Carboniferous magmatism in the West Junggar, Xinjiang: Implications for ridge subduction? *Chemical Geology*, 266(3–4): 364–389
- Gribble RF, Stern RJ, Newman S, Bloomer SH and O’Hearn T. 1998. Chemical and isotopic composition of lavas from the Northern Mariana Trough: Implications for magmatogenesis in back-arc basins. *Journal of Petrology*, 39(1): 125–154
- Gu PY, Li YJ, Zhang B, Tong LL and Wang JN. 2009. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of gabbro in the Darbut ophiolite, western Junggar, China. *Acta Petrologica Sinica*, 25(6): 1364–1372 (in Chinese with English abstract)
- Gu PY, Li YJ, Wang XG, Zhang HW and Wang JN. 2011. Geological evidences and tectonic significances of Dalabute SSZ-type ophiolitic mélange, western Junggar Basin. *Geological Review*, 57(1): 36–44 (in Chinese with English abstract)
- Guo LS, Liu YL, Wang ZH, Song D, Xu FJ and Su L. 2010. The zircon U-Pb LA-ICP-MS geochronology of volcanic rocks in Baogutu areas, western Junggar. *Acta Petrologica Sinica*, 26(2): 471–477 (in Chinese with English abstract)
- Hall HC and Fahrig WF. 1987. Mafic dyke swarms. *Geological Association of Canada, Special Papers*, 34: 483–491
- Han BF, Wang SG, Jahn BM, Hong DW, Kagami H and Sun YL. 1997. Depleted-mantle source for the Ulungur River A-type granites from North Xinjiang, China: Geochemistry and Nd-Sr isotopic evidence, and implications for Phanerozoic crustal growth. *Chemical Geology*, 138(3–4): 135–159
- Han BF, Ji JQ, Song B, Chen LH and Zhang L. 2006. Late Paleozoic vertical growth of continental crust around the Junggar Basin, Xinjiang, China (Part I): Timing of post-collisional plutonism. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1077–1086 (in Chinese with English abstract)
- Han BF, Guo ZJ, Zhang ZC, Zhang L, Chen JF and Song B. 2010. Age, geochemistry, and tectonic implications of a Late Paleozoic stitching pluton in the North Tianshan suture zone, western China. *Geological Society of America Bulletin*, 122(3–4): 627–640
- Han BF, Guo ZJ and He GQ. 2010. Timing of major suture zones in North Xinjiang, China: Constraints from stitching plutons. *Acta Petrologica Sinica*, 26(8): 2233–2246 (in Chinese with English abstract)
- Han BF, He GQ, Wang XC and Guo ZJ. 2011. Late Carboniferous collision between the Tarim and Kazakhstan-Yili terranes in the western segment of the South Tianshan Orogen, Central Asian, and implications for the northern Xinjiang, western China. *Earth Science Reviews*, 109(3–4): 74–93
- He GQ, Li MS and Liu DQ. 1994. Paleozoic Crustal Evolution and Mineralization in Xinjiang of China. Urumqi: Xinjiang People’s House, 1–437 (in Chinese)
- He GQ, Liu JB, Zhang YQ and Xu X. 2007. Karamay ophiolitic mélange formed during Early Paleozoic in western Junggar basin. *Acta Petrologica Sinica*, 23(7): 1573–1576 (in Chinese with English abstract)
- Hou ZQ, Gao YF, Qu XM, Rui ZY and Mo XX. 2004. Origin of adakitic intrusives generated during Mid-Miocene east-west extension in southern Tibet. *Earth and Planetary Science Letters*, 220(1–2): 139–155
- Hu AQ, Jahn BM, Zhang GX, Chen YB and Zhang QF. 2000. Crustal evolution and Phanerozoic crustal growth in northern Xinjiang: Nd isotopic evidence. Part I. Isotopic characterization of basement rocks. *Tectonophysics*, 328(1–2): 15–51
- Huang JH, Jin ZD and Li FC. 1999. Sm-Nd isotopes and age of the Hongguleng ophiolite. *Chinese Science Bulletin*, 44(9): 1004–1007 (in Chinese)
- Jahn BM, Wu FY and Chen B. 2000. Massive granitoids generation in Central Asia: Nd isotope evidence and implication for continental growth in the Phanerozoic. *Episodes*, 23(2): 82–92
- Jahn BM, Capdevila R, Liu DY, Vernon A and Badarch G. 2004. Sources of Phanerozoic granitoids in the transect Bayanhongor-Ulaan Baatar, Mongolia: Geochemical and Nd isotopic evidence, and implications for Phanerozoic crustal growth. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23(5): 629–653
- Jian P, Liu DY, Zhang Q, Zhang FQ, Shi YR, Shi GH, Zhang LQ and Tao H. 2003. SHRIMP dating of ophiolite and leucocratic rocks within ophiolite. *Earth Science Frontiers*, 10(4): 439–456
- Jian P, Liu DY, Shi YR and Zhang FQ. 2005. SHRIMP daing of SSZ ophiolites from northern Xinjiang Province, China: Implications for the generation of oceanic crust in the Central Asian Orogenic Belt. In: Sklyarov EV (ed.). *Structural and Tectonic Correlation across the Central Asia Orogenic Collage: Northeastern Segment. Guidebook and Abstract Volume of the Siberian Workshop ICGP-480. IEC SB RAS, Irkutsk*, 246
- Jiang Y, Li SZ, Zhen QZ, Li SL, Feng XC and Dong FR. 2003. Chemistry character and formed environment of super-magnesium iron ore of Daerbute, West Junggar region. *Xinjiang Geology*, 21(2): 260–261 (in Chinese)
- Jin CW and Zhang XQ. 1993. A geochronology and genesis of the western Junggar granitoids, Xinjiang, China. *Scientia Geologica Sinica*, 28(1): 28–36 (in Chinese with English abstract)
- Kang L, Li YJ, Zhang B, Zhang HW and Wang JN. 2009. Petrographic evidence for magma mixing of Xiaerpu granite in West Junggar, Xinjiang. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 28(5): 423–432 (in Chinese with English abstract)
- Kay RW and Kay SM. 1988. Crustal recycling and the Aleutian arc. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 52(6): 1351–1359
- Kwon ST, Tilton GR, Coleman RG and Feng Y. 1989. Isotopic studies bearing on the tectonics of the West Junggar region, Xinjiang, China. *Tectonics*, 8(4): 719–727
- Leat PT, Livermore RA, Millar IL and Pearce JA. 2000. Magma supply in back-arc centre spreading segment E2, East Scotia Ridge. *Journal of Petrology*, 41(6): 845–866
- Lefort J, Alfa T and Hervé F. 2005. AMS criteria for determining the azimuth and dip of a subduction zone from a mafic dyke swarm. In: Hanski E, Mertanen S, Ramo T and Vuollo J (eds.). *Dyke Swarms: Time Markers of Crustal Evolution: Fifth International Dyke Conference. Rovaniemi, Finland; Taylor & Francis Group*, 49–62
- Lei M, Zhao ZD, Hou YQ, Zhang HF, Xu JF, Chen YL, Zhang BR and Liu XJ. 2008. Geochemical and Sr-Nd-Pb isotopic characteristics of the Dalabute ophiolite, Xinjiang: Comparison between the Paleo-Asian ocean and the Tethyan mantle domains. *Acta Petrologica Sinica*, 24(4): 661–672 (in Chinese with English abstract)
- Li JW, Zhao XF, Zhou MF, Ma CQ, De Souza ZS and Vasconcelos P. 2009. Late Mesozoic magmatism from the Daye region, eastern China: U-Pb ages, petrogenesis, and geodynamic implications.

- Contributions to Mineralogy and Petrology, 157(3): 383–409
- Li JY and Xiao XC. 1999. Brief reviews on some issues of framework and tectonic evolution of Xinjiang crust, NW China. *Scientia Geologica Sinica*, 34(4): 405–419 (in Chinese with English abstract)
- Li JY, He GQ, Xu X, Li HQ, Sun GH, Yang TN, Gao LM and Zhu ZX. 2006. Crustal tectonic framework of Northern Xinjiang and adjacent regions and its formation. *Acta Geologica Sinica*, 80(1): 148–168 (in Chinese with English abstract)
- Liu XJ, Xu JF, Wang SQ, Bai ZH and Lei M. 2009. Geochemistry and dating of E-MORB type mafic rocks from Dalabute ophiolite in West Junggar, Xinjiang and geological implications. *Acta Petrologica Sinica*, 25(6): 1373–1389 (in Chinese with English abstract)
- Li XZ, Han BF, Li ZH, Li ZQ, Liu ZQ and Yang B. 2004. Geology, geochemistry and K-Ar ages of the Karamay basic-intermediate dyke swarms from Xinjiang, China. *Geochimica*, 33(6): 574–584 (in Chinese with English abstract)
- Li XZ, Han BF, Li ZH, Liu ZQ and Du W. 2005. Mechanism of the Karamay basic-intermediate dyke swarms from Xinjiang and tectonic implications. *Geological Review*, 51(5): 517–522 (in Chinese with English abstract)
- Li ZL, Li YQ, Chen HL, Santosh M, Yang SF, Xu YG, Langmuir CH, Chen ZX, Yu X and Zou SY. 2012. Hf isotopic characteristics of the Tarim Permian large igneous province rocks of NW China: Implication for the magmatic source and evolution. *Journal of Asian Earth Sciences*, 49: 191–202
- Liu ZQ, Han BF, Ji JQ and Li ZH. 2005. Ages and geochemistry of the post-collisional granitic rocks from Eastern Alatau Mountains, Xinjiang, and implications for vertical crustal growth. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 623–639 (in Chinese with English abstract)
- Ma C, Xiao WJ, Windley BF, Zhao GP, Han CM, Zhang JE, Luo J and Li C. 2012. Tracing a subducted ridge-transform system in a Late Carboniferous accretionary prism of the southern Altaids: Orthogonal sanukitoid dyke swarms in western Junggar, NW China. *Lithos*, 140–141: 152–165
- Nielsen R. 2006. Geochemical Earth References Model (GERM) partition coefficient (Kd) database. Available at <http://www.geo.oregonstate.edu/people/faculty/nielsenr.htm>, 373: 1–16
- Pearce JA, Lippard SJ and Roberts S. 1984. Characteristics and tectonic significance of supra-subduction zone ophiolites. In: Kokelaar BP and Howells MF (eds.). *Marginal basin Geology*. Special Publication Geology Society of London, 16: 77–89
- Pirajno F, Seltmann R and Yang YQ. 2010. A review of mineral systems and associated tectonic settings of northern Xinjiang, NW China. *Geoscience Frontiers*, 2(2): 157–185
- Qu XM, Hou ZQ and Li YG. 2004. Melt components derived from a subducted slab in late orogenic ore-bearing porphyries in the Gangdese copper belt, southern Tibetan Plateau. *Lithos*, 74(3–4): 131–148
- Rapp RP and Watson EB. 1995. Dehydration melting of metabasalt at 8–32 kbar: Implications for continental growth and crust-mantle recycling. *Journal of Petrology*, 36(4): 891–931
- Rudnick RL. 1990. Nd and Sr isotopic compositions of lower-crustal xenoliths from north Queensland, Australia: Implications for Nd model ages and crustal growth processes. *Chemical Geology*, 83(3–4): 195–208
- Sengör AMC, Natalin BA and Burtman VS. 1993. Evolution of the Altaid tectonic collage and Palaeozoic crustal growth in Eurasia. *Nature*, 364(6435): 299–307
- Smithies RH and Champion DC. 2000. The Archaean high-Mg diorite suite: Links to tonalite-trondhjemite-granodiorite magmatism and implications for Early Archaean crustal growth. *Journal of Petrology*, 41(12): 1653–1671
- Su BX, Qin KZ, Sakyi PA, Liu PP, Tang DM, Malaviarachchi PK, Xiao QH, Sun H, Dai YC and Yan H. 2011a. Geochemistry and geochronology of acidic rocks in the Beishan region, NW China: Petrogenesis and tectonic implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, 41(1): 31–43
- Su BX, Qin KZ, Sakyi PA, Li XH, Yang YH, Sun H, Tang DM, Liu PP, Xiao QH and Malaviarachchi PK. 2011b. U-Pb ages and Hf-O isotopes of zircons from Late Paleozoic mafic-ultramafic units in the southern Central Asian Orogenic Belt: Tectonic implications and evidence for an Early-Permian mantle plume. *Gondwana Research*, 20(2–3): 516–531
- Su YP, Tang HF, Hou GS and Liu CQ. 2006. Geochemistry of aluminous A-type granites along Darabut tectonic belt in West Junggar, Xinjiang. *Geochimica*, 35(1): 1–5 (in Chinese with English abstract)
- Tang GJ, Wang Q, Wyman DA, Li ZX, Zhao ZH, Jia XH and Jiang ZQ. 2010. Ridge subduction and crustal growth in the Central Asian Orogenic Belt: Evidence from Late Carboniferous adakites and high-Mg diorites in the western Junggar region, northern Xinjiang (west China). *Chemical Geology*, 277(3–4): 281–300
- Tang GJ, Wang Q, Wyman DA, Li ZX, Xu YG and Zhao ZH. 2012a. Recycling oceanic crust for continental crustal growth: Sr-Nd-Hf isotope evidence from granitoids in the western Junggar region, NW China. *Lithos*, 128–131: 73–83
- Tang GJ, Wang Q, Wyman DA, Li ZX, Zhao ZH and Yang YH. 2012b. Late Carboniferous high $\varepsilon_{Nd}(t)$ - $\varepsilon_{Hf}(t)$ granitoids, enclaves and dikes in western Junggar, NW China: Ridge-subduction-related magmatism and crustal growth. *Lithos*, 140–141: 86–102
- Tatsumi Y and Ishizaka K. 1982. Origin of high-magnesian andesites in the Setouchi volcanic belt, southwest Japan, I. Petrographical and chemical characteristics. *Earth and Planetary Science Letters*, 60(2): 293–304
- Tong LL, Li YJ, Zhang B, Liu J, Pang ZJ and Wang JN. 2009. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating and geological age of the Baogutu Formation andesites in the south of Dalabute faulted zone, western Junggar. *Xinjiang Geology*, 27(3): 226–230 (in Chinese)
- Tong Y, Wang T, Hong DW, Han BF, Zhang JJ, Shi XJ and Wang C. 2010. Spatial and temporal distribution of the Carboniferous-Permian granitoids in northern Xinjiang and its adjacent areas, and its tectonic significance. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 29(6): 618–641 (in Chinese with English abstract)
- Treuil M and Joron JL. 1975. Utilisation des elements hygromagmatophiles pour la simplification de la modelisation quantitative des processus magmatiques: Exemples de l'Afar et de la dorsale medioatlantique. *Societa Italiana Mineralogiae Petrologiae*, 31(1): 125–174
- Turner SP, Foden JD and Morrison RS. 1992. Derivation of some A-type magmas by fractionation of basaltic magma: An example from the Padthaway Ridge, South Australia. *Lithos*, 28(2): 151–179
- Wang GC, Xiao L and Gong YM. 2012. Several new insights into the orogenic tectonic evolution in West Junggar. Wuhan: Abstracts of the 5th National Symposium on Structural Geology and Geodynamics, 120–122 (in Chinese)
- Wang R and Zhu YF. 2007. Geology of the Baobei gold deposit in western Junggar and zircon SHRIMP age of its wall-rocks, western Junggar (Xinjiang, NW China). *Geological Journal of China Universities*, 13(3): 590–602 (in Chinese with English abstract)
- Wang T, Hong DW, Jahn BM, Tong Y, Wang YB, Han BF and Xiao WJ. 2006. Timing, Petrogenesis, and setting of Paleozoic synorogenic intrusions from the Altai Mountains, Northwest China: Implications for the tectonic evolution of an accretionary orogen. *The Journal of Geology*, 114(6): 735–751
- Wang T, Jahn BM, Kovach VP, Tong Y, Hong DW and Han BF. 2009. Nd-Sr isotopic mapping of the Chinese Altai and implications for continental growth in the Central Asian Orogenic Belt. *Lithos*, 110(1–4): 359–372
- Wang ZH, Sun S, Li JL, Hou QL, Qin KZ, Xiao WJ and Hao J. 2003. Paleozoic tectonic evolution of the northern Xinjiang, China: Geochemical and geochronological constraints from the ophiolites. *Tectonics*, 22(2): 1–15
- Wei RZ. 2010. Geochemistry and chronology of the Laba intrusion in western Junggar, Xinjiang. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 29(6): 663–674 (in Chinese with English abstract)

- Whalen JB, Currie KL and Chappell BW. 1987. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95(4): 407–419
- Williams H, Turner S, Kelley S and Harris N. 2001. Age and composition of dikes in Southern Tibet: New constraints on the timing of east-west extension and its relationship to postcollisional volcanism. *Geology*, 29(4): 339–342
- Windley BF. 1984. *The Evolving Continents*. 2nd Edition. New York: John Wiley, 69–228
- Windley BF, Kroner A, Guo JH, Qu GS, Li YY and Zhang C. 2002. Neoproterozoic to Paleozoic geology of the Altai orogen, NW China: New zircon age data and tectonic evolution. *The Journal of Geology*, 110(6): 719–737
- Wu B, He GQ, Wu TR, Li HJ and Luo HL. 2006. Discovery of the Buergen ophiolitic mélange belt in Xinjiang and its tectonic significance. *Geology in China*, 33(3): 476–486 (in Chinese with English abstract)
- Xia LQ, Xu XY, Xia ZC, Li XM, Ma ZP and Wang LS. 2003. Carboniferous post-collisional rift volcanism of the Tianshan Mountains, northwestern China. *Acta Geologica Sinica*, 77(3): 338–360
- Xia LQ, Xu XY, Xia ZC, Li XM, Ma ZP and Wang LS. 2004. Petrogenesis of Carboniferous rift-related volcanic rocks in the Tianshan, northwestern China. *Geological Society of America Bulletin*, 116(3): 419–433
- Xiao WJ, Zhang LC, Qin KZ, Sun S and Li JL. 2004. Paleozoic accretionary and collisional tectonics of the Eastern Tianshan (China): Implications for the continental growth of Central Asia. *American Journal of Science*, 304(4): 370–395
- Xiao WJ, Han CM, Yuan C, Chen HL, Sun M, Lin SF, Li ZL, Mao QG, Zhang JE, Sun S and Li JL. 2006. Unique Carboniferous-Permian tectonic-metallogenic framework of Northern Xinjiang (NW China): Constraints for the tectonics of the southern Paleosian Domain. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1062–1076 (in Chinese with English abstract)
- Xiao WJ, Han CM, Yuan C, Sun M, Lin SF, Chen HL, Li ZL, Li JL and Sun S. 2008. Middle Cambrian to Permian subduction-related accretionary orogenesis of Northern Xinjiang, NW China: Implications for the tectonic evolution of Central Asia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32(2–4): 102–117
- Xiao WJ and Kusky T. 2009. Geodynamic processes and metallogenesis of the Central Asian and related orogenic belts: Introduction. *Gondwana Research*, 16(2): 167–169
- Xiao XC, Tang YQ and Feng YM. 1992. *Tectonic Evolution of Northern Xinjiang and Its Adjacent Regions*. Beijing: Geological Publishing House, 1–169 (in Chinese with English abstract)
- Xiao XC, Tang YQ, Wang J and Zhao M. 1994. Tectonic evolution of the Northern Xinjiang, N. W. China: An introduction to the tectonics of the southern part of the Paleo-Asian Ocean. In: Coleman RG (ed.). *Reconstruction of the Paleo-Asian Ocean*. *Proceeding of the 29th International Geological Congress*. Part B. VSP, Utrecht, 6–25
- Xu QQ, Ji JQ, Han BF, Zhu MF, Chu ZY and Zhou J. 2008. Petrology, geochemistry and geochronology of the intermediate to mafic dykes in northern Xinjiang since Late Paleozoic. *Acta Petrologica Sinica*, 24(5): 977–996 (in Chinese with English abstract)
- Xu X, He GQ, Li HQ, Ding TF, Liu XY and Mei SW. 2006. Basic characteristics of the Karamay ophiolitic mélange, Xinjiang, and its zircon SHRIMP dating. *Geology in China*, 33(3): 470–475 (in Chinese with English abstract)
- Xu XY, Ma ZP, Xia ZC, Xia LQ, Li XM and Wang LS. 2005. Discussion of the sources and characteristics on Sr, Nd, Pb isotopes of the Carboniferous to Permian post-collision granites from Tianshan. *Northwestern Geology*, 38(2): 1–18 (in Chinese with English abstract)
- Xu Z, Han BF, Ren R, Zhou YZ, Zhang L, Chen JF, Su L, Li XH and Liu DY. 2012. Ultramafic-mafic mélange, island arc and post-collisional intrusions in the Mayile Mountain, West Junggar, China: Implications for Paleozoic intra-oceanic subduction-accretion process. *Lithos*, 132–133: 141–161
- Yang GX, Li YJ, Gu PY, Yang BK, Tong L and Zhang HW. 2012a. Geochronological and geochemical study of the Darbut ophiolitic complex in the West Junggar (NW China): Implications for petrogenesis and tectonic evolution. *Gondwana Research*, 21(4): 1037–1049
- Yang GX, Li YJ, Santosh M, Gu PY, Yang BK, Zhang B, Wang HB, Zhong X and Tong L. 2012b. A Neoproterozoic seamount in the Paleasian Ocean: Evidence from zircon U-Pb geochronology and geochemistry of the Mayile ophiolitic melange in West Junggar, NW China. *Lithos*, 140–141: 53–65
- Yang GX, Li YJ and Santosh M. 2012c. Geochronology and geochemistry of basalts from the Kaamay ophiolitic melange in West Junggar: Implications for Devonian-Carboniferous intra-oceanic accretionary tectonics of the southern Altai. *Wuhan: Abstracts of the 5th National Symposium on structural Geology and Geodynamics*, 120–122
- Yang SF, Li ZL, Chen HL, Santosh M, Ding CW and Yu X. 2007. Permian bimodal dyke of Tarim Basin, NW China: Geochemical characteristics and tectonic implications. *Gondwana Research*, 12(1–2): 113–120
- Yin JY, Yuan C, Sun M, Xiao WJ, Zhao GC, Long XP, Geng HY and Wang BY. 2009. Sanukitic dykes in West Junggar, Xinjiang: Geochemical features, petrogenesis and links to Cu-Au mineralization. *Geochimica*, 38(5): 413–423 (in Chinese with English abstract)
- Yin JY, Yuan C, Sun M, Long XP, Zhao GC, Wong KP, Geng HY and Cai K. 2010. Late Carboniferous high-Mg dioritic dikes in western Junggar, NW China: Geochemical features, petrogenesis and tectonic implications. *Gondwana Research*, 17(1): 145–152
- Yin JY, Yuan C, Wang YJ, Long XP and Guan YL. 2011. Magmatic records on the Late Paleozoic tectonic evolution of western Junggar, Xinjiang. *Geotectonica et Metallogenia*, 35(2): 278–291 (in Chinese with English abstract)
- Yin JY, Yuan C, Sun M, Long XP, Qiu HN, Wang YJ, Ren JB and Guan YL. 2012. Age, geochemical features and possible petrogenesis mechanism of Early Permian magnesian diorite in Hatu, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 28(7): 2171–2182 (in Chinese with English abstract)
- Yu X, Yang SF, Chen HL, Chen ZQ, Li ZL, Batt GE and Li YQ. 2011. Permian flood basalts from the Tarim basin, Northwest China: SHRIMP zircon U-Pb dating and geochemical characteristics. *Gondwana Research*, 20(2–3): 485–497
- Yuan F, Zhou TF, Tan LG, Fan Y, Yang WP, He LX and Yue SC. 2006. Isotopic ages of the I type granites in West Junggar Sawuer region. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1238–1248 (in Chinese with English abstract)
- Zhang C and Huang X. 1992. The ages and tectonic settings of ophiolites in West Junggar, Xinjiang. *Geological Review*, 38(6): 509–524 (in Chinese with English abstract)
- Zhang C, Zhai MG, Allen MB, Saunders AD, Wang GR and Huang X. 1993. Implications of Palaeozoic ophiolites from Western Junggar, NW China, for the tectonics of central Asia. *Journal of the Geological Society*, 150(3): 551–561
- Zhang CL, Li ZX, Li XH, Xu YG, Zhou G and Ye HM. 2010. A Permian large igneous province in Tarim and Central Asian orogenic belt, NW China: Results of a ca. 275Ma mantle plume? *Geological Society of America Bulletin*, 122(11–12): 2020–2040
- Zhang HW, Kang L, Zhao CH, He XG and Li YJ. 2011. Geochemical evidence of magma mingling of Xiaerpu granite in West Junggar, Xinjiang. *Northwestern Geology*, 44(2): 41–50 (in Chinese with English abstract)
- Zhang JE, Xiao WJ, Han CM, Mao QG, Ao SJ and Guo QQ. 2009. Fold and thrust structure in Yeyagou area, western Junggar, China and its implication. *Geological Bulletin of China*, 28(12): 1894–1903 (in Chinese with English abstract)
- Zhang JE, Xiao WJ, Han CM, Mao QG, Ao SJ, Guo QQ and Ma C.

- 2011a. A Devonian to Carboniferous intra-oceanic subduction system in western Junggar, NW China. *Lithos*, 125(1-2): 592-606
- Zhang JE, Xiao WJ, Han CM, Ao SJ, Yuan C, Sun M, Geng HY, Zhao GC, Guo QQ and Ma C. 2011b. Kinematics and age constraints of deformation in a Late Carboniferous accretionary complex in western Junggar, NW China. *Gondwana Research*, 19(4): 958-974
- Zhang LF, Xian WS and Sun M. 2004. Petrogenesis of Charnockites from western Junggar, Xinjiang, China. *Xinjiang Geology*, 22(1): 36-42 (in Chinese with English abstract)
- Zhang LF, Ai YL, Li XP, Rubatto D, Song B, Williams S, Song SG, Ellis D and Liou JG. 2007. Triassic collision in western Tianshan orogenic belt, China: Evidences from SHRIMP U-Pb dating of zircons from HP/UHP eclogitic rocks. *Lithos*, 96(1-2): 266-280
- Zhang YY and Guo ZJ. 2010. New constraints on formation ages of ophiolites in northern Junggar and comparative study on their connection. *Acta Petrologica Sinica*, 26(2): 421-430 (in Chinese with English abstract)
- Zhang ZM, Liou JG and Coleman RG. 1984. An outline of the plate tectonics of China. *Geological Society of America Bulletin*, 95(3): 295-312
- Zhao ZH, Wang Q, Xiong XL, Zhang HY, Niu HC, Xu JF, Bai ZH and Qiao YL. 2006. Two types of adakites in North Xinjiang, China. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1249-1265 (in Chinese with English abstract)
- Zheng JP, Sun M, Zhao GC, Robinson PT and Wang FZ. 2007. Elemental and Sr-Nd-Pb isotopic geochemistry of Late Paleozoic volcanic rocks beneath the Junggar basin, NW China: Implications for the formation and evolution of the basin basement. *Journal of Asian Earth Sciences*, 29(5-6): 778-794
- Zhou DW, Su L, Jian P, Wang RS, Liu XM, Liu GX and Wang JL. 2004. Zircon U-Pb SHRIMP ages of high-pressure granulite in Yushugou ophiolitic terrane in southern Tianshan and their tectonic implications. *Chinese Science Bulletin*, 49(13): 1415-1419
- Zhou J, Ji JQ, Han BF, Ma F, Gong JF, Xu QQ and Guo ZJ. 2008. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of mafic dykes in North Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 24(5): 997-1010 (in Chinese with English abstract)
- Zhou TF, Yuan F, Tan LG, Fan Y and Yue SC. 2006. Geodynamic significance of the A-type granites in the Sawuer region in west Junggar Xinjiang: Rock geochemistry and SHRIMP zircon age evidence. *Science in China (Series D)*, 49(2): 113-123
- Zhou TF, Yuan F, Fan Y, Zhang DY, Cooke D and Zhao GC. 2008. Granites in the Sawuer region of the West Junggar, Xinjiang Province, China: Geochronological and geochemical characteristics and their geodynamic significance. *Lithos*, 106(3-4): 191-206
- Zhu YF, Xu X, Chen B and Xue YX. 2008. Dolomite marble and garnet amphibolite in the ophiolitic melange in western Junggar: Relics of the Early Paleozoic oceanic crust and its deep subduction. *Acta Petrologica Sinica*, 24(12): 2767-2777 (in Chinese with English abstract)
- 陈家富, 韩宝福, 张磊. 2010. 西准噶尔北部晚古生代两期侵入岩的地球化学、Sr-Nd 同位素特征及其地质意义. *岩石学报*, 26(8): 2317-2335
- 陈石, 郭召杰. 2010. 达拉布特蛇绿岩带的时限和属性以及对西准噶尔晚古生代构造演化的讨论. *岩石学报*, 26(8): 2336-2344
- 陈晔, 孙明新, 张新龙. 2006. 西准噶尔巴尔鲁克断裂东南侧石英闪长岩锆石 SHRIMP U-Pb 测年. *地质通报*, 25(8): 992-994
- 范裕, 周涛发, 袁峰, 谭绿贵, Cooke D, Meffre S, 杨文平, 何立新. 2007. 新疆西准噶尔地区塔斯特岩体锆石 LA-ICP MS 年龄及其意义. *岩石学报*, 23(8): 1901-1908
- 冯乾文, 李锦轶, 刘建峰, 张进, 曲军峰. 2012. 新疆西准噶尔石炭纪晚期地球动力学环境——来自暗色岩墙时空分布的证据. 武汉: 第五届全国构造地质与地球动力学学术研讨会文摘集, 80-81
- 高俊, 龙灵利, 钱青, 张喜, 江拓. 2012. 中亚造山带古生代大陆地壳生长的两阶段模型——以西天山为例. 武汉: 第五届全国构造地质与地球动力学学术研讨会文摘集, 82
- 高山林, 何治亮, 周祖翼. 2006. 西准噶尔克拉玛依花岗岩体地球化学特征及其意义. *新疆地质*, 24(2): 125-130
- 辜平阳, 李永军, 张兵, 佟丽莉, 王军年. 2009. 西准噶尔布特蛇绿岩中辉长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年. *岩石学报*, 25(6): 1364-1372
- 辜平阳, 李永军, 王晓刚, 张洪伟, 王军年. 2011. 西准噶尔达尔布特 SSZ 型蛇绿杂岩的地球化学证据及构造意义. *地质评论*, 57(1): 36-44
- 郭丽爽, 刘玉琳, 王政华, 宋达, 许发军, 苏犁. 2010. 西准噶尔包古图地区地层火山岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学研究. *岩石学报*, 26(2): 471-477
- 韩宝福, 季建清, 宋彪, 陈立辉, 张磊. 2006. 新疆准噶尔晚古生代陆壳垂向生长(1)-后碰撞深成岩浆活动的时限. *岩石学报*, 22(5): 1077-1086
- 韩宝福, 郭召杰, 何国琦. 2010. “钉合岩体”与新疆北部主要缝合带的形成时限. *岩石学报*, 26(8): 2233-2246
- 何国琦, 李茂松, 刘德权. 1994. 中国新疆古生代地壳演化及成矿. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 1-437
- 何国琦, 刘建波, 张越迁, 徐新. 2007. 准噶尔盆地西缘克拉玛依早古生代蛇绿混杂岩带的厘定. *岩石学报*, 23(7): 1573-1576
- 黄建华, 金章东, 李福春. 1999. 洪古勒楞蛇绿岩 Sm-Nd 同位素特征及时代界定. *科学通报*, 44(9): 1004-1007
- 姜勇, 李少贞, 郑启之, 李松龄, 冯新昌, 董富荣. 2003. 西准噶尔达拉布特超镁铁岩岩石化学特征及形成环境. *新疆地质*, 21(2): 260-261
- 金成伟, 张秀棋. 1993. 新疆西准噶尔花岗岩类的时代及其成因. *地质科学*, 28(1): 28-36
- 康磊, 李永军, 张兵, 张洪伟, 王军年. 2009. 新疆西准噶尔夏尔莆岩体岩浆混合的岩相学证据. *岩石矿物学杂志*, 28(5): 423-432
- 雷敏, 赵志丹, 侯青叶, 张宏飞, 许继峰, 陈岳龙, 张本仁, 刘希军. 2008. 新疆达拉布特蛇绿岩带玄武岩地球化学特征: 古亚洲洋与特提斯洋的对比. *岩石学报*, 24(4): 661-672
- 李锦轶, 肖序常. 1999. 对新疆地壳结构与构造演化几个问题的简

附中文参考文献

- 安芳, 朱永峰. 2009. 新疆西准噶尔包古图组凝灰岩锆石 SHRIMP 年龄及其地质意义. *岩石学报*, 25(6): 1437-1445
- 白文吉, 任有祥, 王书蓉, 勒贝尔 L. 1986. 新疆洪古勒楞蛇绿岩岩石学矿物学和铬铁矿成因. *中国地质科学院研究所刊*, 14: 1-49
- 新疆地质矿产局. 1993. 新疆维吾尔自治区区域地质志. 北京: 地质出版社, 1-841
- 陈博, 朱永峰. 2011. 新疆达拉布特蛇绿混杂岩中辉长岩岩石学、微量元素地球化学和锆石 U-Pb 年代学研究. *岩石学报*, 27(6): 1746-1758

- 要评述. 地质科学, 34(4): 405-419
- 李锦轶, 何国琦, 徐新, 李华芹, 孙桂华, 杨天南, 高立明, 朱志新. 2006. 新疆北部及邻区地壳构造格架及其形成过程的初步探讨. 地质学报, 80(1): 148-168
- 李辛子, 韩宝福, 季建清, 李宗怀, 刘志强, 杨斌. 2004. 新疆克拉玛依中基性岩墙群的地质地球化学和 K-Ar 年代学. 地球化学, 33(6): 574-584
- 李辛子, 韩宝福, 李宗怀, 刘志强, 杜蔚. 2005. 新疆克拉玛依中基性岩墙群形成力机制及其构造意义. 地质论评, 51(5): 517-522
- 刘希军, 许继峰, 王树庆, 侯叶青, 白正华, 雷敏. 2009. 新疆西准噶尔达拉布特蛇绿岩 E-MORB 型镁铁质岩的地球化学、年代学及其地质意义. 岩石学报, 25(6): 1373-1389
- 刘志强, 韩宝福, 季建清, 李宗怀. 2005. 新疆阿拉套山东部后碰撞岩浆活动的时代、地球化学性质及其对陆壳垂向增长的意义. 岩石学报, 21(3): 623-639
- 苏玉平, 唐红峰, 侯广顺, 刘丛强. 2006. 新疆西准噶尔达拉布特构造带铝质 A 型花岗岩的地球化学研究. 地球化学, 35(1): 55-67
- 佟丽莉, 李永军, 张兵, 刘静, 庞振甲, 王军年. 2009. 新疆西准噶尔达尔布特断裂带南包古图组安山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年及地质时代. 新疆地质, 27(3): 226-230
- 童英, 王涛, 洪大卫, 韩宝福, 张建军, 史兴俊, 王超. 2010. 北疆及邻区石炭-二叠纪花岗岩时空分布特征及其构造意义. 岩石矿物学杂志, 29(6): 619-641
- 王国灿, 肖龙, 龚一鸣等. 2012. 西准噶尔造山带区域构造演化的几点新认识. 武汉: 第五届全国构造地质与地球动力学学术研讨会文摘集, 120-122
- 王瑞, 朱永峰. 2007. 西准噶尔宝贝金矿地质与容矿火山岩的锆石 SHRIMP 年龄. 高校地质学报, 13(3): 590-602
- 魏荣珠. 2010. 新疆西准噶尔拉巴花岗岩地球化学特征及年代学研究. 岩石矿物学杂志, 29(6): 663-674
- 吴波, 何国琦, 吴泰然, 李会军, 罗红玲. 2006. 新疆布尔根蛇绿混杂岩的发现及其大地构造意义. 中国地质, 33(3): 476-486
- 肖文交, 韩春明, 袁超, 陈汉林, 孙敏, 林寿发, 厉子龙, 毛启贵, 张继恩, 孙枢, 李继亮. 2006. 新疆北部石炭纪-二叠纪独特的构造-成矿作用: 对古亚洲洋构造域南部大地构造演化的制约. 岩石学报, 22(5): 1062-1076
- 肖序常, 汤耀庆, 冯益民. 1992. 新疆北部及其邻区大地构造. 北京: 地质出版社, 1-169
- 徐芹芹, 季建清, 韩宝福, 朱美妃, 储著银, 周晶. 2008. 新疆北部晚古生代中基性岩脉的年代学、岩石学、地球化学研究. 岩石学报, 24(5): 977-996
- 徐新, 何国琦, 李华芹, 丁天府, 刘兴义, 梅绍武. 2006. 克拉玛依蛇绿混杂岩带的基本特征和锆石 SHRIMP 年龄信息. 中国地质, 33(3): 470-475
- 徐学义, 马中平, 夏祖春, 夏林圻, 李向民, 王立社. 2005. 天山石炭-二叠纪后碰撞花岗岩的 Nd、Sr、Pb 同位素源区示踪. 西北地质, 38(2): 1-18
- 尹继元, 袁超, 孙敏, 肖文交, 赵国春, 龙晓平, 耿红燕, 王步云. 2009. 新疆西准噶尔地区赞岐岩 (sanukite) 的地球化学特征、成因机制及其与铜金矿化的关系. 地球化学, 38(5): 413-423
- 尹继元, 袁超, 王毓婧, 龙晓平, 关义立. 2011. 新疆西准噶尔晚古生代大地构造演化的岩浆活动记录. 大地构造与成矿学, 35(2): 278-291
- 尹继元, 袁超, 孙敏, 龙晓平, 邱华宁, 王毓婧, 任江波, 关义立. 2012. 新疆哈图早二叠世富镁闪长岩的时代、地球化学特征和可能的成因机制. 岩石学报, 28(7): 2171-2182
- 袁峰, 周涛发, 谭绿贵, 范裕, 杨文平, 何立新, 岳书仓. 2006. 西准噶尔萨吾尔地区 I 型花岗岩同位素精确定年及其意义. 岩石学报, 22(5): 1238-1248
- 张弛, 黄萱. 1992. 新疆西准噶尔蛇绿岩形成时代和环境的探讨. 地质论评, 38(6): 509-524
- 张洪伟, 康磊, 赵春环, 何晓刚, 李永军. 2011. 西准噶尔夏尔莆岩体岩浆混合的地球化学证据. 西北地质, 44(2): 41-50
- 张继恩, 肖文交, 韩春明, 毛启贵, 敖松坚, 郭谦谦. 2009. 西准噶尔野鸭沟地区褶皱冲断构造的特征及意义. 地质通报, 28(12): 1894-1903
- 张立飞, 洗伟胜, 孙敏. 2004. 西准噶尔紫苏花岗岩成因岩石学研究. 新疆地质, 22(1): 36-42
- 张元元, 郭召杰. 2010. 准噶尔北部蛇绿岩形成时限新证据及其东、西准噶尔蛇绿岩的对比研究. 岩石学报, 26(2): 421-430
- 赵振华, 王强, 熊小林, 张海洋, 牛贺才, 许继峰, 白正华, 乔玉楼. 2006. 新疆北部的两类埃达克岩. 岩石学报, 22(5): 1249-1265
- 周晶, 季建清, 韩宝福, 马芳, 龚俊峰, 徐芹芹, 郭召杰. 2008. 新疆北部基性岩脉⁴⁰Ar/³⁹Ar 年代学研究. 岩石学报, 24(5): 997-1010
- 周涛发, 袁峰, 范裕, 谭绿贵, 岳书仓. 2006. 西准噶尔萨吾尔地区 A 型花岗岩的地球动力学意义: 来自岩石地球化学和锆石 SHRIMP 定年的证据. 中国科学(D 辑), 36(1): 39-48
- 朱永峰, 徐新, 陈博, 薛云兴. 2008. 西准噶尔蛇绿混杂岩中的白云石大理岩和石榴角闪岩: 早古生代残余洋壳深俯冲的证据. 岩石学报, 24(12): 2767-2777