

古亚洲洋与古特提斯洋关系初探^{*}

李文渊

LI WenYuan

国土资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室,中国地质调查局西安地质调查中心,西安 710054

MLR Key Laboratory for the Study of Focused Magmatism and Giant Ore Deposit, Xi'an Center of Geological Survey, CGS, Xi'an 710054, China

2018-03-01 收稿, 2018-04-08 改回.

LI WY. 2018. The primary discussion on the relationship between Paleo-Asian Ocean and Paleo-Tethys Ocean. *Acta Petrologica Sinica*, 34(8): 2201–2210

Abstract To study the relationship between Chinese Paleozoic ocean-continent and tectonic-magmatic-metallogenesis through plate tectonics, it is essential to determine the relationship between Paleo-Asian Ocean and Paleo-Tethys Ocean. Especially, for the research of Northwest China, the formation and evolution for the two Paleozoic oceans is the key to understand the geological structure and mineralization events. In this paper, it is believed that Early Paleozoic Proto-Tethys Ocean and Paleo-Asian Ocean is one ocean, and it can be called the Paleoasian-Prototethys Ocean or the Paleo-Asian Ocean for short. The Paleo-Asian Ocean is an Early Paleozoic ocean developed between Laurasia and Gondwana, and the forming of Jinchuan giant magmatic Ni-Cu sulfide deposit means the opening of the ocean owing to cracking of triennial rift in the Proterozoic Rodinia supercontinent. The Tarim block is located in the south of the Paleo-Asian Ocean, and the Early Paleozoic Kunlun ocean, Qilian ocean and Qinling ocean are branches or secondary ocean basins of the Paleo-Asian Ocean. These secondary ocean basins closed in Late Silurian era, but the main ocean of the Palaeo-Asian Ocean was closed until the Devonian era. In the Carboniferous era, there are two coexisting geodynamic tectonic settings in the Tianshan and its adjacent areas, which are the post-collision mechanism of plate tectonic after closure of the Paleo-Asian Ocean and the heating mechanism of plume, and this kind of setting provides the possibility for large scale magmatic mixing or contamination between crust and mantle, and large metallogenic explosion. The Paleo-Tethys Ocean is the development and inheritance of the Paleo-Asian Ocean in Late Paleozoic era, and the forming of Xiarihamu ultra-large magmatic Ni-Cu sulfide deposit in East Kunlun means the opening of ocean owing to cracking of triennial rift in the northern part of Gondwana continent in Late Silurian era. The Pan Cathaysian landmass group including the Tarim block and North China block contribute the north continental margin of the Paleo-Tethys Ocean, and the Paleo-Tethys Ocean is formed in Carboniferous era. The Maerkansu high quality manganese deposit in West Kunlun was formed in neritic or surface sea of the north passive continental margin of the ocean, and the ore-forming materials probably originated from the mid ocean ridge. The Deerni large copper-cobalt deposit is a Cyprus-type massive sulfide deposit was formed in the Late Carboniferous oceanic ridge of the Paleo-Tethys Ocean. The Tongyugou large skarn-porphyry copper deposit and the Dachang large epithermal gold deposit are the products of the arc magmatism resulting with the subduction of the Paleo-Tethys Ocean. The Paleo-Tethys Ocean closed in Late Triassic era.

Key words Paleo-Asian Ocean; Paleo-Tethys Ocean; Tectonic evolution and metallogenesis; Paleozoic era; Ocean-continent transition

摘 要 从板块构造研究中国古生代洋陆关系和构造-岩浆-成矿作用,离不开对古亚洲洋和古特提斯洋的关系判断,特别是对于中国西北部的研究,两个古生代大洋形成演化和关系是理清重要地质构造和成矿事件的关键。本文认为早古生代的原特提斯洋与古亚洲洋应连为一体,合称古亚洲-原特提斯洋,简称古亚洲洋。古亚洲洋是发育于早古生代劳亚大陆与冈瓦纳大陆之间的大洋,金川超大型铜镍矿床的形成是元古宙罗迪尼亚超大陆裂解三叉裂谷开启大洋的开始,塔里木陆块作为古亚洲洋南岸的一个陆块,早古生代的昆仑洋、祁连洋和秦岭洋只是古亚洲洋的分支或次生洋盆,这些次生洋盆于志留纪末闭合,

* 本文受国土资源公益性行业科研专项(201511020)和中国地质调查局地质调查项目(DD20160346)联合资助。

第一作者简介: 李文渊,男,1962年生,博士,研究员,博士生导师,主要从事岩浆作用矿床及区域成矿研究工作, E-mail: xalwenyuan@cgsc.gov.cn

古亚洲洋主洋则直到晚古生代泥盆纪末才闭合。石炭纪天山及邻区是古亚洲洋闭合后板块构造后碰撞机制与地幔柱作用提供热动力的两种地球动力学机制并存的构造背景,为大规模壳幔混合(染)岩浆作用和成矿爆发提供了可能。古特提斯洋是古亚洲洋在晚古生代的发展和继承,东昆仑夏日哈木超大型铜镍矿床的产生是冈瓦纳大陆北侧志留纪末破裂三叉裂谷开启大洋的开始,塔里木和华北等泛华夏陆块群构成了古特提斯洋北岸陆缘,石炭纪大洋形成,西昆仑玛尔坎苏大型优质锰矿可能就形成于大洋北侧被动大陆边缘的浅海或陆表海,成矿物质则很可能来自于同时代的大洋中脊。德尔尼大型铜钴矿为晚石炭世大洋中脊塞浦路斯型块状硫化物矿床。而铜峪沟大型铜矿和大场大型金矿等则分别为古特提斯洋消减俯冲岛弧岩浆作用砂卡岩-斑岩矿床和浅成低温热液矿床。中三叠世末古特提斯洋闭合。

关键词 古亚洲洋;古特提斯洋;构造演化与成矿作用;古生代;洋陆转换

中图法分类号 P542

中国古生代板块构造的探讨,离不开对古特提斯洋和古亚洲洋的研究,特别是西北部的构造演化史,其实就是古特提斯洋和古亚洲洋的关系史。但以往的研究,不论是区域构造研究,还是区域成矿探索,多是对古亚洲洋或古特提斯洋形成演化和成矿作用开展各自独立的研究。二者的关系,有过古特斯洋是古亚洲洋或古太平洋组成的猜想(Şengör *et al.*, 1993; 程裕淇, 1994; 涂光炽, 1999),或古亚洲洋是古特提斯洋部分的设想(Yakubchuk, 2002),但均未纳入一体开展研究。因此,二者的关系问题,并未引起学术界真正重视。以全球视野和超大陆演化视角,审视中国西北部整个古生代洋陆转化景观和地质历史,古特提斯和古亚洲洋之间的关系问题,是以活动论的观点解释西北地质构造的关键,也是更加逼近客观,认识其地质演化史和成矿史的关键。本文以西北地区古生代天山-北山洋、昆仑洋、祁连洋和秦岭洋以往形成演化研究,在时空上相互矛盾和不协调事实出发,以这些历史上认定的大洋和洋盆与塔里木陆块及其周边小地块之间的关系为关注的重点,试图对古亚洲洋与特提斯洋之间的关系进行新的判断,借此对古生代中国西北部可能洋-陆构造景观和演化及其成矿作用进行重塑,以逐渐消除以往成矿作用构造背景研究中只见树木不见森林的窘境,从整体活动构造观的构建,避免局部研究无奈陷入固定论的范式。

1 古亚洲洋形成演化的认识及其争议

李春煜等(1982)在编制亚洲古板块构造地质图时,从欧亚大陆或更多从亚洲出发,将全球划分古亚洲构造域、特提斯构造域和环太平洋构造域,相应地从成矿角度也认识为古亚洲、特提斯和环太平洋成矿域。近年有人从现今全球大陆构造演化背景与成矿特征出发,将全球划分为劳亚成矿域、特提斯成矿域、冈瓦纳成矿域和环太平洋成矿域(梅燕雄等, 2009),其实也可以认识为相应的构造域。古亚洲构造域其实就是劳亚构造域在亚洲的一部分。但这个古亚洲构造域对东亚,特别是中国北方的地质地貌影响甚大。古亚洲洋的形成演化史就是中国北方构造地质史的框架。古亚洲洋的研究在中国新疆北部研究最为深入,其次是东北,近年来在其交接处的甘肃北部和内蒙古西部的银根-额济纳旗盆地,为勘查石炭-二叠系的油气而开展了较多调查研究工作。新

疆北部古亚洲洋的研究,主要来自于对天山-北山和东、西准噶尔的研究,重点是古亚洲洋(天山洋)的闭合问题。

1.1 古亚洲洋封闭时限的争论

古亚洲洋的闭合至少有三种主要观点:(1)中生代早期早三叠世闭合(Xiao *et al.*, 2010)。也就是说古亚洲洋贯穿整个古生代3亿多年,从全球超大陆旋回史判断,劳伦超大陆中裂解出的大洋,似乎不会不受中间大陆聚散的影响,特别是晚古生代潘吉亚超大陆汇聚影响,更重要的是天山、阿尔泰280Ma左右幔源含铜镍硫化物矿体的镁铁-超镁铁质侵入岩体的产出,不可能是岛弧岩浆作用的产物。此认识主要证据是发现有早三叠世的蛇绿岩(Xiao *et al.*, 2004),但越来越多的研究似乎不支持这一跨越地质历史上两个代之久的大洋演化认识。(2)中石炭世或晚石炭世闭合(李锦轶等, 2006)。这一观点一直占据主流,主要是石炭纪大量岛弧火山岩和相应金属矿床的发育,为天山及邻区地质填图人员广泛接受。不过最近几年夏林圻等通过对岛弧溢流玄武岩地球化学鉴别的研究(Xia *et al.*, 2014),深刻地影响了该区研究者的认识。(3)泥盆纪末闭合(Xia *et al.*, 2004)。即以夏林圻等为代表的新研究认识,主要证据是泥盆系与石炭系之间的角度不整合、蛇绿岩主要形成于石炭纪之前和石炭纪岛弧玄武岩被重新鉴别为大陆溢流玄武岩等。关于石炭纪火山岩构造属性学术界还存在不同认识,就是石炭纪大量安山岩的形成环境归属。主张岛弧火山岩的认识仍占据着主流话语,但地幔柱动力作用导致消减物质在软流圈重熔的认识也愈来愈受到重视。

就目前研究,天山及邻区(古亚洲洋中南部)晚古生代晚期早二叠世已是板内演化似乎已存在较小争议,而且塔里木早二叠世大火成岩省已为国际学术界认同。争议较大的是石炭纪构造环境,为此我们提出了一种新的主张:石炭纪该地区可能是板块俯冲消减与地幔柱共同作用,两种地球动力学机制并存的环境(李文渊等, 2012)。展开来阐释就是一种构造体制的结束在时空上存在差异性,志留纪古亚洲洋就开始闭合,泥盆纪已经基本完成了闭合。石炭纪古亚洲洋的主闭合作用虽已完成,但就古亚洲洋板块构造体制缝合作用尚未完成,俯冲消减物质的重熔作用不仅没有减弱,反而由于来自深部地幔的地幔柱热能的作用,含水的消减物质和软

流圈地幔物质大规模重熔,故而形成大量中性安山质岩浆的喷发和A型花岗岩类的产出,但少见含铜镍镁铁-超镁铁岩的形成,这与早二叠世存在显著差异。早二叠世时古亚洲洋的板块构造体制已经结束,代之以地幔柱作用的动力学背景(秦克章等, 2017)。但为什么早二叠世岩浆作用的产物还多有地壳消减物质的地球化学特点呢? 主要是地幔柱作用软流圈地幔重熔混有消减的地壳物质所致,后期地壳物质强大的地球化学屏蔽效应,使上侵岩浆岩在微量元素地球化学更代表了消减洋壳的特点,但成矿物质和岩浆主体物质则来源于地幔重熔或地幔柱。不过现在还缺乏有效的地球化学方法予以论证。这也是目前天山-北山早二叠世含岩浆铜镍硫化物镁铁-超镁铁岩地质地球化学研究中困惑的问题,地质与地球化学的不匹配。目前还没有足够充足的证据证明岛弧岩浆作用能够形成有工业价值的铜镍硫化物矿床。因此,仅依靠地球化学投图,而得出岛弧环境的观点是不慎重的。就如同海底海水的同位素屏蔽,但最终还是证实是岩浆流体提供了近99%的成矿物质的块状硫化物矿床成因论证(Yang and Scott, 1996)。

1.2 古亚洲洋与祁连、秦岭和昆仑洋的关系

古亚洲洋一般认为是新元古代就打开成洋的,应是罗迪尼亚超大陆裂解的产物。早古生代时扩张成为北方劳亚大陆与南方冈瓦纳大陆之间的大洋,如同现今大西洋进一步扩张成为太平洋的过程。从地理几何空间思考,在早古生代古亚洲洋大洋存在面前,以往关于秦祁昆中央造山带为早古生代独立洋的判断是存在问题的(李文渊等, 2011)。而且北秦岭洋、北祁连洋、东昆仑洋、阿尔金洋和西昆仑洋自成体系,互不关联,残留的蛇绿岩和蛇绿混杂岩时代上主要显示为早古生代,而古亚洲洋也在早古生代扩张为大洋。由此,古亚洲洋与祁连、秦岭和昆仑洋的空间关系如何理解,是梳理好早古生代这些造山带之间关系的关键? 同时代、大致同处于一个大的空间位置的一系列大洋或洋盆,只能有一个大洋,其它只能从属于这个大洋。这个大洋肯定是古亚洲洋,祁连、秦岭和昆仑洋应是古亚洲洋的次生洋,或是沿岸的边缘海或多岛洋。如同今天的太平洋西岸菲律宾、日本岛、台湾岛与中国大陆之间边缘海或者说为多岛洋一样。以往我们对早古生代北秦岭、北祁连和东、西昆仑造山带的研究,限于空间视野,往往将其判定为独立的大洋,进行自成体系的研究,难免与整个洋陆环境不关联或者不协调。以古亚洲洋形成演化为主线,将早古生代祁连、秦岭和昆仑洋纳入其中开展研究,必将产生更符合亚欧大陆地质历史聚散实际的新认识,进而揭示符合客观实际的区域成矿作用,指导找矿实践。

1.3 塔里木陆块是早古生代古亚洲洋的南岸

目前还缺乏古亚洲洋两岸陆块和微地块,随大洋演化时空位置的详细定位与变化研究,仅对塔里木陆块的位置和变

化进行初步探讨。早古生代塔里木陆块应是古亚洲洋的南岸,因为以往南天山洋的研究也均将其作为南侧的大陆,但塔里木陆块之南的地理景观,由于习惯于将新疆南北两分,分别纳入两个不同的构造动力学体系,在研究天山构造演化时,很少考虑塔里木陆块南缘喀喇昆仑的情形。如果早古生代古亚洲洋大洋存在,不可能再并列分布一个原特提斯洋,有的只能是古亚洲洋与原特提斯洋相通,只是不同位置的不同称谓而已。从塔里木陆块被放置在劳亚大陆和冈瓦纳大陆之间大的视野看待,就只是一个从冈瓦纳大陆裂离出来的相对较大的小陆块或岛块而已。如果古亚洲洋是罗迪尼亚超大陆裂解而成,亲南岸冈瓦纳大陆的塔里木陆块与北岸劳亚大陆的组成分子也应是相似的。这里存在一个古亚洲洋主洋位置判断的问题? 南天山洋如果是主洋,中天山就是亲劳亚大陆的组成分子,也是从大陆裂离而成。

我们再将视野扩大一些,关于古亚洲洋的开始产生也是存在某些地质线索的。关于金川超大型岩浆铜镍硫化物矿床的形成时代,通过锆石 U-Pb 法定年,确认含矿二辉橄辉岩中锆石年龄为 827Ma(李献华等, 2004),是南华纪的产物,其形成被认为是罗迪尼亚超大陆裂解的产物,进而判断为塔里木、阿拉善和西澳大利亚陆块裂解三叉裂点的位置(Zhang *et al.*, 2010)。因此进一步推论,即为劳亚大陆和冈瓦纳大陆破裂最初分离的位置和时间节点。金川超大型铜镍矿可视为古亚洲洋开始裂解的产物。裂解后,如果塔里木与西澳大利亚之间分支裂谷夭折的话,塔里木与阿拉善之间、西澳大利亚与阿拉善之间的裂谷将发育成古亚洲洋,因此阿拉善应是亲劳亚大陆的,古亚洲洋主洋位置就落在了北祁连洋。这显然与目前的研究是不一样的,古亚洲洋主洋位置至少应在阿拉善北边的南天山-北山洋中。阿拉善、西澳大利亚和塔里木都是亲冈瓦纳的,只有中天山是亲劳亚的。金川铜镍矿空间位置与古亚洲洋主洋位置的不一致,其地质意义需要深入研究,仅大胆的推测已经远远不能满足问题解决的需求。据王超(2011)研究,阿拉善与塔里木古元古代基底是一致的,难道三叉裂谷的裂点与最终形成大洋主洋的位置并不一定重叠?

1.4 天山-北山及邻区石炭纪的两种构造动力学机制与成矿

石炭纪在新疆北部的成矿占有重要的地位,除铜镍矿外,斑岩型铜钼矿床、岩浆型铁矿床等大部分金属矿床主要形成于这一时代。也即石炭纪是新疆北部的成矿爆发期。为什么会形成成矿的爆发? 必然与其特殊的构造环境和地球动力学背景有关。单纯的板块构造俯冲消减不足以提供成矿爆发的物质基础和动力学能量,板块构造机制与地幔柱作用机制双重叠加,才可能提供独特而强有力的物源和能量。

两种构造体制并存指的是:板块构造体制是处于行将结束期,而地幔柱动力学体系则是开始期或孕育期。板块构造

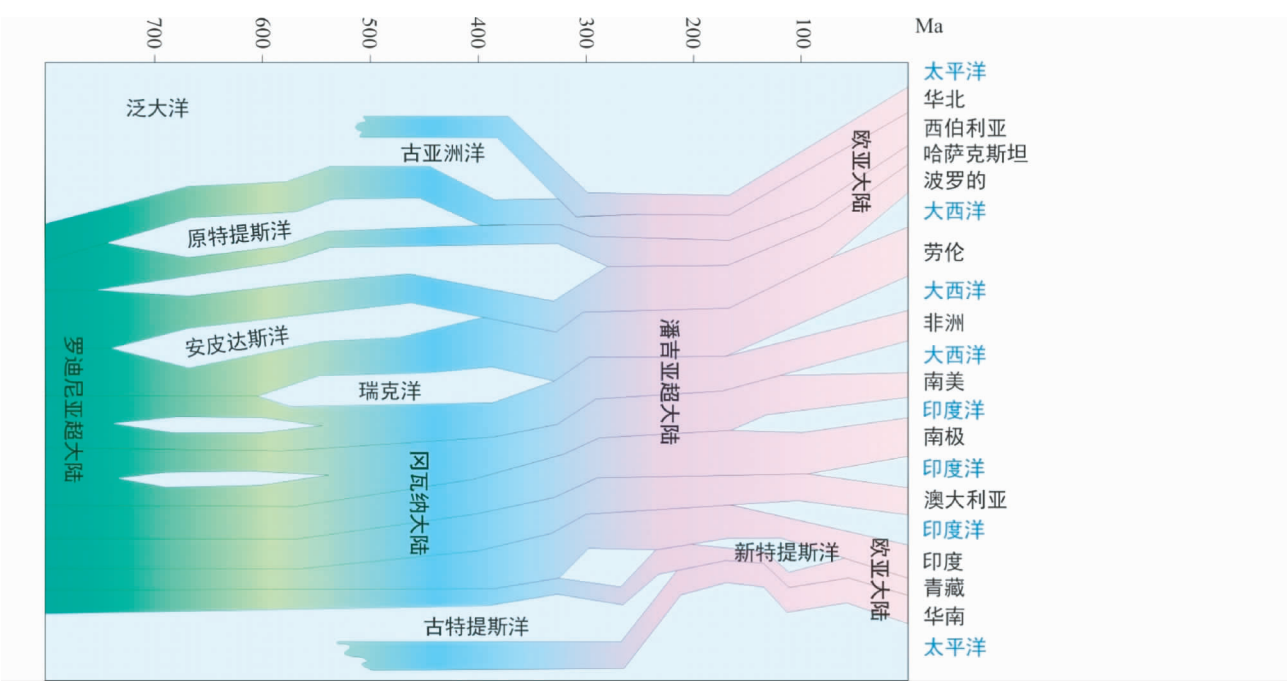


图1 罗迪尼亚和潘吉亚超大陆形成前后主要陆块的示意图(据 Frish *et al.*, 2011 修改)

Fig.1 Graphic illustration of major landmasses before, during and after the Rodinia and the Pangaea supercontinents (modified after Frish *et al.*, 2011)

的贡献更多表现为可见的中性或中酸性喷出岩和侵入岩,构造体制上可鉴别为浅部后碰撞的动力学机制阶段,但实质上深部地幔柱热动力的贡献更为关键,是大规模熔融作用发生的主要因素。可表达为地壳物质的重熔物源和地幔深部热源两种构造体系叠加的特点。例如东天山土屋-延东-东戈壁一线的斑岩铜钼矿床,有中亚型斑岩铜矿的认识,以示与太平洋东岸安第斯活动大陆边缘洋-陆碰撞成矿构造背景的区别,暗示大陆裂谷或裂陷槽的背景。而这种构造背景,只能是新旧两种构造体制交织的结果。再如西天山阿吾拉勒火山岩型铁矿田,表现为大规模岩浆喷发作用不混溶凝结铁矿石的堆积特点,而如此熔融作用的发生,没有深部高温异常是难以形成的。Xia *et al.* (2004)将天山及邻区石炭纪玄武岩分为高 Ti 系列和低 Ti 系列两种,认为前者是未受地壳物质混染的幔源熔融作用直接分异的产物,后者是强烈遭受地壳物质混染后的结果,因为没有对安山岩和安山质流纹岩进行地球化学和成因进行探究,所以也就导致了较大的争议,至今仍是板块岛弧/地幔柱裂谷两种不相容观点同时存在,各有重要证据支持。因此,两种深、浅地球动力学机制并存是可能的,也可以较好解释相互矛盾的地质事实。我们假设太平洋闭合,板块体制行将结束,沿板块缝合带浅部板块机制的岛弧动力热能不足,岩浆作用消减了,但夏威夷洋岛为代表的地幔柱动力学机制并未结束,而是进一步加强,缩减的太平洋缝合带初始岩浆作用显然是两种地球动力学共同贡献的结果。只是一个时代是正在结束,而另一个时代正在开始罢了。

2 古特提斯洋的概念及不同认识

特提斯构造带由于阿尔卑斯山脉和喜马拉雅山脉在亚欧大陆南缘遗世独立存在,任何构造划分都不可能忽视对该带的重视。但就特提斯研究,更多的还是探讨阿尔卑斯和喜马拉雅形成的所谓新特提斯的研究。大家已共识新特提斯洋是中生代裂开,伴随着中生代的结束,于 65Ma 进入新生代,新特提斯洋闭合而陆-陆碰撞,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,导致全球最高峰巍峨的珠穆朗玛峰的崛起,并对亚洲大陆的地貌和构造形迹与成矿作用产生深刻影响(侯增谦等, 2006)。新特提斯之前,亚欧大陆南缘在漫长的古生代是否存在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?肯定是存在的,当然也不是我们现在意义上的亚欧大陆南缘,而是地质历史上冈瓦纳大陆的北缘,现今东、西昆仑造山带及其西延的地质构造历史。已有的研究认为至少存在两期古老的特提斯洋演化历史:一期是新元古宙开裂,早古生代早中期演化成熟,于早古生代末闭合的原特提斯洋构造演化历史。前已经述及原特提斯洋与古亚洲洋是同时期存在联通的大洋,只是不同位置不同的称谓而已。而古特提斯洋是独立存在的,但开启的时间还需进一步深入研究。

2.1 原特提斯洋与古亚洲洋为一体

Frish *et al.* (2011)认为原特提斯洋是晚前寒武纪伴随

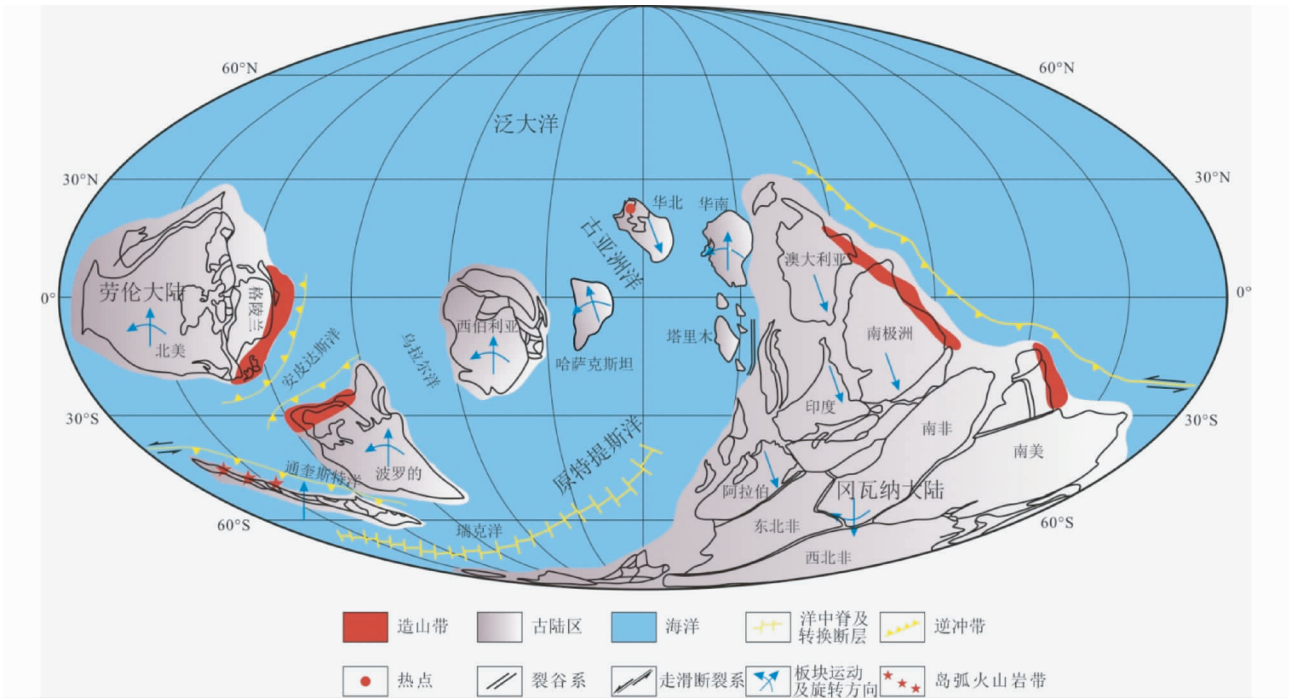


图2 早古生代奥陶纪(470Ma)古亚洲洋板块构造示意图(据李江海等, 2014 修改)
Fig.2 Global map of Early Paleozoic Ordovician (470Ma) plate tectonics (modified after Li *et al.* , 2014)

元古宙罗迪尼亚超大陆的裂解而形成于西伯利亚陆块与哈萨克斯坦陆块之间的大洋,一直延续到泥盆纪,但没有标出古亚洲洋的位置(图1)。西伯利亚与华北陆块之间没有标出大洋的空白位置,其实就是古亚洲洋的位置。从古板块重建图来看,早古生代奥陶纪(470Ma)时劳伦(北美洲)、波罗的(欧洲)和西伯利亚陆块尚未连接成为劳亚大陆,塔里木、华北和华南之间也相互分离,在低纬度处与冈瓦纳大陆之间构成有限洋盆(图2)。相当于古亚洲洋的分支或边缘海,如同现今太平洋的东海和南海。古亚洲洋则界于哈萨克斯坦陆块与西伯利亚陆块和与塔里木、华北和华南陆块之间,向南西即与界于波罗的和西伯利亚陆块之间的原特提斯洋或瑞克洋(Rheic Ocean)相连(图2)。可见,早古生代古亚洲洋与原特提斯洋就是连为一体的,可称之为古亚洲-原特提斯洋。由于古亚洲洋在中国北部古生代构造演化历史的重要性,我们简称古亚洲洋,即代表古亚洲-原特提斯洋。

从奥陶纪重建板块的分布来看,古亚洲洋与原特提斯洋构成的洋呈近南北向(图2),到志留纪逐渐向东向西偏移,古亚洲洋在东,原特提斯洋在西。劳伦、波罗的和西伯利亚陆块在逐渐向一起形成新的劳亚大陆汇聚,并与冈瓦纳大陆逐步靠近。于志留纪末塔里木、华北和华南陆块与冈瓦纳大陆之间的大洋分支或有限洋盆——昆仑洋、祁连洋和秦岭洋相继闭合造山,有多处志留纪末高压-超高压变质带榴闪岩、榴辉岩的产出是主要证据。另外,青藏高原有相应缝合带的发现(潘裕生, 1994)。最终泥盆纪末古亚洲洋主洋和原特提斯洋闭合。由于古生代古板块构造的重建是一项需要多

学科合作综合性研究的工作,即使大陆或重要陆块相对位置正确了,就现有的研究程度,也难以清楚确定较小陆块的位置正确。这也是中国目前亟待加强华北、华南陆块研究的同时,加强塔里木及其周边陆块研究的紧迫性问题。因此,古生代塔里木及其周边陆块与南、北大陆(冈瓦纳、劳亚)的时空关系研究,是特提斯重大地质问题研究的关键。

2.2 夏日哈木含镍超镁铁岩是古特提斯洋开启的产物

东、西昆仑造山带的研究,晚古生代的古特提斯洋是存在的,其形成演化和闭合造山过程中留下了大量的地质构造建造和相应的众多矿产资源。古特提斯研究已被广泛接受,特别是近年来东昆仑夏日哈木超大型岩浆铜镍硫化物矿床、西昆仑玛尔坎苏大型优质沉积碳酸锰矿床等的发现,极大地丰富了古特提斯地质的研究。由于新特提斯构造的叠加,尽管已经普遍接受古特提斯洋的认识,但对古特提斯洋的形成演化和闭合造山的细节并不十分清楚,特别是古特提斯洋裂解成洋的时限缺乏约束性的研究,有待于进一步寻找证据。从全球超大陆聚散认识出发,随着古亚洲洋的闭合而导致地球表面积的缩减,为实现空间上的平衡,另一个新的陆块开裂伸张事件将必然发生。我们认为东昆仑志留纪末夏日哈木超大型岩浆铜镍硫化物矿床(Li *et al.* , 2015),是这一重要裂解事件的产物,即形成于411Ma的夏日哈木含铜镍镁铁-超镁铁质侵入岩是古特提斯洋初期大陆裂谷环境的产物(李文渊, 2015),代表了地球表面冈瓦纳大陆的裂解。是什么原因导致冈瓦纳大陆裂解呢?除前述为维持地球表面积伸

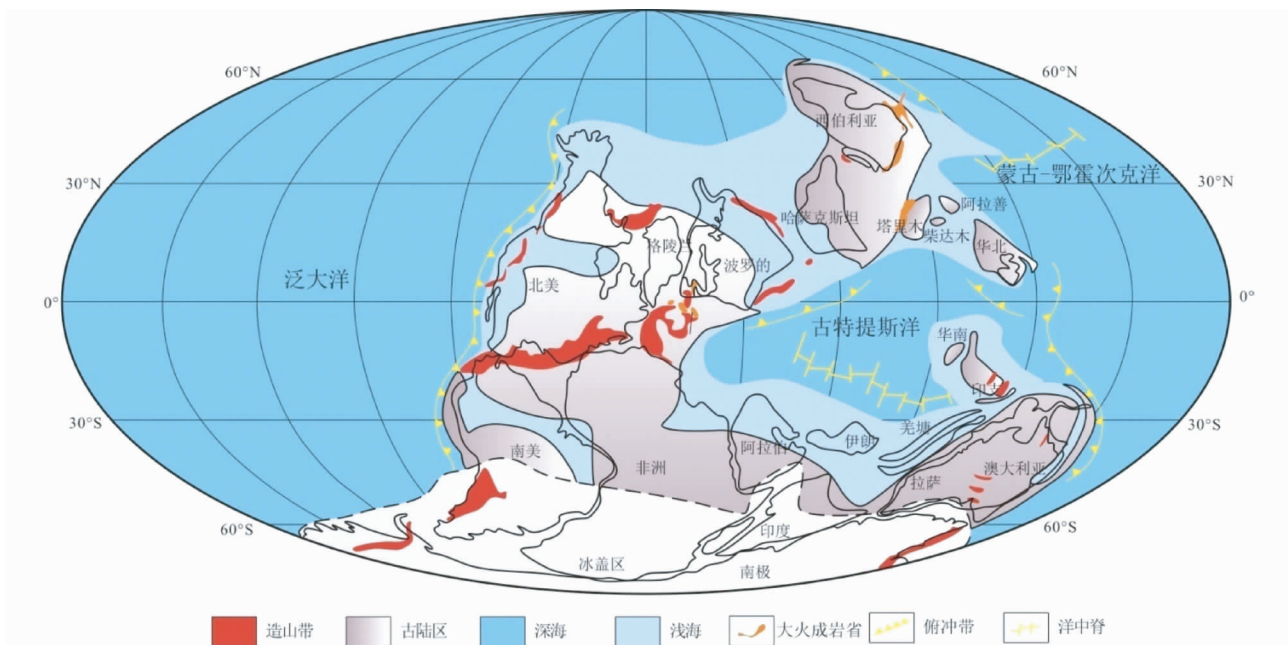


图3 晚古生代石炭纪(320Ma)古特提斯洋板块构造示意图(据李江海等, 2014; Frish *et al.*, 2011 修改)

Fig.3 Global map of Late Paleozoic Carboniferous plate tectonics (modified after Li *et al.*, 2014; Frish *et al.*, 2011)

缩平衡的动力学原因外,夏日哈木含铜镍镁铁-超镁铁质岩体的成因是解决古特提斯洋开裂地球动力学机制的关键钥匙。

除柴达木地块南缘东昆仑造山带元古宙金水口群基底中发现志留纪末的夏日哈木含铜镍岩体外,在东昆仑东段南邻的南祁连山隆微地块中也发现有以拉水峡、裕龙沟等多个中小型岩浆铜镍硫化物矿床,含矿岩体年龄为晚志留世(裕龙沟辉长岩锆石 U-Pb 年龄 422Ma, Zhang *et al.*, 2014);阿尔金构造带上也发现有志留纪的含铜镍镁铁-超镁铁质岩体(马中平等, 2009)。迄今为止,并没有充足证据证明,岩浆铜镍硫化物矿床除大陆板内拉张环境产生外,可以在在板块边缘的聚敛环境中形成(李文渊, 2007)。所谓造山带型铜镍矿床,不过是现在分布于鉴别为地史上的造山带中而已,并非岛弧形成,而是由于新生的陆壳环境下,造山带的缝合线更容易成为部分熔融幔源岩浆上侵通道所致。这就是造山带型铜镍矿床的铁质镁铁-超镁铁岩带,往往与先前的蛇绿(混杂)岩带相伴产出的原因。夏日哈木最为典型,矿区大比例尺地质填图发现,不仅有先前 441Ma 的蛇绿混杂岩残块,而且发现有 408Ma 折返的榴闪岩等(钱兵等,待刊)。

当然,闭合后先前俯冲消减洋壳可能拆离,甚至抵达核幔边界深处,诱发地幔柱产生。地幔柱热能促使软流圈地幔物质部分熔融,有大量洋壳的加入,形成的幔源岩浆在地球化学特点上更趋向岛弧岩浆罢了。因此,岩浆铜镍硫化物矿床仍旧具有构造环境判别的专属性功能,是大陆裂谷的典型产物。目前,我们还没有充足证据说明夏日哈木是地幔柱作用三叉裂谷裂点的结果。但夏日哈木作为中国仅次于金川镍金属储量第二的超大型岩浆铜镍硫化物矿床,其有无可能

如同金川超大型矿床是罗迪尼亚超大陆三叉裂点一样,也是冈瓦纳大陆裂解的三叉裂点,只是能量和规模较小而已。我们猜测阿尔金带是夭折的那条裂谷带,而东昆仑(实则穿越现今的东昆仑和南祁连)和西昆仑裂谷则继续发育,直至裂解成古特提斯洋。

2.3 塔里木陆块是晚古生代古特提斯洋的北岸

随着古特提斯洋新生洋壳的不断产生,形成了新的洋陆空间关系。古亚洲洋在泥盆纪末闭合后,原来作为古亚洲洋南岸的塔里木陆块,发生空间位置上的转化,拼贴于哈萨克斯坦-西伯利亚大陆(新劳亚大陆)上,成为了古特提斯洋的北岸(图3)。与此同时,柴达木地块连同新生的祁连山造山带、北秦岭造山带新陆块都纳入古亚洲洋北岸的范畴。石炭纪古特提斯洋逐渐发育成熟,由于先前大陆裂谷或新生洋壳岩浆火山作用提供物质基础,塔里木南缘作为被动大陆边缘,甚至可能海侵整个塔里木作为陆表海,为玛尔坎苏大型碳酸锰矿层的形成提供良好的成矿环境。塔里木陆块在晚古生代作为先后古亚洲洋和古特提斯洋的见证,担当了两个大洋的大陆边缘角色,只是时代和位置发生了变化。

因此,从塔里木陆块演化出发,新疆南北是一个整体,不存在归属两种构造体系的说法,只是在不同时代归属于不同的构造演化体系而已,不能完全割裂开来看。早古生代,包括塔里木南北均属于古亚洲洋的构造演化体系;晚古生代,由于地幔柱作用的结果,石炭纪地幔柱热动力和板块闭合后碰撞动力并存的构造动力学导致天山-北山及邻区大规模岩浆作用和成矿爆发,构成了新疆北部独特的以石炭纪为突出代表的构造-岩浆-成矿事件,但不能将新疆北部晚古生代的

成矿特色归功于古亚洲洋地质作用的产物,与祁连、北秦岭和昆仑的早古生代成矿作用表现一样,早古生代的成矿作用才是古亚洲洋构造体系的结果。但为什么晚古生代成矿事件反而强劲呢?一是石炭-二叠纪地幔柱的作用。可能大家质疑如此漫长的地幔柱作用,其实地幔柱作用与板块构造作用一样,是地球两大动力学基本机制,在板块构造没有出现以前,地幔柱作用是地球深部与浅部和地表之间能量及物质交换的主要机制,并贯穿于地球演化史始终,但也有孕育期、作用期和衰亡期,即使作用期也有间歇期,大火成岩省是强度作用的结果;二是晚古生代古特提斯洋构造演化成矿作用的叠加。这方面的研究过去只关注于塔里木南缘的昆仑造山带,对塔里木北缘以及天山西延境外天山成矿作用研究几乎不被提及或重视。

如果地史上的古特提斯洋存在,它就必然对北面陆缘产生影响,对先成的天山成矿带的成矿作用有过叠加作用。境内和境外天山成矿上的最大区别在于境内有早二叠世的铜镍矿,但境外有石炭纪世界级的斑岩铜矿。例如乌兹别克斯坦天山中的阿尔马雷克(Almalyk)超大型斑岩铜矿,铜金属储量高达2400万吨,位居亚欧大陆第一,形成时代也为石炭纪(薛春纪等,2013)。这个石炭纪的铜矿我们无法用地幔柱与板块构造并存的观点解释,它又确实存在,并认为是岛弧环境,它是不是古特提斯洋的岩浆火山岛弧呢?

2.4 古特提斯洋的俯冲消减、闭合和造山与成矿

由于中生代以来印度次大陆与亚洲大陆之间强烈的新特提斯地质作用的叠加,我们很难对古特提斯洋的形成演化做出细节性的判断。比较形成共识的是中三叠统与上三叠统之间的不整合,可能代表了古特提斯洋的结束。从空间上来说,古特提斯洋在青藏高原北带,新特提斯洋在南带。时间上是先后关系,先古特提斯洋闭合,后新特提斯洋才开裂。正如特提斯概念的变化一样,从西面的地中海依据希腊神话建立了“特提斯”术语起,就赋予了它无限的想象,直到板块构造认识提出才有了古特提斯洋的概念。我们继续顺着前面的叙述逻辑,古特提斯洋从志留纪末打开,泥盆纪开始扩张,石炭纪形成大洋,早二叠世发展到极限,然后开始衰落,直至中三叠世末闭合。这是古特提斯洋大致的时间演化序次。空间上,认为与塔里木一样,柴达木、祁连、阿拉善、华北、北秦岭等大小陆块、微陆块构成泛华夏古陆群,向北拼贴于劳亚大陆,形成古特提斯洋北面的陆缘,南面则是冈瓦纳大陆。而且还认为,古特提斯洋并不像太平洋那样“干净”,是多岛洋的洋陆景观(潘桂堂等,2009)。

如果古特提斯洋石炭纪发生俯冲消减,必然会造成岛弧或活动大陆边缘。现今东、西昆仑造山带中哪些地质单元是这些曾经的岛弧或活动大陆边缘的分子,似乎需要梳理,它们是我们分析判断成矿的地质基础。西昆仑玛尔坎苏锰矿的石炭纪碳酸盐岩沉积是古特提斯洋北岸塔里木陆缘浅海或陆表海的产物呢,还是南岸的物质?若在北岸塔里木南缘

而成,应是还未发生俯冲消减前的被动大陆边缘的背景,成矿物质可能来源于同时代的洋中脊或前世火山岩基底。东昆仑德尔尼铜矿曾被误认为岩浆铜镍硫化物矿床系列的缺镍单铜钴类型,进一步研究确认为晚石炭世310Ma洋中脊铜钴块状硫化物矿床(杨经绥等,2004),与塞浦路斯型铜矿床相比,差异在不仅成铜,还钴高,且矿体不是产在玄武岩中,而是在辉长岩中,这也是过去被误认为岩浆矿床的原因。鄂拉山铜峪沟、赛什塘铜矿为三叠纪砂卡岩-斑岩铜矿床(曾小华和周宗桂,2014),代表了古特提斯洋消减俯冲形成的火山岛弧环境。大场金矿应是三叠纪岛弧火山岩浅成低温热液矿床类型,是古特提斯洋消减闭合产物。目前新疆西昆仑、祁漫塔格和青海东昆仑镍、铜、锰、铅锌、金银金属矿床已有重大发现,已形成若干重要矿产资源基地,需要以古特提斯洋的形成演化为研究主线,进行构造演化-岩浆作用-成矿响应研究,丰富古特提斯洋在中国的地质研究。消减压缩后的造山带中各种地质体空间位置的紧密镶嵌,并不能代表其形成时的实际空间关系,何况又有新特提斯的叠加改造,多岛洋模式是否代表了古特提斯洋的特点,需要更全面深入的研究。因为,压缩后的造山带中,微陆块被保留了下来,大洋多被消减而消失了,多岛的特点就往往突出显现了出来。

亚欧大陆南缘中西段地中海、黑海、咸海、里海从最初被认为是特提斯海的残留,到板块构造研究后是古特提斯洋还是新特提斯洋的残留,反而并无深究。青海湖作为青藏高原北部最大的咸水湖,是古特提斯洋的残留,还是中生代后更南部新生新特提斯洋的残留,似乎也没有定论。古特提斯洋作为中国大陆华北、华南和塔里木几个大的陆块及众多微陆块最后最重要的分离,消减闭合后连接为一体,对中国大陆研究意义重大。古特提斯洋中三叠世末的最终闭合,使华南与华北陆块拼接在了一起,从此中国大陆构架基本形成。

3 古亚洲洋与古特提斯洋先后关系讨论

古亚洲洋和古特提斯洋作为亚欧大陆地质历史上古生代最重要两个大洋的演化,实际上反映了亚欧大陆古生代重要陆块之间的聚散演化关系。由于特提斯洋本身复杂的划分方案,故而有古亚洲洋是古特提斯洋组成的认识(Yakubchuk, 2002),也有古特提斯洋与古亚洲洋并存的观点(李荣社等,2011)。通过上述论述,已经比较清楚阐明:早古生代的古亚洲洋与早古生代的原特提斯洋是一个相通的大洋,古亚洲洋在东,原特提斯洋在西,一些著作中不认同早古生代的原特提斯洋,名为瑞克洋(Rheic ocean)(Robb, 2005),其实指的是一个洋;早古生代的昆仑洋、祁连洋和秦岭洋是早古生代古亚洲洋的分支、次生洋盆或边缘海,于早古生代末闭合,古亚洲洋主洋则延续到泥盆纪末闭合;早古生代古亚洲洋与晚古生代古特提斯洋是前后关系,志留纪末冈瓦纳大陆北部裂解,晚古生代形成古特提斯洋,于中生代中三叠世末闭合;相应地三叠纪冈瓦纳大陆南部再次裂解,

于中生代形成新特提斯洋,并与古太平洋相联,于新生代开始 65Ma 闭合而陆陆碰撞并发生陆壳俯冲,青藏高原大规模隆升。现今的亚欧大陆,自北而南,从大陆腹地向南以次是早古生代的亚洲洋(-原特提斯洋)、晚古代的古特提斯洋和中新生代的新特提斯洋的时空演化展布,并决定了区域构造-岩浆活动的演化和响应的区域成矿作用。

3.1 早古生代是古亚洲洋主要发育期

中亚造山带(CAOB)是晚古生代造山带的认识由来已久,也深入人心,主要原因是天山及邻区石炭纪大规模的岩浆作用和成矿大爆发,吸引了大家的注意力,而忽略了早古生代大洋作用的地质事实。塔里木早二叠世大火成岩省的确认(Yang *et al.*, 2006),唤起了人们对天山及邻区晚古生代,特别是石炭-二叠纪构造环境的探索。Xia (2014)近十年对天山及邻区石炭纪火山岩的研究,尤其是石炭纪玄武岩的深入研究,提出了天山及邻区石炭纪-早二叠世大陆裂谷背景大火成岩省的认识(Xia *et al.*, 2004),激起了学术界对中亚造山带的重新思考。随着中亚哈萨克斯坦石炭-二叠纪油气资源的利用,中国境内新疆准噶尔和银根-额尔齐斯盆地二叠纪油气的发现,对石炭-二叠纪岛弧火山岩的认识受到了更多质疑。从更大视野考察,在劳亚大陆与冈瓦纳大陆之间整个古生代同时存在两个大洋不太可能,应是两个大洋的接替比较符合地球表部洋陆之间的几何学展布。早古生代是古亚洲洋的主要发育期,早古生代的祁连洋、秦岭洋和昆仑洋都是其分支或次生有限洋盆,在早古生代就先于古亚洲洋主洋而闭合,最终古亚洲洋于泥盆纪末闭合。

3.2 晚志留世古特提斯洋开启与石炭纪古亚洲洋闭合转换的意义

古亚洲洋闭合之前,志留期末古特提斯洋就已经开裂。地质历史上的地球动力学体系之间的转换,不是一夜之间完成的,需要一个衰亡期和孕育期的转换,有时这个转换过程甚至很漫长。同时,一个老的构造体系的结束和新的构造体系的开始,在空间上和时间上是存在差异的,并非同时完成。古特提斯洋在经历泥盆纪大陆裂谷的同时,古亚洲洋则正经历着消减闭合过程,到石炭纪时古特提斯洋拉开,而古亚洲洋闭合进入了后碰撞阶段,这时中国天山及邻区又同时开始了新的地幔柱地球动力学机制的孕育和发育,两种地球动力学的并存造就了中国天山及邻区石炭纪大规模岩浆作用和成矿大爆发的特点。

3.3 晚古生代是古特提斯洋的主要发育期

随着古亚洲洋闭合进入板内作用阶段,古特提斯洋扩张至二叠纪大洋已经成熟,随即开始消减,于中三叠世末闭合,因此晚古生代是古特提斯洋的主要发育期。古特提斯洋其实也是中国北方古陆(华北、塔里木)与南方古陆(扬子)之间最后的分离,古特提斯洋的闭合使它们最终走到了一起。

中国古陆块群在早、晚古生代经历了不同的空间大陆归属,早古生代属于古亚洲洋南岸冈瓦纳大陆裂离的陆块,晚古生代除华南(扬子)和羌塘(?)陆块外,所谓泛华夏陆块群成为了古特提斯洋的北岸组成。

4 结语

对古亚洲洋和古特提斯洋关系的梳理,古亚洲洋开裂是由于以 827Ma 金川超大型铜镍矿床形成为代表的地幔柱作用,罗迪尼亚超大陆三叉裂谷的开裂开始的,金川的形成可视作古亚洲洋的开启;古特提斯洋开裂则是以 411Ma 夏日哈木超大型铜镍矿床形成为代表的地幔柱作用,冈瓦纳大陆北部三叉裂谷的裂解开始的,夏日哈木的形成也可被看作为古特提斯洋的开启。这两个地幔柱作用,除幔源的镁铁-超镁铁岩侵入体外,没有找着大火成岩省的地质遗迹。在 290 ~ 251Ma 的二叠纪亚欧大陆趋向聚合统一的潘吉亚超大陆过程中,亚欧大陆则有三处重要的大火成岩省展布,最早的是 290 ~ 288Ma(早二叠世)塔里木大火成岩省,其次是 259Ma(晚二叠世)峨眉大火成岩省,再次是 252Ma(二叠纪-三叠纪交接)的西伯利亚大火成岩省。三个大火成岩省在全球视野和地史尺度上看非常接近,难免被放在一起思考。塔里木大火成岩是古老陆块边部发生的重大快速岩浆事件,而此时陆块的南侧正经历着古特提斯洋大洋化过程,这犹如太平洋东岸的黄石大火成岩省事件一样。不过由于塔里木大火成岩省被覆盖隐伏,其实际规模可能要更大,同时,它能够刺破陆壳上升喷发,相邻的新生天山造山带陆壳中更可能产出,而且在石炭纪就已活动,从动力学机制可看做是一个地幔柱作用的阶段性过程;而峨眉大火成岩省实际发生在古特提斯洋南侧扬子陆块西缘及松潘甘孜和三江造山带的结合部位,也在古老陆块的边缘与新生造山带陆壳中,与塔里木颇为相似,只是时间范围更为有限,从 251 ~ 253Ma 或最多到 263Ma(尤敏鑫和刘建民, 2014);西伯利亚大火成岩省则完全发生在劳亚大陆的西伯利亚大陆块中,正好处于二叠纪与三叠纪的交接的时间,由于其巨大的岩浆喷出侵入规模和铜镍成矿作用被广泛关注,同时被认为是古生代进入中生代许多生物灭绝的原因(Sobolev *et al.*, 2009)。从当时地域空间关系上看,三个大火成岩省可能并无直接关系,但集中发生于二叠纪-三叠纪时期,则可能反应了潘吉亚超大陆的裂解。深部地幔柱与浅部板块构造大洋的形成演化之间的关系,除地幔柱作用使陆壳破裂产生大陆裂谷而发生联系外,两者之间关系的研究还有待于深入。

致谢 感谢翟明国院士推荐国土资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室组织刊行这期有关中国西北地区地质与成矿作用研究主题的专辑。本来要我写些有关这期专辑组稿情况的说明,后忍不住还是写成了这样一篇拙文。近 30 年来,开始师从汤中立院士研究金川超大型岩浆铜镍硫化物矿

床,后又在西安地调中心跟随夏林圻研究员研究祁连山早古生代海相火山岩及其火山成因块状硫化物矿床。进入二十一世纪,主持研究秦祁昆造山带的成矿作用和探索新疆北部晚古生代大规模岩浆作用与成矿爆发,最近几年又重新开始对新发现的东昆仑夏日哈木超大型岩浆铜镍硫化物矿床开展研究,并在期间考察中亚的重要矿床。在这些矿床和重要成矿作用研究的背后,一直对这些重要矿床和成矿作用的地质构造背景心存疑惑,它们与所在造山带的关系以及整个古亚洲洋和古特提斯洋的关系问题,缺乏必要的梳理,不同的观点和不同的地质事实交织在一起,令人眼花缭乱而不得要领。在学习消化大量前辈和同辈及年轻学者成果的基础上,试图绘出一个古亚洲洋与特提斯洋关系整体的框架式的粗浅认识,以梳理相互之间的内在关系。没有系统引出前人的文献,旨在更加综合地提出一些整体的观点,以抛砖引玉,推动问题的深入研究和解决。因此,或许一些认识是推测的,还缺少严密的论证,恳望学者同仁批评指正!感谢高永宝博士、钱兵助理研究员认真校勘了全文并补充了有关文献,韩一筱博士生重新制作了精美的插图。再次感谢翟明国院士,感谢各位审稿人和《岩石学报》编辑部的辛勤付出!

References

- Cheng YQ. 1994. Outline to the Regional Geology of China. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)
- Frish W, Meschede M and Blakey R. 2011. Plate Tectonics: Continental Drift and Mountain Building. Heidelberg: Springer, 1 – 212
- Hou ZQ, Pan GT, Wang AJ, Mo XX, Tian SH, Sun XM, Ding L, Wang EQ, Gao YF, Xie YL, Zeng PS, Qin KZ, Xu JF, Qu XM, Yang ZM, Yang ZS, Fei HC, Meng XJ and Li ZQ. 2006. Metallogenesis in Tibetan collisional orogenic belt: II. Mineralization in late-collisional transformation setting. Mineral Deposits, 25(5): 521 – 543 (in Chinese with English abstract)
- Li CS, Zhang ZW, Li WY, Wang YL, Sun T and Ripley EM. 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. Lithos, 216 – 217: 224 – 240
- Li CY, Wang Q, Liu XY and Tang YQ. 1982. Explanatory Notes to the Tectonic Map of Asia. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)
- Li JH, Han XQ and Mao X. 2014. Atlas of Global Tectonic. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)
- Li JY, He GQ, Xu X, Li HQ, Sun GH, Yang TN, Gao LM and Zhu ZX. 2006. Crustal tectonic framework of northern Xinjiang and adjacent regions and its formation. Acta Geologica Sinica, 80(1): 148 – 168 (in Chinese with English abstract)
- Li RS, Ji WH, He SP, Liu Y and Zhang HD. 2011. The two tectonic domain division discussion between the ancient Asian and Tethys in western China. Xinjiang Geology, 29(3): 247 – 250 (in Chinese with English abstract)
- Li WY. 2007. The current status and prospect on magmatic Ni-Cu-PGE deposits. Northwestern Geology, 40(2): 1 – 28 (in Chinese with English abstract)
- Li WY, Zhang ZW, Gao YB, Tan WJ, Jiang HB and Guo ZP. 2011. Important metallogenic events and tectonic response of Qinling, Qilian and Kunlun orogenic belts. Geology in China, 38(5): 1132 – 1149 (in Chinese with English abstract)
- Li WY, Niu YL, Zhang ZW, Zhang MJ, Gao YB, Hu PQ, Zhang JW, Tan WJ and Jiang HB. 2012. Geodynamic setting and further exploration of magmatism-related mineralization concentrated in the Late Paleozoic in the northern Xinjiang Autonomous Region. Earth Science Frontiers, 19(4): 41 – 50 (in Chinese with English abstract)
- Li WY. 2015. Metallogenic geological characteristics and newly discovered orebodies in Northwest China. Geology in China, 42(3): 365 – 380 (in Chinese with English abstract)
- Li XH, Su L, Song B and Liu DY. 2004. SHRIMP U-Pb zircon age of the Jinchuan ultramafic intrusion and its geological significance. Chinese Science Bulletin, 49(4): 420 – 422
- Ma ZP, Li XM, Sun JM, Xu XY, Lei YX, Wang LS and Duan XX. 2009. Discovery of layered mafic-ultramafic intrusion in Changshagou, Altyn Tagh, and its geological implication: A pilot study on its petrological and geochemical characteristics. Acta Petrologica Sinica, 25(4): 793 – 804 (in Chinese with English abstract)
- Mei YX, Pei RF, Yang DF, Dai ZX, Li JW, Xu CR and Qu HY. 2009. Global metallogenic domains and districts. Mineral Deposits, 28(4): 383 – 389 (in Chinese with English abstract)
- Pan GT, Xiao QH, Lu SN, Deng JF, Feng YM, Zhang KX, Zhang ZY, Xing GF, Hao GJ and Feng YF. 2009. Subdivision of tectonic units in China. Geology in China, 36(1): 1 – 28 (in Chinese with English abstract)
- Pan YS. 1994. Discovery and evidence of the fifth suture zone of Qinghai-Xizang Plateau. Acta Geophysica Sinica, 37(2): 184 – 192 (in Chinese with English abstract)
- Qin KZ, Zhai MG, Li GM, Zhao JX, Zeng QD, Gao J, Xiao WJ, Li JL and Sun S. 2017. Links of collage orogenesis of multiblocks and crust evolution to characteristic metallogenesis in China. Acta Petrologica Sinica, 33(2): 305 – 325 (in Chinese with English abstract)
- Robb LJ. 2005. Introduction to Ore-Forming Processes. Malden: Blackwell Publishing, 1 – 373
- Şengör AMC, Natal' in BA and Burtman VS. 1993. Evolution of the Altaid tectonic collage and Palaeozoic crustal growth in Eurasia. Nature, 364(6435): 299 – 307
- Sobolev AV, Krivolutsкая NA and Kuzmin DV. 2009. Petrology of the parental melts and mantle sources of siberian trap magmatism. Petrology, 17(3): 253 – 286
- Tu GC. 1999. On the Central Asia metallogenic province. Scientia Geologica Sinica, 34(4): 397 – 404 (in Chinese with English abstract)
- Wang C. 2011. Precambrian tectonic of south margin of Tarim Basin, NW China. Ph. D. Dissertation. Xi'an: Northwest University, 1 – 137 (in Chinese with English summary)
- Xia LQ, Xu XY, Xia ZC, Li XM, Ma ZP and Wang LS. 2004. Petrogenesis of carboniferous rift-related volcanic rocks in the Tianshan, northwestern China. Geological Society of America Bulletin, 116(3–4): 419 – 433
- Xia LQ. 2014. The geochemical criteria to distinguish continental basalts from arc related ones. Earth-Science Reviews, 139: 195 – 212
- Xiao WJ, Windley BF, Badarch G, Sun S, Li J, Qin KZ and Wang ZH. 2004. Palaeozoic accretionary and convergent tectonics of the southern Altaids: implications for the growth of Central Asia. Journal of the Geological Society, 161(3): 339 – 342
- Xiao WJ, Huang BC, Han CM, Sun S and Li JL. 2010. A review of the western part of the Altaids: A key to understanding the architecture of accretionary orogens. Gondwana Research, 18(2–3): 253 – 273
- Xue CJ, Duan SG, Chai FM, Maimaitie M, Typecegekob AX and Qu WJ. 2013. Metallogenic epoch of the almalik porphyry copper ore field, Uzbekistan, and its geological significance. Earth Science Frontiers, 20(2): 197 – 204 (in Chinese with English abstract)
- Yakubchuk A. 2002. The Baikallide-Altaid, Transbaikalian-Mongolian and North Pacific orogenic collages: Similarity and diversity of structural patterns and metallogenic zoning. In: Blundell D, Neubauer F and von Quadt A (eds.). The Timing and Location of Major Ore Deposits in an Evolving Orogen. Geological Society, London,

Special Publications, 204, 273 – 297

- Yang JS, Wang XB, Shi RD, Xu ZQ and Wu CL. 2004. The Dur' ngoi ophiolite in East Kunlun, northern Qinghai-Tibet Plateau: A fragment of paleo-Tethyan oceanic crust. *Geology in China*, 31(3): 225 – 239 (in Chinese with English abstract)
- Yang KH and Scott SD. 1996. Possible contribution of a metal-rich magmatic fluid to a sea-floor hydrothermal system. *Nature*, 383(6599): 420 – 423
- Yang SF, Li ZL, Chen HL *et al.* 2006. ^{40}Ar - ^{39}Ar dating of basalts from Tarim Basin, NW China and its implication to a Permian thermal tectonic event. *Journal of Zhejiang University (Science A)*, 7(2): 320 – 324
- You MX and Liu JM. 2014. Application status and progress of isotopic geochemistry in research of Emeishan Large Igneous Province (ELIP). *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 44(4): 1231 – 1243 (in Chinese with English abstract)
- Zeng XH and Zhou ZG. 2014. Geochemistry constraint on ore-forming material and ore-forming fluids of Tongyugou copper deposit in Xinghai County, Qinghai Province. *Geoscience*, 28(2): 348 – 358 (in Chinese with English abstract)
- Zhang CL, Yang DS, Wang HY, Takahashi Y and Ye HM. 2011. Neoproterozoic mafic-ultramafic layered intrusion in Quruqtagh of northeastern Tarim Block, NW China: Two phases of mafic igneous activity with different mantle sources. *Gondwana Research*, 19(1): 177 – 190
- Zhang ZW, Li WY, Gao YB, Li CS, Ripley EM and Kamo S. 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 Yaqi gabbroic intrusions. *Mineralium Deposita*, 49(2): 279 – 292

附中文参考文献

- 程裕淇. 1994. 中国区域地质概论. 北京: 地质出版社
- 侯增谦, 潘桂棠, 王安建, 莫宣学, 田世洪, 孙晓明, 丁林, 王二七, 高永丰, 谢玉玲, 曾普胜, 秦克章, 许继峰, 曲晓明, 杨志明, 杨竹森, 费红彩, 孟祥金, 李振清. 2006. 青藏高原碰撞造山带: II. 晚碰撞转换成矿作用. *矿床地质*, 25(5): 521 – 543
- 李春煜, 王荃, 刘雪亚, 汤耀庆. 1982. 亚洲大地构造图(说明书). 北京: 地质出版社
- 李江海, 韩喜球, 毛翔. 2014. 全球构造图集. 北京: 地质出版社
- 李锦轶, 何国琦, 徐新, 李华芹, 孙桂华, 杨天南, 高立明, 朱志新. 2006. 新疆北部及邻区地壳构造格架及其形成过程的初步探讨. *地质学报*, 80(1): 148 – 168
- 李荣社, 计文化, 何世平, 刘银, 张海迪. 2011. 中国西部古亚洲与特提斯两大构造域划分问题讨论. *新疆地质*, 29(3): 247 – 250
- 李文渊. 2007. 岩浆 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床研究现状及发展趋势. *西北地质*, 40(2): 1 – 28

- 李文渊, 张照伟, 高永宝, 谭文娟, 姜寒冰, 郭周平. 2011. 秦祁昆造山带重要成矿事件与构造响应. *中国地质*, 38(5): 1132 – 1149
- 李文渊, 牛耀龄, 张照伟, 张铭杰, 高永宝, 胡沛青, 张江伟, 谭文娟, 姜寒冰. 2012. 新疆北部晚古生代大规模岩浆成矿的地球动力学背景和战略找矿远景. *地质前缘*, 19(4): 41 – 50
- 李文渊. 2015. 中国西北部成矿地质特征及找矿新发现. *中国地质*, 42(3): 365 – 380
- 李献华, 苏犁, 宋彪, 刘敦一. 2004. 金川超镁铁侵入岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及地质意义. *科学通报*, 49(4): 401 – 402
- 马中平, 李向民, 孙吉明, 徐学义, 雷孝孝, 王立社, 段星星. 2009. 阿尔金山南缘长沙沟镁铁-超镁铁质层状杂岩体的发现与地质意义——岩石学和地球化学初步研究. *岩石学报*, 25(4): 793 – 804
- 梅燕雄, 裴荣富, 杨德风, 戴自希, 李进文, 徐丛荣, 瞿泓滢. 2009. 全球成矿域和成矿区带. *矿床地质*, 28(4): 383 – 389
- 潘桂棠, 肖庆辉, 陆松年, 邓晋福, 冯益民, 张克信, 张智勇, 王方国, 邢光福, 郝国杰, 冯艳芳. 2009. 中国大地构造单元划分. *中国地质*, 36(1): 1 – 28
- 潘裕生. 1994. 青藏高原第五缝合带的发现与论证. *地球物理学报*, 37(2): 184 – 192
- 秦克章, 翟明国, 李光明, 赵俊兴, 曾庆栋, 高俊, 肖文交, 李继亮, 孙枢. 2017. 中国陆壳演化、多块体拼合造山与特色成矿的关系. *岩石学报*, 33(2): 305 – 325
- 涂光炽. 1999. 初议中亚成矿域. *地质科学*, 34(4): 397 – 404
- 王超. 2011. 塔里木盆地南缘前寒武纪地质演化. 博士学位论文. 西安: 西北大学, 1 – 137
- 薛春纪, 段士刚, 柴凤梅, 木合塔尔·买买提, Typecebekob AX, 屈文俊. 2013. 乌兹别克斯坦 Almalyk 斑岩铜矿田成矿时代及其地质意义. *地质前缘*, 20(2): 197 – 204
- 杨经绥, 王希斌, 史仁灯, 许志琴, 吴才来. 2004. 青藏高原北部东昆仑南缘德尔尼蛇绿岩: 一个被肢解了的古特提斯洋壳. *中国地质*, 31(3): 225 – 239
- 尤敏鑫, 刘建民. 2014. 同位素地球化学在峨眉山大火成岩省研究中的应用现状与进展. *吉林大学学报(地球科学版)*, 44(4): 1231 – 1243
- 曾小华, 周宗桂. 2014. 青海省兴海县铜峪沟铜矿床成矿物质和流体来源的地球化学探讨. *现代地质*, 28(2): 348 – 358