

# 中亚成矿域核心地区地质演化与成矿规律

朱永峰, 何国琦, 安 芳

ZHU Yong-feng, HE Guo-qi, AN Fang

造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871

Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, Ministry of Education,

School of Earth and Space Science, Peking University, Beijing 100871, China

摘要: 中亚成矿域地质演化的重要特征是: 古生代地壳生长和演化的多阶段性、多旋回物质的活化-再活化、成矿环境的长期性和周期性, 这些特征导致域内成矿物质的多次迁移和聚集。中亚成矿域由若干个成矿省组成, 其核心部分由阿尔泰成矿省、环巴尔喀什-准噶尔成矿省和中-南天山成矿省构成。成矿省由多个成矿带构成, 每个成矿带由若干个矿集区组成, 每一个矿集区包含至少1个大型—超大型矿床。古亚洲洋关闭后, 中亚成矿域核心地区普遍发育的印支期成矿作用主要受韧性剪切带和小型壳源岩浆活动控制。中亚成矿域核心地区的关键科学问题包括古南天山俯冲带流体-岩浆演化过程对成矿作用的制约、巨型斑岩铜矿带的形成环境、晚古生代大地构造格局重建、巨型韧性剪切带的特征及其对金成矿作用的控制机制。

关键词: 中亚成矿域; 环巴尔喀什; 准噶尔; 天山; 成矿省

中图分类号: P612 文献标志码: A 文章编号: 1671-2552(2007)09-1167-11

Zhu Y F, He G Q, An F. Geological evolution and metallogeny in the core part of the Central Asian metallogenic domain. Geological Bulletin of China, 2007, 26(9): 1167-1177

Abstract: The important characteristics of the geological evolution in the core part of the Central Asian metallogenic domain are its multi-stage growth and evolution of Paleozoic crust, polycyclic mobilization-remobilization materials and long-continued and cyclic metallogenic environment. These characteristics determined multiple transport and concentration of ore-forming materials. This metallogenic domain comprises several metallogenic provinces and its core part is composed of the Altay, circum-Balkhash-Junggar and Central-South Tianshan metallogenic provinces. A metallogenic province includes several metallogenic belts, each metallogenic belt is made up of several ore deposit concentration areas, and each ore deposit concentration area contains at least one large or superlarge deposit. After the closing of the Paleo-Asian Ocean, the Indosinian metallogenesis developed in the core of the Central Asian metallogenic domain was mainly controlled by ductile shear zones and small-scale crust-derived magmatism. The key scientific problems in the core of this metallogenic domain include the constraint of the fluid-magmatic evolution on mineralization in the Paleo-South Tianshan subduction zone, environment for the formation of the gigantic porphyry copper belt, reconstruction of the Late Paleozoic tectonic framework, characteristics of the gigantic ductile shear zone and its controlling mechanism for gold mineralization.

Key words: Central Asian metallogenic domain; circum-Balkhash; Junggar basin; Tianshan Mountains; metallogenic province

中亚地区地质演化历史漫长而复杂, 其独特的地壳生长过程(包括古生代地壳垂向和侧向增生)具有区别于世界其他地区的特殊性。地壳生长的复杂性和特殊性造就了中亚成矿域复杂多样的地质

构造格局(图1-a), 该地区因此成为目前大陆动力学研究的热点区域。在中亚地区已经查明了若干个世界知名的大型矿集区, 如北哈萨克斯坦的金矿(斯杰普尼亚克、瓦西里科夫斯克耶等)、中哈萨克

收稿日期: 2007-03-05; 修订日期: 2007-06-22

科技项目: 国家科技支撑计划重点项目(编号: 2006BAB07B08)资助。

作者简介: 朱永峰(1965-), 男, 教授, 博士生导师, 从事岩石、矿床地球化学的教学和研究工作。E-mail: yfzhu@pku.edu.cn

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

斯坦(环巴尔喀什)的铁-锰-铜多金属-金和稀有金属矿、天山(包括楚-伊犁和西南天山)的金-铜-钼-钨矿等。世界第三大斑岩金铜矿Kal makyr形成于石炭纪(金储量1374 t,铜10.8 Mt), Dal neye斑岩金-铜矿床形成于石炭纪(金储量376 t,铜3.2 Mt), 哈萨克斯坦的Aktogai- Aiderly斑岩铜矿铜储量12.5 Mt<sup>[1]</sup>。这些重要矿集区毗邻中国新疆, 在新疆寻找类似的矿床(矿集区)一直是中国地质工作者的重要任务。

有关中国西部和毗邻国家矿产资源找矿潜力的国际比对研究<sup>[4-14]</sup>, 为进一步开展在中国以找矿为主要目标的工作奠定了良好的基础。笔者结合前人的研究成果, 已初步总结了中亚主要成矿带的基本特征, 在中亚成矿域初步厘定了6类大型—超大型矿床的成矿环境<sup>[14]</sup>: 在夹杂于显生宙造山带中的众多前寒武纪地块内部形成了重要的原生铀矿和稀有金属矿床; 形成于早古生代陆缘增生带的重要的金、铜多金属矿床(加里东晚期成矿); 在加里东和前加里东期陆壳围限的环巴尔喀什地区具有多个峰期和在空间上相互叠加或有一定迁移规律的成矿作用; 西南天山金-铜-钼-钨成矿带与一个长期活动的巨型水热系统相关; 中—新生代盆地中的可地侵型铀矿、晚古生代超大型砂岩铜矿等形成于碰撞后陆内环境; 大型矿床主要产在大型“横向构造”与成矿带交叉的部位。中亚成矿域由若干个成矿省组成, 其中心部分由阿尔泰成矿省、环巴尔喀什-准噶尔成矿省和中-南天山成矿省构成(成矿省还可能包含2个或者2个以上成矿亚省)。成矿省由多个成矿带组成, 每个成矿带由若干个矿集区组成, 而每一个矿集区包含至少一个大型—超大型矿床。本文初步总结了环巴尔喀什-准噶尔和中-南天山成矿省的重要地质演化规律和主要成矿特征。

## 1 环巴尔喀什-准噶尔成矿省

在哈萨克斯坦中部存在一个马蹄形的古生代岩浆岩带(即环巴尔喀什岩浆岩带, 图1-b), 其外部从寒武纪到奥陶纪增长, 内部从寒武纪到石炭纪增长。在该地区存在许多不规则的古生代洋壳残余片<sup>[15-16]</sup>。哈萨克斯坦中部蛇绿岩带普遍包含了由深海沉积物和火山岩组成的古洋壳顶层。这些岩层的年龄主要属于中奥陶世, 但深部的火山岩层很少能保存至文德期<sup>[16]</sup>。晚奥陶世造山运动很大程度上

确定了哈萨克斯坦中部的大陆环境, 广泛分布的泥盆纪—早石炭世火山—深成岩带是大陆岩浆岛弧的产物。涉及环巴尔喀什-准噶尔成矿省的关键科学问题包括: 环巴尔喀什-准噶尔成矿省成矿背景,

环巴尔喀什-准噶尔-北天山火山岩和次火山岩中铜-金多金属矿集区的形成和演化, 天山地区韧性剪切带的特征及其对金成矿作用的控制, 塔尔巴哈台山的地质演化及其对北疆地壳生长、早古生代金矿和海底喷流型铜多金属成矿作用的制约。环巴尔喀什-准噶尔成矿省由环巴尔喀什-准噶尔成矿亚省和楚伊犁-北天山成矿亚省组成。

### 1.1 环巴尔喀什-准噶尔成矿亚省

环巴尔喀什地区是中亚成矿域中最主要的金属成矿密集区, 该地区地质演化历史复杂, 形成了众多世界级的铜矿、金矿和银多金属矿床(图2-a)。环巴尔喀什-准噶尔成矿亚省主要由以下成矿带组成:

斋桑褶皱系南西部的含炭细碎屑岩型金矿成矿带, 巴尔喀什云英岩-石英脉型钼-钨-锡成矿带, 巴尔喀什重晶石-多金属和稀有金属矿带, 环巴尔喀什火山沉积型铁-锰矿带, 环巴尔喀什砂卡岩-多金属-斑岩铜-钼矿带, 塔尔巴哈台海底喷流型铜多金属成矿带。

中亚成矿域的主要斑岩铜-钼矿同时含大量金(有些甚至构成超大型金矿), 例如哈萨克斯坦的Bozshakol含6.7 Mt铜(49 t金), Kounrad含5 Mt铜(约600 t金), 乌兹别克斯坦的Kamakyр-Danee含21 Mt铜(约2650 t金), 吉尔吉斯斯坦的Taldy Bulak含1.4 Mt铜(约270 t金<sup>[18]</sup>)。最近, 一些研究者<sup>[18-21]</sup>把中亚地区斑岩型矿床的分布与包括Kipchak和Tuva-Mongol在内的一系列岛弧的形成和演化联系起来解释斑岩矿床的成因, 他们在中亚地区岛弧演化的构造基础上<sup>[15, 22]</sup>研究矿床的分布规律, 在前人所描绘的岛弧格局上标出了已经发现的重要矿床, 并总结了各类矿床的分布规律及其与岛弧演化的可能关系。

前苏联学者<sup>[23-28]</sup>、德国学者<sup>[17]</sup>和英国学者<sup>[29]</sup>在研究中亚地区的成矿规律时没有简单地套用岛弧模型, 而是从不同地区的地质演化历史入手, 探讨形成不同类型矿床的成矿规律。中亚成矿域中分布着众多性质和演化历史不同的地体, 这些地体具有截然不同的成矿背景并形成不同类型的矿床。西南天山、环巴尔喀什-准噶尔和阿尔泰地区的成矿作用各具特色。Pb同位素研究表明, 这些地区主要地质体的

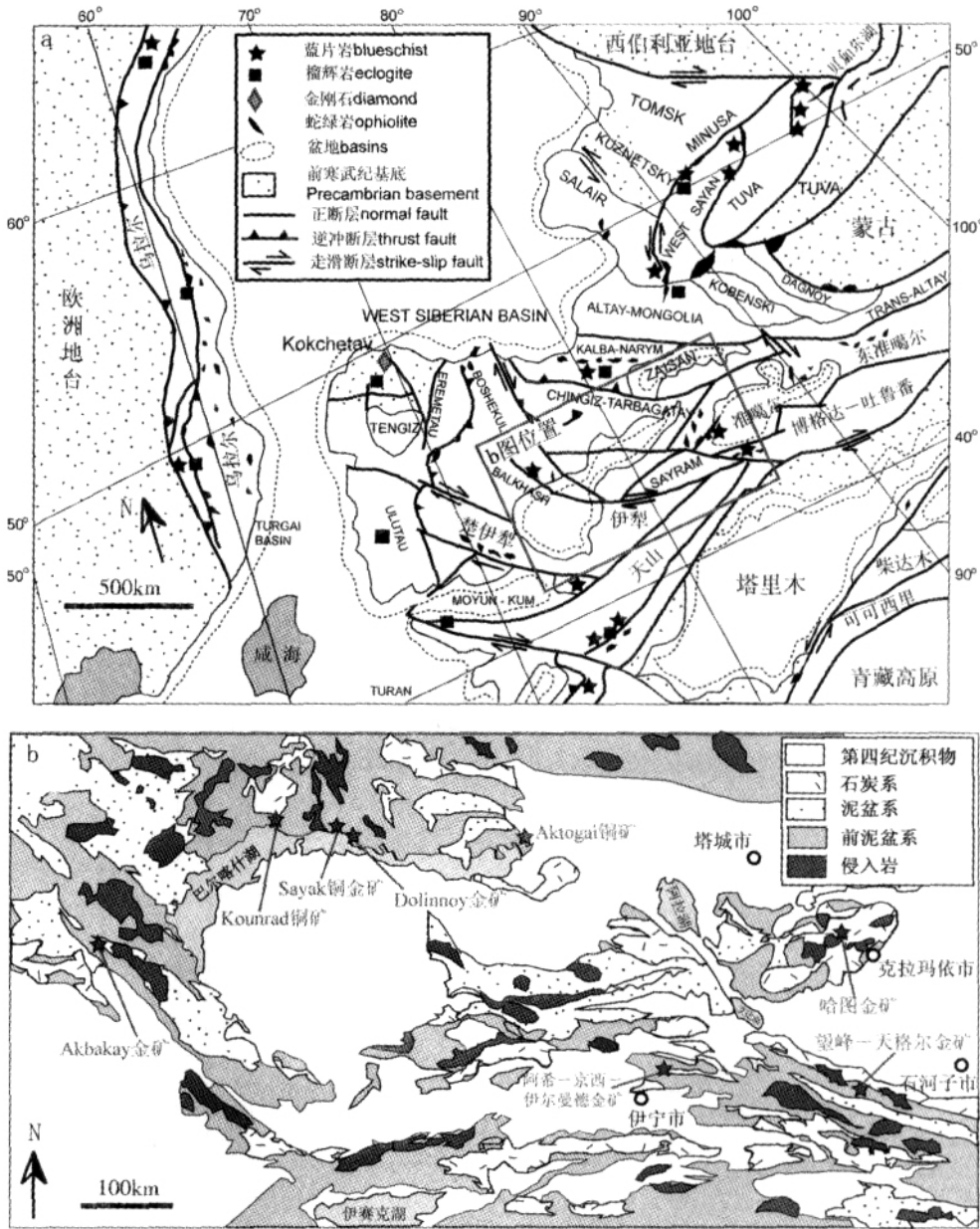


图1 中亚区域地质构造图(a)<sup>[2]</sup>和环巴尔喀什-准噶尔成矿省地质简图(b)<sup>[3]</sup>

Fig. 1 Tectonic sketch map of Central Asia (a) and geological sketch map of the circum-Balkhash-Junggar metallogenic province (b)

Pb同位素组成截然不同: 西南天山地区的Pb同位素具有成熟大陆地壳的地球化学性质, 而阿尔泰地区的Pb同位素则显示出原生地幔的地球化学特征, 介于上述二者之间的广大地区(环巴尔喀什-准噶尔)的Pb同位素地球化学性质具有大陆地壳与原生地幔混合的性质<sup>[2]</sup>。这种变化规律表明, 不同成矿省的成矿背景差别巨大, 各地体演化过程中形成的矿床类型存在

明显的差异。由于西南天山、环巴尔喀什-准噶尔和阿尔泰成矿省的地质演化具有相对的独立性, 它们的演化历史和成矿作用完全不同<sup>[2-3, 14, 30-33]</sup>, Pb同位素在3个成矿域之间表现出较大的差异, 表明其所属的地质单元具有不同的地质演化历史和特征, 很难对成矿作用提供明确的限定。

巴尔喀什湖东侧(塔尔巴哈台山南缘)分布着一



些海相块状硫化物型铜多金属矿床,如Mizek和Kosmurun矿床。这些块状硫化物矿床呈NW方向排列,与蛇绿岩伴生,表明它们的成矿作用与洋壳的形成密切相关。与它们伴生的蛇绿岩主要形成于奥陶纪,成矿作用与奥陶纪古亚洲洋的扩张密切相关。塔尔巴哈台山东延进入中国新疆塔城地区,在塔城北山发现的早奥陶世蛇绿混杂岩<sup>[34]</sup>表明,塔尔巴哈台海底喷流型块状硫化物成矿带有可能与蛇绿混杂岩带一起东延进入中国新疆西北部。中哈萨克斯坦以北的Bozchekul矿床与侵入到寒武纪铁镁质火山岩中的闪长岩-英云闪长岩伴生(英云闪长岩Rb-Sr等时线年龄为481 Ma, <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr初始值为0.703935)。

环巴尔喀什地区的许多矿床都经过了多期成矿作用叠加和成矿物质不断改造的过程。岩浆型造山构造发育的早期阶段形成了斑岩型铜-钼矿和矽卡岩-热液型重晶石-多金属矿,在造山构造发育的后期形成了稀有金属矿床,在沉积型的造山构造中先形成层状铁-锰矿和重晶石-多金属矿,稍晚形成砂岩铜矿。巴尔喀什-楚伊犁晚古生代火山-深成岩带可区分出3个主要阶段<sup>[25,35]</sup>:早造山阶段(339~311 Ma)形成安山岩-英安岩-流纹岩和闪长岩-花岗闪长岩-花岗正长岩-花岗岩系列,中造山阶段(311~300 Ma)主要以喷出酸性火山岩和形成淡色花岗岩为特征,晚造山阶段(300~245 Ma)形成了双峰式粗玄岩-粗流岩和闪长岩-正长岩-碱性花岗岩-白岗岩系列。火山-深成岩带中最重要的工业矿床与深成岩伴生,包括重要的斑岩型钼-铜矿、矽卡岩和热液型重晶石-多金属矿、云英岩和石英脉型稀有金属矿等。

巴尔喀什湖北岸有20多个大型—超大型矿床,包括Nuratdy、Aqshatau、Taskora-Sharyk-Tuz等产在火山沉积岩中的热液型金-银-钼-锡-钨矿床, Sayak矽卡岩-斑岩型矿床和Samarsk、Koktashal、Kounrad、Kosmurun、Aktogai等斑岩-热液型铜-金矿床(图2-a)。这些斑岩矿床均受石炭纪—二叠纪的次火山岩—侵入岩控制,成矿作用主要发生在晚石炭世—早二叠世。类似于中国北天山的阿希-京希-伊尔曼德金矿集区和西准噶尔的哈图-宝贝金矿集区,巴尔喀什湖北岸的Dollinoye、Arkharly、Taskora-Sharyk-Muzbel是典型的陆相火山-热液型(自然金-石英脉)金矿集区。中国北天山的莱历

斯高尔、肯登高尔、达巴特等已知斑岩(似斑岩)铜-钼-金矿和阿吾拉勒山同晚石炭世—二叠纪火山—侵入体有关的岩浆-热液金-铜矿床与哈萨克斯坦中东部地区的矿床存在很多可比性。

巴尔喀什湖北岸的Sayak群是一套中石炭世火山岩-碳酸盐岩-陆源磨拉石建造,不整合覆盖在志留纪—泥盆纪陆源沉积物和前志留纪的蛇绿岩套之上。上覆与其整合接触的晚石炭世Tastyquduk组的碎屑沉积物(从基底砾岩往上粒度逐渐减小),最上部为碳酸盐岩(从盆地西部的1~2 m厚到中心逐渐增厚到5~7 m,该碳酸盐地层是本地区矽卡岩矿床的主要赋矿围岩<sup>[18]</sup>)。侵入到该套地层中的Kungheisayak英云闪长岩的年龄为347~307 Ma,斜长花岗岩的年龄为314~310 Ma, Umit花岗闪长岩的年龄为335~304 Ma<sup>[9]</sup>。Sayak地区发育矽卡岩-斑岩型钼-钽-金-钼-铜矿化,其中矽卡岩矿化最具经济价值(图2-b、c)。从侵入体接触部位开始矿体呈带状沿碳酸盐地层分布,依次出现:磁铁矿内带(即花岗闪长岩接触带的外缘):钼-铜矿化、自然金与晚期石榴子石、辉石-石榴子石矽卡岩化伴生,矽卡岩化的花岗闪长岩内部的微弱矿化与矽卡岩化同时形成; 中带:伴随绿帘石-阳起石矽卡岩的金-铋-铜矿化; 外带:青磐岩化岩体向未蚀变的大理岩-灰岩过渡,以石英-方解石-绿泥石蚀变为主要特征。

Sayak地区最大的矿床Sayak位于Lebai岩体西缘外接触带,赋矿碳酸盐地层被一薄层凝灰质粉砂岩-砂岩分隔,其上被厚层凝灰质粉砂岩-粉砂岩覆盖。闪长玢岩、粗粒玄武玢岩及少量花岗质岩脉穿切矿体<sup>[36]</sup>。主要的磁铁矿矿体形成于绿帘石-阳起石矽卡岩化阶段。铜-钼-金矿化形成于阳起石-石英-方解石-绿泥石矽卡岩化阶段。花岗闪长岩体内部也存在微弱的浸染状矿化。矿脉产状陡,深达约500 m,延伸方向与围岩碳酸盐岩和侵入体的接触边界平行(图2-b)。矿脉中心铜的品位最高,向下倾方向及边缘逐渐降低。矿体具有明显的分带性:辉石-长石和辉石-石榴子石矽卡岩中含磁铁矿-斑铜矿-黄铜矿,北部的石榴子石矽卡岩含辉钼矿-斑铜矿-黄铜矿。阳起石-石英-方解石-绿泥石带则以毒砂-钽矿化为主要特征。品位较高的矽卡岩中含70~80 mol%钙铁榴石、20~30 mol%钙铝榴石及高铁辉石(>60 mol%的铁钙辉石)。主要矿石矿物包括黄铜矿、磁铁矿、斑铜矿、磁黄铁矿、毒砂及辉钼矿,少量

黄铁矿、辉钼矿、白铁矿、胶黄铁矿、自然金、方铅矿、闪锌矿、银金矿、碲金矿、碲金银矿及针碲金银矿等。金属矿化晚于砂卡岩化<sup>[18]</sup>。

环巴尔喀什地区的地质演化与成矿作用具有很好的耦合性<sup>[14, 17]</sup>。尽管在单独的岩浆系统中壳-幔组分比例变化很大, 但大部分岩石有相似的正  $Nd$  值( $0 \sim +5.5$ ,  $T_{DM} = 500 \sim 800$  Ma)。普遍存在年轻的TDM是中亚成矿域的重要特征。包括中国新疆在内的中亚造山域广泛分布的晚古生代岩浆岩(包括花岗岩和辉长岩)都具有正的  $Nd$  值<sup>[37-43]</sup>。Aktogai斑岩铜矿早期容矿岩石和地下壳捕虏体的Rb- Sr等时线年龄为366 Ma( $^{87}Sr / ^{86}Sr$ 初始值为0.7035)。暗色捕虏体的  $Nd$  值为+5.9, Sm- Nd等时线年龄为359 Ma<sup>[49]</sup>。哈萨克斯坦中部的稀土- 稀有金属矿化作用通过中国西北部一直延伸到蒙古南部, 该巨型矿化带与二叠纪钠闪石(±霓石)花岗岩带有关。这些过碱性钠闪石花岗岩具有高的  $Nd$  值(+5~+8<sup>[17]</sup>)。Verkhnee Espe是该成矿带中最大的矿床之一, 矿化与含钠闪石(±霓石)的花岗岩有关, 在花岗岩岩脉和交代矿脉中形成多种稀土- 稀有金属矿物。环巴尔喀什地区的矿床谱系反映了其受控于活动大陆边缘多旋回的地球动力学背景。寒武纪—奥陶纪在环巴尔喀什的外环地区形成了块状硫化物型矿床和各种铜- 金矿床, 志留纪—泥盆纪形成了锡- 钨- 钼- 铜- 金矿床, 石炭纪—二叠纪在环巴尔喀什的内环地区形成了规模巨大的斑岩型铜- 钼- 金矿床、热液型钨- 金- 铜矿床和与碱性岩浆演化有关的稀有- 稀土金属矿床。在空间上由外向内, 时间上从早古生代逐渐变化到晚古生代, 矿床类型从块状硫化物型演化到斑岩型- 砂卡岩型- 中低温热液型, 成矿环境从海底演化到大陆边缘(或者大陆弧), 并最终发展到大陆内部(大陆裂谷)。

### 1.2 楚伊犁- 北天山成矿亚省

楚伊犁- 北天山成矿亚省主要由以下几个成矿带构成: 楚伊犁- 天山早古生

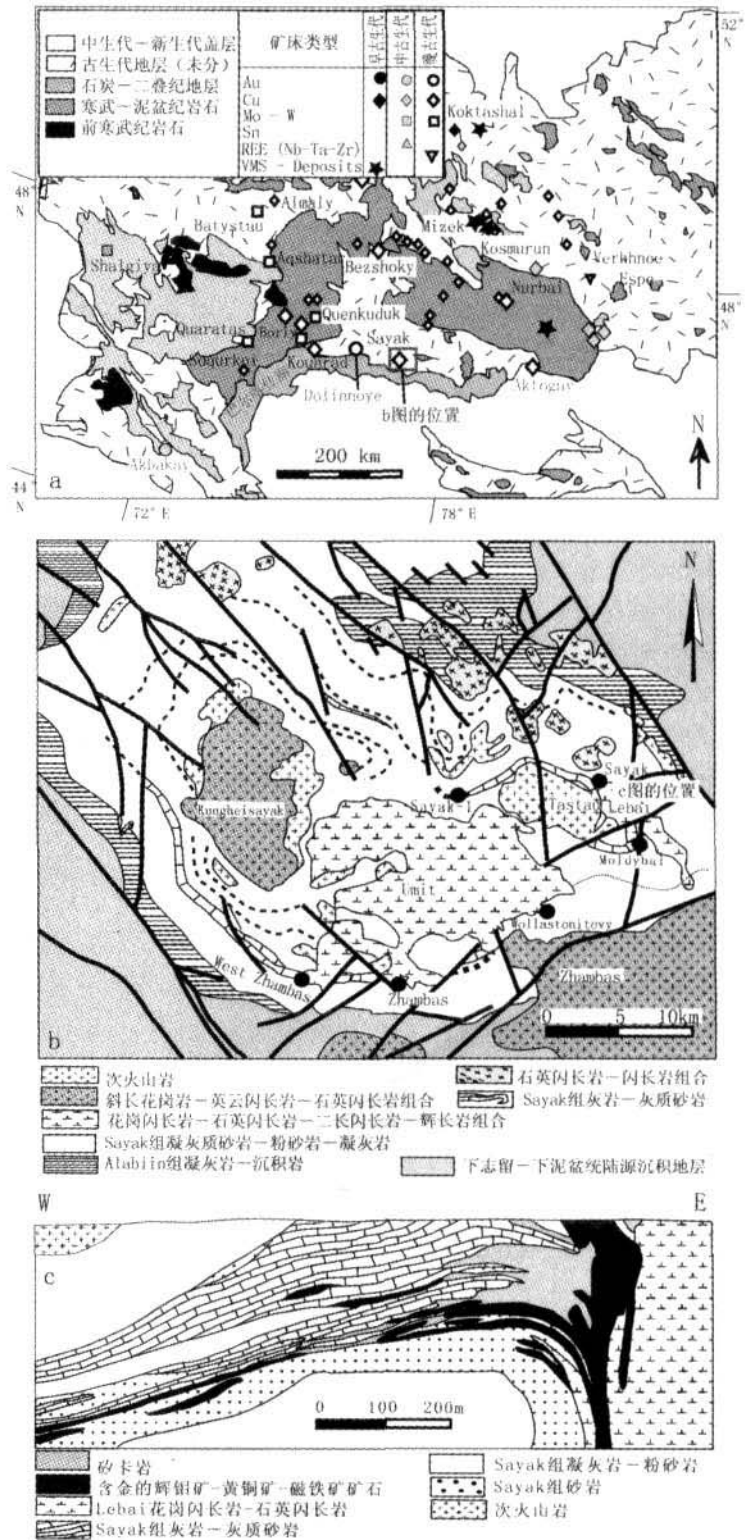


图2 巴尔喀什地区矿床地质简图(显示成矿类型与成矿时代在空间上的变化规律)(a)<sup>[17]</sup>、Sayak地区地质简图(b)和Sayak矿体剖面(c)<sup>[18]</sup>

Fig. 2 Geological sketch map of mineral deposits in the Balkhash area (a), geological sketch map of the Sayak area (b) and vertical section of orebodies in Sayak (c)



代石英脉型金成矿带(例如Aqbakai矿集区); 可可苏-捷克利-赛里木层控铅锌多金属成矿带; 北天山晚古生代火山岩型金-铜成矿带(阿希-京希-伊尔曼德矿集区); 北天山石炭纪斑岩铜矿成矿带(达巴特-莱历斯高尔矿集区)。中国境内的西北天山与境外的楚伊犁-天山成矿带连接。该地区火山活动频繁,晚泥盆世火山岩主要出露于阿拉套-科古琴晚古生代岛弧带(主要为中酸性火山碎屑岩和熔岩,图3-a)。对阿希-京希-伊尔曼德金矿区容矿安山岩中锆石的SHRIMP U-Pb年代学的研究表明,该地区的火山岩形成于晚泥盆世,而非前人一直认为的早石炭世<sup>[50]</sup>,这与阿希金矿南侧大面积分布的火山岩的锆石SHRIMP U-Pb研究结果<sup>[51-52]</sup>一致。阿希和京希-伊尔曼德金矿体均就位于火山机构边缘的环形断裂中,并受矿区NWW向区域性断裂和后期SN向断裂的控制<sup>[53-54]</sup>。

天山地区的金矿除与火山作用有关外,许多大—中型金矿受韧性剪切带的控制。中国天山地区发育大规模的韧性剪切带,例如中天山北缘的冰达坂-天格尔剪切带控制着望峰、天格尔和萨日达拉金矿<sup>[55]</sup>(图1-b)。对该剪切带型金矿的研究发现,这个韧性剪切带的活动历史很长<sup>[56-57]</sup>,最后一次韧性剪切变形发生在三叠纪(220 Ma<sup>[58]</sup>),金成矿作用主要与最晚期的韧性—脆性变形有关<sup>[55,58]</sup>。印支期成矿作用在中国天山和阿尔泰地区均有强烈表现,天山地区的印支期成矿作用主要与大规模的韧性剪切带有关<sup>[59]</sup>。在开展大型剪切带空间展布规律研究的同时,应重点分析剪切带对金成矿作用的控制特征,研究不同期次含金韧性剪切带变形强度的空间变化规律、相应的流体-岩石相互作用特征、构造蚀变类型和强度及其对金矿的制约,并建立此类金矿床定位预测的构造-流体-蚀变综合示踪标志。

楚伊犁-北天山成矿亚省中的捷克利(Tekeli,图3-a)铅锌矿集区曾经是前苏联铅锌的主要供应地之一。捷克利矿床铅锌储量约5.5Mt(铅锌平均品位合计11%),矿体主要赋存在下—中奥陶统褶皱系的碳酸盐岩-碎屑岩强动力变质带中(宽度小于200m)。矿体分为2类:与地层谐和的黄铁矿-闪锌矿矿体和斜切地层的闪锌矿-方铅矿矿体。黄铁矿-闪锌矿矿体形成于热水-沉积过程中,黄铁矿层具

有微细的层理,矿体具有层控的特征。闪锌矿-方铅矿矿体以雁列形式组合成带,分布在背斜的核部,产在白云岩-灰岩中。有关研究表明<sup>①</sup>,捷克利矿床明显存在2个成矿阶段:加里东伸展阶段成矿,形成了热水沉积,矿层与硅-泥-钙质沉积交替产出,沿盆地沉降最大的轴部形成了最厚的矿层;华力西造山阶段成矿,沿深断裂迁移的变质热液从围岩中萃取成矿元素(并改造先期形成的黄铁矿-闪锌矿矿体),最终受断裂控制形成雁行式分布的矿体。捷克利矿集区东延进入中国西北天山(图3-a),尽管在中国天山地区还没有发现类似的大型矿床,但赛里木-科古琴铜-铅-锌成矿带可能是可可苏-捷克利铅锌成矿带的东延部分<sup>[60]</sup>。赛里木微陆块边缘出露古元古界温泉群变质岩、中元古界蓟县系库松木切克群浅海相碳酸盐岩夹碎屑岩建造、中泥盆统汗吉尔组砾岩-石英砂岩夹生物碎屑灰岩和晚古生代火山-沉积岩地层,其中蓟县系库松木切克群是铜矿的赋矿层位(代表矿床为喇嘛苏铜矿),上泥盆统托斯库尔他乌组为铜铅锌矿床的主要赋矿层位。

## 2 中-南天山成矿省

中-南天山地体是中亚成矿域的主要组成部分,该地区以斑岩型铜-金和岩浆热液型金-钨矿床为重要特征<sup>[61-67]</sup>。该成矿省形成了一些重要的含金剪切带和网脉状成矿系统,在很多情况下与矽卡岩矿化有关。西南天山地区的地质构造复杂多样,尤其是剪切带很发育,并且控制着几乎所有大型—超大型金矿的分布。最重要的构造线是尼古拉耶夫线(南天山洋的缝合线),沿尼古拉耶夫线分布着众多的大型—超大型矿床,著名的金矿有Muruntau, Daugyztau, Zamitan, Taror, Jlau, Kumtor, 萨瓦亚尔顿和大山口金矿(图4-a)。例如Kumtor金矿(514t金)产于炭质黑色岩系中,受EW向韧性剪切带控制(位于尼古拉耶夫构造线的一条分支断裂中),成矿作用发生在早二叠世<sup>[68]</sup>。产于库玛拉-费尔干纳地体边缘的Almayk斑岩铜矿田由Kamkyr, Daneye, Sarcheku和Kyzata 4个大型矿床组成,铜储量超过13Mt。离中国边境不远的Karakol, Oktorkoy和Zharkulak斑岩铜矿均分布在尼古拉耶夫线北侧(图4-a)。中-南天山成

① 斌德曼,捷克利型矿床的地质构造和成因的新资料,1989;何国琦编译,新疆毗邻地区矿产研究新进展,2006:134-138.





岩发生了矽卡岩化,并被厚层磨拉石建造不整合覆盖。成矿作用与同构造期-构造期后花岗闪长质侵入体有密切的关系<sup>[70-71]</sup>。由于海西期的挤压,南天山地区晚古生代的沉积序列强烈褶皱,并向北逆冲推覆。塔吉克斯坦西部被褶皱成一个简单的大构造(称为Zeravshan复背斜<sup>[70]</sup>),该构造由一系列较小的褶皱组成,其中的Chinorsai背斜核部被Chinorsai花岗岩侵入,著名的Jilau钨-金矿床与该侵入体有关(图4-b,c)。Jilau钨矿已于1953—1974年间开采完,含金石英脉体构成了Jilau金矿的主体(1996年投产,54t金)。海西期Chinorsai岩体主要由花岗闪长岩、石英二长岩和英云闪长岩组成,该岩体侵入到志留系—泥盆系薄层陆源碎屑-碳酸盐地层中。岩体及其围岩中细晶岩脉的年龄为329~306 Ma<sup>[70]</sup>。一系列网状断裂是控制Jilau及其周围地区矿体的主要构造因素。这些断裂的宽度变化很大,从不连续的面状构造到强烈剪切变形带(最大宽度超过150 m)。组成网脉状金矿的主体位于这种剪切带内(图4-c)。在热液强烈蚀变的花岗闪长岩中形成了近直立的石英脉和透镜状富矿体。有经济价值的矿体沿走滑剪切带向远离核部的方向尖灭。

与北天山天格尔金矿<sup>[55,58]</sup>类似,Jilau金成矿作用发生于地壳脆性—韧性过渡带内,矿脉由转换挤压断裂控制<sup>[69]</sup>。金与毒砂、白钨矿和铋矿物伴生,由低盐度的 $H_2O-CO_2-CH_4-N_2$ 流体经二次沸腾沉淀。Jilau金矿中金的品位与流体中高浓度 $CH_4$ 的相关性表明,矿化流体的一部分起源于还原性含C岩层,并与Jilau矽卡岩钨矿体发生作用形成富金-钨的成矿流体。许多热液金矿的形成与 $CH_4$ 流体密切相关<sup>[72-73]</sup>。然而,中亚地区蛇绿岩也富含 $CH_4$ 流体<sup>[74]</sup>的事实和天山许多巨型矿床与深部构造具很好的对应关系<sup>[75-76]</sup>表明,金成矿流体中的 $CH_4$ 及其他成矿物质可能主要来源于地幔深部。因此,不能简单地把含金石英脉中高密度的 $CH_4$ 流体与在地壳浅部发生的热液蚀变联系起来。相反,中亚地区许多巨型金矿(包括Muruntau)与板块缝合线关系密切,来自

地球深部的物质通过长期活动的热液体系在特定区域不断有效地聚积,是形成这些巨型矿床的必要条件之一<sup>[14]</sup>。

除Muruntau、Kumtor、Daugyzstau、Zarmitan和Jilau这些著名的矿床外,塔什干以南Angele地区的卡尼玛苏尔多金属成矿密集区也具有重要的资源价值。这个矿集区相继发现了众多岩浆-热液型钨-金-铜-钼-铀-银-汞矿床。成矿类型丰富多样,形成了矽卡岩型钨矿、斑岩型铜-钼-金矿、浅成低温热液型银多金属矿床等<sup>[21,61-64,75,77-81]</sup>。大部分矿床产在石炭纪—二叠纪的岩浆岩中,并受局域性断裂的控制。Angele地区的科奇布拉克金-铂矿床产在中晚

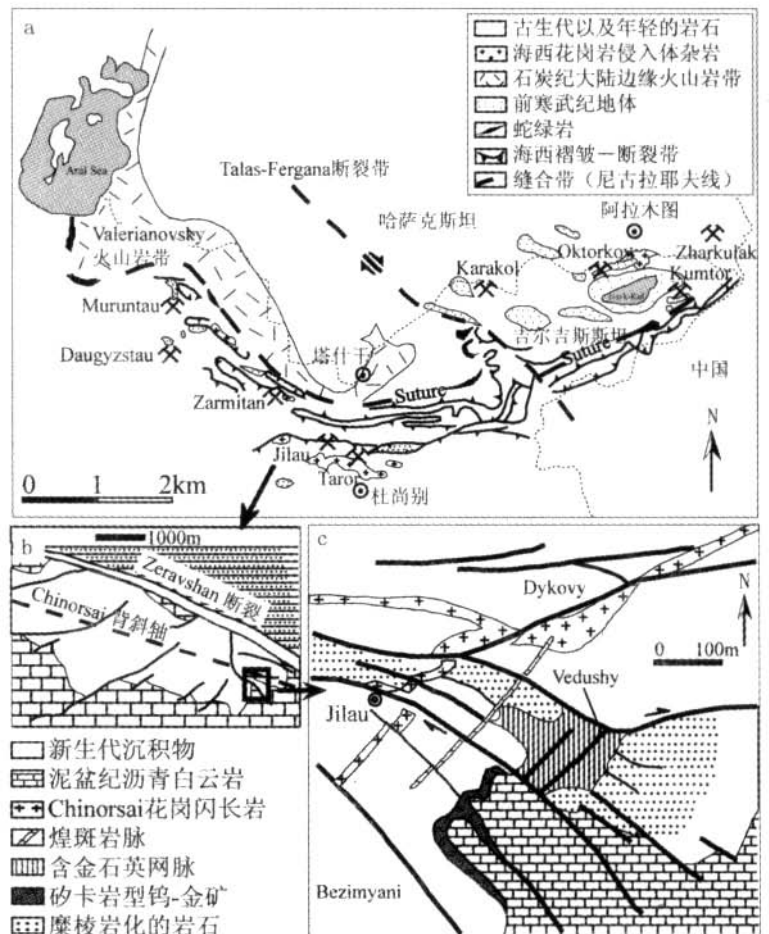


图4 中—南天山成矿省的构造线走向及其主要矿床分布(a), Zeravshan地区的Chinorsai背斜、Chinorsai花岗岩(b)和Jilau矿区地质简图(c)<sup>[69]</sup>

Fig. 4 Strike of the lineament of the Central-South Tianshan metallogenic province and distribution of its related ore deposits (a), the Chinorsai anticline and Chinorsai granite in the Zeravshan area (b) and the geological sketch map of the Jilau deposit (c)



石炭世安山岩- 英安岩系之中, 火山岩地层被晚石炭世—早二叠世的亚碱性花岗闪长岩- 花岗正长岩侵入。Angele西南约100 km的恰尔米坦石英脉型金矿(约400t金)与穆龙套、阿曼塔伊套和萨尔米奇等金矿处于同样的地质构造带中。

### 3 结 语

地壳生长的复杂性和特殊性造就了中亚地区复杂多样的地质构造格局和极具特色的中亚成矿域, 因此中亚地区成为目前大陆动力学和成矿作用研究的重要热点区域, 同时由于其巨大的资源潜力, 也受到了各国矿产企业的关注。中亚成矿域由若干个成矿省组成, 其核心由阿尔泰成矿省、环巴尔喀什- 准噶尔成矿省和中- 南天山成矿省构成。中亚成矿域核心地区的主要特征包括: 早古生代地体的演化决定着中亚成矿域的成矿背景, 环巴尔喀什- 准噶尔成矿省具有的环形特征受其加里东基底的制约, 中- 南天山成矿省的线形特征受晚古生代南天山洋缝合带的控制; 环巴尔喀什- 准噶尔成矿省具有在空间上相互叠加和迁移的成矿规律(从加里东晚期到华力西晚期, 从外环到内环); 尼古拉耶夫线及其相关岩浆- 热水体系的长期多期次活动控制着中- 南天山成矿省的形成与演化; 天山地区发育的印支期成矿作用主要受韧性剪切带的控制。随着对中亚成矿域地质特征、成矿作用研究的不断深入和一些基本地质问题的解决, 又凸现出如下一些有关成矿作用的关键科学问题: 环巴尔喀什- 准噶尔成矿省的成矿背景及其演化规律; 环巴尔喀什- 准噶尔- 北天山火山岩和次火山岩中铜- 金多金属矿集区的形成机制; 天山地区韧性剪切带的地质特征及其对金矿成矿作用的控制; 塔尔巴哈台山的地质演化及其对北疆地壳生长、早古生代金矿和海底喷流型铜多金属成矿作用的制约; 古南天山洋俯冲带流体- 岩浆对成矿作用的控制; 沿尼古拉耶夫线分布的火山岩- 次火山岩中金- 银- 锑- 碲- 汞矿集区的形成与演化; 巨型斑岩铜矿带的形成环境与晚古生代大地构造格局的重建; 中亚成矿域的印支运动及其对天山韧性剪切带和相关金矿成矿作用的制约关系。

致谢: 在新疆进行的多次野外地质考察得到国家“305”项目办公室王宝林主任、徐新研究员和王钰研究员的大力支持, 特此感谢。

### 参考文献:

- [1]Cooke D R, Hollings P, Walhe J L. Giant porphyry deposits characteristics distribution, and tectonic controls[J]. *Econ. Geol.*, 2005, 100(5): 801- 818.
- [2]Zonenshain L P, Kuzmin M I, Natapov L M. Geology of the USSR: a plate- tectonic synthesis[M]. *Geodynamics Series*, 21, American Geophysical Union, Washington, D.C., 1990: 242.
- [3]何国琦, 成守德, 徐新, 等. 中国新疆及邻区大地构造图(1: 1500000) [M]. 北京: 地质出版社, 2005.
- [4]蔡宏渊. 中- 乌西天山斑岩铜矿成矿条件对比与成矿远景预测[J]. *有色金属矿产与勘查*, 2005, 5(6): 284- 288.
- [5]祁志明, 李天德. 中国和哈萨克斯坦阿尔泰有色金属成矿带的划分和对比[J]. *有色金属矿产与勘查*, 1996, 5(6): 265- 271.
- [6]涂光炽. 初议中亚成矿域[J]. *地质科学*, 1999, 34(4): 397- 404.
- [7]李天德, 波里杨斯基 B H. 中国和哈萨克斯坦阿尔泰大地构造及地壳演化[J]. *新疆地质*, 2001, 19(1): 27- 32.
- [8]戴自希, 白治, 吴初国. 中国西部及毗邻国家铜金找矿潜力的对比研究[M]. 北京, 地震出版社, 2001.
- [9]陈哲夫. 新疆与邻区南天山超大型金矿成矿条件和找矿方向[J]. *新疆地质*, 2002, 20(3): 229- 232.
- [10]何政伟. 新疆西天山西段金铜成矿带——中亚成矿域东延[J]. *成都理工学院学报*, 2002, 29(1): 78- 84.
- [11]刘德权, 唐延龄, 周汝洪, 等. 新疆及周边国家、地区超大型矿床成矿特征和远景分析[J]. *华南地质与矿产*, 2004, (3): 1- 12.
- [12]杨建国, 闫晔轶, 徐学义, 等. 西南天山成矿规律及其与境外对比研究[J]. *矿床地质*, 2004, 23(1): 20- 30.
- [13]杨富全, 毛景文, 郑建民, 等. 哈萨克斯坦阿尔泰巨型成矿带的地质特征和成矿模型[J]. *地质学报*, 2006, 80(7): 963- 983.
- [14]何国琦, 朱永峰. 中国新疆及其邻区地质矿产对比研究[J]. *中国地质*, 2006, 33(3): 451- 460.
- [15]Sengor A M C, Natal'in B A, Burtman V S. Evolution of the Altaid tectonic collage and Paleozoic crustal growth in Eurasia[J]. *Nature*, 1993, 364: 299- 307.
- [16]Nikitin I F. Early geosynclinal Ordovician siliceous and jasper- basaltic formations of Kazakhstan [C]//Aspects of the geology of Kazakhstan: a collection of papers honoring the 70th birthday of Academician A.A. Abdulin. *Contributions to Eurasian Geology, Occ. Pub. ESRI, New series no. 12b. University of South Carolina and Utah*, 1993: 19- 33.
- [17]Heinhorst J, Lehmann B, Ermolov P, et al. Paleozoic crustal growth and metallogeny of Central Asia: evidence from magmatic- hydrothermal ore systems of Central Kazakhstan[J]. *Tectonophysics*, 2000, 328: 69- 87.
- [18]Saltmann R, Porter T M. The porphyry Cu- Au/Mo deposits of central Eurasia I. Tectonic, geologic and metallogenic setting, and significant deposits[C]//Porter T M. *Super Porphyry Copper & Gold Deposits A Global Perspective*. PGC Publishing, Adelaide, 2005, (2): 467- 512.
- [19]Yakubchuk A, Saltmann R, Shatov V, et al. The Altai's tectonic evolution and metallogeny[J]. *SEG Newsletter*, 2001, 46(1): 7- 14.

- [20] Yakubchuk A, Seltmann R, Shatov V. Tectonics and metallogeny of the western part of the Altai orogenic collage[C]// Mao J, Goldfarb R J, Seltmann R, et al. Tectonic Evolution and Metallogeny of the Chinese Altai and Tianshan. International Association on the Genesis of Ore Deposits/Centre for Russian and Central Asian Mineral Studies, 2003, Natural History Museum, London, 2003: 7-16.
- [21] Seltmann R, Janchuraeva R. Paleozoic Geodynamics and Gold Deposits in the Kyrgyz Tien Shan[C]. IGCP Project 373, I-AGOD Excursion Guidebook Series, vol. 9. National Academy of Sciences, 2001, Bishkek, Kyrgyz Republic/Natural History Museum, London, 2001: 180.
- [22] Sengor A M C, Natalin B A. Paleotectonics of Asia: fragments of a synthesis[C]// Yin An, Harrison M. The Tectonic Evolution of Asia. Cambridge University Press, Cambridge, 1996: 486-640.
- [23] [J], 1986, (5): 81-90.
- [24] [J], 1988, (6): 66-75.
- [25] ( ) [J], 1994, 36(6): 536-544.
- [26] Kurchavov A M, Grankin M S, Malchenko E G, et al. Metallogenic zonality of the Devonian volcanoplutonic belt in Central Kazakhstan[J]. *Geology of Ore Deposits*, 2002, 44: 22-30.
- [27] Nurlybaev A V, Berdina L E, Gafurova L A. Geodynamic position of magmatic formations of Kazakhstan and their ore content[C]// Bepaev Kh A. Geodynamics and Mineralogy of Kazakhstan. Almaty, VAC Publishing House, 2000: 82-94 (in Russian).
- [28] Yakubchuk A. Architecture and mineral deposit settings of the Altai orogenic collage: a revised model[J]. *J Asian Earth Sciences*, 2004, 23: 761-779.
- [29] Chiaradia M, Konopalko D, Seltmann R, et al. Lead isotope variations across terrane boundaries of the Tien Shan and Chinese Altai[J]. *Miner Deposita*, 2006, 41: 411-428.
- [30] 何国琦, 李茂松, 刘德权, 等. 中国新疆古生代地壳演化及成矿[M]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 1994: 1-437.
- [31] 李华芹, 谢才富, 常海亮. 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: 1-335.
- [32] 陈毓川, 叶庆同, 王京彬. 中国新疆阿尔泰山成矿带矿床地质、成矿规律与技术经济评价[M]. 北京: 地质出版社, 2003: 453.
- [33] 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.
- [34] 朱永峰, 徐新. 新疆塔尔巴哈台山发现早奥陶世蛇绿混杂岩[J]. *岩石学报*, 2006, 22(12): 2833-2842.
- [35] Kudryavtsev Y K. The Cu-Mo deposits of Central Kazakhstan [C]// Shatov V, Seltmann R, Kremenetsky A, et al. Granite-related Ore Deposits of Central Kazakhstan and Adjacent Areas. Glagol Publ. House, St Petersburg, 1996: 119-144.
- [36] [J], 1995, 37(3): 250-264.
- [37] 韩宝福, 王世, 江博明, 等. 新疆乌仑古河碱性花岗岩Nd同位素特征及其对显生宙地壳生长的意义[J]. *科学通报*, 1997, 42(17): 1829-1832.
- [38] 韩宝福, 王世洗, 孙元林, 等. 正 $\epsilon_{Nd}(T)$ 值的准铝-过铝花岗岩: 新疆也布山岩体[J]. *科学通报*, 1998, 43(17): 1323-1328.
- [39] 陈江峰, 满发胜, 倪守斌. 西天山菁布拉克基性-超基性岩的Nd、Sr同位素地球化学[J]. *地球化学*, 1995, 24(2): 121-127.
- [40] 刘志强, 韩宝福, 李建清, 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.
- [41] 周涛发, 袁峰, 谭绿贵. 新疆萨吾尔地区晚古生代岩浆作用的时限、地球化学特征及动力学背景[J]. *岩石学报*, 2006, 22(4): 1225-1237.
- [42] 朱永峰, 周晶, 郭璇. 西天山石炭纪火山岩的岩石学及Sr-Nd同位素地球化学研究[J]. *岩石学报*, 2006, 22(5): 1341-1350.
- [43] 朱永峰, 郭璇, 周晶. 新疆中天山巴仑台地区晚石炭世 $\epsilon_{Nd}$ 辉长岩体的岩石学和同位素地球化学研究[J]. *岩石学报*, 2006, 22(5): 1178-1192.
- [44] Han B F, Wang S G, John B M. Depleted-mantle sources for the Ulungur River A-type granites from north Xinjiang, China: geochemistry and Sr-Nd isotopic evidence, and implications for Phanerozoic crustal growth[J]. *Chem. Geol.*, 1997, 138: 135-159.
- [45] Hong D W, Zhang J, Wang T, et al. Continental crustal growth and the supercontinental cycle: evidence from the Central Asian orogenic belt[J]. *J Asian Earth Sciences*, 2004, 23: 799-813.
- [46] Kovalenko V I, Yarmolyuk V V, Kovach V P, et al. Isotope provinces: mechanisms of generation and sources of the continental crust in the Central Asian mobile belt: geological and isotopic evidence[J]. *J Asian Earth Sciences*, 2004, 23: 605-627.
- [47] Zhu Y F, Zhang L F, Gu L B, et al. The zircon SHRIMP chronology and trace element geochemistry of the Carboniferous volcanic rocks in western Tianshan Mountains[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(19): 2201-2212.
- [48] Zhu Y F, Zeng Y S, Gu L B. Geochemistry of the rare metal-bearing pegmatite no.3 vein and related granites in the Keke-tuohai region, Altai mountains, northwest China[J]. *J Asian Earth Sciences*, 2006, 27: 61-77.
- [49] Ermolov P V. Crust-derived crystalline inclusions in granitoid systems of Kazakhstan as a source of petrological information[C]// Shatov V, Seltmann R, Kremenetsky A, et al. Granite-related Ore Deposits of Central Kazakhstan and Adjacent Areas. Glagol Publ. House, St Petersburg, 1996: 301-314.
- [50] 翟伟, 高俊, 孙晓明. 新疆阿希金矿赋矿围岩——大哈拉军山组火山岩锆石SHRIMP年龄[J]. *岩石学报*, 2006, 22(5): 1399-1404.
- [51] 朱永峰, 周晶, 宋彪, 等. 新疆“大哈拉军山组”火山岩的形成时代问题及其解体方案[J]. *中国地质*, 2006, 33(3): 487-497.
- [52] 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.
- [53] Xiao L, Hayward N, Begg G. The Jnxi- Yelmand high- sulfidation epithermal gold deposit, Western Tianshan, Xinjiang Province, P.R. China[J]. *Ore Geology Review*, 2005, 26: 17- 37.
- [54] 董连慧, 沙德铭. 西天山地区晚古生代浅成低温热液金矿床[M]. 北京: 地质出版社, 2005: 154.
- [55] Zhu Y F, Zhou J, Zeng Y S. The Tianger (Bingdaban) shear zone hosted gold deposit, west Tianshan, NW China: petrographic and geochemical characteristics[J]. *Ore Geology Review*, 2007, 32: 337- 365.
- [56] 朱永峰, 宋彪. 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.
- [57] 杨天南, 李锦轶, 文中田. 中天山地块南北两缘的韧性剪切带[J]. *地质学报*, 2004, 78(3): 310- 318.
- [58] Zhu Y F, Zhou J, Gu L B. Geochemistry of the Tianger shear zone- hosted gold deposit (west Tianshan, northwest China) [C]// Mao J W, Bierlein F P. *Mineral Deposit Research: Meeting the Global Challenge*. Berlin, Springer, 2005: 1131- 1134.
- [59] 朱永峰. 新疆的印支运动与成矿[J]. *地质通报*, 2007, 26(5): 510- 519.
- [60] 钟莉, 卢全敏, 康正文. 新疆赛里木湖一带铜多金属矿找矿前景分析[J]. *新疆地质*, 2003, 21(3): 371- 372.
- [61] . [J]. , 1990, (1): 59- 71.
- [62] , , . [J]. , 1988, (5): 81- 87.
- [63] , , . [J]. , 1990, (4): 13- 26.
- [64] , . [J]. , 1992, (2): 68- 88.
- [65] Berger B R, Drew L J, Goldfarb R J, et al. An epoch of gold riches: the Paleozoic in Uzbekistan, Central Asia[J]. *SEG Newsltt.*, 1994, 16: 7- 11.
- [66] Maksumova R A, Dzhenchuraeva A V, Berezanskii A V. Structure and evolution of the Tien Shan nappe- folded orogen [J]. *Geologiya i Geofizika*, 2001, 42(10): 1444- 1452(in Russia).
- [67] Drew L J, Berger B R, Kurbanov N K. Geology and structural evolution of the Muruntau gold deposit, Kyzylkun desert, Uzbekistan[J]. *Ore Geology Review*, 1996, 11: 175- 196.
- [68] Mao J W, Konopelko D, Saltmann R, et al. Postcollisional age of the Kumtor gold deposit and timing of Hercynian events in the Tien Shan, Kyrgyzstan[J]. *Econ. Geol.*, 2004, 99: 1771- 1780.
- [69] Cole A, Wilkinson J J, Halls C, et al. Geological characteristics, tectonic setting and preliminary interpretations of the JIau gold- quartz vein deposit, Tajikistan[J]. *Mineralium Deposita*, 2000, 35: 600- 618.
- [70] Dzhanukov A B, Shishikin V V, Samoilenk G M. Detailed survey of the JIau deposit with estimation of reserves to 1st June 1985. Final Report for JIau Geological Expedition for 1981 to 1985. Vol. 1, Report Text[C]. USSR Ministry of Geology, 1985. Geology Administration of the Tajik SSR(in Russia).
- [71] Mukhin P A, Abdullayev K A, Minayev S Y. The Palaeodynamics of Central Asia[J]. *Int. Geol. Rev.*, 1989, 31: 1073- 1083.
- [72] Wilde A R, Layer P, Mernach T, et al. The giant Muruntau gold deposit: geological, geochronologic, and fluid inclusion constraints on ore genesis[J]. *Econ. Geol.*, 2001, 96: 633- 644.
- [73] Zhu Y F, Zeng Y S, Jang N. Geochemistry of the ore- forming fluids in gold deposits from the Taihang Mountains, Northern China[J]. *International Geology Review*, 2001, 43: 457- 473.
- [74] Liu W, Pan X F. Methane- rich fluid inclusions from ophiolitic dunite and post- collisional mafic- ultramafic intrusion: The mantle dynamics underneath the Palaeo- Asian Ocean through to the post- collisional period [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 242: 286- 301.
- [75] Dzhenchuraeva R D. Transregional deep faults in the Tien Shan as a structural control of large mineral deposits [J]. *Geologiya i Geofizika*, 2001, 42(10): 1476- 1483(in Russia).
- [76] 王京彬, 王玉往, 何志军. 东天山大地构造演化与成矿[J]. *中国地质*, 2006, 33(3): 461- 469.
- [77] Safonov Yu G, Bortnikov A B, Zlobina T M. Polymetal (Ag, Pb, U, Cu, Zn, F) Adrasman- Kanimansur ore field (Tajikistan), and its ore- forming system. I: Geology, mineralogy, and structural conditions of the ore deposition[J]. , 2000, 42(3): 195- 211(In Russia).
- [78] Safonov Yu G, Bortnikov A B, Zlobina T M. Polymetal (Ag, Pb, U, Cu, Zn, F) Adrasman- Kanimansur ore field (Tajikistan), and its ore- forming system. II: Physicochemical, geochemical and geodynamic formation conditions [J]. , 2000, 42(4): 350- 362(in Russia).
- [79] Dzhenchuraeva R J. Tectonic settings of porphyry- type mineralization and hydrothermal alteration in Paleozoic island arcs and active continental margins, Kyrghyz Range (Tien Shan) Kyrghyzstan[J]. *Mineral Deposita*, 1997, 32: 434- 440.
- [80] Belousov V I. Ore- clastic olistostromes, ore clasts and Al- lochthonous antimony- mercury deposits in the Alay Range, Southern Tien Shan[J]. *Lithology and Resources*, 2002, 37: 251- 265.
- [81] Plotinskaya O Yu, Kovalevker V A, Saltmann R, et al. Te and Se mineralogy of the high- sulfidation Kochbulak and Karagach epithermal gold telluride deposits (Kurama Ridge, Middle Tien Shan, Uzbekistan)[J]. *Mineralogy and Petrology*, 2006, 87: 187- 207.