

科克苏-穹库什太古生代构造-岩浆作用及其对西南天山造山时代的约束*

王博¹ 舒良树¹ Michel FAURE² Dominique CLUZEL² Jacques CHARVET²

WANG Bo¹, SHU LiangShu¹, Michel FAURE², Dominique CLUZEL² and Jacques CHARVET²

1. 南京大学地球科学系, 南京 210093

2. 法国奥尔良大学地球科学研究所, 奥尔良 45067, 法国

1. Department of Earth Sciences, Nanjing 210093, China

2. URM CNRS 6113 Institut des Sciences de la Terre d'Orleans 45067, France

2007-03-07 收稿, 2007-05-26 改回.

Wang B, Shu LS, Faure M, Cluzel D and Charvet J. 2007. Paleozoic tectonism and magmatism of Kekesu-Qiongkushitai section in southwestern Chinese Tianshan and their constraints on the age of the orogeny. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1354–1368

Abstract The Tianshan is a polyphase collision-accretion orogenic belt, its ages of orogeny is an issue in hot debate. The Kekesu-Qiongkushitai section of southwestern Chinese Tianshan experienced complicated deformations including mainly top-to-the-north thrust and NE-SW extending ductile strike-slip faulting. This section can be subdivided into three lithotectonic units, namely Yili magmatic arc, Yili Proterozoic basement and HP metamorphic complex. In the field, granodiorite of Yili arc intrudes in greenschist facies metamorphic rocks cutting foliations of greenschists. Zircon U-Pb LA-ICPMS dating yields 341 ± 6 Ma and 338 ± 8 Ma for K-granite from Kekesu River, and 313 ± 4 Ma for biotite-bearing granodiorite from Qiongkushitai, respectively. Biotite from granodiorite yields a $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ plateau age at 263.4 ± 0.6 Ma, revealing an important thermal overprint in Permian. Geochemistry of granodiorite indicates that it belongs to calc-alkaline series, with significant low compositions in Nb and Ta, and enrichment in Rb, Ba and Th. These features are consistent with the geochemical components of arc-type magmatic rocks. Taking into account the previous results on HP metamorphic and magmatic rocks in west Tianshan areas, this paper proposes that the subduction-collision events in southwestern Chinese Tianshan occurred before Late Carboniferous, post-collisional ductile strike-slip faulting confirms that the collisional orogenic processes ended in Permian for the southwestern Chinese Tianshan belts.

Key words Tianshan Belt, Granite, Paleozoic, Zircon U-Pb dating, Ar-Ar dating, Geochemistry

摘要 天山造山带是古生代多期碰撞增生作用的产物,其确切的造山时代是当前争议较多的热点问题。分布在西南天山的科克苏-穹库什太剖面经历了复杂的构造变形,最明显的两期变形事件分别为朝北的推覆作用和 NE-SW 韧性走滑作用。本剖面可分为伊犁岩浆岛弧、伊犁结晶基底、高压变质杂岩三个岩石-构造单元。野外可见黑云母花岗闪长岩侵入到绿片岩相变质岩中,岩脉切穿绿片岩中面理构造。通过锆石 U-Pb LA-ICPMS 测年,科克苏剖面钾长花岗岩的年龄为 341 ± 6 Ma 和 338 ± 8 Ma, 穹库什太黑云母花岗闪长岩的年龄为 313 ± 4 Ma。其中,花岗闪长岩发生了黑云母定向排列,通过对黑云母进行 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 测年,获得坪年龄为 263.4 ± 0.6 Ma, 表明该花岗闪长岩受过后期热事件的干扰。地球化学分析表明,黑云母花岗闪长岩属于钙碱性系列, Nb 和 Ta 含量低而 Rb, Ba 和 Th 含量很高,与俯冲作用有关的岛弧岩浆岩地球化学组成非常相似。结合前人对该地区高压变质岩、花岗岩和火山岩的研究成果,本文提出,西南天山俯冲-碰撞造山作用发生在晚石炭世之前,研究区后碰撞区域走滑作用标志着西南天山碰撞造山作用在二叠纪之前全部结束。

关键词 天山造山带; 花岗岩; 古生代; 锆石 U-Pb 定年; $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年; 地球化学

中图法分类号 P588.121; P597.3

* 国家地质调查局项目(编号 1212010611806)及国家自然科学基金(编号 40573038)资助。

第一作者简介: 王博,男,1978年生,博士,从事构造地质学与大地构造学方面的研究, E-mail: wangbo1996@nju.org.cn

1 引言

天山造山带近东西向横亘于新疆中北部,东起甘新交界,向西延伸至哈萨克斯坦、吉尔吉斯斯坦和乌兹别克斯坦境内,是“中亚造山带”(Burtman, 1975; Coleman, 1989; Zonenshain *et al.*, 1990; Jahn *et al.*, 2000; Brookfield, 2000; Buckman and Aitchison, 2004)或“阿尔泰构造拼贴体(Altoids)”(Sengör *et al.*, 1993; Sengör and Natal'in, 1996)的重要组成部分。天山造山带经历了古生代多块体之间的碰撞、增生作用(Coleman, 1989; Shi *et al.*, 1994; Gao *et al.*, 1998; Chen *et al.*, 1999; Shu *et al.*, 2000, 2002; Xiao *et al.*, 2004)以及中、新生代以来的陆内变形与再造山作用(Molnar and Tapponnier, 1975; Tapponnier and Molnar, 1979; Nelson *et al.*, 1987; Avouac *et al.*, 1993; Hendrix *et al.*, 1994; Allen *et al.*, 1999; Burchfiel, *et al.*, 1999; Poupinet *et al.*, 2002; Shu *et al.*, 2003; Charreau *et al.*, 2005)。

天山地区分布有多条蛇绿混杂岩带,它们记录了天山造山带古生代洋陆格局转换和地壳侧向增生的过程。其中天山北部巴音沟蛇绿混杂岩带属于“北天山缝合带”,天山南部哈尔克山一带高压变质岩带和蛇绿混杂岩带被认为是“南天山缝合带”,前者为“北天山洋盆”在晚古生代俯冲关闭后形成的残片,后者为“南天山洋”在早古生代俯冲碰撞的产物(Windley *et al.*, 1990; 肖序常等, 1992; Allen *et al.*, 1993; Gao *et al.*, 1998)。对天山古生代造山作用确切时代的准确限定,是正确认识天山乃至整个中亚造山带构造演化的关键,因此越来越受到国内外学者的重视。目前,关于这一问题仍然存在多种不同的认识。

鉴于西天山蓝片岩中蓝闪石或多硅白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄415~350Ma(肖序常等, 1992; 汤耀庆等, 1995; Gao *et al.*, 2000; Gao and Klemd, 2003; 刘斌等, 2003),一些学者认为天山南部碰撞造山作用发生在晚泥盆世-早石炭世之前(Windley *et al.*, 1990; Allen *et al.*, 1993; 车自成等, 1994; 夏林圻等, 2004; Xia *et al.*, 2004a);但另外一些学者根据高压变质岩带中榴辉岩和蓝片岩Sm-Nd等时线年龄、白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄以及蛇绿混杂岩带中晚泥盆-早石炭世放射虫硅质岩等资料,认为天山南部造山时代应为早石炭世(王宝瑜等, 1994; 高长林等, 1995; Gao *et al.*, 1998; 李向东等, 2004; 肖序常等, 2004)或晚石炭世-早二叠世(Shi *et al.*, 1994; 何国琦等, 1994; 刘本培等, 1996; Chen *et al.*, 1999; Zhao *et al.*, 2000; Xiao *et al.*, 2004; 高俊等, 2006)。近年来,有研究者在西天山南部高压变质岩和蛇绿混杂岩中分别获得了一些锆石U-Pb年代学和古生物学的资料,表明晚二叠世时天山西南部还存在洋壳(Li *et al.*, 2002, 2005),从而提出天山地区洋壳最终关闭造山的时代为三叠纪(张立飞等, 2005; Zhang *et al.*, 2007)。

由此可见,天山造山带的形成时代,特别是西天山南部的造山时代仍然是一个争议的课题。关于造山时代的厘定,除了直接对蛇绿岩、高压-超高压变质岩等进行测年以外,花岗岩和火山岩等造山作用的产物也可以用来获取准确的同位素年龄。本文将通过对西天山南部科克苏河和穹库什太剖面花岗岩类的岩浆结晶年龄和变形年龄的测定、分析,结合前人在本地区已获得的资料,讨论西天山造山作用的时代。

2 研究区地质构造特征

传统上,沿乌鲁木齐-库尔勒一带,天山造山带被一分为二,东部为东天山,西部为西天山。从地质角度,天山通常也被分为北天山、伊犁-中天山(地块)和南天山三部分(图1插图)。本文所研究的科克苏-穹库什太剖面位于西天山伊犁地块南缘至哈尔克山北麓、距独库公路西测约150km处(图1)。该剖面跨越了多个不同的岩石构造和变质变形单元,是研究天山古生代构造演化的重要窗口。经过野外实地考察,本剖面从北向南依次可分为三个岩石-构造单元:伊犁岩浆岛弧、元古宙构造基底和高压变质杂岩(图1,图2)。

2.1 伊犁岩浆岛弧

在科克苏河剖面的北段,从特克斯到温泉北(图2),出露的地层主要为石炭系大哈拉军山组(C1d)和阿克沙克组(C1a)火山岩和陆源碎屑岩(新疆地矿局, 1979, 1993)。火山岩主要由中基性玄武安山岩、中性安山岩、粗面安山岩和酸性流纹岩、英安岩等组成,并伴有大量同时代侵入岩。侵入岩主要为辉长岩、花岗闪长岩、英云闪长岩、钾长石花岗岩和花岗质岩脉。沉积岩则主要为凝灰岩、砂砾岩、砂岩、粉砂岩、薄层灰岩和泥质岩。辉长岩和部分花岗岩发生了不同程度的糜棱岩-超糜棱岩化,糜棱面理朝SE方向陡立倾斜,剪切面上发育有ENE-WSW向近水平的拉伸线理和矿物线理构造(图2)。详细的运动学研究表明,这些韧性变形构造代表一期显著的右旋走滑事件(Wang *et al.*, 2007b)。另外,部分辉长岩和花岗闪长岩中还发育有SE向中等倾伏的线理构造,指示一期朝北的剪切推覆作用(Wang *et al.*, 2007b)。

根据现有的新疆地质图,“石炭纪”火山-沉积岩层和海西中期侵入岩体沿NE向分布,向西经昭苏跨国界延伸至吉尔吉斯斯坦,向东经穹库什太至那拉提及其以东。同时,类似的岩石组合也广泛分布于博罗霍努山南缘。近年来,很多高精度地球化学、同位素和年代学研究成果陆续发表,其中伊犁南缘特克斯-新源-那拉提一带火山岩属于钙碱性系列,形成于板块俯冲有关的活动大陆边缘环境(朱永峰等, 2005, 2006a, 2006b; 邵铁全等, 2006; 朱志新等, 2006),火山岩的锆石U-Pb年龄为354~309Ma(朱永峰等, 2005, 2006b; Wang *et al.*, 2006a),那拉提二长花岗岩的锆石SHRIMP U-Pb年龄为436Ma和370~366Ma(朱志新等, 2006)。特克

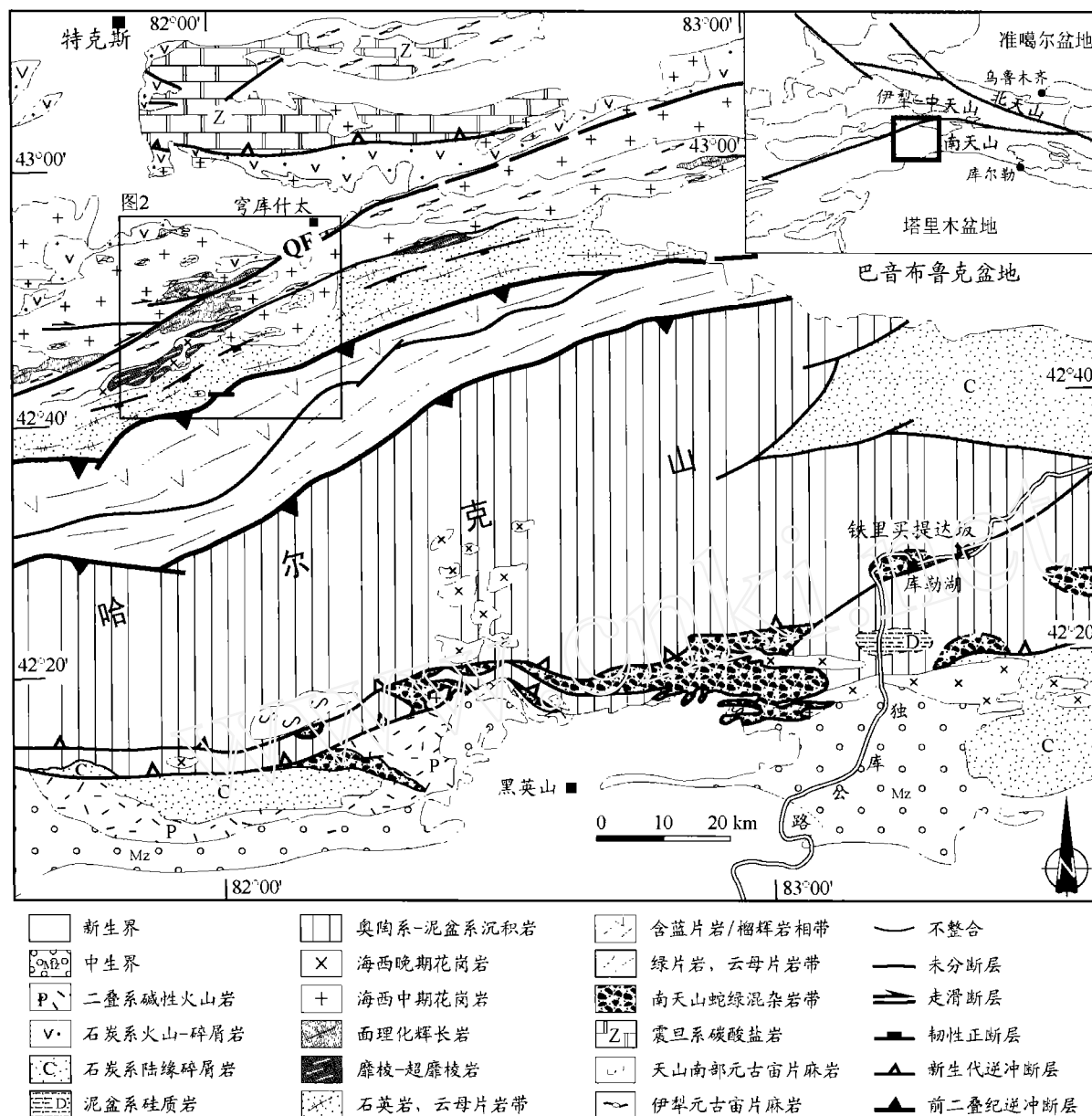


图1 天山西南部地质构造简图(据新疆地矿局(1979,1983,1993)和高俊(2000)改编)。QF为普布拉克断裂

Fig. 1 Geological and structural sketch map of southwestern Chinese Tianshan Belt (modified from XBGMR, 1979, 1983, 1993; Gao, 2000)

斯县南普布拉克基性杂岩体具有典型岛弧岩浆的地球化学特征(张作衡等,2006)。昭苏北部火山岩的地球化学特征表明其形成于大陆边缘弧后拉张背景(钱青等,2006),花岗岩则形成于陆缘岛弧环境,锆石 U-Pb 年龄为 361 ~ 358Ma (Wang *et al.*, under review)。另外,伊犁中部阿吾拉勒地区石炭纪火山岩(李注苍等,2006;王博等,2006;Wang *et al.*, 2007c)与伊犁北部博罗霍努山岩浆岩(姜常义等,1995;邵铁全等,2006)也形成于陆缘岛弧环境。

值得提出的是,伊犁地区在晚石炭-早二叠世末(300 ~ 260Ma)发生了从碰撞造山到后碰撞伸展的重要转换事件

(赵振华等,2003),表现为浅侵位和 A 型花岗岩浆作用(张增杰等,2002)。也有少部分学者认为,伊犁地区所有石炭-二叠纪岩浆岩均为后碰撞大陆裂谷或地幔柱作用的产物(Xia *et al.*, 2003, 2004a; 夏祖春等,2005)。

2.2 元古宙构造基底

岛弧火山-沉积岩层不整合覆盖在震旦系碳酸盐岩之上,野外二者多以断层接触(图1)。碳酸盐岩主要为结晶灰岩、大理岩和白云岩,灰岩中富含叠层石(新疆地质矿产局,1979)。这些岩层区域上被划归为穹库什太群和特克

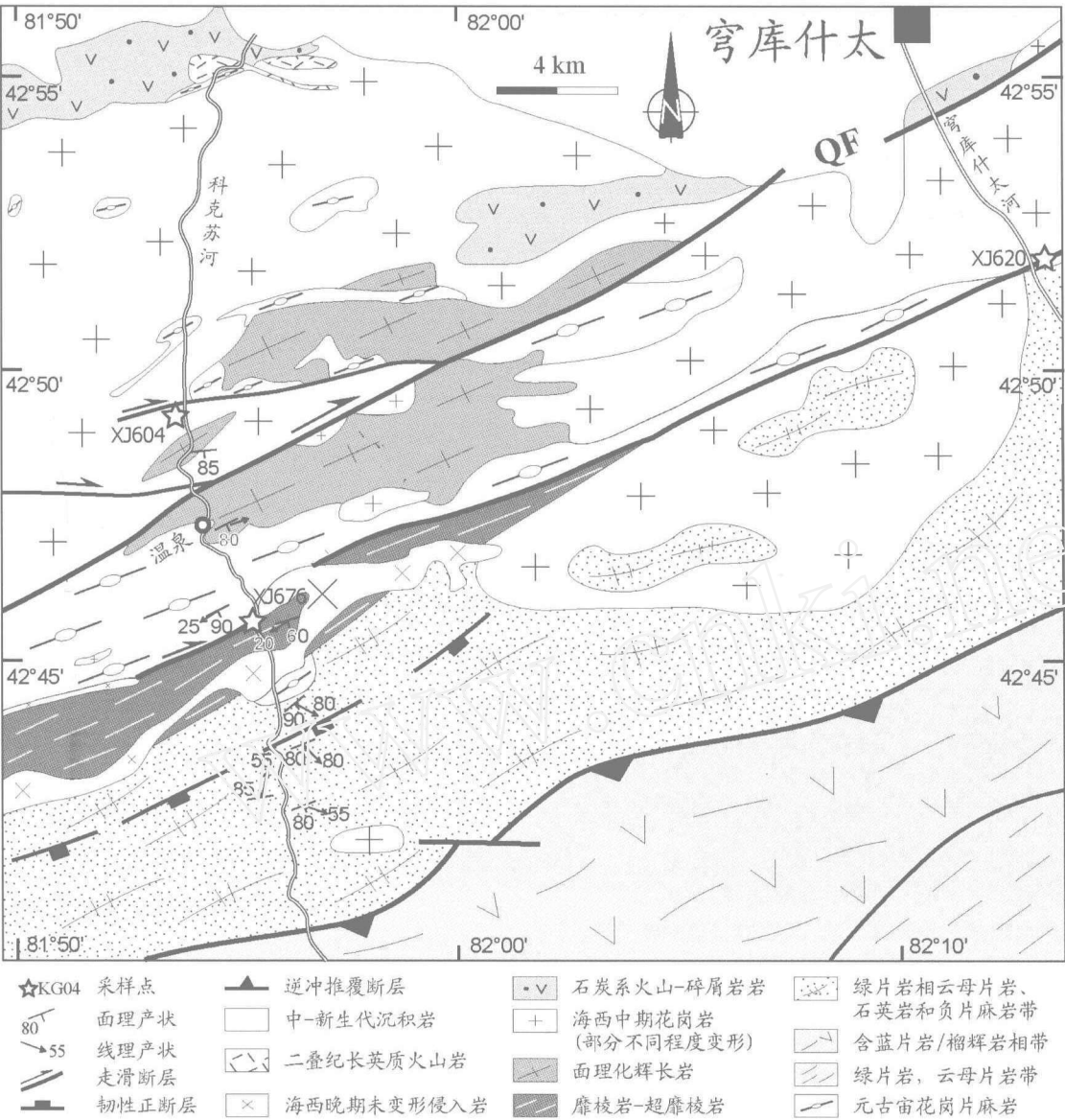


图2 西天山南部科克苏-穹库什太剖面构造简图
Fig. 2 Structural sketch map of Kekesu-Qiongkushitai section in southwestern Chinese Tianshan

斯群。张万仁等(2006)对该区碳酸盐岩进行了研究,认为它们形成于古亚洲洋发育阶段的“构造碳酸盐台地”沉积环境。另外,元古宙片麻岩也广泛分布于特克斯地区,向南到温泉一带也有零星分布(图1,图2),其中木扎尔特群花岗片麻岩的锆石 U-Pb 年龄为 $707 \pm 13\text{Ma}$ (陈义兵等,2000)。花岗片麻岩向北东断续延伸至那拉提南侧拉尔墩达坂(图1;胡霁琴等,1999),其中锆石 U-Pb 年龄为 $882 \pm 33\text{Ma}$ (陈义兵等,1999)。

另外,沿科克苏河地质点 $N42^{\circ}45'$ 以南,发育有二云母片岩、含云母石英岩和黑云母片麻岩(新疆地质矿产局,1979; Gao *et al.*, 1995; 汤耀庆等,1995)(图1)。部分片麻岩中可见眼球状长石斑晶和椭圆体状黑云母残留体,表明花岗质岩石曾经侵入到碎屑岩中,并发生了角闪岩相变质作

用。关于这些角闪岩相变质岩的确切年龄,目前尚无研究结果,它们可能为伊犁晚古生代岛弧南缘的前寒武纪或早古生代基底岩层,在后期经历了多期强烈、韧性变形作用,局部发生了超糜棱岩化。

在片麻岩、云母片岩和石英片岩中,发育有 SW 向倾斜的剪切面理,面理面上有近 N-S 向延伸的拉伸线理和矿物线理(图2)。在花岗片麻岩中,钾长石斑晶和黑云母集合体构成主要线形构造,线理倾伏角从 20° 到 60° 不等,大部分为 50° 左右,少数达 80° 。这些线状构造要素与超糜棱岩化辉长岩的线理可能属于同一期变形事件。宏观和显微不对称运动学组构指示从南向北逆冲的运动动向(Wang *et al.*, 2007b)。

2.3 高压变质杂岩体

在哈尔克山北麓,发育有一条宽约 20km, 长达 200km 的高压变质岩带(图 1),带内主要产出有绿片岩、蓝片岩、榴辉岩和少量大理岩(Gao *et al.*, 1995; 汤耀庆等, 1995; Gao *et al.*, 1998)。该带向南西延伸至长阿吾孜、阿克雅孜一带(Klemd, 2003; Klemd *et al.*, 2002; Zhang *et al.*, 2002, 2003a; 2003b), 并与哈萨克斯坦(Dobretsov *et al.*, 1987; Tagiri *et al.*, 1995)和塔吉克斯坦(Volkova and Budanov, 1999)境内的蓝片岩带相连,向北东则消失于巴音布鲁克盆地西侧(图 1)。部分学者在中天山库米什地区也报道过蓝片岩残迹(高俊等, 1993),但目前尚未见进一步研究成果。

根据前人对高压变质岩矿物学、地球化学及其原岩性质的研究(Gao *et al.*, 1995; 汤耀庆等, 1995),该变质带可分为两个亚单元:蓝片岩相带和绿片岩相带(图 1, 2)。蓝片岩相带主要发育有云母片岩、含云母石英片岩以及高压变质的基性岩和大理岩。蓝片岩主要以数米级大小的块体、透镜体、薄层和布丁构造产出于绿片岩相泥质岩层中。在长阿吾孜一带还发育有榴辉岩相变质岩的透镜体(Gao *et al.*, 1999; Gao and Klemd, 2003)。绿片岩带分布在蓝片岩相带南北两侧,主要由绿片岩、石英片岩、云母片岩和少量大理岩组成,没有蓝片岩发育。

在绿片岩相带和蓝片岩相带中,变质沉积岩具有相似的原岩特征,原岩主要为泥质粘土岩、钙质-硅质页岩、硅质岩和火山碎屑杂砂岩等(Gao *et al.*, 1995; 汤耀庆等, 1995)。变质基性岩的岩石学、地球化学研究表明,其原岩与洋中脊玄武岩和洋底拉斑玄武岩相似。另外,由于变质基性火山岩同时还具有洋岛拉斑玄武岩的特征,因此一些学者还提出了一种类似海山的构造环境(Gao *et al.*, 1995; Volkova and Budanov, 1999)。由此可见,这些高压变质的岩石既包括洋壳物质,也包括洋底深海沉积物,因而代表一个洋盆环境,该洋盆习惯上被称为“南天山洋”(肖序常等, 1992; 汤耀庆等, 1995; Gao *et al.*, 1995, 1998; 高俊等, 1997)。鉴于高压变质带与伊犁岩浆岛弧在空间上的匹配关系,一些学者认为南天山洋向北俯冲在伊犁-中天山地块之下形成了伊犁活动大陆边缘(Gao *et al.*, 1995, 1998; Gao and Klemd, 2003; 朱永峰等, 2005)。

但运动学研究表明,钠长石-云母片岩和云母石英片岩发育有 SW 向陡立的面理和近垂直线理构造(图 2)。在绿片岩相变质沉积岩和基性岩中,还常见层间 A 型褶皱、流变褶皱、布丁状石英脉等构造,其中褶皱轴面平行于面理,从褶皱形态可以推断出南上北下的剪切应力方向。在显微镜下,已交代蚀变的不对称长石斑晶及压力影和 S 型云母鱼构造也指示了从南向北的运动动向(Gao *et al.*, 1995; Wang *et al.*, 2007b)。

高压变质岩经历了 2.0 ± 0.1 GPa 和 $550 \pm 50^\circ\text{C}$ 的高峰变质作用过程(Klemd *et al.*, 2002; Gao and Klemd, 2003;

Klemd, 2003)。另有学者认为,蓝片岩和榴辉岩经历了不同的峰期变质条件,并提出了发生在 2.5 GPa 甚至 5.0 GPa 的超高压变质作用(Wei *et al.*, 2003; Zhang *et al.*, 2003a, 2003b)。在科克苏河一带,蓝片岩相变质岩也经历了后期绿片岩相退变质作用(Gao and Klemd, 2003; Klemd *et al.*, 2005)。

前人对该高压变质岩带进行了大量年代学研究。汤耀庆等(1995)从穹库什太蓝片岩多硅白云母中获得 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄 419 ~ 415 Ma, 从科克苏蓝片岩中获得蓝闪石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄 345 Ma; Gao *et al.* (2000) 在阿克雅孜蓝片岩中获得蓝闪石和多硅白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄分别为 401 ~ 344 Ma 和 381 ~ 331 Ma; 肖序常等(1992)从长阿吾孜蓝片岩中获得蓝闪石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄 351 Ma; Gao and Klemd (2003) 从阿克雅孜榴辉岩中获得绿辉石-蓝闪石-石榴石-全岩和蓝闪石-石榴石的 Sm-Nd 等时线年龄 346 ~ 343 Ma; 高俊等(2006)从该榴辉岩中获得蓝闪石和白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄分别为 345 Ma 和 334 Ma, 而含石榴蓝闪石云母片岩中白云母的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄为 317 ~ 310 Ma, 后者与 Klemd *et al.* (2005) 在退变质云母片岩中获得的白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄 (328 ~ 311 Ma) 和白云母-全岩 Rb-Sr 等时线年龄 (313 ~ 302 Ma) 基本一致; Wang *et al.* (2007b) 也在科克苏剖面退变质的蓝片岩和绿片岩中获得白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄 331 ~ 316 Ma。另外, Zhang *et al.* (2007) 从榴辉岩中获得锆石 U-Pb SHRIMP 年龄 290 ~ 280 Ma 和 230 ~ 220 Ma。

3 样品采集、处理与测试

进行测年的岩石分别为采自科克苏剖面的钾长花岗岩和穹库什太剖面的黑云母花岗岩闪长岩。红色钾长花岗岩大多没有发生变形(XJ604),但在走滑剪切带内则出现明显的超糜棱岩化(XJ676),并以陡立的面理和不对称长石眼球为特征。黑云母花岗岩(XJ620)中常见铁镁质岩浆包体,岩石发生微弱变形,黑云母含量约 5% ~ 10%, 出现定向排列(图 3c),构成近水平的矿物线理。在穹库什太剖面,可见花岗岩与绿片岩的侵入接触关系(图 3a),花岗岩脉切割绿片岩中面理构造(图 3b)。花岗岩中锆石矿物一般分布在黑云母、角闪石等暗色矿物的边部,或以包体形态沿暗色矿物的解理方向生长。

将岩石首先压碎成 500 μm 以下的颗粒,用清水冲洗、低温(40°C)烘干后,在双目镜下手挑选出 0.3 ~ 2 mm 大小的黑云母单颗粒(20g),再经过重液和磁分选,最后在双目镜下挑选锆石单矿物颗粒(30 余颗),分别用于 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 激光探针和锆石 U-Pb 同位素分析。

锆石颗粒大多呈自形、无色(个别边部呈黄色)。除少数颗粒外,一般没有分带和破裂纹。从每个样品中选择颗粒较大、晶形好、透明度高的锆石颗粒 20 颗,在澳大利亚塔斯马尼亚(Tasmania)大学用 LA-ICPMS(Hewlett Packard HP 4500)

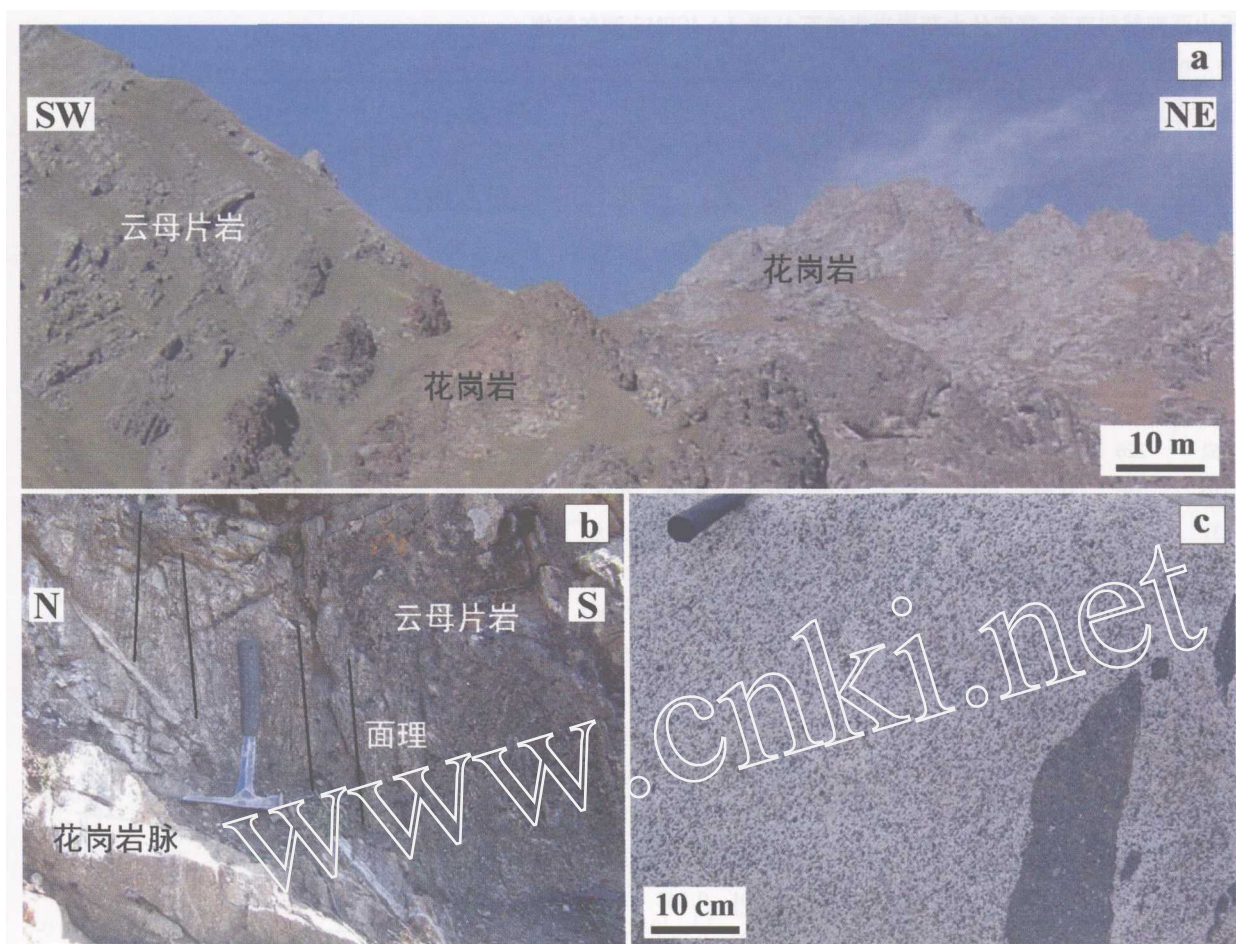


图3 穹库什太剖面花岗岩野外产状特征

a-花岗岩与绿片岩的侵入接触关系; b-花岗岩脉切割绿片岩面理; c-花岗岩闪长岩中黑云母定向排列和包体

Fig.3 Field occurrence of granites in Qiongkushitai section, southwestern Chinese Tianshan a, granites intruding in greenschist; b, granitic dykes cutting the foliation of greenschist; c, enclaves and oriented biotites in granodiorite

方法进行 U-Pb 定年测试。质谱仪所配激光为 213nm NewWave Merchantek UP213 Nd-YAG, 详细的测试过程参照 Meffre *et al.* (2004)。

黑云母在法国雷恩(Rennes)大学 Internal Geophysics 实验室的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 激光探针(CO_2 Synrad)中分步加热分析。实验中,黑云母颗粒封装在 $11\text{mm} \times 11\text{mm} \times 0.5\text{mm}$ 大小的铝箔封袋中,封袋排列放置在固定的照射装置中,并且在每 8~10 个样品之间放置一个电通量控制器。详细的仪器参数和分步加热过程见 Ruffet *et al.* (1991, 1995)。样品测试在 Map215 质谱仪中进行。

4 花岗岩测年结果

4.1 锆石 U-Pb 测年结果

每个样品中测试的单颗粒矿物均为 12 颗,各样品分析结果如表 1 所示。样品 XJ604 的一颗榍石矿物被误认为锆石,因含有较高的 Pb 含量,产生了一个过老的年龄。另外两

颗锆石由于过高的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 比值而远离谐和线。其余 9 颗锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄在误差范围内比较一致,其加权平均值为 $341 \pm 6\text{Ma}$ (表 1,图 4)。由于所有锆石的 Th, U 含量较高($\text{Th} > 130 \times 10^{-6}$, $\text{U} > 170 \times 10^{-6}$, 大多数锆石 $\text{U} > 200 \times 10^{-6}$),Th/U 比值明显大于 0.1 (介于 0.71~1.19 之间),表明这些锆石均为岩浆成因(Vavra *et al.*, 1996)。因此这一年龄可代表花岗岩的结晶年龄。

样品 XJ676 中的大多数锆石颗粒在分析过程中,不同程度地出现了 Pb 丢失,导致 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 比值偏高。根据 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄分布,可以将分析点分为三组(表 1,图 4)。点 6~10 在分析过程中 Pb 丢失不明显,Th/U 比值范围为 0.54~1.48, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄也非常一致,加权平均年龄为 $338 \pm 8\text{Ma}$ (2σ , MSWD=0.52),可以解释为钾长花岗岩的成岩年龄;点 11~12 的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 385Ma 和 394Ma,明显高于前 5 个点的年龄,可能代表老的继承锆石;点 1~5 在整个分析过程均有 Pb 丢失,锆石 U 含量非常高,且变化大($380 \times 10^{-6} \sim 7770 \times 10^{-6}$),Th/U 比值较低(0.07~0.22),对

表1 天山西南部科克苏-穹库什太花岗岩类锆石 U-Pb LA-ICPMS 测年数据

Table 1 Zircon U-Pb LA-ICPMS analysis results of the granitoids from Kekesu-Qiongkushitai sections, southwestern Chinese Tianshan

| 分析点 | 元素含量 | | 原子比率 | | | | | | | | 年龄 (Ma) | | | | | | isc. (%) |
|---------------------|-------------------------|------------------------|------|-------------------------------------|------|-------------------------------------|-------|--------------------------------------|-------|-------------------------------------|---------|-------------------------------------|------|--------------------------------------|-----|------|-------------|
| | Th x10 ⁻⁶ | U x10 ⁻⁶ | Th/U | ²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U | 1σ | ²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U | 1σ | ²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb | 1σ | ²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U | 1σ | ²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U | 1σ | ²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb | 1σ | | |
| 科克苏钾长花岗岩 XJ604 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 166 | 175 | 0.95 | 0.89 | 0.05 | 0.054 | 0.001 | 0.118 | 0.007 | 647 | 30 | 341 | 5.5 | 1921 | 104 | 6.4 | |
| 2 | 201 | 222 | 0.91 | 0.52 | 0.04 | 0.052 | 0.001 | 0.074 | 0.006 | 422 | 26 | 324 | 5.7 | 1029 | 153 | 6.0 | |
| 3 | 198 | 254 | 0.78 | 0.37 | 0.02 | 0.052 | 0.001 | 0.051 | 0.003 | 317 | 16 | 327 | 4.1 | 250 | 135 | 4.3 | |
| 4 | 179 | 209 | 0.86 | 0.39 | 0.02 | 0.053 | 0.001 | 0.055 | 0.004 | 332 | 18 | 334 | 4.4 | 409 | 148 | 4.6 | |
| 5 | 315 | 281 | 1.12 | 0.45 | 0.02 | 0.054 | 0.001 | 0.061 | 0.003 | 378 | 17 | 339 | 4.2 | 624 | 113 | 4.3 | |
| 6 | 162 | 226 | 0.71 | 0.40 | 0.03 | 0.054 | 0.001 | 0.056 | 0.004 | 345 | 19 | 342 | 4.7 | 437 | 143 | 5.0 | |
| 7 | 210 | 230 | 0.91 | 0.42 | 0.02 | 0.055 | 0.001 | 0.055 | 0.003 | 354 | 17 | 343 | 5.2 | 422 | 137 | 5.4 | |
| 8 | 131 | 168 | 0.78 | 0.40 | 0.03 | 0.055 | 0.001 | 0.053 | 0.004 | 340 | 22 | 342 | 4.8 | 315 | 171 | 5.1 | |
| 9 | 245 | 206 | 1.19 | 0.41 | 0.03 | 0.055 | 0.001 | 0.055 | 0.004 | 346 | 20 | 346 | 4.9 | 400 | 146 | 5.1 | |
| 10 | 268 | 310 | 0.86 | 0.42 | 0.02 | 0.056 | 0.001 | 0.056 | 0.003 | 356 | 15 | 350 | 3.8 | 454 | 120 | 4.0 | |
| 11 | 476 | 341 | 1.39 | 0.50 | 0.02 | 0.056 | 0.001 | 0.064 | 0.003 | 412 | 17 | 354 | 4.2 | 757 | 104 | 4.4 | |
| 12 | — | — | — | 6.76 | 0.37 | 0.117 | 0.004 | 0.471 | 0.029 | 2080 | 49 | 716 | 23.6 | 4153 | 93 | 47.9 | |
| 科克苏钾长花岗岩 XJ676 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 960 | 4326 | 0.22 | 0.34 | 0.02 | 0.041 | 0.001 | 0.057 | 0.002 | 295 | 12 | 257 | 6 | 510 | 87 | 6 | |
| 2 | 567 | 7770 | 0.07 | 0.37 | 0.01 | 0.042 | 0.001 | 0.063 | 0.002 | 317 | 7 | 263 | 3 | 702 | 56 | 3 | |
| 3 | 279 | 376 | 0.74 | 0.46 | 0.04 | 0.046 | 0.001 | 0.070 | 0.007 | 381 | 29 | 292 | 9 | 939 | 194 | 9 | |
| 4 | 1039 | 4691 | 0.22 | 0.43 | 0.03 | 0.048 | 0.001 | 0.062 | 0.004 | 367 | 19 | 301 | 8 | 677 | 129 | 8 | |
| 5 | 455 | 479 | 0.95 | 0.34 | 0.04 | 0.048 | 0.002 | 0.050 | 0.007 | 296 | 34 | 300 | 13 | 212 | 315 | 14 | |
| 6 | 40 | 74 | 0.54 | 0.41 | 0.05 | 0.053 | 0.002 | 0.068 | 0.009 | 350 | 36 | 334 | 11 | 864 | 268 | 12 | |
| 7 | 620 | 2666 | 0.23 | 0.49 | 0.02 | 0.054 | 0.001 | 0.066 | 0.003 | 406 | 16 | 338 | 8 | 821 | 94 | 8 | |
| 8 | 654 | 496 | 1.32 | 0.44 | 0.04 | 0.054 | 0.001 | 0.058 | 0.006 | 370 | 30 | 340 | 8 | 515 | 216 | 8 | |
| 9 | 182 | 250 | 0.73 | 0.53 | 0.06 | 0.055 | 0.002 | 0.064 | 0.007 | 432 | 42 | 345 | 13 | 739 | 241 | 13 | |
| 10 | 4212 | 2853 | 1.48 | 0.52 | 0.03 | 0.056 | 0.001 | 0.068 | 0.003 | 428 | 17 | 351 | 8 | 862 | 92 | 8 | |
| 11 | 497 | 1230 | 0.40 | 0.48 | 0.02 | 0.061 | 0.001 | 0.054 | 0.002 | 396 | 16 | 385 | 6 | 388 | 102 | 6 | |
| 12 | 279 | 713 | 0.39 | 0.51 | 0.04 | 0.063 | 0.002 | 0.058 | 0.004 | 422 | 25 | 394 | 12 | 546 | 161 | 12 | |
| 穹库什太黑云母花岗岩闪长岩 XJ620 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 33 | 72 | 0.45 | 0.39 | 0.04 | 0.048 | 0.001 | 0.064 | 0.007 | 337 | 33 | 300 | 8.1 | 742 | 233 | 8.4 | |
| 2 | 40 | 81 | 0.50 | 0.32 | 0.04 | 0.049 | 0.001 | 0.053 | 0.006 | 283 | 28 | 307 | 6.9 | 334 | 264 | 7.2 | |
| 3 | 50 | 115 | 0.43 | 0.32 | 0.03 | 0.049 | 0.001 | 0.050 | 0.005 | 280 | 23 | 307 | 6.4 | 204 | 231 | 6.7 | |
| 4 | 58 | 132 | 0.44 | 0.33 | 0.03 | 0.049 | 0.001 | 0.050 | 0.004 | 286 | 21 | 309 | 6.0 | 217 | 200 | 6.2 | |
| 5 | 74 | 188 | 0.39 | 0.37 | 0.03 | 0.050 | 0.001 | 0.056 | 0.004 | 322 | 20 | 312 | 5.0 | 438 | 160 | 5.2 | |
| 6 | 53 | 108 | 0.49 | 0.33 | 0.03 | 0.049 | 0.001 | 0.052 | 0.005 | 287 | 26 | 311 | 5.7 | 274 | 242 | 6.1 | |
| 7 | 67 | 123 | 0.55 | 0.40 | 0.03 | 0.050 | 0.001 | 0.060 | 0.004 | 340 | 22 | 316 | 5.0 | 588 | 160 | 5.3 | |
| 8 | 76 | 168 | 0.45 | 0.35 | 0.02 | 0.050 | 0.001 | 0.053 | 0.004 | 306 | 18 | 314 | 4.6 | 326 | 160 | 4.8 | |
| 9 | 98 | 238 | 0.41 | 0.37 | 0.02 | 0.050 | 0.001 | 0.057 | 0.004 | 320 | 18 | 315 | 4.8 | 485 | 152 | 5.0 | |
| 10 | 90 | 167 | 0.54 | 0.40 | 0.03 | 0.051 | 0.001 | 0.060 | 0.005 | 345 | 23 | 319 | 5.6 | 607 | 168 | 5.9 | |
| 11 | 56 | 100 | 0.56 | 0.30 | 0.06 | 0.051 | 0.001 | 0.050 | 0.009 | 269 | 44 | 318 | 8.9 | 194 | 410 | 9.5 | |
| 12 | 65 | 147 | 0.44 | 0.30 | 0.03 | 0.051 | 0.001 | 0.044 | 0.004 | 267 | 21 | 323 | 5.6 | -105 | 215 | 5.9 | |

Disc. (%) 为相关误差。

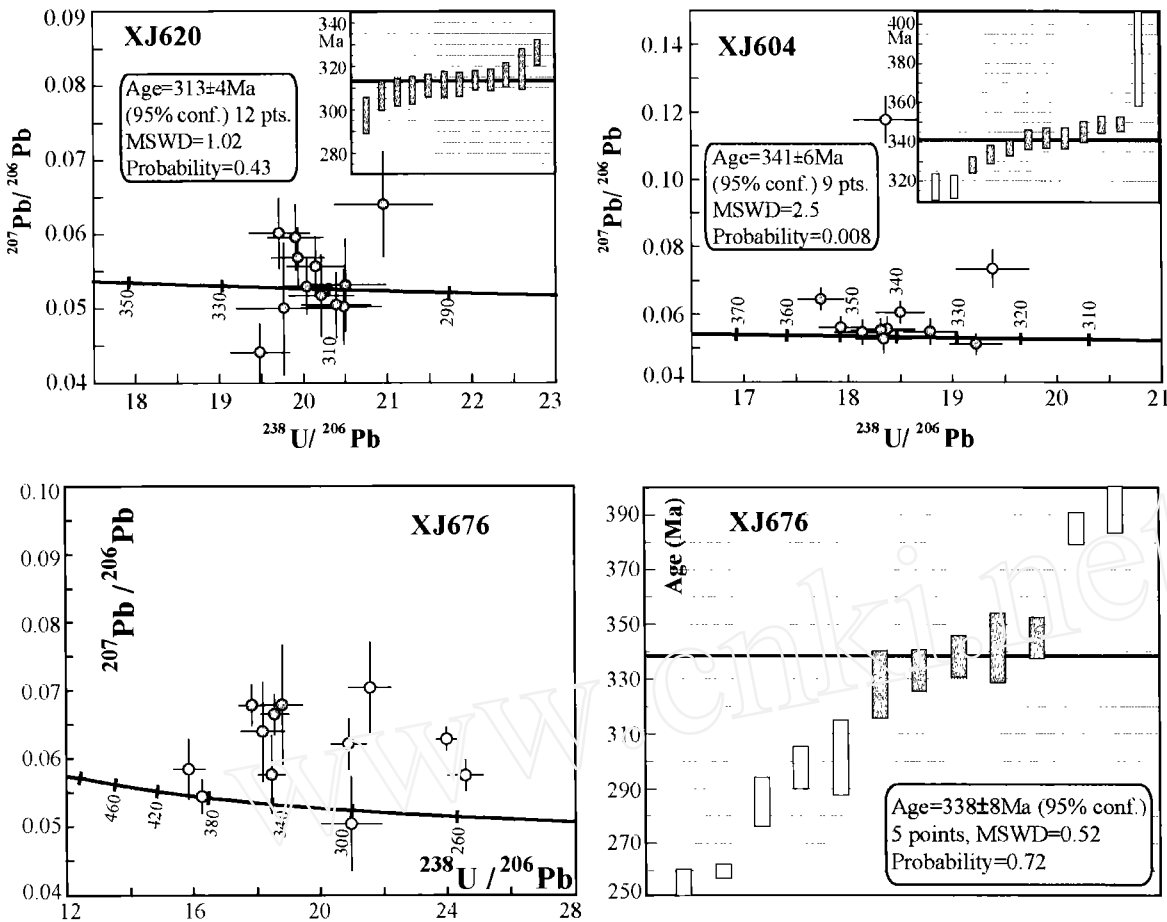


图4 科克苏-穹库什剖面花岗岩类锆石 U-Pb LA-ICPMS 测年的 $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ - $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 谐和图与年龄分布(其中实心 and 空心符号分别代表用来计算加权平均年龄的分析点和丢弃的分析点)

Fig. 4 Reverse $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ - $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ concordia diagrams and histograms of zircon U-Pb LA-ICPMS dating results on the granitoids from Kekesu-Qiongkushitai sections, southwestern Chinese Tianshan

应的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄范围为(257 ± 6 ~ 301 ± 8Ma), 其中 Th/U 比值最小(Th/U = 0.07) 的锆石对应的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 263 ± 3Ma, 明显低于岩浆结晶的年龄。

样品 XJ620 的所有 12 个点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄均在误差范围内一致, 计算出加权平均年龄为 313 ± 4Ma (图 4)。各锆石的 Th 含量为 $33 \times 10^{-6} \sim 90 \times 10^{-6}$, U 含量为 $72 \times 10^{-6} \sim 238 \times 10^{-6}$, Th/U 比值范围为 0.39 ~ 0.55 (表 1), 较好地反映了岩浆结晶锆石的化学特征。因此, 该年龄可代表样品 XJ620 的成岩年龄。

4.2 黑云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 测年结果

花岗闪长岩样品 XJ620 中黑云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 分析结果见表 2 和年龄谱图 5 所示。从第 2 ~ 11 连续 10 步加热过程中, ^{39}ArK 析出率达到 90% 以上, 其中每一步加热所获年龄均控制在 1 σ 的误差范围内, 由此可计算出花岗闪长岩样品 XJ620 中黑云母的坪年龄为 263.4 ± 0.6Ma。这一年龄明显晚于花岗闪长岩结晶的时代, 考虑到花岗闪长岩发生了黑云

母的定向排列, 因此可以推断, 该岩石经历了后期构造-热事件的改造。

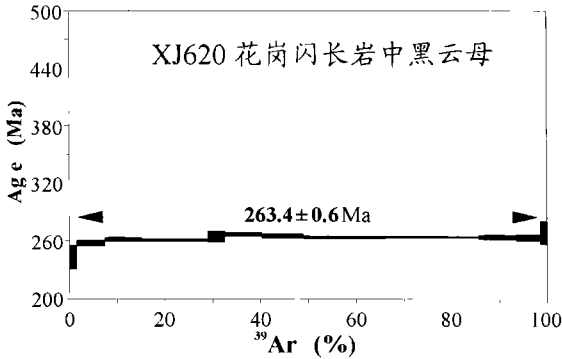


图5 穹库什太花岗闪长岩黑云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄谱图

Fig. 5 Argon spectrum showing plateau age of biotite from granodiorite in Qiongkushitai section, southwestern Chinese Tianshan

表2 天山西南部穹库什太花岗闪长岩黑云母⁴⁰Ar/³⁹Ar 测年数据

Table 2 Argon isotopic analysis results on biotite from granodiorite of Qiongkushitai section, SW Chinese Tianshan

| 温度(℃) | ⁴⁰ Ar _{atm} (%) | ³⁹ Ar _K (%) | ³⁷ Ar _{Ca} / ³⁹ Ar _K | ⁴⁰ Ar* / ³⁹ Ar _K | 年龄(Ma) |
|--------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|--|---|--------------|
| 变形花岗闪长岩 XJ620 中黑云母 | | | | | |
| 500 | 17.4 | 1.6 | 0.352 | 26.74 | 243.1 ± 12.5 |
| 650 | 8.1 | 5.9 | 0.010 | 28.50 | 258.0 ± 3.2 |
| 750 | 4.7 | 7.6 | 0.053 | 28.96 | 261.9 ± 2.2 |
| 820 | 3.3 | 13.9 | 0.061 | 28.87 | 261.2 ± 1.4 |
| 890 | 2.5 | 3.6 | 0.000 | 29.31 | 264.8 ± 5.9 |
| 940 | 0.9 | 7.7 | 0.000 | 29.58 | 267.1 ± 2.1 |
| 990 | 1.7 | 8.6 | 0.006 | 29.34 | 265.1 ± 2.3 |
| 1040 | 1.1 | 17.3 | 0.014 | 29.21 | 263.9 ± 1.3 |
| 1080 | 1.5 | 19.4 | 0.000 | 29.21 | 264.0 ± 0.8 |
| 1120 | 2.1 | 7.9 | 0.017 | 29.20 | 263.9 ± 2.2 |
| 1150 | 2.4 | 5.0 | 0.000 | 29.17 | 263.6 ± 3.2 |
| 熔化 | 2.7 | 1.4 | 0.026 | 29.77 | 268.7 ± 12.4 |

注：熔化为加热最后一步，在激光束聚焦时获得；⁴⁰Ar* 为 K 自然衰变过程中形成的放射成因 Ar；
⁴⁰Ar_{atm} 为大气中的 ⁴⁰Ar；³⁷Ar_{Ca} 与 ³⁹Ar_K 分别为 Ca 和 K 在照射过程中释放的 Ar；J=0.00539451 为照射参数。
衰变常数和同位素丰度比值：⁴⁰K_{tot} = 5.543 × 10⁻¹⁰ a⁻¹；⁴⁰K/K = 0.01167 atom % (Steiger and Jäger, 1977)。

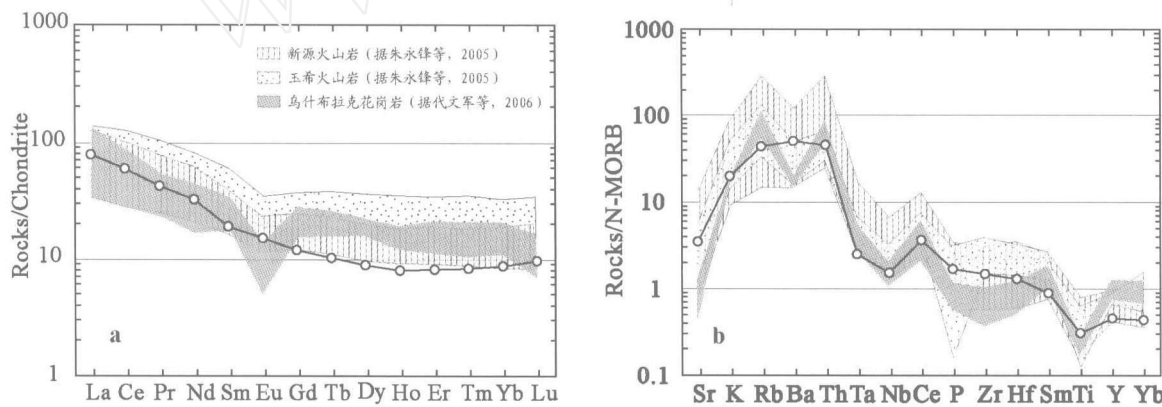


图6 穹库什太花岗闪长岩微量元素地球化学特征球粒陨石稀土元素值据 Sun *et al.* (1989)；N-MORB 值据 Pearce (1983)
Fig.6 Trace elements geochemical patterns of the granodiorite from Qiongkushitai section, southwestern Chinese Tianshan

5 花岗闪长岩地球化学特征

对穹库什太剖面黑云母花岗闪长岩进行了地球化学全岩分析。样品新鲜,未经受明显蚀变。主量元素采用 ICP-AES 法,微量元素采用 ICP-MS 方法,测试均在法国南锡岩石矿物分析实验室(SARMCRPG)进行。分析精度均优于5%。详细的仪器参数和测试过程参见 Carignan *et al.* (2004)。分析结果见表3所示。

花岗闪长岩具有富 Mg, Ca 和 Ti 而贫 Al 的特点,Na₂O > K₂O、铝饱和指数和里特曼指数较低,属钙碱性(钙性)系

列。虽然很难断定是 I 型、M 型还是 S 型,但与 A 型花岗岩完全不同。其 CNK = 6.5 > A = 5.26 > NK = 3.44, FeO^T / (FeO^T + MgO) = 0.65 < 0.8, 根据 Barbarin (1999) 的分类标准,该花岗闪长岩属于 ACG(富角闪钙碱性花岗岩类)。

表3显示,该黑云母花岗闪长岩的稀土元素总量较低(87ppm),且轻稀土明显比重稀土富集(ΣLREE/ΣHREE = 8.87)。球粒陨石标准化稀土元素配分(图6a)也表明,花岗闪长岩的重稀土不如轻稀土富集,且曲线比较平坦,具有典型钙碱性岩浆岩的稀土元素配分模式。在 N-MORB 标准化微量元素蛛网图(图6b)中,花岗闪长岩富集 K, Rb, Ba 和 Th, 而亏损 Nb 和 Ta, 这与典型的俯冲带岩浆岩微量元素特

表3 天山西南部穹库什太花岗闪长岩全岩地球化学分析数据

Table 3 Bulk geochemical analysis results of granodiorite from Qiongkushitai section, SW Chinese Tianshan.

| 主化学组成 | SiO ₂ | TiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | MnO | MgO | CaO | Na ₂ O | K ₂ O | P ₂ O ₅ | LOI | 总量 | ALK | ASI | σ | F/M | | |
|----------------------|------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|-------|-------|-------------------|------------------|-------------------------------|-------|-------|------|--------|----------|------|------|------|
| (w%) | 63.70 | 16.54 | 5.26 | 0.13 | 1.75 | 5.40 | 3.06 | 2.98 | 0.46 | 0.20 | 0.67 | 100.1 | 3.44 | 0.48 | 0.57 | 0.65 | | |
| 微量元素 | La | Ce | Pr | Nd | Sm | Eu | Gd | Tb | Dy | Ho | Er | Tm | Yb | Lu | ΣREE | L/H | δEu | |
| (×10 ⁻⁶) | 18.69 | 36.43 | 4.04 | 15.24 | 2.91 | 0.88 | 2.45 | 0.38 | 2.25 | 0.45 | 1.35 | 0.21 | 1.47 | 0.25 | 87.0 | 8.87 | 0.98 | |
| Sc | V | Cr | Co | Ni | Cu | Zn | Ga | Ge | Rb | Sr | Y | Zr | Nb | Ba | Hf | Ta | Th | U |
| 37.22 | 80.7 | 8.35 | 11.73 | 5.00 | 10.76 | 66.49 | 16.19 | 1.60 | 86.8 | 415.2 | 13.56 | 124.0 | 5.29 | 1010.0 | 3.11 | 0.45 | 9.17 | 0.97 |

注: ALK(全碱) = Na₂O + K₂O; ASI(铝饱和指数) = Al₂O₃/(Na₂O + K₂O + CaO)或 Al/(Na + K + Ca)mol 比;
σ(里特曼指数) = ALK²/(SiO₂ - 43); F/M = FeO^T/(FeO^T + MgO); ΣREE: 稀土元素总量;
L/H: 轻稀土元素总量与重稀土元素总量比值; δEu(Eu 异常值) = Eu_N × 2/(Sm_N + Gd_N), R_N 指球粒陨石标准化值。

征完全一致。从图6还可以看出,该黑云母花岗岩与邻区新源、玉希达坂一带的石炭纪岛弧火山岩(朱永锋等,2005)具有相似的稀土元素及其他微量元素分布特征,元素组成上,该黑云母花岗岩的重稀土元素和Nb、Ta含量较这些岛弧火山岩更低。但在研究区的乌什布拉克,晚石炭世末后碰撞黑云母花岗岩类(代文军等,2006)也表现出类似的地球化学特征。因此,限于该样品的地球化学数据,难以判断其形成的构造环境。

6 讨论

天山造山带经历了古生代、中生代、新生代多旋回、复杂的构造、岩浆作用过程,早期的地质事件往往被后期构造或岩浆作用所叠加、改造。目前,关于天山古生代造山作用时代的多种不同认识,一方面可能是受后期改造的影响所致,另一方面也可能是由于所用测年对象和测年方法的不同所造成的。

如上文所述,前人对科克苏-穹库什太一带高压变质岩进行了大量年代学研究,其中一些偏老的年龄(419~364Ma),可能代表西南天山地区早期的俯冲-增生变质作用,如中亚地区早古生代俯冲事件(de Jong *et al.*, 2006),但也很可能是由于高压变质岩中 Ar-Ar 体系的过剩 Ar 问题(Li *et al.*, 1994)或混合相中的去气作用(Wijbrans and McDougall, 1986; de Jong, 2003)所导致的。

另外,一些较新的⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄数据(335~302Ma)已被证明是高压变质岩折返到较浅的构造层次时发生绿片岩相退变质作用的时间(Klemd *et al.*, 2005; 高俊等, 2006; Wang *et al.*, 2007b)。由于科克苏-穹库什太一带发育大量的海西期花岗岩,部分岩体侵入到高压变质杂岩带中。同时,在高压变质杂岩带的北侧,二叠纪曾发生过大型的区域韧性走滑事件。海西期岩浆活动和二叠纪走滑作用所带来的热和流体,非常容易使早期岩石中的 Ar-Ar 系统发生重置(如本文所研究的花岗闪长岩中黑云母⁴⁰Ar/³⁹Ar 坪年龄)。根据吴元保和郑永飞(2004), Rasmussen (2005) 及朱永峰和

宋彪(2006)对锆石成因及其定年学的研究,后期热和流体事件还可以形成各种形态的次生锆石。Zhang *et al.* (2007)对榴辉岩中锆石 U-Pb SHRIMP 测年获得三组年龄: >310Ma, ≈292Ma 和 233~226Ma, 其中年龄为≈292Ma 和 233~226Ma 的锆石边部形态特征表明,它们可能形成于后期的热液流体作用(高俊等, 2006),而真正能代表榴辉岩变质作用时代的,应为具有典型结晶成因特征的锆石核部的年龄,其范围为 310~413Ma。

由于长阿吾孜蓝片岩中蓝闪石⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄 350.9 ± 2.0Ma (肖序常等, 1992)、科克苏河上游蓝片岩多硅白云母⁴⁰Ar/³⁹Ar 坪年龄 345.5 ± 7Ma (Gao *et al.*, 1995)和榴辉岩 Sm-Nd 等时线年龄为 346 ± 3Ma 以及⁴⁰Ar/³⁹Ar 坪年龄 343.7 ± 1.3Ma (Gao and Klemd, 2003)在误差范围内非常一致,因此, ≈345Ma 可以解释为榴辉岩相峰期变质作用的年龄(Gao *et al.*, 2003; Klemd, 2003; 高俊等, 2006; Wang *et al.*, 2007b)。

本文通过 LA-ICPMS 定年获得科克苏-穹库什太一带花岗岩类的年龄为 341~313Ma, 其中钾长花岗岩的年龄 341 ± 6Ma 和 338 ± 8Ma, 在误差范围内与榴辉岩相峰期变质作用的年代基本一致。考虑到在研究区北东方向的新源-那拉提-玉希达坂一带, 广泛分布有志留纪-石炭纪岛弧型花岗岩和火山岩, 它们的形成时代为 436~366Ma (朱志新等, 2006) 和 354~309Ma (朱永锋等, 2005; Wang *et al.*, 2006), 同时, 本文所研究的黑云母花岗岩具有与俯冲带岛弧型岩浆岩非常一致的地球化学组成, 因此作者推测, 科克苏-穹库什太一带的花岗岩类可能也形成于类似的构造环境, 但需要更详细的岩石地球化学和同位素数据进行验证。

一般认为, 西天山岩浆岛弧与高压变质岩带形成于早古生代“南天山洋”向北(伊犁中天山板块)的俯冲作用。但值得提出的是, 新源-那拉提-玉希达坂一带的火山岩分属早石炭世和晚石炭世两期不同的岩浆活动的产物(朱永锋等, 2005, 2006a, 2006b), 意味着西天山伊犁地区, 古生代期间至少存在两期岛弧岩浆作用, 单从时代角度分析, 一期发生在早石炭世及其以前, 另一期则发生在晚石炭世。由于穹库什

太黑云母花岗闪长岩的 La-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄(313Ma) 虽然与其南侧绿片岩的白云母 Ar/Ar 坪年龄(328~302Ma) 比较接近,但明显比榴辉岩相峰期变质作用的年龄小,同时,该黑云母花岗闪长岩侵入于其南侧绿片岩中,因此作者推断,该花岗闪长岩的形成时代应晚于榴辉岩相峰期变质作用的年代。另外,也不能排除绿片岩中白云母的 Ar/Ar 系统受本期岩浆活动高温热作用的影响。

考虑到本文所提供的地球化学数据有限,而且黑云母花岗闪长岩的地球化学组成既与邻区岛弧型火山岩一致,也与后碰撞花岗岩相似,因此目前尚难以断定其形成的构造环境。但无论哪种构造背景,花岗岩与绿片岩的侵入关系表明,与“南天山洋”俯冲有关的岛弧岩浆活动及榴辉岩相峰期变质作用应发生在黑云母花岗闪长岩的侵入之前,即早于 313Ma (晚石炭世早期)。如果这些花岗岩形成于后碰撞环境,表明西南天山的碰撞造山作用在早石炭世早期已进入后碰撞演化阶段;如果花岗岩形成于活动大陆边缘,则表明在西天山高压变质岩带北侧存在一个与其无直接成因联系的晚古生代大陆岩浆岛弧,该岛弧与新源-玉希一带的岩浆岩时代一致(315~309Ma; 朱永锋等, 2005; Wang *et al.*, 2006),可能具有相同的成因背景,与北天山洋盆向伊犁地块的俯冲作用有关(肖序常等, 1992; Allen *et al.*, 1993; Wang *et al.*, 2006, 2007b, 2007c)。

科克苏-穹库什太花岗岩类发生了不同程度的韧性剪切变形,其中科克苏钾长花岗岩发生了强烈的糜棱岩化作用,穹库什太黑云母花岗闪长岩则发生了黑云母的定向排列,黑云母⁴⁰Ar/³⁹Ar 坪年龄 263Ma, 应代表剪切作用发生的时代。该剪切作用在区域上属于菁布拉克-那拉提韧性走滑断裂带,向东与天山主断裂和阿齐库都克断裂相连(Shu *et al.*, 1999; Laurent-Charvet *et al.*, 2002, 2003),是天山造山带碰撞后陆内大规模走滑断裂作用的结果。另外,古地磁资料显示,塔里木、准噶尔和伊犁在晚石炭世-晚二叠世期间,只有相对旋转,而在纬度上没有发生明显的相对运动,晚二叠世以来整个新疆北部已联结为一个整体(Wang *et al.*, 2007a)。这些研究结果均表明,西天山南部的碰撞造山事件在二叠纪之前全部结束。

7 结论

(1) 西天山南部高压变质杂岩及其北侧元古宙变质基底岩石和古生代花岗岩类发生了两期强烈的韧性变形,一期为指向北的推覆剪切作用,另一期为 NE-SW 向走滑剪切作用。

(2) 科克苏剖面钾长花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 341~338Ma, 与榴辉岩相高压变质岩的年龄(≈345Ma) 相当,但穹库什太剖面黑云母花岗闪长岩的年龄(313Ma) 明显比榴辉岩相峰期变质作用的年龄小,而黑云母花岗闪长岩与退变质绿片岩的侵入接触关系表明,高压变质作用的时代早于该黑云母花岗闪长岩的形成年龄。因此,西南天山俯冲、碰撞

作用发生在晚石炭世之前。

(3) 穹库什太花岗闪长岩发生了黑云母的定向排列,矿物线理近水平,黑云母⁴⁰Ar/³⁹Ar 坪年龄为 263Ma, 表明岩石经受了二叠纪的构造、热事件的改造,应与区域韧性走滑作用有关,从而进一步确证,西南天山造山作用在二叠纪之前已结束。

(4) 黑云母花岗闪长岩具有与俯冲带岩浆岩类似的地球化学特征,但与后碰撞花岗岩地球化学也比较接近,为了认识研究区花岗岩形成的构造环境,需要进一步开展详细的岩石地球化学和同位素研究。

致谢 北京大学韩宝福教授、中科院地质与地球物理所高俊研究员、肖文交研究员与作者的有益讨论对本文的写作具有重要启发作用。澳大利亚塔斯马尼亚大学地球科学学院 Meffre S 博士帮助完成了 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 测年, de Jong K 博士在⁴⁰Ar/³⁹Ar 定年中给予了很大帮助。张旗教授和一名匿名审稿人的详细修改意见,帮助作者改进了本文的论证,在此一并感谢!

References

- Allen MB, Vincent SJ and Wheeler PJ. 1999. Late Cenozoic tectonics of the Kepingtage thrust zone: Interaction of the Tien Shan and Tarim Basin, northwest China. *Tectonics*, 18(4): 639–654
- Allen MB, Windley BF and Zhang C. 1993. Paleozoic collisional tectonics and magmatism of the Chinese Tien Shan, Central Asia. *Tectonophysics*, 220: 89–115
- Avouac JP, Tapponnier P, Bai M, You H and Wang G. 1993. Active thrusting and folding along the northern Tien Shan and Late Cenozoic rotation of the Tarim relative to Dzungaria and Kazakhstan. *Journal of Geophysics Research*, 98(B4): 6755–6804
- Barbarin B. 1999. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments. *Lithos*, 46: 605–626
- Brookfield ME. 2000. Geological development and Phanerozoic crustal accretion in the western segment of the southern Tianshan (Kyrgyzstan, Uzbekistan and Tajikistan). *Tectonophysics*, 328: 1–14
- Buckman S and Aitchison JC. 2004. Tectonic evolution of Paleozoic terranes in West Junggar, Xinjiang, NW China. In: Malpas J, Fletcher CJN, Ali JR and Aitchison JC (eds). *Aspects of the tectonic evolution of China*. Geol. Soc., London, Spec. Publ., 226: 101–129
- Burchfiel BC, Brown ET, Deng QD, Feng XY, Li J, Molnar P, Shi JB, Wu ZM and You HC. 1999. Crustal shortening on the Margins of the Tien Shan, Xinjiang, China. *International Geology Review*, 41: 665–700
- Burtman VS. 1975. Structural geology of variscan Tien Shan, USSR. *American Journal of Sciences*, 275(A): 157–186
- Charreau J, Chen Y, Gilder S, Dominguez S, Avouac JP, Sen S, Sun DJ, Li YA and Wang WM. 2005. Magnetostratigraphy and rock magnetism of the Neogene Kuitun He section (northwest China): Implications for Late Cenozoic uplift of the Tianshan mountains. *Earth and Planetary Science Letters*, 230(1–2): 177–192
- Che ZC, Liu HF, Liu L *et al.* 1994. The formation and evolution of the central Tianshan orogenic belt. Beijing: Geological Publishing House, 135 (in Chinese with English abstract)
- Chen CM, Lu HF, Jia D, Cai DS and Wu SM. 1999. Closing history of

- the southern Tianshan oceanic basin, western China: An oblique collisional orogeny. *Tectonophysics*, 302: 23–40
- Chen YB, Hu AQ, Zhang GX and Zhang QF. 2000. Precambrian basement age and characteristics of Southwestern Tianshan: Zircon U-Pb geochronology and Nd-Sr isotopic composition. *Acta Petrologica Sinica*, 16(1): 91–98 (in Chinese with English abstract)
- Chen YB, Hu AQ, Zhang GX and Zhang QF. 2000. Zircon U-Pb age of granitic gneiss on Duku highway in western Tianshan of China and its geological implications. *Chinese Science Bulletin*, 45(7): 649–653 (in Chinese)
- Coleman RG. 1989. Continental growth of northwest China. *Tectonics*, 8(3): 621–635
- Dai WJ, Shi WQ, Zhu GR and Liu Q. 2006. The features of Wushibulake mass and its significance in the west section of western Tianshan. *Gansu Geology*, 15(1): 29–35 (in Chinese with English abstract)
- de Jong K, Xiao WJ, Windley BF, Masago H and Lo CH. 2006. Ordovician $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ phengite ages from the blueschist-facies Ondor Sum subduction-accretion complex (Inner Mongolia) and implications for the early Paleozoic history of continental blocks in China and adjacent areas. *Am. J. Sci.*, in Press
- de Jong K. 2003. Very fast exhumation of high-pressure metamorphic rocks with excess ^{40}Ar and inherited ^{87}Sr , Betic Cordilleras, southern Spain. *Lithos*, 70: 91–110
- Dobretsov NL, Coleman RG, Liou JG and Maruyama S. 1987. Blueschist belt in Asia and possible periodicity of blueschist facies metamorphism. *Ophiolite*, 12: 445–456
- Gao CL, Cui KR, Qian YX, Liu B, Ding DG and Yin Y. 1995. Macroplate tectonics in the Tianshan and the Northern Tarim basin. Beijing: Geological Publishing House, 1–284 (in Chinese)
- Gao J and Klemd R. 2003. Formation of HP-LT rocks and their tectonic implications in the western Tianshan Orogen, NW China: Geochemical and age constraints. *Lithos*, 66: 1–22
- Gao J, He GQ and Li MS. 1997. Paleozoic orogenic processes of Western Tianshan Orogen. *Earth Science (Journal of China University of Geosciences)*, 22(1): 27–32 (in Chinese with English abstract)
- Gao J, He GQ, Li MS, Xiao XC and Tang YQ. 1995. The mineralogy, petrology, metamorphic P-T trajectory and exhumation mechanism of blueschists, south Tianshan, northwestern China. *Tectonophysics*, 250: 151–168
- Gao J, Klemd R, Zhang L, Wang Z and Xiao X. 1999. P-T path of high pressure-low temperature rocks and tectonic implications in the western Tianshan Mountains (NW China). *J. Metamorph. Geol.*, 17: 621–636
- Gao J, Li MS, Xiao XC, Tang YQ and He GQ. 1998. Paleozoic tectonic evolution of the Tianshan orogen, northwestern China. *Tectonophysics*, 287: 213–231
- Gao J, Long LL, Qian Q, Huang DZ, Su W and Klemd R. 2006. South Tianshan: A Late Paleozoic or a Triassic orogen? *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1049–1061 (in Chinese with English abstract)
- Gao J, Xiao XC, Tang YQ, Zhao M, Wang J and Wu HQ. 1993. The discovery of blueschist in Kumux of the southern Tien Shan and its tectonic significance. *Regional Geology of China*, (4): 344–347 (in Chinese with English abstract)
- Gao J, Zhang LF and Liu S. 2000. The $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age record of formation and uplift of the blueschists eclogites in the western Tianshan Mountains. *Chinese Science Bulletin*, 45(11): 1047–1051
- Gao J. 2000. Geological map of high-pressure low-temperature metamorphic belt in the western Tianshan Mountains, northwest of China (1:200 000). Mapped by Hebei Geological Survey (China)
- He GQ, Li MS, Liu DQ, Tang YL and Zhou HR. 1994. Paleozoic evolution and metallogenesis in Xinjiang, China. Wulumuqi: Xinjiang People's Publishing House and Hongkong Educational and Cultural Press Ltd., 1–473 (in Chinese)
- Hendrix MS, Dumitru TA and Graham SA. 1994. Late Oligocene-Early Miocene unroofing in the Chinese Tien Shan: An early effect of the India-Asia collision. *Geology*, 22: 487–490
- Hoskin PWO and Black LP. 2000. Metamorphic zircon formation by solid-state recrystallization of protolith igneous zircon. *J. Metamorph. Geol.*, 18: 423–439
- Hu AQ, Zhang GX and Zhang QF. 1999. The basement age of Tianshan belt and the Nd isotopic constraining on crustal accretion. *Science in China (D)*, 29(2): 104–112 (in Chinese)
- Carignan J, Cardinal D, Eisenhauer A, Galy A, Rehkämper M, Wombacher F and Vigier N. 2004. A reflection on Mg, Cd, Ca, Li and Si isotopic measurements and related reference materials. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 28(1): 139–148
- Jahn BM, Griffin WL and Windley BF (eds). 2000. Continental growth in the Phanerozoic: Evidence from Central Asia. *Tectonophysics*, 328: 1–227
- Jiang CY, Wu WK, Zhang XR and Cui SS. 1995. The change from island arc to rift valley: evidence from volcanic rocks of Awulale area. *Acta Petrologica et Mineralogical*, 14(4): 289–300 (in Chinese with English abstract)
- Klemd R, Bräcker M, Hacker BR, Gao J, Gans P and Wemmer K. 2005. New Age Constraints on the Metamorphic Evolution of the High-Pressure/Low-Temperature Belt in the Western Tianshan Mountains, NW China. *The Journal of Geology*, 113: 157–168
- Klemd R, Schröter M, Will TM and Gao J. 2002. P-T evolution of glaucophane-clinozoisite bearing HP-LT rocks in the western Tianshan orogen, NW China. *J. Metamorph. Geol.*, 20: 239–254
- Klemd R. 2003. Ultrahigh-pressure metamorphism in eclogites from the western Tianshan high-pressure belt (Xinjiang, western China)-Comment. *Am. Mineral.*, 88: 1153–1156
- Laurent-Charvet S, Charvet J, Monie P and Shu LS. 2003. Late Paleozoic strike-slip shear zones in eastern Central Asia (NW China): New structural and geochronological data. *Tectonics*, 22(2): 1099–1101
- Laurent-Charvet S, Charvet J, Shu LS, Ma RS and Lu HF. 2002. Palaeozoic late collisional strike-slip deformations in Tianshan and Altay, eastern Xinjiang, NW China. *Terra Nova*, 14(4): 249–256
- Li XD, Xiao WJ and Zhou ZL. 2004. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age determination on the Late Devonian tectonic event along the southern margin of the South Tianshan Mountains and its significance. *Acta Petrologica Sinica*, 20(3): 691–696 (in Chinese with English abstract)
- Li YJ, Sun LD, Wu HR, Zhang GY, Wang GL and Huang ZB. 2005. Permo-Carboniferous radiolarians from the Wupata'erkun group, Western South Tianshan, Xinjiang, China. *Acta Geologica Sinica*, 79(1): 16–23
- Li YJ, Wang ZM, Wu HR, Huang ZB, Tan ZJ and Luo JC. 2002. Discovery of radiolarian fossils from the Aiketik group at the western end of the South Tianshan Mountains of China and its implications. *Acta Geologica Sinica*, 76(2): 146–154
- Li ZC, Li YJ, Li JH, Luan XD and Guo WJ. 2006. Geochemical characteristics of the Dahalajunshan Formation volcanic rocks and their implication on the tectonic setting in Awulale area, west Tianshan. *Xinjiang Geology*, 15(1): 25–28 (in Chinese with English abstract)
- Lin W and Enami M. 2006. Prograde pressure-temperature path of jadeite-bearing eclogites and associated high-pressure/low-temperature rocks from western Tianshan, northwest China. *Island Arc*, 15: 477–496
- Liu B and Qian YX. 2003. The geologic characteristics and fluid evolution in the three high-pressure metamorphic belts of eastern Tianshan. *Acta Petrologica Sinica*, 19(2): 283–296 (in Chinese with English abstract)
- Liu BP, Wang ZQ, Zhang CH *et al.* 1996. The tectonic framework and evolution in Southwest Tianshan Mountains, China. Wuhan: China University of Geosciences Press. 1–120 (in Chinese)
- Meffre S, Nicholas GD, Anthony JC *et al.* 2004. Mafic volcanic rocks on King Island, Tasmania: Evidence for 579 Ma break-up in east Gondwana. *Precambrian Research*, 135(3): 177–191
- Molnar P and Tapponnier P. 1975. Cenozoic tectonics of Asia: Effects of a continental collision. *Science*, 189: 419–426
- Nelson MR, McCaffrey R and Molnar P. 1987. Source parameters for eleven earthquakes in the Tien Shan, Central Asia. Determined by P

- and SH waveform inversion. *Journal of Geophysical Research*, 92: 12629 – 12648
- Pearce JA. 1983. Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins. In: Hawkesworth CJ and Norry MJ (eds). *Continental Basalts and Mantle Xenoliths*. Nantwich (U. K.): Shiva Press, 230 – 249
- Poupinet G, Avouac JP, Jiang M, Wei S, Kissling E, Herquel G, Guilbert J, Paul A, Wittlinger G, Su H and Thomas JC. 2002. Intracontinental subduction and Palaeozoic inheritance of the lithosphere suggested by a teleseismic experiment across the Chinese Tien Shan. *Terre Nova*, 14: 18 – 24
- Qian Q, Gao J, Xiong XM, Long LL and Huang DZ. 2006. Petrogenesis and tectonic settings of Carboniferous volcanic rocks from north Zhaosu, western Tianshan Mountains: Constraints from petrology and geochemistry. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1307 – 1323 (in Chinese with English abstract)
- Rasmussen B. 2005. Zircon growth in very low grade metasedimentary rocks: evidence for zirconium mobility at $\approx 250^\circ\text{C}$. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 150: 146
- Ruffet G, Faud G and Amouric M. 1991. Comparison of $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ conventional and laser dating of biotites from the North Trégor Batholith, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 55: 1675 – 1688
- Ruffet G, Faud G, Ballèvre M and Kienast JR. 1995. Plateau ages and excess argon in phengites: An $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ laser probe study of Alpine micas (Sesia zone, Western Alps, northern Italy). *Chem. Geol. (Isotope Geoscience Section)*, 121: 327 – 343
- Sengör AMC and Natal'in BA. 1996. Palaeotectonics of Asia: Fragments of a synthesis. In: Yin A and Harrison M (eds). *The tectonic evolution of Asia*. Rubey Colloquium, Cambridge: Cambridge University Press, 486 – 640
- Sengör AMC, Natal'in BA and Burtman VS. 1993. Evolution of the Altaid tectonic collage and Palaeozoic crust growth in Eurasia. *Nature*, 364: 299 – 307
- Shao TQ, Shi Y, Jin H, Song Y, Zhu ZX, Wang KZ, Zhang JD and Xu D. 2006. Volcanic rock petrochemical characteristics of the Dahalajunshan Formation in the western Tianshan, Xinjiang and their geological significance. *Xinjiang Geology*, 24(3): 218 – 222 (in Chinese with English abstract)
- Shi YS, Lu HF, Jia D and Howell DG. 1994. Palaeozoic plate tectonic evolution of the Tarim and western Tianshan Regions, Western China. *International Geological Review*, 36: 1058 – 1066
- Shu LS, Charvet J, Guo LZ, Lu HF and Laurent-Charvet S. 1999. A large-scale Palaeozoic dextral ductile strike-slip zone: the Aqikkudug-Weiya zone along the northern margin of the Central Tianshan belt, Xinjiang, NW China. *Acta Geol. Sinica*, 73(2): 148 – 162
- Shu LS, Charvet J, Lu HF and Laurent SC. 2002. Palaeozoic accretion-collision events and kinematics of ductile deformation in the central-southern Tianshan Belt, China. *Acta Geol. Sinica*, 76(3): 308 – 323
- Shu LS, Lu HF, Charvet J, Laurent-Charvet S and Yin DH. 2000. Palaeozoic accretionary terranes in Northern Tianshan, NW China. *Chinese Geochemistry*, 19(3): 193 – 202
- Shu LS, Wang B, Yang F, Lu HF, Charvet J and Laurent-Charvet S. 2003. Polyphase Tectonic Events and Mesozoic-Cenozoic Basin-Range Coupling in the Chinese Tianshan belt. *Acta Geol. Sinica*, 77(4): 457 – 467
- Steiger RH and Jäger E. 1977. Subcommittee on geochronology: convention on the use of decay constants in geo- and cosmology. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 36: 359 – 362
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of ocean island basalts: implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds). *Magma-tism in the Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publications, 42: 313 – 345
- Tagiri M, Yano T, Bakirov A, Nakajima T and Uchiumi S. 1995. Mineral parageneses and metamorphic *P-T* paths of ultrahigh-pressure eclogites from Kyrgyzstan Tien-Shan. *Island Arc*, 4: 280 – 292
- Tang YQ, Gao J, Zhao M, Li JY and Wang J. 1995. The ophiolites and blueschists in the Southwestern Tianshan orogenic belt, Xinjiang, Northwestern China. Beijing: Geological Publishing House. 1 – 133 (in Chinese with English abstract)
- Tapponnier P and Molnar P. 1979. Active faulting and Cenozoic tectonics of the Tianshan, Mongolia and Baykal regions. *Journal of Geophysical Research*, 84: 3425 – 3459
- Vavra G, Gebauer D, Schmid R *et al.* 1996. Multiple zircon growth and recrystallization during polyphase Late Carboniferous to Triassic metamorphism in granulites of the Ivrea Zone (Southern Alps): An ion microprobe (SHRIMP) study. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 122: 337 – 358
- Volkova NI and Budanov VI. 1999. Geochemical discrimination of metabasalt rocks of the Fan-Karatagin transitional blueschist/greenschist belt, South Tianshan, Tajikistan: Seamount volcanism and accretionary tectonics. *Lithos*, 47(3–4): 201 – 216
- Wang B, Chen Y, Zhan S *et al.* 2007a. Primary Carboniferous and Permian paleomagnetic results from Yili Block and their geodynamic implications on evolution of Chinese Tianshan Belt. *Earth and Planetary Science Letters*, Under review
- Wang B, Faure M, Cluzel D, Shu LS, Charvet J, Maffre S and Ma Q. 2006a. Late Palaeozoic tectonic evolution of the northern West Chinese Tianshan Belt. *Geodinamica Acta*, 19(3–4): 227 – 237
- Wang B, Faure M, Shu LS *et al.* 2007b. Tectonics of the Yili Block in the southern part of the Western Chinese Tianshan and its Palaeozoic geodynamic evolution. *Tectonics*, Under review
- Wang B, Shu LS, Cluzel D, Faure M and Charvet J. 2007c. Geochemical Constraints on Carboniferous Volcanic rocks of Yili Block (Xinjiang, NW China): Implication on tectonic evolution of Western Tianshan. *Journal of Asian Earth Sciences*, 29(1): 148 – 159
- Wang B, Shu LS, Cluzel D, Faure M, Charvet J and Ma Q. 2006b. Geochemical characteristics and tectonic significance of Carboniferous volcanic rocks in the northern part of the Ili Block, Xinjiang. *Geology in China*, 33(3): 498 – 508 (in Chinese with English abstract)
- Wang BY, Lang ZJ and Li XD. 1994. Study on the geological sections across the western segment of Tianshan Mountains, China. Beijing: Science Press. 5 – 19 (in Chinese with English abstract)
- Wei CJ, Powell R and Zhang LF. 2003. Eclogites from the south Tianshan, NW China: Petrological characteristic and calculated mineral equilibria in the $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{FeO}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ system. *J. Metamorph. Geol.*, 21: 169 – 179
- Wijbrans JR and McDougall I. 1986. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of white micas from an Alpine high-pressure metamorphic belt on Naxos (Greece): The result of resetting of the argon isotopic system. *Contrib. Min. Petrol.*, 93: 187 – 194
- Windley BF, Allen MB, Zhang C, Zhao ZY and Wang GR. 1990. Palaeozoic accretion and Cenozoic redeformation of the Chinese Tien Shan range, Central Asia. *Geology*, 18: 128 – 131
- Wu YB and Zheng YF. 2004. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U-Pb age. *Chinese Science Bulletin*, 49(15): 1554 – 1569 (in Chinese)
- XBGMR (Xinjiang Bureau of Geology and Mineralogy Resources). 1979. Geological map 1: 200000, Zhaosu sheet (K-44-10)
- XBGMR. 1983. Geological map 1: 200000, Heiyingshan sheet (K-44-17)
- XBGMR. 1993. Regional geology of Xinjiang Uygur Autonomy Region. Beijing: Geology Publishing House. 1 – 841 (in Chinese with English abstract)
- Xia LQ, Xia ZC, Xu XY, Li XM, Ma ZP and Wang LS. 2004b. Carboniferous Tianshan igneous megaprovince and mantle plume. *Geological Bulletin of China*, 23(9–10): 903 – 910 (in Chinese with English abstract)
- Xia LQ, Xu XY, Xia ZC, Li XM, Ma ZP and Wang LS. 2004a. Petrogenesis of Carboniferous rift-related volcanic rocks in the Tianshan, northwestern China. *GSA Bulletin*, 116(3–4): 419 – 433
- 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 ZC, Xu XY, Xia LQ *et al.* 2005. Geochemistry of Carboniferous–Permian post-collisional granitic rocks from Tianshan. *Northwestern Geology*, 38(1): 1–14 (in Chinese with English abstract)
- 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: 370–395
- Xiao XC, Tang YQ, Feng YM, Zhu BQ, Li JY and Zhao M. 1992. Tectonic evolution of the northern Xinjiang and its adjacent regions. Beijing: Geology Publishing House. 12–47 (in Chinese with English abstract)
- Zhang L, Ellis DJ and Jiang W. 2002. UHP metamorphism in western Tianshan, China, Part II: Evidence from magnesite in eclogite. *American Mineralogist*, 87: 861–866
- Zhang L, Ellis DJ, Arculus RJ, Jiang W and Wei C. 2003a. “Forbidden zone” subduction of sediments to 159 km depth: The reaction of dolomite to magnesite-aragonite in the UHPM metapelites from western Tianshan, China. *J. Metamorph. Geol.*, 21: 523–529
- Zhang LF, Ai YL, Li Q, Li XP, Song SG and Wei CJ. 2005. The formation and tectonic evolution of UHP metamorphic belt in southwestern Tianshan, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 21(4): 1029–1038 (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 of western Tianshan orogenic belt, China: Evidence from SHRIMP U–Pb dating of zircon from HP/UHP eclogitic rocks. *Lithos*, in press
- Zhang LF, Ellis DJ, Williams S and Jiang W. 2003b. Ultrahigh-pressure metamorphism in eclogites from the western Tianshan, China—Reply. *Am. Mineral.*, 88: 1157–1160
- Zhang WR, Zhu WG and Wang SX. 2006. The Meso-Neoproterozoic Carbonate environment of Kekesu River areas in western Tianshan. *Gansu Geology*, 15(1): 25–28 (in Chinese with English abstract)
- Zhang ZH, Wang ZL, Mao JW, Chai FM, Yang FQ and Yang JM. 2006. Geochemistry of the Qingbulake Basic Complex in Western Tianshan. *Acta geologica sinica*, 80(7): 1005–1016 (in Chinese with English abstract)
- Zhang ZJ, Chen YJ, Chen HY, Bao JX and Liu YL. 2002. The Petrochemical characteristics of the Hercynian granitoids in Tianshan and geodynamic implications. *Journal of Mineral. Petrology*, 22(2): 13–21 (in Chinese with English abstract)
- Zhao ZH, Bai ZH, Xiong XL, Mei HJ and Wang YX. 2000. Geochemistry of alkali-rich igneous rocks of Northern Xinjiang and its implications for geodynamics. *Acta Geologica Sinica*, 74(2): 321–328
- Zhao ZH, Bai ZH, Xiong XL, Mei HJ and Wang YX. 2003. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ chronological study of Late Paleozoic volcanic-hypabyssal igneous rocks in western Tianshan, Xinjiang. *Geochimica*, 32(4): 317–327 (in Chinese with English abstract)
- Zhu YF and Song B. 2006. Petrology and SHRIMP chronology mylonitized Tianger granite, Xinjiang: Also about the dating on hydrothermal zircon in granite. *Acta Petrologica Sinica*, 22(1): 135–144 (in Chinese with English abstract)
- Zhu YF, Zhang LF, Gu LB, Guo X and Zhou J. 2005. The zircon SHRIMP chronology and trace element geochemistry of the Carboniferous volcanic rocks in western Tianshan Mountains. *Chinese Science Bulletin*, 50(19): 2201–2212 (in Chinese)
- Zhu YF, Zhou J and Guo X. 2006a. Petrology and Sr–Nd isotopic geochemistry of the Carboniferous volcanic rocks in the western Tianshan Mountains, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1341–1350 (in Chinese with English abstract)
- Zhu YF, Zhou J, Song B, Zhang LF and Guo X. 2006b. Age of the “Dahala-Junshan” Formation in Xinjiang and its disintegration. *Geology in China*, 33(3): 487–497 (in Chinese with English abstract)
- Zhu ZX, Wang KZ, Zheng YJ *et al.* 2006. The Zircon SHRIMP dating of Silurian and Devonian granitic intrusions in the southern Yili Block, Xinjiang and preliminary discussion on their tectonic setting. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1193–1200 (in Chinese with English abstract)
- Zonenshain LP, Kuzmin MI and Natapov LM. 1990. *Geology of the USSR: A Plate Tectonic Synthesis*. AGU Geodynamics Series, 242

附中文参考文献

- 车自成, 刘洪福, 刘良等. 1994. 中天山造山带的形成与演化. 北京: 地质出版社. 135
- 陈义兵, 胡霭琴, 张国新, 张前锋. 1999. 西天山独库公路花岗片麻岩的锆石 U–Pb 年龄及其地质意义. *科学通报*, 44(21): 2328–2332
- 陈义兵, 胡霭琴, 张国新, 张前锋. 2000. 西南天山前寒武纪基底时代和特征: 锆石 U–Pb 年龄和 Nd–Sr 同位素组成. *岩石学报*, 16(1): 91–98
- 代文军, 史文全, 朱光儒, 刘强. 2006. 西天山西段乌什布拉克岩体特征及其形成意义. *甘肃地质*, 15(1): 29–35
- 高长林, 崔可锐, 钱一雄等. 1995. 天山微板块构造与塔北盆地. 北京: 地质出版社. 1–284
- 高俊, 何国琦, 李茂松. 1997. 西天山造山带的古生代造山过程. *地球科学*, 22(1): 27–32
- 高俊, 龙灵利, 钱青, 黄德志, 苏文, Klemd R. 2006. 南天山: 晚古生代还是三叠纪碰撞造山带? *岩石学报*, 22(5): 1049–1061
- 高俊, 肖序常, 汤耀庆, 赵民, 王军, 吴汉泉. 1993. 南天山库米什蓝片岩的发现及其大地构造意义. *中国区域地质*, (4): 344–347
- 高俊. 2000. 中国西北西天山高压低温变质带地质图. 中国地质科学院地质所. 制图单位: 河北地质调查局
- 何国琦, 李茂松, 刘德权, 唐延龄, 周洪汝. 1994. 中国新疆古生代地壳演化与成矿. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社. 1–437
- 胡霭琴, 张国新, 张前锋, 陈义兵. 1999. 天山造山带基底时代和地壳增生的 Nd 同位素制约. *中国科学(D)*, 29(2): 104–112
- 姜常义, 吴文奎等. 1995. 从岛弧向裂谷的变迁: 来自阿吾来勒地区火山岩的证据. *岩石矿物学杂志*, 14(4): 289–300
- 李向东, 肖文交, 周宗良. 2004. 南天山南缘晚泥盆世构造事件的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年证据及其意义. *岩石学报*, 20(3): 691–696
- 李注苍, 李永军, 李景宏, 栾新东, 郭文杰. 2006. 西天山阿吾拉勒一带大哈拉军山组火山岩地球化学特征及构造环境分析. *新疆地质*, 15(1): 25–28
- 刘本培, 王自强, 张传恒等. 1996. 西南天山构造格局与演化. 武汉: 中国地质大学出版社. 1–120
- 刘斌, 钱一雄. 2003. 东天山三条高压变质带地质特征和流体作用. *岩石学报*, 19(2): 283–296
- 钱青, 高俊, 熊贤明, 龙灵利, 黄德志. 2006. 西天山昭苏北部石炭纪火山岩的岩石地球化学特征、成因及形成环境. *岩石学报*, 22(5): 1307–1323
- 邵铁全, 石莹, 靳红, 宋杨, 朱志新, 王克卓, 张建东, 徐达. 2006. 新疆西天山大哈拉军山组火山岩岩石化学特征及地质意义. *新疆地质*, 24(3): 218–222

- 汤耀庆, 高俊, 赵民等. 1995. 西南天山蛇绿岩和蓝片岩. 北京: 地质出版社. 1-133
- 王宝瑜, 郎智君, 李向东. 1994. 中国天山西段地质剖面综合研究. 北京: 科学出版社. 5-19
- 王博, 舒良树, Cluzel D, Faure M, Charvet J, 马前. 2006. 新疆伊犁北部石炭纪火山岩地球化学特征及其地质意义. 中国地质, 33(3): 498-508
- 吴元保, 郑永飞. 2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约. 科学通报, 49(16): 1589-1604
- 夏林圻, 夏祖春, 徐学义等. 2004. 天山石炭纪大火成岩省与地幔柱. 地质通报, 23(9): 903-910
- 夏祖春, 徐学义, 夏林圻等. 2005. 天山石炭-二叠纪后碰撞花岗岩岩石地球化学研究. 西北地质, 38(1): 1-14
- 肖序常, 刘训, 高锐. 2004. 中国新疆天山-塔里木-昆仑地学断面说明书. 北京: 地质出版社. 1-89
- 肖序常, 汤耀庆, 冯益民等. 1992. 新疆北部及其邻区大地构造. 北京: 地质出版社. 12-47
- 新疆地质矿产局. 1979. 新疆 1:200000 地质图昭苏幅 (K-44-10)
- 新疆地质矿产局. 1983. 新疆 1:200000 地质图黑英山幅 (K-44-17)
- 新疆地质矿产局. 1993. 新疆维吾尔自治区地质志. 北京: 地质出版社
- 张立飞, 艾永亮, 李强, 李旭平, 宋述光, 魏春景. 2003. 新疆西南天山超高压变质带的形成与演化. 岩石学报, 21(4): 1029-1038
- 张万仁, 朱文戈, 王世新. 2006. 西天山科克苏河一带中新元古代碳酸盐岩沉积环境. 甘肃地质, 15(1): 25-28
- 张增杰, 陈衍景, 陈华勇, 鲍景新, 刘玉林. 2002. 天山海西期不同类型花岗岩类岩石化学特征及其地球动力学意义. 矿物岩石, 22(2): 13-21
- 张作衡, 王志良, 毛景文, 柴凤梅, 杨富全, 杨建民. 2006. 西天山菁布拉克基性杂岩体的地球化学特征. 地质学报, 80(7): 1005-1016
- 赵振华, 白正华, 熊小林, 梅厚钧, 王一先. 2003. 西天山北部晚古生代火山-浅侵位岩浆岩 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 同位素定年. 地球化学, 32(4): 317-327
- 朱永峰, 宋彪. 2006. 新疆天格尔糜棱岩化花岗岩的岩石学及其 SHRIMP 年代学研究: 兼论花岗岩中热液锆石边的定年. 岩石学报, 22(1): 135-144
- 朱永峰, 张立飞, 古丽冰等. 2005. 西天山石炭纪火山岩 SHRIMP 年代学及其微量元素地球化学研究. 科学通报, 50(18): 2004-2014
- 朱永峰, 周晶, 郭璇. 2006a. 西天山石炭纪火山岩岩石学及 Sr-Nd 同位素地球化学研究. 岩石学报, 22(5): 1341-1350
- 朱永峰, 周晶, 宋彪等. 2006b. 新疆“大哈拉军山组”火山岩的形成时代问题及其解体方案. 中国地质, 33(3): 487-497
- 朱志新, 王克卓, 郑玉洁等. 2006. 新疆伊犁地块南缘志留纪和泥盆纪花岗岩质侵入体锆石 SHRIMP 定年及其形成时构造背景的初步探讨. 岩石学报, 22(5): 1193-1200