

天山山脉地貌特征、地壳组成与地质演化

李锦轶¹, 王克卓², 李亚萍¹, 孙桂华¹, 褚春华², 李丽群², 朱志新^{1,2}

LI Jin-yi¹, WANG Ke-zhuo², LI Ya-ping¹, SUN Gui-hua¹, CHU Chun-hua², LI Li-qun², ZHU Zhi-xin^{1,2}

1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 2. 新疆地质调查研究院, 新疆 乌鲁木齐 830000

1. *Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;*

2. *Xinjiang Institute of Geological Survey, Ürümqi 830000, Xinjiang, China*

摘要:天山位于亚洲中部, 东西向延伸, 由中亚诸国向南西凸出的弧形山系与其间的大型盆地, 中国境内北西、北东走向的山系与其间长轴近东西走向的盆地和蒙古西南部的低山戈壁等组成, 东西延长近4000 km, 南北宽逾150 km。天山山脉与两侧的盆地多以逆冲断层为界, 盆地的基底下插于天山山脉之下。天山山脉及毗邻地区的地壳主要由前震旦纪古陆碎块、古生代陆缘岩系和洋岩石圈残片等组成。从构造方面看, 该山脉及毗邻地区的地壳可以划分为15个单元。大致以东经90°线为界, 以西地区南侧的南天山碰撞带为向南凸出的弧形构造带, 北侧的古陆碎块和其间的碰撞带呈北西走向斜列展布, 构成巨型帚状构造; 以东地区为相间排列的近东西走向的古活动陆缘或岛弧及其间的碰撞带。天山山脉形成于古生代晚期古洋盆关闭以后, 现今山脉的地貌特征则是新生代晚期地壳变动的产物。天山山脉形成以后的地质演化可以划分为石炭纪末至二叠纪初同碰撞—后碰撞构造岩浆活动阶段、二叠纪早—中期幔源岩浆活动与壳幔相互作用阶段和二叠纪晚期以来的陆内演化阶段。

关键词:天山山脉; 地貌特征; 地壳构造分区; 地质演化

中图分类号: P542+.4 文献标识码: A 文章编号: 1671-2552(2006)08-0895-15

LI J Y, Wang K Z, Li Y P, Sun G H, Chu C H, Li L Q, Zhu Z X. *Geomorphological features, crustal composition and geological evolution of the Tianshan Mountains. Geological Bulletin of China, 2006, 25(8): 895-909*

Abstract: Located in Central Asia and extending in an E-W direction, the Tianshan Mountains are composed of arcuate mountain systems convex southwestward and large basins between them in Central Asian countries, NW- and NE-trending mountain systems and basins with nearly E-W-strike long axes between them in China and low mountains and gobies in southwestern Mongolia. The mountains are nearly 4000 km long from east to west and >150 km wide from north to south. They are mostly separated from the basins on either side by thrusts and the basement of the basins is underthrust beneath the Tianshan Mountains. The crust consists predominantly of fragments of pre-Sinian continents, Paleozoic continental-margin rock series and oceanic lithospheric slices. The crust of the mountains and adjacent areas may be divided into 15 tectonic units. Roughly with the longitude 90°E as the boundary, in the region west of the boundary the South Tianshan collision zone in the south is an arcuate tectonic zone convex southward and the cratonic fragments and the collision zone between them in the north are an echelon in a NW direction, forming a huge brush structure; in the region east of the boundary there occur the nearly E-W-trending active paleo-continental margins or island arcs and collision zones between them which are arranged alternately. The Tianshan Mountains formed after the closing of the Late Paleozoic oceanic basin and the geomorphological features of the present mountains are the production of Late Cenozoic crustal movement. The geological evolution after the formation of the Tianshan Mountains may fall into the stage of terminal Carboniferous-initial Permian syncollisional-postcollisional tectonomagmatism, stage of Early-Mid Permian mantle-derived magmatism and crust-mantle interaction and stage of intracontinental since the Late Permian.

Key words: Tianshan Mountains; geomorphological features; crustal structural divisions; geological evolution

收稿日期: 2006-07-10; 修订日期: 2006-07-31

基金项目: 国家重要基础研究发展规划(“973”)项目(编号: 2001CB409810)资助。

作者简介: 李锦轶(1956-), 男, 博士生导师, 研究员, 从事大地构造研究。E-mail: jyli@cags.net.cn

天山山脉位于亚洲大陆中部,总体上近东西向延伸,横贯中亚诸国,从中亚乌兹别克斯坦、吉尔吉斯斯坦等国,向东通过中国西北的新疆维吾尔自治区中部、甘肃省北部和内蒙古自治区西部,到蒙古西南部,绵延近4000 km。从地质构造角度看,天山山脉是由古生代陆缘增生-碰撞造山作用和新生代晚期陆内造山作用形成的。在该山脉中,赋存有丰富的能源和固体矿产资源,以及大陆地壳形成演化的大量重要信息。因此,许多来自不同国家的地质工作者长期以来一直对该山脉具有浓厚的兴趣,试图从不同角度揭开其神秘的面纱,查明并开采其中的资源,使其更好地为人类生存繁衍服务。

天山在中国境内的部分一直是中国地质界关注的地区之一。新一轮国土资源调查项目实施,该区被继续确定为重点工作的区域之一。同时,新疆维吾尔自治区和国家有关部门还设立专项,对该区地壳演化和矿产资源展开调查研究。所有这些项目的实施都取得了令人瞩目的成果。本专刊刊登的18篇文章,就是这些成果中的一小部分。其中有13篇文章以报道天山岩浆活动和成矿作用年代学新资料为主,现将其汇集在一起,主要是考虑高精度的年代学资料是认识和重建造山过程和成矿作用的关键因素之一,希望这些资料的发表有助于深化人们对天山地区地壳形成演化和成矿作用的认识。

长期以来,对于天山山脉究竟包括哪些山系、该区地壳结构如何、不同山系之间存在什么样的内在联系、该山脉是如何形成与演化的、该区矿产资源的时空分布和成矿作用有什么样的规律等重大问题,在地质界一直存在不同认识。

基于在天山山脉多年工作的积累和对现有资料的综合研究,借《地质通报》刊出天山及邻区地质调查与研究成果专辑的机会,笔者下面对天山山脉形成演化的几个主要问题,包括天山山脉的地理地貌特征、地壳组成与构造分区、地壳形成演化的阶段划分及各阶段的主要特征等,进行初步探讨,期望对天山山脉形成演化的研究和矿产资源勘查工作的部署有所裨益。

1 地貌特征

如图1所示,天山山脉以南为卡拉库姆盆地(沙漠)、塔里木盆地和河西走廊,以北为哈萨克斯坦丘陵、准噶尔盆地、东准噶尔和南蒙古低山丘陵,向西隐没于图兰低地或渐变为哈萨克斯坦丘陵,东端在蒙古境内渐变为戈壁荒漠。在中国境内,阿尔金山脉和祁连山脉与其毗邻;在中亚地区,帕米尔山脉与天山山脉遥相呼应。总体上看,天山山脉西宽东窄,其最高峰为位于中国和吉尔吉斯斯坦国境线附近的汗腾格里峰,海拔为6995 m。

与总体近东西向延伸形成鲜明对比的是,组成天山山脉的山系分别呈现为向南南西凸出的弧形(中亚地区)、北东东走向的S形波状弯曲(阿赖山-哈尔克山-霍拉山)和近东西走向的波状弯曲(博格达山-哈尔里克山)。阿赖山-哈尔克山-

霍拉山为连续性完好的延伸最长的线性山系,而其北侧的山系和盆地则呈雁行式相间排列,向南东汇聚收敛,它们构成天山山脉西段巨型的帚状样式。库尔勒市以东、吐哈盆地以南的东天山和北山地区为荒漠戈壁和低山丘陵。在中国新疆西部国境线附近,山系断续呈北东东走向,中国境内天山山脉中的盆地都呈现为长轴近东西走向的菱形。这一复杂的内部地貌特征反映出天山山脉地壳结构和地质历史的复杂性。

在中国地质界,大体上以东经88°线为界将天山山脉分为东天山和西天山。吐哈盆地位于东天山中部,其北侧山顶常年积雪的博格达山呈向北凸出的弧形,哈尔里克山呈向南凸出的弧形,二者分别与西天山北部北西走向的依连哈比尔尕山和南蒙古戈壁天山相连;吐哈盆地南侧为觉罗塔格及库鲁克塔格低山丘陵与戈壁,东延与北山和蒙古戈壁天山相连。中国境内的西天山被划分为北天山、中天山、南天山和西南天山。北天山呈北西走向,包括依连哈比尔尕山和博罗霍洛山等;中天山大部分为伊犁盆地所占据;南天山由北东东走向的哈尔克山、那拉提山及北西西走向的霍拉山等组成;西南天山位于塔里木盆地西北缘,呈北东走向。中亚地区的天山山脉由向南凸出的弧形山系及位于其间的盆地组成,出露宽度要比中国境内的大得多;在文献中虽然也被划分为北天山、中天山和南天山,但是与中国境内的划分并不完全对应。其中的南天山与中国境内的西南天山和南天山南部大体相同,中天山到中国境内尖灭,北天山与伊犁盆地南缘的那拉提山及大哈拉军山大体等同,而中国境内的伊犁盆地和北天山被有些中亚国家和俄罗斯的学者称为北东天山。

从区域上看,天山山脉是亚洲大陆中部巨型盆-山-原构造的组成部分。自南向北,组成这一构造的地理单元依次是:青藏高原、昆仑山脉、柴达木盆地、塔里木盆地、祁连山脉、河西走廊、天山山脉、准噶尔盆地和阿尔泰山脉。与美国西部伸展构造背景下的盆岭构造不同,亚洲中部这一巨型盆-山-原构造不仅规模巨大宏伟,而且山脉与盆地之间都以逆冲断裂或逆冲-褶皱带为界^[1],反映出是在挤压背景下形成的。

作为中亚地区巨型盆-山-原构造的主要组成部分,天山山脉本身也表现出山系与盆地相间的地貌与地理特征。其中伊赛克湖盆地、伊犁盆地、巴音布鲁克盆地、焉耆盆地和吐哈盆地等的长轴都近东西向延伸且明显大于其南北向的短轴,至少盆地延长方向的一侧边界是逆冲断层并伴有走滑运动。在天山北侧,自西向东,克孜尔库姆、穆云库姆、楚-伊犁、准噶尔等盆地斜列展布,并都具有向南东方向变窄的几何特征,反映出在该山脉两侧可能存在平行山脉走向的左行走滑运动,其动力可能来自印度与欧亚大陆的碰撞,特别是西构造结的楔入。

2 地壳组成

2.1 地表出露的地质体

天山山脉地表出露的地质体,主体为古生代以来形成的^[2]。其中第四纪以前的地质体都不同程度地遭受了构造变

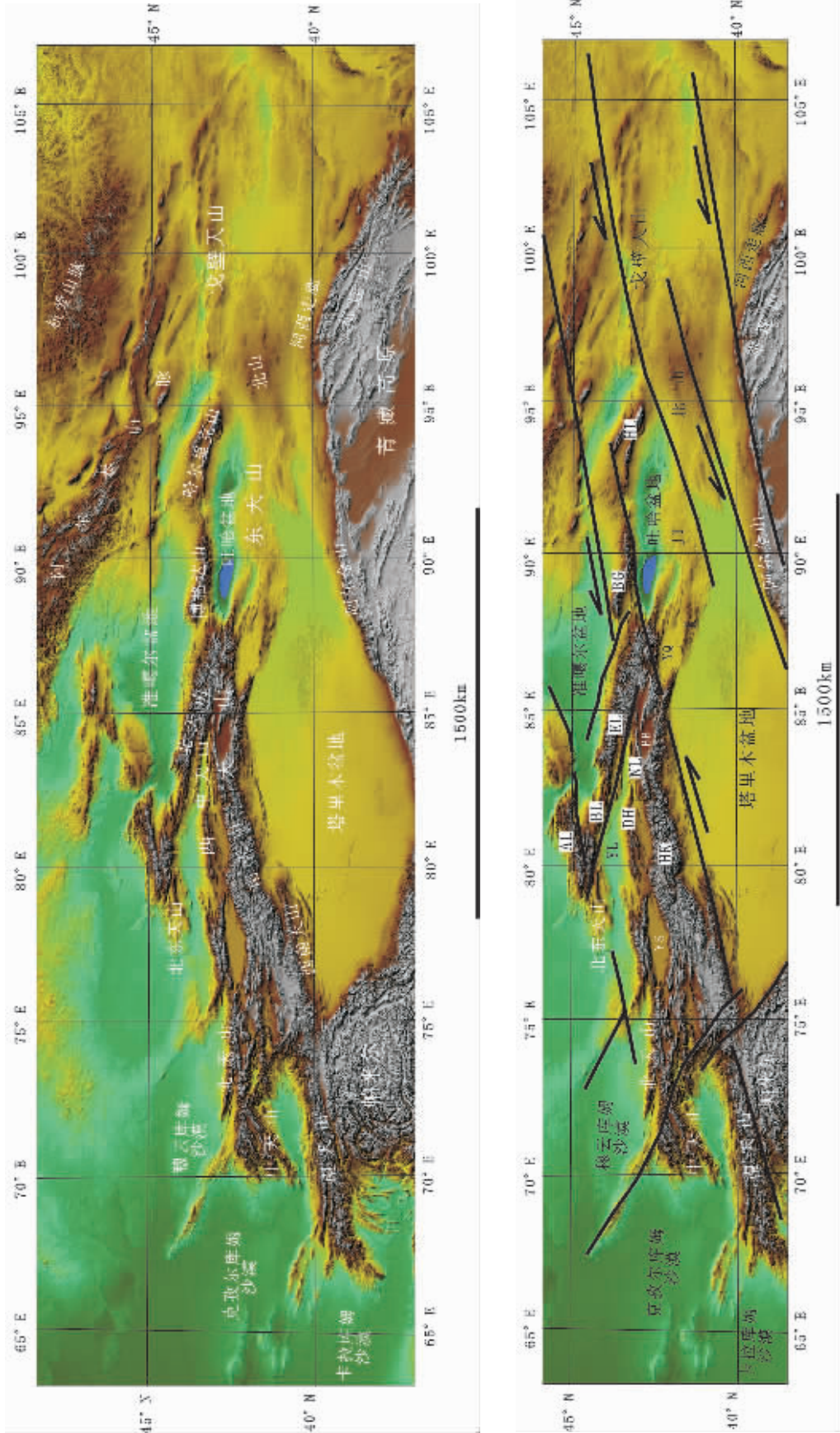


图1 天山山脉及其毗邻地区DEM地貌图

Fig.1 DEM geographic map of Tianshan Mountains and adjacent areas

图中表示了中国天山和中亚天山划分方案之间的关系,天山山脉地貌特征沿走向的变化,以及新生代主要的走滑断裂

AL—阿拉套山;BL—博罗霍洛山;EL—依连哈比尔杂山;BG—博格达山;HL—哈尔里克山;DH—大哈拉军山;NL—那拉提山;HK—哈尔克山;HO—霍拉山;K—库鲁克塔格;JT—觉罗塔格;YL—伊犁盆地;YS—伊塞克湖盆地;BB—巴音布鲁克盆地;YQ—焉耆盆地

形的改造。

天山山脉中的古生代地质体,包括以海相为主的火山沉积岩系、各种成分的侵入岩和变质岩。根据形成时的构造背景,这些古生代地质体可以划分为古活动陆缘或岛弧火山沉积岩系、侵入岩,古洋岩石圈残片,古被动陆缘岩系和二叠纪陆内幔源、壳源岩浆侵入杂岩、喷出岩、沉积岩系等。

中生代以来的地质体分布在山间及山脉两侧的盆地中,以陆相沉积岩系为主,在中国东天山局部出露三叠纪至早侏罗世的酸性小岩株侵入体^[5-9],在西南天山托云盆地出露白垩纪晚期火山岩^[5-9]。

前古生代地质体出露比较零星,比较确凿的最古老的地质体为太古宙变质杂岩和侵入岩,仅见于库尔勒市以东的库鲁克塔格地区^[7];元古宙地质体出露面积相对大一些,除了库鲁克塔格地区以外,还零星见于天山山脉的其他地区。在塔里木盆地西北缘、库鲁克塔格地区和伊犁盆地以北的博罗霍洛山,元古宙末期的震旦纪地层与下伏地质体之间发育明显的不整合界面,向上与早古生代地层连续沉积,都形成于浅海相环境,构造变形特征也基本相同^[7]。

2.2 地壳结构构造

上述这些不同时代的地质体被近东西走向、北西走向和北东走向的大型断裂所切割,沿这些断裂带,在不同地质时期有不同规模的逆冲和走滑运动。在乌鲁木齐市(东经88°线)以西,这些大型断裂构造构成一个向北西撒开、向南东收敛的巨型帚状构造。在乌鲁木齐市(东经88°线)以东,近东西走向的大型断裂被北东走向的左行走滑断裂所切割。在中国境内天山山脉南北两侧均发育指向盆地的逆冲断裂。

地球物理探测揭示,天山山脉地壳在垂向上明显具有分层结构。沿独山子—库车公路的地球物理探测揭示出上层为古陆缘杂岩、洋岩石圈残片和古陆碎块的镶嵌,其下为向北俯冲的塔里木陆块和向南俯冲的准噶尔陆块^[8-9]。沿乌鲁木齐—库尔勒公路天然地震宽频探测发现,天山山脉50 km深度左右的界面(推测为莫霍面)有比较明显的变形,呈现出向两侧盆地逆冲的特点,在乌鲁木齐市附近尤为明显;在乌鲁木齐市附近地下约70 km以下,界面不明显,指示可能经历了深熔作用;乌鲁木齐以北地区地表以下50 km范围内的南倾界面和天山中同样深度范围内的北倾界面,有可能分别是准

噶尔盆地和塔里木盆地地壳的顶面(图2)。

3 构造分区

根据地壳的组成和构造特征,天山及其毗邻地区的地壳可以划分成如图3所示的15个构造单元。现将各个构造单元的组成特征简要叙述如下。

3.1 准噶尔—吐哈岛弧(I)

该构造单元现今大部分被中、新生代盆地堆积物覆盖,只在哈尔里克山和吐哈盆地南缘有少量前新生代地质体的露头。航磁资料和对周围古生代地质体的研究,特别是最近笔者对准噶尔盆地东北缘石炭纪(原来被对比为泥盆纪和志留纪)地层中碎屑锆石的研究,揭示出该岛弧以比较古老的大陆地壳作为基底,本专辑发表的文章和文献中关于哈尔里克山和吐哈盆地南缘侵入岩的年代学资料^[11-18],以及笔者最近获得的碎屑锆石资料(将另文发表),都支持该岛弧由奥陶纪至石炭纪的岩浆岩组成,其岩浆前锋从奥陶纪至石炭纪逐渐向南迁移的认识^[19]。

博格达山是由叠加在该岛弧之上的晚石炭世裂谷或弧后盆地堆积物组成的,该盆地的形成可能与南侧天山山脉前身的古洋盆岩石圈板块向北俯冲有关^[20-22]。

从二叠纪开始,该岛弧演化为陆内盆地和山系,形成了二叠纪双峰式火山岩、基性为主的岩墙和幔源基性超基性杂岩,以及三叠纪至侏罗纪早期的中酸性侵入岩等^[23-28]。它们又被中生代以来的陆内盆地堆积物不整合覆盖。新生代早期的陆内造山作用使博格达山和哈尔里克山进一步隆升,两侧盆地进一步沉降。

需要指出的是,关于准噶尔盆地和吐哈盆地的基底组成和构造属性,长期以来一直有圈闭的洋壳^[29-31]和不同时代物质组成的陆壳^[32-33]2种对立的认识。从现有资料看,非洋壳的论点可能更符合实际情形。基于笔者多年的工作,进一步明确该盆地基底为奠基在古老陆壳基底之上的古生代岛弧。

3.2 依连哈比尔尕增生杂岩(II)

由以巴音沟蛇绿岩为代表的洋岩石圈残片和泥盆纪至石炭纪弧前、洋底沉积物组成,它们构成向北的逆冲叠瓦构造。巴音沟蛇绿岩伴生的硅质岩中含有晚泥盆世牙形石化石^[34],揭示该杂岩所代表的洋盆在泥盆纪晚期还具有相当的规模。该带向两侧如何延伸,目前还不是很清楚。近年的研究

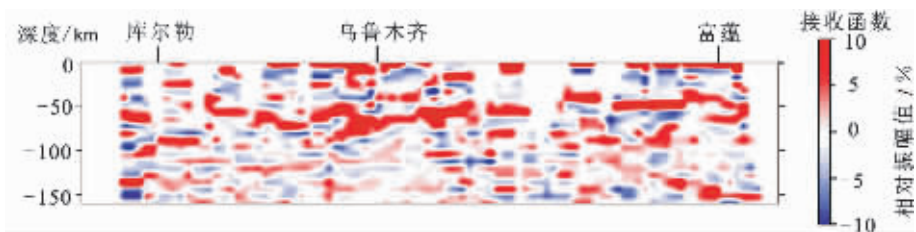


图2 富蕴—库尔勒剖面接收函数图像(引自参考文献[10])

Fig.2 Receiver function images along the array from Fuyun to Kuerle

表明,康古尔塔格带向北倾斜,在其北侧发育奥陶纪至石炭纪的向南变年轻的活动陆缘建造;在吐哈盆地北缘,没有与依连哈比尔尕带类似的泥盆纪至石炭纪洋的残片,因此,张良臣^[2]关于该带向东与康古尔塔格构造带相连和李锦轶等^[23]关于该带向东可能通过吐哈盆地北缘的认识,可能都不符合实际情形。在这里,基于近年对中亚地区大型断裂构造的研究和对已有资料的综合分析,笔者认为该带可能是哈萨克斯坦板块北缘的弧前增生杂岩,与西准噶尔及塔尔巴哈台山的活动陆缘杂岩属于一个活动大陆边缘的不同部分,是后来的断裂活动把它们肢解位移到现今的位置。沿走向向南东,有可能在托克逊以南交会到南天山北缘的卡瓦布拉克断裂带(图3)。

3.3 伊犁微大陆(Ⅲ)

位于中国天山山脉西部中间地区,向西可以延伸到哈萨克斯坦中部地区,向南东逐渐尖灭。该微大陆与巴仑台陆块原来是一个古陆,还是被洋盆分隔的洋中独立的微陆,目前还不是很清楚。笔者暂时认为它们属于一个古陆。

组成该微大陆的地质体,最古老的见于其北缘博乐、南缘那拉提山北麓和东部巴仑台等地,主要为古元古代变质岩,近年陆续识别出其中有新元古代早期的中酸性侵入岩和火山岩(将另文发表)。

在该地块北缘,博罗霍洛山出露震旦纪至寒武纪陆缘碎屑岩和碳酸盐岩,显示出被动陆缘的组成特征。在该微大陆的南缘和北缘都发育奥陶纪至石炭纪的侵入岩和火山沉积岩系,其中的岩浆岩都显示出活动陆缘的特征^[36~38]。

在该微大陆内部,二叠纪火山岩比较发育,关于其形成时的构造背景,有后碰撞阶段底侵的玄武质下地壳部分熔融^[39]和陆内裂谷^[42]2种认识。

3.4 扎来伊尔-奈曼碰撞带(Ⅳ)

该带主要出露在东经76°线以西的中亚地区,在巴尔喀什湖南西呈北西—南东走向,出露属于古洋岩石圈残片的超镁铁质—镁铁质岩石和寒武纪至奥陶纪的弧前沉积物。在该带北东一侧,出露寒武纪至泥盆纪的火山沉积岩系和奥陶纪至泥盆纪的中酸性侵入岩。

在东经74°线至79°线之间伊塞克湖以北,沿向南西略微凸出的断裂带出露有超镁铁质岩石和奥陶纪至泥盆纪火山沉积岩系、侵入岩。与巴尔喀什湖南西地区不同的是,那里有较多的石炭纪火山沉积岩系和侵入岩。向东至东经80°线以东及中国境内,主体为石炭纪火山沉积岩系和侵入岩。

笔者推测,以上不同地段可能属于同一构造单元。但是需要说明的是,目前还没有确切的资料证明这一推论,特别是在该带延伸到中国境内的地段,还没有发现早古生代洋岩石圈残片和早古生代活动陆缘建造。

3.5 穆云库姆-伊塞克岛弧(Ⅴ)

局部地区出露古元古代的变质岩系,构成了该弧的陆壳基底。组成该弧的地质体主要为早古生代(奥陶纪至志留纪)的火山沉积岩系和侵入岩,其上叠加有泥盆纪—石炭纪的火山沉积岩系和侵入岩。根据Mao等^[40]的论述及所引用文献反

映的资料,该区活动陆缘型岩浆活动一直持续到晚石炭世(320~300 Ma)。

3.6 卡腊山-吉尔吉斯山碰撞带(Ⅵ)

在中亚地区,被称为尼古拉耶夫线,延伸到中国境内,被称为那拉提断裂带。沿该带出露有震旦纪蛇绿岩^[41]和元古宙变质岩。相对来说,该带出露宽度比较小,构造变形比较强。

3.7 克孜尔库姆微大陆(Ⅶ)

该微大陆在中亚地区被称为中天山,前震旦纪岩石零星出露,主体是古生代火山沉积岩系和侵入岩,显示其可能是古生代岛弧的一部分。在乌兹别克斯坦境内,在塔什干市南东形成了著名的卡尔马留克金铜碲矿集区。近年的资料表明,成矿作用主要发生在石炭纪晚期(Rima Seltmann, 2006年面告)。著名的穆龙套金矿位于该微大陆的南部边缘,库姆托尔金矿床就位于该弧的伊塞克湖附近。近年的研究表明,这些金矿的成矿时代是二叠纪早期(285 Ma前后)^[41],都是在造山阶段形成的。

该微大陆在东段被塔腊斯-费尔干纳右行走滑断裂切割。如图3所示,该构造单元向东延伸到中国境内,逐渐变窄,主要出露志留纪至石炭纪的火山沉积岩系和侵入岩。其中志留纪花岗岩相对富含钾质,泥盆纪侵入岩则属于典型的钙碱系列^[42]。

3.8 南天山碰撞带(Ⅷ)

位于天山山脉南部,在中亚地区呈北西走向、向南西凸出的弧形,在中国境内呈近东西走向、向北凸出的弧形,二者之间为北西—南东走向的费尔干纳右行走滑断裂。

该带主要由古生代陆缘岩系和洋的残余组成。其中的陆缘杂岩包括奥陶纪、志留纪、泥盆纪、石炭纪中酸性侵入岩,奥陶纪至石炭纪火山沉积岩系等构成的活动陆缘杂岩和位于阿赖山南部的被动陆缘杂岩。洋的残余包括以蛇绿岩为代表的洋岩石圈残片,如阿赖山北部的蛇绿岩、那拉提蛇绿岩、库勒湖蛇绿岩、米斯布拉克蛇绿岩、库米什蛇绿岩和卡瓦布拉克蛇绿岩等,其中与库勒湖蛇绿岩伴生的硅质岩中含有泥盆纪和早石炭世的牙形石和放射虫化石,与阿赖山蛇绿岩伴生的硅质岩中含有奥陶纪至早石炭世的放射虫和牙形石化石^[43]。根据Brookfield^[44]的资料,横穿阿赖山自北向南,依次为志留纪至泥盆纪中期岛弧和石炭纪岛弧,这2个岛弧在泥盆纪晚期拼贴,位于南侧的石炭纪岛弧在二叠纪与卡拉库姆陆块碰撞,其上叠加了三叠纪的弧后盆地建造。

在中国境内,哈尔克山和霍拉山属于该带的不同地段,它们的组成也有明显差别。笔者推测,哈尔克山可能属于弧前增生杂岩,霍拉山则可能为古海山残片。再向东到博斯腾湖以东地区,洋的残片以库米什和榆树沟蛇绿岩、卡瓦布拉克蛇绿岩为代表,伴生浅变质岩系。除了这些洋的建造以外,其中可能还含有古岛弧的残片。

在该带中亚地区,二叠纪早期后碰撞富钾花岗岩侵入其中,二叠纪早期造山型金矿发育(图4)^[41],揭示出该带前身洋盆是在此之前关闭的。

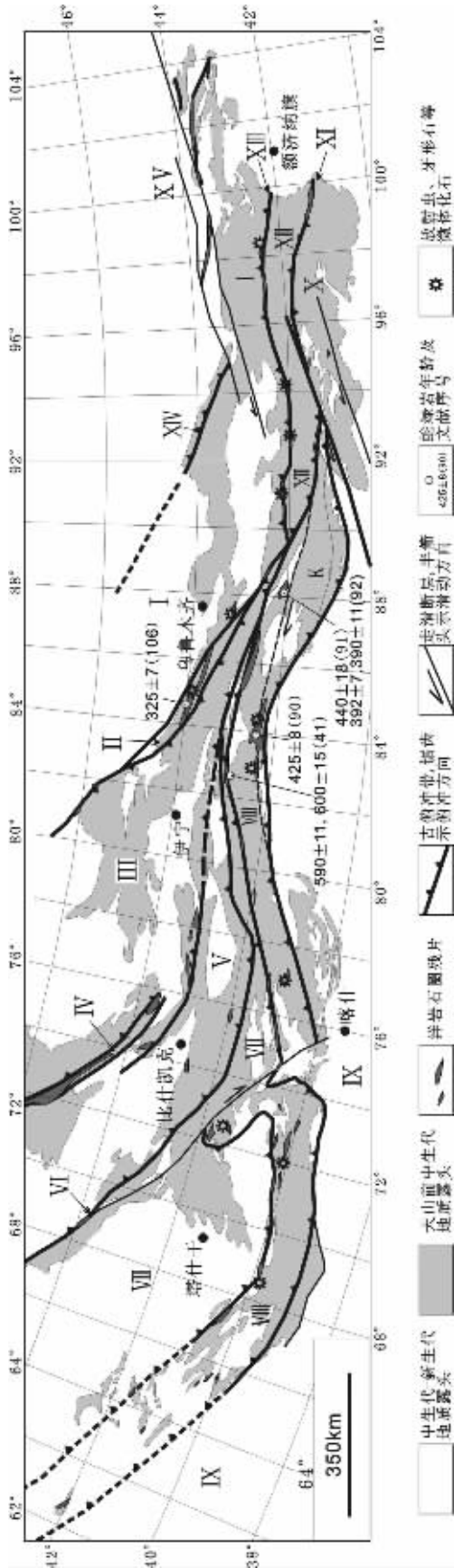


图3 天山山脉地壳构造分区(根据中国科学院主编的中亚地区1:250万地质图编制)

Fig.3 Tectonic divisions of the crust of the Tianshan Mountains

示意性地表示了洋岩石圈残片的空间分布和已有的年龄资料。图中罗马数字为构造单元编号,其名称及组成见正文,K为库鲁克塔格地区

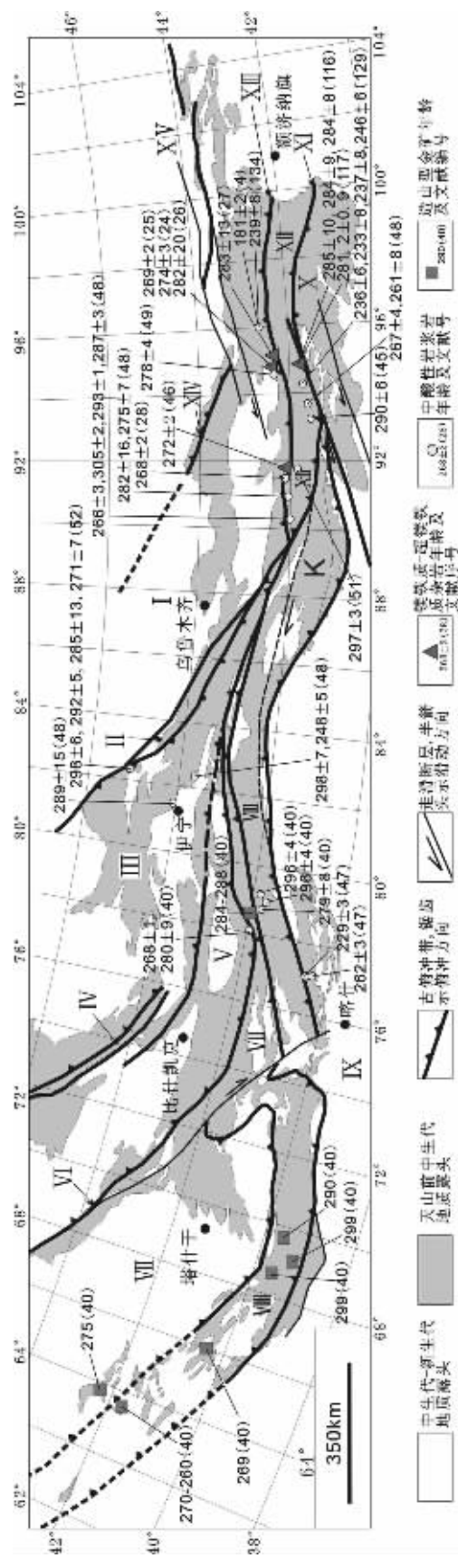


图4 天山山脉二叠纪岩浆岩和金矿床的部分同位素年龄

Fig.4 Isotopic ages of some Permiian magmatic rocks and gold deposits in Tianshan Mountains

图中罗马字母为构造单元的编号,同图3,其特征详见正文描述

位于库米什蛇绿岩以南的库鲁克塔格地区,被多数学者认为是塔里木地台基底隆起。然而,近年从该区陆续发现的古生代,特别是早古生代岩浆活动^[53,54],揭示出该区可能不是塔里木古陆的组成部分。在构造变形方面,库鲁克塔格地区总体上呈现为扇形构造样式,也与塔里木盆地西北缘阿克苏地区不同。根据这些资料,姜常义等^[53]认为南天山存在向南的古俯冲带;李锦轶等^[21,23]曾推测,以兴地塔格断裂为界,以北属于天山造山带,以南为塔里木基底。考虑到区域背景资料,特别是该区东延和西延地区的地质,笔者推测,库鲁克塔格地区在古生代期间很可能是古亚洲洋中的古岛弧的一部分;在库米什蛇绿岩、色日克亚依拉克蛇绿岩和米斯布拉克蛇绿岩一线可能发育一条古右行走滑断层,其走滑运动使库鲁克塔格地区位于现今的位置;库鲁克塔格地区原来是与哈尔克山等还是与巴伦台、喀拉塔格-星星峡等构成一系列岛弧,还有待于进一步研究,就目前资料而言,笔者倾向于后者。

3.9 卡拉库姆-塔里木古陆(IX)

位于天山山脉以南,现今大部分被新生代盆地堆积物覆盖,基底露头非常有限。在塔里木盆地西北缘阿克苏一带,新元古代早期的阿克苏蓝片岩被震旦纪沉积岩系不整合覆盖^[55-57],其上的古生代地层由陆源碎屑岩和碳酸盐岩组成,卷入了指向盆地的逆冲褶皱构造变形,指示这些震旦纪至古生代晚期的地层类似于被动大陆边缘的沉积岩系。该区发育的基本连续沉积的震旦纪至石炭纪地层,揭示出天山山脉前身的洋盆在古生代期间没有经历关闭后再打开最后再闭合的演化历史,而是直到石炭纪晚期才关闭。

3.10 敦煌地块(X)

位于红柳河-小黄山碰撞带以南、赛里克沙依-星星峡断裂以东、阿尔金断裂带以西、阿尔金山拉配泉蛇绿岩带以北,主要由早前寒武纪变质岩组成,在其北部发育奥陶纪-志留纪火山沉积岩系、侵入岩和晚石炭世至三叠纪的中酸性侵入岩。在文献中,该地块曾经被称为安西地块^[23],被普遍认为是塔里木古陆的一部分。但是从航磁资料^[58]看,该地块与塔里木古陆是有明显区别的,二者之间的界线,即赛里克沙依-星星峡断裂也是很清楚的,该地块北缘与塔里木古陆北缘的地质差别也是很明显的。因此,笔者坚持认为,该地块是独立于塔里木古陆的洋中微大陆,至少在古生代晚期,其北部边缘可能属于类似于安第斯型的活动陆缘。

在柳园地区,出露二叠纪海相枕状玄武岩,这些玄武岩被普遍认为是在二叠纪裂谷中形成的。但是,该区没有典型的裂谷沉积建造,区域上发育同期的钙碱系列岩浆岩,揭示出这些玄武岩的形成环境可能是弧后裂谷,也可能是古海山,而不大可能是陆内裂谷。从区域上看,中国东北地区以西拉木伦河北和索伦山蛇绿岩为代表的晚古生代洋盆向西应该延伸到北山地区。如果柳园枕状玄武岩形成于弧后,那么位于其北侧的红柳河-白云山-小黄山蛇绿岩带代表的洋盆应该是在晚古生代关闭的。虽然这与目前流行的认识不吻合,但是星星峡以南金窝子金矿一带和北山牛圈子一带与红

柳河-小黄山蛇绿岩带伴生的带状展布的二叠纪海相沉积岩系,表明这种可能还不能被排除。柳园枕状玄武岩如果是古海山残片,那么柳园以北马鬃山一带的古生代活动陆缘建造就可能是古岛弧的一部分,而不属于敦煌地块。就目前的资料而言,还不能确定以上哪一种推论更符合实际情形。但是笔者认为,从目前已有的地质资料看,柳园一带的二叠纪枕状玄武岩不太可能形成于陆内裂谷环境,暂倾向于其形成环境是二叠纪弧后盆地。

3.11 红柳河-白云山-小黄山碰撞带(XI)

从兰一新铁路红柳河车站附近,向东通过玉石山、牛圈子、石板井南东的白云山到小黄山出露的蛇绿岩,遭受了不同程度变质作用的改造,目前还没有它们所代表的洋盆形成演化的确切年代学资料。在该蛇绿岩带附近,金窝子金矿和牛圈子等地都发育平行该带、呈带状展布的二叠纪海相沉积地层,有可能是该带前身洋盆演化晚期的地质记录,间接指示该带前身的洋盆有可能延续到古生代晚期。根据其两侧岩浆活动的特征,笔者进一步推测,该带前身的洋盆与内蒙古东部的晚古生代洋盆可能是连通的,它们都是在二叠纪晚期关闭的。目前获得的塔里木和中朝地块的古地磁资料^[59,60],表明二者当时处于不同的纬度区。地质资料显示敦煌陆块北缘在二叠纪期间与中朝陆块北缘的亲缘性,可以推测,红柳河-白云山-小黄山蛇绿岩带代表的古洋盆向西可能通过塔里木以南与帕米尔一带的晚古生代洋盆贯通。

3.12 星星峡-旱山岛弧(XII)

位于康古尔塔格-碧玉山碰撞带与南天山碰撞带、红柳河-白云山-小黄山碰撞带之间,包括文献中所说的喀拉塔格地块、星星峡地块和旱山微大陆^[24,61]。该岛弧具有元古宙结晶基底,活动陆缘建造主要为早古生代深成岩和石炭纪深成岩、火山沉积岩系。

在新疆境内,位于该岛弧中部的阿其克库都克断裂带曾经被作为早古生代俯冲带^[62]或古板块边界^[63],但是笔者近年的工作发现该断裂带可能是在石炭纪晚期至二叠纪裂谷带的基础上发育起来的走滑断裂带。位于阿其克库都克断裂带以北的雅满苏-阿奇山一带的石炭纪地层,被有些学者认为是康古尔塔格碰撞带前身洋盆向南俯冲形成的岛弧带^[62]。笔者近年的工作发现,那里被划归早石炭世的火山岩实际上是晚石炭世形成的,该区早石炭世地层主要为陆缘碎屑岩和碳酸盐岩,类似于被动陆缘沉积岩系。

在李锦轶等^[23]的文章中,基于姜常义等^[53]的资料和对卡瓦布拉克断裂带构造样式的研究,以及喀拉塔格一带没有前晚石炭世岩浆活动的信息,认为喀拉塔格是洋中的微大陆,两侧边缘均为被动陆缘。考虑到星星峡一带发育古生代岩浆活动,结合断裂构造研究,推测它们原来可能相距很远,不直接相邻。然而,近年的工作中,在卡瓦布拉克断裂带以北,笔者发现了时代可能为早古生代的安山岩和志留纪、石炭纪早期的侵入岩^[64,65],表明卡瓦布拉克断裂带中的蛇绿岩代表的洋盆,可能还是通过向北的俯冲消减而关闭的。即

喀拉塔格与星星峡等地的元古宙变质岩和古生代岩石组成一列古生代岛弧,该岛弧的演化与位于其南侧的以卡瓦布拉克和库米什等地的蛇绿岩为代表的洋岩石圈板块向北的俯冲作用有关。

3.13 康古尔塔格-碧玉山碰撞带(XIII)

该带西起托克逊南东的却勒塔格,向东通过恰特卡尔塔格、康古尔塔格、土屋南、兰新铁路苦水(思甜)火车站北、黄山到北山北部的碧玉山,延伸近1000 km,宽度10~20 km不等,主要由玄武岩-碧玉岩-远洋复理石等洋壳残片组成,被二叠纪含铜镍矿的幔源杂岩和花岗岩侵入。该带呈现为北窄南宽不对称的扇形构造样式,经历了早期南北向挤压(二叠纪初期)和晚期右行走滑运动(二叠纪中期)^[29]。

该带西段被干沟断裂向北的逆冲所构造掩覆,东端被新生代沉积物覆盖。

该带以南雅满苏-阿奇山一带的早石炭世地层具有被动陆缘的亲缘性^[29],以北吐哈盆地南缘发育奥陶纪至石炭纪的活动陆缘建造^[19]。

以上特征表明,该带的形成是其前身洋盆岩石圈板块向北俯冲消减的结果,因此不可能是依连哈比尔杂带的向东延伸。

3.14 卡拉麦里碰撞带(XIV)

位于天山山脉与准噶尔低山丘陵之间,系准噶尔-吐哈岛弧与东准噶尔-南蒙古岛弧之间的碰撞带。由卡拉麦里蛇绿岩和泥盆纪弧前沉积物、早石炭世残余海盆堆积物组成^[66,67]。图瓦贝动物群化石的分布及区域地质资料揭示出该带前身洋盆形成于泥盆纪初期,为西伯利亚古板块边缘的弧后盆地或边缘洋盆^[24]。

3.15 东准噶尔-南蒙古岛弧(XV)

由叠加在早古生代岛弧建造上的泥盆纪中期至早石炭世火山沉积岩系组成,同时代的深成岩出露规模有限。被石炭纪晚期和二叠纪花岗岩侵入,局部发育同时代的火山沉积岩系。

综上所述,天山山脉古构造格局是古岛弧及相关的古洋盆演化形成的。中亚及中国西天山为早古生代聚合的哈萨克斯坦古板块及其南北两侧晚古生代活动陆缘带,其南邻区为塔里木陆块和卡拉库姆陆块,后二者与东欧克拉通一起构成了以被动边缘面向乌拉尔-天山前身洋盆的古洋中的大陆群;其北隔斋桑洋盆与西伯利亚古板块活动陆缘相望。

由于后期断裂活动的改造,中国东天山和北山地区等天山山脉东段的古构造格局不如天山山脉西段的保存完整。综合吐哈盆地南缘古活动陆缘演化研究的新进展^[19]、已有的古生物和近年大型断裂构造的研究资料,笔者认为乌鲁木齐市以东的天山山脉东段的主体为西伯利亚古板块的增生边缘。从哈尔里克山到吐哈盆地南缘,是逐渐向南迁移的奥陶纪至石炭纪活动陆缘。该陆缘以南依次为康古尔塔格-碧玉山(北山北部)碰撞带、喀拉塔格-星星峡-早山(北山中部)岛弧、红柳河-白云山-小黄山碰撞带、敦煌地块北部活动陆缘。这一格局与天山山脉西段显然是不同的。

4 地壳形成演化

天山山脉上述地壳构造分区的形成,是漫长地质时期各种地质作用的产物。组成天山山脉地壳地质体的类型与时代,表明天山山脉地壳的形成演化经历了从太古宙至现今大约30亿年的地质历史。正确恢复这一漫长的地质历史,需要回答该区地壳形成演化是否有阶段性,如果有,如何划分,各个阶段之间又是何种关系等重大地质问题。下面就基于目前获得的资料,包括区域地质、古地磁、古生物和同位素年代学等方面的资料,对这些问题进行简要的讨论。

4.1 构造阶段的划分

在天山山脉的地质历史上曾经发育不同地质时期的古洋盆,每一个地质时期的古洋盆都对应着大陆裂解到再聚合的演化过程。这里所说的构造阶段就对应着该区这样的不同地质时期。因此,确定该区地质历史上存在几个不同时期的古洋盆,是划分该区构造阶段的关键。

一般说来,一个洋盆的打开和闭合,都留下了相应的地质记录,包括沉积环境的改变、特定成分和类型的岩浆活动、反映海进或海退的沉积岩系、强烈的构造变形和变质事件等。例如,洋盆的打开,在地质记录中留下了沉积环境由陆相到海相的转变、双峰式岩浆活动、区域性的高角度不整合界面;在洋盆发展和演化时期,形成了连续的浅海相和深海相沉积岩系、钙碱系列和拉斑玄武岩系列的岩浆活动;在洋盆关闭阶段,沉积环境发生从海相到陆相的改变、形成快速堆积的巨厚沉积岩系、富铝富钾的岩浆岩、区域性的动力变质岩系、具有明显构造极性的逆冲褶皱构造、继之发生的平行山脉的大型走滑断裂构造和地质记录中的区域性高角度不整合界面。

基于以上认识,以中元古代地层底部的不整合界面、震旦纪地层底部的不整合界面、石炭纪末期至二叠纪初期强烈的构造变形事件及在这一时期前后岩浆活动和沉积作用的明显差别,以及早更新世西域砾岩底部的不整合界面等为标志,天山山脉地壳的形成与演化可以划分为太古宙-古元古代、中元古代-新元古代中期、新元古代晚期至石炭纪、二叠纪至上新世和第四纪以来5个构造阶段,分别对应着全球大陆演化的哥伦比亚超大陆、罗丁尼亚超大陆、潘吉亚超大陆和现今大陆的形成演化等阶段。

4.2 太古宙-古元古代古活动陆缘残片

及其地质意义

天山山脉内确切的太古宙和古元古代的地质体,目前主要见于库鲁克塔格地区,由表壳岩系、斜长角闪岩包体、TTG片麻岩和花岗岩等组成。从已有的同位素年代学资料^[68-73]看,以辛格南灰色片麻岩为代表的具有TTG岩系特征的岩石形成于太古宙晚期,侵入其中的片麻状二云母花岗岩形成于2000 Ma前后,分别在2300 Ma前后和1850 Ma前后经历了变质作用的改造。该区是否发育更古老的地质体,还有待于进一步研究。

温泉地区和巴伦台地区出露的变质岩,其时代被置于古元古代^[7],但是一直没有确切的年代学证据。近年来,对巴伦台地区花岗岩的定年,从中获得了古老锆石的信息^[74],揭示出该区可能曾经存在早前寒武纪地质体。

这些古老的地质体,从岩石组合和岩石化学特征看,与后来的活动陆缘岩系是可以对比的。尽管没有发现确切的古洋岩石圈的残片,但是这些岩石的存在揭示,在太古宙晚期至古元古代期间,可能发育与显生宙类似的板块之间的相互作用;同时也揭示出天山山脉中的这些古老岩石是古超大陆的碎片,不是原始的古陆核。

4.3 中元古代—新元古代中期阶段洋陆演化的地质记录与古板块运动

这一地质时期的地质记录在天山山脉中有比较广泛的出露。

出露在塔里木盆地西北缘阿克苏一带被震旦纪不整合覆盖的阿克苏群由绿片岩和蓝片岩组成,其中的蓝片岩形成于新元古代中期,绿片岩的原岩为洋底拉斑玄武岩^[55,56]。这些岩石的存在揭示出该区新元古代早期发育板块俯冲碰撞作用。

出露在中国东天山喀拉塔格—星星峡一带的元古宙星星峡群、卡瓦布拉克群和天湖群,都由不同程度变质的火山沉积岩系组成,其中卡瓦布拉克群中夹有比较多的碳酸盐岩,可能为古海洋中碳酸盐台地或古海山的沉积。近年获得的年代学资料,揭示出天山山脉中的这些地质体主要是在中元古代和新元古代早期形成的^[75-80]。在中国天山中段的冰达坂一带,笔者近年识别出950 Ma左右的片麻状花岗岩,其岩石化学特征类似于活动陆缘钙碱系列侵入岩。

在库鲁克塔格地区,这一时期的地质体被划分为杨吉布拉克群、爱尔基干群和帕尔岗塔格群^[7,81],它们主要由陆源碎屑岩和碳酸盐岩组成,不整合覆盖在太古宙和古元古代的地质体之上,显示出被动陆缘沉积岩系的特征。

上述不同类型地质体的存在,揭示出天山山脉地壳的形成演化经历了中—新元古代期间古洋陆格局演化和古板块之间的相互作用;它们的空间展布虽然显示出活动陆缘残片位于北部、被动陆缘和古俯冲带残片位于南部的宏观特征,但是当时的洋陆格局已经难以重建。

由阿克苏地区的蓝片岩和绿片岩等构成塔里木古陆的基底,近年在塔里木盆地中也识别出新元古代中期的岩浆岩^[82,83],可知塔里木古陆的基底是由太古宙、早元古代结晶岩系(更古老的古陆的碎片)和中—新元古代造山带组成的,直到新元古代中期才最后形成。它作为一个独立的古陆,则是从新元古代晚期它所在的超大陆分裂才开始的。

需要指出的是,即使不考虑上文所推测的后期断裂活动导致库鲁克塔格地区的位移,目前识别出的天山山脉中前震旦纪地质体的组成及空间分布(特别是它们与塔里木古陆基底露头揭示出的彼此关系)、塔里木和伊犁2个古陆块体的古地磁资料^[59],以及中亚地区天山山脉中其他古陆的存在(图

3),都不支持塔里木与伊犁2个古陆原来直接相连的论点。

4.4 震旦纪(新元古代晚期)至石炭纪洋陆演化阶段与地壳主体格架的形成

塔里木盆地西北缘柯坪至阿克苏一带出露的震旦纪至石炭纪的连续沉积岩系,揭示出天山山脉前身的洋盆在这一地质时期是连续发育的。该区及库鲁克塔格地区震旦系与下伏地质体之间的高角度不整合,震旦纪巨厚陆源碎屑岩及其中冰碛岩和双峰式火山岩的发育,以及天山山脉中震旦纪至石炭纪的地质记录,揭示出天山山脉前身古生代洋盆的形成演化可以分成如下几个阶段。

4.4.1 震旦纪古陆裂解与天山山脉前身洋盆的打开

天山山脉前身洋盆打开的时限一直是地质界争议的问题之一。一些学者基于该区地质体的时代和寒武纪的沉积特征,认为该洋盆是在奥陶纪或志留纪打开的^[84,85]。这一认识不仅与塔里木盆地北缘出露比较连续的震旦纪至石炭纪被动陆缘沉积岩系这一现象相矛盾,而且与中国天山和中亚地区广泛出露的指示古洋盆已经开始收缩的奥陶纪活动陆缘杂岩不吻合。因此,Li^[86]根据对塔里木盆地北缘和扬子陆块北缘震旦纪地层中火山沉积岩系的分析研究,认为该洋盆是在震旦纪打开的。笔者等也多次阐述了类似的认识^[20,21,23,87]。夏林圻等^[88]也提出了类似的结论。Xu等^[89]对库鲁克塔格地区贝义西组火山岩的年代学研究,进一步限定了这一导致古洋盆形成的大陆裂解的时限。

近年来,对天山蛇绿岩的研究获得了一些高精度的年代学资料(图3)。其中杨海波等^[90]对选自那拉提山达鲁巴依蛇绿岩中辉长岩和玄武岩的锆石定年,获得了590 Ma和600 Ma的年龄,是迄今获得的天山山脉中蛇绿岩的最古老年龄,揭示出天山山脉前身的古生代洋盆在震旦纪中期就已具有一定规模。龙灵莉等^[91]对库勒湖蛇绿岩辉长岩中锆石的定年、王润三等^[92]和周鼎武等^[92]对榆树沟蛇绿岩定年获得的锆石U-Pb年龄,虽然都属于奥陶纪和志留纪,但是这些年龄只能说明当时古洋盆在扩张,不能作为该古洋盆是在奥陶纪或志留纪期间才打开的证据,原因是区域上发育从奥陶纪开始一直持续到石炭纪的活动陆缘建造。

综合考虑塔里木盆地北缘震旦纪、古生代沉积岩系的特征和天山及毗邻地区蛇绿岩、活动陆缘杂岩的同位素年代学资料,笔者相信天山山脉古生代期间的洋盆是在震旦纪期间大陆分裂形成的。

4.4.2 震旦纪—寒武纪古洋盆持续扩张和被动陆缘演化

在塔里木盆地北缘库鲁克塔格、柯坪和阿克苏等地,以及在天山山脉中博罗霍洛山,震旦纪至寒武纪地层主体都为陆源碎屑岩夹碳酸盐岩,不含钙碱系列火山物质^[7,81]。在整个天山山脉中,迄今为止还没有发现确切的寒武纪钙碱系列岩浆活动。这些资料表明,天山山脉前身的古生代洋盆在震旦纪至寒武纪期间很可能处于持续扩张阶段,其边缘为被动大陆边缘。

4.4.3 奥陶纪—石炭纪古俯冲带形成演化与古洋盆持续收缩

哈尔克山西段、博罗霍洛山、南天山的硫磺山、东天山哈

尔里克山等地陆续发现的奥陶纪和志留纪岩浆活动^[12,13,91,93-98],揭示从奥陶纪开始天山山脉前身的古洋盆已经开始收缩,亦即古洋岩石圈板块开始俯冲。从龙灵莉等^[90]报道的库勒湖蛇绿岩的志留纪年龄可知,在边缘俯冲消减的同时,直到志留纪期间,仍有新的洋岩石圈在古洋扩张脊形成。

中亚地区天山中部活动陆缘的地质记录揭示出,在早古生代晚期至晚古生代早期,洋中的一些岛屿可能逐渐汇聚在一起形成了哈萨克斯坦古板块。那拉提山、巴伦台地区和库鲁克塔格地区志留纪富钾花岗岩的形成^[42,54,74]可能对应着这一事件。但是南天山库勒湖以北地区、巴伦台至库米什以北地区、东天山吐哈盆地南缘等地,志留纪—泥盆纪钙碱系列岩浆活动的存在^[13,14,42,94,95],都揭示出志留纪至泥盆纪期间古洋盆没有关闭。

东天山土屋及其以北地区、喀拉塔格地区、西天山大哈拉军山地区、依连哈比尔尕山等地及中亚地区都有石炭纪钙碱系列岩浆活动的发育^[15-19,36-38,40],以及与蛇绿岩伴生的硅质岩中含有泥盆纪和石炭纪的牙形石和放射虫等化石^[34,99],揭示出古洋盆的演化和古洋岩石圈板块的俯冲都持续到了石炭纪晚期。

4.4.4 石炭纪晚期古洋盆关闭与统一大陆地壳的形成

关于天山古洋盆的关闭时限,在地质界一直有石炭纪晚期^[87]和二叠纪期间^[100]2种认识。近年来,夏林圻等^[88]根据对石炭纪火山岩及地层中不整合界面的研究,认为该洋盆是在泥盆纪晚期或石炭纪初期关闭的,王京彬等^[101]也持类似的观点。张立飞等^[102]根据对哈尔克山北坡高压变质岩的年代学研究,认为天山古洋盆的关闭可能发生在二叠纪晚期或三叠纪期间;李日俊等^[103]基于对哈尔克山南坡硅质岩中微体化石的研究,也认为天山前身古洋盆的演化可能持续到了二叠纪晚期或三叠纪。

关于这一问题的分歧,关键在于所依据的地质资料是否准确及解释得是否合理,以及是否考虑该区古洋盆演化的所有记录、该区以挤压为主的主构造变形发生的时代和区域地质资料。

首先,看一下是否有足够的证据表明天山山脉前身的洋盆是在石炭纪早期或古生代更早期关闭的。韩宝福等^[74]发现巴伦台一带的志留纪花岗岩具有后碰撞的岩石化学特征,但是并没有明确指出与哪一碰撞事件有关。天山其他地区类似的同时代花岗岩,被其他学者认为形成于活动陆缘环境^[42,54]。根据对已有资料的综合分析,笔者推测这一时期可能是哈萨克斯坦古板块聚合的时期,天山前身的古洋盆并没有关闭。

其次,天山山脉中石炭纪马鞍桥组与下伏地质体之间的不整合,被有些学者认为是天山前身古洋盆关闭的有力证据^[88]。通过对相关资料的研究和对部分地区的野外考察,笔者形成的概念是,被置于马鞍桥组底部的一套砾岩,仅在局部地区如巴伦台镇以北地区发育,未见其与被置于其上紧闭褶皱的沉积岩系之间的连续沉积关系;马鞍桥组下伏的

地质体,基本都是被置于元古宙的变质岩系,未见其与古生代洋壳残片的直接接触关系。因此,把该不整合界面作为天山山脉前身古洋盆关闭的时限,至少证据是不充分的。关于地层中的不整合界面,笔者认为其地质意义应该结合其他方面的资料才能确定。因为在活动陆缘的岩浆弧和弧前乃至弧后地区,不整合界面是很常见的地质现象。例如美国西海岸科迪勒拉地区和日本的弧前地区,中生代和新生代地层中都发育比较明显的不整合界面,如果据此就得出太平洋关闭的结论,显然不符合实际情形。关于天山山脉及邻区的泥盆纪晚期和石炭纪地层中的不整合界面,笔者认为有2种情形,一是局部洋盆关闭的地质记录,如东准噶尔南部卡拉麦里地区和南蒙古地区早石炭世晚期的不整合界面;二是限于活动陆缘区的局部性不整合界面。天山山脉中的石炭纪地层与下伏地质体之间的不整合界面可能都属于后一类。

从沉积环境看,天山及其以北地区的海相沉积环境都持续到了石炭纪末,在此之前,从泥盆纪到石炭纪都以海相沉积环境为主,没有任何迹象显示在此期间全区经历了由海相到陆相再转化为海相,即发生了洋盆关闭再打开的演变过程。特别是在塔里木盆地北缘,震旦纪至石炭纪地层为基本连续的海相沉积岩系,指示它们所面对的海洋盆地在古生代期间是持续发展的。

如上文所述,在南天山库勒湖和北天山巴音沟,与蛇绿岩伴生的硅质岩中都含有泥盆纪和石炭纪的微体化石,它们被认为是蛇绿混杂岩的组成部分。最近Xia等^[104]和徐学义等^[105,106]报道了从巴音沟蛇绿岩获得的325 Ma的同位素年龄,并据此认为该蛇绿岩所代表的洋盆是早石炭世形成的红海型洋盆。由于目前没有迹象显示该区含有泥盆纪微体化石的硅质岩与含有石炭纪微体化石的硅质岩分属2套蛇绿岩,是2个洋盆开合旋回的地质记录,所以那里325 Ma的蛇绿岩是否代表了石炭纪新生洋盆,还需要结合区域上沉积环境的改变、岩浆活动的差别和强烈构造变形的时代等方面的资料才能确定。

与马鞍桥组层位相当或位于其上的石炭纪火山岩和同时代的大面积花岗岩,具有明显的活动陆缘杂岩的地球化学特征^[16,17,19,36-38,40,53]。

天山山脉中的高压变质岩的形成时代,曾经被置于元古宙晚期^[107,108]、志留纪至石炭纪^[85,109]、石炭纪^[34]和二叠纪或三叠纪^[102]。然而Klemm等^[110]对已有年代学资料进行系统研究后认为,该带的高压变质作用主要发生在石炭纪晚期,揭示出古洋盆的演化持续到了石炭纪晚期。这一结论与笔者近年对天山地区变形时代的研究是吻合的。

那么该区的古洋盆是否持续到二叠纪或三叠纪才关闭呢?

天山地区二叠纪期间的岩浆活动还是很强烈的。但是与石炭纪期间不同,该区二叠纪岩浆活动主要以幔源岩浆活动为主,并具有双峰式的特征,类似的岩浆活动还广泛发育在天山山脉两侧,包括阿尔泰山和塔里木古陆的广大

地区^[7,23-28,44-46,48-53,111-120]。在天山山脉中的康古尔塔格碰撞带和南天山碰撞带都可以见到这一时期的侵入岩和火山岩,其中侵入岩最年轻的围岩为变形的石炭纪海相沉积岩系,火山岩的产状和变形特征也明显不同于其覆盖或伴生的石炭纪地质体。在岩石类型和岩石化学成分方面,二叠纪岩浆岩没有明显的极性特征。在产状方面,二叠纪岩体多为小岩株,同时还以基性岩墙广泛发育为特征。这些特点揭示出它们形成于区域性伸展构造背景。

在沉积作用方面,西南天山虽然有报道说发育早二叠世的海相沉积,但是不仅证据有限,而且不能排除该海相沉积环境属于前陆盆地演化早期的可能性。

陆续获得的天山主要变形带的年代学资料,揭示出天山山脉在古生代期间经历了2期全区性的强烈构造变形,早期构造变形发生在石炭纪末至二叠纪初,以挤压体制为主,晚期发生在二叠纪中—晚期,绝大部分地区都以走滑体制为主^[23,121-125]。虽然有些地区获得了二叠纪晚期挤压构造变形和三叠纪走滑运动的资料^[126,127],但是还没有发现二叠纪或三叠纪早期区域性挤压构造变形的任何信息。迄今为止,还没有获得存在区域性的晚石炭世以前强烈构造变形的任何确凿证据。

基于以上资料和分析,笔者相信天山古洋盆的关闭发生在石炭纪晚期,不是在更早或更晚的地质时期。

4.4.5 二叠纪至新生代早期陆内地壳演化

与现今地壳构造格架的形成

天山山脉二叠纪以来的地壳构造演化都发生在陆内环境,与以上3个阶段有比较明显的区别。目前已经知道,在这一阶段,除了陆内大型沉积盆地的形成演化外,主要的地质事件有二叠纪初期的钙碱系列岩浆活动与挤压变形(290~300 Ma)、早二叠世幔源及壳源的岩浆活动(270~280 Ma)、二叠纪中—晚期的走滑运动(260 Ma)、二叠纪末至三叠纪的碱性岩浆活动(260~240 Ma)、晚三叠世的走滑运动(220 Ma)、晚三叠世至侏罗纪早期的岩浆活动(220~180 Ma)、白垩纪岩浆活动等。

在文献中,二叠纪期间的地质作用被归因于板块碰撞的后碰撞阶段,其余的被认为属于板内地壳构造变动。然而,与Liegeois^[128]定义的后碰撞概念相比,天山山脉及其毗邻地区二叠纪构造演化有其自身的特点,即该区二叠纪发育幔源岩浆侵入与喷发。

天山山脉中的三叠纪和侏罗纪岩浆活动是近年才发现的,主要发育在中国的东天山和北山地区,以富碱质的酸性小岩株为主^[3,4,7,129]。该区为什么发育这一时期的岩浆活动,一直是令人困惑的问题。通过对区域地质背景的分析,发现同期的岩浆岩及热事件还见于中国阿尔泰山、蒙古、俄罗斯外贝加尔、中国东北北部、北山至内蒙古索伦山—西拉木伦河一带,以及中朝古陆和敦煌古陆的北缘^[130-133]。其中阿尔泰山、蒙古境内、俄罗斯外贝加尔和中国东北北部这一时期的岩浆岩围绕蒙古—鄂霍次克造山带展布,北山—内蒙古索伦

山—西拉木伦河一带和中朝古陆北缘则是另一条巨型岩浆岩带。笔者推测它们可能分别与蒙古—鄂霍次克造山带前身洋盆的大陆边缘演化及中朝古陆—敦煌古陆与蒙古古陆的碰撞有关。

白垩纪晚期的岩浆活动仅见于中国的西南天山和中亚地区,被推测是地幔柱活动的产物。但是托云盆地的火山岩中含有下地壳的包体,且以偏酸性岩浆岩为主,故不能排除它们的形成与特提斯洋岩石圈板块向欧亚大陆之下俯冲有关的可能性。

综上所述,天山山脉二叠纪至新生代早期的构造演化,根据区域地质背景和动力学体制,似乎还可以进一步划分为二叠纪至三叠纪初期、三叠纪至侏罗纪和白垩纪至新近纪3个不同时期,分别与中亚地区后碰撞演化(P—T)、蒙古—鄂霍次克造山带及昆仑造山带前身的古太平洋及古特提斯洋演化(T—J)、陆内演化(K—N)等有关。

4.4.6 早更新世陆内造山作用与现今盆山格局的形成

天山山脉在早更新世经历了强烈的板内造山作用,形成了现今所见的盆山格局和地貌特征。目前获得的资料表明,该区的板内造山作用主要表现为逆冲推覆、走滑运动和差异隆升。逆冲推覆主要发育在天山山脉南北两侧的山脉与盆地之间,导致包括新近纪沉积岩在内的盆地堆积物被卷入到山系之中,亦即山脉向盆地方向的生长。走滑运动主要是沿共轭的北东走向的左行走滑断裂和北西走向的右行走滑断裂发生的,其中又以北东走向的左行走滑断裂更为发育。差异隆升形成了现今的海拔近7000 m的高山峻岭和海拔最低为-154 m的盆地。一个有趣的现象是,现今的天山山脉与古天山山脉有明显差别,哈尔克山—博格达山—哈尔里克山构成了现今天山山脉的主脉,但是它们的地质构成则有明显的差别。

这一板内造山作用是很独特的,被普遍认为是印度与欧亚大陆碰撞产生的远程效应。但是为什么这一板内造山作用只在天山山脉表现得如此强烈,为什么在空间上又与古天山山脉不完全相同,为什么地质构造背景没有发生变化而该山脉沿走向会逐渐转化为盆地或平原,都还有待于进一步研究。

5 结语

总体上看,目前获得的资料使我们有可能重新认识天山山脉地壳形成演化、矿产形成的地质背景和保存潜力等方面的一些重大问题。从上文不难看出,笔者对天山山脉相关问题的认识与前人有很大差别。概括起来,这些差别主要是:①笔者认为天山山脉的地壳结构不是简单的东西走向、南北分带,而是具有相对复杂的内部结构。文献中经常提到的哈萨克斯坦古板块没有延伸到东天山,塔里木古板块也没有延伸到北山地区;康古尔塔格断裂带以北属于西伯利亚古板块的活动陆缘,乌鲁木齐市以西的北天山和南天山分别属于哈萨克斯坦古板块两侧的活动陆缘;星星峡等地的古岛弧与已经消亡的古洋岩石圈板块可能构成了独立于上述3个古板块的

另一个以洋为主的古板块;库鲁克塔格地区有可能是被断裂构造活动重新定位的古岛弧的一部分。正是这一古格局导致了现今东天山与西天山许多方面的重大差别。②天山山脉地壳的形成经历了太古宙—古元古代、中元古代—新元古代早期和震旦纪—石炭纪3个洋陆演化阶段,该区地壳现今的构造格架主要是在震旦纪至石炭纪洋陆演化阶段形成的。③该区古洋盆在石炭纪末期结束,二叠纪至三叠纪早期是该区地壳形成演化的后碰撞构造阶段,这一阶段是该区地壳固结和矿产资源形成的重要时期。从三叠纪晚期至新生代早期,都属于该区板内演化阶段,这一时期的地壳变动主要受区域上板块之间相互作用的制约。④早更新世以来属于该区板内造山阶段,笔者将其独立划分出来,是基于现今天山山脉及邻区的构造格局、地貌特征主要形成于这一时期,由板块俯冲—碰撞形成的天山造山带在早更新世已经基本消亡,代之以现今的天山板内造山带,二者的成因机制和空间展布都不相同。

对天山山脉的形成历史,本文虽然勾画出了一个大致轮廓,但是其详细过程还不是很清楚。其中仍然有待于进一步研究的重大问题有:①组成天山山脉的各个古陆碎块在古洋盆中的相对位置,目前的认识基本上都是推测的。例如中亚地区克孜尔库姆、穆云库姆和伊犁3个微大陆在早古生代是多岛洋中的古陆还是一列岛弧的不同部分,目前的资料还难以确定。②二叠纪是天山山脉乃至中亚地区地壳形成演化和矿产形成的重要时期,但是这一时期的岩浆活动的成因机制是后碰撞拆沉还是地幔柱的活动,还需要进一步研究。③新生代晚期天山山脉的陆内或板内造山作用是很独特的,对其详细过程及成因机制,目前还知之甚少。④天山山脉作为中亚地区的一部分,显生宙,主要是古生代期间,地壳有显著生长。对其过程、方式和机制,目前的认识还很模糊。⑤对天山山脉及邻区地壳形成历史的重建还都是粗线条的,关于其详细的时空演变过程,在文献中未见系统的论述和动态重建。

因此,有针对性地开展进一步的研究,有可能在近期内取得重大突破与进展,对于地球科学的发展与完善,对于加速该区矿产资源的勘查,都具有重大的理论意义和现实意义。

致谢:本项研究使用了前人的大量资料,新疆有关部门给予了大力支持和协助,在此表示崇高的敬意和衷心的感谢。

参考文献:

- [1]肖序常,刘训,高锐,等.新疆南部地壳结构和构造演化[M].北京:商务印书馆,2004.1-270.
- [2]李廷栋.亚欧地质图(1:5,000,000)[M].北京:地质出版社,1997.
- [3]Li Huaqin, Chen Fuwen, Lu Yuanfa, et al. New chronological evidence for Indosinian diagenetic mineralization in Eastern Xinjiang NW China. *Acta Geologica Sinica*[J]. 2005, 79(2): 264-275.

- [4]李华芹,吴华,陈富文,等.东天山白山钼铅矿区燕山期成岩成矿作用同位素年代学证据[J].地质学报,2005,79(2):249-255.
- [5]王彦斌,王永,刘训,等.南天山托云盆地晚白垩世—早第三纪玄武岩的地球化学特征及成因初探[J].岩石矿物学杂志,2000,19(2):131-173.
- [6]韩宝福,王学潮,何国琦,等.西南天山早白垩世火山岩中发现地幔和地下壳捕虏体[J].科学通报,1998,43(23):2544-2547.
- [7]新疆维吾尔自治区地质矿产局.新疆维吾尔自治区区域地质志[M].北京:地质出版社,1993.1-841.
- [8]卢德源,李秋生,高锐,等.横跨天山德人工爆炸地震剖面[J].科学通报,2000,45(9):982-987.
- [9]Poupinet G, Avouac J-Ph, Jiang M, et al. Intracontinental subduction and Paleozoic inheritance of the lithosphere suggested by a teleseismic experiment across the Chinese Tien Shan [J]. *Terra Nova*, 2002, 14:18-24.
- [10]李海鸣,姜枚,王亚军,等.新疆富蕴—库尔勒剖面接收函数方法获得的地壳上地幔结构图像[J].地质学报,2006,80(1):135-141.
- [11]曹福根,涂其军,张晓梅,等.哈尔里克山早古生代岩浆弧的初步确定——来自塔水河一带花岗岩体锆石SHRIMP U-Pb测年的证据[J].地质通报,2006,25(8):923-927.
- [12]郭华春,钟莉,李丽群.哈尔里克山口门子地区石英闪长岩锆石SHRIMP U-Pb测年及其地质意义[J].地质通报,2006,25(8):928-931.
- [13]李亚萍,孙桂华,李锦轶,等.吐哈盆地东缘泥盆纪花岗岩的确定及其地质意义[J].地质通报,2006,25(8):932-936.
- [14]宋彪,李锦轶,李文铅,等.吐哈盆地南缘克孜尔卡拉萨依和大南湖花岗岩体锆石SHRIMP定年及其地质意义[J].新疆地质,2002,20(4):342-345.
- [15]陈富文,李华芹,陈毓川,等.东天山土屋—延东斑岩铜矿田成岩时代精确测定及其地质意义[J].地质学报,2005,79(2):256-261.
- [16]李文铅,夏斌,王克卓,等.新疆东天山彩中岩体花岗岩体锆石SHRIMP年龄及地球化学特征[J].地质学报,2006,80(1):43-52.
- [17]侯广顺,唐红峰,刘丛强,等.东天山土屋—延东斑岩铜矿围岩的同位素年代和地球化学研究[J].岩石学报,2005,21(6):1729-1736.
- [18]李向民,夏林圻,夏祖春,等.东天山企鵝山群火山岩锆石U-Pb年代学[J].地质通报,2004,23(12):1215-1220.
- [19]李锦轶,王克卓,孙桂华,等.东天山吐哈盆地南缘古生代活动陆缘残片:中亚地区古亚洲洋板块俯冲的地质记录[J].岩石学报,2006,22(5):1087-1102.
- [20]Jinyi Li, Wenjiao Xiao, Kezhuo Wang, et al. Neoproterozoic-Paleozoic tectonostratigraphy, magmatic activities and tectonic evolution of eastern Xinjiang, NW China[A]. In: Mao Jingwen, Goldfarb, Seltman, et al, eds. *Tectonic Evolution and Metallogeny of the Chinese Altay and Tianshan*, IAGOD Guidebook Series 10; CERCAM/NHM[C]. London, 2003.31-74.
- [21]李锦轶.新疆东部新元古代晚期至古生代的构造格局与构造演化[J].地质论评,2004,50(3):304-322.
- [22]孙桂华,李锦轶,高立明,等.新疆东部哈尔里克山闪长岩锆石SHRIMP U-Pb定年及其地质意义[J].地质论评,2005,51(4):

- 463-469.
- [23]李锦轶,王克卓,李文铅,等.东天山晚古生代以来大地构造与矿产勘查[J].新疆地质,2002,20(4):295-301.
- [24]韩宝福,季建清,宋彪,等.新疆喀拉通克和黄山东含铜镍矿镁铁-超镁铁杂岩体的SHRIMP锆石U-Pb年龄及其地质意义[J].科学通报,2004,49(22):2324-2328.
- [25]Mei-Fu Zhou, C Michael Leshner, Zhengxi Yang, et al. Geochemistry and petrogenesis of 270 Ma Ni-Cu-(PGE) sulfide-bearing mafic intrusions in the Huangshan district, Eastern Xinjiang, Northwest China: implications for the tectonic evolution of the Central Asian orogenic belt[J]. Chemical Geology, 2004, 209:233-257.
- [26]毛景文,杨建民,屈文俊,等.新疆黄山东铜镍硫化物矿床Re-Os同位素测定及其地球动力学意义[J].矿床地质,2002,21(4):323-333.
- [27]陈世平,王登红,屈文俊,等.新疆葫芦铜镍硫化物矿床的地质特征与成矿时代[J].新疆地质,2005,23(3):230-233.
- [28]任燕,郭宏,涂其军,等.吐哈盆地南缘彩霞山东石英闪长岩岩株锆石SHRIMP U-Pb测年[J].地质通报,2006,25(8):941-944.
- [29]李继亮.准噶尔弧后残留盆地与天山造山带大地构造关系[J].沉积学报,1989,(增刊):112-120.
- [30]Hsu K J. Relict back-arc basins: principles of recognition and possible new examples from China[A]. In: K L Kleinpell, C Paola eds. New Perspectives in Basin Analysis[C]. Springer-Verlag, New York, 1988.245-263.
- [31]Carroll A R, Liang Y, Graham S A, et al. Junggar basin, northwest China: trapped Late Paleozoic ocean [J]. Tectonophysics, 1990, 186:1-14.
- [32]吴庆福.论准噶尔中间地块的存在及其在哈萨克斯坦板块构造演化中的位置[A].见:中国北方板块构造论文集2[C].北京:地质出版社,1987.29-38.
- [33]李锦轶,肖序常,陈文,等.准噶尔盆地东部的前晚奥陶世陆壳基底[J].中国区域地质,2000,19(3):297-302.
- [34]肖序常,汤耀庆,冯益民,等.新疆北部及邻区大地构造[M].北京:地质出版社,1992.
- [35]张良臣.中国新疆板块构造与动力学特征[A].见:新疆第三届天山地质矿产学术讨论会论文集[C].乌鲁木齐:新疆人民出版社,1995.1-14.
- [36]朱永峰,张立飞,古丽冰,等.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[J].科学通报,2005,50(18):2004-2014.
- [37]朱志新,王克卓,徐达,等.依连哈比尔尕山石炭纪侵入岩锆石SHRIMP U-Pb测年及其地质意义[J].地质通报,2006,25(8):986-991.
- [38]王强,赵振华,白正华,等.新疆阿拉套山石炭纪埃达克岩、富Nb岛弧玄武岩:板片熔体与地幔橄榄岩相互作用及地壳增生[J].科学通报,2003,48(12):1342-1349.
- [39]熊小林,赵振华,白正华,等.西天山阿吾拉勒Adakite型钠质中酸性岩及地壳垂向增生[J].科学通报,2001,46(4):281-287.
- [40]Mao J W, Konopelko D, Seltam R, et al. Postcollisional age of the Kumtor gold deposit and timing of Hercynian events in the Tien Shan, Kyrgyzstan[J]. Economic Geology, 2004, 99: 1771-1780.
- [41]杨海波,高鹏,李兵,等.新疆西天山达鲁巴依蛇绿岩地质特征[J].新疆地质,2005,23(2):123-126.
- [42]朱志新,王克卓,郑玉洁,等.新疆伊犁地块南缘志留纪和泥盆纪花岗岩侵入体锆石SHRIMP定年及其形成时构造背景的初步探讨[J].岩石学报,2006,22(5):1193-1200.
- [43]何国琦,李茂松.中亚蛇绿岩带研究进展及区域构造连接[J].新疆地质,2000,18(3):193-202.
- [44]Brookfield M E. Geological development and Phanerozoic crustal accretion in the western segment of the southern Tien Shan (Kyrgyzstan, Uzbekistan and Tajikistan) [J]. Tectonophysics, 2000, 328:1-14.
- [45]张晓梅,王德贵,李刚.东天山库姆塔格沙垄东二长花岗岩锆石SHRIMP U-Pb测年[J].地质通报,2006,25(8):957-959.
- [46]李少贞,任燕,冯新昌,等.吐哈盆地南缘克孜尔塔格复式岩体中花岗岩闪长岩锆石SHRIMP U-Pb测年及岩体侵入时代讨论 [J].地质通报,2006,25(8):937-940.
- [47]杨富全,王立本,叶锦华,等.新疆霍什布拉克地区花岗岩锆石U-Pb年龄[J].中国区域地质,2001,20(3):267-273.
- [48]李华芹,谢才富,常海亮,等.新疆北部有色贵金属矿床成矿作用年代学[M].北京:地质出版社,1998.1-264.
- [49]李华芹,陈富文,路远发,等.东天山三岔口铜矿区矿化岩体SHRIMP U-Pb年代学及锆同位素地球化学特征研究[J].地球学报,2004, 25(2):191-195.
- [50]李华芹,陈富文,蔡红,等.新疆东部马庄山金矿成矿作用同位素年代学研究[J].地质科学,1999,34(2):251-256.
- [51]王龙生,李华芹,刘德权,等.新疆哈密维权银(铜)矿床地质特征和成矿时代[J].矿床地质,2005,24(3):280-284.
- [52]刘志强,韩宝福,季建清,等.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[J].岩石学报, 2005,21(3):623-639.
- [53]姜常义,穆艳梅,白开寅,等.南天山花岗岩类的年代学、岩石学、地球化学及其构造环境[J].岩石学报,1999,15(2):298-308.
- [54]校培喜,黄玉华,王育习,等.新疆库鲁克塔格地块东南缘钾长花岗岩的地球化学特征及同位素测年[J].地质通报,2006,25(6): 725-729.
- [55]肖序常,格雷厄姆 S A,卡罗尔 A R,等.中国西部元古代蓝片岩带——世界最老的前寒武纪蓝片岩[J].新疆地质,1990,8(1):12-21.
- [56]Nakajima T, Maruyama S, Uchiumi S, et al. The age of the oldest blueschist of the world—the Aksu Group of Western China[J]. Nature, 1991, 346:263-265.
- [57]Liou J G, Graham S A, Maruyama S, et al. Characteristics and tectonic significance of the Late Proterozoic Aksu blueschists and diabasic dikes, Northwest Xinjiang, China[J]. International Geological Review, 1996, 38:228-244.
- [58]熊盛青,周伏洪,姚正熙,等.青藏高原中西部航磁概查[M].北京:地质出版社,2002.1-221.

- [59]李永安,孙东江,郑洁.新疆及周边古地磁研究与构造演化[J].新疆地质,1999,17(3):97-139.
- [60]杨振宇,马醒华,孙知明,等.华北地块显生宙古地磁视极移曲线与地块运动[J].中国科学(D辑),1998,28(S1):44-56.
- [61]左国朝,何国琦.北山板块构造及成矿规律[M].北京:北京大学出版社,1990.1-226.
- [62]马瑞士,叶尚夫,王赐银,等.东天山造山带构造格架和演化[J].新疆地质科学,1990,(2):21-36.
- [63]黄汲清,姜春发,王作勋.新疆及邻区板块开合构造及手风琴式运动[J].新疆地质科学,1990,(1):3-16.
- [64]王德贵,李丽群,李刚.东天山大盐池东花岗岩闪长岩锆石SHRIMP U-Pb测年[J].地质通报,2006,25(8):960-962.
- [65]孙桂华,李锦轶,王德贵,等.东天山阿其克库都克断裂南侧花岗岩和花岗岩闪长岩锆石SHRIMP U-Pb测年及其地质意义[J].地质通报,2006,25(8):945-952.
- [66]李锦轶,肖序常,汤耀庆,等.新疆东准噶尔卡拉麦里地区晚古生代板块构造的基本特征[J].地质论评,1990,36(4):305-316.
- [67]李锦轶.新疆东准噶尔蛇绿岩的基本特征和侵位历史[J].岩石学报,1995,11(增刊):73-84.
- [68]胡霁琴.新疆塔里木北缘首次发现33亿年的岩石[J].科学通报,1992,37(7):624-630.
- [69]高振家,陈晋镛,陆松年,等.新疆北部前寒武系[A].见:地质矿产部《前寒武纪地质》编辑委员会编.前寒武纪地质[C].北京:地质出版社,1993.1-83.
- [70]冯本智,周裕文,迟仕福,等.新疆库鲁克塔格地区前震旦纪地质与贵重/有色金属矿床[M].北京:地质出版社,1995.107-214.
- [71]胡霁琴,王中刚,涂光炽,等.新疆北部地质演化及其成岩成矿规律[M].北京:科学出版社,1997.9-105.
- [72]郭召杰,张志诚,刘树文,等.塔里木克拉通早前寒武纪基底层序与组合:颗粒锆石U-Pb年龄新证据[J].岩石学报,2003,19(3):537-542.
- [73]胡霁琴,韦刚健.塔里木盆地北缘新太古代辛格尔灰色片麻岩形成时代问题[J].地质学报,2006,80(1):126-134.
- [74]韩宝福,何国琦,吴泰然,等.天山早古生代花岗岩锆石U-Pb定年.岩石地球化学特征及其大地构造意义[J].新疆地质,2004,22(1):4-11.
- [75]陈义兵,胡霁琴,张国新,等.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[J].岩石学报,2000,16(1):91-98.
- [76]陈义兵,胡霁琴,张国新,等.西天山独库公路花岗岩片麻岩锆石U-Pb年龄及其地质意义[J].科学通报,1999,44(21):2328-2332.
- [77]张遵忠,顾连兴,杨浩,等.东天山平顶山巨眼球状片麻状花岗岩特征及成因[J].岩石学报,2005,21(6):889-908.
- [78]张遵忠,顾连兴,杨浩,等.中天山东段澄江期片麻状花岗岩特征和成因-以天湖东岩体为例[J].岩石学报,2004,20(3):595-608.
- [79]刘树文,郭召杰,张志斌,等.中天山东段前寒武纪变质地块的性质:地质年代学和铀同位素地球化学的约束[J].中国科学(D辑),2004,34(5):395-403.
- [80]修群业,于海峰,李铨.卡瓦布拉克岩群花岗岩闪长岩单颗粒锆石U-Pb年龄[J].新疆地质,2002,20(4):335-337.
- [81]新疆维吾尔自治区地质矿产局.新疆维吾尔自治区岩石地层[M].武汉:中国地质大学出版社,1999.1-430.
- [82]李曰俊,贾承造,胡世玲,等.塔里木盆地瓦基里塔格辉长岩⁴⁰Ar-³⁹Ar年龄及其意义[J].岩石学报,1999,15(4):594-599.
- [83]李曰俊,孙龙德,胡世玲,等.塔里木盆地塔参1井底部花岗岩闪长岩的⁴⁰Ar-³⁹Ar年代学研究[J].岩石学报,2003,19(3):530-536.
- [84]李春昱,王荃,刘雪亚,等.亚洲大地构造图(1:8,000,000)及说明书[M].北京:地图出版社,1982.
- [85]汤耀庆,高俊,赵民,等.西南天山蛇绿岩和蓝片岩[M].北京:地质出版社,1995.1-133.
- [86]Jinyi Li. Petrological evidence of continental disintegration in the late Neoproterozoic: Sinian volcanic rocks in central China mainland[J]. Gondwana Research, 2001, 4(4):682-683.
- [87]李锦轶,何国琦,徐新,等.新疆北部及邻区地壳构造格架及其形成过程的初步探讨[J].地质学报,2006,80(1):148-168.
- [88]夏林圻,张国伟,夏祖春,等.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[J].地质通报,2002,21(2):56-62.
- [89]Xu B, Jian P, Zheng H F, et al. U-Pb zircon geochronology and geochemistry of Neoproterozoic volcanic rocks in the Tarim Block of northwest China: implications for the breakup of Rodinia supercontinent and Neoproterozoic glaciations[J]. Precambrian Research, 2005,136:107-123.
- [90]龙灵利,高俊,熊贤明,等.南天山库勒湖蛇绿岩地球化学特征及其年龄[J].岩石学报,2006,22(1):65-73.
- [91]王润三,王焰,李惠民,等.南天山榆树沟高压麻粒岩地体锆石U-Pb定年及其地质意义[J].地球化学,1998,27(6):517-522.
- [92]周鼎武,苏犁,简平,等.南天山榆树沟蛇绿岩地体中高压麻粒岩SHRIMP锆石U-Pb年龄及构造意义[J].科学通报,2004,49(14):1411-1415.
- [93]龚福华,李曰俊,王清华,等.南天山西段古生代火山岩Ar-Ar年龄新资料[J].高校地质学报,2003,9(3):494-498.
- [94]王德贵,张晓梅,伏红霞.东天山小盐池北二长闪长岩锆石SHRIMP U-Pb测年[J].地质通报,2006,25(8):966-968.
- [95]杨天南,李锦轶,孙桂华,等.中天山早泥盆世陆弧:来自花岗岩糜棱岩地球化学及SHRIMP U/Pb定年的证据[J].岩石学报,2006,22(1):41-48.
- [96]朱永峰,朱彪.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[J].岩石学报,2006,22(1):135-144.
- [97]Avdeyev A V. Ophiolite zones and the geologic history of Kazakhstan from the mobilist standpoint[J]. International Geological Review, 1984, 26(9):995-1005.
- [98]李伍平,王涛,李金宝,等.东天山红柳河地区晚加里东期花岗岩类岩石锆石U-Pb年龄及其地质意义[J].地球学报,2001,22(3):231-235.
- [99]刘羽,王乃文,姚建新.新疆库车地区放射虫新资料及其意义[J].新疆地质,1994,12(4):344-350.
- [100]Allen M B, Windley B F, Zhang C. Paleozoic collisional tectonic and magmatism of the Chinese Tien Shan, central Asia

- []]. Tectonophysics, 1992, 220: 89-115.
- [101]王京彬,徐新.新疆北部后碰撞构造演化与成矿[J].地质学报, 2006, 80(1):23-31.
- [102]张立飞,艾永亮,李强,等.新疆西南天山超高压变质带的形成与演化[J].岩石学报, 2005, 21(4):1029-1038.
- [103]李曰俊,孙龙德,吴浩若,等.南天山西端乌帕塔尔坎群发现石炭—二叠纪放射虫化石[J].地质科学, 2005, 40(2):220-226.
- [104]Xia Linqi, Li Xiangmin, Xu Xueyi, et al. Petrogenetic evolution of the Bayan Gol ophiolite—geological record of an early Carboniferous “red sea type” ocean basin in the Tianshan mountains, northwestern China[J]. Acta Geologica Sinica, 2005, 79(2):174-192.
- [105]徐学义,马中平,夏林圻,等.北天山巴音沟蛇绿岩形成时代的精确厘定及意义[J].地球科学与环境学报, 2005, 27(2):17-20.
- [106]徐学义,夏林圻,马中平,等.北天山巴音沟蛇绿岩斜长花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及蛇绿岩成因研究[J].岩石学报, 2006, 22(1):83-94.
- [107]中国科学院登山科学考察队.天山托木尔峰地区的地质与古生物[M].乌鲁木齐:新疆人民出版社, 1985.
- [108]王作勋,邹继易,吕喜朝,等.天山多旋回构造演化及成矿[M].北京:科学出版社, 1990.
- [109]高俊,肖序常,汤耀庆,等.南天山蓝片岩的变质作用 $p-T$ 轨迹及构造演化[J].地质论评, 1994, 40(6):544-553.
- [110]Klemd R, Brocker M, Hacker B R, et al. New age constraints on the metamorphic evolution of the high-pressure/low-temperature belt in the Western Tianshan Mountains, NW China[J]. The Journal of Geology, 2005, 113:157-168.
- [111]林克湘,阎春德,龚文平.新疆三塘湖盆地早二叠世火山岩地球化学特征与构造环境分析[J].矿物岩石地球化学通报, 1997, 16(1):39-42.
- [112]木合塔尔·扎日.新疆沙尔布尔山早二叠世卡拉岗组火山岩岩石化学及其构造环境分析[J].新疆工学院学报, 1997, 18(2):85-89.
- [113]邢秀娟,周鼎武,柳益群,等.吐哈盆地及周缘早二叠世火山岩地球化学特征及大地构造环境探讨[J].新疆地质, 2004, 22(1):50-55.
- [114]徐学义,何世平,马中平,等.新疆柯坪库木如吾祖克地区二叠纪火山岩[J].西北地质, 2002, 35(3):35-41.
- [115]杨树锋,陈汉林,董传万,等.塔里木盆地二叠纪正长岩的发现及构造意义[J].地球化学, 1996, 25(2):121-128.
- [116]吴华,李华芹,莫新华,等.新疆哈密白石泉铜镍矿区基性—超基性岩的形成时代及其地质意义[J].地质学报, 2005, 79(4):498-502.
- [117]毛启贵,肖文交,韩春明,等.新疆东天山白石泉铜镍矿床基性—超基性岩体锆石 U-Pb 同位素年龄、地球化学特征及其对古亚洲洋闭合时限的制约[J].岩石学报, 2006, 22(1):153-162.
- [118]王志良,毛景文,杨建民,等.新疆巴音布鲁克乔霍特铜矿区斜长花岗岩中钾长石的 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年龄及其地质意义[J].岩石矿物学杂志, 2004, 23(1):12-18.
- [119]张作衡,柴凤梅,杜安道,等.新疆喀拉通克铜镍硫化物矿床 Re-Os 同位素测年及成矿物质来源示踪[J].岩石矿物学杂志, 2005, 24(4):285-293.
- [120]Zhang Zhicheng, Guo Zhaojie, Liu Shuwen. Age and tectonic significance of the mafic dyke swarm in the Kuruketag region, Xinjiang[J]. Acta Geologica Sinica, 1998, 72(1):29-36.
- [121]舒良树,夏飞雅克,马瑞士.中天山北缘大型右旋走滑韧性剪切带研究[J].新疆地质, 1998, 16(4):326-336.
- [122]杨兴科,姬金生,陈强,等.东天山区域韧性剪切带特征[J].新疆地质, 1999, 17(1):55-64.
- [123]王瑜,李锦轶,李文铅.东天山造山带右行剪切变形及构造演化的 Ar-Ar 年代学证据[J].新疆地质, 2002, 20(4):315-319.
- [124]Laurent-Charvet S, Charvet J, Liangshu Shu, et al. Paleozoic late collisional strike-slip deformations in Tianshan and Altay, Eastern Xinjiang, NW China[J]. Terra Nova, 2002, 14:249-256.
- [125]陈文,孙枢,张彦,等.新疆东天山秋格明塔什—黄山韧性剪切带 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学研究[J].地质学报, 2005, 79(6):790-804.
- [126]李向东,王庆明,王克卓.天山后碰撞阶段构造演化的新信息——来自阿吾拉勒山中段动力变质岩的证据[J].地质论评, 1998, 44(4):443-448.
- [127]孙桂华,李锦轶,杨天南,等.天山造山带二叠纪后碰撞南北向挤压变形:以哈尔里克山北坡口门子逆冲型韧性剪切带为例[J].岩石学报, 2006, 22(5):1359-1368.
- [128]Liegeois G-P. Preface—Some words on the post-collisional magmatism[J]. Lithos, 1998, 45:xv-xvii.
- [129]Zhang Zunzhong, Gu Lianxing, Wu Changzhi, et al. Zircon SHRIMP dating for the Weiya pluton, eastern Tianshan: its geological implication[J]. Acta Geologica Sinica, 2005, 79(4):481-490.
- [130]李锦轶,肖序常,陈文,等.新疆北部晚石炭世至晚三叠世地壳热演化——东准噶尔考克塞山荒草坡群的 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 定年[J].地质学报, 2000, 74(4):303-312.
- [131]洪大卫,王式洸,黄怀曾.中国北部边疆晚古生代—三叠纪碱性花岗岩带及其地球动力学意义[A].见:李之彤主编.中国北方花岗岩及其成矿作用论文集[C].北京:地质出版社, 1991.40-48.
- [132]牟堡垒,阎国翰.燕辽三叠纪碱性偏碱性杂岩体地球化学特征及意义[J].地质学报, 1992, 66(2):108-121.
- [133]阎国翰,牟保磊,许保良,等.燕辽—阴山三叠纪碱性侵入岩年代学和 Sr, Nd, Pb 同位素特征及意义[J].中国科学(D 辑), 2000, 30(4):383-387.
- [134]李华芹,陈富文,李锦轶,等.再论东天山白山镍铜矿区成岩成矿时代[J].地质通报, 2006, 25(8):916-922.