

中亚天山—帕米尔地区成矿地质背景

李宝强, 孟广路, 曹新, 曹积飞, 范堡程, 王斌

LI Baoqiang, MENG Guanglu, CAO Xin, CAO Jifei, FAN Baocheng, WANG Bin

中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710054

Xi'an Center of Geological Survey, China Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China

摘要: 中亚天山—帕米尔地区地处亚欧大陆腹地, 跨古亚洲、特提斯两大全球性构造域, 是哈萨克斯坦—准噶尔、卡拉库姆—塔里木、中伊朗—冈底斯、印度四大古板块的结合部位, 地质构造复杂, 矿产资源丰富。自中新太古代(或古元古代)以来分为5大演化阶段: ①太古宙—古元古代演化阶段, 本区古陆可能是组成Pangea-IV泛大陆的一部分; ②长城纪—青白口纪泛大陆裂解事件导致了西昆仑地区第一次大规模的成矿作用, 新元古代超大陆汇聚形成阶段, 中天山地区广泛沉积了一套文德系含炭质岩系, 形成金的矿源层, 为后期大规模金的成矿作用提供了物质基础; ③新元古代超大陆裂解及古亚洲洋—原特提斯洋演化阶段, 岩浆活动强烈深部壳幔物质交换频繁, 尤其是晚泥盆世—早中二叠世碰撞后伸展期, 是区内最重要的成矿期; ④研究区工作程度低(部分地区为空白区), 特提斯洋演化阶段矿床发现较少, 但找矿潜力巨大; ⑤欧亚大陆形成后的后造山阶段, 伴随着造山带强烈的挤压、褶皱、抬升、走滑、推覆等构造活动, 岩浆作用十分发育, 形成了一系列与韧性剪切构造有关的金矿化, 以及中酸性岩浆热液活动有关的铁、铜、多金属、锂铍(铌钽)、钨、锡、钼等矿产。

关键词: 中亚天山; 帕米尔; 成矿背景; 成矿作用; 构造演化

中图分类号: P611 文献标志码: A 文章编号: 1671-2552(2015)04-0686-10

Li B Q, Meng G L, Cao X, Cao J F, Fan B C, Wang B. Ore-forming geological background of the Tianshan Mountains—Pamir region in Central Asia. *Geological Bulletin of China*, 2015, 34(4):686–695

Abstract: The Tianshan Mountains—Pamir region is located in the hinterland of Eurasian continent and in the junction of Kazakhstan—junggar, Karakum—Tarim, Central Iran—Gandise and Indian plate. It extends across two global tectonic domains, Tethys and Paleo-Asian Oceans, thus possessing complicated tectonic phenomena and rich mineral resources. Since Middle Neoproterozoic (or Proterozoic) the study area has experienced five main evolutionary phases. The continental nucleus in this area might have served as a part of “Pangea-IV” during Archean—Paleoproterozoic evolutionary phase. The first large-scale mineralization in Western Kunlun area was caused by continental breakup in the Changcheng—Qingbaikou period. At the Neoproterozoic supercontinental convergence stage, Vendian carbonaceous rock series was extensively deposited in Middle Tianshan Mountains, which served as the source bed of gold and provided a material basis for large-scale gold mineralization in the following evolutionary phase. Magmatic activities occurred intensely during the Neoproterozoic supercontinental breakup period as well as the evolutionary stage of Paleo-Asian Ocean and Tethys, with frequent exchange of deep crust—mantle material, especially in Late Devonian—Early—Middle Permian post-collisional intraplate extension phase, which seems to have been the most important ore-forming stage in the study area. As the study of this area remains at a very low level (some part in the study area even has no geological work), few mineral deposits of the Tethys evolutionary stage have been discovered in spite of the fact that this area owns considerable prospecting potential. Following the strong tectonic activities in this area, such as crumpling, folding, lifting, striking-slipping and thrusting, magmatic activities occurred widely at the post-orogenic stage after the formation of Eurasian continent. As a result, there occurred a series of gold mineralization related to ductile shear structures, as well as iron, copper, multi-metal, lithium, beryllium (niobium, tantalum), tungsten, tin, molybdenum

收稿日期: 2014-09-09; 修订日期: 2014-12-19

资助项目: 中国地质调查局项目(编号: 1212011220905、1212010561509、1212011220912)

作者简介: 李宝强(1955—), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 从事中亚地质矿产研究、找矿勘查及地球化学工作。E-mail: xalbaoqiang@163.com

and other minerals related to acidic magmatic hydrothermal activities.

Key words: Tianshan Mountains in Central Asian; Pamir; ore-forming geological background; tectonic evolution

中亚天山—帕米尔地区地处亚洲大陆腹地,是亚洲大陆腹地几大构造的交汇地区,亚洲中部重要的构造线都从区内通过。本次研究涉及中国新疆西部、哈萨克斯坦南部、乌兹别克斯坦东部、吉尔吉斯斯坦、塔吉克斯坦、巴基斯坦北部、阿富汗中东部及克什米尔地区($E66^{\circ}\sim 88^{\circ}$ 、 $N34^{\circ}\sim 45^{\circ}$),北部为乌拉尔—天山—兴蒙造山系,南部属特提斯造山系。新元古代晚期以来经历了古亚洲洋盆和特提斯洋盆的开启、俯冲和增生,以及众多微陆块之间的多次碰撞造山,特别是50~60Ma以来,受印度板块与欧亚板块碰撞效应的影响,发生了强烈的隆升、缩短及走滑变形,形成了现今复杂的构造体系,完成了古亚洲体系和特提斯体系的最终对接,并伴有多期的构造、岩浆及成矿作用,形成了丰富的矿产资源。

根据近年来承担的“中吉合作境内外天山1:100万成矿规律图编制与研究”、“兴都库什—西昆仑成矿带成矿地质背景和成矿规律研究”等项目成果,结合前人研究资料^[1-14],笔者从古亚洲体系和特提斯体系对接演化的视角,对中亚天山—帕米尔地区构造演化、成矿背景进行了分析,为研究区矿产资源潜力评价及部署提供新的科学依据。

1 大地构造背景

1.1 古亚洲和特提斯两大构造体系划分

许志琴等^[15]在前人研究基础上,将亚洲大陆自北而南划分为西伯利亚陆块、古亚洲(乌拉尔—蒙古)造山系、卡拉库姆—塔里木—华北陆块群、特提斯造山系和阿拉伯—印度—南中国陆块群5个大地构造单元(图1)。中亚天山—帕米尔地区涉及古亚洲(乌拉尔—蒙古)造山系、卡拉库姆—塔里木—华北陆块群、特提斯造山系和阿拉伯—印度—南中国陆块群四大单元,存在北部古亚洲洋构造域和南部特提斯洋构造域两大格局。关于两大构造域的划分问题,前人做了大量的研究,但关于两大构造域的定义、时限、划分界线等仍存在分歧,主要的观点有:何国琦等^[1]认为,古亚洲洋构造域是指西伯利亚与东冈瓦纳大陆间广阔的古生代造山区,在古生代古亚洲洋闭合过程中,中国的中朝、扬子、塔里木等小克拉通,均属古亚洲构造域;黄汲清等^[3]认为,古亚洲构造域主要形成于古生代,经历兴凯期、加里

东期、华力西期3个旋回的发展,且以华力西期造山为主。二叠纪以前,特提斯范围很广,古亚洲洋与其南东的原特提斯海域彼此相通;任纪舜等^[2]则认为,古亚洲构造域包括古亚洲造山区及南北两侧西伯利亚克拉通南部边缘和冈瓦纳北部边缘,华力西期构造运动使中国大陆南北拼合,成为特提斯演化的开始,特提斯洋演化阶段主要在中新生代,将古亚洲洋和特提斯洋的演化在时间上给予了先后之分,因此两大构造域的分布范围存在叠置关系。本文以古亚洲洋和特提斯洋演化为出发点,强调构造域划分应以同一动力源为前提条件,同域构造是地球特定演化阶段,受控于同一动力源地域内的构造(带)集合,洋盆的发展演化主导了大陆造山带的形成演变^[13],提出以卡拉库姆—塔里木—华北陆块群作为古亚洲、特提斯两大构造域的分界。研究区北部古亚洲构造域位于西伯利亚陆块、东欧陆块和卡拉库姆—塔里木—华北陆块群之间,受古亚洲洋洋中脊扩张的动力学系统影响,演化过程与古亚洲洋裂解和拼合有关,记录了古亚洲洋盆成生和演化及自新元古代晚期开始的整个古生代增生造山和地体拼贴过程。研究区卡拉库姆—塔里木陆块以南与印度板块之间的特提斯构造域部分主体为帕米尔高原,以西与阿富汗兴都库什造山带相接。自新元古代以来受控于原—古—新特提斯洋洋中脊扩张的动力学系统,演化过程与特提斯洋裂解、拼合有关,形成巨型复合地体群和复合造山拼贴体。自始新世以来,由于印度板块与欧亚板块碰撞效应的影响,整体发生了强烈的隆升、缩短及走滑变形,最终在帕米尔高原(西构造结)完成了古亚洲体系和特提斯体系的直接对接。

1.2 构造单元划分

研究区以卡拉库姆—塔里木陆块为界,北部为古亚洲构造域,南部属特提斯构造域。由北向南划分为哈萨克斯坦—准噶尔板块、卡拉库姆—塔里木板块、中伊朗—冈底斯(滇藏)中间板块和印度板块4个一级板块单元,分别由乌拉尔—南天山—红柳河、赫拉特—巴米扬—北帕米尔—康西瓦—鲸鱼湖、瓦济里斯坦—科希斯坦—拉达克—雅鲁藏布江板块缝合带连接,这3条缝合带曾经是分隔这四大板块的大洋消亡带(图2)。

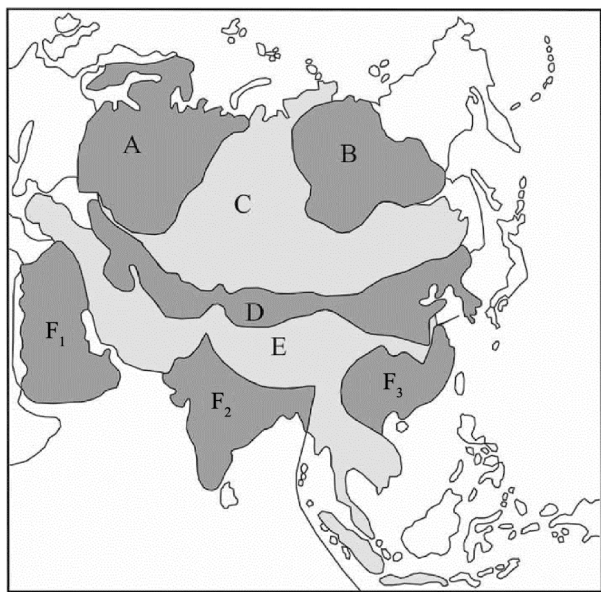


图1 亚洲大陆构造示意图(据参考文献[15]修改)
(图中国界线按原文未改动)

Fig. 1 Tectonic sketch map of the Asia Continent

A—东欧克拉通;B—西伯利亚克拉通;C—古亚洲(乌拉尔—蒙古)造山系;D—卡拉库姆—塔里木—华北陆块群;E—特提斯造山带。

F₁—阿拉伯克拉通;F₂—印度克拉通;F₃—扬子克拉通

哈萨克斯坦—准噶尔板块夹持于西伯利亚板块与卡拉库姆—塔里木板块之间,由乌卢套地块、阿塔苏—莫因特地块、楚河地块、伊塞克—北天山地块、铁克利—赛里木地块、准噶尔地块、吐鲁番—哈密地块等众多古老块体及围绕各古陆块边缘发育的一系列古生代造山带组成,晚前寒武纪时期(1100Ma以前)已是一个连续的古陆的一部分^[13],其后经历了再次的汇聚和固结作用。早古生代成为具有独立运动行为,且有一定规模的古板块的核心。

塔里木板块西延与卡拉库姆地块相连,向东可与柴达木地块相接^[14],规模宏大,在欧亚大陆地质构造发展史中占有举足轻重的地位。其北部陆缘区为突厥斯坦—南天山洋发展演化所形成的弧盆系构造,具被动陆缘性质;南部陆缘十分复杂,兼受原特提斯、古特提斯洋发展演化影响,具活动陆缘性质。哈萨克斯坦—准噶尔板块与卡拉库姆—塔里木板块之间的分界线为乌拉尔—南天山—红柳河巨型板块缝合带的中段,南天山晚古生代缝合带。缝合带内岩石、地层杂乱,岩石变质程度深、

变形期次多、变形层次深,岩浆岩及线性构造十分发育,是一个规模宏大、特征明显、地层杂乱的构造单元。沿缝合带断续分布有蛇绿岩和蓝片岩,前者多被肢解,部分成为糜棱岩基质。

古生代—新生代中期由于冈瓦纳古陆北缘解体,分别来自南、北两侧克拉通大陆边缘的众多块体相互拼贴而成的大陆块体被称为基麦里大陆^[16],即中伊朗—冈底斯(藏滇)中间板块。北侧以古特提斯洋(C₁—T₃)与卡拉库姆—塔里木板块相隔,南侧以新特提斯洋(T₃—E₂)与印度板块相接。赫拉特—巴米扬—北帕米尔—康西瓦缝合带为三叠纪古特提斯洋消亡,南部中伊朗—冈底斯中间板块向北拼贴于塔里木—卡拉库姆板块南缘所形成的复杂构造带。整体上洋壳残片保存极少,多数地段只表现为长期活动的断裂带,沿断裂两侧见有蛇绿岩残块。

印度板块与欧亚板块之间为瓦济里斯坦—科希斯坦—拉达克板块缝合构造带,西起瓦济里斯坦蛇绿岩带,后向东北方向延伸,经帕米尔的科希斯坦岛弧再转向南东,经克什米尔的拉达克花岗岩带与中国西藏雅鲁藏布江缝合带相连,具有较典型的板块缝合带的特征,是新特提斯洋消亡的反映。主要发育白垩纪—古近纪基性—超基性岩、蛇绿混杂岩、蓝片岩及大型花岗岩岩基。印度板块在研究区仅涉及其北部边缘,大面积出露前寒武纪基底岩系,其上古生代、中—新生代碎屑岩、碳酸盐岩等均为盖层沉积。石炭系—二叠系中可见冰碛砾岩,具有冈瓦纳相特征,多被新生界覆盖。白沙瓦以南地区,红色砂岩及页岩属渐新世—中新世,代表了早期喜马拉雅的磨拉石沉积。

2 区域大地构造演化及其成矿地质背景

研究区复杂的大地构造格局是地壳长期发展演化的结果。它与中亚地区古大陆的形成、裂解,以及古亚洲洋、特提斯洋的发生、发展、消亡及印度板块的持续北侵有密切联系。根据大地构造演化特征,将研究区从中新太古代(或古元古代)以来分为以下5个构造演化阶段和相应的成矿作用。

2.1 太古宙—古元古代古陆核形成与发展阶段

东邻区阿尔金山北阿克塔斯塔克片麻状花岗岩的年龄为 $3605 \pm 43 \text{ Ma}$ ^[17],在哈萨克斯坦外伊犁阿克丘兹组片麻岩、榴辉岩、混合岩中有3000~2780Ma

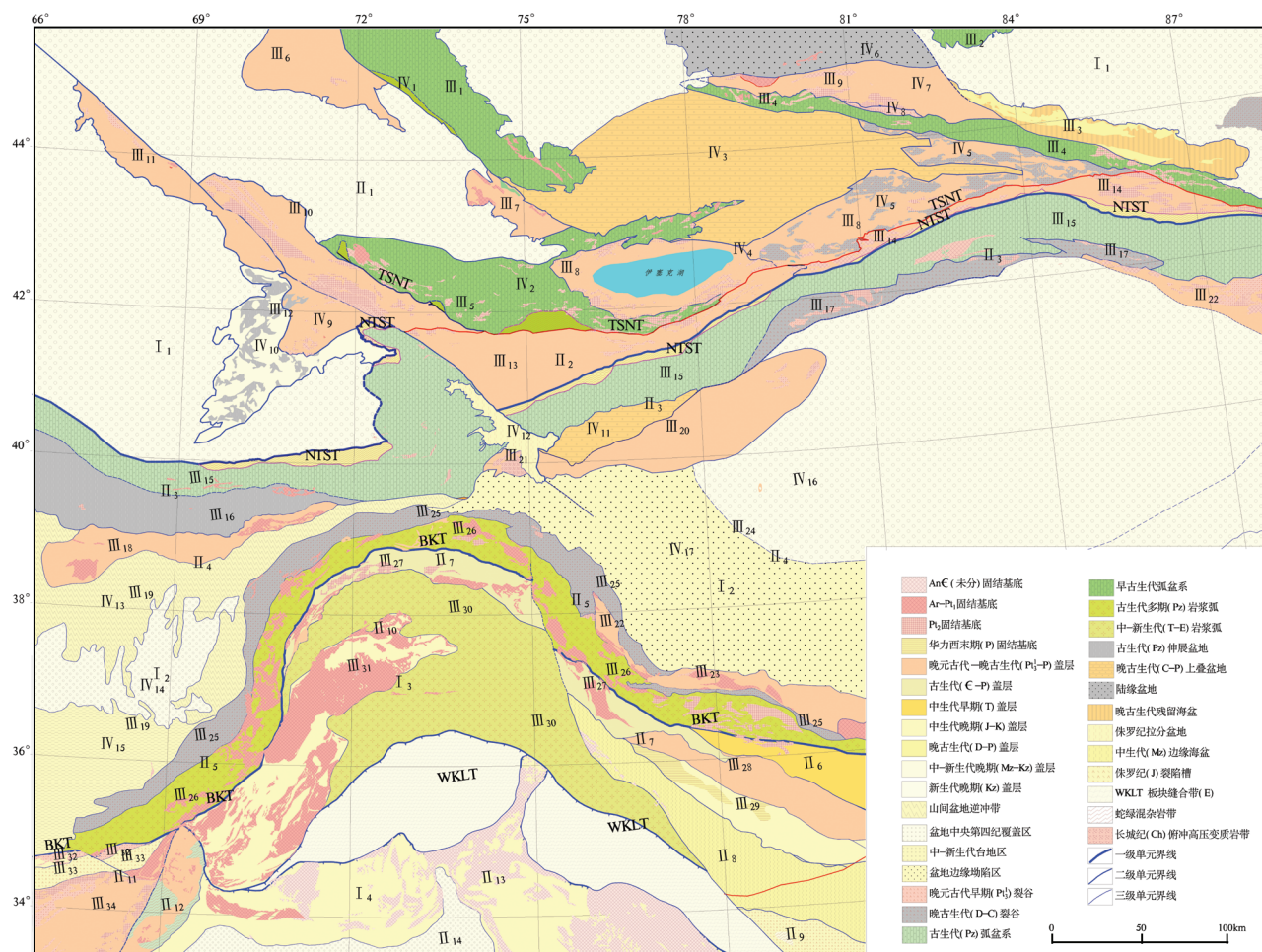


图2 研究区大地构造分区

Fig. 2 Sketch map showing tectonic unit division of the study area

I₁—哈萨克斯坦—准噶尔板块; I₂—卡拉库姆—塔里木板块; I₃—中伊朗—冈底斯(滇藏)中间板块; I₄—印度板块; II₁—北天山弧盆系; II₂—中天山陆块; II₃—卡拉库姆—塔里木北部陆缘区; II₄—卡拉库姆—塔里木陆块; II₅—卡拉库姆—塔里木板块南部活动陆缘区; II₆—大红柳滩晚古生代—中生代边缘海盆; II₇—塔里玛西山—阿克赛钦陆块; II₈—喀喇昆仑中生代边缘海盆; II₉—班公错侏罗纪裂陷槽; II₁₀—米特拉姆—红旗拉普陆块; II₁₁—加尼兹—迈丹陆块; II₁₂—喀布尔陆块; II₁₃—白沙瓦陆缘盆地; II₁₄—伊斯兰堡中—新生代盆地; III₁—扎拉伊尔—奈曼早古生代陆缘弧; III₂—西准葛尔古生代弧盆; III₃—依连哈比尔残留海盆(D₃—C₁); III₄—博罗科努—米什沟早古生代陆缘弧; III₅—杰尔苏克伊早古生代岛弧带; III₆—阿尔巴斯套地块; III₇—肯德克斯塔斯地块; III₈—依塞克—伊犁地块; III₉—赛里木地块; III₁₀—卡拉套地块; III₁₁—大卡拉套地块; III₁₂—恰特卡尔地块; III₁₃—纳伦地块; III₁₄—星星峡—巴仑台地块; III₁₅—南天山弧前增生楔; III₁₆—泽拉夫尚拉伸盆地; III₁₇—霍拉山泥盆—石炭纪陆缘裂谷; III₁₈—吉萨尔地块; III₁₉—卡拉库姆中新生代沉积盆地; III₂₀—柯坪地块; III₂₁—铁热克苏地块; III₂₂—库鲁克塔格地块; III₂₃—铁克里克地块; III₂₄—塔里木中新生代沉积盆地; III₂₅—西巴达赫尚—昆北—库尔良石炭纪裂谷; III₂₆—兴都库什—昆中多期复合岩浆弧; III₂₇—乌孜别里山口—麻扎达坂地块; III₂₈—天神达坂—阿克赛钦地块; III₂₉—神仙湾—林济塘中生代前陆盆地; III₃₀—鲁山—明铁盖中新生代岩浆弧; III₃₁—霍罗格地块; III₃₂—哈吉加克地块; III₃₃—曼德河中生代裂陷槽; III₃₄—加尼兹地块; IV₁—扎拉伊尔早古生代蛇绿混杂岩带; IV₂—杰尔苏克伊早古生代岛弧; IV₃—杰尔苏克伊晚古生代上叠盆地; IV₄—依塞克地块; IV₅—伊宁石炭纪—二叠纪裂谷; IV₆—赛里木陆缘盆地; IV₇—赛里木地块; IV₈—赛里木南缘南华纪—震旦纪裂谷; IV₉—恰特卡尔地块; IV₁₀—恰特卡尔南部拉伸盆地(C—P); IV₁₁—西南天山石炭纪上叠盆地; IV₁₂—托云中—新生代拉分盆地; IV₁₃—阿富汗—塔吉克中新生代山间盆地逆冲带; IV₁₄—卡拉库姆第四纪覆盖区; IV₁₅—北阿富汗中—新生代台地; IV₁₆—塔里木中央隆起; IV₁₇—塔西南拗陷; TSNT—塔拉斯—松凯利湖—尼古拉耶夫线—中天山北缘早古生代缝合带; NTST—南天山晚古生代缝合带(D—C); BKT—巴米扬—康西瓦板块缝合带(T); WKLT—瓦济里斯坦—科希斯坦—拉达克板块缝合带(E)

的年龄值^[14],在塔里木盆地西南缘赫罗斯坦岩群(后改为喀拉喀什岩群 Pt₁)中的古侵入岩获得 2977±140Ma 的岩浆结晶年龄^[18],在阿尔金地区若羌河上游的多种片麻岩具有 TTG 岩套的岩石中获得 2679±142Ma 的同位素年龄^[19],以及塔里木盆地北缘库鲁克塔格一带代表太古宙古老陆核存在的达格拉克布拉克杂岩(Ar₂₋₃)等,是区内太古宙陆核存在的反映。古元古代早期末(2400~2200Ma)的兴地运动,造成库鲁克塔格地区兴地塔格群(岩性为石英岩、石英片岩夹大理岩,沉积韵律明显,原岩下部为石英砂岩,上部为粉砂岩、泥岩夹碳酸盐岩,属近源浊流沉积)与下伏托格杂岩呈不整合接触关系;铁克里克一带喀拉喀什群与上覆埃连卡特群(为云母石英片岩、绢云母绿泥石石英片岩等夹大理岩,具韵律层,成熟度较高,属被动大陆边缘沉积)呈角度不整合接触。西昆仑的古元古界为一套原岩是陆源碎屑岩、碳酸盐岩夹基性、酸性火山岩、硅质岩等的变质岩(片岩、片麻岩等);阿尔金的阿尔金山群,由下部的中性—基性火山岩、火山质硬砂岩及中上部的陆源碎屑岩夹碳酸盐岩等原岩变质的片岩、片麻岩组成,构成了塔里木古陆南缘的陆缘活动带,说明古元古代末期塔里木已发展成为较稳定的大陆。中、东南阿富汗地区喀布尔一带的古元古界主要由片麻岩、混合岩、石英岩、大理岩、角闪岩等深变质岩组成,为太古宙—古元古代陆核形成时构造—岩浆热事件的产物。

总体上,这一阶段的构造格局为由太古宙—古元古代结晶变质杂岩构成的陆核和围绕稳定陆核的元古宙古裂谷或古老的拗拉槽,可能存在一个古元古代的超大陆 Pangea-IV 泛大陆。本区古陆可能是组成 Pangea-IV 泛大陆的一部分。泛大陆地表出现了巨大沉积盆地和有机物,大气中出现了氧,并在沉积盆地中堆积了大量的 Fe、Cu、Pb、Zn、Au 等金属元素,形成矿源层^[20]。

2.2 长城纪—青白口纪原始古陆裂解与罗迪尼亚超大陆汇聚阶段

兴地运动之后,已固结的古陆区沉积构成了早前寒武纪结晶基底上的最下部沉积盖层。在古陆边缘,再次发生裂解作用。铁克里克山的塞拉加兹塔格群细碧角斑岩(1764Ma)^[14],反映了蓟县系的拉张事件。随着裂解作用的进一步加剧,昆仑(特别是昆中)地区出现了 1550~1200Ma 的层状杂岩和类

蛇绿岩组合^[21],以及以大陆板内玄武岩为主的火山岩。在阿富汗分布于喀布尔以北的中元古代片麻状辉长岩—闪长岩—斜长花岗岩—变辉绿岩等,也是中元古代伸展体制下的产物。与本构造期有关的矿产表现为在较稳定型沉积中的炭质—硅质—碳酸盐岩—页岩建造内产有层控铅锌矿床,碳酸盐岩中产有银、铜、铅、锌多金属矿化,活动带内的火山—沉积岩系中产细脉—浸染型多金属矿化^[22]。西昆仑地区第一次大规模的成矿作用就出现在中元古代大陆地壳的减薄、裂解时期,在太古宙—古元古代结晶基底之上形成窄长的裂陷槽,其中堆积了厚层的火山—沉积建造,形成了 2 类重要的金属矿床。西部木吉—布伦口成矿带细碎屑岩和碳酸盐岩建造之内形成了一系列层控热液型铁—铜—金矿床,如哈拉墩、皮拉里铁铜金矿床,布伦口、卡拉库里铜金矿床,切列克契铁(铜)矿床等;在东部桑株塔格成矿带火山—沉积建造之内形成了一系列火山岩型块状硫化物铜锌矿床,如塔木其铜锌矿床、铜牙铺含铜黄铁矿矿点。

青白口纪为汇聚阶段。这一阶段的依塞克、纳伦、卡拉库姆、塔里木都已克拉通化,形成稳定的陆块,普遍出现厚度不大的泥质白云质碳酸盐岩建造。蓟县纪末期的阿尔金运动使长城系—蓟县系强烈变形,并发生低绿片岩相变质作用,未变质的青白口系(1000~800Ma)不整合于长城系—蓟县系之上,形成巨大的区域性不整合,同时有造山期花岗岩的侵入。阿尔金构造带西段侵入古元古界阿尔金群、长城系巴什库尔干群和蓟县系塔昔达坂群中的花岗质片麻岩,其 Rb—Sr 全岩等时线年龄为 1035±77Ma,显示出同碰撞花岗岩的特征^[23]。沿吉尔吉斯北天山南北缘出现的大量里菲期(相当于青白口纪)钙碱性花岗质侵入岩、中国新疆西天山及其邻区 950~850Ma 的岩浆侵入事件及变质事件,以及卡拉套、依塞克、纳伦、巴尔喀什—伊犁、卡拉库姆、塔里木等地块上广泛出露的南华纪—震旦纪冰成沉积岩系及其下的区域性角度不整合面等,作为新元古代超大陆拼合的地质响应,标志着该带曾经发生过大陆拼合。

1974 年扎依采夫在哈萨克斯坦—天山地区的乌鲁套—杰尔斯克伊带确立了时代约为 1050Ma 的造山运动,称之为伊塞东运动,可与格林维尔运动相对比^[14]。这次造山运动之后,形成了一个包括

当时全球主要古陆在内的新元古代超大陆(罗迪尼亚古陆)。天山地区这一时期的成矿作用以金矿化为主,矿化围岩为千枚状页岩、千枚岩及粉砂岩互层或薄层韵律层,作为金的矿源层,如吉尔吉斯库姆托尔特大型金矿床,产于文德系含炭质千枚岩中。

2.3 南华纪—早古生代罗迪尼亚超大陆裂解、古亚洲洋—原特提斯洋形成与消亡阶段

南华纪—震旦纪含冰成岩系盖层沉积的同时也开始孕育着超大陆裂解。裂谷作用的发育大体是从距今800Ma前后开始的,沿吉尔吉斯北天山北缘及尼古拉耶夫线出现晚里菲期及文德期的火山岩;在库鲁克塔格群含冰成岩系的陆源碎屑浊流沉积层中夹有数层基性火山岩,其中贝义西组火山岩的同位素年龄为 $814.1 \pm 97.3 \text{ Ma}^{[24]}$,照壁山组火山岩的同位素年龄为 $753 \pm 30 \text{ Ma}^{[24]}$;柯坪一带震旦纪苏盖特布拉克组中亦含基性火山岩;铁克里克一带恰克马克里克组(相当于南沱期)的冰水沉积,以及在阿富汗巴米扬西南、塔吉克拜松地块等分布的文德期火山—沉积建造标志着南华纪—震旦纪进入了又一次裂解。区域上,主要形成沉积变质型铁、铜矿产,如吉尔吉斯超大型杰德姆铁矿床、中国新疆艾登格尔铁矿床,在阿富汗中—东部西兴都库什地区晚元古代文德期—寒武纪沉积—火山沉积建造内,形成了一系列与裂谷作用有关的火山—沉积型、沉积—喷气沉积型、火山—沉积变质型铁铜金矿床。尤以巴米扬地区哈吉加克超大型铁矿床(火山—沉积型)、喀布尔地区艾纳克超大型铜矿床(火山—沉积变质型)为代表。许多矿床产于前寒武纪变质岩中,尽管成矿年龄比围岩稍显年轻,但围岩在成矿过程中提供矿源,或围岩物理化学性质对成矿有一定的控制作用。

2.3.1 北部地区古亚洲洋形成演化、消亡

随着裂谷进一步发展,在中天山微陆块南、北两侧出现2个大洋盆地,即北侧北天山洋,南侧南天山洋。

北天山洋存在的时限为文德期(震旦纪)—早奥陶世,吉尔吉斯—侧洋盆扩张脊大致为塔拉斯—卡拉套碰撞带一线,沿该带出露有早寒武世洋壳建造,以北出露有中寒武世—早奥陶世弧火山岩、晚奥陶世酸性火山岩等构成岛弧相建造组合。到了中晚奥陶世普遍出现碰撞造山期磨拉石建造及晚

奥陶世碰撞型花岗岩。新疆伊犁地块和准噶尔地块之间为寒武纪—奥陶纪的唐巴勒—米什沟洋(或者称北天山洋)。这个洋盆于晚奥陶世末期关闭,在米什沟—干沟一带保留有志留纪前陆盆地沉积。北天山洋盆于中晚奥陶世发生俯冲和碰撞,吉尔吉斯北天山内广泛发育同位素年龄为390~470Ma^[15]的奥陶纪—志留纪花岗岩、花岗闪长岩、浅色花岗岩、石英二长岩和少量石英闪长岩,代表早古生代岛弧的发展过程;花岗岩类岩体之上,覆盖早—中泥盆世以中—酸性为主的火山岩,后者常与红色磨拉石建造伴生,出现前陆磨拉石及碰撞型花岗质岩浆活动,缺失志留纪—早泥盆世沉积,说明北天山洋在志留纪—早泥盆世已经转化成碰撞造山带。在吉尔吉斯北、中天山广泛分布加里东期的矿床,矿产以金、铁、铜多金属、铍等为主,如巴拉—奇奇坎铁钛钒矿床,塔尔德布拉克、安达什金—铜斑岩矿床,阿克塔什金—铜矽卡岩矿床,杰鲁伊石英脉型金矿床,乌尊—塔什铍矿床,库姆什塔格银矿床等。而南天山这一时期成矿较弱。

南天山洋盆存在时限较长,一直持续到早中泥盆世。沿南费尔干纳断裂带及阿特巴什—伊尼尔切克断裂带南侧出露有含高压变质岩构造岩片(块)的俯冲杂岩(S_3-D_1)或经受高压变质作用的增生楔(S_3-D_1)、蛇绿岩、蛇绿混杂岩、晚寒武世—奥陶纪洋壳建造等。此带以南则是广阔的被动陆缘沉积带,主体是陆坡相浊流沉积及台地相碳酸盐岩沉积和发育在被动陆缘之上的陆缘裂谷火山岩建造,时代为寒武纪—奥陶纪。南天山洋可能在中晚奥陶世出现过局部的俯冲碰撞,但大部分延续到志留纪。结合新疆境内西南天山的情况,南天山洋盆在志留纪—早中泥盆世发生俯冲和碰撞,出现俯冲杂岩、弧火山岩、前陆磨拉石等。到了中泥盆世末期或晚泥盆世早中期,南天山洋的俯冲导致碰撞造山,形成天山—准噶尔碰撞造山带。除了南天山有晚泥盆世残留海盆外,在天山—准噶尔广袤的地域内,晚泥盆世陆相粗碎屑岩沉积(或陆相火山岩)不整合在碰撞造山形成的褶皱基底之上。南天山洋盆的关闭,使卡拉库姆—塔里木板块与哈萨克斯坦—准噶尔板块拼贴在一起,亚洲北部大陆形成。南天山洋盆关闭后,晚泥盆世—早中二叠世区域地壳演化进入后碰撞期或称为碰撞后伸展期,这一时期在早古生代残留洋盆的基

础上,再次拉张形成有限洋盆、陆内裂谷、裂陷槽、上叠盆地等,初步统一的新陆壳处于碰撞挤压应力环境向后碰撞伸展环境的转化。这一阶段是深部壳幔物质交换最强烈、最频繁,整个造山阶段岩浆活动最激烈的时期。同时,也是天山地区最主要的内生金属成矿期。在北天山地区形成金、铅、锌、铍、稀土、铜多金属、钼、铁、锰、铝、铋等矿产;在中天山形成金、金铜、钨、锑、铜镍、铁锰矿;在南天山形成汞锑、金锑、锡钨、铅锌、银、铝土矿、铁、铁钒钛、稀土、钍等矿产。

2.3.2 南部地区原特提斯洋形成、演化、消亡

北部古亚洲洋演化、消亡的同时,在南部昆仑一带古陆边缘发生裂解,出现阿北红柳沟—拉配泉小洋盆($512.1 \pm 1.5 \text{ Ma}^{[25]}$)、昆中地块的库地—其曼于特洋盆(库地蛇绿岩 $510 \pm 4 \text{ Ma}^{[26]}$,其曼于特蛇绿岩 $526 \pm 1 \text{ Ma}^{[27]}$)、祁漫塔格的弧盆系(弧后盆地)及柳什塔格—朝阳沟—诺木洪等一线的小洋盆。早寒武世中晚期—早奥陶世,裂解达到鼎盛时期,南部冈瓦纳大陆体系与北部劳亚大陆体系之间的大洋体系称为原始特提斯(Proto-Tethys)^[28]。早寒武世晚期,洋盆开始消减俯冲,昆中地块出现少量寒武纪俯冲花岗岩,大规模的俯冲消减作用发生在奥陶纪的东、西昆仑,祁漫塔格及阿尔金发育了大量 $481 \sim 440 \text{ Ma}$ 的岛弧(陆缘弧)型侵入岩^[27],西昆仑中带加里东早期($480 \sim 400 \text{ Ma}$)岛弧型花岗岩,如坎地里克、库地北二长花岗岩、新藏公路、普鲁—克里阳达坂花岗闪长岩、大同乡西黑云母闪长花岗岩等岩体,都属于早古生代岛弧型花岗岩^[29]。晚奥陶世—志留纪末期洋盆封闭,昆仑地区形成一系列同碰撞花岗岩类。祁漫塔格地区发育晚志留世—早泥盆世的同碰撞岩浆岩;昆中韧性逆冲变形及前泥盆纪存在绿片岩相变质作用,昆南奥陶纪—志留纪增生楔杂岩带之上堆积有中、下泥盆统布拉克巴什组前陆盆地沉积,说明此时东、西昆仑、塔里木乃至阿尔金已连为一体。

研究区西兴都库什—帕米尔—西昆仑一带,东侧喀喇昆仑地块与西昆仑地块沿着康西瓦大断裂对接、缝合,西侧霍罗格中间地块沿巴达赫尚断裂拼贴于卡拉库姆南缘,使卡拉库姆—塔里木板块南缘处于活动大陆边缘构造环境之中,形成了火山弧、岩浆弧、弧后裂谷盆地等不同的地质构造环境及相应的金属矿床类型。火山岛弧环境,以毗邻康

西瓦断裂(缝合带)北侧的瓦恰岛弧为代表,已经发现有热液型铁铜矿化。沿着中昆仑隆起陆缘岩浆弧带形成与中酸性岩浆侵入活动有关的矿床,如大同岩浆热液型或斑岩型铜(钼)矿床,库地、阿拉木图、汗也依拉克等矽卡岩型铜铁矿床(化)。西兴都库什—帕米尔—西昆仑地区北部晚古生代大陆边缘弧后裂谷拗陷带内,形成3种重要的矿床类型:①矿床产在昆盖山北坡古鲁滚涅克—恰尔隆裂谷带石炭纪双峰式火山岩系内,形成了昆仑式火山岩型块状硫化物矿床,即在下石炭统形成以基性火山岩为容矿主岩的块状硫化物含铜黄铁矿矿床,如萨落依、古鲁滚涅克铜矿床,在上石炭统形成以酸性火山岩为容矿主岩的块状硫化物含铜黄铁矿矿床,如阿克塔什、萨西萨苏、卡拉卡依铜矿床等,此类矿床在境外部分可能由于工作程度原因尚未发现;②产在古鲁滚涅克—恰尔隆裂谷拗陷带东侧特格里曼苏一带及塔吉克斯坦巴达赫尚州西北部努里南德地区,晚古生代细碎屑岩建造之内的层控砂岩型铜矿床;已知的矿床有西昆仑特格里曼苏铜矿床、塔吉克拉乌努大型铜矿床等;③产在塔木—卡兰谷拗拉槽裂谷石炭系厚层碳酸盐岩建造之内,形成一系列层控碳酸盐岩型铅锌矿床,如卡兰古、塔木中型铅锌矿床等,同类型矿床在塔吉克努里南德地区亦有产出。同时,在阿富汗巴达赫尚省北部有多处产于前寒武纪结晶基底域内与显生宙地层、岩浆岩侵入有关的含金矽卡岩和石英脉状金矿床,元古宙基底变质岩是 Au 元素的重要来源。

2.4 特提斯洋发展演化阶段

从(中)晚泥盆世开始,整个天山—准噶尔地区已经进入造山后板内伸展阶段,大陆动力学条件由前期的挤压变为伸展。浩瀚的早古生代古亚洲洋主体关闭,在其残留洋盆的基础上,或再次拉张形成有限洋盆,或形成陆内裂谷、裂陷槽、上叠盆地等。早二叠世末期的天山运动,使残留的古亚洲洋完全消失,天山地区全面进入陆内演化阶段,形成现今由陆内复合造山带和盆地2种单元构成的陆内盆山构造格局。在北部古亚洲洋最后消失的同时,南部特提斯洋正处于发展演化阶段,分为古、新特提斯洋2个时期。

2.4.1 古特提斯洋的形成发展与消亡时期

石炭纪—中晚三叠世,在卡拉库姆—塔里木板块与基麦里大陆,即中伊朗—冈底斯(藏滇)中间板

块之间存在古特提斯洋。与古亚洲洋类似,古特提斯洋中也漂移着从两侧大陆中分离出来的残留地块。洋盆于早石炭世开始打开,至早二叠世扩张到最大规模后开始俯冲消减,逐渐缩小,至晚三叠世末期—早侏罗世初期洋盆闭合,使冈瓦纳古陆的前缘与劳亚古陆的前缘碰撞拼合。

昆仑地区,加里东碰撞造山之后泥盆系为不同性质的前陆盆地。晚泥盆世东昆仑出现伸展磨拉石、双峰式火山岩,发育基性岩墙群,在他龙—库尔良直到东昆仑西部的托库孜达坂山一带,向西经昆盖山—北帕米尔—西巴达赫尚等一带出现大陆边缘裂谷碎屑岩、火山岩,标志晚古生代裂解开始。早、中二叠世西昆仑于田南部堆积了以裂谷玄武岩为主夹放射虫硅质岩的裂陷槽沉积组合;康西瓦—木孜塔格—阿尼玛卿带发育小洋盆性质的蛇绿岩、放射虫硅质岩等,并逐渐消减增生;出现小洋盆与微陆块相间的构造格局。中、晚二叠世之交发生了一次重要的构造汇聚事件,昆南—羌北多数洋盆、裂谷闭合,成为北部陆缘的一部分。晚三叠世末期—早侏罗世初期古特提斯洋消亡,使巴颜喀拉—松潘地块向北与昆仑地块碰撞,羌塘地块与巴颜喀拉—潘松地块碰撞,拼贴于欧亚大陆南缘并成为其组成部分。侏罗纪时,除局部拉张形成有限洋盆外,多为残留海盆,于晚侏罗世—早白垩世向北俯冲关闭。

2.4.2 新特提斯洋的发展、消亡

大致与古特提斯洋俯冲、消亡同时或略早,基麦里大陆以南的新特提斯洋打开,于早—中侏罗世之交扩张到最大规模,然后开始消减、缩小,晚白垩世—古近纪之交闭合消亡,印度大陆开始与欧亚大陆南缘碰撞^[30]。在喀喇昆仑主逆冲断裂附近出现具S型花岗岩特征的始新世二长花岗岩—二云母石榴子石淡色花岗岩,为新特提斯洋最后消亡同碰撞期的岩浆活动;渐新世—中新世阿富汗境内岩浆活动强烈,以富碱花岗岩类为特征,如白岗岩、淡色花岗岩、正长花岗岩等,可能为新特提斯洋封闭后印度次大陆与欧亚大陆后碰撞阶段的产物。总体上,这一阶段是冈瓦纳大陆北部边缘不断裂离,并增生到欧亚大陆南部边缘的复杂而漫长的过程。

古、新特提斯洋的扩张与闭合经历了2次大规模的板块俯冲、碰撞作用。复杂的地质演化过程注

定其成矿具有多金属、多类型的特征。张洪瑞等^[31]在特提斯成矿域中识别出斑岩型铜—钼—金、与岩浆热液有关的锡—钨、岩浆型铬铁矿、VMS型铜—铅—锌、浅成低温热液型金—汞—锑及与沉积岩有关的铅—锌6种矿床类型,均有世界级矿床产出,如伊朗的萨尔切什梅(Sar Cheshmeh)、松贡(Sungun)、巴基斯坦的赛因德格(Saindak)、中国西藏的驱龙等都是世界级的超大型斑岩型矿床。但研究区内这一阶段矿床发现较少,仅在中帕米尔地区形成了多处与华力西期(部分可延至三叠纪)岩浆作用有关的岩浆热液型(脉与网脉)金、银矿床(点),其中部分可能属于斑岩型,这与研究区工作程度低有直接关系。例如帕米尔大部分地区及巴基斯坦北部地区至今地质矿产工作程度都很低,部分地区为空白区,因此仍有巨大的找矿潜力。

2.5 欧亚大陆形成后的后造山阶段

新特提斯洋闭合消亡后,印度次大陆与欧亚大陆发生碰撞。西昆仑断裂、塔什库尔干断裂的富碱侵入岩、喀尔巴生二长花岗岩、阿尔金断裂南侧的东昆仑北缘、阿羌南东花岗岩^[24]等多属后碰撞至后造山阶段的产物,反映新陆壳已逐渐发育成熟。阿富汗境内新近纪晚期—第四纪的橄榄玄武岩、粗面玄武岩、粗面安山岩熔岩流厚约200m。新疆昆仑、阿富汗等地还见有保留较好的早第四纪火山机构,反映了欧亚大陆形成后的后造山期的构造—岩浆活动。

碰撞后的印度板块继续向欧亚大陆楔入,使陆内俯冲及走滑平移运动进一步发展。由于天山、昆仑山强烈抬升,盆地相对下降,形成了统一的由造山带包围的陆内盆地。帕米尔西构造结是地壳缩短、隆升最强烈的地区。地震层析资料显示,印度岩石圈板片向北深俯冲到兴都库什之下500km的深度,亚洲大陆岩石圈板片向东南俯冲于帕米尔之下300km的深处,帕米尔地区发生了300~700km的地壳缩短^[32-35],并导致西构造结两侧大型走滑断裂的形成(西侧为北北东走向的恰曼左行走滑断裂,东侧为北西向的喀喇昆仑右行走滑断裂),最终实现古亚洲构造体系和特提斯构造体系的直接对接。

研究区巴米扬—康西瓦缝合带(BKT)以北地区(南天山、西兴都库什北部、西昆仑),于中—新生代进入陆内挤压造陆构造环境。伴随着造山带强

烈的挤压、褶皱、抬升、走滑、推覆等构造活动,以及偏碱性岩浆的侵入活动,形成了一系列与韧性剪切构造和碱性岩浆热液活动有关的金矿(化)床,如西昆仑木吉构造蚀变岩型金矿床、依迈克、塔西克西韧性剪切带型、阿然保泰碱性岩浆热液型金矿化等,以及与中酸性岩浆热液活动有关的多金属矿床,如库地矽卡岩型铁铜矿床,大同热液型、斑岩型铜矿床,大红柳滩锂铍(铌钽)矿床等。西兴都库什北部形成与中—新生代岩浆侵入作用有关的接触变质—交代型、矽卡岩型和斑岩型铁、铜、钨、锡、钼等矿床。

巴米扬—康西瓦缝合带(BKT)以南,在两大板块碰撞作用的影响下,中—新生代岩浆作用十分发育。阿富汗东北部西兴都库什地区,白垩纪—新近纪黑云母花岗岩和花岗闪长岩类广泛侵入于古元古代变质岩基底,形成众多伟晶岩稀有金属矿床(点)。而在中、南帕米尔形成了与燕山期、古近纪—新近纪中酸性岩浆作用有关的岩浆热液型、伟晶岩型、斑岩型铜、钼、锂、铍、铌钽等稀土矿床。古比斯—马拉坎德—喜马拉雅地区则主要为与喜山期岩浆作用有关的铜、铅、锌矿床(点),以及与蛇绿岩有关的岩浆型铬矿床。

3 结 论

(1)研究区范围内自中新太古代(或古元古代)以来可分为太古宙—古元古代陆核形成与发展阶段,长城纪—青白口纪大陆裂解与罗迪尼亚超大陆汇聚形成阶段,南华纪—早古生代罗迪尼亚超大陆裂解、古亚洲洋—原特提斯洋演化阶段,特提斯洋发展演化阶段和欧亚大陆形成后的后造山阶段五大演化阶段。

(2)太古宙—古元古代演化阶段,本区古陆可能是 Pangea-IV 泛大陆的一部分,在沉积盆地中堆积了 Fe、Cu、Pb、Zn、Au 等金属元素,形成矿源层;长城纪—青白口纪大陆裂解事件导致西昆仑地区第一次大规模的成矿作用,形成了一系列层控碳酸盐岩型铁—铜—金矿床和火山岩型块状硫化物铜锌矿床;新元古代超大陆汇聚形成阶段,中天山地区广泛沉积了一套文德系含炭质岩系,形成金的矿源层,为后期大规模金的成矿作用提供了物质基础。

(3)新元古代超大陆裂解及古亚洲洋—原特提斯洋演化阶段是区内最重要的成矿期,尤其是晚泥

盆世—早中二叠世碰撞后伸展期,岩浆活动强烈,深部壳幔物质交换频繁,成矿类型多样,矿种齐全。

(4)古、新特提斯洋发展演化阶段是南部特提斯构造域的主要成矿阶段,在邻区形成诸多世界级矿床。但由于研究区工作程度低(部分地区为空白区),这一阶段矿床发现较少,因此仍有巨大的找矿潜力。

(5)欧亚大陆形成后的后造山阶段,伴随着造山带强烈的挤压、褶皱、抬升、走滑、推覆等构造活动,岩浆作用十分发育,形成了一系列与韧性剪切构造有关的金矿化,以及与中酸性岩浆热液活动有关的铁、铜、多金属、锂铍(铌钽)、钨、锡、钼等矿产。

致谢:该项工作得到中国地质调查局发展研究中心向运川研究员等的指导和帮助,在此一并表示感谢。

参考文献

- [1]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,香港:香港文化教育出版社,1994.
- [2]任纪舜,王作勋,陈炳蔚,等.从全球看中国大地构造——中国及邻区大地构造图简要说明[M].北京:地质出版社,1999.
- [3]黄汲清,陈炳蔚.中国及邻区特提斯海的演化[M].北京:地质出版社,1987.
- [4]何国琦,李茂松,韩宝福.中国西南天山及邻区大地构造研究[J].新疆地质,2001,19(1):7-11.
- [5]成守德,刘通,王世伟.中亚五国大地构造单元划分简述[J].新疆地质,2010,28(1):16-21.
- [6]王作勋,郭继勇,吕喜朝,等.天山多旋回构造演化及成矿[M].北京:科学出版社,1990:53-59.
- [7]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,1992:47-68.
- [8]Дженчураева Р. Д. Геодинамика металлогения и рудогенез[M]. Илим, Бишкек, 2010:1-71.
- [9]肖文交,韩春明,袁超,等.新疆北部石炭纪—二叠纪独特的构造—成矿作用:对古亚洲洋构造域南部大地构造演化的制约[J].岩石学报,2006,22(5):1062-1076.
- [10]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.
- [11]左国朝,刘义科,张招崇,等.中亚地区中、南天山造山带构造演化及成矿背景分析[J].现代地质,2011,25(1):1-13.
- [12]陈哲夫,周守濤,乌统旦.中亚大型金属矿床特征与成矿环境[M].乌鲁木齐:新疆科技卫生出版社,1999:26-27.
- [13]李荣社,计文化,何世平,等.中国西部古亚洲与特提斯两大构造域划分问题讨论[J].新疆地质,2011,29(3):247-250.

- [14]何国琦, 成守德, 徐新, 等. 中国新疆及邻区大地构造图1:2500000 [M]. 北京: 地质出版社, 2005.
- [15]许志琴, 李思田, 张建新, 等. 塔里木地块与古亚洲/特提斯构造体系的对接[J]. 岩石学报, 2011, 27(1): 1–22.
- [16]Sengor A M C, Botum U J. The Tethyside orogenic system: an introduction[C]//Sengor A M C. Tectonic Evolution of the Tethyan Region. Dordrecht/Boston/London: Kluwer Academic Publishers, 1989: 1–22.
- [17]李惠民, 陆松年, 郑健康, 等. 阿尔金山东端花岗片麻岩中3.6Ga锆石的地质意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2001, 4: 259–262.
- [18]肖序常, 王军, 苏犁, 等. 再论西昆仑库地蛇绿岩及其构造意义[J]. 地质通报, 2003, 22(10): 745–750.
- [19]崔军文. 阿尔金断裂系[M]. 北京: 地质出版社, 1999: 125–136.
- [20]左国朝, 刘义科, 张招崇, 等. 中亚地区中、南天山造山带构造演化及成矿背景分析[J]. 现代地质, 2011, 25(1): 1–13.
- [21]陈哲夫, 成守德, 等. 新疆开合构造与成矿[M]. 乌鲁木齐: 新疆科技卫生出版社, 1997: 125–168.
- [22]成守德. 中国新疆北部及邻区贵重有色金属矿产图说明书[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1996: 42–44.
- [23]覃小锋, 夏斌, 黎春泉, 等. 阿尔金构造带西段前寒武纪花岗质片麻岩的地球化学特征及其构造背景[J]. 现代地质, 2008, 1: 34–44.
- [24]高振家, 陈克强. 新疆的南华系及中国南华系的几个地质问题[J]. 地质调查与研究, 2003, 26(1): 8–14.
- [25]高晓峰, 校培喜, 过磊, 等. 北阿尔金地区早古生代有限洋盆开启时限: 来自斜长花岗岩的证据[J]. 中国科学(D辑), 2012, 3: 359–368.
- [26]韩芳林. 西昆仑其曼于特蛇绿混杂岩带及地质意义[D]. 中国地质大学(北京)硕士学位论文, 2003.
- [27]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: 15–37.
- [28]甘克文. 特提斯的演化和油气分布[J]. 海相油气地质, 2000, 5(4): 21–29.
- [29]毕华, 王中刚, 王元龙, 等. 西昆仑造山带构造岩浆演化史[J]. 中国科学(D辑), 1999, 5: 398–406.
- [30]莫宜学, 潘桂棠. 从特提斯到青藏高原形成: 构造–岩浆事件的约束[J]. 地学前缘, 2006, 13(6): 43–51.
- [31]张洪瑞, 侯增谦, 杨志明. 特提斯成矿域主要金属矿床类型与成矿过程[J]. 矿床地质, 2010, 29(1): 113–133.
- [32]Burtman V S, Molnar P. Geological and geophysical evidence for deep subduction of continental crust beneath the Pamir. [J]. Spec. Pap. Geol. Soc. Am., 1993, 281: 76.
- [33]Fan G, Ni J F, Wallace T C. Active tectonics of the Pamirs and Karakorum[J]. Geophys. Res., 1994, 99: 7131–7160.
- [34]Burtman V S. Cenozoic crustal shortening between the Pamir and Tien Shan and a reconstruction of the Pamir–Tien Shan transition zone for the Cretaceous and Palaeogene[J]. Tectonophysics, 2000, 319, 2: 69–92.
- [35]Negredo A M, Replumaz A, Villase A et al. Modeling the evolution of continental subduction processes in the Pamir–Hindu Kush region[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2007, 259(1/2): 212–225.