

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2020.196>



伊犁板块南缘高 T/P 变质岩系：代表前寒武纪结晶基底还是活动大陆边缘？

夏 彬¹, 张立飞²

1. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

2. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871

摘要：新疆伊犁板块南缘的狭长地带内广泛出露了高 T/P 变质岩系, 其成因和属性研究有利于我们深入了解天山造山带的造山演化过程. 前人认为这些岩石属早前寒武纪结晶基底, 近期研究则显示其主要形成于早古生代. 系统总结了课题组近些年在该区开展的工作, 结合前人研究, 对伊犁板块南缘不同岩石构造单元内的岩石成因进行了分析和讨论, 提出伊犁板块南缘的高 T/P 变质岩系的形成与南天山洋大洋板片在伊犁板块之下的俯冲、岩浆在陆缘弧位置就位并造成伊犁板块南缘地温梯度的明显升高有关. 因此, 认为伊犁板块南缘狭长地带内的高 T/P 变质岩系形成于南天山洋俯冲过程中形成的活动大陆边缘环境, 而非前寒武纪结晶基底的组成部分.

关键词：伊犁板块南缘; 高 T/P 变质岩单元; 活动陆缘; 岩石学.

中图分类号: P581

文章编号: 1000-2383(2021)06-1960-13

收稿日期: 2020-06-18

High T/P Metamorphic Rocks in Southern Yili Plate: Representative for Precambrian Crystalline Basement or Active Continental Margin?

Xia Bin¹, Zhang Lifei²

1. School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

Abstract: Study on high T/P metamorphic rocks in the southern Yili plate is essential for our understanding of the evolution of the Tianshan orogenic belt. Previous researchers suggested these rocks to belong to the Early Precambrian basement of the Nalati Group. However, recent studies show that they were generated in Paleozoic. Here in this study, it discusses the origin and formation environment for rocks in different litho-tectonic units in the southern Yili plate. Combined with other studies, it proposes that the high T/P metamorphic rocks were formed due to the emplacement and transportation of large volume magma in the arc region when the South Tianshan oceanic slab subducted under the Yili plate. The magma intrusion significantly elevated the thermal gradient, resulted in the regional high T/P metamorphism along the southern Yili plate. Therefore, high T/P rocks in the southern Yili plate were not a constituent of the Early Precambrian basement, but represented an active continental margin formed by the subduction of the South Tianshan ocean.

Key words: southern Yili plate; high T/P metamorphic rocks; active continental margin; petrology.

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(No.41502043).

作者简介: 夏彬(1987-), 男, 副教授, 现主要从事变质地质学研究. ORCID: 0000-0001-7921-1545. E-mail: xiabin@cug.edu.cn

引用格式: 夏彬, 张立飞, 2021. 伊犁板块南缘高 T/P 变质岩系: 代表前寒武纪结晶基底还是活动大陆边缘? 地球科学, 46(6):1960-1972.

0 前言

高级变质岩系(角闪岩相至麻粒岩相变质岩)和花岗质片麻岩(如TTG岩石)是大陆结晶基底的重要组成部分,并常伴随区域变形的叠加.在精细原位微区测年手段应用之前,对地球上出现的高级变质岩系和花岗质片麻岩由于缺失用于时代限定的生物化石标志,常以岩石地层对比为主要依据,将高级变质岩系和花岗质片麻岩等置放于早前寒武纪结晶基底组成部分.而板块构造理论显示,大洋向大陆板块之下俯冲过程中同样可以在俯冲带之上的大陆弧位置发育大量岩浆的侵入和喷出事件,并可能因区域热流值的升高而发育高级变质岩系(Miyashiro, 1972),且这一造山过程常伴随区域变形作用,形成类似于前寒武纪结晶基底的岩石组合和组构特征.因此,准确识别这一类岩石组合的成岩特征和构造环境,对于理解造山带演化历史有重要作用.

天山造山带位于中国西部新疆境内,是中亚造山带的重要组成部分,记录了古亚洲洋在中国西部的演化过程.天山造山带的形成和演化,是认识古亚洲洋闭合和中亚造山带演化历史的关键,因此一直以来都受到国内外地质学者的广泛关注.位于伊犁板块南缘,沿近东西向出露的逾200 km狭长地带内发育了高T/P变质岩系和花岗质片麻岩.前人根据地层对比,认为这些高T/P变质岩系和花岗质片麻岩是中天山地体早前寒武纪结晶基底的组成部分,时代上属古元古代那拉提群(新疆维吾尔自治区地质矿产局, 1993).这一观点直在近年来仍被一些研究者秉持(Gao *et al.*, 2009; Wang *et al.*, 2018).随着新的测年手段的应用,研究者们发现该带内高T/P变质岩系和花岗质片麻岩可能并不属于早前寒武系结晶基底,而与新元古代或古生代的构造热事件相关.本文基于近几年课题组在该区开展的工作,结合前人研究,对伊犁板块南缘不同岩石构造单元内的岩石组成、成因和形成环境进行了分析和总结,尤其对前人认为属古元古代那拉提群的高T/P变质岩系展开了详细讨论,以明确伊犁板块南缘的构造属性,是形成于活动大陆边缘环境,还是代表了天山造山带内陆块的结晶基底.

1 区域地质背景

天山造山带位于中亚造山带的西南缘(图1a),

见证了古亚洲洋在中国西部的最终闭合.天山造山带近东西向展布,自东向西横跨中国西部新疆、邻区哈萨克斯坦南部、吉尔吉斯斯坦、塔吉克斯坦和乌兹别克斯坦境内,全长逾2500 km(图1b).在中国境内,天山造山带分新疆为南北两疆,形成南、北天山分准噶尔、伊犁和塔里木三大盆地的地理格局.研究者多以托克逊—库米什公路(国道314,现为G314高速公路)为界,将天山造山带划分为东天山和西天山造山带(马瑞士等, 1997).根据传统对西天山采取的是三分方案,自北向南依次为北天山、中天山和南天山,如胡冰等(1964)划分出北天山褶皱带、中天山结晶基底和南天山褶皱带,以及板块构造理论出现以来的北天山造山带、中天山板块和南天山造山带的分法(李春昱, 1980; 汤耀庆等, 1995; Gao *et al.*, 1998).在这种三分方案中,伊犁板块被认为是广义的中天山板块的西延部分.近些年来一些学者从构造岩性角度分析认为伊犁板块和中天山陆块在早古生代时期应属两个相互独立的块体,二者同属位于中亚造山带南缘从古塔里木板块分离出来的小陆块,并在早志留世前重新拼贴到一起(Windley *et al.*, 2007; Biske and Seltmann, 2010).因此,西天山自北向南又被划分出4个构造单元:北天山造山带、伊犁板块、中天山陆块和南天山造山带(图1b; Gao *et al.*, 2009; Biske and Seltmann, 2010; Han *et al.*, 2011).

在Talas-Fergana断裂以东,邻区吉尔吉斯斯坦境内的天山同样采取了三分方案,自北向南划分出了北天山、中天山和南天山造山带(图1b; Glorie *et al.*, 2010).它们与中国境内天山不同构造单元间的对应关系存有争议.一些学者认为,吉尔吉斯斯坦境内分隔中天山陆块和北天山地块的Nikolaev断裂可以与中国境内的那拉提北缘断裂相连,代表早古生代时期Terskey洋的闭合(何国琦等, 2001; Gao *et al.*, 2009).在这种划分方案下,吉尔吉斯斯坦北天山地块可以同中国的伊犁板块相连,共同组成哈萨克斯坦—伊犁板块.吉尔吉斯斯坦中天山陆块则通过伊犁板块南缘狭长的前寒武纪结晶基底与中国的中天山陆块相连(Gao *et al.*, 2009).其他一些研究者则认为Nikolaev断裂不与那拉提北缘断裂连接,而是消失在中国和吉尔吉斯斯坦国界附近(Biske and Seltmann, 2010)或尖灭在西南天山高压—超高压变质带的阿克牙孜地区(Hegner *et al.*, 2010).吉尔吉斯斯坦中天山陆块并没有与中国的中天山陆

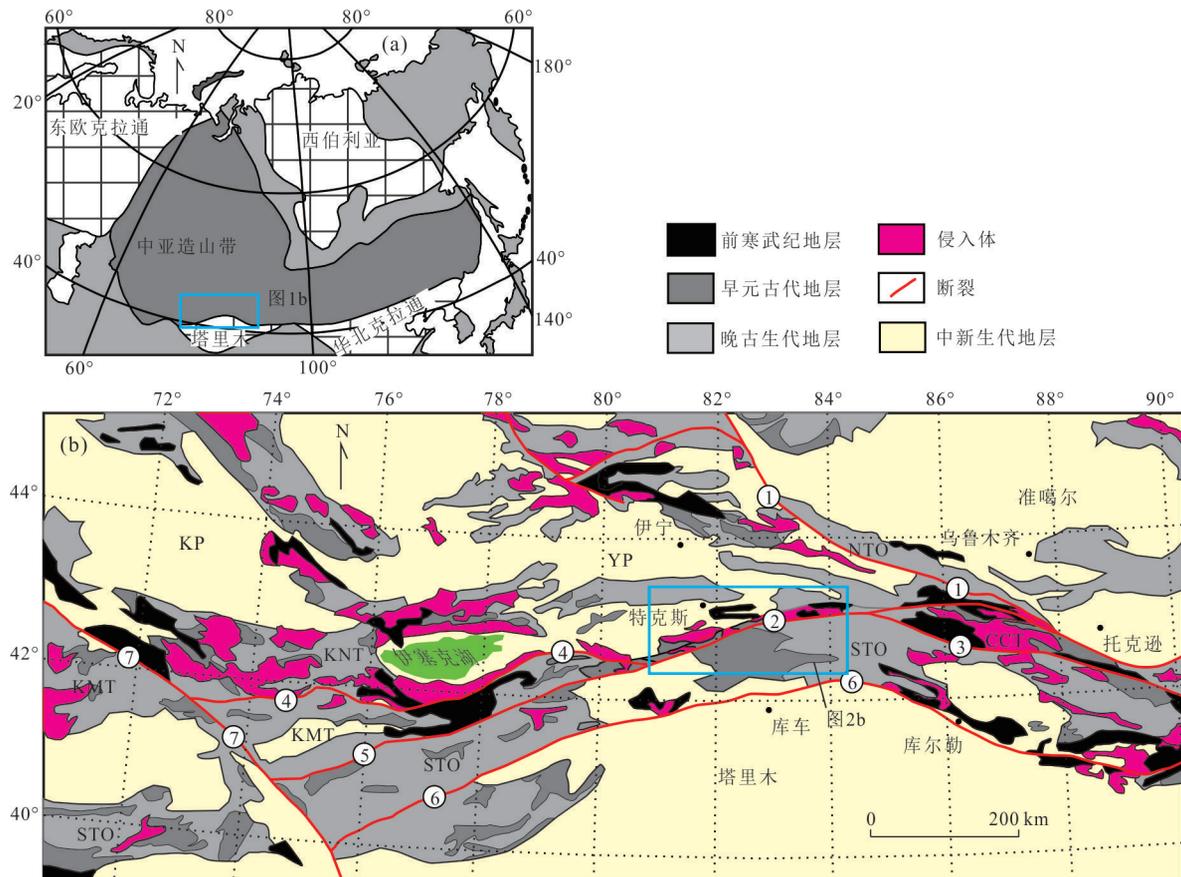


图 1 中亚造山带大地构造简图

Fig.1 Schematic geological map for the Central Asian orogenic belt

1. 北天山断裂; 2. 筲布拉克—那拉提断裂; 3. 巴伦台断裂; 4. Nikolaev 断裂; 5. Atbashi-Inylchek 断裂; 6. 塔里木北缘断裂; 7. Talas-Fergana 断裂; YP. 伊犁板块; KP. 哈萨克斯坦板块; KNT. 吉尔吉斯北天山; CCT. 中天山陆块; NTO. 北天山造山带; STO. 南天山造山带; KMT. 吉尔吉斯中天山

块相连, 而可能是尖灭于中吉边界附近. 通过地层岩性及岩浆岩的对比, 伊犁板块南缘与吉尔吉斯斯坦北天山地块直接具有一定的相似性, 显示二者可能存在共同的属性特征 (Chen *et al.*, 1999; Biske and Seltmann, 2010). 因此, 伊犁板块南缘的狭长地带并不是中国境内中天山的西延部分, 而是伊犁板块的组成部分 (图 1b). 为更好地认识这一地区的构造岩石属性, 本文将对该位置不同构造岩石单元进行详细论述.

2 伊犁板块南缘的构造岩石单元特征

伊犁板块南缘西起昭苏县夏特乡木扎尔特口岸, 沿北东东方向延伸逾 200 km 至和静县巩乃斯乡艾肯达坂一带 (图 2a). 其北为伊犁盆地, 南为西南天山高压—超高压变质带. 该区岩石类型主要由前寒武纪地层、古生代火山—沉积岩系、花岗质片麻

岩、变沉积岩等组成, 并被大量古生代岩浆岩侵入. 不同变质等级岩石均以带状分布, 且存在从高 T/P 变质岩系, 其变质等级向南北两侧级别显著降低的趋势. 按区内岩石变质等级、形成时代, 并结合大型走滑断裂, 自北向南大致划分出了 4 个构造岩石单元: 中新元古代沉积地层单元、古生代火山沉积岩系单元、高 T/P 变质岩单元和绿片岩相变沉积岩单元 (图 2b). 在绿片岩相变沉积岩单元南侧, 是西南天山高压—超高压变质带 (Zhang *et al.*, 2018).

2.1 中新元古代沉积地层单元

伊犁板块南缘出露的新元古代地层主要位于特克斯县东南、科克苏河东岸一带 (图 2b). 岩性以砂岩、粉砂岩、石英岩、大理岩和灰岩等为主, 时代上主要属长城系特克斯群、蓼县系科克苏群和青白口系库什台群, 并被晋宁期和华力西期花岗岩侵入 (新疆地质局区域地质调查大队五分队, 1978. 区域

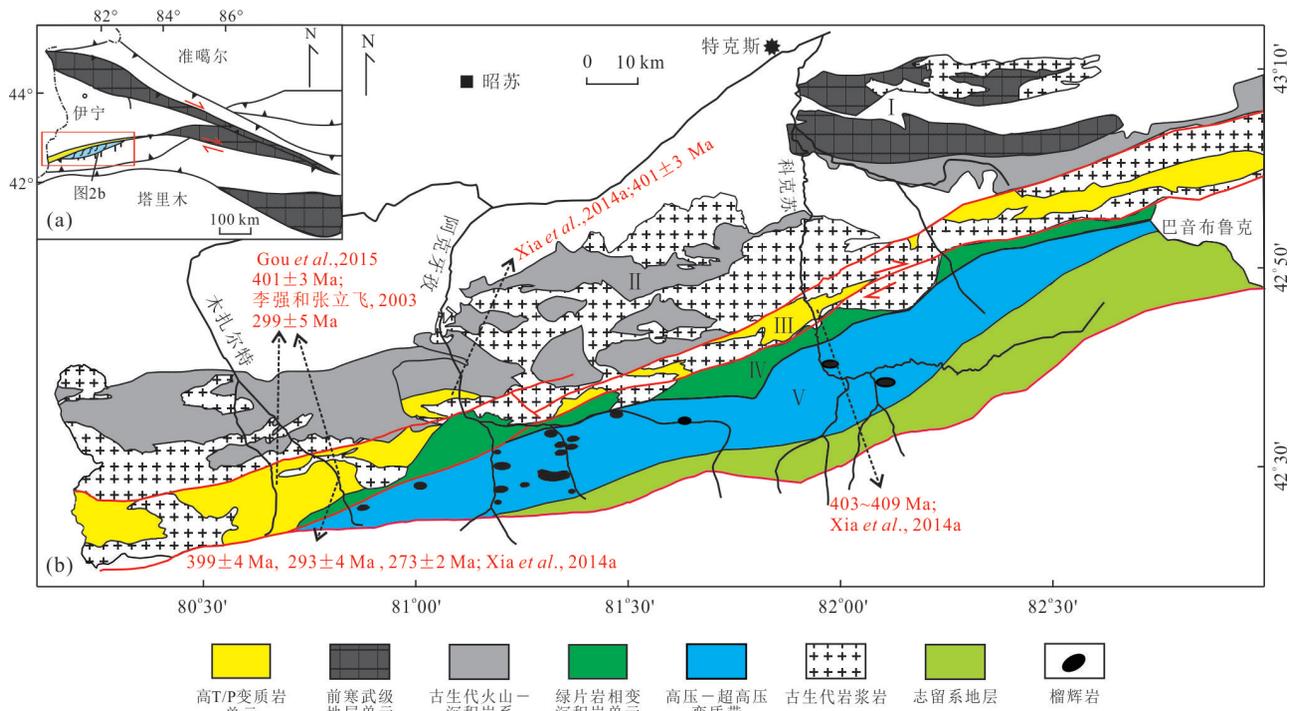


图 2 伊犁板块南缘构造岩石单元地质简图

Fig.2 Simplified geological map for the litho-tectonic units in the southern Yili plate

地质调查报告:英尔幅.新疆).整体而言,地层岩性下部以碎屑岩为主,上部逐渐出现大量碳酸盐岩,并在碳酸盐岩中发现丰富的前寒武系叠层石.在科克苏河东岸局部位置还出露少量震旦系水泉组地层,由一套冰碛岩、含砾砂岩和灰岩组成,呈角度不整合覆盖在青白口系库什台群之上,上界被第四系砂砾层覆盖(新疆地质局区域地质调查大队五分队,1978.区域地质调查报告:英尔幅.新疆).整个前寒武系地层遭受了低级变质作用叠加,变泥质岩中普遍发育板状、千枚状构造,变质级别大致对应绿泥石-绢云母级.对特克斯县东南部蓟县系科克苏群采集的钙质粉砂岩和青白口系库什台群采集的石英砂岩进行的碎屑锆石年代学研究显示,钙质粉砂岩中最年轻的锆石其加权平均年龄为 1 200 Ma,石英砂岩中最年轻的锆石其加权平均年龄为 904 Ma(本人未发表数据).前者对应科克苏群最大沉积时代为中元古代晚期蓟县系,后者对应新元古代早期青白口系,这与前人通过对该地层内广泛发育的碳酸盐岩中丰富的叠层石和微古植物化石的研究给出的结论一致(新疆维吾尔自治区地质矿产局,1993).

在伊犁板块及邻区,除特克斯县附近外,中新元古代蓟县系和青白口系地层还在赛里木湖附近、

特克斯县城附近和东天山卡瓦布拉克至星星峡一带分布,岩性均以碳酸盐岩和镁质碳酸盐岩为主,含丰富的叠层石和微古植物化石(新疆维吾尔自治区地质矿产局,1993),显示这些地区在该时代的可对比性.

2.2 古生代火山-沉积岩系

古生代的火山-沉积岩系在伊犁板块南缘广泛分布,大致呈带状分布在高 T/P 变质岩单元的北侧,并大致以那拉提北缘断裂分隔.该套岩系可分为上下两个部分,下部为一套浅变质沉积岩系,主要分布在阿克牙孜河下游地区,岩石类型主要为变质砂岩、变质粉砂岩、千枚岩和碳酸盐岩夹层或透镜体等,可见晚志留-早泥盆的珊瑚、苔藓虫和层孔虫等化石(新疆地质局区域地质调查大队五分队,1978.区域地质调查报告:英尔幅.新疆).上部为一套火山沉积建造,在伊犁板块南缘出露非常广泛,以角度不整合覆盖在前寒武系地层和早古生代地层之上.该套地层可分为上下两个组,下部为大哈拉军山组,主要由基性-酸性火山岩、火山碎屑岩、碎屑岩夹灰岩透镜体等组成,发育广泛;上部为阿克萨克组,主要为一套红色碎屑岩、碳酸盐岩夹少量火山碎屑岩沉积,出露范围相对较小(新疆地质局区域地质调查报告,1978).近些年对该区广泛

分布的这套火山沉积岩系开展了较多的工作(钱青等, 2006; 朱永峰等, 2006; Zhu *et al.*, 2009; 林靛等, 2015), 结果显示, 前人所谓的晚石炭世大哈拉军山组火山岩其形成时代可从晚泥盆世一直延续到晚石炭世. 大致分为晚泥盆世(>363 Ma), 早石炭世(~354 Ma)和晚石炭世(~313 Ma)三个阶段. 有学者提出将“大哈拉军山组”火山岩解体为三个组: 上泥盆统“特克斯达坂组”、下石炭统“大哈拉军山组”和上石炭统“拉尔敦达坂组”(朱永峰等, 2006; Zhu *et al.*, 2009). 对这一套晚古生代火山—沉积建造的形成环境, 存在两种不同的认识: 一是大陆裂谷环境, 与地幔柱的活动有关(夏林圻等, 2006); 二是大陆弧环境, 与南天山洋洋壳向伊犁—中天山板块之下的俯冲有关(钱青等, 2006; 朱永峰等, 2006; Zhu *et al.*, 2009; 林靛等, 2015).

2.3 高 T/P 变质岩单元

高 T/P 变质岩单元岩性组成主要为花岗质片麻岩、副片麻岩、透辉石斜长角闪岩、石榴黑云角闪片岩和混合岩等, 局部可见二辉石麻粒岩透镜体包裹在石榴矽线黑云片麻岩中(李强和张立飞, 2004), 变质级别达高角闪岩相—麻粒岩相(Xia *et al.*, 2014a).

该单元高级变质岩系长期被认为代表前寒武系结晶基底, 时代上属古元古代(新疆维吾尔自治区地质矿产局, 1993; 王宝瑜等, 1994; Gao *et al.*, 2009). 近些年开展的锆石原位微区测年工作显示, 该带西部昭苏一带副片麻岩的变质时代可能为 396 Ma(Gou *et al.*, 2015)或 299 Ma(李强和张立飞, 2004); 昭苏、特克斯一带的花岗质片麻岩、石榴黑云角闪片岩和混合岩等则给出了 410~400 Ma, ~290 Ma 和 ~270 Ma 的变质时代和深熔作用发生时代(Xia *et al.*, 2014a). 部分副片麻岩的继承性锆石给出了~430 Ma 的最大沉积时代.

在该带东段独库公里沿线的艾肯达坂和那拉提镇附近的拉尔敦达坂, 对侵位到变沉积岩中的花岗质片麻岩开展的年代学研究给出了新元古代早期年龄. 如在艾肯达坂的眼球状花岗闪长质片麻岩进行的 SHRIMP 年代学工作显示其形成于 895 Ma(Long *et al.*, 2011), 拉尔敦达坂花岗质片麻岩给出了 948 Ma 的锆石 SHRIMP 年龄(陈新跃等, 2009). 这一时期的岩浆活动在中天山陆块、伊犁板块和邻区吉尔吉斯斯坦北天山零星散布(Yang *et al.*, 2008; Kröner *et al.*, 2009; 胡霭琴等, 2010), 被解释

为可能与 Rodinia 超大陆聚合过程中的 Grenville 造山运动有关.

2.4 绿片岩相变沉积岩单元

绿片岩相变沉积岩单元位于高 T/P 变质岩单元南侧, 岩性以白云母片岩、二云母片岩和黑云钠长石英片岩为主, 变质级别较低, 达绿片岩相(图 2b). 前人认为该套岩石组合时代上属中新元古代(新疆维吾尔自治区地质矿产局, 1993; Wang *et al.*, 2010, 2011). 近年来对二云母片岩和白云母片岩中的黑云母和白云母开展的 Ar-Ar 测年显示, 变质时代发生在~250 Ma, 解释为代表那拉提北缘大型走滑断裂的发生时间(Xia *et al.*, 2016a); 而锆石 U-Pb 原位测年结果显示, 变沉积岩原岩物质供给主要来源于隆起的陆缘弧岩浆岩区, 其最大沉积时代为 400~390 Ma(Xia *et al.*, 2014b). 岩石组合、原岩特征及年代学研究结果说明, 该套岩石的原岩可能形成于弧前盆地环境.

2.5 古生代岩浆岩侵入体

伊犁板块南缘普遍遭受古生代岩浆岩的侵入. 近年来研究者们对这些岩浆岩进行了较多的年代学和地球化学工作, 并对其形成环境进行了讨论. 总体而言, 岩浆岩的形成时代主要集中在早志留世~430 Ma 到中二叠世~270 Ma 的范围内. 按形成时代和成因环境特征, 岩浆活动大致可分为两个时期, 第一期为早志留世—早石炭世岩浆岩, 如位于变质带西段木扎尔特地区的花岗质闪长岩(305~320 Ma; Gou *et al.*, 2012)和阿克牙孜地区的中酸性花岗岩类(400~420 Ma; 龙灵利等, 2007), 位于变质带中部科克苏地区的花岗岩类(340~430 Ma; 王博等, 2007; Gao *et al.*, 2009)和筭布拉克基性、超基性侵入岩(431~434 Ma; 张作衡等, 2007; Yang *et al.*, 2008), 以及位于变质带东部新源地区的中酸性花岗岩(366~436 Ma; 朱志新等, 2006)等. 地球化学研究显示, 这些岩浆岩表现出弧岩浆岩的特征, 推测形成于大陆边缘弧或岛弧环境中, 可能与南天山洋洋壳向伊犁板块之下的俯冲有关. 第二期为后碰撞岩浆岩, 如位于变质带西部木扎尔特地区的 I 型花岗岩(293~294 Ma; Gou *et al.*, 2012)和 S 型花岗岩(266~278 Ma; Gou *et al.*, 2015), 以及位于变质带中部科克苏地区的 S 型花岗岩(Xia *et al.*, 2016b)等. 这些花岗岩类岩石表现出后碰撞环境的地球化学特征. 此外, 晚石炭世—中二叠世的岩浆岩在邻区吉尔吉斯斯坦中天山和整个南天山造山

带中都有分布,被认为形成于造山后拉张背景下,可能与加厚岩石圈的拆沉并伴随软流圈地幔的上涌有关(Han *et al.*, 2011; Gou *et al.*, 2015). 岩石圈地幔拆沉后,软流圈地幔的上涌会带来大量的热,促进地壳岩石及下伏岩石圈地幔的部分熔融,形成一系列后碰撞花岗岩,这些花岗岩通常会带有明显的地幔印记;上地壳沉积物的部分熔融则形成了S型花岗岩.

2.6 西南天山高压-超高压变质带

西南天山高压-超高压变质带总体延伸方向与伊犁板块南缘高T/P变质岩单元基本一致,二者在空间上近于平行并置(图2). 该带自西部的木扎尔特河谷一带,向东延伸到巴音布鲁克盆地之下. 岩性以变沉积岩为主,局部发育大理岩、钙质片岩夹层和蛇纹岩团块. 榴辉岩或蓝片岩呈团块状、透镜状、枕状或层状夹于变沉积岩或蛇纹岩中(Zhang *et al.*, 2018). 榴辉岩和蓝片岩等变基性岩表现出N-MORB, E-MORB, OIB及VAB等地球化学特征(高俊等, 2006). 这些岩石组合和地球化学特征都显示这一地区的基性岩和超基性岩其原岩具有洋壳属性. 变质作用研究显示,该区变质岩石整体表现出较低的地温梯度(5~7 °C/km)和峰期变质温度(<550 °C),代表洋壳冷俯冲环境(张立飞等, 2013; 吕增和王凯, 2018; Zhang *et al.*, 2018; 张丽娟等, 2018). 而峰期变质压力的差异表明,在西南天山北西侧可能发育超高压变质亚带,在南东侧发育高压变质亚带,自南东向北西,变质岩石记录的压力由低到高,可能代表折返深度的不同(张立飞等, 2013; Zhang *et al.*, 2018; Xia *et al.*, 2020). 大量的年代学研究显示,高压-超高压变质带榴辉岩相峰期变质时代为~320~315 Ma, 蓝片岩相叠加时代为~320~310 Ma, 绿片岩相叠加时代为~293 Ma(Su *et al.*, 2010; Xia *et al.*, 2016a; Zhang *et al.*, 2018).

3 讨论

3.1 伊犁板块南缘是早前寒武纪结晶基底吗?

研究者认为天山造山带内存在数个前寒武纪结晶基底,基底岩石主要分布在天山造山带的中部隆起位置,由厚层前寒武纪变质岩系和侵入到其中的岩浆岩组成,并被寒武系-奥陶系稳定大陆边缘沉积盖层不整合覆盖,这一隆起区域被称为“中天山结晶轴”(胡冰等, 1964). 其后罗发祚(1989)根据在这一隆起区内获得的数十个同位素地质年龄数

据,结合大量中、新元古代的叠层石和微古植物孢粉化石等资料,论证了中天山隆起带自西向东在昭苏、艾肯达坂、巴伦台、天湖和星星峡等地区连续出露数个元古代的变质岩系区域,为中天山前寒武系结晶基底的存在提供了证据. 板块构造理论出现后,一些地质学者对天山地区的基底重新开展了研究,认为中天山并不存在一个连续的“前寒武纪结晶轴”,而是由寒武纪时期从塔里木板块北缘离散出来的若干块体组合而成. 这些块体分散在天山造山带中,自西向东包括:赛里木微地块、那拉提微地块、阿克乔喀微地块、巴伦台微地块和卡瓦布拉克微地块等(夏林圻等, 2002). 多数研究者认为这些微陆块具有前寒武纪的结晶基底,时代上可分为晚太古代-早元古代结晶基底和中晚元古代结晶基底(新疆维吾尔自治区地质矿产局, 1993; 胡霁琴等, 1999). 前者包括出露在哈尔克山和那拉提山的木扎尔特群和那拉提群,以及赛里木湖地区的温泉群(新疆维吾尔自治区地质矿产局, 1993). 后者在时代上分别对应长城系、蓟县系和青白口系.

近些年来随着新技术的发展,尤其是锆石原位微区测年技术的广泛应用,人们对天山地区的基底组成又有了新的认识. 锆石 SHRIMP 及 LA-ICPMS U-Pb 原位测年结果显示,部分早期认为是古老基底组成部分的花岗质片麻岩类岩石,其形成时代则显著年轻,年龄从新元古代到晚古生代都有分布. 如在天山东段星星峡变质杂岩体中的灰色片麻岩给出了 1.4 Ga 的 SHRIMP 测年结果(胡霁琴等, 2006); 部分分布于那拉提山北缘、巴伦台及温泉地区花岗质片麻岩的测年结果也给出了新元古代早期的年龄(900~950 Ma; Yang *et al.*, 2008; 陈新跃等, 2009; 胡霁琴等, 2010; Long *et al.*, 2011). 有些变质杂岩体给出了更年轻的古生代年龄,如位于赛里木湖地区前人认为属温泉群的斜长角闪岩给出了 ~450 Ma 的岩体形成年龄(胡霁琴等, 2010), 位于西南天山木扎尔特地区前人认为属那拉提群的副片麻岩给出了古生代 299 Ma (李强和张立飞, 2004) 及 396 Ma (Gou *et al.*, 2015) 的年龄. 在邻区吉尔吉斯斯坦北天山地区,之前认为是太古代老基底的花岗质片麻岩给出了新元古代 810~844 Ma 的年龄; 靠近中吉边境、被认为是太古代的强变形花岗片麻岩, SHRIMP 测年结果却显示其侵位时代为早石炭世 336 Ma (Kröner *et al.*, 2009). 因此,这些地区的高级变质岩系和花岗质片麻岩可能

并不属于早前寒武系的结晶基底,而可能与中新元古代或古生代的构造热事件相关。

位于伊犁板块南缘的深变质岩系和花岗质片麻岩同样被认为是那拉提微地块的基底组成部分,并可能与巴伦台微陆块代表的中天山相连(Gao *et al.*, 2009). 而上文对该带不同构造单元岩石的形成时代和背景的详细论述可以看出,除特克斯县附近存在中新元古代沉积地层,及伊犁板块南缘东段局部位置发现新元古代花岗质片麻岩外,高级变质岩系和花岗质片麻岩主要形成于古生代早泥盆世~400 Ma、晚石炭世~290 Ma和~270 Ma(李强和张立飞, 2004; Xia *et al.*, 2014a, 2016b; Gou *et al.*, 2015). 对该高 T/P 变质单元南侧呈带状并置西南天山高压—超高压变质带内发育的蓝片岩和榴辉岩开展的大量年代学研究结果表明,南天山洋闭合的时间大致为 320~310 Ma(张立飞等, 2013). 在~310 Ma 之后,南天山造山带进入后碰撞环境中. 因此,伊犁板块南缘高 T/P 变质岩单元可能与其南侧高压—超高压变质带同处于南天山洋闭合过程相关的造山作用中。

3.2 伊犁板块南缘高级变质岩系的成因

伊犁板块南缘的高级变质岩和花岗质片麻岩共记录了三个期次的高级变质作用和深熔事件,且以早泥盆世~400 Ma 的变质热事件发育最为显著,影响最为广泛,形成了自东向西从科克苏地区到阿克牙孜地区再到木扎尔特地区的混合岩杂岩体. 而之后的~290 Ma 和~270 Ma 的高级变质作用则影响范围较小,仅局部发生在该带西段的木扎尔特地区。

对分布于伊犁板块南缘自西向东不同位置的花岗质岩石和火山岩开展的年代学研究显示,在早志留世~430 Ma 南天山洋就已经发生了俯冲,俯冲在伊犁板块南缘活动大陆边缘形成了具陆缘弧特征的岩浆岩和火山岩。

大洋板片在俯冲过程中,随着温度、压力条件的升高,含水矿物发生分解发生脱水反应. 脱水出来的流体在大约 100 km 的深度进入地幔楔,会促进地幔楔组成岩石的部分熔融,从而在上盘位置引发弧岩浆的侵位和喷发(Ernst, 2010). 大量的岩石学研究显示,在西南天山西段,榴辉岩和围岩云母片岩经历了超高压变质作用,显示洋壳曾俯冲到较深位置(>90 km)并折返到地表(张立飞等, 2013). 深俯冲大洋板片的脱水会进入并交代上覆地

幔楔,引发部分熔融,并在上盘伊犁板块南缘发生大量的岩浆侵位和火山喷发事件. 沿整个伊犁板块南缘,岩浆岩记录了 430~320 Ma 的活动时间(图 3),且表现出陆缘弧岩浆岩的地球化学特征. 因此,伊犁板块南缘 410~400 Ma 的高级变质作用可能形成于南天山洋俯冲形成的陆缘弧环境中. 弧岩浆在陆缘弧位置的大量就位和迁移,会造成该位置地热梯度的明显升高. 越靠近侵入岩体,围岩所受的温度越高,形成的变质岩变质级别也越高,这类似于接触变质作用,只不过变质作用发生的范围更大,压力也稍高(Miyashiro, 1972, 1973; Brown, 2009). 图 4 大致描述了活动大陆边缘弧位置岩浆岩的侵入与区域变质作用之间的关系. 图 4a 和图 4b 展示了由于岩浆侵位深度的不同,造成的区域变质级别在横剖面上的差异. 其中图 4a 表示侵入体主要就位在中浅部层位(多大于 8 km),图 4b 显示侵入体就位在不同深度. A、B 剖面分别表示由于抬升剥蚀作用,可能出现的现今野外变质岩的出露面. A 代表了低压型区域变质作用,而 B 代表了中压型区域变质作用. 在伊犁板块南缘,高级变质岩系和花岗质片麻岩给出的峰期低温梯度 >30 °C/km,大致对应低压型区域变质作用. 因此,我们认为,伊犁板块南缘~410~400 Ma 的高级变质作用与洋壳俯冲过程中岩浆在陆缘弧地区的大规模侵入造成区域热流值

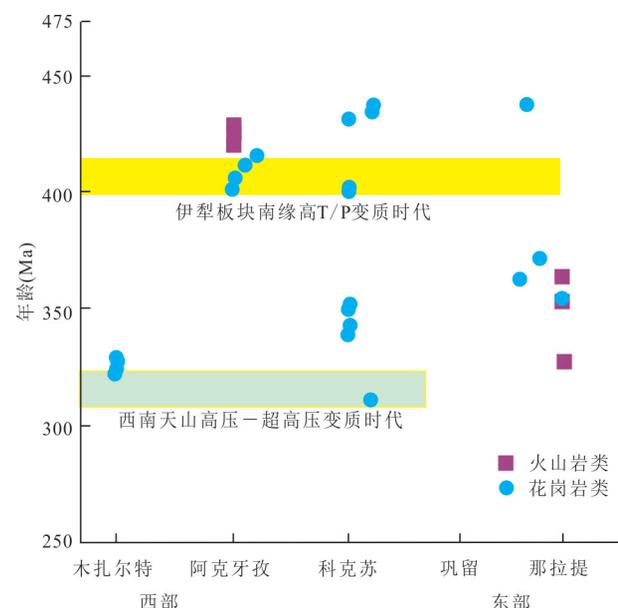


图 3 伊犁板块南缘陆缘弧岩浆岩年龄分布

Fig. 3 Igneous rocks with arc chemical signature in the southern Yili plate

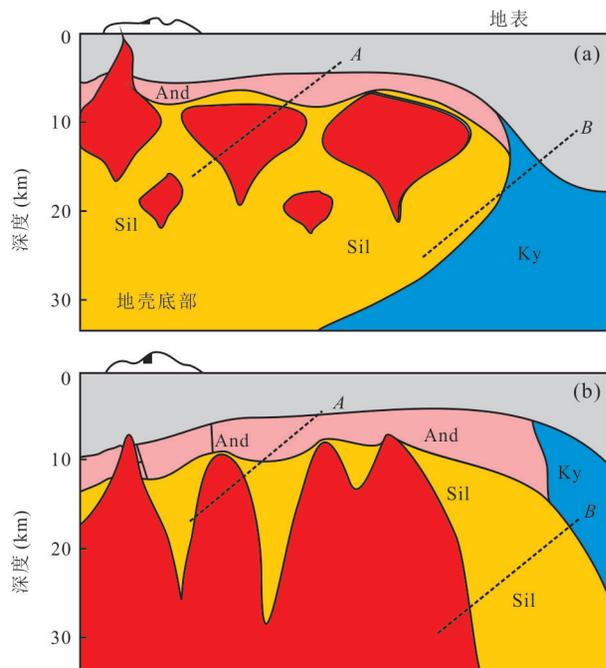


图4 陆缘弧位置区域变质作用和岩浆岩侵入体之间的成因联系模式

Fig.4 Schematic model showing possible relationships between regional metamorphism and intrusions in the active continental margins

改自 Miyashiro (1994). a 和 b 图分别代表弧岩岩侵入到中浅部层位而形成的低压型区域变质作用和侵入到不同深度层位而形成的中压型区域变质作用; A、B 则表示由于抬升剥蚀作用, 可能出露的现今野外变质岩剖面; And. 红柱石; Sil. 矽线石; Ky. 蓝晶石

的升高有直接关系.

在南天山洋洋盆闭合之后, 伊犁板块南缘可能处在后碰撞环境中. 在整个西南天山及邻区在缝合带两侧都存在后碰撞花岗岩, 时代多在 290~270 Ma. 这一时期, 可能由于岩石圈地幔的拆沉, 软流圈地幔物质上涌而带来大量的热, 并促进地壳岩石及下伏岩石圈地幔发生部分熔融. 在形成一系列后碰撞花岗岩的同时, 大量的热还能促进中上地壳物质发生高级变质作用, 形成高角闪岩相—麻粒岩相高级变质岩系以及发生深熔作用. 这可能是伊犁板块南缘局部位置出现 ~290 Ma 和 ~270 Ma 高级变质作用的原因.

3.3 南天山洋的演化

南天山洋的打开可能始于晚寒武世—早奥陶世时期伊犁板块和中天山陆块从塔里木板块上的分离 (图 5a; 李春昱等, 1980; 夏林圻等, 2002; Han *et al.*, 2011). 对伊犁板块南缘变沉积岩开展的碎屑锆石年代学研究显示, 物源区为伊犁板块的碎屑锆石与塔里木板块西北缘岩浆岩和沉积岩中的锆石

具有基本一致的年龄谱 (Xia *et al.*, 2014b), 显示伊犁板块与塔里木板块具有亲缘性. 对邻区吉尔吉斯斯坦中天山的研究给出了相似的结论 (Biske and Seltmann, 2010; Hegner *et al.*, 2010). 此外, 新元古代—早寒武世冰碛岩沉积及含磷层建造在吉尔吉斯斯坦中天山和北天山地块、中国伊犁板块和中天山陆块, 以及塔里木克拉通上的普遍存在说明这些块体在该时期具有可对比性, 有可能是一个统一的大陆块的组成部分. 这一时代可以作为南天山洋打开时间的下限. 存在于南天山造山带库勒湖和阔克萨彦岭的早古生代蛇绿岩 (425 ± 8 Ma, 龙灵利等, 2006; 450 ± 2 Ma, 王超等, 2007; ~440 Ma, Wang *et al.*, 2018), 被解释为南天山洋洋壳残片, 可为南天山的打开提供上限. 但南天山洋的形成规模还难以做出有效的估算, 这主要是对塔里木板块以及天山地块体的古地磁研究程度不够 (Bazhenov *et al.*, 2003).

从对伊犁板块南缘侵入岩和火山岩开展的工作表明, 南天山洋可能在早志留世~430 Ma 就已经发生俯冲, 俯冲在伊犁板块南缘活动大陆边缘形成了具陆缘弧特征的岩浆岩和火山岩 (图 5b). 在大致同时期, 还发生了高压混杂带原岩和部分混合岩原岩在弧前增生楔位置的沉积作用 (图 5b), 前者碎屑锆石年代学研究显示的最大沉积时代约为 430 Ma, 后者的最大沉积为 ~440 Ma (Xia *et al.*, 2014b).

在早泥盆世~400 Ma 在伊犁板块南缘的陆缘弧地体发生的广泛的高级变质作用 (变质级别达高角闪岩相—麻粒岩相) 及部分熔融事件 (图 5c), 形成了该位置的高 T/P 变质岩单元. 这一时期由于弧地体的抬升剥蚀, 还造成了低压型变质带南侧浅变质岩系的原岩沉积物在弧前位置的加积.

南天山洋的闭合发生在 ~320 Ma, 深俯冲的大洋板片发生了榴辉岩相 HP-UHP 变质作用 (图 5d), 随后快速折返. 在早二叠世~290 Ma 时期, 可能由于加厚岩石圈的拆沉使得软流圈地幔的上涌, 造成了两个期次 (~290 Ma 和 ~270 Ma) 的后碰撞花岗岩在伊犁板块南缘的发育, 并在局部位置导致了高级变质作用的发生.

在晚二叠世到早三叠世~250 Ma 开始进入造山后的陆内调整时期 (图 5e), 大致在古生代火山—沉积岩系和高 T/P 变质岩单元之间发生了大型右旋走滑断裂, 形成那拉提北缘断裂, 并沿断裂带位置形成了绿片岩相变质岩. 该剪切带可能仅是一个

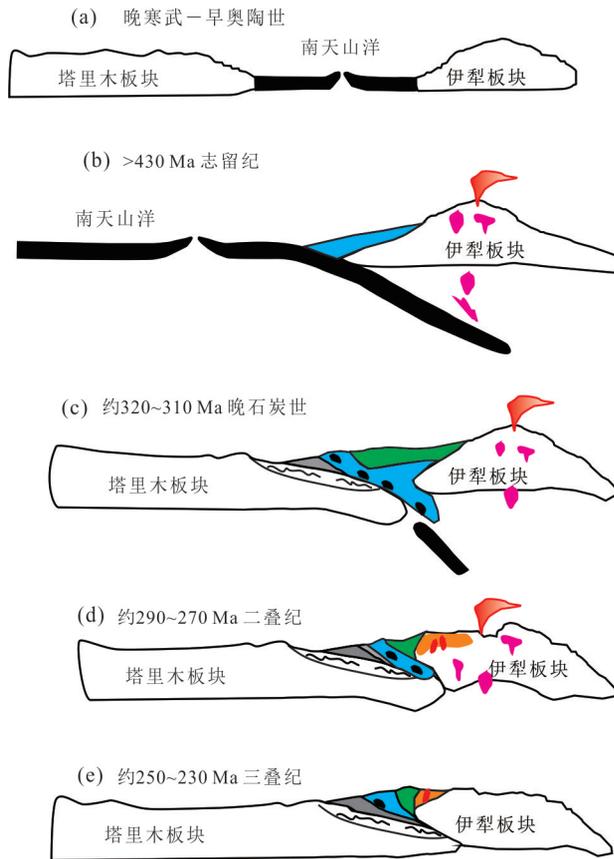


图5 古生代南天山洋演化模式图(改自 Xia *et al.*, 2014a)

Fig.5 Schematic cartoon showing the Paleozoic evolution of the South Tianshan ocean (revised from Xia *et al.*, 2014a)

陆内走滑断裂带,而不具有板块边界的性质.

4 结论

随着微区测年手段的广泛应用,早期被认为是前寒武纪结晶基底重要组成部分的高级变质岩系和花岗质片麻岩可能形成于显生宙汇聚板块造山环境中.在伊犁板块南缘的高 T/P 变质岩单元内发育了高角闪岩相—麻粒岩相的高级变质岩和花岗质片麻岩,并伴随了混合岩化现象.前人将这些岩石组合归入了前寒武纪结晶基底岩石.近些年的研究显示,这些高级变质岩系经历了古生代多期次的变质作用,变质时代为 410~400 Ma、~290 Ma 和 ~270 Ma.结合南天山洋俯冲和闭合时代的限定,明确了 410~400 Ma 的高级变质作用发生在大洋板片在伊犁板块之下俯冲形成的陆缘弧环境中.由于俯冲板片脱水交代上覆地幔楔,造成了大量同期岩浆在陆缘弧位置的侵位,并使得该位置地温梯度显著

升高,由此造成区域高温低压型变质作用的发生.而~290 Ma 和~270 Ma 变质作用的发生则与后碰撞环境有关.而绿片岩相变沉积岩的最大沉积时代为 400~390 Ma,其变质时代则为~250 Ma,并非前人认为的中新元古代地层.结合对伊犁板块南缘侵入岩和火山岩的成因环境分析,明确了伊犁板块南缘在古生代处于活动大陆边缘弧环境.

致谢:感谢三位评审人提出的意见和建议.

References

- Bazhenov, M.L., Collins, A.Q., Degtyarev, K.E., et al., 2003. Paleozoic Northward Drift of the North Tien Shan (Central Asia) as Revealed by Ordovician and Carboniferous Paleomagnetism. *Tectonophysics*, 366(1-2): 113-141. [https://doi.org/10.1016/s0040-1951\(03\)00075-1](https://doi.org/10.1016/s0040-1951(03)00075-1)
- Biske, Y. S., Seltmann, R., 2010. Paleozoic Tian-Shan as a Transitional Region between the Rheic and Urals-Turkestan Oceans. *Gondwana Research*, 17(2-3): 602-613. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2009.11.014>
- Brown, M., 2009. Metamorphic Patterns in Orogenic Systems and the Geological Record. *Geological Society, London, Special Publications*, 318(1): 37-74. <https://doi.org/10.1144/sp318.2>
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Xinjiang Uygur Autonomous Region, 1993. Regional Geology of Xinjiang Uygur Autonomous Region. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Chen, C.M., Lu, H.F., Jia, D., et al., 1999. Closing History of the Southern Tianshan Oceanic Basin, Western China: An Oblique Collisional Orogeny. *Tectonophysics*, 302(1-2): 23-40. [https://doi.org/10.1016/s0040-1951\(98\)00273-x](https://doi.org/10.1016/s0040-1951(98)00273-x)
- Chen, X. Y., Wang, Y. J., Sun, L. H., et al., 2009. Zircon SHRIMP U-Pb Dating of the Granitic Gneisses from Bingdaban and Laerdundaban (Tianshan Orogen) and Their Geological Significances. *Geochimica*, 38(5): 424-431 (in Chinese with English abstract).
- Ernst, W. G., 2010. Subduction-Zone Metamorphism, Calc-Alkaline Magmatism, and Convergent-Margin Crustal Evolution. *Gondwana Research*, 18(1): 8-16. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2009.05.010>
- Gao, J., Li, M.S., Xiao, X.C., et al., 1998. Paleozoic Tectonic Evolution of the Tianshan Orogen, Northwestern China. *Tectonophysics*, 287(1-4): 213-231. [https://doi.org/10.1016/s0040-1951\(98\)80070-x](https://doi.org/10.1016/s0040-1951(98)80070-x)
- Gao, J., Long, L.L., Klemd, R., et al., 2009. Tectonic Evolution of the South Tianshan Orogen and Adjacent Re-

- gions, NW China: Geochemical and Age Constraints of Granitoid Rocks. *International Journal of Earth Sciences*, 98(6):1221–1238. <https://doi.org/10.1007/s00531-008-0370-8>
- Gao, J., Long, L.L., Qian, Q., et al., 2006. South Tianshan: A Late Paleozoic or a Triassic Orogen? *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1049–1061 (in Chinese with English abstract).
- Glorie, S., de Grave, J., Buslov, M. M., et al., 2010. Multi-Method Chronometric Constraints on the Evolution of the Northern Kyrgyz Tien Shan Granitoids (Central Asian Orogenic Belt): From Emplacement to Exhumation. *Journal of Asian Earth Sciences*, 38(3–4): 131–146. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2009.12.009>
- Gou, L.L., Zhang, L.F., Lü, Z., et al., 2015. Geochemistry and Geochronology of S-Type Granites and Their Coeval MP/HT Meta-Sedimentary Rocks in Chinese Southwest Tianshan and Their Tectonic Implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, 107: 151–171. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2015.04.020>
- Gou, L.L., Zhang, L.F., Tao, R.B., et al., 2012. A Geochemical Study of Syn-Subduction and Post-Collisional Granitoids at Muzhaerte River in the Southwest Tianshan UHP Belt, NW China. *Lithos*, 136–139: 201–224. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2011.10.005>
- Han, B.F., He, G.Q., Wang, X.C., et al., 2011. Late Carboniferous Collision between the Tarim and Kazakhstan-Yili Terranes in the Western Segment of the South Tianshan Orogen, Central Asia, and Implications for the Northern Xinjiang, Western China. *Earth-Science Reviews*, 109(3–4): 74–93. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.09.001>
- He, G.Q., Li, M.S., Han, B.F., 2001. Geotectonic Research of Southwest Tianshan and Its Adjacent Area, China. *Xinjiang Geology*, 19(1): 7–11 (in Chinese with English abstract).
- Hegner, E., Klemd, R., Kröner, A., et al., 2010. Mineral Ages and *P-T* Conditions of Late Paleozoic High-Pressure Eclogite and Provenance of Mélange Sediments from Atbashi in the South Tianshan Orogen of Kyrgyzstan. *American Journal of Science*, 310(9): 916–950. <https://doi.org/10.2475/09.2010.07>
- Hu, A. Q., Wei, G. J., Deng, W. F., et al., 2006. 1.4 Ga SHRIMP U-Pb Age for Zircons of Granodiorite and Its Geological Significance from the Eastern Segment of the Tianshan Mountains, Xinjiang, China. *Geochimica*, 35(4): 333–345 (in Chinese with English abstract).
- Hu, A. Q., Zhang, G. X., Zhang, Q. F., et al., 1999. Constraints on the Age of Basement and Crustal Growth in Tianshan Orogen by Nd Isotopic Composition. *Science in China (Series D)*, 29(2): 104–112 (in Chinese).
- Hu, A. Q., Wei, G. J., Zhang, J. B., et al., 2008. SHRIMP U-Pb Ages for Zircons of the Amphibolites and Tectonic Evolution Significance from the Wenquan Domain in the West Tianshan Mountains, Xinjiang, China. *Acta Petrologica Sinica*, 24(12): 2731–2740 (in Chinese with English abstract).
- Hu, B., Wang, J. B., Gao, Z. J., et al., 1964. Several Problems of Tectonic Evolution in Xinjiang. *Acta Geologica Sinica*, 44(2): 156–170 (in Chinese with English abstract).
- Hu, A. Q., Wei, G. J., Jiang, B. M., et al., 2010. Formation of the 0.9 Ga Neoproterozoic Granitoids in the Tianshan Orogen, NW China: Constraints from the SHRIMP Zircon Age Determination and Its Tectonic Significance. *Geochimica*, 39(3): 197–212 (in Chinese with English abstract).
- Kröner, A., Alexeiev, D. V., Hegner, E., et al., 2009. New Zircon, Sm-Nd, and Ar-Ar Ages for Precambrian and Paleozoic Rocks from the Tianshan Orogenic Belt in Kyrgyzstan and Disappearance of the Archean. International Field Excursion and Workshop on Tectonic Evolution and Crustal Structure of the Paleozoic Chinese Tianshan, Urumqi, China, 43–44.
- Li, C. Y., Wang, Q., Zhang, Z. M., et al., 1980. Plate Tectonics of China. *Bulletin Chinese Academic Geology Science*, 2(1): 11–19, 130 (in Chinese with English abstract).
- Li, Q., Zhang, L. F., 2004. The *P-T* Path and Geological Significance of Low-Pressure Granulite-Facies Metamorphism in Muzhaerte, Southwest Tianshan. *Acta Petrologica Sinica*, 20(3): 583–594 (in Chinese with English abstract).
- Lin, L., Qian, Q., Wang, Y. L., et al., 2015. Gabbroic Pluton in the Dahalajunshan Formation Volcanic Rocks from Northern Zhaosu, Western Tianshan: Age, Geochemistry and Geological Implications. *Acta Petrologica Sinica*, 31(6): 1749–1760 (in Chinese with English abstract).
- Long, L.L., Gao, J., Klemd, R., et al., 2011. Geochemical and Geochronological Studies of Granitoid Rocks from the Western Tianshan Orogen: Implications for Continental Growth in the Southwestern Central Asian Orogenic Belt. *Lithos*, 126(3–4): 321–340. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2011.07.015>
- Long, L.L., Gao, J., Xiong, X.M., et al., 2006. The Geochemical Characteristics and the Age of the Kule Lake Ophiolite in the Southern Tianshan. *Acta Petrologica Sinica*, 22(1): 65–73 (in Chinese with English abstract).

- Long, L.L., Gao, J., Xiong, X.M., et al., 2007. Geochemistry and Geochronology of Granitoids in Bikai Region, Southern Central-Tianshan Mountains, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 23(4): 719–732(in Chinese with English abstract).
- Lü, Z., Wang, K., 2018. Metamorphic Evolution of Two Types of Garnet Amphibolites from UHP Terrane of Southwestern Tianshan, NW China. *Earth Science*, 43(1): 150–163(in Chinese with English abstract).
- Luo, F.Z., 1989. On Precambrian in Mid-Tianshan Uplift (Metamorphic) Zone. *Xinjiang Geology*, 7(4): 24–34(in Chinese with English abstract).
- Ma, R.S., Shu, L.S., Sun, J.Q., 1997. Tectonic Evolution and Metallogenesis in Eastern Tian Shan. Geological Publishing House, Beijing(in Chinese).
- Miyashiro, A., 1972. Metamorphism and Related Magmatism in Plate Tectonics. *American Journal of Science*, 272(7): 629–65. <https://doi.org/10.2475/ajs.272.7.6296>
- Miyashiro, A., 1973. Paired and Unpaired Metamorphic Belts. *Tectonophysics*, 17(3): 241–254. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(73\)90005-x](https://doi.org/10.1016/0040-1951(73)90005-x)
- Miyashiro, A., 1994. Metamorphic Petrology. University College London, London.
- Qian, Q., Gao, J., Xiong, X.M., et al., 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).
- Su, W., Gao, J., Klemd, R., et al., 2010. U-Pb Zircon Geochronology of Tianshan Eclogites in NW China: Implication for the Collision between the Yili and Tarim Blocks of the Southwestern Altai. *European Journal of Mineralogy*, 22(4): 473–478. <https://doi.org/10.1127/0935-1221/2010/0022-2040>
- Tang, Y.Q., Gao, J., Zhao, M., et al., 1995. The Ophiolites and Blueschists in the Southwestern Tianshan Orogenic Belt, Xinjiang, Northwest China. Geological Publishing House, Beijing(in Chinese).
- Wang, B., Faure, M., Shu, L.S., et al., 2010. Structural and Geochronological Study of High-Pressure Metamorphic Rocks in the Kekesu Section (Northwestern China): Implications for the Late Paleozoic Tectonics of the Southern Tianshan. *The Journal of Geology*, 118(1): 59–77. <https://doi.org/10.1086/648531>
- Wang, B., Jahn, B.M., Lo, C.H., et al., 2011. Structural Analysis and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Thermochronology of Proterozoic Rocks in Sailimu Area (NW China): Implication to Polyphase Tectonics of the North Chinese Tianshan. *Journal of Asian Earth Sciences*, 42(5): 839–853. <https://doi.org/10.1016/j.jseae.2011.07.022>
- Wang, B., Shu, L.S., Faure, M., et al., 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(in Chinese with English abstract).
- Wang, B.Y., Lang, Z.J., Li, X.D., et al., 1994. Comprehensive Survey of Geological Sections in the West Tianshan of Xinjiang, China. Science Press, Beijing(in Chinese).
- Wang, C., Liu, L., Luo, J.H., et al., 2007. Late Paleozoic Post-Collisional Magmatism in the Southwestern Tianshan Orogenic Belt: Take the Baleigong Pluton in the Kokshal Region as an Example. *Acta Petrologica Sinica*, 23(8): 1830–1840(in Chinese with English abstract).
- Wang, X.S., Klemd, R., Gao, J., et al., 2018. Final Assembly of the Southwestern Central Asian Orogenic Belt as Constrained by the Evolution of the South Tianshan Orogen: Links with Gondwana and Pangea. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(9): 7361–7388. <https://doi.org/10.1029/2018jb015689>
- Windley, B.F., Alexeiev, D., Xiao, W.J., et al., 2007. Tectonic Models for Accretion of the Central Asian Orogenic Belt. *Journal of the Geological Society*, 164(1): 31–47. <https://doi.org/10.1144/0016-76492006-022>
- Xia, B., Michael, B., Zhang, L.F., 2020. P-T Evolution and Tectonic Significance of Lawsonite-Bearing Schists from the Eastern Segment of the Southwestern Tianshan, China. *Journal of Metamorphic Geology*, 38: 935–962. <https://doi.org/10.1111/jmg.12555>
- Xia, B., Zhang, L.F., Bader, T., 2014a. Zircon U-Pb Ages and Hf Isotopic Analyses of Migmatite from the ‘Paired Metamorphic Belt’ in Chinese SW Tianshan: Constraints on Partial Melting Associated with Orogeny. *Lithos*, 192–195: 158–179. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2014.02.003>
- Xia, B., Zhang, L.F., Bader, T., et al., 2016a. Late Palaeozoic $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Ages of the HP-LT Metamorphic Rocks from the Kekesu Valley, Chinese Southwestern Tianshan: New Constraints on Exhumation Tectonics. *International Geology Review*, 58(4): 389–404. <https://doi.org/10.1080/00206814.2015.1084487>
- Xia, B., Zhang, L.F., Xia, Y., et al., 2014b. The Tectonic Evolution of the Tianshan Orogenic Belt: Evidence from U-Pb Dating of Detrital Zircons from the Chinese Southwestern Tianshan Accretionary Mélange. *Gondwana Research*, 25(4): 1627–1643. <https://doi.org/10.1016/j.gres.2014.07.003>

- gr.2013.06.015
- Xia, B., Zhang, L.F., Zhang, L., 2016b. Petrogenesis and Tectonic Implications of Permian Post-Collisional Granitoids in the Chinese Southwestern Tianshan, NW China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 130: 60–74. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2016.08.007>
- Xia, L. Q., Li, X. M., Xia, Z. C., et al., 2006. Carboniferous–Permian Rift-Related Volcanism and Mantle Plume in the Tianshan, Northwestern China. *Northwestern Geology*, 39(1):1–49(in Chinese with English abstract).
- Xia, L. Q., Zhang, G. W., Xia, Z. C., et al., 2002. Constraints on the Timing of Opening and Closing of the Tianshan Paleozoic Oceanic Basin: Evidence from Sinian and Carboniferous Volcanic Rocks. *Geological Bulletin of China*, 21(2):55–62(in Chinese with English abstract).
- Yang, T. N., Li, J. Y., Sun, G. H., et al., 2008. Mesoproterozoic Continental Arc Type Granite in the Central Tianshan Mountains: Zircon SHRIMP U-Pb Dating and Geochemical Analyses. *Acta Geologica Sinica*, 82(1): 117–125. <https://doi.org/10.1111/j.1755-6724.2008.tb00330.x>
- Zhang, L. F., Du, J. X., Lü, Z., et al., 2013. A Huge Oceanic-Type UHP Metamorphic Belt in Southwestern Tianshan, China: Peak Metamorphic Age and *P-T* Path. *Chinese Science Bulletin*, 58(22): 2107–2112(in Chinese).
- Zhang, L. F., Wang, Y., Zhang, L. J., et al., 2018. Ultrahigh Pressure Metamorphism and Tectonic Evolution of Southwestern Tianshan Orogenic Belt, China: A Comprehensive Review. *Geological Society, London, Special Publications*, 474: 133–152. <https://doi.org/10.1144/sp474.12>
- Zhang, L. J., Zhang, L. F., Chu, X., 2018. Limitations of Traditional Thermobarometer in Applications to Low-Temperature Eclogites: A Case Study of UHP Metamorphic Belt in Southwest Tianshan. *Earth Science*, 43(1): 164–175(in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z. H., Wang, Z. L., Wang, Y. B., et al., 2007. SHRIMP Zircon U-Pb Dating of Diorite from Qingbulake Basic Complex in Western Tianshan Mountains of Xinjiang and Its Geological Significance. *Mineral Deposits*, 26(4): 353–360(in Chinese with English abstract).
- Zhu, Y. F., Guo, X., Song, B., et al., 2009. Petrology, Sr-Nd-Hf Isotopic Geochemistry and Zircon Chronology of the Late Palaeozoic Volcanic Rocks in the Southwestern Tianshan Mountains, Xinjiang, NW China. *Journal of the Geological Society*, 166(6):1085–1099. <https://doi.org/10.1144/0016-76492008-130>
- Zhu, Y. F., Zhou, J., Song, B., et al., 2006. Age of the “Dahala-junshan” Formation in Xinjiang and Its Disintegration. *Geology in China*, 33(3):487–497(in Chinese with English abstract).
- Zhu, Z. X., Wang, K. Z., Zheng, Y. J., et al., 2006. 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).

附中文参考文献

- 陈新跃, 王岳军, 孙林华, 等, 2009. 天山冰达坂和拉尔敦达坂花岗岩片麻岩 SHRIMP 锆石年代学特征及其地质意义. *地球化学*, 38(5):424–431.
- 高俊, 龙灵利, 钱青, 等, 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.
- 何国琦, 李茂松, 韩宝福, 2001. 中国西南天山及邻区大地构造研究. *新疆地质*, 19(1):7–11.
- 胡霭琴, 韦刚健, 邓文峰, 等, 2006. 天山东段 1.4 Ga 花岗闪长质片麻岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. *地球化学*, 35(4):333–345.
- 胡霭琴, 韦刚健, 江博明, 等, 2010. 天山 0.9 Ga 新元古代花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其构造意义. *地球化学*, 39(3):197–212.
- 胡霭琴, 韦刚健, 张积斌, 等, 2008. 西天山温泉地区早古生代斜长角闪岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义. *岩石学报*, 24(12):2731–2740.
- 胡霭琴, 张国新, 张前锋, 等, 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 辑)*, 29(2): 104–112.
- 胡冰, 王景斌, 高振家, 等, 1964. 新疆大地构造的几问题. *地质学报*, 44(2):156–170.
- 李春昱, 王荃, 张之孟, 等, 1980. 中国板块构造的轮廓. *中国地质科学院院报*, 2(1):11–19, 130.
- 李强, 张立飞, 2004. 新疆西南天山木扎尔特一带低压麻粒岩相变质作用 *P-T* 轨迹及其地质意义. *岩石学报*, 20(3): 583–594.
- 林靛, 钱青, 王艳玲, 等, 2015. 西天山昭苏北部大哈拉军山组火山岩中辉长岩体的形成时代、地球化学特征及地质意义. *岩石学报*, 31(6):1749–1760.
- 龙灵利, 高俊, 熊贤明, 等, 2006. 南天山库勒湖蛇绿岩地球化学特征及其年龄. *岩石学报*, 22(1):65–73.
- 龙灵利, 高俊, 熊贤明, 等, 2007. 新疆中天山南缘比开(地区)花岗岩地球化学特征及年代学研究. *岩石学报*, 23(4): 719–732.
- 吕增, 王凯, 2018. 西南天山超高压变质带的两类石榴角闪岩. *地球科学*, 43(1):150–163.
- 罗发祚, 1989. 对中天山隆起(变质)带前寒武系的探讨. *新疆*

- 地质, 7(4):24—34.
- 马瑞士, 舒良树, 孙家齐, 1997. 东天山构造演化与成矿. 北京:地质出版社.
- 钱青, 高俊, 熊贤明, 等, 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.
- 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.
- 王博, 舒良树, Faure, M., 等, 2007. 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. 岩石学报, 23(6):1354—1368.
- 王宝瑜, 郎智君, 李向东, 等, 1994. 中国天山西段地质剖面综合研究. 北京:科学出版社.
- 王超, 刘良, 罗金海, 等, 2007. 西南天山晚古生代后碰撞岩浆作用:以阔克萨彦岭地区巴雷公花岗岩为例. 岩石学报, 23(8):1830—1840.
- 夏林圻, 李向民, 夏祖春, 等, 2006. 天山石炭—二叠纪大火成岩省裂谷火山作用与地幔柱. 西北地质, 39(1):1—49.
- 夏林圻, 张国伟, 夏祖春, 等, 2002. 天山古生代洋盆开启、闭合时限的岩石学约束——来自震旦纪、石炭纪火山岩的证据. 地质通报, 21(2):55—62.
- 新疆维吾尔自治区地质矿产局, 1993. 新疆维吾尔自治区区域地质志. 北京:地质出版社.
- 张立飞, 杜瑾雪, 吕增, 等, 2013. 新疆西南天山超高压变质带的空间分布、峰期变质时代和 $P-T$ 轨迹特征. 科学通报, 58(22):2107—2112.
- 张丽娟, 张立飞, 初旭, 2018. 传统温压计在低温榴辉岩应用中的局限:以西南天山超高压变质带为例. 地球科学, 43(1):164—175.
- 张作衡, 王志良, 王彦斌, 等, 2007. 新疆西天山青布拉克基性杂岩体闪长岩锆石 SHRIMP 定年及其地质意义. 矿床地质, 26(4):353—360.
- 朱永峰, 周晶, 宋彪, 等, 2006. 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.