

万天丰, 赵庆乐. 天山—阿尔泰地区古生代构造成矿作用[J]. 中国地质, 2015, 42(2): 365–378.

Wan Tianfeng, Zhao Qingle. Paleozoic tectono-metallogeny in Tianshan–Altay area, Central Asia[J]. Geology in China, 2015, 42(2): 365–378(in Chinese with English abstract).

天山—阿尔泰地区古生代构造成矿作用

万天丰 赵庆乐

(中国地质大学(北京), 北京 100083)

摘要: 天山—阿尔泰地区古生代大地构造及其相关的内生金属成矿作用是一个重要而又有趣的研究课题。阿尔泰地区属于早古生代碰撞带, 天山地区属于晚古生代早期(晚泥盆世—早石炭世, 385~323 Ma)碰撞带, 均为区域性近南北向(按现代磁方位)缩短—碰撞作用的结果。在晚泥盆世—早石炭世碰撞作用下, 阿尔泰地区近 NW 向区域性断层呈现为右行走滑的特征, 天山地区近东西向的区域性断层表现为逆断层的活动。然而, 在晚石炭世—二叠纪(323~260 Ma)受乌拉尔碰撞带向东挤压作用的远程效应影响, 该地区受到较弱的向东挤压作用, 阿尔泰地区 NW 向断层转变成左行走滑断层, 天山地区近东西向的断层则转为右行走滑断层, 使该区岩石发生适度的破碎, 以致在天山—阿尔泰地区形成大量世界著名的大型内生金属矿床。对于亚洲大陆来说, 碰撞作用最强烈的时期并不一定是内生金属成矿作用最有利的阶段。应该审慎地对待“造山带成矿”假说。

关键词: 碰撞作用; 远程效应; 构造—成矿作用; 天山—阿尔泰地区, 古生代

中图分类号: P547; P612 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2015)02-0365-14

Paleozoic tectono-metallogeny in Tianshan–Altay area, Central Asia

WAN Tian-feng, ZHAO Qing-le

(School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Paleozoic tectonics and endogenic metallogeny in Tianshan–Altay area of Central Asia constitute an important research topic in geology. The Altay area, as a collision zone of the Early Paleozoic (500–397 Ma), and the Tianshan region, as a collision zone of the early period in Late Paleozoic (Late Devonian – Early Carboniferous, 385–323 Ma), resulted from nearly NS-trending shortening and collision (according to recent magnetic orientation). In the Late Devonian–Early Carboniferous (385–323 Ma), regional NW-trending faults exhibited features of the dextral strike-slip motion in Altay area and Junggar basin. In the Tianshan area, however, nearly EW-trending regional faults caused motions of the thrusts, thus belonging to the collision period of the Tianshan Mountains. However, in the Late Carboniferous–Permian (323–260 Ma), these areas suffered from weaker eastward compression, influenced by the long-distance effect of the Ural collision zone, which converted existent NW-trending faults into sinistral strike-slip in Altay and Junggar areas, and also converted existent nearly EW-trending faults into dextral strike-slip in Tianshan area. The rocks of that area in the Late Carboniferous – Permian period were moderately ruptured into a certain tension–

收稿日期: 2015-02-24; 改回日期: 2015-03-19

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(科[2011]01-48-11)资助。

作者简介: 万天丰, 男, 1938年生, 教授, 博士生导师, 主要从事大地构造学和应用构造地质学的教学与研究; E-mail: wan-tianfeng@163.com。

shear form, thus forming a number of world-famous giant endogenic metal ore deposits in Tianshan-Altay area. As to the Central Asian continent, the most powerful collision period may not coincide with the most favorable endogenic metallogenic period. Therefore the "orogenic metallogeny hypothesis" should be treated with caution in that area.

Key words: tectono-metallogeny; collision; long distance effect; Tianshan-Altay area; Paleozoic

About the first author: WAN Tian-feng, male, born in 1938, professor, mainly engages in the study and teaching of tectonics and applied structural geology; E-mail: wan-tianfeng@163.com.

近年来,笔者在研究亚洲大地构造并编制亚洲大地构造区划图^[1]的过程中,对于亚洲中部天山—阿尔泰地区的构造—成矿作用产生了浓厚的兴趣。现将一些新认识奉献给读者,与大家进行讨论。

1 大地构造背景

天山—阿尔泰地区地处亚洲中部的哈萨克、吉尔吉斯、乌兹别克、蒙古和中国西北等地的交界地带,其北部与俄罗斯相邻,该地区是一个世界著名的内生金属成矿带。天山—阿尔泰地区,在大地构造上属于中亚—蒙古构造域的中部。

中亚—蒙古构造域是由阿尔泰—中蒙古—海拉尔早古生代(500~397 Ma)增生碰撞带,卡拉干达—吉尔吉斯早古生代(500~397 Ma)增生碰撞带,土兰—卡拉库姆板块,西天山晚古生代(360~260 Ma)增生碰撞带,巴尔喀什—天山—兴安岭晚古生代(360~260 Ma)增生碰撞带以及准噶尔地块等构造单元所组成^[1]。所谓“增生碰撞带”就是2个大陆板块之间规模较大、结构较复杂的碰撞带。一些学者喜欢用“造山带”的术语,那是槽台假说所习惯使用的。如果赞成板块构造学说的话,就不宜再使用“造山带”的术语。天山—阿尔泰地区的北部,即阿尔泰地区主要为早古生代碰撞带,南部的天山地区主要为晚古生代碰撞带,内含许多个体较小的、较老的结晶地块,它们随西伯利亚板块从南半球运移到北半球中高纬度,经过古生代的2次碰撞作用而拼接到西伯利亚板块西南缘,它们也可以看作为西伯利亚板块在古生代时期的增生部分^[2]。阿尔泰—中蒙古—海拉尔早古生代(500~397 Ma)增生碰撞带就是西伯利亚板块及其南部许多小地块碰撞的结果。巴尔喀什—天山—兴安岭晚古生代(360~260 Ma)增生碰撞带则为西伯利亚南部许多小地块与中朝板块(广义的)碰撞的结果。总之,以现代磁方位为准,阿尔泰—天山地区主要都是早、晚古生代近南北向两次碰撞作用的结果,其地质构造都是通

过古生代构造—岩浆事件而最后定型的。过去曾以为在中亚地区存在“哈萨克板块”的设想,现在看来并不妥当,该区发育着强烈的古生代碰撞作用和多期构造—岩浆事件,最新的研究成果已经改正了过去的设想,认为其主要部分是古生代碰撞作用的产物^[3-5]。过去所谓“哈萨克板块”其实是在古特提斯洋内所存在的许多古老的小结晶陆块(都在500 Ma以前形成的陆块)、在古生代的板块碰撞作用中拼贴而成为大陆板块的一部分。只有土兰—卡拉库姆板块具有稳定的结晶基底^[1]。

2 晚古生代的2次构造—热事件

对于卡拉干达—阿尔泰—中蒙古地区的早古生代的碰撞事件,近年来没有什么争议^[2, 6-10],这就是说阿尔泰地区的碰撞作用主要发生在早古生代晚期(400 Ma左右)。但是,对于西天山和巴尔喀什—天山—兴安岭晚古生代(360~260 Ma)碰撞增生带,以及阿尔泰地区是否存在晚古生代构造事件则存在一些分歧。

长期以来,一直认为天山地区存在2次碰撞作用。谢家荣^[11]最早将中国天山的构造事件划分为2期,第一期为泥盆纪末期(或早石炭世末),第二期为晚石炭世末期—早二叠世,该区存在2个显著的地层角度不整合接触关系。几十年来,此认识被许多学者所引用,并一直以为在天山地区曾发生过2次碰撞作用或造山作用^[2, 10]。第一期晚泥盆世—早石炭世的碰撞作用,长期以来一直得到许多学者的认同^[6, 7, 9, 10]。在巴尔喀什—天山碰撞作用影响极大,较强的构造变形可影响到阿尔泰地区,晚古生代碰撞作用所造成的构造变形带宽度可达1500 km左右。近年来,根据Buslov et al.^[12]对于阿尔泰附近地区许多NW向断层的活动性质研究及其同位素测年结果,发现第一期晚泥盆世—早石炭世(385~323 Ma)的碰撞作用是该区的主碰撞时期,使区域性Charysh—Terckta和塔拉斯—费尔干纳(Talas—

Ferganan)等一系列走向北西的断层均表现为右行走滑活动。而对于天山附近的、发育在主碰撞带内的近东西向断层,大家都公认:在晚泥盆世—早石炭世主要表现为逆断层的特征^[1, 10, 13, 14](图1)。综合上述资料,按现代磁方位的资料,上述2类断裂活动可能都是由于阿尔泰—天山陆块群相对向北运移所造成的,是巴尔喀什—天山—兴安岭晚古生代早期碰撞增生带南北向缩短、碰撞作用的表现,此种解释看来是比较合理的,认识也比较一致^[1, 7-10, 15](图1,碰撞作用方向如大红箭头所示)。

对于第二期,即晚石炭世末期到二叠纪的构造事件,也得到许多学者的肯定^[10, 15-21],尽管对于延续的期限有些分歧,不过他们都认为在巴尔喀什—天山地区继续发生了晚古生代晚期的第二次碰撞作用。但是,值得关注的是, Buslov et al.^[12]发现,在晚石炭世—二叠纪(316~280 Ma)的构造作用却使一系列 NW 向断层(如 Chara, Irtysh 和 Krail Kuznetsk—Teletsk—Bashkauss, 巴尔喀什地区,以及阿尔泰及其东部地区的许多断层)都呈现为大幅度的左行走滑特征(图2上部),其运动滑移特征与晚泥盆世—早石炭世的完全相反。Han et al.^[15]也确认

准噶尔与伊犁地块之间的北天山 NW 向断裂(原来具蛇绿岩套)在早石炭世之后,也变成左行走滑断层,其伴生的花岗质侵入体的同位素年龄为 316~270 Ma,并认为此岩体是后碰撞作用的产物;还引用前人的成果^[22, 23],指出:中天山—吉尔吉斯—伊犁地块可能是向东挤入到中国的南、北天山之间。

李锦轶等^[13]、王瑜^[14]对于天山地区近东西向区域性断层进行了断层活动性与⁴⁰Ar—³⁹Ar测年的研究,明确地认定它们在泥盆纪—早石炭世原来为逆断层,而在晚石炭世—二叠纪(300~260 Ma)却都转变为右行走滑断层,并指出这是天山以北地块在碰撞作用之后向东嵌入作用的结果(图3)。这一点,在东天山(吐鲁番—哈密)地区卫星影像上表现得尤为明显,东西向的断层表现为大幅度的右行走滑活动。Laurent—Charvet et al.^[24, 25]、Buslov et al.^[12]、Natal'in & Sengor^[26]、Van der Voo et al.^[27]的研究也得到类似的结果,都认为天山地区近 EW 向的主断层在晚石炭世—二叠纪表现为走滑断层,而不是逆断层。

综合 Buslov et al.^[12]、Wang et al.^[14]、肖序常等^[10]和 Han et al.^[15]对于巴尔喀什—天山—阿尔泰地区断裂活动的研究成果,可以看出:在晚泥盆世—早石

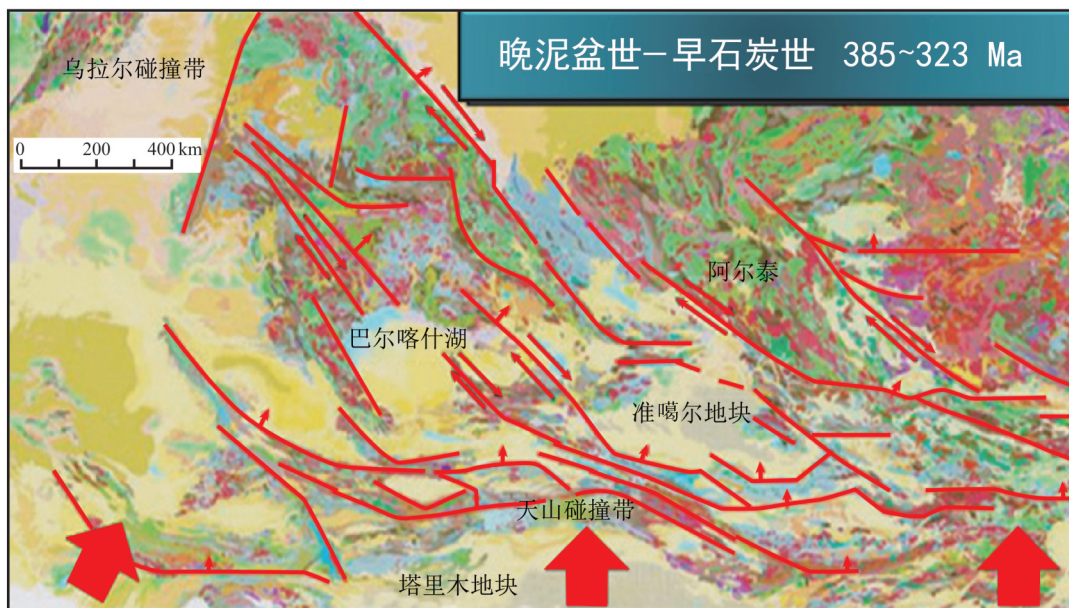


图1 巴尔喀什—天山—阿尔泰地区主碰撞阶段(晚泥盆世—早石炭世)区域应力状态与断层的走滑方向(据[1, 6-8, 10, 15]的资料改绘)

红色大箭头示区域性挤压与缩短方向;红色小箭头示逆断层;一对黑色小箭头示右行走滑断层

Fig.1 Regional maximum principal compressive stress orientation and strike-slip fault in Balkhash-Tianshan-Altay area during the main collision period (Late Devonian-Early Carboniferous) (modified after [1, 6-8, 10, 15])

The big red arrow shows the trend of regional compression and collision. Small red arrows represent nearly EW-trending reverse faults, whereas a pair of black arrows show the NW-trending dextral strike-slip fault

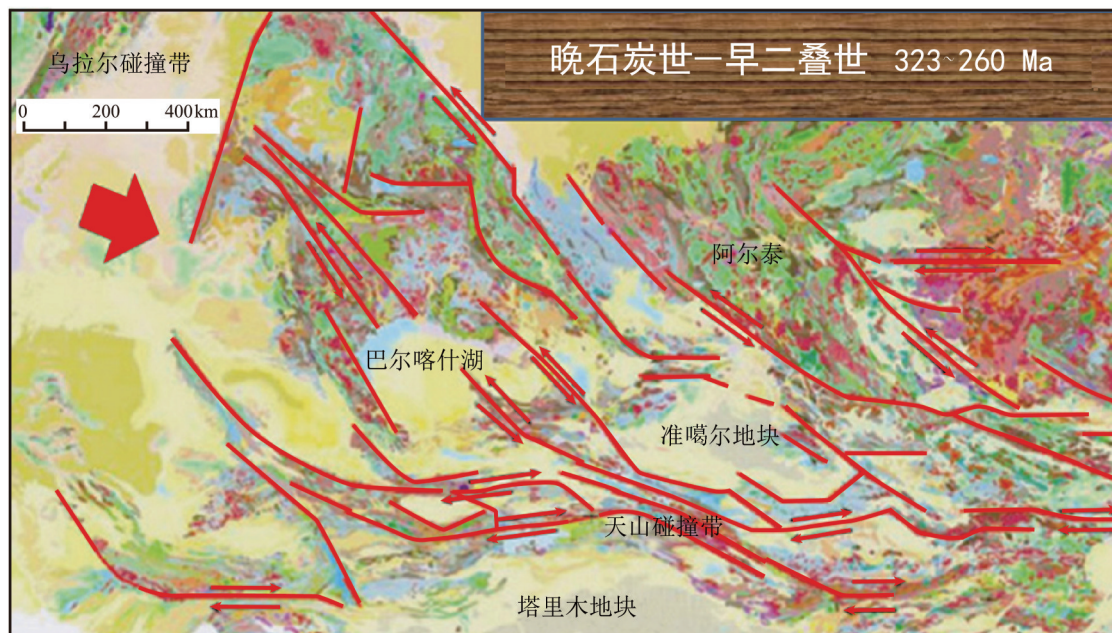


图2 巴尔喀什—天山—阿尔泰地区后碰撞阶段(晚石炭世—二叠纪)区域应力状态与断层的走滑方向
(据[13-21]的资料绘制)

大红箭头示区域挤压与缩短方向,一对小黑箭头示:近EW向断层为右行走滑,NW向断层为左行走滑断层

Fig.2 Regional maximum principal compressive stress orientation and strike-slip fault in Balkhash-Tianshan-Altay area during the post-collision period (Late Carboniferous - Permian) (modified after [13-21]). The big red arrow shows the trend of regional compression and shortening. A couple of small and black arrows show the dextral or sinistral strike-slip fault

炭世(385~323 Ma)走向北西的断层表现为右行走滑活动,而近东西向断层均为逆断层的特征,说明该区受到近南北向的缩短和碰撞作用(图1),这是该区晚古生代碰撞作用的影响所致。而在晚石炭世—二叠纪(323~260 Ma)的构造作用,却使所有NW向断层转变为大幅度的左行走滑,近东西向断层则转变为右行走滑活动。其动力作用的来源就无法用南北向碰撞作用来解释,此时的最大主压应力方向显然应该在NW与EW向断层的锐角平分线附近(图2)。因而,只可能是近EW向挤压作用所派生的现象。所以,笔者推断:此时的EW向挤压作用只可能是乌拉尔碰撞带(图2)向东挤压作用的远程效应。此构造阶段也可称为后碰撞阶段,其实就是在原碰撞带内、后来发生了明显的板内变形。不过整体来看,晚石炭世—二叠纪近EW向挤压作用的强度毕竟有限,它没有使整个地区的叶理面发生根本性的改造,而只是沿断裂发生新的滑脱,改变了先存断裂的滑动方向,派生了一些局部的褶皱与裂隙带。

在中亚地区的构造研究中,长期以来一直存在一些疑问:为什么在近南北向汇聚、碰撞作用下,形

成的阿尔泰—中蒙古—海拉尔、卡拉干达—吉尔吉斯早古生代(541~419 Ma)增生碰撞带和巴尔喀什—天山—兴安岭晚古生代增生碰撞带,而在它们的西段哈萨克斯坦和巴尔喀什附近出现与整体构造线方向极不协调的弯月形构造带(构造线方向由NW向转为近NS—NE—近EW),形成了Xiao et al.^[28-31]所说的“哈萨克斯坦山弯构造”和“巴尔喀什山弯构造”(Kazakhstan and Balkash Orocline)。他们研究的结果是,这2个山弯构造均开始形成于石炭纪,主要定型于中二叠世到早三叠世。

如果把晚石炭世—二叠纪的NW向断层转变为左行走滑活动,EW向断层转变为右行走滑活动和哈萨克斯坦、巴尔喀什山弯构造的形成联系起来进行分析,用乌拉尔晚古生代碰撞作用所派生的向东挤压作用的远程效应来解释,就显得十分合理。这种向东挤压的远程构造作用,过去常常被人忽视,经常只是以为巴尔喀什—天山碰撞带存在着2期“造山幕”或以为是多次增生、造山作用的产物。

在此,还有一个问题值得探讨,即中国西南天山的构造活动性问题。近10年来,西南天山地区获

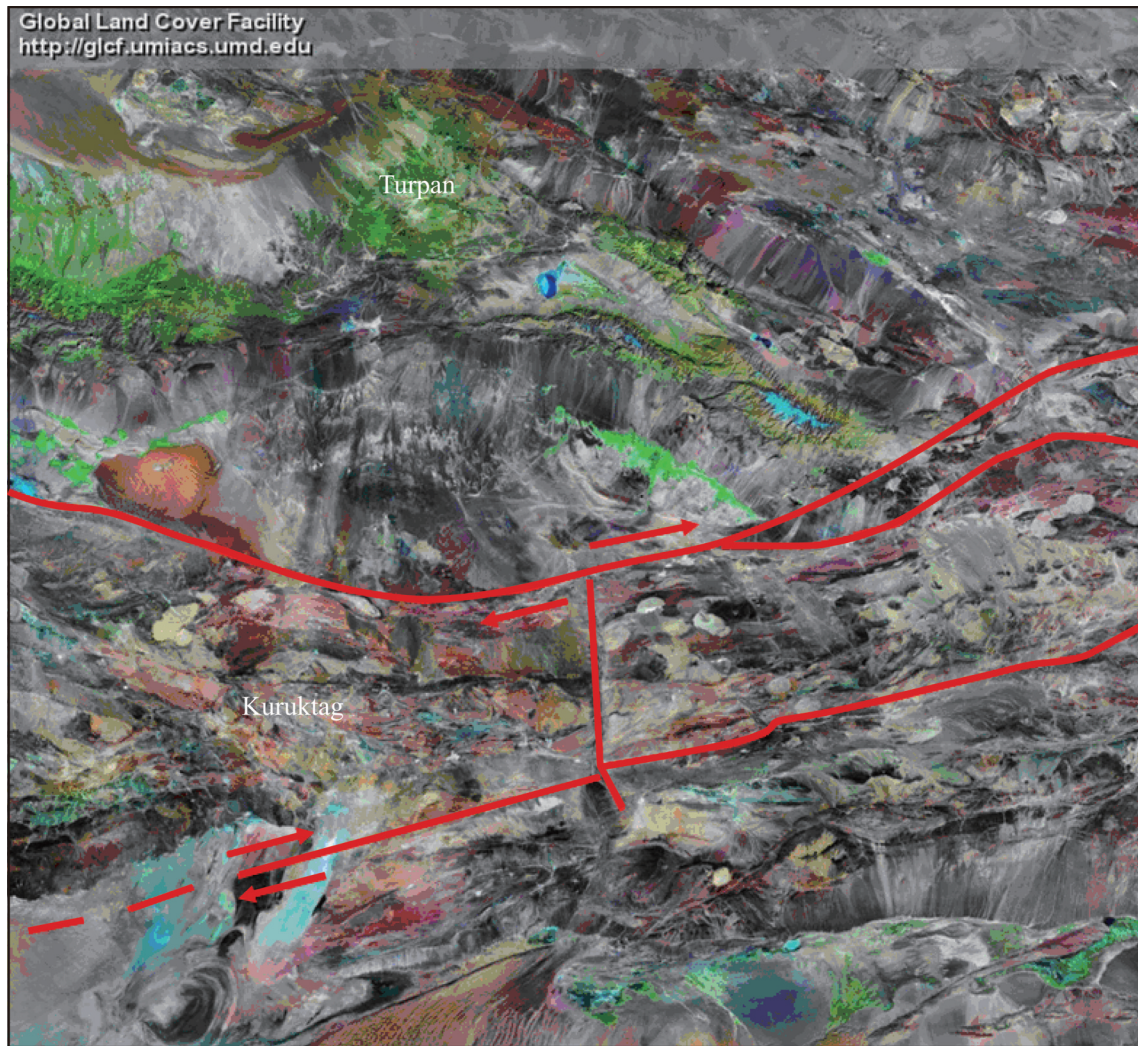


图3 新疆吐鲁番—哈密南部地区卫星影像, 示近东西向断层最终为右行走滑的特征(王小牛提供)

Fig.3 The satellite image of southern Turpan-Hami area, Xinjiang, China, approximately EW-trending faults display dextral strike-slip features during the Late Carboniferous-Permian (after Wang Xiaoniu)

得了许多晚石炭世—二叠纪蛇绿岩套、榴辉岩、蓝闪石和其他变质岩的同位素年龄数据^[15]。高俊等^[19]、龙灵利等^[32]和张招崇等^[33]认为上述特征应该是与碰撞作用相关的、发生在326~308 Ma和263~243 Ma的2期变质热事件。笔者认为,这2期变质热事件都是在天山主碰撞期之后发生的,都是在中国南、北天山之间的地块向东挤压、嵌入作用下所派生的。由于西南天山构造带与主干断层均呈ENE走向,在晚石炭世—二叠纪,受到乌拉尔碰撞带向东挤压的远程效应影响,因而ENE向一系列断裂带都表现为压-剪性的特征,它们既可形成类似于碰撞-挤压作用所构成的变质-岩浆岩系,也有右行走滑的构造特征,这是巴尔喀什—天山构造带主

碰撞作用之后的板内变形现象。巴尔喀什—天山碰撞带在晚泥盆世—早石炭世是以近南北向的汇聚-缩短作用为主要特征的,如此看来,以为西南天山的碰撞作用主要发生在晚石炭世—二叠纪的认识可能不太妥当。

由于发育在泥盆—石炭纪的乌拉尔碰撞带,距离巴尔喀什—天山—阿尔泰地区约有上千千米的距离,因而这个朝东的挤压作用对巴尔喀什—天山—阿尔泰地区的影响滞后到晚古生代晚期(323~260 Ma)。笔者粗略地估算,此强构造应力作用向东的迁移、传递速度约为2.5~3.0 cm/yr,看来是比较缓慢的。根据笔者对于在古近纪太平洋板块向西俯冲、挤压所造成的东亚板内强构造变形带逐渐向

西迁移资料的计算,其迁移的速度约为 $65 \text{ cm/yr}^{[2]}$, 大约为乌拉尔碰撞带向东挤压所造成的强变形带迁移速度的20倍左右。看来,由乌拉尔碰撞带所造成的向东挤压作用是不大强烈的。它可能只是造成岩石的适度破碎,改变了断层的活动性质,从而对巴尔喀什—天山—阿尔泰地区形成大量内生金属矿床创造了十分有利的构造条件。

乌拉尔碰撞带所造成的向东挤压的远程效应不会无限制地扩展。从现有的资料来看,其最东的影响地区可能达到贺兰山—六盘山一带。耿元生和周喜文^[34]在贺兰山—六盘山碰撞带西侧、阿拉善变质基底中发现了大量的、近SN向展布的早二叠世弱变形花岗岩类和变质岩系。采自阿拉善东部的闪长质片麻岩、含石榴英云闪长质片麻岩、英云闪长岩、条痕状黑云斜长片麻岩和片麻状花岗岩的锆石U-Pb年龄均在 $(287 \pm 2.5) \text{ Ma} \sim (269 \pm 2.4) \text{ Ma}$ 。采自阿拉善变质基底西部的粗粒花岗闪长质片麻岩和中粒闪长质片麻岩的锆石LA-ICP-MS, U-Pb年龄都在 $(289 \pm 3) \text{ Ma} \sim (276 \pm 2) \text{ Ma}$ 。尽管早二叠世花岗岩的岩石类型和化学成分不同,但它们都形成于289~269 Ma一个较短的时间范围内,属于同一期构造-岩浆热事件的产物。早二叠世花岗岩的形成年龄与基底变质岩中角闪石³⁹Ar-⁴⁰Ar的坪年龄288~277 Ma也近于一致。在阿拉善变质基底中大量早二叠世花岗岩类侵入体的发现,表明:阿拉善变质结晶基底在古生代晚期可能受到乌拉尔带向东挤压碰撞作用的影响,这是贺兰山—六盘山晚古生代发生东西向碰撞作用所伴生的构造热事件。这也可能是贺兰山—六盘山晚古生代碰撞带存在的一个重要的旁证资料。可惜的是其后的侏罗纪近东西向强烈的对冲型逆掩断层系将该地区的构造改造的十分复杂,使我们对于该地区构造演化的认识发生很大的困难。

经过晚泥盆世—早石炭世向北的碰撞作用和晚石炭世—二叠纪的向东挤压变形的改造,巴尔喀什—天山—阿尔泰地区的构造格局就基本定型了。在三叠纪和侏罗纪时期,该区发育了较微弱的近南北向的挤压作用,白垩纪—古近纪该区地壳比较稳定、未发现明显的构造变形,中新世受到更为微弱的东西向挤压,在软弱地层内形成一些十分宽缓的近南北向的褶皱^[2]。至于造成塔里木和准噶尔

地块朝天山之下俯冲,以致天山地区大幅度隆升成山的作用过程,则发生在新近纪以来的阶段,是印度板块向北运移、碰撞作用的远程效应^[2]。

3 构造成矿作用

在巴尔喀什—阿尔泰地区,早古生代经历了很强的碰撞事件,但是在此时期却很少形成什么超大型内生金属矿田或矿床,主要成矿作用都在此碰撞作用之后的晚古生代发生的。例如阿尔泰—斋桑铜、金、多金属、稀有金属矿集区内,赋存了矿区阿尔泰的哈萨克斯坦尼古拉耶夫(Nikolaev)超大型VMS型铜锌矿床和孜良诺夫斯克(Zyryanovsk)超大型铅锌多金属矿床等,它们虽然都位于早古生代碰撞带内,但其成矿作用却都是与晚古生代的火山活动密切相关^[35-38]。

新疆阿尔泰富蕴县可可托海超大型花岗伟晶岩型稀有-稀土金属(锂、铍、铌、钽、铷、铯、钆)矿床研究得比较精细,矿床也产在早古生代碰撞带内,但是成矿作用却主要发生在晚古生代的330~250.3 Ma(即石炭—二叠纪,图4^[39])。该区以NW向为主的含矿构造裂隙带,在泥盆纪—早石炭世(345~325 Ma)受到区域性的右行剪切作用影响,裂隙均呈张剪性,有利于含矿流体及岩浆的运移。而在二叠纪(280~270 Ma),NW向为主的裂隙带,受到区域性的左行剪切作用影响,裂隙呈现为压剪性,遂使构造裂隙相对闭合,

从而有利于形成伟晶岩岩浆与含矿流体的冷凝聚集与储存,以致赋存了大量的含矿伟晶岩脉。近年来,王涛等^[40]在可可托海主矿体三号伟晶岩脉内获得了SHRIMP锆石U-Pb年龄为220~198 Ma,即三叠纪。看来,此含矿伟晶岩脉可能最后定型于三叠纪。

在中国阿尔泰山南缘,还存在北西向的贵金属与有色金属成矿带(以阿舍勒块状硫化物铜锌矿床为代表,图5)。该带为阿尔泰—中蒙古—海拉尔早古生代(500~397 Ma)碰撞增生带的西南部,其后又发育着强烈的晚古生代构造-岩浆活动,形成了阿舍勒火山岩带,并赋存了大型阿舍勒块状硫化物铜锌矿床。阿舍勒火山岩以富钠为特点,为海相细碧角斑岩建造。阿舍勒火山岩的同位素年龄为352.3~386 Ma,而热液成矿年龄则主要在262~242

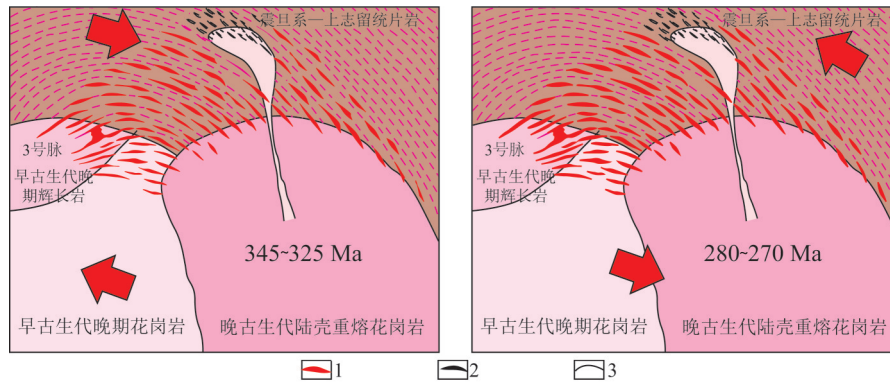


图4 新疆富蕴可可托海伟晶岩型稀—稀土金属矿床成因模式的平面图(据[39]资料改编)
1—与晚古生代陆壳重熔型花岗岩有关的锂、铍、铌、钽、铷、铯、钫矿化伟晶岩脉群;2—与三叠纪二云母花岗岩有关的铍、铌、钽、矿化伟晶岩脉群;3—地质界线;红色箭头为地块运动方向

Fig. 4 Plan view of the metallogenic model for pegmatite type rare - rare earth metal deposits in Koktokay, Fuyun, Xinjiang (modified after [39])

1-Lithium, beryllium, niobium, tantalum, rubidium, cesium and hafnium mineralized pegmatite vein group related to Late Paleozoic continental crust remelted granite; 2-Beryllium, niobium and tantalum mineralized pegmatite vein group related to Triassic two-mica granite; 3-Geological boundary; Red arrows show shear direction of blocks

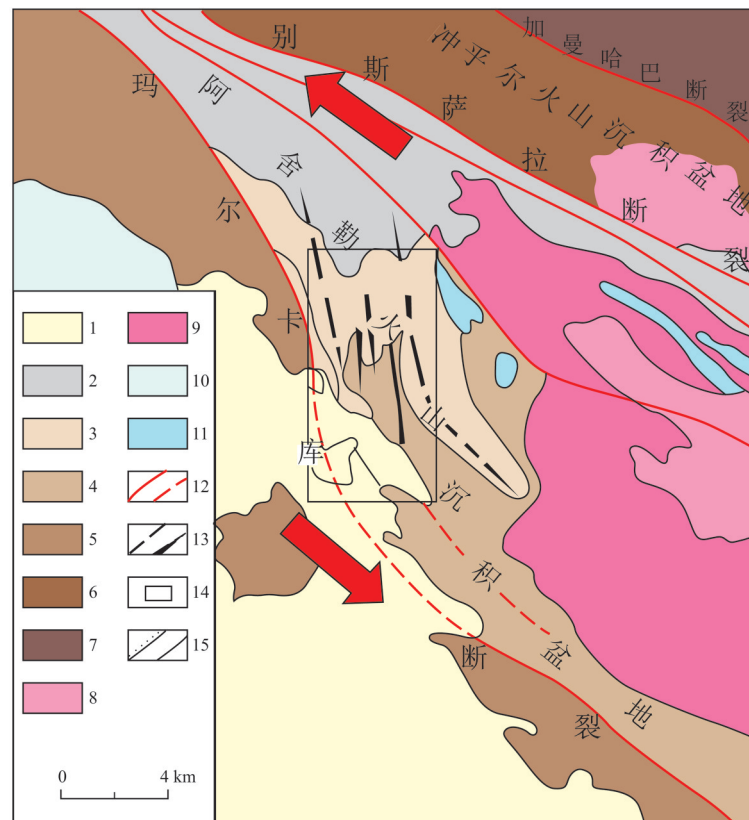


图5 新疆阿尔泰成矿带阿舍勒火山沉积盆地地质略图(据[41]改绘)

1—第四系;2—下石炭统;3—中上泥盆统;4—中下泥盆统阿舍勒组;5—中下泥盆统托克萨雷组;6—中泥盆统阿尔泰组;7—下泥盆统;8—晚古生代二长花岗岩;9—晚古生代斜长花岗岩;10—晚古生代英云闪长岩;11—晚古生代辉长闪长岩;12—断裂;13—背斜与向斜;14—阿舍勒矿区;15—地质界线;红色箭头示二叠纪末期地块受左行剪切作用的影响

Fig.5 Sketch geological map of the metallogenic belt and the volcanic rock basin in Ashele of Altay, Xinjiang (modified after [41])
1-Quaternary; 2-Lower Carboniferous; 3-Middle-Upper Devonian; 4- Middle-Lower Devonian Ashele Formation; 5- Middle-Lower Devonian Tuokesalei Formation; 6- Middle Devonian Altay Formation; 7-Lower Devonian; 8-Late Paleozoic monzonitic granite; 9-Late Paleozoic plagioclase granite; 10-Late Paleozoic tonalite; 11-Late Paleozoic gabbro diorite; 12-Fault; 13-Anticline and syncline; 14-Ashele mining area; 15-Geological boundary; The red arrows show influence on Permian blocks by sinistral strike slip

Ma, 即主要在二叠纪末期^[41]。根据区域构造应力状态的特征, 在早石炭世(345~325 Ma)受走向NW的区域性断裂右行走滑活动的影响, 此时的阿舍勒地区近南北向的次级派生断裂呈张剪性, 有利于含矿流体的运移。而在早二叠世(280~270 Ma)时期, 当NW向区域性断裂转为左行走滑活动时, 使矿区受到近EW向的局部挤压, 从而造成火山岩盆地内形成一系列次级的近南北向褶皱, 而近SN向的断裂、裂隙则呈现为压剪性, 具有一定的封闭作用, 以致有利于阿舍勒块状硫化物铜锌矿床的赋存。

西南天山是世界上著名的金-汞-锑-稀有金属成矿带。在乌兹别克斯坦东部, 金矿资源极为丰富,

储量以超大型的穆龙套(Muruntau, 41°22'N, 64°32'E)金矿床为最大^[35-37](图6), 矿化带总长度约12 km。该矿床位于乌兹别克斯坦齐尔库姆沙漠腹地, 年产金21 t(另有资料估计产量可能达80 t), 已探明的金储量约5000 t, 平均品位为2~11 g/t, 预计在金矿床深1500 m的范围内, 还有1830 t的资源量^[35-37]。穆龙套金矿区(图6)内主要的褶皱构造为塔斯卡兹甘复背斜, 其轴线走向近东西, 向东倾伏, 倾角15°~30°, 次级褶皱穆龙套背斜构成其南翼。矿区出露的地层为从寒武纪到奥陶纪, 厚约5 km的别索潘(Besapan)组, 由一套变质粉砂岩、砂岩和泥岩组成。矿区地层的下部为碳酸盐-陆源-火山沉积岩

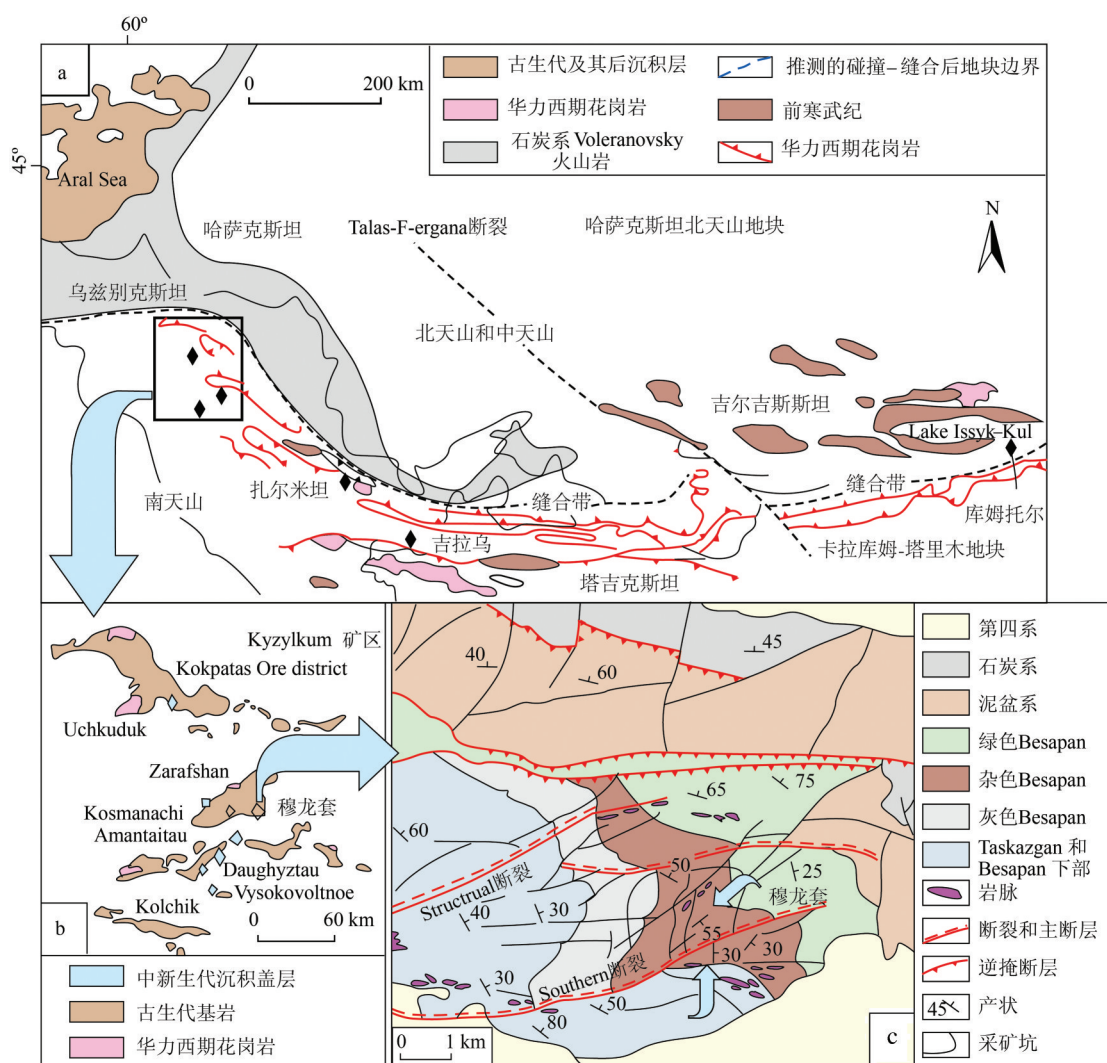


图6 西南天山穆龙套(Muruntau)金矿床区域及矿区地质略图(据[35-37,42]的资料改绘)

Fig.6 Sketch geological map of the Muruntau gold deposit and mining area in southwest Tianshan (modified after[35-37,42])

系;上部为陆源的复理石建造。根据同位素年代学与古生物学的研究表明,别索潘组其实是一个构造混杂岩系。矿区的边缘出露浅色成分的岩脉带,2个花岗闪长岩岩株分布在矿区的东南部。在矿区中部,发育着北西向片理—流劈理裂隙带,长10余km,宽约1km,岩石强烈破碎成角砾岩、糜棱岩,有人把该带称为“千枚糜棱岩”带,带内强烈发育硅化、黑云母化、钾长石化,金矿体主要产于NW向强硅化带内。金矿体的产状严格受控于剪切带及其衍生的韧性—脆性断裂系统,矿床由大量的网状脉所构成。矿脉一般宽15~20cm,为含金黄铁矿—毒砂—石英脉。矿床总体上是一个规模巨大、构造复杂的,呈向东微倾的陡立柱状体。矿脉中硫化物的平均含量为0.5%~1.5%,金元素具有多次析出和再分布的特征,并混有银、铜、铋、铅、砷和铁等。银平均品位为100~300g/t。根据同期形成的矿石矿物的Rb—Sr、Sm—Nd和Re—Os等同位素年龄测定,穆龙套金矿的成矿年龄在270~290Ma,即为二叠纪^[42]。

此时东西向断裂呈现为右行走滑活动,在NW向、略带张性的左行剪切性裂隙系内就可富集成矿。据Groves et al.的研究^[43],乌兹别克的金矿带Muruntau矿床的构造岩浆活动的同位素年代为310Ma,而成矿年代为271~261Ma,与Graupner et al.^[42]的研究结果相近。而矿区内ENE向的断层(图6下部)表现为压剪性的特征,并不很有利于矿液的储存、富集。由近年来2个超深钻孔(6000多米)的资料,可以看出穆龙套金矿的成矿物质来源与深部花岗岩有关,而不是取自于杂色别索潘组,或仅仅与早古生代黑色岩系的同沉积作用相关^[35-37]。由于受波罗的板块相对向东运移和乌拉尔碰撞带向东挤压作用的影响,使矿区内近EW向与NW向的岩层沿叶理面发生适度的张裂,并在断裂交叉点附近形成此矿床有用元素的高度富集,从而构成网脉状的、总体呈陡立、柱状的矿体。过去,中国一些地质工作者老是只想在新疆的“黑色岩系”内找寻“穆龙套式”金矿床,现在看来显然是不妥当的。

在东天山,晚泥盆世—早石炭世为天山碰撞带形成时期。而在晚石炭世—早二叠世时期,近东西向的断层发生了较大幅度的右行走滑活动,派生了一系列ENE向的压剪性裂隙或小断层以及WNW向张剪性裂隙或小断层,它们就经常成为热液金属

矿床的良好赋存部位,构成了著名的东天山贵金属和多金属成矿带内的一系列矿床^[35](图7),以香山铜镍矿床(图7,16号矿床)与黄山东铜镍矿床(图7,18号矿床)为代表的矿床,它们都是晚石炭世—早二叠世成矿作用的产物。

沿此带赋存的几个火山岩与岩浆矿床的形成年代主要都是300~282Ma,镁铁—超镁铁岩体和铜矿床均主要赋存在主断裂带所派生的ENE向次级压剪性脆性断层之中,但是其富矿体则主要赋存在其中局部陡倾斜的、张剪性裂隙带内。而绝大多数热液矿床则都在更晚一点的时期形成,即主要为二叠纪晚期^[35](261~252Ma)。由此可以看出,此带与成矿作用关系密切的火山岩和矿化蚀变的形成时代主要都是在晚古生代晚期,是在断层带转变成右行走滑的阶段形成的,而不是天山带主碰撞期(385~323Ma)的产物。总之,这些在天山碰撞带内二叠纪形成的内生金属矿床,显然都是在碰撞作用发生之后,也可称为后碰撞阶段,是在板块内部区域性断层调整为右行走滑过程中形成的。可惜的是国内过去一些区域成矿作用的研究常常只注意各个时代区域地质构造带的划分而不注意成矿作用是否与该构造带同时形成,当然这也和当时缺乏成矿作用年代数据有关^[44]。

在准噶尔地块的最南端,东天山近EW走向的康古尔塔格俯冲—碰撞带(天山碰撞增生带北缘,断层面为向南陡倾斜)内,还发育了土屋大型斑岩铜矿床^[35](图7,9号矿床)。含矿岩体主要为闪长玢岩及斜长花岗斑岩。该矿区内的含矿侵入体——斜长花岗斑岩的锆石U—Pb年龄为356Ma左右,Rb—Sr等时线年龄约为369Ma,均为晚泥盆世—早石炭世侵入成岩的;而辉钼矿的形成年龄则为322Ma,即成矿作用还是在晚石炭世早期形成的。由于俯冲带的主断面是向南倾斜的,土屋斑岩铜矿床的产状与主断裂面几乎平行,也是走向东西、并向南陡倾斜的,形成了规模较大的矿体。不过,该矿床并非赋存于主断裂面内,而是在其旁侧的次级走滑断层内。

在天山西段,吉尔吉斯赋存着著名的库姆托尔(Kumtor)超大型金矿床和波济穆恰克矽嘎岩型铜金矿床,它们也是二叠纪早期(Ar—Ar坪年龄在(284.3±3.0)Ma~(288.4±0.6)Ma)形成的,主要赋存

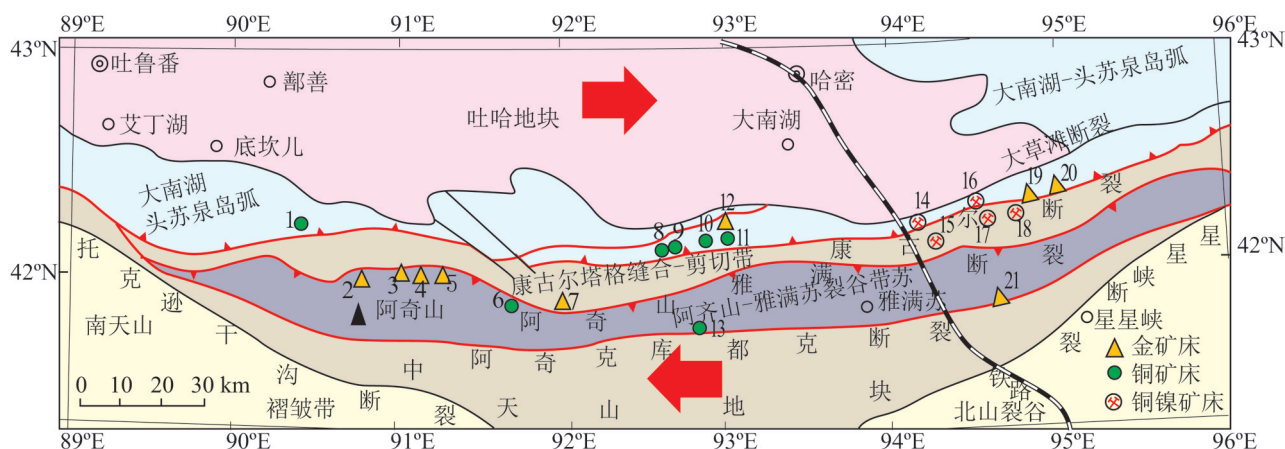


图7 东天山(吐鲁番—哈密南部)贵金属和多金属成矿带地质构造略图(据[35]改绘)

矿床编号与名称:1—小热泉子铜矿;2—石英滩金矿;3—康西金矿;4—康古尔金矿;5—马头滩金矿;6—维权金矿;7—夹白山金矿;8—延东金矿;9—土屋铜矿;10—灵龙铜矿;11—赤湖铜矿;12—小红山金矿;13—路白山铜矿;14—土墩铜镍矿;15—二红洼铜镍矿;16—香山铜镍矿;17—黄山铜镍矿;18—黄山东铜镍矿;19—148金矿;20—梧桐窝子南金矿;21—白石沟金矿;红色大箭头为成矿时地块的转移方向

Fig.7 Sketch geological map of precious metal and polymetallic metallogenic belt in eastern Tianshan Mountains (southern Turpan-Hami) (modified after [35])

Serial number and name of ore deposit: 1-Xiaorequanzi copper deposit; 2-Shiyingtang gold deposit; 3-Kangxi gold deposit; 4-Kangguer gold deposit; 5-Matoutan gold deposit; 6-Weiquan gold deposit; 7-Jiabaishan gold deposit; 8-Yandong gold deposit; 9-Tuwu copper deposit; 10-Linglong copper deposit; 11-Chihu copper deposit; 12-Xiaohongshan gold deposit; 13-Lubaishan copper deposit; 14-Tudun copper-nickel deposit; 15-Erhongwa copper-nickel deposit; 16-Xiangshan copper-nickel deposit; 17-Huangshan copper-nickel deposit; 18-Huangshan East copper-nickel deposit; 19-No. 148 gold deposit; 20-Wutongwozi South gold deposit; 21-Baishigou gold deposit; The big red arrows show shear directions of the block during mineralization

在走向ENE的右行走滑断裂带及其次级的压剪性裂隙带内^[45],显然也属于碰撞后的板内变形时期成矿的。

在蒙古国南部边境地区欧玉陶勒盖(Oyu Tologoi)赋存了超大型斑岩型铜金矿床。此矿床处在巴尔喀什—天山—兴安岭晚古生代(360~260 Ma)碰撞增生带中部的北缘。欧玉陶勒盖铜金矿床赋存于上泥盆统斑岩体内,围岩主要为酸性到中性的火山与火山碎屑岩,并被早石炭世—早二叠世花岗质岩体所侵入。据辉钼矿的Re-Os测年,此矿床的成矿年代为373~370 Ma,即晚泥盆世形成的^[46-48],为晚古生代主碰撞时期成矿的一个重要实例。矿床明显地受NNE向张剪性断层(横张断裂)所控制,而不是沿着碰撞带近东西向区域性主干断层展布。

综上所述,可见晚古生代早期(晚泥盆世—早石炭世,385~323 Ma)是巴尔喀什—天山碰撞带的主碰撞时期,构造作用应该是最强烈的,岩石较为破碎,十分有利于成矿流体的运移,断裂容易与地表相连通,因而也更容易使含矿流体散失。只有在

主碰撞时期形成的、规模较小的、与地表不连通的断裂及其附近的次级裂隙带内才有利于聚集和赋存矿体。因而,在主碰撞期成矿的机会比较少一些。而在晚古生代晚期(晚石炭世—二叠纪,323~260 Ma)受乌拉尔碰撞带向东挤压的、较弱的远程效应影响,使巴尔喀什—天山—阿尔泰地区原来的构造裂隙适度地张开,很多构造裂隙未与地表贯通,从而使该地区具有十分有利的赋存矿床的条件,以致形成了大量的超大型内生金属矿床。看来,“造山带(Orogenic)成矿论”^[37, 42, 49-54]并不适用于亚洲大陆中部的天山—阿尔泰地区,而“后造山阶段”也即碰撞带形成后的板内变形时期才是该区形成大量超大型内生金属矿床的主要阶段。

4 讨论与建议

巴尔喀什—天山—阿尔泰地区位于古生代的碰撞带内,是亚洲大陆岩石圈核心部分——西伯利亚板块南部的外围增生带。它们原来是由位于南半球的许多小地块所组成,后来随西伯利亚板块—

起运移到北半球的中纬度地区,通过早、晚古生代的2次碰撞事件而使其构造格局基本定型,同时也在适度破碎的部位构成一些内生金属矿床。在晚古生代晚期(晚石炭世—早二叠世)受乌拉尔碰撞带向东挤压作用的远程效应影响,造成部分裂隙重新适度地张开,使该地区成为内生金属矿床极为有利的赋存部位,从而形成了大量的内生金属矿床。

巴尔喀什—天山—阿尔泰地区,在主碰撞期之后大量成矿的事实,并非特例。根据笔者最近的统计与研究,在亚洲大陆,这是一种相对比较普遍的现象。根据笔者对亚洲大陆191个大型或超大型内生矿床或矿田的成矿期与构造变形阶段的关系进行了统计(图8),分别为:形成于前碰撞期(或结晶基底形成之前)为16个(占8.4%);同碰撞期(包括同俯冲期)为36个(占18.8%);板内变形期(包括矿床的位置虽然处在碰撞带内,但是成矿期却在主碰撞作用之后,也即“碰撞期后”,或者称之为“后碰撞期”成矿的52个)共计为137个(占71.7%);另有2个矿床未能确定与构造作用的关系。上述资料都说明在构造作用适度的、不太强烈的阶段,即板内变形期或“后碰撞期”,对亚洲大陆来说,是最有利于形成大型与超大型内生金属矿床的。同碰撞期形成的矿床,一般也不赋存在主断裂面内,而是形成

于主断裂面附近的次级破碎带内,也就是说矿床仍主要是赋存在构造作用不太强烈的部位。

部分学者盲目套用前人的说法,把国内绝大多数内生金属矿床都说成是“造山型”的^[37, 42, 49-54],并以为“造山带是找寻内生金属矿床的最佳部位”,“造山作用越强烈就越有利于成矿作用”^[55],这些说法是不符合亚洲大陆的基本地质事实的。上述事实告诉我们,内生金属矿床,常常并不在构造作用最强烈的时期形成,也不在构造作用最强烈的部位赋存。构造作用最强烈的部位,既有利于含矿流体的运移,也有利于它们散失到大气圈与水圈中去。“造山带成矿”的假说,只能说在原来碰撞作用较强烈的地区,在后来适度构造作用下可能更容易形成大型矿床,其实此时的成矿作用与碰撞作用或所谓的“造山作用”已经没有什么关系了。这与俯冲带成矿的机制是完全不同的,不能到处套用,需要谨慎地对待。

综上所述,成矿规律的研究必须在弄清矿床的物质组成、成因类型、工业类型的基础之上,大力加强成矿年代学以及构造—成矿作用(包括构造应力场)的研究,必须掌握成矿作用时期的构造作用背景和应力场特征。如果仅仅将矿床的赋存地点放到一张地质构造图上,是很难弄清其成矿规律的,因而也很难对进一步的找矿工作起到指导作用。

感谢: 感谢裴荣富院士及其研究集体和中国地质科学院矿产资源研究所对本课题研究的支持和帮助,也感谢李廷栋院士、肖序常院士、王瑜教授、刘少峰教授、毛景文教授、王涛研究员、聂凤军研究员和张作衡研究员等提供了宝贵资料和进行了十分有益的讨论。总之,他们的学术思想对本文的完成起到了重要启迪作用,在此一并致谢。

参考文献(References):

- [1] 万天丰. 新编亚洲大地构造区划图[J]. 中国地质, 2013, 40(5): 1351-1365.
Wan Tianfeng. A new Asian tectonic unit map[J]. Geology in China, 2013, 40(5): 1351-1365(in Chinese with English abstract).
- [2] Wan T F. The Tectonics of China - Data, Maps and Evolution [M]. Beijing, Dordrecht Heidelberg, London and New York: Springer and Higher Education Press, 2011: 1-501.
- [3] 李廷栋(中国主编), Uzhkenov B S, Mazorov A K (哈萨克斯坦主编), Kim B C (韩国主编), Tomurtogoo O (蒙古主编), Petrov

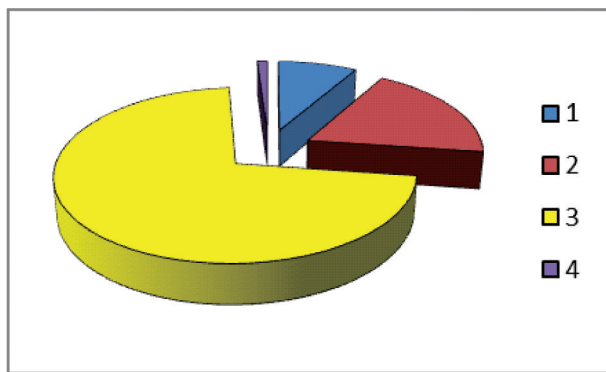


图8 亚洲大陆内生金属矿床成矿期与构造碰撞、俯冲期或板内变形期的关系

1—前碰撞期;2—同碰撞期或俯冲期;3—板内变形期;4—未知

Fig.8 The relationship between the periods of endogenic metallogeny and collision, subduction or intraplate deformation

1—Pre-collision period;2—Syn-collision or subduction period; 3—Intraplate deformation period;4—Unknown

- G V, Strelnikov S I (俄罗斯主编). 亚洲中部及邻区地质图(1:2500000)[M]. 北京: 地质出版社, 2008.
- Li T D (China), Uzhkenov B S, Mazorov A K (Kazakhstan), Kim B C (Korea), Tomurtogoo O (Monoglia), Petrov G V, Strelnikov S I (Russia). Atlas of Geological Map of Central Asia and Adjacent Areas (1 : 2 500 000) [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2008.
- [4] Petrov O, Leonov Y, Li T D, Tomurtogoo O, Hwang J H (Editor in chief). Tectonic Zoning of Central Asia and Adjacent Areas (1: 20 000 000) [M]//Atlas of Geological Maps of Central Asia and Adjacent areas (1:2 500 000). VSEGEI Cartographic Factory. 2008.
- [5] Pubellier M, Structural Map of Eastern Eurasia (1:12500000) [M]. Paris: CGMW. 2008.
- [6] 肖序常, 汤耀庆, 冯益民, 等. 新疆北部及其邻区构造演化[M]. 北京: 地质出版社, 1992: 1-169.
- Xiao Xuchang, Tang Yaoqing, Feng Yimin, et al. Tectonic Evolution of Northern Xinjiang and Its Adjacent Regions [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1992: 1-169 (in Chinese with English abstract).
- [7] Allen M, Windley B, Zhang C. Paleozoic collisional tectonics and magmatism of the Chinese Tianshan, Central Asia [J]. Tectonophysics, 1992, 220: 89-115.
- [8] 车自成, 刘洪福, 刘良, 等. 中天山造山带的形成与演化[M]. 北京: 地质出版社, 1994: 1-135.
- Che Zicheng, Liu Hongfu, Liu Liang et al. The Formation and Evolution of Middle Tianshan Orogenic Zone [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994: 1-135 (in Chinese).
- [9] Charvet J, Shu L S, Laurent-Charvet S. Paleozoic structural and geodynamic evolution of eastern Tianshan (NW China) : welding of the Tarim and Junggar plates [J]. Episodes, 2007, 30: 163-186.
- [10] 肖序常, 何国琦, 徐新, 等. 中国新疆地壳结构与地质演化[M]. 北京: 地质出版社, 2010: 1-317.
- Xiao Xuchang, He Guoqi, Xu Xin, et al. Tectonics and Geological Evolution of Xinjiang, China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2010, 1-317 (in Chinese with English abstract).
- [11] 谢家荣. 中国之矿产时代及矿产区域 [J]. 地质论评, 1936, 1(3): 363-380.
- Xie Jiarong. The orogenic time and region in China [J]. Geological Review, 1936, 1(3): 363-380 (in Chinese).
- [12] Buslov M M, Watanabe T, Fujiwara Y, et al. Late Paleozoic faults of the Altai region, Central Asia: tectonic pattern and model of formation [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2004, 23: 655-671.
- [13] 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.
- Li Jinyi, Wang Kezuo, Li Wenqian, et al. Tectonics and mineral deposit exploration of Eastern Tianshan, since Late Paleozoic [J]. Xinjiang Geology, 2002, 20(4): 295-301 (in Chinese).
- [14] Wang Y, Li J Y, Sun G H. Post-collision eastward extrusion and tectonic exhumation along the eastern Tianshan orogen, central Asia: Constraints from dextral strike-slip motion and ⁴⁰Ar/³⁹Ar geochronological evidence[J]. Journal of Geology, 2008, 116: 599-618.
- [15] Han B F, He G Q, Wang X C, et al. Late Carboniferous Collision between the Tarim and Kazakhstan-Yili terranes in the western segment of South Tian Shan Orogen, Central Asia, and implications for the Northern Xinjiang, western China [J]. Earth-Science Reviews, 2011, 109: 74-93.
- [16] Zonenshain L P, Kuzmin M L, Natapov L M, Geology of the USSR: A Plate Tectonic Synthesis [M]. American Geophysical Union, Washington D C, 1990, 1-242.
- [17] Shi Y, Lu H, Jia D, Cai D, et al. Paleozoic plate tectonic evolution of Tarim and Western Tianshan region, western China [J]. International Geological Review, 1994, 36: 1058-1066.
- [18] Bazhenov M L, Collins A Q, Degtyarev K E, et al. Paleozoic northward drift of the North Tianshan (Central Asia) as revealed Ordovician and Carboniferous paleomagnetism[J]. Tectonophysics, 2003, 366: 113-141.
- [19] 高俊, 龙灵利, 熊贤明, 等. 南天山: 一个晚古生代或三叠纪造山带[J]. 岩石学报, 2006, 22: 1049-1061.
- Gao Jun, Long Linli, Xiong Xianming, et al. South Tianshan: An orogenic belt of Late Paleozoic or Triassic [J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22: 1049-1061(in Chinese with English abstract).
- [20] Pickering K T, Koren T N, Lytochkin V N, et al. Silurian - Devonian active-margin deep marine systems and paleogeography, Alai Range, Southern Tian Shan, Central Asia[J]. Journal of the Geological Society of London, 2008, 165: 189-210.
- [21] Xiao, W J, Han C M, Yuan C, et al. Middle Cambrian to Permian subduction-related accretionary orogenesis of Northern Xinjiang, NW China: Implications for the tectonic evolution of Central Asia[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2008, 32, 102-117.
- [22] Bakirov A B, Kakitav K. Information about Geology of the Kyrgyz Republic (Kyrgyzstan) [M]. International Consortium of Geological Survey Asia-Pacific Newsletter, 2000, 3: 4-12.
- [23] Biske Y S, Seltmann R. Paleozoic Tianshan as a transitional region between the Rheic and Ural - Turkestan ocean[J]. Gondwana Research, 2010, 17: 602-613.
- [24] Laurent-Charvet S, Charvet J, Shu L S, et al. Paleozoic late collisional strike-slip deformation in Tianshan and Altay, eastern Xinjiang, NW China [J]. Terra Nova, 2002, 14: 249-256.
- [25] Laurent-Charvet S, Charvet J, Monie P, et al. Late Paleozoic strike-slip shear zones in eastern Central Asia (NW China): New structural and geochronological data [J]. Tectonics, 2003, 22,

- 1099–1101.
- [26] Natal' in B A, Sengor A M C. Late Paleozoic to Triassic evolution of the Turan and Scythian platform: the pre-history of the paleo-Tethyan closure [J]. *Tectonophysics*, 2005, 404: 175–202.
- [27] Van der Voo R, Levashova N M, Skrinnik L I, et al. Late orogenic large-scale rotations in the Tian Shan and adjacent mobilebelt in Kyrgyzstan and Kazakhstan [J]. *Tectonophysics*, 2006, 426: 335–360.
- [28] Xiao W J, Windley B F, Hao J, et al. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China[J]. *Tectonics*, 2003, 22(6): 1069. doi: 10.1029/2002TC001484.
- [29] Xiao W J, Kröner A, Windley B F. Geodynamic evolution of Central Asia in the Paleozoic and Mesozoic [J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2009, 98: 1185–1188. doi: 10.1007/s00531-009-0418-4.
- [30] Xiao W J, Windley B F, Huang B C, et al. End-Permian to mid-Triassic termination of the accretionary processes of the southern Altai: implications for the geodynamic evolution, Phanerozoic continental growth, and metallogeny of Central Asia[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2009, 98: 1189–1287. doi: 10.1007/s00531-008-0407-z.
- [31] Xiao W J, Santosh M. The western Central Asian Orogenic Belt: A window to accretionary orogenesis and continental growth [J]. *Gondwana Research*, 2014, 25: 1429–1444.
- [32] 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, 1: 67–75.
- Long Linli, Gao Jun, Xiong Xianming, et al. Ophiolite geochemistry characteristics and its age in Kule Lake of South Tianshan [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 1: 67–75 (in Chinese).
- [33] 张招崇, 董书云, 黄河, 等. 西南天山二叠纪中酸性侵入岩的地质学和地球化学: 岩石成因和构造背景[J]. *地质通报*, 2009, 28: 1827–1839.
- Zhang Zhaochong, Dong Shuyuan, Huang He, et al. Geology and geochemistry of Permian acid-intermediate intrusion in Southwest Tianshan [J]. *Geological Bulletin of China*, 2009, 28: 1827–1839 (in Chinese with English abstract).
- [34] 耿元生, 周喜文. 阿拉善变质基底中的早二叠世岩浆热事件——来自同位素年代学的证据[J]. *岩石学报*, 2012, (9): 3–21.
- Gen Yuanshen, Zhou Xiwen. Early Permian magmatic-thermal event in Alxa metamorphic basement—the evidence from isotopic ages [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, (9): 3–21 (in Chinese).
- [35] 毛景文, 杨建明, 韩春明, 等. 东天山晚古生代铜金多金属矿床成矿系统和成矿地球动力学模型[J]. *地球科学*, 2002, 27 (4): 413–424.
- Mao Jingwen, Yang Jianming, Han Chunming et al., Copper-gold-polymetallic deposit metallogenic system and geodynamic model of Late Paleozoic in Eastern Tianshan[J]. *Earth Science*, 2002, 27 (4): 413–424 (in Chinese with English abstract).
- [36] 毛景文, 张作衡, 王义天, 等. 国外主要矿床类型、特点及找矿勘查[M]. 北京: 地质出版社, 2012, 1–480.
- Mao Jingwen, Zhang Zuoheng, Wang Yitian, et al. *Mineral Deposits: Type, Characteristics and Explorations* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2012, 1–480 (in Chinese).
- [37] 毛景文, 张作衡, 裴荣富(主编). 中国矿床模型概论[M]. 北京: 地质出版社, 2012: 1–560.
- Mao Jingwen, Zhang Zuoheng, Pei Rongfu. *Mineral Deposit Models in China* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2012, 1–560 (in Chinese).
- [38] 吴振寰, 邬统旦, 唐昌韩. 中国周边国家地质与矿产[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1993: 1–268.
- Wu Zhenhuan, Wu Tongdan, Tang Changhan, *Geology and Mineral deposits in Adjacent Countries of China* [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1993, 1–268(in Chinese).
- [39] 邹天人, 李清昌. 中国新疆稀有及稀土金属矿床[M]. 北京: 地质出版社, 2006: 1–284.
- Zou Tianren, Li Qingchang, *Rare Metal and Rare Earth Metal Ore Deposits in Xinjiang, China*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2006: 1–284 (in Chinese with English abstract).
- [40] Wang T, Tong Y, Jahn B M, et al. SHRIMP U–Pb zircon geochronology of the Altai No.3 pegmatite, NW China, and its implications for the origin and tectonic setting of the pegmatite [J]. *Ore Geology Review*, 2007, 32: 325–336.
- [41] 陈毓川, 叶庆同, 冯京, 等. 阿舍勒铜锌成矿带黄铁矿型多金属成矿带和成矿预测[M]. 北京: 地质出版社, 1996: 1–330.
- Chen Yuchuan, Ye Qingtong, Feng Jing, et al. Pyrite-type Polymetallic Metallogenic Belt and Metallogenic Prediction in Ashele Copper zinc Metallogenic Belt [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996, 1–330 (in Chinese with English abstract).
- [42] Graupner T, Niedermann S, Kempe U, et al. Origin of ore fluids in the Murumtau gold system: Constraints from noble gas, carbon isotope and halogen data [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2006, 70: 5356–5370.
- [43] Groves D I, Goldfarb R J, Gebre-Mariam M, et al. Orogenic gold deposits: A proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types [J]. *Ore Geology Reviews*, 1998, 13(1/5): 7–27.
- [44] 王京彬, 王玉往, 何志军. 东天山大地构造演化的成矿示踪[J]. *中国地质*, 2006, 33(3): 461–469.
- Wang Jingbin, Wang Yuwang, He Zhijun. Ore deposits as a guide to the tectonic evolution in the East Tianshan Mountains, NW China [J]. *Geology in China*, 2006, 33(3): 461–469(in Chinese with English abstract).
- [45] 陈喜峰, 彭润民, 刘家军, 等. 吉尔吉斯斯坦库姆托尔超大型金矿床地质特征[J]. *黄金*, 2010, 31(12): 15–19.

- Chen Xifeng, Peng Ruanmin, Liu Jiajun, et al. The geological characteristics of Kumtor super large gold deposit in Kirgizstan [J]. *Gold*, 2010, 31(12): 15–19(in Chinese).
- [46] 聂凤军, 江思宏, 张义, 等. 中蒙边境及邻区斑岩型铜矿床地质特征及成因[J]. *矿床地质*, 2004, 23 (2): 176–189.
- Nie Fengjun, Jiang Sihong, Zhang Yi, et al. The Geological characteristics and origin of porphyry type copper deposit in the border between China and Mongolia [J]. *Geology and Ore Deposit*, 2004, 23 (2): 176–189. (in Chinese).
- [47] 聂凤军, 江思宏, 白大明, 等. 中天山及邻区金属矿床成矿规律和找矿方向[M]. 北京: 地质出版社, 2005, 1–371.
- Nie Fengjun, Jiang Sihong, Bai Daming, et al. *Metallogeny and Prospecting for Middle Tianshan and Adjacent* [M]. Beijing: Geological Publishing House. 2005, 1–371(in Chinese).
- [48] 张新元, 聂秀兰. 蒙古国南部欧玉陶勒盖铜(金)矿田找矿勘查与成矿理论研究新进展[J]. *地球学报*, 2010, 31 (3): 373–382.
- Zhang Xunyuan, Nie Xiulan. New progress of prospecting and metallogeny theory for Oyu Tolgoi copper – gold ore field in southern Mongolia [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2010, 31 (3): 373–382. (in Chinese with English abstract).
- [49] Kerrich R, Wyman D A. The geodynamic setting of mesothermal gold deposits: An association with accretionary tectonic regions [J]. *Geology*, 1990, 18: 882–885.
- [50] Barley M E, Groves D I. Supercontinent cycles and the distribution of metal deposits through time [J]. *Geology*, 1992, 20: 291–294.
- [51] Goldfarb B J, Groves D I, Gardoll S. Orogenic gold and geologic time: A global synthesis[J]. *Ore Geology Reviews*, 2001, 18: 1–75.
- [52] 陈衍景. 准噶尔造山带碰撞体制的成矿作用及金等矿床的分布规律[J]. *地质学报*, 1996, 70(3): 253–261.
- Chen Yanjing, Mineralization during collisional orogenesis and its control of the distribution of gold deposits in Junggar mountains, Xinjiang, China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1996, 70 (3): 253–261 (in Chinese with English abstract).
- [53] 陈衍景. 中国西北地区中亚型造山–成矿作用研究意义和进展[J]. *高校地质学报*, 2000, 6(1): 17–22.
- Chen Yanjing, Research and progress for Central Asia type orogeny–metallogeny in Northwest China [J]. *Geological Journal of China Universitise*, 2000, 6(1): 17–22 (in Chinese with English abstract).
- [54] 陈衍景. 造山型矿床、成矿模式及找矿潜力[J]. *中国地质*, 2006, 33(6): 1181–1195.
- Chan Yanjing, Orogenic type ore deposit [J]. *Geology in China*, 2006, 33(6): 1181–1195 (in Chinese with English abstract).
- [55] 邱小平. 碰撞造山带与成矿区划[J]. *地质通报*, 2002, 21(10): 675–681.
- Qiu Xiaoping. Collision orogenic belt and metallogenic division[J]. *Geological Bulletin of China*, 2002, 21(10): 675–681(in Chinese with English abstract).