

阿尔金山东段地质热年代学与构造演化

陈宣华^{1,2}, 尹安³, George E. Gehrels⁴, 蒋荣宝^{1,2}, 陈正乐^{1,2}, 白彦飞⁵

1. 国土资源部 新构造运动与地质灾害重点实验室, 北京 100081

2. 中国地质科学院 地质力学研究所, 北京 100081

3. Department of Earth and Space Sciences, University of California, Los Angeles, CA 90095-1567, USA

4. Department of Geosciences, University of Arizona, Tucson, AZ 85721, USA

5. 水利部 山西水利水工勘测设计研究院, 山西 太原 030024

Chen Xuanhua^{1,2}, An Yin³, George E. Gehrels⁴, Jiang Rongbao^{1,2}, Chen Zhengle^{1,2}, Bai Yanfei⁵

1. Key Laboratory of Neotectonic Movement and Geohazard, Ministry of Land and Resources, Beijing 100081, China

2. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China

3. Department of Earth and Space Sciences, University of California, Los Angeles, CA 90095-1567, USA

4. Department of Geosciences, University of Arizona, Tucson, AZ 85721, USA

5. Shanxi Hydroelectric Investigation & Design Institute, Ministry of Water Resources, Taiyuan 030024, China

Chen Xuanhua, Yin A, Gehrels G E, et al. Geothermochronology and tectonic evolution of Eastern Altyn Tagh Mountains, Northwestern China. Earth Science Frontiers, 2009, 16(3) :207-219

Abstract: This paper gives the integrated analyses of geothermochronology and tectonic system evolution of eastern Altyn Tagh Mountains, northern Qinghai-Tibet Plateau. The eastern Altyn Tagh is considered to have developed from Archean continental core, through Proterozoic stable platform and continental rifting in the Neo-Proterozoic, to "Altyn Ocean" and trench-arc-basin system in the Early Paleozoic plate subduction, collisional orogeny and arc magmatism (with a peak activity at 443 Ma) occurred through the Ordovician and the Early Silurian. After the closing of "Altyn Ocean" in the Carboniferous, the eastern Altyn Tagh entered into the stage of continental tectonic development, and had undergone two major tectonic events since then, which are Mesozoic extension appeared as Lapeiquan detachment faulting and Cenozoic strike-slip faulting on Altyn Tagh Fault. The regional thermal cooling history of the eastern Altyn Tagh was controlled by these tectonic events and the tectonic events developed there were recorded by the thermal cooling history. Various massifs developed in different time had experienced different cooling histories which are well depicted by the geothermochronologic data. Therefore, geothermochronology is a helpful method for understanding the regional tectonic evolution of eastern Altyn Tagh area.

Key words: Altyn Tagh; tectonic system; geothermochronology; cooling history; tectonic evolution

摘要:文中综合分析了青藏高原北缘阿尔金山东段地质热年代学和构造体系演化。阿尔金山东段从太古宙陆核发育而来,经历了元古宙稳定地台和新元古代大陆裂解阶段,形成了早古生代阿尔金洋和沟-弧-盆构造体系,发育了奥陶纪早期的板块俯冲、碰撞造山作用和奥陶纪—志留纪之交的岛弧岩浆活动(峰期年龄为 443

收稿日期:2009-03-11;修回日期:2009-05-12

基金项目:中国地质科学院地质力学研究所基本科研业务费项目(DZLXJ K200703);国家自然科学基金项目(40342015)

作者简介:陈宣华(1967—),男,博士,研究员,主要从事构造地质学(地质力学)和矿产资源科学研究工作。E-mail: xhchen@cags.net.cn

Ma)。石炭纪洋盆闭合之后,该地区进入陆内构造发育阶段。其中,占主导地位的是以拉配泉断裂为代表的中生代伸展构造和新生代阿尔金断裂系的左行走滑断裂活动,它们分别控制了中生代两期热冷却事件和新生代地块快速抬升-冷却事件。地质热年代学年龄数据为阿尔金山东段不同时期形成的不同地块勾画了不同的热冷却历史,由此可区分不同时期不同构造事件对区域热冷却历史的影响。

关键词:阿尔金山;构造体系;地质热年代学;热冷却历史;构造演化

中图分类号:P542;P597 文献标志码:A 文章编号:1005-2321(2009)03-0207-13

阿尔金山地处青藏高原的北缘,是解决青藏高原形成演化和中国西北大陆动力学问题的关键地区。其中的阿尔金断裂带是一个经历过多期复杂地质演化历史,由不同层次、不同时期和形成于不同构造环境地质体所组成的造山带,并与相邻造山带有密不可分的关系^[1]。近几年来,阿尔金山地区已经成为国际地学研究的热点之一,并积累了一批丰富的地质热年代学年龄数据(图1)。本文综合分析了该地区主要构造体系特征,并结合地质热年代学数据的综合分析,探讨了该地区地质热演化(包括岩浆活动与区域地块冷却)的阶段性历史与主要构造演化阶段的特征。

1 阿尔金山地质概况与主要构造体系特征

1.1 地质概况

阿尔金山脉把青藏高原与塔里木盆地分割开来,在晚新生代区域构造格架中,整个阿尔金地块处于活动的左行走滑阿尔金断裂北边^[2]。阿尔金山东北缘由太古宇麻粒岩和元古宇片麻岩组成。元古宇含叠层石沉积序列,主要为厚层石英岩和硅质灰岩,出现在研究区中部和西部。早古生代火山岩夹海相沉积岩只出现在阿尔金山脉的东部,而阿尔金山西段主要由大理岩、片岩和长英质片麻岩组成的变沉积岩类。阿尔金西段片麻岩变质程度局部达到麻粒岩相^[3]。本区晚古生代地层比较少。出露的泥盆纪地层为典型的硅质碎屑沉积,石炭系为浅海沉积。侏罗系含煤陆相沉积在本区零星分布^[4]。阿尔金山存在两条蛇绿混杂岩带和两条高压变质岩带^[5-11]。

阿尔金山东段新生代变形主要表现为几条东西走向的第三纪逆冲断裂,构成晚始新世—早渐新世盆地的边界,并被阿尔金断裂所切割^[4, 12-13](图1)。阿尔金断裂是渐新世以来活动的断裂^[14]。阿尔金山西段的北部边界为江孜勒萨依断裂(ENE走向,左行走滑),它与东段东西走向的第三纪逆冲断裂系

可能具有运动学联系^[12, 15]。

1.2 主要构造体系的划分与特征

构造体系是由许多不同形态、不同性质、不同等级和不同序次但具有成生联系的各项结构要素所组成的构造带以及它们之间所夹地块或地块组合而成的总体。这个总体,是一定方式的区域性构造运动(即地壳的一个组成部分的运动)的结果^[16]。

1.2.1 早古生代沟-弧-盆构造体系

根据阿尔金山地区现存的岩相组合特征和有关花岗岩类、火山岩类和沉积岩(硅质岩)的研究结果,可以认为在早古生代及其以前,曾存在过一个可以称之为“阿尔金洋”的洋盆。阿尔金洋的特征是远洋硅质岩沉积,部分是喷发玄武岩(具有洋脊和洋岛玄武岩特征)以及蛇绿岩堆积。在阿尔金洋的北边,是塔里木地块的活动大陆边缘,以钙碱性花岗岩类(岛弧花岗岩类和深熔花岗岩类)侵入、双峰式火山喷发活动和陆缘浊积岩沉积为特征。塔里木地块则是由高角闪岩相和麻粒岩相变质岩系为其结晶基底的古老地块。早古生代时期阿尔金山地区构成了大陆边缘和沟-弧-盆构造体系。根据时代关系,“阿尔金洋”可能是“原特提斯”^[17]的一部分。

阿尔金北缘发育红柳沟—拉配泉蛇绿混杂岩带和高压低温变质带,主要由一套复理石沉积及其赋存于其中的大量的基性-超基性岩岩体、基性-酸性双峰式火山岩组合(包括枕状熔岩、细碧岩等)、硅质岩、凝灰岩、凝灰质粉砂岩夹薄层灰岩和一些深变质岩片组成。阿尔金北缘地区蛇绿混杂岩中的枕状熔岩和高压变质岩可能是被消减掉的古生代洋壳的残片,洋盆关闭的时间在早志留世之后和中泥盆世之前,并称之为拉配泉缝合线(中古生代)^[19]。阿尔金北缘蛇绿混杂岩带玄武岩 Sm-Nd 等时线年龄为(508.3 ±41) ~ (524.4 ±44) Ma^[7],玄武岩锆石 U-Pb 年龄为(448.6 ±3.3) Ma^[18],红柳沟斜长角闪岩锆石 U-Pb 年龄为(506 ±11) Ma^[19],红柳沟和卡拉塔格变质砂岩(复理石沉积)分别获得主期年龄为482 Ma 和 487 Ma 的碎屑锆石年龄谱系^[20],因而确

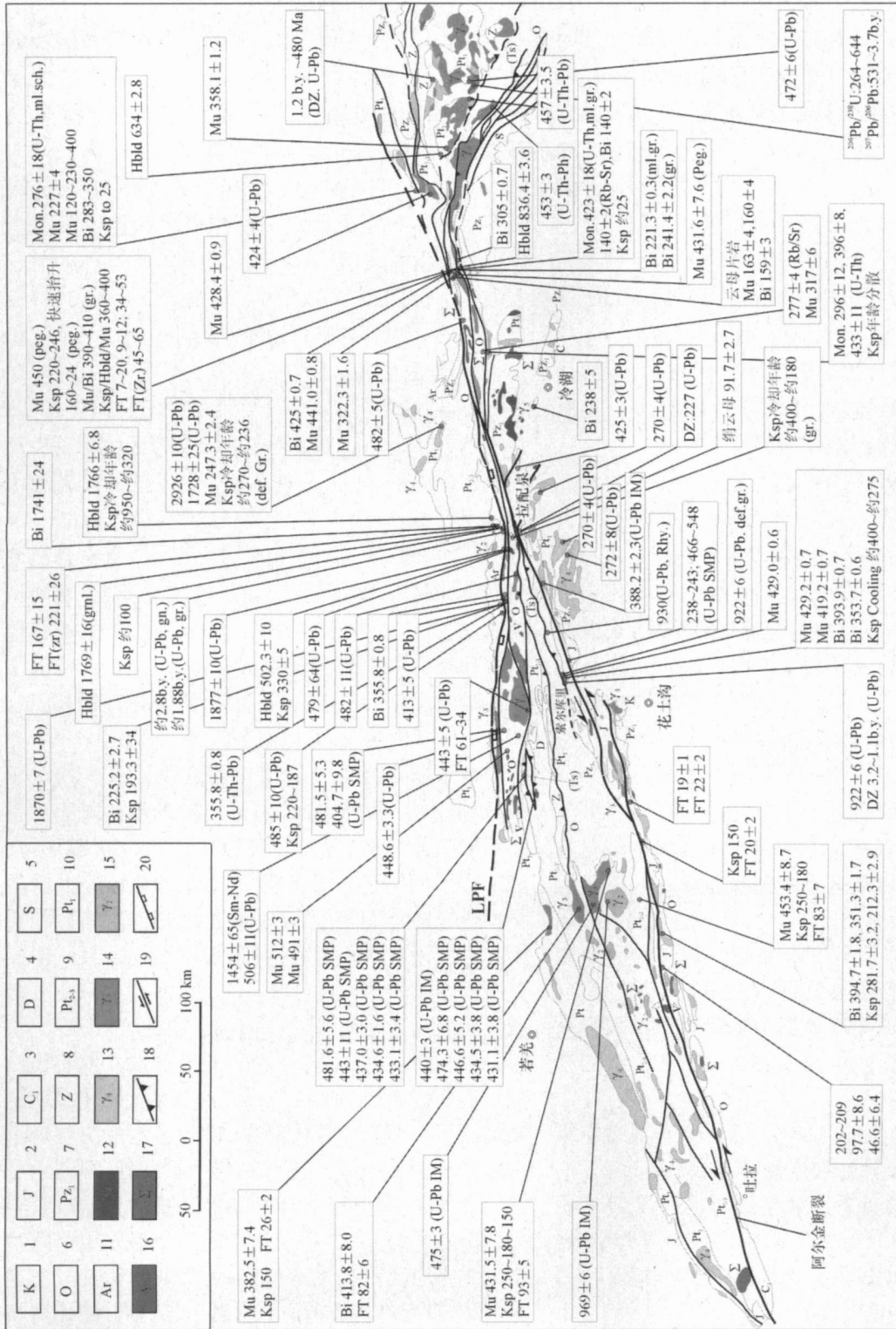


图1 阿尔金山及邻区地质简图和地质热年代学数据分布 (据文献[23]修改。年龄数据资料来源于文献[9-10, 18-19, 24-43]以及本研究年龄数据)

1—白垩系; 2—侏罗系; 3—下石炭统; 4—泥盆系; 5—志留系; 6—奥陶系; 7—下古生界; 8—震旦系; 9—中—新元古界; 10—古元古界; 11—太古宇; 12—燕山和印支期中酸性侵入岩; 13—海西期中酸性侵入岩; 14—加里东期中酸性侵入岩; 15—元古宙中酸性侵入岩; 16—基性岩; 17—超基性岩; 18—逆冲断层; 19—走滑断层; 20—正断层。Ts, 第三系红层; LPP, 拉萨裂陷带; 裂陷带; Hbl—角闪石; Mon—独居石; Mu—白云母; Bi—黑云母; Ksp—碱性长石; DZ—碎屑锆石。年龄测试方法: FT—裂变径迹法; U-Pb 和 U-Th-(Pb)法, 除 Mon 外均为锆石, 其中 IM 和 SMP 为离子探针, 其余为稀释法; Sm-Nd 法; Rb-Sr 法; 其他未标明者均为 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法。年龄单位: 除标明 b. y. (10 亿年) 外, 均为 Ma

定该套火山-沉积岩系地层属于早古生界。尽管阿克塞半鄂博图沟蛇绿岩套 Sm-Nd 等时线年龄为 (949 ± 62) Ma 和 (829 ± 60) Ma^[51], 巴什考供北斜长角闪岩全岩 Sm-Nd 等时线年龄为 $(1\ 185 \pm 130)$ Ma、角闪石⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄为 (612 ± 5.8) Ma^[21]。红柳沟—拉配泉蛇绿混杂岩带基质绢云母石英片岩中绢云母⁴⁰Ar/³⁹Ar 坪年龄为 (455 ± 2) Ma^[22]。阿尔金北缘高压低温变质带主要由变泥质岩、蓝片岩和榴辉岩等组成。高压变泥质岩的变质上限年龄约为 570 Ma, 又遭受了约 527 Ma 或 479 Ma 退变质作用的改造^[7]。榴辉岩中多硅白云母⁴⁰Ar/³⁹Ar 坪年龄为 (512 ± 3) Ma, 蓝片岩中钠云母⁴⁰Ar/³⁹Ar 坪年龄为 (491 ± 3) Ma^[10]。晚奥陶世碎屑岩、碳酸盐岩组合中出现的双峰式火山岩是阿尔金地块碰撞后伸展阶段拉张裂谷的火山作用的产物。

阿尔金南缘发育阿帕—茫崖蛇绿混杂岩带和江孜勒萨依南—米兰河上游榴辉岩带。蛇绿混杂岩带主要由复理石及碳酸盐岩地层及其呈透镜状赋存于其中的基性-超基性岩岩体、基性-酸性双峰式火山岩组合(包括枕状熔岩)和少量硅质岩组成,玄武岩 Sm-Nd 等时线年龄为 (481.3 ± 53) Ma^[8]。超高压榴辉岩的变质年龄为 (500 ± 10) Ma(榴辉岩 Sm-Nd 等时线)或 (503.9 ± 5.3) Ma(锆石 U-Pb)^[11], 或 (493 ± 4.3) Ma(LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄)^[6]。

1.2.2 中生代伸展构造体系

过去认为,在青藏高原地区显生宙构造演化过程中,占统治地位的是微大陆和弧地体在亚洲南缘连续增生导致的收缩变形^[44-45]。亚洲南缘的这些碰撞事件被认为影响了塔里木和天山地区的盆地发育,并产生了许多大的与俯冲有关的陆内盆地^[46-47]。但是,青藏高原腹地羌塘地块中生代含蓝片岩拆离断层系的发现,突出了中亚地质格架重建中伸展构造的重要性^[48]。

在青藏高原北缘的阿尔金山脉东段也发现有较大规模南倾的中生代伸展断裂体系;根据 U-Pb 锆石和钾长石⁴⁰Ar/³⁹Ar 热年代学数据,结合野外地质观测,可以认为,青藏高原北缘中生代存在两期伸展构造事件,其中一期发生在晚三叠世至早侏罗世,另一期发生在早白垩世^[24-25, 50]。

青藏高原中部和北部出现的早侏罗世伸展作用可能主要受特提斯洋的俯冲作用的控制,对印亚碰撞过程中新生代地壳缩短和岩浆作用的定位可能起着关键作用。同时,青藏高原中北部的中生代伸展

构造环境也制约了中国西北柴达木盆地等中生代大型盆地的侏罗纪原型盆地的形成。

1.2.3 阿尔金断裂系

李海兵等^[51]认为,(古)阿尔金断裂带可能形成于三叠纪,后又经历了侏罗纪、白垩纪的强烈左旋走滑活动,自印度板块与欧亚大陆碰撞后阿尔金断裂再次活动,其主要的走滑活动发生在(1)245~220 Ma;(2)180~140 Ma;(3)120~100 Ma;(4)90~80 Ma;(5)60~45 Ma;(6)渐新世至中新世;(7)上新世至更新世以及(8)全新世。刘永江等^[60](2007)认为阿尔金走滑断裂带起始活动的时间为 164.3~178.4 Ma,尔后分别在 100~85 Ma、40~25 Ma 和 10~8 Ma 发生多次脉冲式走滑活动。

不过,通常所谓的阿尔金走滑断裂构造体系(简称阿尔金断裂系),是指阿尔金山及邻区的新生代及现今构造体系,其形成主要与中生代末期以来的印度-亚洲大陆碰撞有关,是康藏歹字型构造的一部分。阿尔金断裂系由南山逆冲断裂带、西昆仑逆冲断裂带、阿尔金断裂(主干)的左行走滑部分、北阿尔金断裂、左行走滑的喀喇喀什断裂和沿塔里木盆地南缘和柴达木盆地西部的压缩和走滑构造组成,主要走滑断裂有阿尔金断裂、且末河(车尔臣河)断裂、若羌—米兰断裂、三危山断裂等。

阿尔金断裂可以分为东西两段。东段具扭压(即转换挤压)性质,标志为包括新近系在内的一系列褶皱和冲断层(图 2),它们与阿尔金断裂平行。Yin 等^[52]的分析结果说明,46 Ma 前西昆仑逆冲带开始地壳增厚,大约 49 Ma 时形成祁漫塔格和柴达木北缘逆冲系,约 33 Ma 前形成南山逆冲系。印亚碰撞的变形前锋到达青藏高原北缘的时间只比其碰撞开始的时间晚约 (10 ± 5) Ma。由此, Yin 等^[52]认为,阿尔金断裂自 49 Ma 左右开始活动。他们提出阿尔金断裂活动的推拉门模式。新生代阿尔金断裂系构成了一个狭长的构造带,将柴达木地块与塔里木地块陆-陆碰撞的应变作用集中在此处,并制约着它们之间的位移场。因此,阿尔金断裂在这时表现为一个斜向的板块边界,其特征的变形作用是阿尔金山北缘地区普遍发育的逆冲-褶皱系和走滑盆地的形成,具有斜向碰撞的一般特征:应变分解作用表现为走滑方向上的简单剪切和垂直走滑方向上的挤压。阿尔金断裂成为新生代青藏高原的北界,控制了新生代柴达木盆地的形成与演化^[53],并通过走滑相关的逆冲断层作用,在柴西地区形成花土沟逆冲

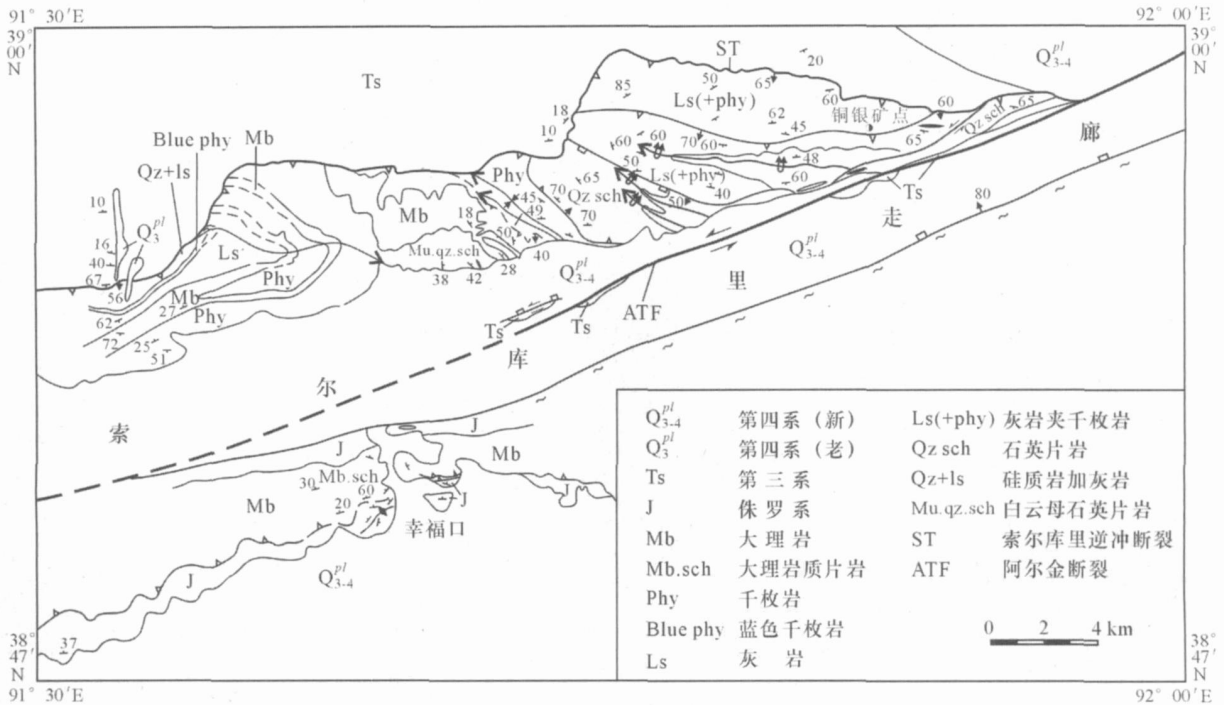


图2 阿尔金断裂索尔库里走廊段构造地质图

Fig. 2 Structural geological map of Altyn Tagh Fault at Xorkol Corridor

断层和狮子沟断展背斜等一系列构造变形^[54]。

2 区域岩浆活动的历史

由于锆石(和独居石) U-Pb 体系具有最高的矿物封闭温度,它们的矿物结晶年龄与深成岩浆侵入的时间相当,因此,可以根据锆石 U-Pb 年龄来划分岩浆活动的期次(图3)。

本区岩浆活动最早出现在古太古代。据文献[55]报道,阿尔金山东段拉配泉北花岗片麻岩中测得14粒锆石 U-Pb 表面年龄(单颗粒稀释法)处在1 503~3 560 Ma,其中4粒锆石上交点年龄值为(3 605 ±43) Ma,下交点年龄(1 958 ±180) Ma,说明塔里木地块可能存在古太古代基底和岩浆活动。

新元古代早期 922 Ma 的花岗片麻岩侵入于变质的元古代大陆架沉积序列之中,后者构造超覆于阿尔金北缘古生代沉积岩-岩浆岩系之上^[28]。

早古生代(490~385 Ma)是阿尔金北缘地区岩浆活动的活跃期(图3)。锆石 U-Pb 地质年代学分析结果^[28, 31, 49]说明,拉配泉西边侵入岩的年龄范围为485~410 Ma,越往北越变得年轻。其中,面积最大的花岗岩岩基为阔什布拉克岩体(或称为冰沟岩体),具有(443 ±5) Ma 锆石 U-Pb 年龄,给出了阿尔

金北缘主岩浆活动的峰期年龄^[31]。阔什布拉克岩体以及同时的早古生代深成花岗岩类钙碱性岩浆活动具有活动陆源的岛弧性质,说明阿尔金北缘地区在早古生代时期存在岛弧体系^[56]。拉配泉红色钾长花岗岩的年龄大于380 Ma,锆石 U-Pb 法上交点年龄为(479 ±64) Ma(结晶年龄),但它已被更新的热事件改写^[28]。

巴什考供盆地南缘花岗岩杂岩体形成于同碰撞-碰撞后构造环境,主要由巨斑花岗岩、红色花岗岩、灰白色似斑状花岗岩和粉红色似斑状花岗岩等组成,其锆石 SHRIMP U-Pb 年龄分别为(474.3 ±6.8) Ma、(446.6 ±5.2) Ma、(434.5 ±3.8) Ma 和(431.1 ±3.8) Ma^[43]。在巴什考供盆地北缘巴什考供-斯米尔布拉克杂岩体中,石英闪长岩属钙碱性系列,具有 I 型花岗岩属性,年龄为(481.6 ±5.6) Ma(可能形成于洋壳俯冲环境);而可能形成于碰撞后环境的灰白色和粉红色花岗岩属高钾钙碱性系列,具有 S 型花岗岩属性,年龄分别为(437.0 ±3.0)~(433.1 ±3.4) Ma 和(443 ±11)~(434.6 ±1.6) Ma(锆石 SHRIMP U-Pb 年龄)^[42]。强烈片麻岩化的恰什坎萨依花岗闪长岩和喀孜萨依花岗岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄分别为(481.5 ±5.3) Ma^[38]和(404.7 ±9.8) Ma^[39]。金雁山花岗闪长岩体锆石

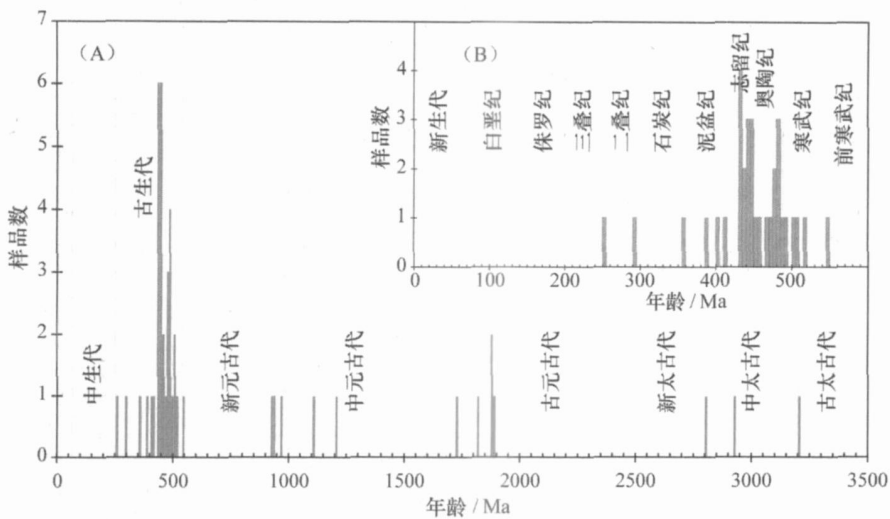


图3 阿尔金山地区岩浆活动的年龄分布直方图

Fig 3 Age histogram of magmatic activities in north Altyn Tagh area
A—太古宙以来的岩浆活动;B—古生代以来的岩浆活动

U-Pb 年龄为 $(467.1 \pm 6) \text{ Ma}^{[22]}$ 。

早古生代花岗岩也出现在中生代伸展构造——阿尔金山北缘拉配泉断裂的北边(断裂下盘),如拉配泉断裂中段大平沟西黑云母花岗岩给出锆石不一致线上交点 U-Pb 年龄为 $(485 \pm 10) \text{ Ma}^{[31]}$,处在奥陶纪 Arenig 世。拉配泉断裂紧下盘其他一些较小的花岗岩岩体中锆石离子探针 U-Pb 测年也得到早古生代年龄^[24]。这些岩体均侵入到作为塔里木结晶基底的高角闪岩相-麻粒岩相变质岩系中,说明早古生代岩浆弧的产出并不像文献[9]所说的只出现在塔里木结晶基底的南边(由此推测了一个南倾俯冲带的存在),而是同时又出现在塔里木结晶基底变质岩系中。因此,该地区早古生代俯冲带的产状可能为北倾。

3 区域地块热冷却历史

3.1 不同矿物的冷却年龄

为了得到有关区域热演化历史的认识,有必要对区域热年代学年龄数据进行综合分析。在热年代学研究中,对于单个样品年龄意义的解释可以有多种可能,而根据矿物封闭温度,由大量冷却年龄的统计分析可以得到较为可靠的区域性地块热演化历史。阿尔金山地区已有的年龄数据(图1)中,角闪石⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄为 1769.7 Ma 以后,除了 1770 Ma 左右的冷却年龄比较普遍外,其他冷却年龄出现

在 836 Ma 左右和 634 ~ 502 Ma;白云母为 453 Ma 以后,在 453 ~ 420 Ma 出现冷却年龄的峰值,在 400 ~ 320 Ma 和 160 Ma 左右也有数据分布;黑云母为 425 Ma 以后,大致分为 425 ~ 350, 250 ~ 220 和 140 ~ 160 Ma 3 个时间段;磷灰石 FT 年龄为 167 Ma 以后,处在 34 ~ 7 Ma 和 7 ~ 9 Ma 的年龄数据比较多。

3.2 区域冷却历史的阶段划分

根据矿物封闭温度的不同^[57-58],不同矿物采用不同方法得到的年龄值处在区域冷却曲线的不同阶段。其中,U-Pb 体系中锆石的封闭温度为 900 以上,独居石约为 700 ;⁴⁰Ar/³⁹Ar 体系中角闪石、白云母和黑云母分别为 (500 ± 25) 、 (380 ± 50) 和 (300 ± 50) ;磷灰石裂变径迹为 90 ~ 120 ;碱性长石可以根据 MDD 模拟给出冷却曲线。因此,将阿尔金山地区(主要为东段)太古宙以来的矿物冷却年龄数据集中在年龄-温度图解中进行综合分析(图 4.5),可以反映阿尔金山东段地区不同时期形成的地块所经历的多阶段阶梯式冷却和剥露-抬升过程。

由于阿尔金山东段具有不同时期形成的地块,因此,可以将阿尔金山东段的区域热冷却历史划分为以下几个域(图 4.5):(1)拉配泉断裂下盘塔里木地块基底(太古宙)的热冷却历史域;(2)古、中元古代冷却历史域;(3)新元古代冷却历史域;(4)古生代冷却历史域;(5)中生代冷却历史域和(6)新生代冷却历史域,它们分别代表了不同时期形成地块的冷却历史。其中最早形成的地块具有最完整的阶梯状

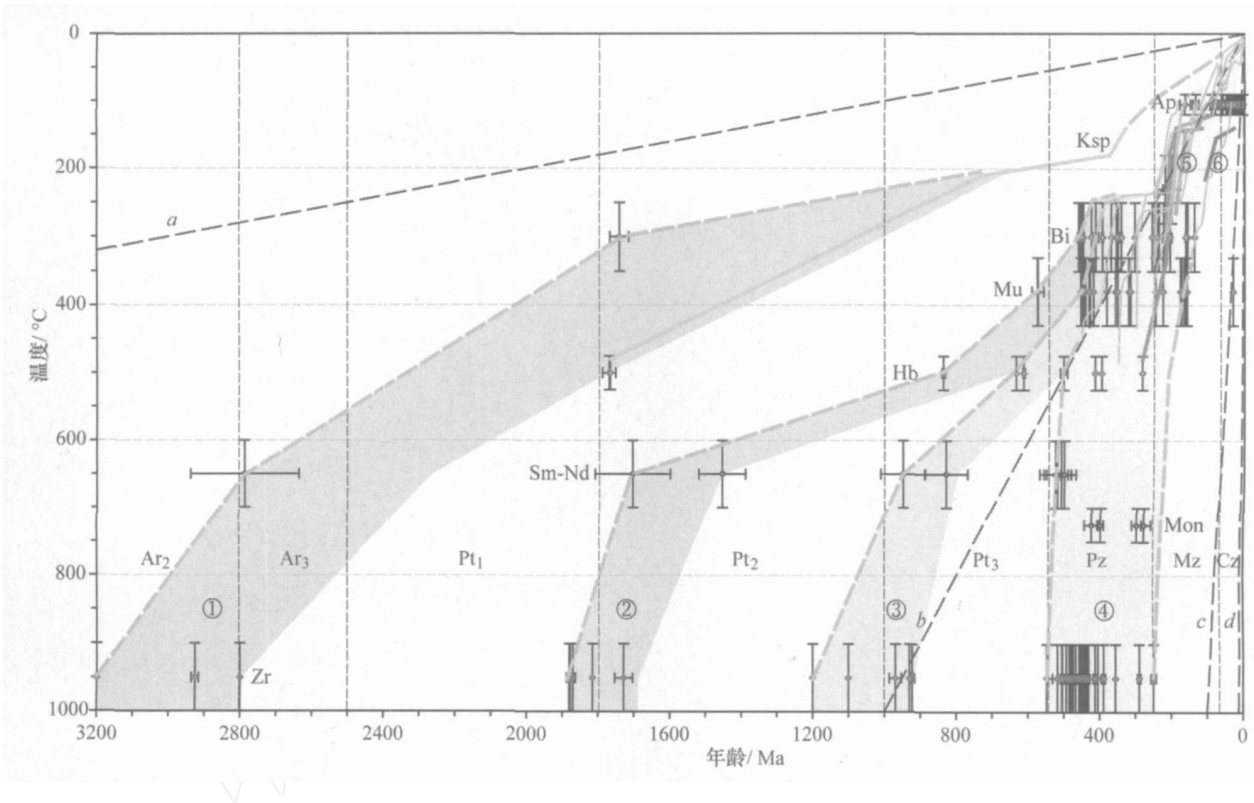


图4 阿尔金山地区地块冷却历史

(据文献[23]修改。数据见图1及相关参考文献)

Fig. 4 Regional cooling history of eastern Altyn Tagh

—拉配泉断裂下盘塔里木地块基底(太古宇)的热冷却历史域; —古、中元古代冷却历史域; —新元古代冷却历史域; —古生代冷却历史域; —中生代伸展构造第一期活动的曲线(3条); —第二期活动的曲线。a、b、c、d分别为冷却速率0.1 /Ma、1 /Ma、10 /Ma和100 /Ma线。其余虚线为推测冷却曲线。测年矿物及年龄测试方法代号: Zr—锆石, U-Pb法; Mon—独居石, U-Pb法; Hb—角闪石, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法; Mu—白云母, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法; Bi—黑云母, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法; Ksp—钾长石, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法和MDD模拟; Ap—磷灰石, 裂变径迹法; 以及 Sm-Nd法

冷却历史,最年轻的地块或地质体具有最不完整的或根本不构成阶梯状的冷却历史;介于两者之间形成的地块,其热冷却历史具有不完整的阶梯形状。深成岩浆的侵入和冷却过程,以及其他(如区域大断裂引起的)热事件,可能会被相应地块的热冷却历史域所包络。不同地块、不同时期的热冷却历史域的总和,构成了阿尔金山东段地区的区域热演化历史。

阿尔金山东段拉配泉北部的太古宇结晶基底麻粒岩和片麻岩中角闪石的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 测年给出中元古代早期的年龄。麻粒岩中角闪石为包含有石榴子石和单斜辉石等矿物的后期筛状变晶,其阶段加热 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 测年给出全熔年龄(1729.9 ± 59.7) Ma和坪年龄(1769.7 ± 16.1) Ma;等时线年龄的线性关系较好,给出年龄为(1836.8 ± 36.7) Ma^[32]。片麻岩中角闪石给出(1766 ± 6.8) Ma的全熔年龄^[59]。角闪石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 冷却年龄代表了塔里木盆地结晶基底变质后抬升形成稳定地块的时代,大致处在古元古代和中元古代的分界时期,说明塔里木

地块地台化的时代可能是从长城纪开始。

角闪石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄说明,早古生代地块抬升事件开始于奥陶纪早期,与阿尔金洋向北(塔里木地块)的俯冲和洋壳闭合过程相一致,可能有一个南北方向上的变化过程。

中生代快速冷却事件与该地区发育的伸展构造有关。其中,阿尔金山东段北缘的拉配泉断裂启动时间为226 Ma左右,其主要活动时间为220~180 Ma,并具有100 Ma左右的再次活动历史(图4中钾长石代表的4条冷却曲线)。拉配泉断裂是一条EW走向的中生代伸展构造(SN向伸展),其活动历史与阿尔金山东段地区中生代早期的区域抬升和快速冷却事件相吻合,因此具有重要的区域意义,可以与东亚的中生代伸展构造一起归结为特提斯洋向北和太平洋向西俯冲形成的弧后伸展作用。

中生代伸展作用开始的时间可能在三叠纪,且可能出现在整个阿尔金山地区。文献[29]得到钾长石冷却的开始年龄为250 Ma左右,在拉配泉北靠近

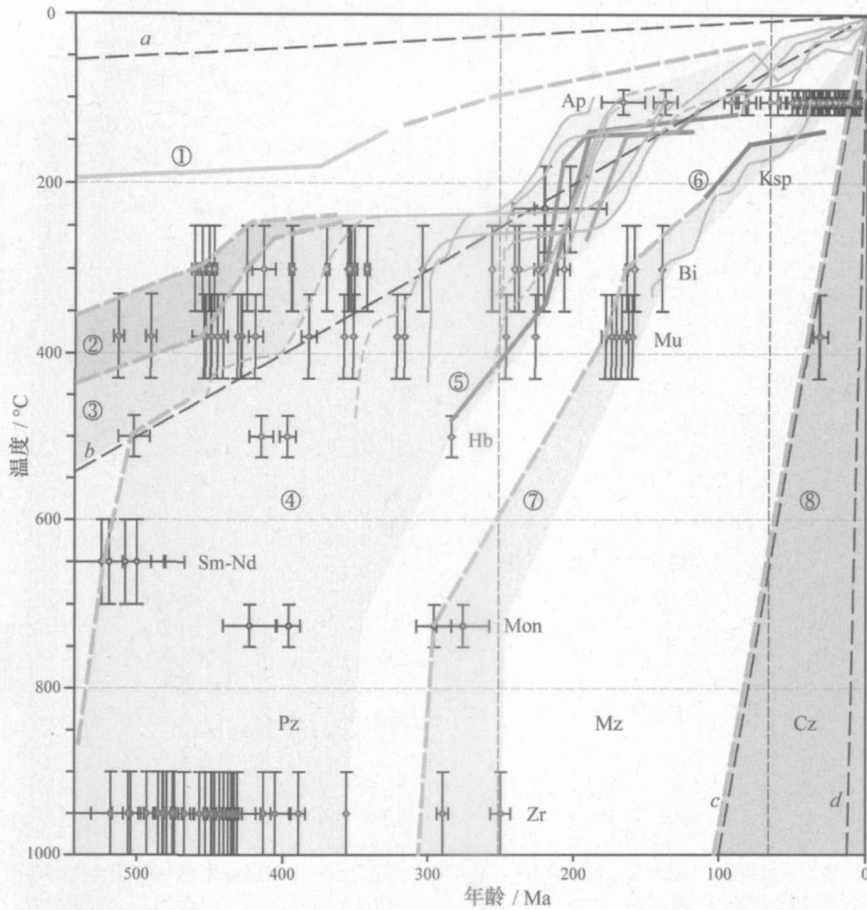


图5 阿尔金山地区显生宙以来地块冷却历史
(据文献[23]修改)

Fig 5 Regional cooling history of Altyn Tagh in Phanerozoic

说明见图4,为图4的局部放大。补充说明:—中生代快速冷却历史(与中生代伸展构造的第二期活动有关);—新生代冷却历史域

拉配泉断裂的下盘岩石中得到单颗粒锆石 FT 年龄为(221 ±26) Ma,磷灰石 FT 年龄为(167 ±15) Ma,与文献[24]提出的中生代伸展构造发育时间大致相当(图5)。刘永江等^[60]提出的阿尔金断裂早侏罗世末—中侏罗世开始活动的年龄,与拉配泉断裂的第2期伸展作用的冷却历史相一致(图5中 和),可能也是中生代伸展作用的年龄。

阿尔金山东段新生代隆升与剥露的历史主要与阿尔金断裂的走滑活动有关,具有非常快速的冷却速率(接近 10 °C/Ma 线)。许志琴等^[11]认为,阿尔金变质体的上隆时限大致为新近纪—全新世,是一个由北缘逆冲断层和南缘走滑转换断层(带正向滑移性质)所夹持的挤出体。根据磷灰石 FT 年龄数据,陈正乐等^[33]认为,阿尔金山脉 EW 向拉配泉—红柳沟山体的隆升-剥露时间早在 61~34 Ma,并有多期隆升的历史;根据磷灰石 FT 年龄数据在 7~9 Ma

集中的情况,可以认为,8 Ma 是青藏高原北缘快速抬升^[41]和变形的一期重要构造事件。该年龄比文献[61]根据第四系上新统沉积相改变和沉积速率加大得到的青藏高原西北部主要抬升事件开始的时间(4.5 Ma 左右)稍早。新生代阿尔金山脉的隆升剥露及其相关盆地的沉积与阿尔金断裂的走滑活动直接相关^[33, 60]。

4 主要构造演化阶段及其特征

根据地质构造与热演化历史的研究,阿尔金山地区构造体系和区域构造演化历史大致可分为以下4个阶段。

4.1 前寒武纪构造演化阶段

(1) 太古宙塔里木陆核发育阶段:形成于 36~32 亿年的古太古代岩浆作用时期,并在 28 亿年左

右的岩浆作用过程中得到巩固,具有麻粒岩相-高角闪岩相变质程度(阿尔金山北缘),是一个热的陆核。(2)元古宙稳定地台阶段:18 亿年长城纪开始的时候,塔里木陆核彻底冷却并形成稳定的塔里木地台,开始长城系沉积。(3)新元古代大陆裂解阶段:可能于 9 亿年左右于塔里木地台南缘裂解(拉配泉北双峰式火山岩),形成扩张洋脊和海洋,塔里木板块南缘为被动大陆边缘(大西洋型)^[59]。索尔库里北山铜银(锑)矿床和部分铁矿化可能形成于这个阶段。

4.2 古生代构造演化阶段

(1)早古生代阿尔金洋(原特提斯)和沟-弧-盆构造体系:形成枕状玄武岩(恰什坎萨依和拉配泉等地)和深海平原硅质岩(拉配泉等地),以及洋中脊(红柳沟—拉配泉和阿帕—茫崖蛇绿混杂岩带)等。喀腊大湾铜多金属矿、喀腊大湾铅锌矿、更新铜锌矿^[62-63]、拉配泉铜矿、攸苏普阿雷克、盖吉里克等铜矿床(点)、白尖山和攸苏普阿雷克铁矿以及蛇绿岩中铬铁矿和石棉矿等^[59]可能形成于这个阶段,构成喷流热水沉积、岩浆热液和基性超基性岩三大成矿系统^[64]。(2)奥陶纪早期板块碰撞、俯冲和造山阶段:阿尔金洋由大西洋型向太平洋型转变,在塔里木板块南缘形成向北插入的俯冲带(极性还有待进一步工作确定),形成蓝片岩相(恰什坎萨依)和榴辉岩相(阿尔金山南缘和北缘榴辉岩带)高压变质作用、钙碱性花岗岩浆活动和火山岛弧(阔什布拉克花岗岩体、喀腊大湾花岗斑岩和酸性火山岩等),以及海沟(恰什坎萨依)和大陆边缘的混杂堆积(红柳沟—拉配泉蛇绿混杂堆积的构造侵位)。早古生代碰撞造山带的洋-陆俯冲造山作用可能发生在早—中奥陶世,陆-陆碰撞造山作用可能发生在中奥陶世末期^[22]。阿尔金山北缘地区金的成矿作用(大平沟金矿和祥云金矿)可能主要与奥陶纪岩浆活动及韧性剪切带作用有关^[49, 63, 65]。(3)石炭纪洋盆闭合阶段:从奥陶系槽型火山岩和大陆边缘沉积的发育向石炭系(因格布拉克组)滨海相或纯陆相沉积的过渡,反映了早古生代地块抬升与阿尔金洋的逐步消减和封闭。同时,在其南边分布有泥盆纪昆仑裂谷系和石炭纪喜马拉雅裂谷系形成的古特提斯构造域。

4.3 中生代构造演化阶段

(1)二叠纪—三叠纪陆壳发育阶段:地层缺乏,为陆相剥蚀阶段。(2)早侏罗世—早白垩世弧后伸展作用和伸展构造体系:南北向伸展作用(拉配泉断裂,开始于晚三叠世),形成特提斯洋北部俯冲带的

弧后盆地(中生代侏罗纪—白垩纪盆地)。柴达木盆地的侏罗纪原型伸展盆地在此时形成。阿尔金山北缘大平沟金矿和红柳沟金矿、大平沟南铜矿化点的剥露作用和进一步矿化,可能与这一阶段的韧性剪切带和剥离断层有关。

4.4 新生代构造演化阶段

(1)印度-亚洲的板块碰撞、南北向挤压与第三纪盆地形成阶段。在印-亚碰撞之前的挤压环境下((108.0 ± 9.6) ~ (63.7 ± 4.4) Ma),柴达木盆地东部逆冲断层作用从柴南缘的东昆仑开始向柴北缘方向逐渐后退^[66],形成背驮式柴达木盆地。阿尔金山断裂在路乐河组沉积时(65 ~ 50.5 Ma)开始活动,在柴西贴近阿尔金山断裂附近形成柴达木盆地新生代宽缓复向斜^[53]。柴达木盆地的油气资源和阿尔金山附近的石膏、砂岩铜矿等开始形成。(2)始新世阿尔金山断裂系以及相关逆冲断裂系形成阶段(50 ~ 40 Ma):与印-亚碰撞过程有关,形成索尔库里-金雁山和南山逆冲断裂系;推测在现今阿尔金山断裂的北边存在与之性质相同的左行走滑断裂——江尕勒萨依断裂,为早期阶段的阿尔金山断裂^[13, 52]。(3)渐新世以来阿尔金山断裂左行走滑阶段:现在所见处在阿尔金山南麓的阿尔金山断裂形成于中渐新世—早中新世(30 ~ 20 Ma),切割了索尔库里—金雁山和南山逆冲断裂系^[24, 52]。期间,柴达木复向斜于 23.3 Ma 向柴东扩展^[53],柴达木盆地东部逆冲断层系(从柴达木南缘断裂到柴达木北缘断裂)贯通(26.6 ~ 17.8 Ma)^[66]。(4)青藏高原北缘隆升阶段:主要发生在 8 Ma 左右(FT 数据)以来^[67],可能稍晚于青藏高原南部裂谷系的形成。现代盐湖是这一阶段重要的成矿系统。

5 结论

阿尔金山东段是从太古宙塔里木陆核发育而来的,经历了元古宙稳定地台和新元古代大陆裂解阶段,形成了早古生代阿尔金洋和沟-弧-盆构造体系,发育了奥陶纪早期的板块碰撞、俯冲和造山作用。石炭纪洋盆闭合之后,该地区进入内陆构造发育阶段,其中占主导地位的是以拉配泉断裂为代表的中生代伸展构造和新生代阿尔金山断裂系的左行走滑断裂活动。

青藏高原北缘阿尔金山东段区域热年代学与构造演化历史的研究说明,该地区岩浆活动的主要时

期为早古生代晚期(490~385 Ma),峰期年龄为443 Ma。地质热年代学年龄数据为阿尔金山东段不同时期形成的不同地块勾画了不同的热冷却历史,由此可区分不同时期的不同构造事件对区域热冷却历史的影响。其中,早古生代地块抬升-冷却事件与该地区洋盆的消失有关,而中生代两期热冷却事件则与阿尔金山东段北缘的拉配泉断裂的伸展作用有关。新生代地块抬升-冷却事件主要与阿尔金断裂的活动有关。

References:

- [1] Xu Z Q, Yang J S, Zhang J X, et al. A comparison between the tectonic units on the two sides of the Altun sinistral strike-slip fault and the mechanism of lithospheric shearing[J]. *Acta Geologica Sinica*, 1999, 73(3): 193-205(in Chinese).
- [2] Burchfiel B C, Deng Q, Molnar P, et al. Intracrustal detachment with zones of continental deformation[J]. *Geology*, 1989, 17: 748-752.
- [3] Zhang J X, Zhang Z M, Xu Z Q, et al. Petrology and geochronology of eclogites from the western segment of the Altyn Tagh, Northwestern China[J]. *Lithos*, 2001, 56: 187-206.
- [4] Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resources. Regional Geology of the Xinjiang Uygur Autonomous Region[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993(in Chinese).
- [5] Guo Z J, Zhang Z C, Wang J J. Sm-Nd isochron age of ophiolite along northern margin of Altun Tagh Mountain and its tectonic significance[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44(5): 456-458.
- [6] Liu L, Zhang A D, Chen D L, et al. Implications based on LA-ICP-MS zircon U-Pb ages of eclogite and its country rock from Jianggalesayi area, Altyn Tagh [J]. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14(1): 98-107(in Chinese).
- [7] Liu L, Che Z C, Wang Y, et al. The petrological characters and geotectonic setting of high-pressure metamorphic rock belts in Altun Mountains[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1999, 15(1): 57-64(in Chinese).
- [8] Liu L, Che Z, Wang Y, et al. The evidences of Sm-Nd isochron age for the Early Paleozoic ophiolite in Mangya area, Altun Mountain[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1998, 43(9): 754-756.
- [9] Sobel E R, Arnaud N. A possible Middle Paleozoic suture in the Altyn Tagh, NW China[J]. *Tectonics*, 1999, 18(1): 64-74.
- [10] Zhang J X, Meng F C, Yu S Y, et al. ^{39}Ar - ^{40}Ar geochronology of high-pressure/low-temperature blueschist and eclogite in the North Altyn Tagh and their tectonic implications [J]. *Geology in China*, 2007, 34(4): 558-564(in Chinese).
- [11] Zhang J X, Zhang Z M, Xu Z Q, et al. The ages of U-Pb and Sm-Nd for eclogite from the western segment of Altyn Tagh tectonic belt—The evidence for existence of Caledonian orogenic root[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44(24): 2256-2259.
- [12] Yin A, Harrison T M. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen[J]. *J Annu Rev Earth Planet Sci*, 2000, 28: 211-280.
- [13] Yin A. Geologic evolution of the Himalaya-Tibetan orogen: Phanerozoic growth of the Asian continent[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2001, 22(3): 193-230(in Chinese).
- [14] Meng Q R, Hu J M, Yang F Z. Timing and magnitude of displacement on the Altyn Tagh fault: Constraints from stratigraphic correlation of adjoining Tarim and Qaidam basins, NW China[J]. *Terra Nova*, 2001, 13: 86-91.
- [15] Cowgill E, Yin A, Wang X F, et al. Late Cenozoic left-reverse slip movement along the Northern Altyn Tagh Fault and its possible development as the northern boundary of a transpressional strike-slip duplex [J]. *Geology*, 2000, 28: 255-258.
- [16] Li S G. Introduction to Geomechanics[M]. Beijing: Science Press, 1973: 1-92(in Chinese).
- [17] Pan Y S, Kong X R. Lithosphere Structure, Evolution and Dynamics of Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau[M]. Guangzhou: Guangdong Science & Technology Press, 1998: 428 (in Chinese).
- [18] Xiu Q Y, Yu H F, Liu Y S, et al. Geology and zircon U-Pb age of pillow basalt at Qiashikansoy in Northern Altyn Tagh, W China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81(6): 787-794(in Chinese).
- [19] Wu Y P, Mao D B, Zhao G X, et al. Geochemistry and geochronology of amphibolite from the Hongliugou area, Altyn Tagh, northwestern China[J]. *Geological Survey and Research*, 2007, 30(2): 81-89(in Chinese).
- [20] Gehrels G E, Yin A, Wang X F. Detrital-zircon geochronology of the Northeastern Tibetan Plateau[J]. *GSA Bulletin*, 2003, 115(7): 881-896.
- [21] Zhang Z C, Guo Z J. Sm-Nd, Ar isotopic and geochemical characteristics of plagioclase amphibolites in the Bashikaogong area, Altun Tagh Mountains[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2004, 10(4): 528-534(in Chinese).
- [22] Hao J, Wang E Q, Liu X H, et al. Jinyanshan collisional orogenic belt of the early Paleozoic in the Altun mountains: Evidence from single zircon U-Pb and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ isotopic dating for the arc magmatite and ophiolitic mélange[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(11): 2743-2752 (in Chinese).
- [23] Chen X H, Yin A, Gao J, et al. Preliminary study on regional thermal history in the Altun region[J]. *Geological Review*, 2002, 48(Suppl): 146-152(in Chinese).
- [24] Chen X, Yin A, Gehrels G E, et al. Two phases of Mesozoic north-south extension in the eastern Altyn Tagh range,

- northern Tibetan Plateau [J]. *Tectonics*, 2003, 22 (5): 1053, doi: 10.1029/2001TC001336.
- [25] Chen X H, An Y, Gehrels G E, et al. Mesozoic N-S extension in the eastern Altyn Tagh range on the northern margin of the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Journal of Geomechanics*, 2004, 10(3): 193-212 (in Chinese).
- [26] Cowgill E S. Tectonic Evolution of the Altyn Tagh-Western Kunlun Fault System, Western China [D]. Los Angeles: University of California, 2001: 311.
- [27] Cowgill E, Yin A, Harrison T M, et al. Reconstruction of the Altyn Tagh fault based on U-Pb geochronology: Role of back thrusts, mantle sutures, and heterogeneous crustal strength in forming the Tibetan Plateau [J]. *J Geophys Res*, 2003, 108(B7): 2346, doi: 10.1029/2002JB002080.
- [28] Gehrels G E, Yin A, Wang X F. Magmatic history of the Northeastern Tibetan Plateau [J]. *J Geophys Res*, 2003, 108(B9): 2423, doi: 10.1029/2002JB001876.
- [29] Sobel E R, Arnaud N, Jolivet M, et al. Jurassic to Cenozoic exhumation history of the Altyn Tagh range, NW China constrained by $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and apatite fission track thermochronology [J]. *Geol Soc Am Memoir*, 2001, 194: 1-15.
- [30] Chen W, Ge X H, Ye H W, et al. Determination of multi-stage activities of the Altun fault system: Laser $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ micro-analyses [J]. *Journal of Chinese Mass Spectrometry Society*, 2000, 21(3-4): 189-190 (in Chinese).
- [31] Chen X H, Gehrels G E, Wang X F, et al. Granite from North Altyn Tagh, NW China: U-Pb geochronology and tectonic setting [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2003, 22(4): 294-298 (in Chinese).
- [32] Chen X H, Wang X F, Chen Z L, et al. Preliminary $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ thermochronologic results in Altyn Tagh [M]. *Collection Papers of Important Geologic Results Done in "9·5" Period*. Beijing: Geological Publishing House, 2000: 106-111 (in Chinese).
- [33] Chen Z L, Gong H L, Li L, et al. Cenozoic uplifting and exhumation process of the Altyn Tagh mountains [J]. *Earth Science Frontiers*, 2006, 13(4): 91-102 (in Chinese).
- [34] Chen Z L, Zhang Y Q, Wang X F, et al. Fission track dating of apatite constraints on the Cenozoic uplift of the Altyn Tagh mountain [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2001, 22(5): 413-418 (in Chinese).
- [35] Li H B, Yang J S, Xu Z Q, et al. Geological and chronological evidence of Indo-Chinese strike-slip movement in the Altyn Tagh fault zone [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(1): 27-32.
- [36] Li H B, Yang J S, Xu Z Q, et al. Formation age of the Altun Fault belt: Evidence from U-Pb SHRIMP dating of syntectonic zircon [J]. *Geological Review*, 2001, 47(3): 315-316 (in Chinese).
- [37] Liu Y T, Ge X H, Ye H W, et al. Strike-slip model for Altyn Tagh fault developed since Late Mesozoic [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2001, 22(1): 23-28 (in Chinese).
- [38] Qi X X, Li H B, Wu C L, et al. SHRIMP U-Pb zircon dating for Qiashikansayi granodiorite, the northern Altyn Tagh Mountains and its geological implications [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(5): 440-445.
- [39] Qi X X, Wu C L, Li H B. SHRIMP U-Pb age of zircons from Kazisayi granite in the northern Altyn Tagh mountains and its significations [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2005, 21(3): 859-866 (in Chinese).
- [40] Wan J L, Wang Y, Li Q, et al. FT evidence of northern Altyn uplift in Late-Cenozoic [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2001, 20(4): 222-224 (in Chinese).
- [41] Wang Y, Wan J L, Li Q, et al. Fission-track evidence for the Cenozoic uplift and erosion of the northern segment of the Altyn Tagh Fault zone at the Aksay-Dangjin Pass [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2002, 76(2): 191-198 (in Chinese).
- [42] Wu C L, Yao S Z, Zeng L S, et al. Bashikaogong-Simierbulake granitic complex, North Altun, NW China: Geochemistry and zircon SHRIMP ages [J]. *Science in China: Series D*, 2006, 49(12): 1233-1251.
- [43] Wu C L, Yang J S, Yao S Z, et al. Characteristics of the granitoid complex and its zircon SHRIMP dating at the south margin of the Bashikaogong Basin, North Altun, NW China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2005, 21(3): 846-858 (in Chinese).
- [44] Allegre C J, Courtillot V, Tapponnier P, et al. Structure and evolution of the Himalaya-Tibet orogenic belt [J]. *Nature*, 1984, 307: 17-22.
- [45] Dewey J F, Shackleton R M, Chang C, et al. The tectonic evolution of the Tibetan Plateau [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London: Series A*, 1988, 327: 379-413.
- [46] Hendrix M S, Graham S A, Carroll A R, et al. Sedimentary record and climatic implications of recurrent deformation in the Tian Shan: Evidence from Mesozoic strata of North Tarim, South Junggar, and Turpan basins, Northwest China [J]. *Geol Soc Am Bull*, 1992, 104: 53-79.
- [47] Ritts B D, Biffi U. Magnitude of post-Middle Jurassic Baocjian displacement on the Central Altyn Tagh fault system, Northwest China [J]. *Geol Soc Am Bull*, 2000, 112(1): 61-74.
- [48] Kapp P A, Yin A, Manning C, et al. Blueschist-bearing metamorphic core complexes in the Qiangtang block reveal deep crustal structure of Northern Tibet [J]. *Geology*, 2000, 28: 19-22.
- [49] Chen X H, Wang X F, George Gehrels G E, et al. Early Paleozoic magmatism and gold mineralization in North Altyn Tagh, NW China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2004, 78(2): 515-523.
- [50] Chen X H, Yin A, Gehrels G E, et al. Mesozoic extension

- in northern Tibetan Plateau: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ analyses and MDD modeling[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2002, 23 (4): 305-310(in Chinese).
- [51] Li H B, Yang J S, Xu Z Q, et al. The constraint of the Altyn Tagh fault system to the growth and rise of the northern Tibetan plateau[J]. *Earth Science Frontiers*, 2006, 13 (4): 59-79(in Chinese).
- [52] Yin A, Rumelhart P E, Butler R, et al. Tectonic history of the Altyn Tagh fault system in northern Tibet inferred from Cenozoic sedimentation[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2002, 114(10): 1257-1295.
- [53] Yin A, Dang Y Q, Chen X H, et al. Cenozoic evolution and tectonic reconstruction of the Qaidam Basin: Evidence from seismic profiles[J]. *Journal of Geomechanics*, 2007, 13 (3): 193-211(in Chinese).
- [54] Li L, Jiang R B, Qi W X, et al. Magnetic fabrics of Cenozoic sedimentary rocks in the western Qaidam Basin and their structural significance[J]. *Journal of Geomechanics*, 2008, 14(1): 45-56(in Chinese).
- [55] Li H M, Lu S N, Zheng J K, et al. Dating of 3.6 Ga zircons in granite-gneiss from the eastern Altyn Mountains and its geological significance[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2001, 20 (4): 259-262 (in Chinese).
- [56] Chen X H, Wang X F, Yang F, et al. Tectonic environments of magmatism in Early Paleozoic in the North Altyn Tagh, China[J]. *Journal of Geomechanics*, 2001, 7 (3): 193-200(in Chinese).
- [57] Reiners P W, Brandon M T. Using thermochronology to understand orogenic erosion[J]. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 2006, 34: 419-466.
- [58] Wang Y. Some thoughts on tectono-thermochronology[J]. *Earth Science Frontiers*, 2004, 11 (4): 435-443 (in Chinese).
- [59] Wang X F, Chen X H, Chen Z L, et al. Geological Setting for Metallogenesis and Prospecting of Ore Deposits in the Altyn Tagh Area[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2004: 463(in Chinese).
- [60] Liu Y J, Neubauer F, Ge X H, et al. Geochronology of the Altun Fault zone and rising of the Altun mountains[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2007, 42 (1): 134-146 (in Chinese).
- [61] Zheng H, Powell C M, An Z, et al. Pliocene uplift of northern Tibetan Plateau[J]. *Geology*, 2000, 28 (8): 715-718.
- [62] Wu Y P, Chen K Q, Zhong L. Geological feature and ore-controlling factors of Kaladawan copper-polymetal deposit in northern side of Altyn Fault, Xinjiang[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2008, 30 (2): 118-124 (in Chinese).
- [63] Li Y C, Chen B L, Chen Z L, et al. Sulfur isotope features of Cu-Au polymetallic deposits in the Hongliugou-Lapeiquan area on the northern margin of the Altyn Tagh Mountains and their relation to the tectonic evolution[J]. *Journal of Geomechanics*, 2007, 13(2): 131-140(in Chinese).
- [64] Zhao G X, Mao D B, Zhang Y, et al. Main metallogenic systems of the Altyn metallogenic belt in Caledonian[J]. *Geological Survey and Research*, 2007, 30(2): 90-97 (in Chinese).
- [65] Yang Y, Chen X H, Gehrels G E, et al. Early Paleozoic magmatism and gold metallogenesis in Altun Mountains, Northwest China[J]. *Mineral Deposits*, 2004, 23 (4): 464-472(in Chinese).
- [66] Jiang R B, Chen X H, Dang Y Q, et al. Apatite fission track evidence for two phases Mesozoic-Cenozoic thrust faulting in eastern Qaidam Basin[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2008, 51(1): 116-124(in Chinese).
- [67] Chen Z L, Wan J L, Wang X F, et al. Rapid strike-slip of the Altyn Tagh Fault at 8 Ma and its geological implications[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2002, 23 (4): 295-300(in Chinese).

参考文献:

- [1] 许志琴,杨经绥,张建新,等.阿尔金断裂两侧构造单元的对比及岩石圈剪切机制[J]. *地质学报*, 1999, 73(3): 193-205.
- [4] 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.
- [5] 郭召杰,张志诚,王建君.阿尔金山北缘蛇绿岩带的 SmrNd 等时线年龄及其大地构造意义[J]. *科学通报*, 1998, 43 (18): 1981-1984.
- [6] 刘良,张安达,陈丹玲,等.阿尔金江尔勒萨依榴辉岩和围岩锆石 LA-ICP-MS 微区原位定年及其地质意义[J]. *地学前缘*, 2007, 14(1): 98-107.
- [7] 刘良,车自成,王焰,等.阿尔金高压变质岩带的特征及其构造意义[J]. *岩石学报*, 1999, 15(1): 57-64.
- [10] 张建新,孟繁聪,于胜尧,等.北阿尔金 HP/LT 蓝片岩和榴辉岩的 Ar-Ar 年代学及其区域构造意义[J]. *中国地质*, 2007, 34(4): 558-564.
- [11] 张建新,张泽明,许志琴,等.阿尔金构造带西段榴辉岩的 SmrNd 及 U-Pb 年龄——阿尔金构造带中加里东期山根存在的证据[J]. *科学通报*, 1999, 44(10): 1109-1112.
- [13] 尹安.喜马拉雅-青藏高原造山带地质演化——显生宙亚洲大陆生长[J]. *地球学报*, 2001, 22(3): 193-230.
- [16] 李四光.地质力学概论[M].北京:科学出版社,1973: 1-92.
- [17] 潘裕生,孔祥儒.青藏高原岩石圈结构演化和动力学[M].广州:广东科技出版社,1998: 428.
- [18] 修群业,于海峰,刘永顺,等.阿尔金山北缘枕状玄武岩的地质特征及其锆石 U-Pb 年龄[J]. *地质学报*, 2007, 81(6): 787-794.
- [19] 武永平,毛德宝,赵更新,等.阿尔金红柳沟斜长角闪岩的形成时代及其地球化学特征[J]. *地质调查与研究*, 2007, 30(2): 81-89.
- [21] 张志诚,郭召杰.阿尔金山巴什考供地区斜长角闪岩的岩石地球化学和 SmrNd, Ar 同位素特征[J]. *高校地质学报*, 2004, 10(4): 528-534.

- [22] 郝杰,王二七,刘小汉,等.阿尔金山脉中金雁山早古生代碰撞造山带:弧岩浆岩的确定与岩体锆石 U-Pb 和蛇绿混杂岩 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学研究的证据[J].岩石学报,2006,22(11):2743-2752.
- [23] 陈宣华,尹安,高荐,等.阿尔金山区域热演化历史的初步研究[J].地质论评,2002,48(增刊):146-152.
- [25] 陈宣华, Yin A, Gehrels G E, 等.青藏高原北缘阿尔金东段中生代南北向伸展作用[J].地质力学学报,2004,10(3):193-212.
- [30] 陈文,葛肖虹,叶慧文,等.用激光微区 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年技术测定阿尔金断裂多期活动的时代[J].质谱学报,2000,21(3-4):189-190.
- [31] 陈宣华, Gehrels G E, 王小凤, 等.阿尔金山北缘花岗岩的形成时代及其构造环境探讨[J].矿物岩石地球化学通报,2003,22(4):294-298.
- [32] 陈宣华,王小凤,陈正乐,等.阿尔金地区 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 热年代学初步研究[M]“九·五”全国地质科技重要成果论文集.北京:地质出版社,2000:106-111.
- [33] 陈正乐,宫红良,李丽,等.阿尔金山脉新生代隆升-剥露过程[J].地学前缘,2006,13(4):91-102.
- [34] 陈正乐,张岳桥,王小凤,等.新生代阿尔金山脉隆升历史的裂变径迹证据[J].地球学报,2001,22(5):413-418.
- [35] 李海兵,万渝生, Ireland T R, 等.阿尔金断裂带印支期走滑活动的地质及年代学证据[J].科学通报,2001,46(16):1333-1338.
- [36] 李海兵,杨经绥,许志琴,等.阿尔金断裂带的形成时代——来自于同构造生长锆石 U-Pb SHRIMP 定年数据[J].地质论评,2001,47(3):315-316.
- [37] 刘永江,葛肖虹,叶慧文,等.晚中生代以来阿尔金断裂的走滑模式[J].地球学报,2001,22(1):23-28.
- [38] 戚学祥,李海兵,吴才来,等.北阿尔金恰什坎萨依花岗岩闪长岩的锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义[J].科学通报,2005,50(6):571-576.
- [39] 戚学祥,吴才来,李海兵.北阿尔金喀孜萨依花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其构造意义[J].岩石学报,2005,21(3):859-866.
- [40] 万景林,王瑜,李齐,等.阿尔金山北段晚新生代山体抬升的裂变径迹证据[J].矿物岩石地球化学通报,2001,20(4):222-224.
- [41] 王瑜,万景林,李齐,等.阿尔金山北段阿克塞—当金山口一带新生代山体抬升和剥蚀的裂变径迹证据[J].地质学报,2002,76(2):191-198.
- [42] 吴才来,姚尚志,曾令森,等.北阿尔金巴什考供—斯米尔布拉克花岗岩杂岩特征及锆石 SHRIMP U-Pb 定年[J].中国科学: D 辑:2007,37(1):10-26.
- [43] 吴才来,杨经绥,姚尚志,等.北阿尔金巴什考供盆地南缘花岗杂岩体特征及锆石 SHRIMP 定年[J].岩石学报,2005,21(3):846-858.
- [50] 陈宣华,尹安, Gehrels G E, 等.青藏高原北缘中生代伸展构造 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 测年和 MDD 模拟[J].地球学报,2002,23(4):305-310.
- [51] 李海兵,杨经绥,许志琴,等.阿尔金断裂带对青藏高原北部生长、隆升的制约[J].地学前缘,2006,13(4):59-79.
- [53] 尹安,党玉琪,陈宣华,等.柴达木盆地新生代演化及其构造重建——基于地震剖面的解释[J].地质力学学报,2007,13(3):193-211.
- [54] 李丽,蒋荣宝,祁万修,等.柴达木盆地西部新生界磁组构造特征及其构造意义[J].地质力学学报,2008,14(1):45-56.
- [55] 李惠民,陆松年,郑健康,等.阿尔金山东端花岗片麻岩中 3.6 Ga 锆石的地质意义[J].矿物岩石地球化学通报,2001,20(4):259-262.
- [56] 陈宣华,王小凤,杨风,等.阿尔金山北缘地区早古生代岩浆活动的构造环境[J].地质力学学报,2001,7(3):193-200.
- [58] 王瑜.构造热年代学——发展与思考[J].地学前缘,2004,11(4):435-443.
- [59] 王小凤,陈宣华,陈正乐,等.阿尔金地区成矿地质条件与远景预测[M].北京:地质出版社,2004:463.
- [60] 刘永江,Neubauer F,葛肖虹,等.阿尔金断裂带年代学和阿尔金山隆升[J].地质科学,2007,42(1):134-146.
- [62] 吴益平,陈克强,钟莉.新疆阿尔金断裂北缘喀腊大湾铜多金属矿床地质特征及控矿因素[J].地球科学与环境学报,2008,30(2):118-124.
- [63] 李月臣,陈柏林,陈正乐,等.阿尔金北缘红柳沟—拉配泉一带铜金矿床硫同位素特征及其意义[J].地质力学学报,2007,13(2):131-140.
- [64] 赵更新,毛德宝,张燕,等.阿尔金成矿带加里东期主要成矿系统[J].地质调查与研究,2007,30(2):90-97.
- [65] 杨屹,陈宣华, Gehrels G E, 等.阿尔金山早古生代岩浆活动与金矿成矿作用[J].矿床地质,2004,23(4):464-472.
- [66] 蒋荣宝,陈宣华,党玉琪,等.柴达木盆地东部中生代两期逆冲断层作用的 FT 定年[J].地球物理学报,2008,51(1):116-124.
- [67] 陈正乐,万景林,王小凤,等.阿尔金断裂带 8 Ma 左右的快速走滑及其地质意义[J].地球学报,2002,23(4):295-300.