

doi: 10.12029/gc20220503

李文渊, 张照伟, 高永宝, 洪俊, 陈博, 张志炳. 2022. 昆仑古特提斯构造转换与镍钴锰锂关键矿产成矿作用研究[J]. 中国地质, 49(5): 1385-1407.

Li Wenyuan, Zhang Zhaowei, Gao Yongbao, Hong Jun, Chen Bo, Zhang Zhibing. 2022. Tectonic transformation of the Kunlun Paleo-Tethyan orogenic belt and related mineralization of critical mineral resources of nickel, cobalt, manganese and lithium[J]. Geology in China, 49(5): 1385-1407(in Chinese with English abstract).

昆仑古特提斯构造转换与镍钴锰锂关键矿产成矿作用研究

李文渊^{1,2,3}, 张照伟^{1,2}, 高永宝^{2,4}, 洪俊^{1,3}, 陈博^{1,3}, 张志炳⁵

- (1. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710054; 2. 自然资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室, 陕西 西安 710054; 3. 中国-上海合作组织地学合作研究中心, 陕西 西安 710054; 4. 中国地质调查局西安地质矿产调查中心, 陕西 西安 710100; 5. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083)

摘要:【研究目的】特提斯构造域研究愈来愈显示为原特提斯、古特提斯和新特提斯三分的特点,其中古特提斯洋的形成演化及其成矿作用的研究较为薄弱。【研究方法】本文根据东昆仑夏日哈木早泥盆世超大型镍钴硫化物矿床、帕米尔玛尔坎苏晚石炭世大型火山源沉积型富锰矿和西昆仑大红柳滩晚三叠世大型伟晶岩型锂铍矿床发现事实,将它们成矿的构造地质背景演化作为主线关联起来研究,提出它们分别代表了古特提斯裂解、大洋扩张和闭合后碰撞构造转换结果的认识。【研究结果】认为与古亚洲洋同期的原特提斯洋于志留纪末碰撞闭合后,在冈瓦纳大陆北缘由于地幔柱作用改造的软流圈发生部分熔融而裂解,形成了以夏日哈木与裂解背景幔源镁铁—超镁铁岩有关的超大型岩浆镍钴硫化物矿床;随着进一步扩张,在早石炭世形成了古特提斯成熟大洋,由于大洋中脊喷发提供的成矿物质,在晚石炭纪随着大洋快速扩张向消减的转换,洋底碳酸盐岩沉积中形成了玛尔坎苏大型富菱锰矿床;古特提斯洋闭合后于中三叠世进入碰撞造山阶段,于晚三叠世后碰撞阶段地壳重熔形成的S型花岗岩高温热液流体,并造就了大红柳滩大型伟晶岩型锂铍矿床。早晚古生代之交是古特提斯洋裂解的开始,此时秦祁昆洋为代表的原特提斯主洋已经闭合,作为原特提斯洋弧后盆地的古亚洲洋尽管尚未闭合,但夏日哈木镍钴矿床则是原特提斯造山后陆壳再次裂解的产物,并非形成于原特提斯洋岛弧或后碰撞的环境;锰是亲石元素,岩浆作用中不富集,而在外生沉积作用中富集,说明古特提斯早石炭世新生洋壳是富锰的,淋滤出的锰离子在晚石炭世相对宁静洋底深处碱性环境中形成沉积型碳酸锰矿,代表了较为强烈的岩浆作用阶段向相对宁静的沉积环境的转换;大红柳滩S型花岗岩基及其大规模伟晶岩型锂铍矿的产出,则反映了强烈的碰撞造山作用导致的地壳重熔的地球动力学背景,应是古特提斯洋缝合造山后或后碰撞伸展的环境。【结论】就已有的成矿事实,东昆仑康西瓦—阿尼玛卿古特提斯缝合带与南部巴颜喀拉的西金乌兰—金沙江和羌塘的龙木错—双湖古特提斯缝合带相比,更富有地质意义。

关键词:构造转换;成矿作用;镍、钴、锰、锂关键矿产;矿产勘查工程;古特提斯;昆仑造山带

创 新 点:古特提斯不同时空特殊矿产的成矿作用所代表的构造环境的厘定,对重塑已经消失的古特提构造演化特别是关键构造转换具有重要的意义。其反过来又可帮助理解区域成矿并指导区域找矿。

中图分类号:P611 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2022)05-1385-23

收稿日期:2021-07-29; 改回日期:2022-09-02

基金项目:国家重点研发计划课题(2019YFC0605201)和国家自然科学基金重点项目(92055314)联合资助。

作者简介:李文渊,男,1962年生,博士,研究员,博士生导师;E-mail: xalwenyuan@126.com。

Tectonic transformation of the Kunlun Paleo–Tethyan orogenic belt and related mineralization of critical mineral resources of nickel, cobalt, manganese and lithium

LI Wenyuan^{1,2,3}, ZHANG Zhaowei^{1,2}, GAO Yongbao^{2,4}, HONG Jun^{1,3}, CHEN Bo^{1,3}, ZHANG Zhibing⁵

(1. Xi'an Center of Geological Survey, China Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. MNR Key Laboratory for the Study of Focused Magmatism and Giant Ore Deposits, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 3. China–SCO Geosciences Research Center, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 4. Xi'an Center of Geology and Mineral Resources Survey, China Geological Survey, Xi'an 710100, Shaanxi, China; 5. School of Earth Science and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: This paper is the result of the mineral exploration engineering.

[Objective] There are increasing evidences show that the Tethys tectonic domain can be divided into three stages of the Proto–Tethys, the Paleo–Tethys and the Neo–Tethys, among which the research on the formation and evolution of the Paleo–Tethys Ocean and related mineralization are relatively weak. **[Methods]** On the basis of the discovery of the Early Devonian Xiarihamu super–large nickel–cobalt sulfide deposit in the East Kunlun, the Late Carboniferous Malkansu large volcanic source sedimentary type manganese–rich deposit in the Pamir and the late Triassic Dahongliutan large pegmatite type lithium–beryllium deposit in the West Kunlun, this study focuses on the formation environment and tectonic evolution as the main line to find out their connection. It is proposed that the three large ore deposits represent the products of the tectonic transformation of Paleo–Tethys break, ocean expansion and ocean closure to continental collision, respectively. **[Results]** It is believed that after the closure of the Proto–Tethys ocean and continental collision, which was contemporaneous with the Paleo–Asian ocean at the end of the Silurian, the modified asthenosphere was partially melted and the northern margin of Gondwana continent breakup due to the mantle plume activity, forming the Xiarihamu super–large magmatic nickel–cobalt sulfide deposit related to the mantle–derived mafic–ultramafic rocks. With the further expansion of the Paleo–Tethys Ocean, the mature ocean was formed in the Early Carboniferous. In the Late Carboniferous, with transformation from rapid expansion to ocean subduction, the Malkansu large rhodochrosite–rich deposit was formed in the carbonate sedimentary of the ocean floor due to the ore forming material provided by the eruption of the mid–ocean ridge. After the closure of the Paleo–Tethys Ocean, it entered the collision orogenic stage in the Middle Triassic. In the Late Triassic post–collisional stage, high temperature hydrothermal fluid of S–type granite formed by the crust remelting, which lead to the formation of Dahongliutan large pegmatite–type lithium–beryllium deposit. The Early Paleozoic and Late Paleozoic alternation was the beginning of the Paleo–Tethys Ocean breakup. At this time the Qinling–Qilian–Kunlun Ocean as the representative of the Proto–Tethys Ocean has closed. Although the Paleo–Asian Ocean as a back–arc basin of the Proto–Tethys has not closed yet, the Xiarihamu nickel–cobalt deposit is the product of the re–cracking of continental crust after the Proto–Tethys orogeny, and it's not formed in the environment of the Proto–Tethys island arc or post–collision. Manganese is a lithophilic element, which is not enriched in magmatism. However, it enriched in exogenous deposition, which indicates that the new oceanic crust of the Early Carboniferous of Paleo–Tethys is rich in manganese, and the leached manganese ions formed sedimentary manganese carbonate in the alkaline environment of relatively quiet ocean floor in the Late Carboniferous, which represents the transition from a strong magmatism stage to a relatively quiet sedimentary environment. In the Dahongliutan, the distribution of S–type granitic batholith and its large–scale pegmatite–type lithium–beryllium ore deposit reflect the geodynamic background of crust remelting caused by strong collisional orogeny. Therefore, it's suggested the formation environment is post–orogeny or post–collision extension of the Paleo–Tethys. **[Conclusions]** As far as the existing facts of mineralization concerned, the Kangxiwa–Animaqing Paleo–Tethys suture zone in East Kunlun is of more geological significance than that of the Xijinwulan–Jinshajiang in the southern Bayankara and the Longmuco–Shuanghu Paleo–Tethys suture zone in the Qiangtang.

Key words: tectonic transformation; metallogenesis; critical mineral resources; nickel, cobalt, manganese and lithium ore deposits; mineral exploration engineering; Paleo–Tethys; the Kunlun orogenic belt

Highlights: The determination of the tectonic environment represented by the mineralization of special mineral resources of different time and space in the Paleo-Tethys is of great significance to the remodeling of the tectonic evolution of Paleo-Tethys, especially for the critical period of tectonic transformation. In turn, it can help understand the regional mineralization regularities and guide regional prospecting.

About the first author: LI Wenyuan, male, born in 1962, doctor, researcher, doctoral supervisor; E-mail: xalwenyuan@126.com.

Fund support: Supported by the projects of National Key Research and Development Program (No.2019YFC0605201) and the National Natural Science Foundation of China (No.92055314).

1 引言

镍钴锰酸锂现在正作为取代钴酸锂成为新一代锂离子电池正极材料的最佳之选,应用和需求日益广泛。特提斯昆仑成矿带这几年最重要的矿床发现是:夏日哈木早泥盆世超大型岩浆镍钴硫化物矿床、玛尔坎苏晚石炭世大型火山沉积富碳酸锰矿床和大红柳滩晚三叠世大型伟晶岩锂铍矿床,以及火烧云白垩纪超大型沉积改造碳酸盐铅锌矿床。这4个大型—超大型矿床都尚未正式开发利用,除火烧云铅锌矿外,其他3个矿床可作为镍钴锰酸锂三元电池“电池金属元素”或者称“能源金属元素”的原材料供给,更有地质意义的是,它们三者是古特提斯威尔逊旋回不同演化阶段构造转换的产物。火烧云铅锌矿则形成于新特提斯构造演化阶段。因此,将夏日哈木、玛尔坎苏晚和大红柳滩3个重要矿床通过古特提斯构造演化而视作一个整体,纳入一体开展区域成矿作用研究,不仅在矿床形成环境上,而且在区域成矿演化探讨上,均具有重要的科学意义。

由于展布于亚欧大陆南缘的特提斯构造域的复杂性,其阶段划分和构造演化存在很大争议。首先是阶段划分,除了中生代以来的新特提斯阶段外,之前古老的特提斯构造活动阶段的划分有不同认识。有一个阶段的认识,即古特提斯,与新特提斯相对应,这种认识国内外比较普遍,至今仍有影响力;还有新特提斯之前存在有原特提斯和古特提斯两个阶段的看法。各有证据,因此特提斯构造阶段划分是一个未定论的问题。但随着研究深入,特别是中国境内秦岭、祁连、昆仑等造山带中大量早古生代志留纪末蛇绿岩和高压—超高压变质带的深入研究,新特提斯之前存在原特提斯和古特提斯两期古老特提斯构造演化阶段的认识逐渐成为共识(Xu et al., 2015; Zhao et al., 2018; 李文渊, 2018;

吴福元等, 2020);其次是构造演化问题,原特提斯、古特提斯和新特提斯构造演化是一个新老相互交替的关系,还是时间上延续时间不一,存在并存的阶段(吴福元等, 2020),以及原特提斯、古特提斯与古亚洲洋之间的关系问题等,是西北地区及其向西境外地质矿产研究不可回避的构造观问题。过去矿产工作习惯于本身矿区的精细地质研究,构造背景套用大地构造研究已有的认识,当区域上不同类型矿床深入研究后,难免在成矿背景整体认识上存在不协调的情况。但矿床学研究本身的任务,在区域成矿背景关联上较少关注。事实上,一些矿床成矿环境专属性的特点,可以关联起来,对一个区域特定时段的构造演化形成富有细节的重塑,反过来亦更加丰富矿床学的研究内容。

本文试图通过昆仑成矿带中夏日哈木、玛尔坎苏和大红柳滩3个不同类型且不同时代矿床的成矿环境与成矿作用的考察,并将它们在时空上关联起来,对昆仑造山带这一特定区域的地质历史上的古特提斯的开启、演化和结束,从矿床学视角结合其他领域已成熟的认识,提出构造演化特别是突变的构造转换与成矿作用相应的时间—环境—遗迹(成矿)系统的重塑,借此丰富特提斯构造成矿和大陆区域成矿学的研究内容。

2 古特提斯洋构造行迹的辨识及其认识

正如特提斯概念的变化一样,从地中海依据希腊神话有了“特提斯”术语起,就赋予了它无限的想象。不过,直到板块构造认识提出后才有了“古特提斯洋”的概念(Stöcklin, 1974; Sengör, 1979)。新特提斯洋是中生代裂开,于65 Ma闭合而陆—陆碰撞,继而印度陆块俯冲于亚洲陆块之下,形成双陆壳岩石圈叠置模式,导致对亚洲大陆的地貌和构造形迹与成矿作用产生深刻影响。新特提斯之前,板

块构造研究已经明确,欧亚大陆南缘,在漫长的古生代存在着更古老而已经消减闭合,并被新特提斯改造或屏蔽的古老特提斯洋的演化历史。但这个古老的特提斯演化是一期威尔逊旋回呢,还是两期?即新特提斯之前是有原特提斯洋和古特提斯洋两期呢,还是仅古特提斯洋一期?如果是两期,原特提斯洋是什么时候闭合的?古特提斯是什么时候开裂的?这些都是大家长期关注的问题。

吴福元等(2020)关于特提斯演化的长文,明确提出了特提斯三分的观点,即新特提斯阶段之前存在着原特提斯和古特提斯两期威尔逊构造演化阶段的认识,为争论多年的原、古特提斯认识分歧,提出了明确的观点,并得到了学术界的广泛认同。但吴福元等(2020)并没有讨论古特提斯洋是何时开

裂的问题,甚至认为古特提斯洋是与原特提斯洋长期并存的洋,只是原特提斯洋于志留纪末(440~420 Ma)闭合后,古特提斯洋继续存在而于中三叠世末(220 Ma)闭合而已。并认为青藏高原北部可能存在3条古特提斯缝合带,自南而北分别是:南、北羌塘地体之间的龙木措—双湖缝合带、地处羌塘地块北缘的西金乌兰—金沙江缝合带和昆仑造山带南部的康西瓦—阿尼玛卿缝合带(图1)。

羌塘地块中间的龙木措—双湖缝合带是青藏专项1:25万区调的发现(李才,1987),发现有蛇绿岩和蓝片岩、榴辉岩,以及斜长角闪岩和麻粒岩。蓝片岩、榴辉岩测年表明其变质年龄集中于220~240 Ma,但麻粒岩却为422~427 Ma(李才等,2016),可见既有早古生代末原特提斯的变质产物,



图1 特提斯缝合带构造分布示意图
(缝合带位置据吴福元等,2020修改)

原特提斯缝合带:①—北祁连—宽坪缝合带;②—柴北缘—商丹缝合带;③—库地—中昆仑缝合带;古特提斯缝合带:④—康西瓦—阿尼玛卿—勉略缝合带;⑤—西金乌兰—金沙江—甘孜—理塘—哀牢山缝合带;⑥—龙木措—双湖—昌宁—孟连缝合带;新特提斯缝合带:⑦—班公湖—怒江—腾冲缝合带;⑧—雅鲁藏布—印缅缝合带

Fig.1 Schematic diagram of structural distribution of Tethys suture ture
(The suture belt position was modified from Wu et al., 2020)

Proto-Tethys suture zone: ①—North Qilian-Kuanping suture zone; ②—North Qaidom margin-Shangdan suture zone; ③—Kudi-Central Kunlun suture zone. Paleo-Tethys suture zone: ④—Kangxiwar-Animqing-Mianlue suture zone; ⑤—Xijinwulan-Jinshajiang-Ganzi-Litang-Ailaoshan suture zone; ⑥—Longmuco-Shuanghu-Changning-Menglian suture zone; Neo-Tethys suture zone: ⑦—Bangong-Nujiang-Tengchong suture zone; ⑧—Yarlung-Tsangpo-Indo-Burma suture zone

也有早中生代古特提斯构造闭合的遗迹。并认为是南、北美塘地体的分割,是北方劳亚大陆和南方冈瓦纳大陆的重要界限,但吴福元等(2020)则认为南、北美塘均属于冈瓦纳大陆,北美塘大约330 Ma从冈瓦纳大陆裂解,又于晚三叠世闭合。龙木措—双湖缝合带向东延伸至云南的昌宁—孟连缝合带,再向南进入缅甸东部、泰国和马来西亚境内,可能延伸至印度尼西亚的清迈—本洞—劳勿缝合带,所以将其古特提斯缝合带总称为龙木措—双湖—昌宁—孟连缝合带(图1)。

羌塘地块北缘的西金乌兰—金沙江缝合带,向南与哀牢山缝合带相连,再向南进入越南境内的松马缝合带,然后向东南经过中国海南岛南部二叠纪蛇绿岩,转向太平洋体系。其闭合时间,目前多认为在二叠纪末期,但俯冲极向存在争论,存在西向、东向,或双向俯冲的观点。发现的蛇绿岩主要形成于泥盆纪—石炭纪,少数二叠纪。由于西金乌兰—金沙江—哀牢山缝合带之北,还存在一个甘孜—理塘缝合带,因此将其古特提斯缝合带统称为西金乌兰—金沙江—甘孜—理塘—哀牢山缝合带(图1)。不过甘孜—理塘缝合带与西金乌兰—金沙江—哀牢山之间是义敦岛弧,蛇绿岩主要限定在二叠纪—早三叠世,因此其形成演化存在诸多疑问。西金乌兰—金沙江—甘孜—理塘—哀牢山缝合带之北的巴颜喀拉—松潘—甘孜地体主体为三叠纪复理石覆盖,东部的松潘—甘孜地体与扬子克拉通相近,而西部的巴颜喀拉与冈瓦纳大陆具有相似的特征(Liu et al., 2019)。由此,巴颜喀拉的甜水海地体北侧发育的花岗岩形成的大红柳滩伟晶岩型锂铍矿床,与松潘—甘孜地体的花岗岩形成的甲基卡伟晶岩型锂铍矿床,在成矿环境上有何异同,或者说这两个均形成于晚三叠世的著名伟晶岩型锂铍矿床,是与西金乌兰—金沙江—甘孜—理塘—哀牢山缝合带有关呢,还是更北面的昆仑造山带南部的康西瓦—阿尼玛卿缝合带的产物?是颇值得研究的问题。

康西瓦—阿尼玛卿缝合带,在西昆仑表现为南昆仑地体与巴颜喀拉(甜水海)地体之间康西瓦缝合带,南昆仑与北昆仑地体之间是原特提斯的库地缝合带。由于南昆仑地体组成复杂,原特提斯和古特提斯构造形迹交织,认识上存在诸多争议(肖文交等,2000)。康西瓦缝合带向东与东昆仑的阿尼

玛卿缝合带相连,也表现为昆南地体南缘的缝合带,昆南和昆北地体之间的昆中缝合带以早古生代的清水泉蛇绿岩为代表,属于原特提斯的缝合带,于440 Ma左右关闭。但昆南的阿尼玛卿古特提斯洋缝合带,出露的一系列蛇绿岩也表现为早古生代和晚古生代两期,与昆南地体发育的400~510 Ma和210~240 Ma的花岗岩相对应,并有泥盆纪和三叠纪两期磨拉石建造,应反映了原特提斯洋和古特提斯洋的两期俯冲和碰撞造山事件。也就是说从西昆仑到东昆仑,除了北昆仑(昆北)与南昆仑(昆南)地体之间是原特提斯缝合带外,南面南昆仑(昆南)南缘的古特提斯缝合带中,也发现了早古生代蛇绿岩的产出(裴先治等,2018),反映了传统上认为的康西瓦—阿尼玛卿古特提斯缝合带,其实是在原特提斯缝合带基础上再次开裂、扩张和闭合的结果。这个原特提斯缝合带不是以往认为的库地—中昆仑原特提斯缝合带,而是在其南面的南昆仑或昆南地体的南缘。看来昆仑地区的原特提斯缝合带和古特提斯缝合带是交织在一起的,但它们具有明确的先后关系,先前原特提斯的缝合带往往是古特提斯再次开裂的薄弱带。这就为人们思考原特提斯洋的闭合和古特提斯的开裂提供了一种新的视角:原特提斯洋的闭合除了在北秦岭、祁连和东、西昆仑早古生代缝合带的表现外,在西段的东、西昆仑古特提斯缝合带上也存在过早古生代原特提斯洋的闭合,这个洋可能是原特提斯洋弧后盆地的扩张洋,稍晚于主洋的闭合。而在这个闭合了的弧后盆地扩张洋的位置,开启了新一轮古特提斯洋的开裂、扩张和消减、碰撞闭合的演化。

康西瓦—阿尼玛卿缝合带向东认为与南秦岭与扬子克拉通之间的勉略带相接(吴福元等,2020),但二者之间的关系由于大面积三叠系覆盖并未有充足的研究。或许康西瓦—阿尼玛卿古特提斯缝合带向东南方向延伸,与甘孜—理塘缝合带相接,构成了一个自西北向东南的康西瓦—阿尼玛卿—甘孜—理塘古特提斯缝合带,从而造就了条形分布的巴颜喀拉—松潘—甘孜造山带,并在其中发育大量的三叠纪花岗岩基,构成了晚三叠世大红柳滩、甲基卡含锂伟晶岩的母岩。但问题是已有的构造单元研究,认定甘孜—理塘缝合带归属于西金乌兰—金沙江缝合带,而与康西瓦—阿尼玛卿缝合带

无关。从甲基卡与大红柳滩板块碰撞闭合形成的花岗质伟晶岩锂矿对比出发(许志琴等,2020),笔者可能更相信甘孜—理塘缝合带与康西瓦—阿尼玛卿缝合带的相关性,但这需要构造学家更为细致的研究工作。

本文仅关注东、西昆仑造山带的康西瓦—阿尼玛卿古特提斯缝合带的形成演化特别是构造转换与新近发现的岩浆镍钴硫化物矿床、沉积锰矿床和伟晶岩锂矿床之间的成生关系(图2),以此来揭示昆仑古特提斯洋发生、发展与消亡过程中构造转换这一特殊构造环境,所导致的镍钴锰锂等关键金属元素的超常富集的机理,从而深入理解区域成矿并指导找矿。所谓构造转换,就是在板块构造作用中,由于深部地质作用的重要变革所导致的重要构造地质环境的突然变化,造成异常物理化学条件的出现,为分散的金属元素异常聚集提供了条件。例如,岩石圈伸展发生破裂形成裂谷,洋中脊洋壳快速扩张转换成俯冲消减为主,以及洋壳闭合形成陆—陆碰撞等。尽管古特提斯缝合带的辨识已取得了卓有成效的成绩,并基本断定古特提斯洋大约在250 Ma前后完成了闭合(吴福元等,2020),但古特提斯洋的发生、形成演化并未形成清晰的认识,甚至古特提斯洋何时开裂亦并无明确意见。有观点

认为是与原特提斯洋并存的洋,但也缺乏必要的论证。不过,笔者从代表原特提斯洋的北祁连—宽坪缝合带、柴北缘—商丹缝合带和库地—中昆仑缝合带于420~440 Ma基本闭合的事实来看,古特提斯洋应该是原特提斯洋闭合后重新裂解拉张成洋的结果。尽管发育250~380 Ma晚古生代蛇绿岩的康西瓦—阿尼玛卿缝合带、西金乌兰—金沙江缝合带和龙木措—双湖缝合带3条古特提斯洋的缝合带中,发现有早古生代的原特提斯时代蛇绿岩的存在,但并不代表此大洋是从早古生代到晚古生代持续存在的,大量早古生代末榴辉岩的发现,更说明此大洋是于早古生代末闭合后又再次打开的。事实上,古老缝合带也是地壳的薄弱带更利于再次打开(Franco,2000),只是这个古特提斯洋是何时裂解而打开的,缺乏足够的论证研究而已。

笔者认为东昆仑新近发现的早泥盆世(411 Ma)夏日哈木超大型岩浆镍钴硫化物矿床(图2),代表了古特提开始裂解的产物(李文渊,2018),是原特提斯洋构造旋回结束,而新的古特提斯洋旋回开始的证据,是重大构造转换的标志性地质事件;而发现于西昆仑造山带西端帕米尔高原的晚石炭世(302 Ma)玛尔坎苏大型沉积富锰矿床(图2),则代表了古特提斯洋在经历了近亿年快速扩张后,进

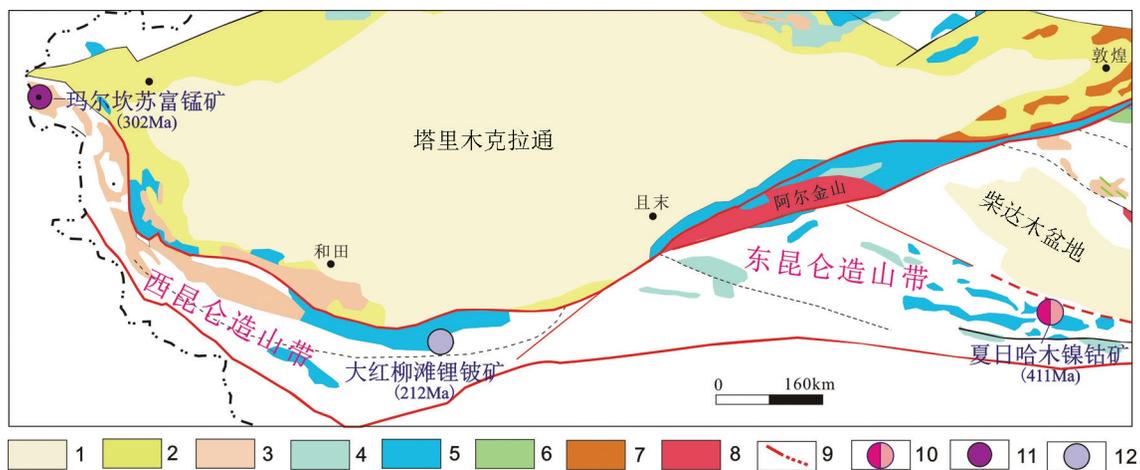


图2 昆仑造山带主要镍钴锰锂矿产地质分布图

1—第四系;2—中生界;3—古生界;4—新元古界;5—中元古界;6—古元古界;7—太古界;8—新元古代花岗岩;9—断裂;10—超大型岩浆镍钴硫化物矿床;11—大型沉积型锰矿床;12—超大型伟晶岩型锂矿床

Fig.2 Geological distribution map of major nickel, cobalt, manganese and lithium minerals in the Kunlun Orogenic Belt (KOB)
 1—Quaternary system; 2—Mesozoic Erathem; 3—Paleozoic Erathem; 4—Neoproterozoic Erathem; 5—Mesoproterozoic Erathem; 6—Paleoproterozoic Erathem; 7—Archean Erathem; 8—Neoproterozoic granite; 9—Fault; 10—Super-large magmatic nickel-cobalt sulfide deposit; 11—Large sedimentary manganese deposit; 12—Super-large pegmatite-type lithium deposit

入了消减的相对慢速扩张时期,或者说由主动的洋中脊扩张洋壳生长期转入了俯冲消减的洋壳消亡期,是大洋从较为强烈的岩浆作用阶段转向相对宁静的沉积环境的构造转换,为沉积型锰矿的形成提供了良好的成矿环境;继甲基卡超大型伟晶岩锂矿床发现后,在西昆仑和田地区发现的晚三叠世(206 Ma)大红柳滩超大型伟晶岩锂矿床(图2),实则代表了古特提斯洋构造旋回的结束,是碰撞造山后最后伸展阶段构造转换的产物。

矿床学家习惯于构造地质学家划定的构造演化轮廓中寻找新发现矿床的构造位置,很少从矿床的成矿专属性上思考所在地质体曾经的构造环境,或者很少从系列矿床组合的成矿专属性演化视角研判曾经成矿阶段的区域构造演化。事实上,这种关系是可以相互的。已有的构造演化认识可以为矿床研究提供重要的成矿构造背景支持,而特定的矿床发现也可以反过来为区域构造环境的判断提供重要证据,特别是区域上一组矿床的形成而所表达出来的特定地质演化关联时,这种矿床-大地构造学的研究是有价值的。笔者认为,东、西昆仑造山带上分布的晚古生代—早中生代岩浆镍钴硫化物矿床、沉积富锰矿床和伟晶岩锂矿床组合,可以很好地重塑地质历史上消失的古特提斯构造旋回的基本框架,为深入理解古特提斯构造及其成矿作用提供帮助。下面就以3个典型矿床的论述,来厘定古特提斯构造演化的关键转换环节及其地质环境与重要成矿作用。

3 昆仑古特提斯洋的开启与岩浆镍钴成矿作用

3.1 夏日哈木岩浆镍钴硫化物矿床代表了古特提斯的开裂

夏日哈木岩浆镍钴硫化物矿床位于青海省中西部格尔木市拉林灶火一带,地质上属于东昆仑造山带昆北构造带中的元古宙金水口群组成的微地块(图3a)。以前没有报道过有岩浆镍钴硫化物矿床发现,而是作为重要的蛇绿岩产出区被重视。2011年通过检查化探异常发现了夏日哈木岩浆镍钴硫化物矿床,从此拉开了东昆仑寻找岩浆镍钴硫化物矿床的序幕(李世金等,2012;王冠等,2014;李文渊,2015),也开启了对造山带中幔源镁铁—超镁铁岩的广泛重视(Zhang et al., 2014, 2019; Li et al.,

2015; Song et al., 2016; Liu et al., 2018)。

夏日哈木超大型矿床的发现勘探,带动了东昆仑造山带中岩浆镍钴硫化物矿床的勘查和研究,继夏日哈木之后相继又发现了规模相对较小的镍钴硫化物矿床(点),并加强了含矿镁铁—超镁铁岩的定年研究工作。已获得了一批高品质的定年数据,集中在443~378 Ma,夏日哈木含矿岩体锆石U-Pb定年为411 Ma(Li et al., 2015)。作为一期新的岩浆镍钴硫化物成矿事件,夏日哈木是造山带中成矿规模最大的岩浆镍钴硫化物矿床,其成矿的物质来源和形成环境开始被广泛关注。2015年笔者在开展以夏日哈木矿床为重点的拉林灶火一带铜镍钴矿公益性行业专项调查研究时,与美国印第安纳大学的Li Chusi博士合作,在国际知名岩石学刊物Lithos上率先发表了夏日哈木矿床年代学、岩石学和Hf-S同位素地球化学的论文(Li et al., 2015),根据岩石地球化学LREE富集和相对亏损Nb、Ta、Ti,以及橄榄石低Ca等弧岩浆的信息,提出了夏日哈木矿床是产于岛弧环境的观点。这一观点立即引起了造山带中与镁铁—超镁铁岩有关岩浆镍钴硫化物矿床成矿构造环境的新一轮争论。事实上,当时提出夏日哈木矿床为岛弧地质背景的观点,也是基于东昆仑区域构造研究的认识,认为原、古特提斯洋一体演化,并未将原特提斯洋和古特提斯洋的演化阶段分开,从而对比区域上原特提斯同时代存在岛弧的认识,提出了岛弧环境的观点。争论是必然的,因为岩浆硫化物矿床作为世界上最为古老的矿床之一,从提出始就定义为克拉通裂谷的产物(Vogt, 1894; Craig, 1979),并被广泛接受,大陆裂谷已成为岩浆硫化物矿床的专属成矿地质背景。一直以来,造山带中也很少有成规模的岩浆硫化物矿床发现。20世纪末以来,天山—北山、东准噶尔造山带中相继发现了众多的岩浆铜镍钴硫化物矿床,因与蛇绿岩相伴产出,但有人提出形成于蛇绿岩的观点时,遭到了一致的反对。由于这些矿床的规模相较夏日哈木矿床要小,夏日哈木作为21世纪超大型岩浆镍钴硫化物矿床的新发现,镍储量已进入世界前十位,同时又是特提斯构造域中发现的首例超大型岩浆镍钴硫化物矿床,其形成环境和所代表的地质意义自然为大家强烈关注。

世界上与镁铁—超镁铁质岩有关的岩浆镍钴

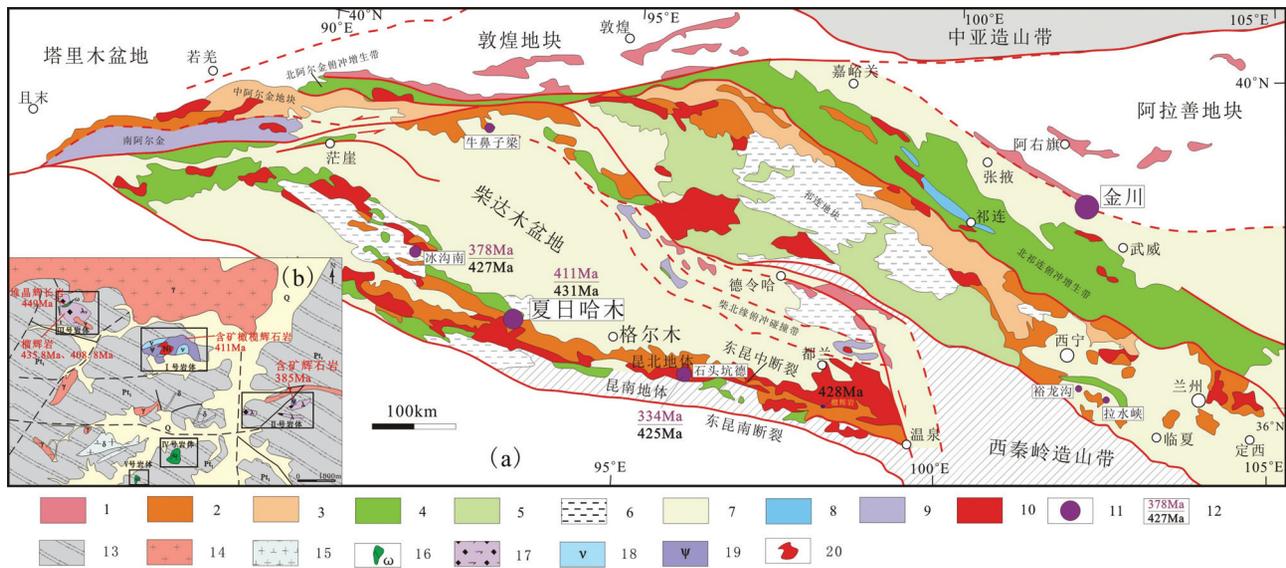


图3 东昆仑—南祁连岩浆镍钴硫化物矿床地质分布(a)及夏日哈木矿区地质图(b)

1—太古宙—古元古代变质基底;2—中元古代深变质岩;3—新元古代浅变质岩;4—早古生代俯冲增生杂岩;5—早古生代沉积建造;6—晚古生代—中生代沉积建造;7—新生代沉积岩;8—高压/低温变质岩;9—超高压变质岩;10—花岗岩;11—铜镍钴硫化物矿床;12—辉石岩/辉长岩年龄;13—矿区古元古界;14—矿区花岗岩;15—矿区闪长岩;16—矿区地幔橄榄岩;17—矿区榴辉岩;18—矿区辉长岩;19—矿区辉石岩;20—矿区铜镍钴硫化物矿体

Fig.3 Geological map of distribution of magmatic nickel-cobalt sulfide deposits in East Kunlun and South Qilian Orogenic Belts (a) and the Xiarihamu ore deposit (b)

1—Archeozoic - Paleozoic metamorphic base; 2—Middle - Neo - Proterozoic deep metamorphic rocks; 3—Neoproterozoic epimetamorphic rock series; 4—Early Paleozoic subduction proliferations; 5—Early Paleozoic sedimentary formation; 6—Late Paleozoic - Mesozoic sedimentary formation; 7—Cenozoic sedimentary rocks; 8—High - pressure / low - temperature metamorphic rocks; 9—Ultra - high - pressure metamorphic rocks; 10—Granite; 11—Nickel - cobalt - copper sulfide deposits; 12—Pyroxenolite/Gabbro age; 13—Palaeoproterozoic rocks in mining area; 14—Granite in mining area; 15—Diorite in mining area; 16—Mantle peridotite in mining area; 17—Eclogite in mining area; 18—Gabbro in mining area; 19—Pyroxenolite in mining area; 20—Nickel - cobalt - copper sulfide ore bodies in mining area

硫化物矿床,通常产于克拉通内部或边缘(Maier and Groves, 2011),很少产于造山带中。但中国除形成于新元古代(827 Ma)的金川超大型岩浆镍钴硫化物矿床外(汤中立和李文渊,1995),大部分与镁铁—超镁铁岩有关的岩浆镍钴硫化物矿床多形成于造山带中,故按照该类矿床的构造—岩石成因分类,可首先划分为两类:克拉通中岩浆镍钴硫化物矿床和造山带中岩浆镍钴硫化物矿床(李文渊,1996,2007)。事实上,造山带中岩浆镍钴硫化物矿床的成矿构造环境一直存在着争论。夏日哈木超大型矿床的发现,掀起了对造山带中与镁铁—超镁铁岩有关的岩浆镍钴硫化物矿床成因的重新讨论(Li et al., 2015; 李文渊, 2015; Song et al., 2016; Liu et al., 2018; 李文渊等, 2020)。

夏日哈木矿床形成构造环境引起广泛争论后(Li et al., 2015),笔者在夏日哈木矿区大比例尺构

造—侵入岩相填图和主、微量元素地球化学、同位素示踪研究基础上,细致开展了橄榄石、单斜辉石、斜方辉石和铬尖晶石成因矿物学研究。进一步研究表明,尽管夏日哈木矿床具有LREE富集和相对亏损Nb、Ta、Ti,橄榄石低Ca等弧岩浆的信息,但与岛弧环境的阿拉斯加型岩体有显著的区别,因此笔者在国际著名矿床学杂志Economic Geology上撰文否定了前面岛弧的认识(张志炳, 2016; Liu et al., 2018),认为夏日哈木矿床源于软流圈,只是受板片混染而已,并进一步提出夏日哈木矿床是古特提斯开始裂解的产物(李文渊等, 2020, 2022)。

夏日哈木矿区大比例尺精细填图发现,仅I、II号岩体是含镍钴岩体,主要由橄榄岩、辉石岩和辉长岩组成外,其余III、IV、V号岩体主要为蛇绿岩残块和榴辉岩(图3b)。而I号含镍钴岩体也是一个复式岩体,分别由含矿的橄榄岩、辉石岩、辉长岩

和不含矿的淡色辉长岩组成,含矿岩体辉石岩中锆石U-Pb年龄为(411.6±2.4)Ma,不含矿淡色辉长岩中锆石U-Pb年龄为(431.3±2)Ma,两者相差20 Ma。不含矿淡色辉长岩地球化学特征与含矿岩体有较大区别。而蛇绿岩残块和榴辉岩中锆石U-Pb年龄分别为439 Ma、408 Ma。可见,在7 km²狭小范围内,不同时代的含矿岩体与蛇绿岩、榴辉岩残块相伴分布。不同构造背景和时代的地质体集中产出,应该是新构造碰撞造山地壳缩减的结果,仍可清晰地反映形成前后关系及其构造环境演化变迁轨迹。结合区域上蛇绿岩、榴辉岩产出判断,以夏日哈木为代表的含镍钴镁铁—超镁铁质岩(411 Ma)明显晚于俯冲消减形成的蛇绿岩和榴辉岩(451~436 Ma),或与榴辉岩的折返过程(408 Ma)同期,属于造山后构造体制的产物。

与含矿岩体伴生的榴辉岩经历了2期变质作用,第一期(436 Ma)代表了前寒武纪陆壳深俯冲发生的榴辉岩相变质作用;第二期(409 Ma)代表了榴辉岩折返过程中发生的角闪岩相退变质作用。该期变质年龄与含矿岩体时代一致,但它们是否具有成因联系尚不明确。近年来,有关俯冲隧道脱水作用导致上覆地幔楔发生部分熔融的研究取得了长足的进展(Zheng et al., 2019; Zheng et al., 2020),在弧下和弧后深度俯冲洋壳脱水进入地幔楔的软流圈,产生水化橄榄岩,水化橄榄岩由于大洋板片俯冲过程中得到充分的冷却,并不立即发生部分熔融,只有地幔楔受到加热作用时,才引起水化橄榄岩脱水熔融。这些研究表明,地幔楔的水化与部分熔融过程通常存在时间差,热动力条件是水化橄榄岩发生熔融的关键。地幔柱热动力源应该是最有效的热动力条件,致使大体积部分熔融而产生大量的镁铁质岩浆,为镍钴元素的巨量富集提供了可能,而岩浆却具有了某些弧地球化学的特点。

夏日哈木含矿岩体的形成时代明显晚于俯冲作用的峰期时代,但却具有明显的岛弧地球化学特征,也正是这样的原因,该矿床被误认为形成于岛弧环境(Li et al., 2015)。尽管否定了产于岛弧环境的观点,但许多研究者却倾向于主张夏日哈木矿床是造山后伸展环境产物的认识。笔者基于特提斯区域构造演化原特提斯和古特提斯两个阶段的事实存在(Zhao et al., 2018; 李文渊, 2018; 吴福元等,

2020),结合区域上原特提斯洋440~420 Ma闭合的认识和夏日哈木含镍钴镁铁—超镁铁岩自身的特点,倾向于认为夏日哈木含镍钴岩体为代表的中生代东昆仑—南祁连镁铁—超镁铁质岩带,是古特提斯洋开始裂解的产物。首先,利用俯冲隧道脱水的地球化学动力学模型,确实可以解释碰撞造山后伸展环境镁铁质侵入岩的形成,但不能提供大规模部分熔融形成可熔离造就大规模硫化物矿床的“大岩浆房”的热动力学条件,这种高热动力学条件,只有高能的地幔柱或上涌地幔作用才可能实现。因此,从原特提斯构造消减的收敛构造体制转向古特提斯构造伸展的离散构造体制的转换,才可能造就夏日哈木超大型岩浆镍钴硫化物超常富集这种可能;其次,如果北秦岭—祁连志留纪末的洋盆闭合,代表了原特提斯洋闭合,大致于420 Ma进入造山后阶段,要扩张形成一个新的向东散开的古特提斯大洋,必然存在一个闭合后的大陆重新裂解,并裂解逐步扩展成洋的过程。过去缺少这方面的地质证据,而形成于411 Ma夏日哈木岩浆矿床就是一个重要的例证。它是特提斯成矿带上迄今为止发现的唯一超大型岩浆镍钴硫化物矿床,是重要的成矿事件和地质事件,是古特提斯洋裂解的标志性事件。特别值得指出的是,最近东昆仑420~409 Ma双峰式火山岩的发现(Li et al., 2020),似乎进一步佐证了夏日哈木岩浆镍钴硫化物矿床形成于新生陆壳古特提斯开始裂解环境的认识。

3.2 东昆仑及邻区晚古生代初期岩浆镍钴硫化物成矿作用

事实上,在东昆仑发现夏日哈木超大型岩浆镍钴硫化物矿床之前,20世纪即在东昆仑东延南祁连造山带中发现有拉水峡等一批中小型岩浆镍钴硫化物矿床(图3a),由于矿床规模小,未引起重视。21世纪以来,笔者曾对南祁连造山带中化隆地区的岩浆镍钴硫化物矿床潜力进行了调查研究,对其中裕龙沟岩体进行了锆石U-Pb同位素定年,获得了443 Ma年龄(Zhang et al., 2014)。近来又在阿尔金地区发现了牛鼻子梁小型岩浆镍钴硫化物矿床(443~378 Ma, Yu et al., 2019)。很显然,夏日哈木矿床为代表的晚古生代初期岩浆镍钴硫化物成矿作用范围及时限较宽泛。不排除部分矿化的镁铁—超镁铁岩是原特提斯洋闭合陆—陆碰撞造山后伸

展环境的产物。但矿化与形成有规模的矿床的成因机理是不同的,一般的矿化作用与形成大规模超大型矿床的成矿背景和动力学机制是完全不同的。411 Ma是古特提斯裂谷成矿作用的峰期,夏日哈木应是这个成矿作用的成矿中心。

夏日哈木含矿岩体呈北东高、南西低的岩盆状,东段出露地表,厚度较大,向西埋藏加深,厚度变薄。含矿岩相由北东向南西基性程度增高,出现纯橄榄岩。矿化倾向于基性程度较高的橄榄岩相和辉石岩相,含矿率高达70%以上,镍平均品位为0.68%,资源量118万t。钴以独立钴矿物或类质同象存在于硫化物、硫砷化物中,平均品位为0.028%,资源量4.03万t。矿物学研究结果显示,夏日哈木矿床橄榄岩和辉石岩中的铬尖晶石地球化学特征与阿拉斯加岛弧型岩体有显著差别,铬尖晶石具有Fe³⁺含量低、Mg[#]和Cr[#]值变化范围大并呈负相关关系,明显区别于阿拉斯加型岩体和玻安岩中的铬尖晶石(张志炳,2016;Liu et al.,2018)。夏日哈木硫化物δ³⁴S值集中在2.2‰~7.7‰,其较高正值与岩浆上升过程遭受地壳物质混染有关。通过模拟显示,含矿母岩浆经历了10%~30%古老陆壳物质的混染。另

外,镍含量高的橄榄岩的初始⁸⁷Sr/⁸⁶Sr比值,明显大于镍含量低的橄榄岩的初始⁸⁷Sr/⁸⁶Sr比值,镍含量高的辉石岩同样对应了高的初始⁸⁷Sr/⁸⁶Sr比值,可见地壳混染对成矿有较大贡献。此外,高氧逸度不利于成矿,因为氧逸度降低会使岩浆中硫化物饱和度降低,从而促进硫化物熔离。阿拉斯加型岩体形成于氧逸度较高的环境不利于成矿,而夏日哈木形成于氧逸度低的环境,单斜辉石Fe³⁺较低(图4),说明其结晶时处于氧逸度较低的环境中,明显与阿拉斯加型岩体相别(Liu et al.,2018)。

阿拉斯加型岩体中极少有斜方辉石,且磁铁矿含量较多(10%~20%),母岩浆Al₂O₃含量较低,而夏日哈木岩体中斜方辉石普遍存在且量较多,甚至出现斜方辉石岩,但磁铁矿含量较少,母岩浆具有较高Al₂O₃含量。铬尖晶石Al₂O₃含量>18.30%,平均34.18%,明显高于玻安岩中的铬尖晶石Al₂O₃含量(<15%,Pagé and Barnes, 2009; Akmaz et al., 2014)。铬尖晶石形成温度为1360~1411℃,而软流圈地幔上界的温度为1280~1350℃(Mckenzie and Bickle, 1988),要发生部分熔融形成岩浆,温度至少要达到1400℃,起源于软流圈地幔的夏日哈木

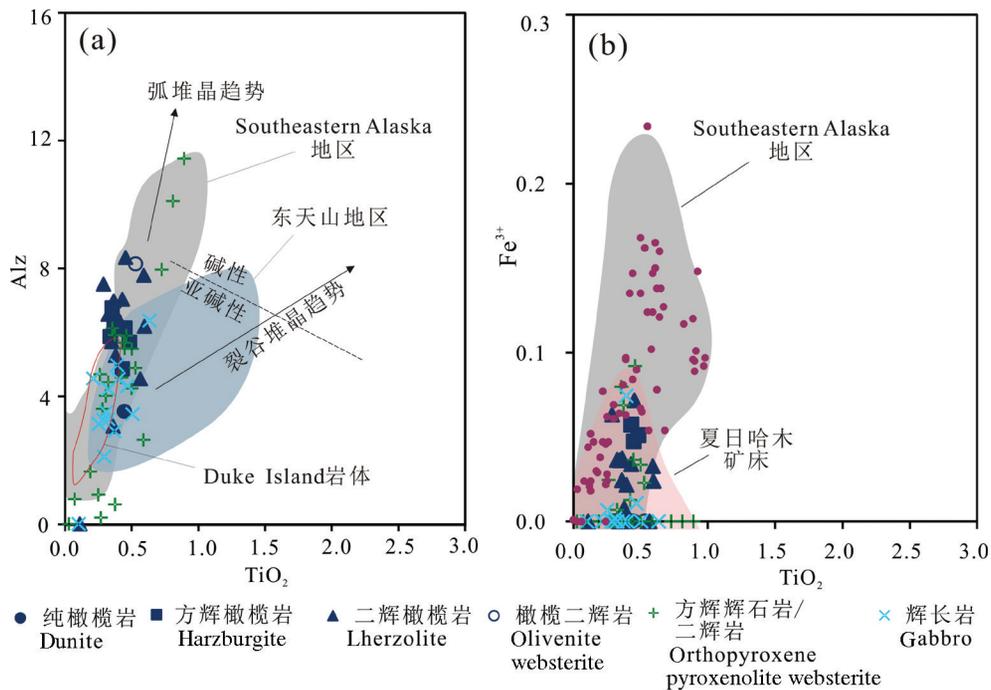


图4 夏日哈木单斜辉石 TiO₂-Al_z及 TiO₂-Fe³⁺图解
(据张志炳,2016修改)

Fig.4 Diagram of clinopyroxene TiO₂-Al_z and TiO₂-Fe³⁺ of Xiarihamu deposit
(modified from Zhang, 2016)

岩体母岩浆,很可能有地幔柱或上涌地幔热源的贡献。而铬尖晶石中包裹角闪石为幔源岩浆成因,软流圈地幔一般不含水,岩浆演化早期结晶的角闪石可能是由于母岩浆混染了俯冲断离至软流圈的地壳含水矿物所致。夏日哈木矿床的“R”因子为100~1000(Song et al., 2016; Liu et al., 2018),表明硫化物是从“大岩浆房”中熔离出来的。可见,造山带中镁铁—超镁铁质岩成矿母岩浆氧逸度和地壳物质的混染是关键因素,但“大岩浆房”是形成大规模矿床的物质供给的关键。

夏日哈木矿床为代表的泥盆纪初期南祁连—东昆仑—阿尔金岩浆镍钴硫化物成矿作用,东昆仑的夏日哈木矿床是成矿中心,向东至南祁连有拉水峡、裕龙沟等成矿表现,向西在阿尔金有牛鼻梁矿产地发现,在祁漫塔格发现了铜镍钴矿化的玉古萨依镁铁—超镁铁质岩体((405±2.8)Ma,胡朝斌,2021)。古特提斯裂解的成矿背景,但其成矿物质建造是在原特提斯洋闭合造山带建造基础上完成的,幔源岩浆肯定保留有原特提斯洋壳俯冲物质的影响。Zheng et al.(2019)研究认为,俯冲消减的洋壳在不同的俯冲深度产生不同的液相组成,俯冲深至弧后深度远离俯冲带抵达洋岛之下时,洋壳俯冲隧道板片—地幔楔软流圈交换反应,引起地幔楔软流圈橄榄岩水化,水化橄榄岩由于温度低并不发生部分熔融,只有当减压发生(更可能是地幔柱或地幔上涌提供热动力源)时,才可能使水化的橄榄岩发生部分熔融形成镁铁质熔体,从而构成板内洋岛玄武岩(OIB)的源区,因此OIB便有了弧的地球化学特征,LILE、Pb和LREE的富集和HFSE的亏损、全岩Sr-Nd同位素及锆石Hf-O同位素富集(Xia, 2014; Dai et al., 2016)。这种地球化学模式,同样可以用于碰撞造山后新生陆壳的破裂幔源镁铁质岩浆的上侵成矿的解释。

原特提斯洋闭合陆—陆碰撞造山后,俯冲消减的洋壳(甚至陆壳),由于俯冲板片的后撤深达软流圈的板片断离,发生板片—软流圈橄榄岩交换反应,软流圈水化橄榄岩当遭遇古特提斯构造拉张而岩石圈破裂减压(或地幔柱或地幔上涌升温)时发生大体积部分熔融,形成带有弧岩浆地球化学信息的镁铁质岩浆,上升至浅部,在低氧逸度条件下,并有地壳物质的混染,发生大规模硫化物熔体—硅酸盐

岩浆不混溶(熔离),上侵—贯入形成与镁铁—超镁铁岩有关的岩浆镍钴硫化物矿床。可见,这种形成镍钴硫化物矿床的镁铁质岩浆作用,是沿着古特提斯裂解呈线形带状展布的,可以是不连续的,可以有多个中心,由于岩浆发育的早晚和成矿条件的变化,矿化强度可能存在差异。因此,与古特提斯裂解有关的大规模岩浆镍钴硫化物矿床,肯定不止夏日哈木一个,应寻找新的岩浆中心,从而探求新的有规模的矿床(李文渊等,2022)。

4 昆仑古特提斯洋的转换与沉积锰矿成矿作用

4.1 玛尔坎苏沉积富锰矿是古特提斯洋快速扩张转向慢速扩张的产物

玛尔坎苏沉积型富锰矿床位于新疆自治区克孜勒苏柯尔克孜自治州阿克陶县木吉乡玛尔坎苏河南岸一带,地质上属于西昆仑造山带与塔里木陆块的结合部位(图2),位于帕米尔构造结正北端挤压构造收敛的部位。民采奥尔托喀纳什锰矿而发现上石炭统含锰岩系层位。含锰岩系沿西昆仑北构造带分布,已发现奥尔托喀纳什大型锰矿、穆呼大型锰矿、玛尔坎土中型锰矿等碳酸锰矿床(图5a),区域成矿潜力巨大,锰平均品位达35%以上,为中国最富的碳酸锰矿床,已控制富锰矿资源量近5000万t,成矿远景达亿t级(高永宝等,2018)。

以东西向的乌赤别离山口—阿克彻依断裂为界,以北为塔里木地层区,以南为昆仑地层区西昆仑地层分区。玛尔坎苏沉积锰矿岩系分布于西昆仑地层分区上石炭统灰岩段中。上石炭统与下伏下石炭统呈角度不整合或平行不整合接触,上覆二叠系呈不整合覆盖。下石炭统为一套基性火山岩和中酸性火山岩组合,并有块状硫化物矿化;下二叠统为碎屑岩—火山碎屑岩夹碳酸盐岩组合。下石炭统乌鲁阿特组火山岩早、中期主要为基性火山岩,以枕状玄武岩为典型标志,反映了深水环境的火山岩浆喷发,晚期有中酸性火山岩产出。

主要含矿地层为晚石炭世喀拉阿特河组(C₃k),喀拉阿特河组自下而上可以划分为3个岩性段:灰黑色生物碎屑角砾灰岩段(C₃k¹)、灰绿色长石砂岩段(C₃k²)和灰黑色含炭泥质灰岩夹薄层微细晶灰岩段

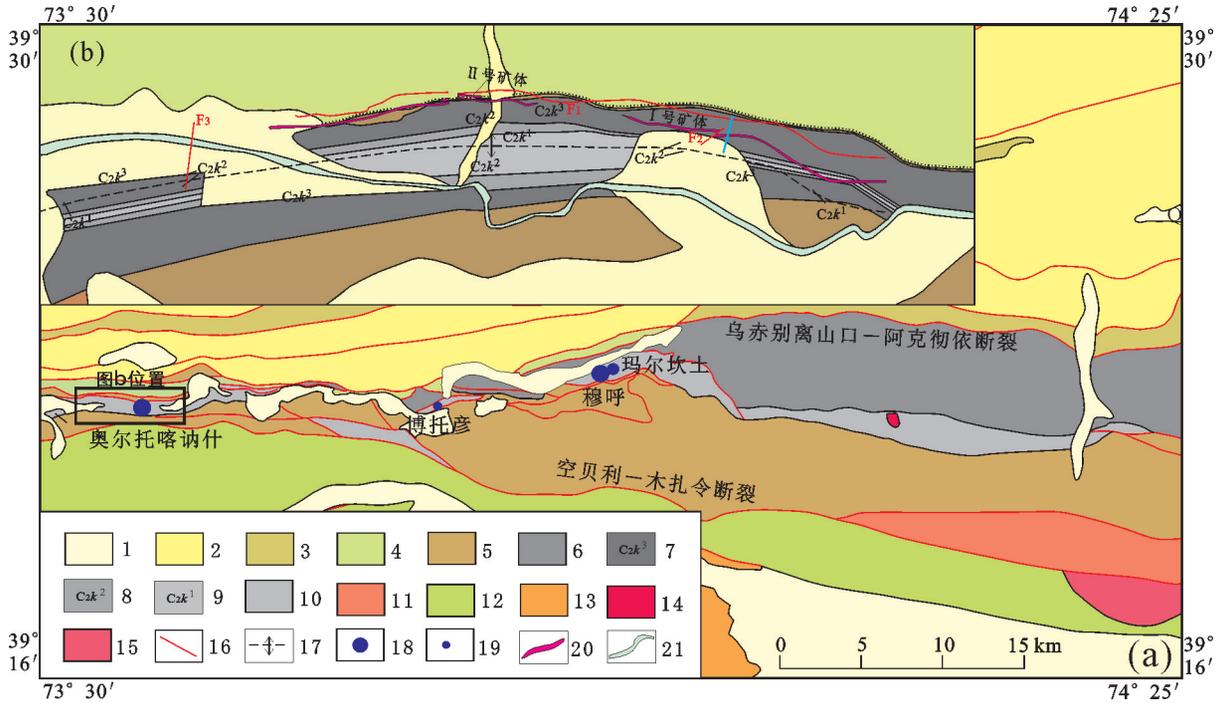


图5 西昆仑玛尔坎苏锰矿区域地质(a)及奥尔托喀纳什锰矿区地质简图(b)(据高永宝等,2018修改)

1—第四系;2—新近系;3—古近系;4—白垩系;5—下二叠统;6—上石炭统;7—上石炭统第三岩段;8—上石炭统第二岩段;9—上石炭统第一岩段;10—下石炭统;11—泥盆系;12—志留系;13—古元古界;14—花岗斑岩;15—斜长花岗岩;16—断裂;17—背斜;18—锰矿床(点);19—锰矿点;20—锰矿体地表露头;21—河流

Fig.5 Geological map of the Maerkansu manganese ore area (a) and the Orto Karnnash manganese ore area (b) (modified from Gao et al., 2018)

1—Quaternary System; 2—Neogene System; 3—Eogene System; 4—Cretaceous system; 5—Lower Permian series; 6—Upper Carboniferous series; 7—The third rock section of Upper Carboniferous series; 8—The second rock section of Upper Carboniferous series; 9—The first rock section of Upper Carboniferous series; 10—Lower Carboniferous series; 11—Devonian System; 12—Silurian System; 13—Paleozoic Erathem; 14—Granite porphyry; 15—Plagioclase granite; 16—Fault; 17—Anticline; 18—Manganese deposit; 19—Manganese ore spots; 20—Surface outcrops of the manganese ore bodies; 21—Rivers

(C_2k^3), 锰矿体顺层分布于第三岩性段(C_2k^3)含炭灰岩中,黄铁矿较为发育。第三岩性段(C_2k^3)含炭灰岩自下而上可分为:(1)下部灰色、灰黑色中厚层状含炭砂屑灰岩夹薄层状角砾灰岩,岩层顶部炭质含量逐渐增加。见有少量安山岩、英安岩碎屑,多见黄铁矿;(2)中部灰黑色含炭质生物碎屑灰岩夹含砂钙质泥岩、钙质砂岩,块状、碎裂状构造,此段即主要赋锰层位,锰矿体厚度3~7 m,局部见粉色蔷薇辉石及乳白色锰方解石脉;(3)上部灰色、青灰色中厚层状结晶灰岩、灰色厚层状含炭粉屑灰岩夹薄层含炭泥质灰岩,多见黄铁矿。

锰矿体呈厚层状,块状构造,碎屑状结构,主要由菱锰矿组成,含量> 90%,棱角状、不规则状,少数次圆状,粒径一般0.03~0.25 mm。碎屑物之间被锰的氧化物充填。部分锰矿石具原生纹层结构,见少量生

物碎屑。矿石类型主要以碳酸锰矿石为主,占95%以上,属低硫、低铁、中磷碳酸锰矿石,为优质富锰矿石。锰矿石为泥-微晶结构,块状构造及层纹-条纹状构造,主要矿石矿物以菱锰矿为主,平均含量80%,部分达到90%以上。此外有锰方解石、硼锰矿等含锰矿物。同时有后期热液改造矿物锰镁绿泥石、红锰矿、硫锰矿、锰方解石(脉)、重结晶菱锰矿及蔷薇辉石等,以及表生氧化矿物软锰矿、水锰矿、硬锰矿等。菱锰矿为褐黑色,玻璃光泽,碳质泥质胶结,与锰方解石、硼锰矿密切共生,主要呈细粒-微粒集合体,矿物颗粒粒径0.002~0.03 mm,电子探针分析MnO为50.2%~57.4%,CaO为0.49%~5.60%,MgO为0.37%~1.67%,FeO为0.06%~0.33%,均属于狭义的菱锰矿($MnCO_3$ 含量大于75%)。

玛尔坎苏大型沉积型富锰矿床,从下伏地层早

石炭世大量基性火山岩分布未成矿,而在晚石炭世沉积作用的碳酸盐岩中富集成矿的事实分析,反映了锰在岩浆内生作用中趋于分散,而在沉积外生成矿作用中趋于富集的地球化学学习性(黎彤,1992)。锰的“亲硅酸盐性”特点,当它随上地幔部分熔融产生玄武质岩浆喷发而形成洋壳时,尽管锰在其中的丰度很高,但却分散到了硅酸盐矿物中,并不富集成矿。因此火山热液喷流作用并不形成锰矿床。只有喷发的火山岩遭遇风化剥蚀外生作用时,锰才以分化型和沉积型锰矿的形式富集成矿。

由此,笔者推断:玛尔坎苏锰矿的形成,是古特提斯洋早、晚石炭世构造转换导致环境发生重大改变的结果。早石炭世快速扩张的大洋,洋中脊上升的岩浆不断增生的洋壳带来大量的锰,但它们分散在洋壳火山岩的硅酸盐矿物中,并没有成矿。这时候的构造环境应该就是扩张的大洋,没有证据表明古特提斯洋早石炭世就开始了俯冲消减产生了岛弧并形成了弧后盆地的构造扩张。直到晚石炭世,早、晚石炭世岩层之间的不整合,才表明晚石炭世进入了一个新的构造环境。早石炭世的枕状玄武岩标志性特点,表明它们曾经洋壳的身份,是消失的古亚洲大洋的增生洋壳环境;进入晚石炭世,首先经历了洋壳向陆壳的转换,代表了俯冲消减开始岛弧的形成,早石炭世末被认为是双峰式火山岩酸性岩端元的安山岩、英安岩应该是岛弧岩浆的产物,此后裸露地表造山风化剥蚀,在大陆斜坡深水地区形成了具有陆源碎屑的碳酸盐沉积,晚石炭世喀拉阿特河组(C_2k)中下部中厚层状含炭砂屑灰岩夹薄层状角砾灰岩,见有少量安山岩、英安岩碎屑,便是例证,但这时候并没有形成锰的富集,锰矿石是在晚石炭世晚期,灰岩中炭质生物碎屑增加、钙质泥岩增加后,才在碳酸盐岩中富集了锰矿石。这种环境应该是有机质发育较为平静的深水环境,是被动陆缘的海湾,不受构造-岩浆作用的扰动(刘训,2001;方爱民等,2009)。可见,玛尔坎苏锰矿的形成经历了两种大的构造环境的转换:由激烈的快速扩张的构造-岩浆环境向平静的慢速消减的沉积环境转换,造就了锰矿的形成。由于地处后期帕米尔构造结强烈挤压收敛的构造顶端位置,构造变形对矿体的构造形态及空间就位影响是很大的,但主要是对水平沉积矿床的空间形态改造问题。

总之,玛尔坎苏锰矿不应是扩张的弧后盆地,也不是裂谷盆地的产物,而是经历两种构造环境强烈转变形成的矿床。前期是物源准备阶段的快速扩张大洋环境,后期是成矿富集阶段的俯冲消减的被动陆缘的深水环境,两种环境,缺一不可。后期成矿富集阶段,只要条件允许,合适的构造环境都可能形成有价值的富集矿体。有报道在二叠纪中也发现了沉积型锰矿(陈登辉等,2019)。

4.2 晚石炭世古特提斯洋的海底富锰矿成矿作用

目前晚石炭世玛尔坎苏富锰矿带,作为一个重要富锰层位已被充分重视,初步调查其东西延长愈几十千米,已向西延伸至境外塔吉克斯坦。但就已查明矿床中,奥尔托喀纳什锰矿床仍是最有工业价值的富锰矿床,矿区含矿岩性段为上石炭统喀拉阿特河组(C_2k)含炭泥质灰岩和含炭灰岩,锰矿体顺层分布于含炭灰岩中。上覆二叠系下统玛尔坎雀库塞山组(P_1m)安山质凝灰岩、细碎屑岩和灰岩,在背斜两翼分布,富锰矿体在核部北侧(图5b)。

奥尔托喀纳什锰矿 I 号矿体为矿区主矿体之一,矿体产状稳定连续,已控制斜深 475 m,矿体厚度 0.3~22.3 m,平均厚度 4.1 m,品位 10.1%~46.9%,平均品位 35.2%。II 号矿体长约 2500 m,矿体厚度 0.6~8.4 m,平均 2.1 m,品位 11.3%~42.5%,平均 29.1%。据目前的研究(高永宝等,2018;张帮禄等,2018;陈登辉等,2019;张连昌等,2020),可将成矿划分为 3 期。第一期:主成矿期,主要矿石矿物为菱锰矿,占比 75%~91%,与硼锰矿、锰方解石密切共生。菱锰矿为隐晶质结构,呈团块状,炭质泥质胶结物,富矿体主要由隐晶质菱锰矿组成;硼锰矿隐晶质;锰方解石主要以团块状产出,交代菱锰矿,内部残留菱锰矿;第二期:矿物组合主要为硅质热液交代早期菱锰矿形成的锰镁绿泥石、红锰矿、水锰矿、硫锰矿、锰方解石(脉)、蔷薇辉石等矿物。该期矿物均沿菱锰矿裂隙或成脉状产出,锰方解石呈钟乳状、红锰矿呈短柱状、锰镁绿泥石呈纤维状。表明该期改造热液主要为以硅质热液为主;第三期:沿菱锰矿边部发育后期软锰矿,少量水锰矿、硬锰矿。

玛尔坎苏锰矿的成岩成矿时限,主要根据上下火山岩的定年数据推定。含矿地层上石炭统喀拉阿特河组(C_1k)下伏岩层下石炭统乌鲁阿特组(C_{1w})中流纹岩年龄((345.3±3.7)Ma)和上覆岩层下二叠

统含凝灰质长石石英砂岩年龄($(292\pm 3.2)\text{Ma}$)(高永宝等,2018),从而确定玛尔坎苏锰矿形成于晚石炭世。此外,锰矿石中有机质Re-Os同位素等时线年龄($(302\pm 9.2)\text{Ma}$)(高永宝,2018)。也进一步证实玛尔坎苏地区锰矿形成于晚石炭世。

据统计,喀拉阿特河组灰岩Mn平均含量仅为 671×10^{-6} ,而下伏的乌鲁阿特组中基性火山岩Mn平均含量为 1193×10^{-6} ,乌鲁阿特组碧玉岩Mn平均含量高达 3547×10^{-6} ,说明成矿物质确实来源于下伏的早石炭世火山岩,但碧玉岩中含量最高。碧玉岩应是海底火山喷发结束后,硅质热液活动的遗迹。硅质热液是岩浆水和海水混合的结果,火山岩中的锰进入硅质热液,可能是热的火山岩硅酸盐矿物遭遇冷的海水发生蚀变而分离出来进入了硅质热液和海水之中,从而表现为海底热水活动的特点(图6)。

锰矿石较低的Fe/Mn比值、V/(V+Ni)比值、强烈的Ce正异常,表明Mn是在较氧化环境下,以氧化物或氢氧化物形式沉积富集(高永宝等,2018;张帮禄等,2018;张连昌等,2020)。顶板灰岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 为 $-3.9\text{‰}\sim -1.0\text{‰}$,底板灰岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 为 $-3.8\sim -2.4\text{‰}$,显示正常沉积碳酸盐岩的特征。锰矿石 $\delta^{13}\text{C}$ 的 $-21.8\text{‰}\sim -12.8\text{‰}$,菱锰矿的 $\delta^{13}\text{C}$ 为 $-19.2\text{‰}\sim -16.4\text{‰}$ (高永宝等,2018;张帮禄等,2018),与有机质(沥青“A”) $\delta^{13}\text{C}$ 为 $-27.7\text{‰}\sim -26.8\text{‰}$ 、干酪根 $\delta^{13}\text{C}$ 为 $-28.0\text{‰}\sim -26.0\text{‰}$)关系密切。因此,认为玛尔坎苏的菱锰

矿经历了先成锰氧化物或氢氧化物被还原转化成菱锰矿的过程(高永宝等,2018;张帮禄等,2018;张连昌等,2020)。但也有可能在还原且较强的碱性($\text{pH}>8$)条件下, Mn^{2+} 可与 CO_3^{2-} 直接结合在海底沉淀形成菱锰矿。

黎彤(1992)认为,由于锰和铁的地球化学行为有很大的差异,在地球核幔分离过程中,铁主要进入地核,而绝大部分锰(约90%)进入地幔。地幔演化中,上部地幔部分熔融产生玄武质岩浆,喷出地幔表面形成洋壳,而残留下来的超基性岩形成了上地幔,锰的“亲硅酸盐性”,使它更多地进入了熔融的玄武质岩浆,喷发而分布到了新生的洋壳中,不像铬留到了难溶的上地幔超基性岩中。不过内生作用中趋于分散的锰,在玄武质岩浆活动中并不富集成矿,尽管丰度很高,但却分散到了硅酸盐矿物中。在海水的岩-水反应中,火山岩中的锰进入海水,富含锰的海水性质,决定了锰的价态。在还原环境, Mn^{2+} 可与 CO_3^{2-} 直接结合在海底沉淀形成菱锰矿;氧化环境则首先形成锰的氧化物和氢氧化物沉淀,在经历富有机质的还原环境,锰氧化物和氢氧化物被还原释放出 Mn^{2+} ,而有机物质被氧化释放大量 CO_3^{2-} , Mn^{2+} 和 CO_3^{2-} 在深部沉淀物表面结合沉淀形成菱锰矿并被保存下来。

玛尔坎苏锰矿的成矿应经历了快速扩张大洋环境新生洋壳前期成矿物源的准备阶段和后期俯

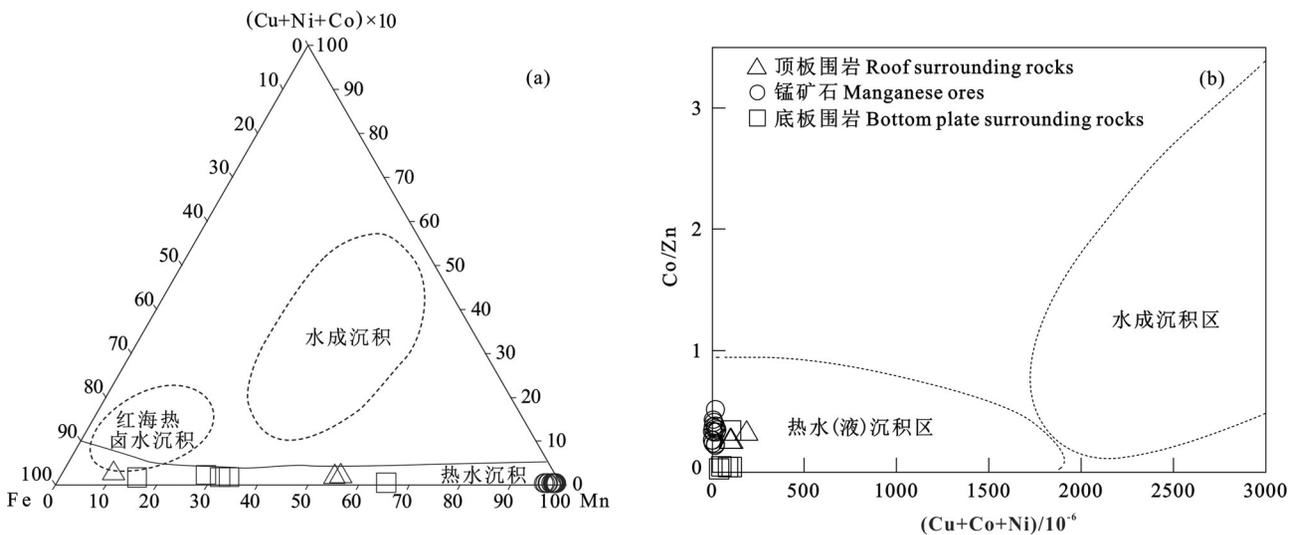


图6 奥尔托喀纳什锰Fe-Mn-(Cu+Co+Ni)和(Cu+Co+Ni)-Co/Zn图解
(据高永宝等,2018修改)

Fig.6 Diagram of Fe-Mn-(Cu+Co+Ni) and (Cu+Co+Ni)-Co/Zn of the Orto Karnash manganese ore deposit
(modified from Gao et al., 2018)

冲消减的被动陆缘的深水环境锰的聚集富集成矿阶段,即内生而外成。晚石炭世锰的聚集富集成矿阶段,应是被动陆缘的平静深水环境。富含锰离子的海水,在合适的物理化学条件下沉淀而成矿。现在看来,并不是上石炭统的所有灰岩中都有菱锰矿的富集,而仅在含炭灰岩中富集。一般认为,锰的氧化物或氢氧化物最易沉淀而富集,而含矿层含炭的标志性特点又指示为富含有机质的还原环境。因此,玛尔坎苏锰矿的成矿环境是氧化环境还是还原的物理化学条件,还颇值得研究。从区域上二叠统中也有菱锰矿发现认识,稳定而持续的局部环境对沉积锰矿形成非常关键。

5 昆仑古特提斯洋闭合造山与伟晶岩锂矿成矿作用

5.1 大红柳滩伟晶岩型锂矿是古特提斯洋闭合碰撞造山后的成矿表现

大红柳滩伟晶岩型锂矿床位于新疆自治区和田地区新藏219国道南侧的大红柳滩地区,因大

红柳滩花岗岩基而得名(图7a)。地质上位于康西瓦(—阿尼玛卿)古特提斯缝合带南侧的巴颜喀拉地体的甜水海地块中。西昆仑大红柳滩伟晶岩型锂矿的发现,是特提斯巨型伟晶岩锂矿带上继甲基卡找矿突破后,又一突破性的找矿发现(Kesler et al., 2012; Feng et al., 2019; Gao et al., 2020; Cao et al., 2021)。中国地质调查局西安地调中心、中国科学院广州地球化学研究所、新疆地质矿产勘查开发局、新疆有色金属集团、陕西省地质调查院等多家单位开展调查评价、勘查和研究工作,由于资源潜力巨大引起了多方面的关注。该矿床围绕大红柳滩花岗岩基周围的伟晶岩成矿,从而称之为大红柳滩伟晶岩型锂矿床,实则为矿田,是由多个矿床组成,白龙山伟晶岩型锂矿实际就是大红柳滩矿田中大红柳滩其中一矿床,位于大红柳滩花岗岩基的北东侧(图7b)。围绕大红柳滩中生代二云母花岗岩基周缘的东侧、东南侧和东北侧伟晶岩构成了大红柳滩伟晶岩型锂矿田。目前已在其中2000余条伟晶岩脉中发现了505、507、俘虏沟南I号、俘

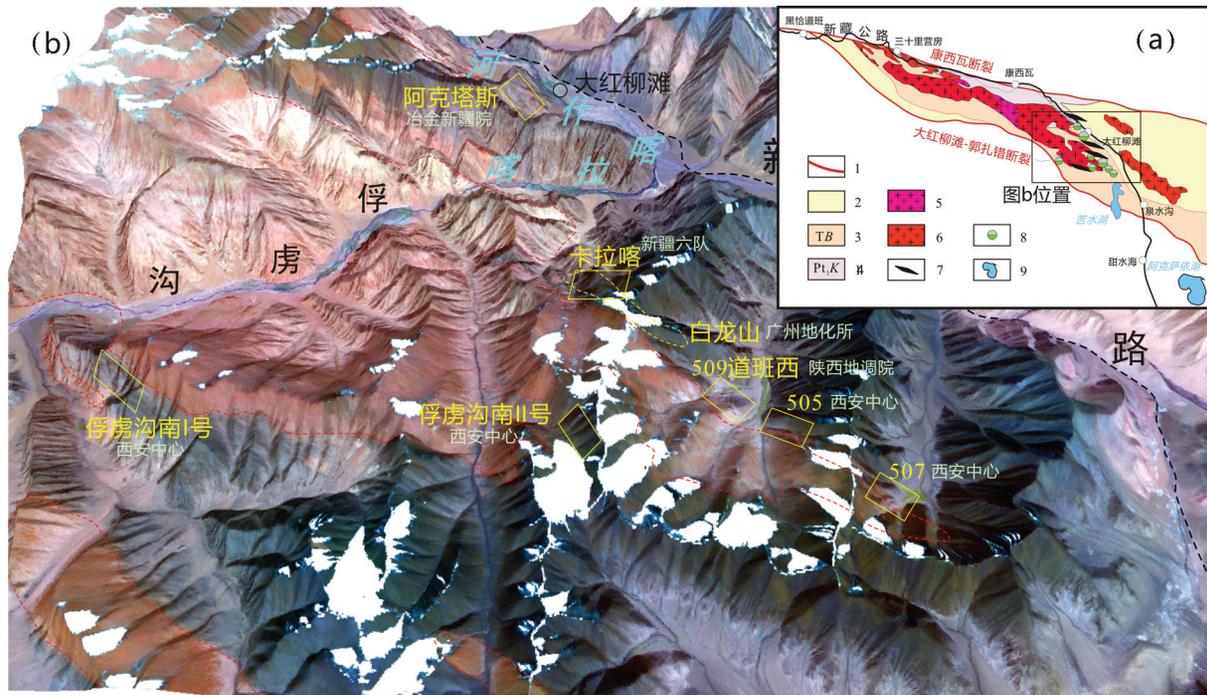


图7大红柳滩伟晶岩型锂矿田区域地质(a)及三维影像图(b)

1—断裂;2—二叠系黄羊岭群;3—三叠系巴颜喀拉山群;4—早古生界康西瓦群;5—寒武纪花岗岩;6—三叠纪二长花岗岩;7—花岗伟晶岩脉群;8—伟晶岩型锂矿;9—盐湖

Fig.7 The regional geological map (a) and remote sensing images (b) of the Dahongliutan pegmatite Lithium ore district
1—Fault;2—The Permian Huangyangling Group;3—The Triassic Bayankalashan Group;4—The Early Paleozoic Conxiwa Group;5—Cambrian granite;6—Triassic monzogranite;7—Granite pegmatite vein group;8—Pegmatite-type lithium deposits;9—Saline lakes

虜沟南Ⅱ号、509道班西、白龙山、卡拉喀、阿克塔斯等多处锂铍矿床(图7b),探获氧化锂(锂辉石)资源量约250万t,远景500万t以上,平均品位1.5%,伴生铍、铷、铯等稀有金属(Gao et al., 2020; Wang et al., 2020; Cao et al., 2021)。

大红柳滩中生代二云母花岗岩基为复式岩体,东部为黑云母二长花岗岩、含石榴石(电气石)二长花岗岩,西南部为二云母花岗岩、黑云母花岗岩和花岗闪长岩。黑云母二长花岗岩中锆石表现为典型的岩浆锆石,加权平均年龄为212~214 Ma(Yan et al., 2018; 丁坤等, 2020),形成于晚三叠世, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为-9.6~0.02, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为-0.9~4.3, T_{DM2} 为974~1307 Ma,呈S型花岗岩特征,为古老陆壳物质重熔而成。围岩为古元古界康西瓦岩群的角闪岩相变质岩和三叠系巴颜喀拉山群浅变质碎屑岩夹少量碳酸盐岩(Feng et al., 2019; Wang et al., 2020; Cao et al., 2021)。大红柳滩矿田伟晶岩主要呈北西—南东向分布,规模长几十米至上千米,宽几米至百余米,分布于花岗岩基中和围岩古元古界康西瓦岩群、三叠系巴颜喀拉山群中。其中,阿克塔斯含锂辉石伟晶岩脉中锆石U-Pb定年209~207 Ma(Yan et al., 2018; 丁坤等, 2020; 乔耿彪等, 2020),白龙山含锂辉石伟晶岩脉中锆石U-Pb定年206~212 Ma(Wang et al., 2020),含锂辉石伟晶岩中白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄为197~185 Ma(Gao et al., 2020),可能代表了伟晶岩热液封闭的时代。总体上,伟晶岩稍晚于大红柳滩二长花岗岩基的形成。

从区域地质来看,目前将西段的大红柳滩—东段的甲基卡联系了起来,作为中生代古特提斯洋闭合的巨型含锂伟晶岩带展布来看。前面已经讨论过,这两条古特提斯缝合带之间,为一个自西而东展布,并在东部向东南方向散开的巴颜喀拉—松潘—甘孜地体主体。西部的巴颜喀拉地体与冈瓦纳大陆具有相似的特征,而东部的松潘—甘孜地体更与扬子克拉通相近。巴颜喀拉的甜水海地块北侧发育的花岗岩形成了大红柳滩伟晶岩型锂铍矿床,而东南部的松潘—甘孜地体中的花岗岩形成了甲基卡伟晶岩型锂铍矿床。从成矿构造位置上看,大红柳滩伟晶岩型锂铍矿床与北侧的康西瓦—阿尼玛卿古特提斯缝合带更为接近,而甲基卡伟晶岩型锂铍矿床则更靠近南西侧的西金乌兰—金沙江—甘孜—理

塘—哀牢山缝合带。这两条古特提斯缝合带的主次关系的厘定,可能对大红柳滩和甲基卡伟晶岩型锂铍矿床的成矿构造背景的认识产生影响。

5.2 晚三叠世古特提斯碰撞造山伸展环境的伟晶岩锂矿成矿作用

大红柳滩伟晶岩脉从花岗岩基到远离花岗岩基有明显的分带性(图8),由花岗岩基内部至围岩地层,大致表现为电气石伟晶岩带向锂辉石伟晶岩带的演变。但电气石伟晶岩脉见于岩基边部及靠近岩基的围岩中,堇青石化比较发育,在岩基(体)内部未发现锂辉石伟晶岩脉;锂辉石伟晶岩脉一般较远离岩基(体)1~4 km范围内产出(Wang et al., 2020; Gao et al., 2020),红柱石化比较发育。伟晶岩中矿物具有粗粒结构且不均匀分布的特征,对大红柳滩矿床中贫矿含石榴石电气石伟晶岩带、富Be含绿柱石电气石伟晶岩带和富Li含锂辉石伟晶岩带中矿物类型、单矿物(如长石、云母和电气石)成分及B同位素进行了对比分析,发现在伟晶岩演化过程中高分异、熔—流体混溶作用和钠长石化导致了

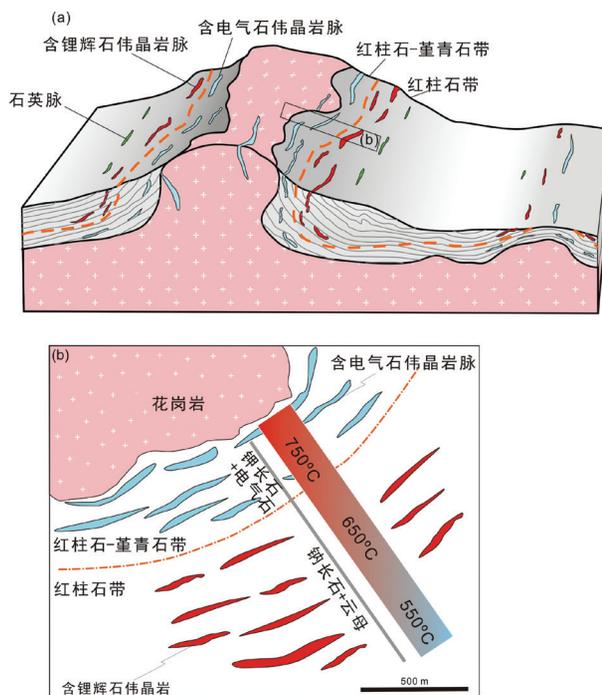


图8 大红柳滩含锂辉石伟晶岩脉分带性横剖面(a)和平面图(b)
(据 Gao et al., 2020 修改)
Fig.8 Cross-section (a) and plan (b) of the pegmatite zonation in the Dahongliutan area
(modified from Gao et al., 2020)

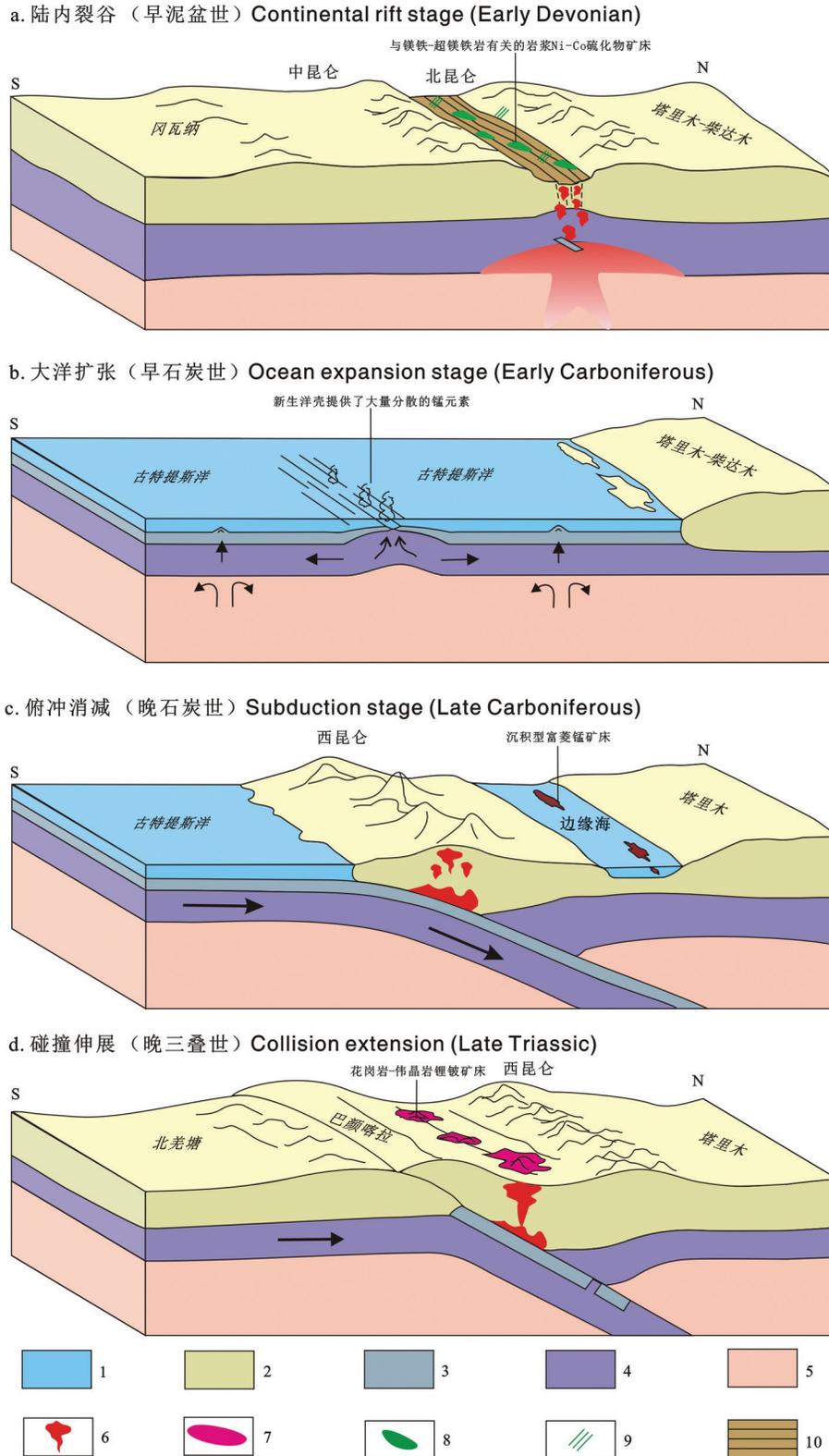


图9 昆仑古特提斯构造演化与重要成矿作用示意图

1—海洋; 2—陆壳; 3—洋壳; 4—岩石圈地幔; 5—软流圈; 6—岩浆; 7—中酸性侵入岩; 8—镁铁-超镁铁质侵入岩; 9—基性岩脉; 10—磨拉石

Fig.9 Schematic diagram of tectonic evolution and important mineralization of the Kunlun Paleotethys

1—Oceans; 2—Continental crust; 3—Oceanic crust; 4—Lithosphere mantle; 5—Asthenosphere; 6—Magma; 7—Intermediate-acid intrusive rock; 8—Mafic-ultramafic intrusive rock; 9—Basic rock vein; 10—Molasse

Be和Li的富集,与稀有金属成矿密切相关(Cao et al., 2021)。

大红柳滩岩体中Li含量为 $5.04 \times 10^{-6} \sim 181.1 \times 10^{-6}$,平均 42.7×10^{-6} , $\delta^7\text{Li}$ 值变化于 $0.76\text{‰} \sim 8.48\text{‰}$,平均 3.36‰ ,与平均大陆上地壳的 $\delta^7\text{Li}$ 值($-2\text{‰} \sim 2\text{‰}$)以及S型花岗岩基质 $\delta^7\text{Li}$ 值($-2.5\text{‰} \sim 2.7\text{‰}$)相似(汤艳杰等, 2009),暗示岩浆源区以壳源为主。相比于四川甲基卡二云母花岗岩(Li含量为 $192 \times 10^{-6} \sim 470 \times 10^{-6}$,平均 304×10^{-6} , $\delta^7\text{Li}$ 值变化于 $-1.56\text{‰} \sim 0.90\text{‰}$,平均 -0.24‰ (汤艳杰等, 2009),大红柳滩岩体Li含量相对低,但 $\delta^7\text{Li}$ 值较高。产于花岗岩基内或附近的贫锂伟晶岩 $\delta^7\text{Li}$ 值为 $1.97\text{‰} \sim 4.94\text{‰}$,平均 3.41‰ ,与大红柳滩岩基(体)的 $\delta^7\text{Li}$ 值比较接近,显示出成因上的亲缘性。但远离岩基(体)的富锂伟晶岩, $\delta^7\text{Li}$ 值变化范围较大,为 $-1.89\text{‰} \sim 11.67\text{‰}$,平均 4.13‰ ,可能与晚期熔-流体相互作用过程中Li的分馏作用有关。大红柳滩含矿伟晶岩脉体中包裹体类型主要为 $\text{H}_2\text{O} + \text{液态CO}_2 + \text{气态CO}_2$ 三相包裹体,均一温度主要分布于 $290 \sim 340^\circ\text{C}$,具有流体不混溶现象;这与大红柳滩矿不同阶段脉体中电气石B同位素表现出熔-流体不混溶特征是一致的(Cao et al., 2021)。由此可见,在伟晶岩演化过程及Li等元素富集作用与熔-流体混溶作用密切相关。

大红柳滩伟晶岩型锂矿床,目前认为形成于晚三叠世后碰撞或碰撞后的伸展阶段(Feng et al., 2019; Gao et al., 2020; Cao et al., 2021),是古特提斯构造演化结束的产物,代表了全球一次重要的伟晶岩型锂矿成矿事件(Kesler et al., 2012)。下地壳部分熔融形成大红柳滩S型花岗岩,花岗岩岩浆房演化到后期,残余岩浆热液逐渐富集成矿元素,最终形成大红柳滩超大型伟晶岩型锂矿床。遭受后期构造热事件影响,形成晚期毛发状锂辉石、电气石等。与甲基卡在成矿上具有很大的相似性。

6 讨 论

本文仅是从东、西昆仑造山带中辨识出的康西瓦—阿尼玛卿古特提斯缝合带及其与西金乌兰—金沙江古特提斯缝合带之间的巴颜喀拉地体经历的晚古生代—中三叠世古特提斯洋构造演化的视角,对其中关键构造转换阶段形成的矿床响应进行

了区域成矿作用的探讨。重点关注古特提的早泥盆世(约411 Ma)裂解及其岩浆镍钴硫化物矿床的成矿作用(图9a)、早石炭世快速大洋扩张(图9b)向晚石炭世(约302 Ma)俯冲消减大洋萎缩转变及其沉积型菱锰矿床的成矿作用(图9c)和晚三叠世(约209 Ma)闭合碰撞伸展及其伟晶岩型锂矿床成矿作用(图9d)。以古特提斯构造演化这一主线将三种完全不同成因的成矿作用联系起来,目的是探索地质历史上古板块构造演化与关键成矿作用的对应关系,同时试图对叠加并被改造的地质历史上的古特提斯构造进行矿床形成谱系的刻画。如果说地质历史上的构造环境遗留的岩石建造及其表现出来的地球化学特征对其形成环境的推演存在多解的话,矿床由于其严苛的形成条件约束,往往是独有的。甚至许多矿床在形成时代上也存在严格的限制。因此,利用矿床的形成或成矿作用对成矿构造环境独有的专属性,反演区域构造背景,甚至利用多个时代矿床形成上的演化,而反演所在区域构造背景的变迁,是很有意义的。如果通过岩石探讨构造环境及其演化称之为岩石大地构造学的话,这也可谓之矿床大地构造学。使区域成矿学的研究更富有内涵。

地质历史上晚古生代—中三叠世,现在亚欧大陆南部曾经存在的这个喇叭状的所谓古特提斯大洋(图10),他的形成演化和消减碰撞对周缘陆块的影响应该是相当重大的。但以往的研究中,并未将它作为地球历史上一个独有的洋陆转化阶段给予明确的重视。基本还停留在概念、推测上或点的野外求证、探索上。对它的裂解及其相应的构造-岩浆-成矿作用缺乏系统研究;对其形成演化过程除识别出的3条蛇绿岩缝合带外,缺乏深入的理解,3条缝合带的规模、相互主次关系,并不清楚,相关的成矿作用只是点上进行的个别推论,缺少系统、整体的论述;大洋关闭、俯冲消减和陆-陆碰撞作用及其构造-岩浆活动和成矿表现缺乏系统而明确的意见。总之,对古特提斯构造及成矿的研究才刚刚起步。本文试图通过东、西昆仑造山带中三个具有特殊意义的矿床,置于古特提斯构造演化过程的关键转换阶段,进行构造环境-岩浆演化-成矿作用的局部论证,以求窥探古特提斯整个状貌的轮廓,为全面深入研究做些尝试。由于东、西昆仑造山带只是

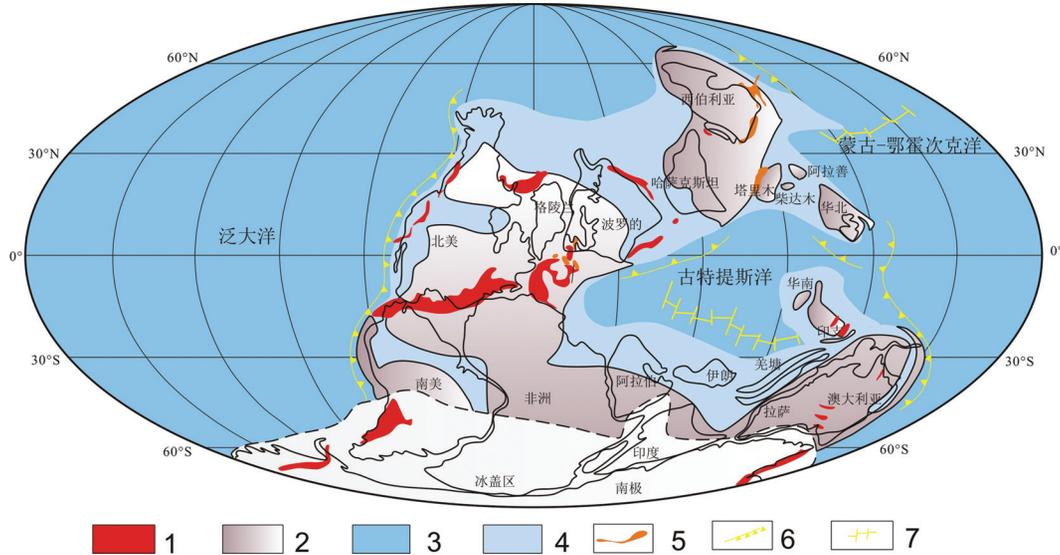


图10 古特提斯洋石炭纪古地理分布图

(据李文渊, 2018 修改)

1—造山带; 2—古陆区; 3—深海; 4—浅海; 5—大火成岩省; 6—俯冲带; 7—洋中脊

Fig. 10 Palaeogeographical distribution of Carboniferous of Paleo-Tethys Ocean

(modified from Li, 2018)

1—Orogen; 2—Ancient landmass area; 3—Deep oceanic area; 4—Shallow oceanic area; 5—Large igneous provinces; 6—Subduction zone;

7—Mid-oceanic ridge

古特提斯构造演化系统的一隅, 难免以偏概全。

7 结论

(1) 古特提斯洋何时裂解及其成矿作用仍然是需要进一步探索的问题。从夏日哈木超大型岩浆镍钴硫化物矿床的成矿的专属性出发, 定义为早泥盆世为古特提斯裂解的开始, 但其裂解系统波及的范围将成为亟待回答的问题。如果将古亚洲洋定义为原特提斯洋的分支, 原特提斯洋在志留纪(440~420 Ma)闭合后, 古亚洲洋延续到中—晚泥盆纪世才闭合, 新生的古特提斯洋的裂解对正在闭合过程的古亚洲洋体系的影响并不清楚。古特提斯裂解是一个重大的地质事件, 裂解作用的东、西延伸, 是寻找夏日哈木式岩浆镍钴硫化物矿床的找矿方向问题。特别是向西延伸, 存在很大潜力, 值得境内外对比研究回答这一大家关注的问题。

(2) 古特提斯洋的主洋位置及其成矿影响亟待研究。康西瓦—阿尼玛卿、西金乌兰—金沙江和龙木措—双湖三个古特提斯蛇绿岩缝合带的相互关系主次不清, 因此古特提斯大洋封闭的位置也并不

清楚。如果古特提斯大洋双向俯冲, 西金乌兰—金沙江和龙木措—双湖缝合带更可能是向南俯冲消减弧后盆地的产物。但目前不论是地质构造还是岩石地球化学研究都未能跟上, 矿床成矿系统组合及其演化亦未开展, 还限于点上的研究, 并未开展面上的时空演化探索。作为早晚石炭世大洋构造转换的产物玛尔坎苏锰矿的研究本身仍是初步的, 尚没有与其他类型矿产的成矿作用联系起来研究, 需要更大视野和更详尽的研究工作开展。

(3) 古特提斯洋闭合相对于其裂解和大洋化过程研究更为详尽一些, 但甲基卡、大红柳滩超大型伟晶岩型锂铍矿床的相继发现, 对古特提斯洋闭合后陆—陆碰撞系统的研究引起了广泛关注, 并已提出了“特提斯巨型伟晶岩型锂铍矿带”的概念, 但古特提斯洋碰撞系统与大规模伟晶岩锂铍成矿做作用研究还刚刚开始起步, 花岗岩—伟晶岩系统的形成与何类下地壳岩石重熔的关系问题, 是颇值得关注的研究, 以及成矿元素的变化和成矿规模。还有就是西延问题, 亟待开展境内外矿床对比和跨区域成矿规律研究。

References

- Akmaz R M, Uysal I, Saka S. 2014. Compositional variations of chromite and solid inclusions in ophiolitic chromitites from the southeastern Turkey: Implications for chromitite genesis[J]. *Ore Geology Reviews*, 58: 208–224.
- Cao Rui, Gao Yongbao, Chen Bin, Leon Bagas, Yan Shengchao, Huang Chao, Zhao Hui. 2021. Pegmatite magmatic evolution and rare metal mineralization of the Dahongliutan pegmatite field, Western Kunlun Orogen: Constraints from the B isotopic composition and mineral–chemistry[J]. *International Geology Review*, 30: 1–20.
- Chen Denghui, Sui Qinglin, Zhao Xiaojian, Jing Delong, Teng Jiaxin, Gao Yongbao. 2019. Geology, geochemical characteristics, and sedimentary environment of Mn–bearing carbonate from the Late Carboniferous Muhu manganese deposit in West Kunlun [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 37(3): 477–490 (in Chinese with English abstract).
- Craig J R. 1979. Geochemical aspects of the origins of ore deposits, review of research on modern problems in geochemistry[J]. *Earth Sciences*, 16: 225–272.
- Dai Liqun, Zheng Yongfei, He Huaiyu, Zhao Zifu. 2016. Postcollisional mafic igneous rocks record recycling of noble gases by deep subduction of continental crust[J]. *Lithos*, 252/253: 135–144.
- Ding Kun, Liang Ting, Zhou Yi, Feng Yonggang, Zhang Ze, Ding Liang, Li Kan. 2020. Petrogenesis of Dahongliutan biotite moonzogradite in western Kunlun orogeny: Evidence from zircon U–Pb age and Li–Hf isotope[J]. *Northwestern Geology*, 53(1): 24–34 (in Chinese with English abstract).
- Fang Aimin, Ma Jianying, Wang Shigang, Zhao Yue, Hu Jianmin. 2009. Sedimentary tectonic evolution of the southwestern Tarim Basin and west Kunlun orogeny since Late Paleozoic [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(12): 3396–3406 (in Chinese with English abstract).
- Feng Yonggang, Liang Ting, Yang Xiuqing, Zhang Ze, Wang Yiqian. 2019. Chemical evolution of Nb–Ta oxides and cassiterite in phosphorus–rich albite–spodumene pegmatites in the Kangxiwa–Dahongliutan pegmatite field, Western Kunlun Orogen, China[J]. *Minerals*, 9: 166–204.
- Franco P. 2000. *Ore Deposits and Mantle Plumes*[M]. London: Kluwer Academic Publishers, 1–540.
- Gao Yongbao, Bagas Leon, Li Kan, Jin Moushun, Liu Yuegao, Teng Jiaxin. 2020. Newly discovered Triassic Li deposits in the Dahongliutan area, NW China: A case study for the detection of Li–bearing pegmatite deposits in rugged terrains using remote–sensing data and images[J]. *Frontiers in Earth Science*, DOI: 10.3389/feart.2020.591966.
- Gao Yongbao, Teng Jiaxin, Li wenyuan, Chen Denghui, Sui Qinglin, Jing Delong, He Yongkang, Bai Jianke. 2018. Geology, geochemistry and ore genesis of the Aertuokanashi manganese deposit, West Kunlun, Xinjiang, Northwest China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 34(8): 2341–2358 (in Chinese with English abstract).
- Kesler S E, Gruber P W, Medina P A, Keoleian G A, Everson M P, Wallington T J. 2012. Global lithium resources: Relative importance of pegmatite, brine and other deposits[J]. *Ore Geology Reviews*, 48: 55–69.
- Hu Chaobin. 2021. Paleozoic Mantle–derived Magmatic Process and Mineralization in Qimantage, East Kunlun[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 1–181 (in Chinese with English abstract).
- Li Cai, Xie Shaoming, Wang Ming, Wu Yangwang, Hu Peiyuan, Zhang Xiuzheng, Xu Fen, Fan Jiangjun, Wu Hao, Liu Yiming, Peng Hu, Jiang Qinyang, Chen Jingwen, Xu Jiangxin, Zhai Qingguo, Dong Yiyongsheng, Zhang Tanyu, Huang Xiaopeng. 2016. Geology in the Qiangtang Region[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1–681 (in Chinese).
- Li Cai. 1987. Longmuco–shuanghu–lancang plate suture zone and the northern boundary of the Carboniferous Permian Gondwana[J]. *Journal of Changchun Institute of Geology*, 17(2): 155–166 (in Chinese with English abstract).
- Li C S, Zhang Z W, Li W Y, Wang Y L, Sun T, Ripley E M. 2015. Geochronology, petrology and Hf–S isotope geochemistry of the newly–discovered Xiarihamu magmatic Ni–Cu sulfide deposit in the Qinghai–Tibet plateau, western China[J]. *Lithos*, 216–217: 224–240.
- Li R B, Pei X Z, Li Z C, Patias D, Su Z G, Pei L. 2020. Late Silurian to Early Devonian volcanics in the East Kunlun orogen, northern Tibetan Plateau: Record of postcollisional magmatism related to the evolution of the Proto–Tethys Ocean[J]. *Journal of Geodynamics*, 140: 101780.
- Li Shijin, Sun Fengyue, Gao Yongwan, Zhao Junwei, Li Liansong, Yan Qian. 2012. The Theoretical guidance and the practice of small intrusions forming large deposits–the enlightenment and significance for searching breakthrough of Cu–Ni sulfide deposit in Xiarihamu, East Kunlun, Qinghai[J]. *Northwestern Geology*, 45(4): 185–191 (in Chinese with English abstract).
- Li Tong. 1992. Geochemical characteristics and resource prognosis of manganese[J]. *Mineral Deposits*, 11(4): 301–306 (in Chinese with

- English abstract).
- Li Wenyuan, Zhang Z W, Wang Y L. 2022. Tectonic transformation of Proto and Paleo Tethys and the metallization of magmatic Ni-Cu-Co sulfide deposits in Kunlun orogeny, Northwest China[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 44(1): 1-19.
- Li Wenyuan, Wang Yalei, Qian Bing, Liu Yuegao, Han Yixiao. 2020. Discussion on formation of magmatic Cu-Ni-Co sulfide deposits in margin of Tarim Block[J]. *Earth Science Frontiers*, 27(2): 276-293 (in Chinese with English abstract).
- Li Wenyuan, Hong Jun, Chen Bo, Liu Jiang, Ma Zhongping, Yang Bo. 2019. Distribution regularity and main scientific issues of strategic mineral resources in Central Asia and adjacent regions[J]. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 33(2): 119-124 (in Chinese with English abstract).
- Li Wenyuan. 2018. The Primary discussion on the relationship between Paleo-Asian Ocean and Paleo-Tethys Ocean[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 34(8): 2201-2210 (in Chinese with English abstract).
- Li Wenyuan. 2015. Metallogenic geological characteristics and newly discovered ore deposits in Northwest China[J]. *Geology in China*, 42(3): 365-380 (in Chinese with English abstract).
- Li Wenyuan. 2007. Research status and development trend of magmatic Cu-Ni-PGE deposits [J]. *Northwestern Geology*, 40(2): 1-28 (in Chinese with English abstract).
- Li Wenyuan. 1996. Mineralization Series and Geochemistry of Copper-nickel Sulfide Deposits in China[M]. Xi'an: Xi'an Map Publishing House, 1-228.
- Liu X Q, Zhang C L, Ye X T, Ye X T, Zou H B, Hao X S. 2019. Cambrian mafic and granitic intrusions in the Mazar-Tianshuihai terrane, West Kunlun Orogenic Belt: Constraints on the subduction orientation of the Proto-Tethys Ocean[J]. *Lithos*, 350-351: 105226.
- Liu Y G, Li WY, Jia Q Z, Zhang Z W, Wang Z A, Zhang Z B, Zhang J W, Qian B. 2018. The dynamic sulfide saturation process and a possible slab break-off model for the giant Xiarihamu magmatic nickel ore deposit in the east Kunlun orogenic belt, northern Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. *Economic Geology*, 113(6): 1383-1417.
- Liu Xun. 2001. Sedimentary-tectonic evolutionary history of the Tianshan to West Kunlun area in West China: The sedimentary-tectonic evolution of the terranes in the corridor of the Xinjiang geotranssect and its adjacent area [J]. *Journal of Palaeogeography*, 3(3): 21-31 (in Chinese with English abstract).
- Maier W D, Groves D I. 2011. Temporal and spatial controls on the formation of magmatic PGE and Ni-Cu deposits [J]. *Mineralium Deposita*, 46(8): 841-857.
- Mckenzie D, Bickle M J. 1988. The volume and composition of melt generated by extension of the lithosphere[J]. *Journal of Petrology*, 29(3): 625-679.
- Pagé P, Barnes S J. 2009. Using trace elements in chromites to constrain the origin of podiform chromitites in the Thetford Mines ophiolite, Québec, Canada[J]. *Economic Geology*, 104(7): 997-1018.
- Pei Xianzhi, Li Ruibo, Li Zuochen, Liu Chengjun, Chen Youxi, Pei Lei, Liu Zhangqin, Chen Guochao, Li Xiaobing and Wang Men. 2018. Composition feature and formation process of Buqingshan composite accretionary mélange belt in southern margin of East Kunlun orogen[J]. *Earth Science*, 43(12): 4498-4520 (in Chinese with English abstract).
- Qiao Gengbiao, Wu Yuezhong, Liu Tuo. 2020. Formation age of the Dahongliutan pegmatite type rare metal deposit in Western Kunlun Mountains: Evidence from muscovite $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ isotopic dating [J]. *Geology in China*, 47(5): 1591-1593 (in Chinese with English abstract).
- Stöcklin J. 1974. Possible ancient continental margins in Iran[C]//Burk C A, Drake C L (eds.). *The Geology Continental Margins*. Berlin: Springer-Verlag, 873-887.
- Sengör A M C. 1979. Mid-Mesozoic closure of Permo-Triassic Tethys and its implications[J]. *Nature*, 279(5714): 590-593.
- Song X Y, Yi J N, Chen L M, She Y W, Liu C Z, Dang X Y, Yang Q A, Wu S K. 2016. The giant Xiarihamu Ni-Co sulfide deposit in the East Kunlun orogenic belt, Northern Tibet Plateau, China[J]. *Economic Geology*, 111(1): 29-55.
- Tang Yanjie, Zhang Hongfu, Ying Jifeng. 2009. Discussion on fractionation mechanism of lithium isotopes [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 34(1): 43-55 (in Chinese with English abstract).
- Tang Zhongli, Li Wenyuan. 1995. Mineralization Mode and Geological Comparison of Jinchuan Copper-nickel Sulfide (Including Platinum) Deposit[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1-209 (in Chinese).
- Vogt J H L. 1894. Beiträge zur genetischen classification der durch magmatische differentiations prozesse und der durch prävinathloyse entslandenen erzvoskommen. *Z Prakt[J]. Geology*, 2: 381-399.
- Wang H, Gao H, Zhang X Y, Yan Q H, Xu Y G, Zhou K L, Dong R, Li P. 2020. Geology and geochronology of the super-large Bailongshan Li-Rb-(Be) rare-metal pegmatite deposit, West Kunlun Orogenic Belt, NW China[J]. *Lithos*, 360/361: 105449.
- Wu Fuyuan, Wan Bo, Zhao Liang, Xiao Wenjiao and Zhu Rixiang. 2020. Tethyan geodynamics[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 36(6): 1627-1674 (in Chinese with English abstract).
- Wang Guan, Sun Fengyue, Li Bile, Li Shijin, Zhao Junwei, Ao Cong, Yang Qian. 2014. Petrography, zircon U-Pb geochronology and

- geochemistry of the mafic-ultramafic intrusion in Xiarihamu Cu-Ni deposit from East Kunlun, with implications for geodynamic setting[J]. *Earth Science Frontiers*, 21(6): 381-401 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Wenjiao, Hou Quanlin, Li Jiliang, Windley BF, Hao Jie, Fang Aaimin, Zhou Hui, Wang Zzihong, Chen Hanlin, Zhang Guocheng and Yuan Chao. 2000. Tectonic facies and the archipelago-accretion process of the West Kunlun, China[J]. *Science China (Seri.D): Earth Sciences*, 30 (Supp.1): 22-28 (in Chinese).
- Xia L Q. 2014. The geochemical criteria to distinguish continental basalts from arc related ones[J]. *Earth Science Reviews*, 139: 195-212.
- Xu Gang. 2013. The Minerogenesis of Heishan Nickel-copper Sulfide Deposit, Gansu Beishan, China[D]. Xi'an: Chang'an University, 1-198 (in Chinese with English abstract).
- Xu Z Q, Dilek Y, Cao H, Yang J S, Robinson P, Ma C Q, Li H Q, Jolivet M, Roger F, Chen X J. 2015. Paleo-Tethyan evolution of Tibet as recorded in the East Cimmerides and West Cathaysides[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 105: 320-337.
- Xu Zhiqin, Wang Rucheng, Zhu Wenbin, Qin Yulong, Fu Xiaofang and Li Guangwei. 2020. Scientific drilling project of granite-pegmatite-type lithium deposit in western Sichuan: scientific problems and significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 94(8): 2177-2188 (in Chinese with English abstract).
- Yan Q H, Qiu Z W, Wang H, Wang M, Wei XP, Li P, Zhang R Q, Li C Y, Liu J P. 2018. Age of the Dahongliutan rare metal pegmatite deposit, West Kunlun, Xinjiang (NW China): Constraints from LA-ICP-MS U-Pb dating of columbite-(Fe) and cassiterite[J]. *Ore Geology Reviews*, 100: 561-573.
- Yu L, Sun FY, Li L, Li BL, Peng B, Xu CH, Li RH, Wang F, Shen D L. 2019. Geochronology, geochemistry and Sr-Nd-Hf isotopic compositions of mafic-ultramafic intrusions in the Niubiziling Ni-(Cu) sulfide deposit, North Qaidam Orogenic Belt, NW China: Implications for magmatic source, geodynamic setting and petrogenesis[J]. *Lithos*, 326-327: 158-173.
- Zhang Banglu, Zhang Lianchang, Feng Jing, Xu Shiqi, Feng Chqnrong, Hao Yanhai, Zhang Mengtian, Zhu Mingtian, Wang Changle, Peng Zidong, Dong Zhiguo. 2018. Genesis of the large-scale Orto Karnash manganese Carbonate deposit in the Malkansu district, Western Kunlun: evidence from geological features [J]. *Geological Review*, 64(2): 361-377 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Lianchang, Zhang Banglu, Dong Zhiguo, Xie Yueqiao, Li Wenjun, Peng Zidong, Zhu Mingtian, Wang Changle. 2020. Tectonic setting and metallogenetic conditions of Carboniferous Malkansu giant manganese belt in West Kunlun orogeny[J]. *Journal of Jilin University (Earth science Edition)*, 50(5): 1340-1350 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zuoheng, Wang Zhiliang, Wang yanbin, Zuo Guochao, Wang Longsheng, Lu Linsu. 2007. Shrimp zircon U-Pb dating of diorite from Qingbulake basic complex in western Tianshan Mountains of Xinjiang and its geological significance [J]. *Mineral Deposit*, 26(4): 353-360 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Z W, Li W Y, Gao Y B. 2014. Sulfide mineralization associated with arc magmatism in the Qilian Block, western China: Zircon U-Pb age and Sr-Nd-Os-S isotope constraints from the Yulonggou and Yaqu gabbroic intrusions[J]. *Mineralium Deposita*, 49 (2): 279-292.
- Zhang Z W, Wang Y L, Wang C Y, Qian B, Li W Y, Zhang J W, You M X. 2019. Mafic-ultramafic magma activity and copper-nickel sulfide metallogeny during Paleozoic in the Eastern Kunlun Orogenic Belt, Qinghai Province, China[J]. *China Geology*, 2: 467-477.
- Zhang Zhibing. 2016. Genetic Significances from Mineralogy of Xiarihamu Ni-Cu Sulfide Deposit, Eastern Kunlun Orogenic Belt [D]. Beijing: China University of Geosciences, 1-150 (in Chinese with English abstract).
- Zhao G C, Wang Y J, Huang B C, Huang B C, Dong Y P, Li S Z, Zhang G W, Yu S. 2018. Geological reconstructions of the East Asian blocks: From the breakup of Rodinia to the assembly of Pangea[J]. *Earth-Science Reviews*, 186: 262-286.
- Zheng Yongfei, Xu Zheng, Chen Long, Dai Liqun and Zhao Zifu. 2019. Chemical geodynamics of mafic magmatism above subduction zones[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 194: 104185.
- Zheng Fei, Dai Liqun, Zhao Zifu, Zheng Yongfei, Ma Litao, Fang Wei. 2020. Syn-exhumation magmatism during continental collision: Geochemical evidence from the Early Paleozoic Fushui mafic rocks in the Qinling orogen, Central China[J]. *Lithos*, 352-353: 105318.

附中文参考文献

- 陈登辉, 隋清霖, 赵晓健, 荆德龙, 滕家欣, 高永宝. 2019. 西昆仑西昆仑穆呼锰矿晚石炭世含锰碳酸盐岩地质地球化学特征及其沉积环境[J]. *沉积学报*, 37(3): 477-490.
- 丁坤, 梁婷, 周义, 风永刚, 张泽, 丁亮, 李侃. 2020. 西昆仑大红柳滩黑云母二长花岗岩岩石成因: 来自锆石 U-Pb 年龄及 Li-Hf 同位素的证据[J]. *西北地质*, 53(1): 24-34.
- 方爱民, 马建英, 王世刚, 赵越, 胡建民. 2009. 西昆仑一塔西南坳陷晚古生代以来的沉积构造演化[J]. *岩石学报*, 25(12): 3396-3406.
- 高永宝, 滕家欣, 李文渊, 陈登辉, 隋清霖, 荆德龙, 贺永康, 白建

- 科. 2018. 新疆西昆仑奥尔托喀纳什锰矿地质、地球化学及成因[J]. 岩石学报, 34(8): 2341-2358.
- 胡朝斌. 2021. 东昆仑祁漫塔格古生代幔源岩浆过程与成矿作用[D]. 北京: 中国地质科学院, 1-181.
- 黎彤. 1992. 锰的成矿地球化学特征及其资源预测[J]. 矿床地质, 11(4): 301-306.
- 李世金, 孙丰月, 高永旺, 赵俊伟, 李连松, 杨启安. 2012. 小岩体成大矿理论指导与实践: 青海东昆仑夏日哈木铜镍矿找矿突破的启示及意义[J]. 西北地质, 45(4): 185-191.
- 李才. 1987. 龙木错—双湖—澜沧江板块缝合带与石炭二叠纪冈瓦纳北界[J]. 长春地质学院学报, 17(2): 155-166.
- 李才, 解邵明, 王明, 吴彦旺, 胡培远, 张修政, 徐锋, 范建军, 吴浩, 刘一鸣, 彭虎, 江庆源, 陈景文, 徐建鑫, 翟庆国, 董永胜, 张天羽, 黄小鹏. 2016. 羌塘地质[M]. 北京: 地质出版社, 1-681.
- 李文渊, 张照伟, 王亚磊, 张江伟, 尤敏鑫, 张志炳, 南卡俄吾. 2022. 东昆仑原、古特提斯构造转换与岩浆铜镍钴硫化物矿床成矿作用[J]. 地球科学与环境学报, 44(1): 1-19.
- 李文渊, 王亚磊, 钱兵, 刘月高, 韩一筱. 2020. 塔里木陆块周缘岩浆Cu-Ni-Co硫化物矿床形成的探讨[J]. 地学前缘, 27(2): 276-293.
- 李文渊, 洪俊, 陈博, 刘江, 马中平, 杨博. 2019. 中亚及邻区战略性关键矿产的分布规律与主要科学问题[J]. 中国科学基金, 2: 119-123.
- 李文渊. 2018. 古亚洲洋与古特提斯洋关系初探[J]. 岩石学报, 34(8): 2201-2210.
- 李文渊. 2015. 中国西北部成矿地质特征及找矿新发现[J]. 中国地质, 42(3): 365-380.
- 李文渊. 2007. 岩浆Cu-Ni-PGE矿床研究现状及发展趋势[J]. 西北地质, 40(2): 1-28.
- 李文渊. 1996. 中国铜镍硫化物矿床成矿系列与地球化学[M]. 西安: 西安地图出版社, 1-228.
- 刘训. 2001. 天山—西昆仑地区沉积—构造演化史: 新疆地学断面走廊域及邻区不同地体的沉积—构造演化[J]. 古地理学报, 3(3): 21-31.
- 裴先治, 李瑞宝, 李作臣, 刘成军, 陈有焯, 裴磊, 刘战庆, 陈国超, 李小兵, 王盟. 2018. 东昆仑南缘布青山复合增生型构造混杂岩带组成特征及其形成演化过程[J]. 地球科学, 43(12): 4498-4520.
- 乔耿彪, 伍跃中, 刘拓. 2020. 西昆仑大红柳滩伟晶岩型稀有金属矿的形成时代: 来自白云母⁴⁰Ar/³⁹Ar同位素年龄的证据[J]. 中国地质, 47(5): 1591-1593.
- 汤艳杰, 张宏福, 英基丰. 2009. 锂同位素分馏机制讨论[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 34(1): 43-55.
- 汤中立, 李文渊. 1995. 金川铜镍硫化物(含铂)矿床成矿模式及地质对比[M]. 北京: 地质出版社: 1-209
- 吴福元, 万博, 赵亮, 肖文交, 朱日祥. 2020. 特提斯地球动力学[J]. 岩石学报, 36(6): 1627-1674.
- 王冠, 孙丰月, 李碧乐, 李世金, 赵俊伟, 奥琮, 杨启安. 2014. 东昆仑夏日哈木铜镍矿镁铁质—超镁铁质岩体岩相学、锆石U-Pb年代学、地球化学及其构造意义[J]. 地学前缘, 21(6): 381-401.
- 肖文交, 侯泉林, 李继亮, 肖文交, 侯泉林, 李继亮, Windley B F, 郝杰, 方爱民, 周辉, 王志洪, 陈汉林, 张国成, 袁超. 2000. 西昆仑大地构造相解剖及其多岛增生过程[J]. 中国科学(D辑): 地球科学, 30(增刊1): 22-28.
- 许志琴, 王汝成, 朱文斌, 秦宇龙, 付小芳, 李广伟. 2020. 川西花岗—伟晶岩型锂矿科学钻探: 科学问题和科学意义[J]. 地质学报, 94(8): 2177-2188.
- 徐刚. 2013. 甘肃北山黑山铜镍硫化物矿床成矿作用研究[D]. 西安: 长安大学, 1-198.
- 张作衡, 王志良, 王彦斌, 左国朝, 王龙生, 吕林素. 2007. 新疆西天山菁布拉克基性杂岩体闪长岩锆石SHRIMP定年及其地质意义[J]. 矿床地质, 26(4): 353-360.
- 张连昌, 张帮禄, 董志国, 谢月娇, 李文君, 彭自栋, 朱明田, 王长乐. 2020. 西昆仑玛尔坎苏石炭纪大型锰矿带构造背景与成矿条件[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 50(5): 1340-1357.
- 张帮禄, 张连昌, 冯京, 徐仕琪, 冯昌荣, 郝延海, 郑梦天, 彭自栋, 董志国. 2018. 西昆仑玛尔坎苏地区奥尔托喀纳什大型碳酸锰矿床地质特征及成因探讨[J]. 地质论评, 64(2): 361-377.
- 张志炳. 2016. 东昆仑夏日哈木铜镍硫化物矿床矿物成因意义探讨[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 1-118.