DOI:10.19826/j. cnki. 1009-3850. 2021. 02012

特提斯中西段古生代洋陆格局与构造演化

耿全如, 李文昌, 王立全, 曾祥婷, 彭智敏, 张向飞,

张 璋,丛 峰,关俊雷

(中国地质调查局成都地质调查中心,四川 成都 610081)

摘要:笔者根据国内外研究进展和区域地质对比,将特提斯中西段的古生代构造域划分为 Iapetus-Tornquist 洋加里东 造山带、Rheic 洋华力西期造山带、乌拉尔 – 天山中亚造山带和古特提斯 Pontides – 高加索 – Mashhad 造山带,并提 出 4 个初步认识:(1) Rodinia 超大陆在新元古代裂解形成的原特提斯大洋在欧洲以 Iapetus 和 Tornquist 缝合带为代 表,它们在约 420 Ma 闭合形成加里东造山带,与我国秦祁昆造山系相似;(2) Rheic 洋类似于特提斯东段的龙木错 – 双湖 – 昌宁 – 孟连洋,为古生代的特提斯主大洋,而泥盆纪形成的古特提斯洋实际上为主洋盆衍生的分支洋盆之 一,Rheic 洋的各分支洋盆在 320 ~ 310 Ma 闭合,形成华力西造山带和 Pangea 超大陆;(3)南阿尔卑斯 Plankogel 带、 土耳其北部 Pontides 带和伊朗北部 Rasht- Mashhad 为古特提斯缝合带,代表泥盆纪—二叠纪的洋盆,晚石炭世—早 三叠世丝绸之路岩浆弧与我国羌塘中部的望果山火山弧相对应;(4)特提斯中西段的基梅里造山带和羌塘中部的印 支期造山带为古特提斯增生型造山带的典型代表。

关 键 词:特提斯中西段;古生代蛇绿岩带;增生杂岩带;构造格架;构造演化

中图分类号:P541 文献标识码:A

特提斯是一个古老的地质概念,最初由奥地利 地质学家 Suess 于 1893 年提出,原意是指现今的欧 亚大陆以南和南美 – 非洲大陆以北,从加勒比海越 过大西洋,从阿尔卑斯山、喀尔巴阡山、土耳其 – 伊 朗高原、喜马拉雅山,直至东南亚的广大地域存在 一个巨型的中生代海洋(§engör,1979; Stampfli and Borel, 2002, 2004)。随着全球地质调查与研究的 不断深入,特提斯的概念已经扩展了。目前认为, 中元古代全球范围内的格林威尔期造山作用(发生 于 10~13 亿年前)形成 Rodinia 超大陆,而新元古 代开始的 Rodinia 裂解已进入原特提斯洋起始阶段 (潘桂棠等,1997, 2002, 2015)。从早古生代开始, 可划分为原、古、新三个特提斯演化阶段(Stöcklin, 1968;黄汲清和陈炳蔚,1987; Şengör,1989; 吴福元 等,2020)。

特提斯构造域从早古生代到新生代的地质演 化决定了现今全球的洋陆分布格局,造就了全球性 的纬向构造带,控制了金属和能源矿产资源的时空 分布。因此,特提斯地质研究具有重要的理论意义 和资源战略意义。我国学者近年来在特提斯东段 的青藏高原及其邻区开展了大量的地质调查,对本 区构造单元进行了详细的划分(潘桂棠等,2002), 以此为基础提出了特提斯主洋盆的观点,并得到普 遍认可。目前认为龙木错 - 双湖 - 昌宁 - 孟连缝 合带代表连续演化的原特提斯、古特提斯主洋盆 (李才等, 2006, 2008, 2009);另一种观点认为班公 湖-双湖-怒江-昌宁-孟连对接带整体代表原 特提斯、古特提斯大洋自北向南后退式俯冲消亡形 成的巨型俯冲增生杂岩带(潘桂棠等,2004,2008, 2009,2020;王立全等,2008a,2008b),向南可连接东 南亚的清迈和文东 - 劳勿带(潘桂棠等,2002; Pan et al., 2012),该带在东特提斯构造域构筑了冈瓦纳 大陆与劳亚-泛华夏大陆的分界,代表原、古特提 斯主洋盆(潘桂棠等,2004,2008,2009;李才等, 2008; 王保弟等, 2013; 彭智敏等, 2014; 张克信 等, 2015)。针对特提斯东段两侧大陆边缘有众多

收稿日期:2021-01-03;改回日期:2021-02-26

作者简介: 耿全如(1963—),研究员,从事青藏高原地质调查和研究。E-mail:cdgengqr@163.com

资助项目: 国家自然科学基金项目(92055314,41273047);中国地质调查局项目(DD20190363,12120113036500)

的 SSZ 型蛇绿岩带、岩浆弧和弧后盆地等构造单元, 不少学者提出大陆边缘多岛弧盆系统和增生型造 山模式(Hsü et al., 1995; 潘桂棠等,2004,2009, 2015; 李三忠等,2016a)。

特提斯地质演化的主要特征表现为南侧冈瓦 纳大陆不断裂解、地块向北漂移并与 Laurentia(劳 伦)、Laurussia(劳俄)、Laurasia(劳亚)大陆持续聚 合,而地块单向裂解与聚合的驱动力可能来自洋脊 俯冲和被动大陆边缘的裂解(万博等, 2019; Zhong and Li, 2019,2020)。特提斯中西段主要指欧洲、中 亚和西亚一带,从北向南包括加里东造山带、华力 西造山带、基梅里造山带和阿尔卑斯造山带,总体显示从老到新的构造格局。目前对特提斯中西段的地质研究主要集中在新特提斯洋的演化、阿尔卑斯期的造山过程和逆冲推覆构造等方面,对古生代的洋陆格局和构造演化研究相对薄弱(Robertson, 2004; Schmid et al.,2020;袁四化等,2020,2021)。

总的看来,我国学者对于特提斯东段青藏高原 及邻区的地质调查和研究已取得重大进展,但对于 特提斯中西段的地质认识尚显不足。2017年国家 自然科学基金委员会发布了"特提斯地球动力系 统"重大研究计划。2020年启动了整个特提斯构造



图 1 特提斯中西段构造格架图(底图据 Google Earth 软件)

古生代缝合带:①—Iapetus;②—Iberia-Thuringian, RS-Rheic;③—Rheic和 Rheno-Hercynian, GMS-Galicia-Moldanubian;④—Tornquist;⑤—南绍 山;⑥—Rhodope 地块西段变辉长岩;⑦—Lesvos;⑧—Karakaya;⑨—Almacik;⑩—高加索;⑪—Takab;⑫—乌拉尔;⑬—Rasht-Mashhad;⑭— Jandagh-Anarak;⑮—Turkestan;⑯—Misho 镁铁质杂岩;⑰—斋桑 - 额尔齐斯;⑱—南天山;⑲—库地;⑳—康西瓦;㉒—阿尼玛卿;㉒—西金乌 兰;㉓—龙木锴 - 双湖

中生代缝合带:①—阿尔卑斯蛇绿岩带 - 喀尔巴阡山;②—Ligurian 亚平宁;③—Mirdita;④—Pindos;⑤—Vardar;⑥—Izmir-Ankara;⑦—Intra-Pontides;⑧—Sevan;⑨—Lycian 蛇绿岩推覆体;⑩—Troodos;⑪—Kizildag;⑫—Bitlis-Zagros;⑬—Zagros 内带;⑭— Makran;⑮—Birjand-Nehbandan-Tchehel-Kureh;⑮—Oman;⑰—Bela-Waziristan;⑮—Sabzevar-Torbat;⑲—Shyok;⑳—班公湖 - 怒江;㉑—狮泉河;㉒—印度河 - 雅鲁藏布江

缩写代号:OM—Ossa Morena 地块(结晶岩系);Cib—中伊比利亚地块;Eib—东伊比利亚地块;Py—比利牛斯(Pyrenees)地块;Arm—Armorica 地 块;Rhine—莱茵地块;CF—法国中部地块;MG—德国中部地块(结晶岩系);Th—Thuringian 地块;Bm—波西米亚地块;AA—奥地利阿尔卑斯地 块;EH—External Hellanides 构造带;Pg—Pelagonian 地块;Rs—Rhodope-Strandja 地块;Is—Istanbul-Zonguldak 地块;Sk—Sakarya 地块;Sm—Strandja 地块;Md—Menderes 地块;EAZ—东 Anatolia 增生杂岩带;SSZ—Sanandaj-Sirjan Zone 增生杂岩带;ZFTB—Zagros 褶冲带;AKB—阿富汗 - 喀布尔地块;KTB—Katawaz 盆地;PMB—帕米尔地块;YLB—Yazd-Lut 地块;KHA—Kohistan 岩浆弧;LDA—拉达克岩浆弧;ACT—阿尔卑斯 - 喀尔巴阡山逆冲带;CUYF—Central Ust Yurt 断裂;EAF—东 Anatolia 断裂;NAF—北 Anatolia 断裂;Levant—里凡特断裂;KKF—喀喇昆仑断裂

Fig. 1 Tectonic framework of the central and western parts of the Tethys

域的综合研究项目并计划编制地质、构造系列图 件,为我国学者认识、掌握特提斯的构造格架和演 化规律提供了良好的研究平台。笔者在参加这项 研究的过程中,根据初步的文献收集与研究,将特 提斯中西段及邻区的构造单元划分为 lapetus-Tornquist 洋加里东造山带、Rheic 洋华力西期造山 带、乌拉尔 - 天山中亚造山带、古特提斯 Pontides -高加索 - Mashhad 造山带、新特提斯阿尔卑斯 - 巴 尔干 - 扎格罗斯造山带、冈瓦纳大陆非洲 - 阿拉伯 - 印度板块(图1)。本文着重对特提斯中西段的古 生代缝合带、增生杂岩带和主要地块等进行了初步 划分,并以我国青藏高原及邻区取得的重要地质认 识为基础,对古生代特提斯的构造演化进行讨论。 由于篇幅所限,笔者将另文发表对于新特提斯构造 格架的研究进展。

需要说明的是,欧洲的特提斯研究已经形成一 套有历史传说的地质术语,这些术语的中文翻译差 异很大,如 Tornquist 洋,有托恩奎斯特、托奎斯特、 特恩奎斯特等不同中文名称。Iapetus 洋有伊阿珀 托斯、伊阿佩托斯等名称。Rheic 洋有瑞亚克、瑞克 等名称。因此笔者对于有不同中文名称的地质术 语一般采用原文名称,以便于读者理解。

1 Iapetus-Tornquist 洋 – 加里东造山带

全球性的 Rodinia 超大陆在新元古代发生裂 解, 劳伦(Laurentia)、波罗地(Baltica)、西伯利亚 (Siberia) 等古陆块向北漂移,并形成 Iapetus、 Tornquist、乌拉尔(Uralian)、古亚洲(Asiatic)和原特 提斯(Proto-Tethys)等新元古代—奥陶纪洋盆(图 2)。劳伦古陆包括北美和格陵兰板块,在北欧的英 国、挪威、瑞典、芬兰和斯堪的纳维亚一带出露的基 底岩系主要为新太古代和古元古代长英质片麻岩, 并且出露大量碱性花岗岩。格陵兰东北部出露的 中元古代玄武岩代表裂谷环境。在斯堪的纳维亚 克拉通上,始欧洲哥德岩系卷入里菲期造山事件, 其时限为1100~900 Ma, 与全球 Rodinia 超大陆汇 聚期相吻合。其上的约特尼新元古代地层岩性为 磨拉石特征的变碎屑岩、冰碛岩以及广泛分布的基 性岩(Ager, 1980),显示出 Rodinia 超大陆裂解。上 部为被动陆缘沉积的寒武—奥陶纪碳酸盐地层,可 能与 Iapetus 洋的打开有关。早古生代地层的褶皱 变形、稍后的碰撞型花岗岩侵入和广泛发育的高压 变质作用均代表加里东期强烈的造山作用 (Kalsbeek et al., 2001; 李三忠等, 2016a)。

北欧的 Iapetus 结合带分布于东格陵兰、斯堪的 纳维亚、Svalbard 和英国中部。Iapetus 洋蛇绿混杂 岩带以新元古代——早奥陶世蛇绿岩、晚寒武世——早 奥陶世火山弧岩浆杂岩和残留洋壳沉积为代表。 造山带中榴辉岩分布广泛,变质年龄为505~391 Ma,代表从俯冲到碰撞的长期造山过程(Augland et al., 2012)。欧洲大陆东缘与 Baltica 地块之间为中 欧 Tornquist 加里东造山带,主要分布于德国北部、 波兰、丹麦以及法国一带。Tornquist 洋盆的时代为 490~460 Ma,根据榴辉岩变质年龄判断,闭合时代 为440~400 Ma(Torsvik and Rehnström, 2003; 李三 忠等,2016b)。阿尔卑斯带前中生代基底岩系中寒 武纪的 SSZ 型蛇绿岩残片、弧前增生杂岩带和欧洲 Amorica 地块群中的岛弧型岩浆岩为原特提斯向南 俯冲消减形成的弧盆系(图 2A)(Von Raumer, 2009; Bonev and Dilek, 2010; 袁四化等, 2020)。 随着 Iapetus 洋和 Tornquist 洋在 440~400 Ma 闭合, 形成北欧和中欧加里东造山系(带),使得劳伦古 陆、Avalonia 地块群与 Baltica 地块拼合,形成劳俄大 陆(Laurussia)(图2B)(王鸿祯, 1997; Kalvoda and Bábek, 2010; Fernández et al., 2016)。欧洲加里东 期造山作用的显著特征,一是持续时间长,大约从 500 Ma 到 370 Ma;二是形成俯冲和折返两期 UHP-HP变质作用,以榴辉岩和蓝片岩为代表;三是形成 强烈的逆冲推覆构造:四是大量的同碰撞花岗岩侵 入,时代为440~420 Ma。加里东造山之后,中志留 世一中泥盆世的老红色砾岩陆相磨拉石建造(Old Red Sandstone)角度不整合于早古生代地层之上。 石炭系及其之上的地层为稳定的海相沉积,中生代 后北大西洋打开,出现大量大洋盆性质的玄武质火 山岩。

在巴尔干东部, Tornquist 缝合带地表出露并不 明显,但地球物理调查证明该带为切穿地壳的深大 断裂带,称为 Tornquist-Teisseyre lineament (Hippolyte, 2002)。该断裂带分隔东侧的 Baltica 地 块厚地壳和西侧的 Avalonian 地块古生代台地薄地 壳,具有右行走滑性质(Mazur et al., 2018)。从黑 海北缘到 Scythian - 土兰构造带北缘, Tornquist -Teisseyre 均为大型右旋走滑断裂带,并作为 Baltica 地块的南界,其东段被称为 Central Ust Yurt 断裂带 (Natal'in and Şengör, 2005)(图1)。

从洋盆和闭合造山时代看,欧洲加里东造山系

与我国秦祁昆造山系的时空结构相似,它们分别代表新元古代晚期—奥陶纪 Iapetus-Tornquist 和原特

提斯大洋俯冲制约的多岛弧盆系,在440~400 Ma 闭合形成弧 - 弧、弧 - 陆碰撞造山系。



(B)~420 Ma

图 2 原特提斯、古特提斯洋陆重建与演化示意图

(据 Torsvik and Cocks, 2013; 吴福元等, 2020; 袁四化等, 2020 修编)

AVA—Avalonia 地块群; ATA—Armorica 地块群; Tm—塔里木; Kz—哈萨克斯坦; ①—华南; ②—印支; ③—秦岭; ④—柴达木; ⑤—昆仑; ⑥—土 兰(卡拉库姆); ⑦—昌都; ⑧—甜水海; ⑨—高加索; ⑩—Iberia 中东部地块; ⑪—北 Armorica(Franconia, Thuringia); ⑫—南 Armorica(Bohemia) 和 CF 法国中部地块等; ⑬—阿尔卑斯 Helvetic, Penninic 和奥地利阿尔卑斯地质单元; ⑭—北羌塘; ⑮—南羌塘; ⑯—拉萨; ⑰—Sibumasu Fig. 2 Schematic illustration showing the reconstruction and evolution of the Proto-Tethys and Paleo-Tethys oceans (modified from Torsvik and Cocks, 2013, Wu et al., 2020; Yuan et al., 2020)

2 Rheic 洋 - 华力西造山带

位于北欧 Iapetus -Tornquist 加里东造山系(带) 以南的欧洲中南部属于华力西期造山系(带),一般 将其划分为 Avalonia 地块群、Rheic 缝合带和 Armorica 地块群等构造单元(Okay et al., 2008; Kalvoda and Bábek, 2010)。地质、生物地理和古地 磁证据表明,欧洲华力西造山带不是由单一洋盆形 成的,早奥陶世—泥盆纪的洋盆包括 Rheic 洋、 Galicia-Moldanubian 洋、Saxo-Thuringian 洋、Rheno-Hercianian 洋等,局部保留志留纪—早泥盆世岩浆 弧(Fernúndez et al., 2016; Franke et al., 2017)。有 三个来自冈瓦纳大陆的地块群卷入了华力西碰撞 造山作用,分别为 Avalonia 地块、北 Armorica 地块 (Franconia 和 Thuringia)和南 Armorica 地块(中 Iberia、Armorica、Bohemia)。欧洲东南部的 Adria、 Apulia 统称为古亚德里地块,也受到华力西造山作 用影响(Abati et al., 2010; Franke et al., 2017; 袁四

化等,2020)。

2.1 Avalonia 地块群

Avalonia 地块群位于西班牙西部、英格兰西南 部、德国中北部、波兰西部和捷克 Moravo-Silesian 一 带(Okay et al., 2008),主要包括 Ossa Morena 地块 (结晶岩系)、莱茵地块和 Bruno-Vistulian 地块等(图 1)。欧洲东部的 Moesia、伊斯坦布尔和 Zonguldak 等地块可能也属于 Avalonia 地块群(Okay et al., 2008;Kalvoda and Bábek, 2010)。该地块群的基底 岩系为片岩、长英质片麻岩(混合岩)、岛弧型的变 质火山岩和 SSZ 型变质蛇绿岩透镜体,时代可能为 中、晚元古代,被时代为 590~570 Ma 的泛非期变花 岗岩侵入。盖层为不整合覆盖的晚志留世红层和 泥盆纪—石炭纪杂砂岩等。Avalonia 地块群是寒武 纪从冈瓦纳大陆北缘裂离出去的(图 2A),其显著 特征是具有泛非和加里东两期造山作用形成的构 造界面和同碰撞花岗岩侵入(Yiğitbaş et al., 2004; Franke et al., 2017)。哈萨克斯坦、塔里木和华北地 块可能也是大致同期从冈瓦纳大陆裂解出去的 (Torsvik and Rehnström, 2003; Torsvik, 2019)。

Moesia 地块除了具有泛非和加里东两期造山界 面之外,其晚古生代—早石炭世为海相砂砾岩和浊 积岩沉积,早石炭世出现含煤建造。晚石炭世—早 二叠世火山岩、砂砾岩不整合覆盖在下伏地层之 上。上述特征说明 Moesia 地块在晚石炭世之后属 于古特提斯北缘的岛弧带(Okay et al., 2008; Kalvoda and Bábek, 2010)。





图 3 古特提斯洋陆重建与演化示意图(据 Torsvik and Cocks, 2013; 吴福元等, 2020; 袁四化等, 2020 修编) 地块编号①~①等等同图 2, [®]—Anatolia; [®]—伊朗; [®]—阿富汗

Fig. 3 Schematic illustration showing the reconstruction and evolution of the Paleo-Tethys ocean (modified from Torsvik and Cocks, 2013; Wu et al., 2020; Yuan et al., 2020)

2.2 Rheic 及其分支洋盆

一般认为 Rheic 为横跨欧洲的大洋,时代为晚 寒武世—中泥盆世(490~380 Ma)(Kalvoda and Bábek, 2010)。最近的研究认为真正代表 Rheic 大 洋的缝合带保留较少,而出露较多的 Rheno-Hercynian Saxo-Thuringian Galicia-Moldanubian 缝合 带和志留纪—早泥盆世岩浆弧等构造单元均代表 生命短暂的小洋盆(图2B),它们代表 Rheic 洋向南 俯冲形成的岩浆弧和弧后洋盆(Franke et al., 2017)。袁四化等(2020)在中奥地利阿尔卑斯基底 的 Plankogel 杂岩中最新发现的南绍山(Saualpe) 蛇 绿岩,代表 Rheic 多岛洋最南侧的弧后洋盆,相当于 古特提斯。Rheic 及其弧后分支洋盆在晚泥盆世— 早石炭世逐渐闭合,形成欧洲著名的华力西造山系 (带)(图 3A),包括 HP-UHP 变质带、早石炭世维宪 期弧前盆地复理石沉积和晚石炭世的陆相砾岩沉 积等(Abati et al., 2010; Fernández et al., 2016)。

欧洲华力西缝合带向东延伸到东欧和喀尔巴 阡山一带已经难觅踪迹,但有学者认为 Rheic 洋向 东可能延伸到 Pontides 和高加索一带。证据主要有 两条:一是在 Pannon 盆地、Vardar 缝合带到巴尔干 一带,存在维宪期复理石沉积(Yanev, 2000; Antić et al., 2016),可能作为华力西洋盆东延的标志;二 是在伊斯坦布尔、Rhodope-Strandja 带和高加索等地 都存在 600~560 Ma 的泛非期造山作用,以及约 350 Ma 和 331~300 Ma 的同造山弧花岗岩侵入,可 能代表 Armorica 地块群拼贴到 Laurussia 大陆南侧 的标志(Okay et al., 2008; Kalvoda and Bábek, 2010)。笔者认为欧洲华力西造山作用广泛影响到 巴尔干、希腊 Hellenide 外带和土耳其北部 Pontides 带,但 Rheic 及其分支洋盆是否延伸到这里尚无定 论。因为这些地区尚未发现早古生代或泥盆纪蛇 绿岩,而石炭纪花岗岩侵入是欧洲华力西期造山的 产物。该区在卡多米期岛弧岩浆作用之后未发现 明确的华力西洋的蛇绿岩证据,在华力西造山之后 直到中三叠世均处于板内伸展环境(Antić et al., 2016)。土耳其北部的 Pontides 带和高加索带则是 古特提斯向北俯冲形成的石炭纪—三叠纪增生杂 岩带。

2.3 Armorica 地块群

分布于 Rheic 结合带以南的 Iberia 中东部、 Armorica、法国中部、Bohemia 等地块统称为 Armorica 地块群(图1),被认为是早志留世随着

Rheic 南侧分支小洋盆的形成,从冈瓦纳大陆北缘 裂离出去的小型地块群,也被称为冈瓦纳外围地块 群 (Peri-Gondwanan terranes) (Okay et al., 2008; Abati et al., 2010) $_{\circ}$ Stampfli and Borel(2002,2004) 称之为 Hun 超级地块群。Franke et al. (2017)将它 们细分为南、北 Armorica 地块和古-Adria 地块等。 这些地块的基底为新元古代花岗质片麻岩、副片麻 岩、云母片岩、角闪片岩、千枚岩、变杂砂岩、变火山 岩等,还有大量岩浆岩侵入体,代表泛非期造山形 成的结晶基底。在 Iberian 地块西北部的西班牙、葡 萄牙和奥地利一带,基底岩系中识别出时代为494 ~493 Ma 和 479~457 Ma 的钙碱性系列英云闪长 岩、花岗闪长岩、高钾花岗岩,以及时代为472~466 Ma的碱性系列的石英正长岩、花岗岩、过铝质钾长 花岗岩和碱性花岗岩等。它们分别代表寒武纪的 岩浆弧和寒武—奥陶纪时期的裂谷事件(Abati et al., 2010; Antić et al., 2016), 推测与原特提斯洋向 南的俯冲消减有关。基底岩系中榴辉岩相的变质 年龄为372~350 Ma,代表欧洲华力西造山事件。

分布于阿尔卑斯造山带的 Helvetic、Penninic 和 奥地利阿尔卑斯地质单元的前中生代变质基底也 属于 Armorica 地块群(图 2B)(Palmeri et al., 2004; von Raumer et al., 2009)。据最新研究,最北侧的 Helvetic 地块是原特提斯向南俯冲消减形成的寒武 纪陆缘增生杂岩带,包含约497 Ma的蛇绿岩,被晚 奥陶世和华力西花岗岩侵入(Guillot et al., 2002; Von Raumer and Stampfli, 2008)。寒武纪至早石炭 世地层以碎屑沉积为主,夹碳酸盐岩和基性火山 岩。Penninic 地块具有泛非期结晶基底,在寒武 纪一早奥陶世主体相当于弧后盆地,包含539~486 Ma 的弧后盆地蛇绿岩残片和约 547 Ma 的洋内弧残 片。奥陶纪变质期的榴辉岩代表原特提斯洋的深 俯冲作用。南阿尔卑斯和萨丁岛具有与 Penninic 和 奥地利阿尔卑斯相似的泛非期结晶基底,属于亚德 里亚板块,其显著特征是经历了寒武纪弧后裂解 (507~494 Ma),奥陶纪岛弧岩浆作用和角闪岩相 (约480 Ma)、榴辉岩相(457 Ma、453 Ma、443 Ma)变 质事件和花岗岩侵入(约457 Ma),说明它们也卷入 了早古生代增生楔(Palmeri et al., 2004; Torsvik and Cocks, 2013; Franke et al., 2017; Maino et al, 2019)。Helvetic 和 Penninic 基底岩系在泥盆纪—早 石炭世均卷入强烈的华力西造山作用,作为华力西 造山带的内带。它们后期发育石炭—二叠纪岛弧

型花岗闪长岩、英云闪长岩和中酸性火山岩,推测 是古特提斯向南俯冲的结果(Liu et al., 2019; 袁四 化等, 2020)。

奥地利阿尔卑斯地块代表新元古代—寒武纪 的岩浆弧和弧后盆地组合。奥陶纪变质深熔作用 花岗岩侵入,代表原特提斯俯冲造山作用。晚志留 世至中泥盆世地层包含台地相碳酸岩、远洋灰岩和 含板内玄武岩的碎屑岩,晚泥盆世碳酸盐台地沉积 过渡到远洋沉积。早石炭世主要为复理石沉积,到 晚石炭世转化为陆相磨拉石堆积。在中奥地利阿 尔卑斯地块南侧 Plankogel 杂岩中最新发现南绍山 蛇绿岩,获得 418~414 Ma 和 266~249 Ma 年龄值 (Liu et al., 2019; 袁四化等, 2020),推测它们分别 代表 Rheic 洋(相当于原古特提斯)最南部弧后 – 分 支洋盆,即古特提斯洋盆开启和闭合阶段的洋壳 残余。

整体看来,Armorica 和亚德里亚地块为冈瓦纳 北缘的泛非期地块群,卷入了寒武—奥陶纪的原特 提斯活动陆缘系统。在志留纪—泥盆纪,Armorica 为 Rheic 及其分支洋盆中的分散地块群(图 2B)。 Armorica 和亚德里亚地块都卷入了古特提斯活动陆 缘弧盆系统,并转化为华力西造山系(带)(图 3A)。

3 乌拉尔 – 天山中亚造山带

乌拉尔 - 天山造山系(带)包括西伯利亚克拉 通、哈萨克 - 准格尔地块群、乌拉尔 - Turkestan - 南 天山缝合带、斋桑 - 额尔齐斯古亚洲洋缝合带和阿 尔泰弧盆系等构造单元(图1),该区也称为哈萨克 - 天山 - 准噶尔 - 北山造山系或中亚造山带 (Altides)(Görür, 1991; Zuza and Yin, 2017; Şengör et al., 2018)。

乌拉尔洋(Uralian)是寒武纪—奥陶纪期间位 于劳伦克拉通与西伯利亚克拉通之间的洋盆,在晚 奥陶世洋盆开始俯冲消减并萎缩,晚泥盆世—早石 炭世发生 Magnitogorsk 岛弧和劳俄地块 (Laurussian)之间的早期碰撞,之后进入残留洋盆阶 段(Brown et al., 2006; Ivanov et al., 2013)。在泥 盆纪末期到石炭纪早期,乌拉尔残留洋盆缩小成为 一个海道,在晚石炭世—二叠纪增生到 Baltica 克拉 通西缘(刘凤山, 1999)。乌拉尔缝合带向南可能延 伸到突厥斯坦缝合带(Turkestan suture),它们的洋 盆演化和闭合造山时代与古亚洲洋的南天山缝合 带、额尔齐斯-西拉木伦缝合带类似。

哈萨克斯坦 - 准格尔地块群北侧的斋桑 - 额 尔齐斯-西拉木伦缝合带以洪古勒楞、阿尔曼泰、 布尔根、温都尔庙、索伦山、西拉木伦等蛇绿岩为代 表,根据同位素测年和放射虫化石的年龄,指示洋 盆的时代主要为寒武—奥陶纪(张克信等, 2015)。 该带东段延续至泥盆—石炭纪,直至二叠纪才俯冲 消亡(潘桂棠等, 2015)。哈萨克斯坦-准格尔地块 南侧的南天山缝合带向西延伸到吉尔吉斯斯坦境 内。我国库米什蛇绿岩中锆石核部年龄为640~ 452 Ma、变质边时代为 392~390 Ma(周鼎武等, 2004),南天山蛇绿岩其他地段获得 440 Ma、418.2 Ma、406.6 Ma 等同位素年龄值(马中平等, 2007; 黄岗等, 2011; 王斌等, 2016)。位于吉尔吉斯斯坦 南天山缝合带附近的 Dianydjer 蛇绿混杂岩由蛇纹 石化橄榄岩、辉长岩、玄武岩、硅质岩等组成。通过 对辉长岩中锆石 U-Pb 年代学研究获得 422.0 Ma 和 397.3 Ma年龄值,认为分隔吉尔吉斯斯坦和塔里木 地块的洋盆在新元古代晚期已经存在,直至晚石炭 世才俯冲消亡(潘桂棠等, 2015)。

斋桑 - 额尔齐斯 - 西拉木缝合带和南天山缝 合带为古亚洲洋的两个分支洋盆,它们在泥盆纪— 中二叠世逐渐俯冲消亡,形成阿尔泰 - 兴蒙造山系 和天山 - 准噶尔 - 北山造山系(图 3A)(Alvarez-Marron et al., 2000; Charvet et al., 2011; 潘桂棠等, 2015)。

中亚乌拉尔和古亚洲洋的闭合造山均发生弧-弧和弧-陆碰撞,但没有发生陆-陆碰撞,这种 大陆地壳的巨量增长模式称为突厥式造山(Turkietype)或增生型造山,大陆地壳的增长占全球总量的 1/3(Şengör et al., 2018)。中亚增生型造山带都有 宽阔的俯冲-增生杂岩带(≥400 km 宽),其中包括 巨厚的强变形复理石细碎屑岩、洋壳、洋岛、海山残 片和以榴辉岩发育为特征的 UHP-HP 变质带(李继 亮, 2004;李三忠等, 2016a)。华力西和中亚造山 带形成之后,欧洲和亚洲已基本连为一体形成劳亚 大陆的主体,而古特提斯东段的扬子克拉通、印支、 南羌塘和拉萨等地块仍处于分散状态(图 3 A)。

4 古特提斯 Pontides - 高加索 - Mashhad 造山带

我国学者一般将晚古生代的洋盆称为古特提 斯,主要位于秦祁昆造山带以南的北羌塘 – 三江造 山带,但在龙木错 – 双湖和昌宁 – 孟连结合带中可 能存在原、古特提斯连续演化的大洋(李才等, 2006;潘桂棠等,2015,2020;吴福元等,2020),与欧 洲的 Rheic 及其分支洋盆有一定的相似性。

4.1 南阿尔卑斯 – Hellenide 带古特提斯活动陆缘

据本文前述分析,在欧洲大陆和阿尔卑斯山 脉,华力西造山带的 Rheic 洋和 Armorica 地块群构 成了志留纪—早石炭世的多岛洋格局(Franke et al.,2017; 袁四化等, 2020)。Rheic 多岛洋至少在 泥盆纪—早石炭世与南侧的古特提斯实际上是连 通的大洋,相当于我国的古特提斯(图 2B、图 3A)。 分布于阿尔卑斯南部和巴尔干一带的石炭—二叠 纪古特提斯洋盆,为 Rheic 多岛洋闭合之后南侧继 续发育的弧后洋盆,但以往对该期洋盆的分布范围 并不清楚,直到在奥地利阿尔卑斯南部的 Plankogel 增生杂岩带中南绍山古生代蛇绿岩的确认,表明石 炭—二叠纪的古特提斯洋最西端可能到达奥地利 阿尔卑斯和意大利北部 Ligurian 一带(Maino et al., 2019; 袁四化等, 2020)。从伊比利亚半岛、南阿尔 卑斯和希腊的 Hellenide 外带,存在石炭—二叠纪的 岛弧型岩浆岩(Reischmann et al., 2001; Pereira et al., 2015; Zulauf et al., 2015), 为石炭—二叠纪古 特提斯南缘的活动大陆边缘。

在希腊克里特岛的石炭—二叠系分为两个构造层,分别为晚石炭世弧前盆地沉积和早二叠世— 中三叠世岛弧火山岩系(Zulauf et al., 2015)。弧前 盆地为变质碎屑岩和石英岩等,其中碎屑锆石的测 年结果为321~300 Ma。Tyros 单元岛弧火山作用 包括两期,时代分别为310~285 Ma和约249 Ma, 岩浆活动在晚二叠世停止,但在早三叠世恢复。这 套晚石炭—中三叠世弧盆系统为古特提斯北部的 活动大陆边缘,在中三叠世晚期(拉丁期)发生闭合 和逆冲推覆造山。

4.2 土耳其北部 Pontides 古特提斯构造带

在土耳其北部 Izmir-Ankara 缝合带以北至黑海 南缘称为 Pontides 构造带,包括伊斯坦布尔地块、 Sakarya 带和 Rhodope-Strandja 带等地质单元。在 Sakarya 和 Rhodope 带中包括石炭—二叠纪蛇绿岩 和增生杂岩带(Koglin et al., 2009; Moix et al., 2008; Bonev and Dilek, 2010; Topuz et al., 2018)。

伊斯坦布尔地块是 Avalonia 地块群的一部分, 新元古代晚期基底岩系包括片岩、混合岩(片麻 岩)、SSZ型变质蛇绿岩及其洋内弧岩块和弧后盆地 变质火山岩组合。它们被时代为 590~570 Ma 的变 花岗岩侵入。变质基底之上为奥陶纪—石炭纪沉 积盖层,包括变砂岩、重结晶石灰岩、变质粉砂岩、 页岩等。伊斯坦布尔地块发育泛非造山界面,也经 历了晚石炭世的造山挤压变形(Yiğitbas et al., 2004; Okay et al.,2008; Kalvoda and Bábek, 2010)。 4.2.1 Karakaya 增生杂岩带

Şengör et al. (1991)最早报道了在土耳其北部的 Pontides 构造带中存在古生代蛇绿岩。近年来的研究发现该带原定的 Karakaya 地层单元为一套增生杂岩带,并包括石炭—二叠纪蛇绿岩岩片。

在伊斯坦布尔地块以南, Karakaya 增生杂岩带 为 Sakarya 构造地层单元的一部分。增生杂岩带下 段主要为千枚岩、大理岩等,包含蛇纹岩岩块、变质 辉长岩和灰岩块体(时代为泥盆纪和二叠纪),局部 出露榴辉岩构造透镜体。以蛇纹岩和强变形辉长 岩等为代表的蛇绿混杂岩带长约40km,宽0.3~ 1.8 km。三件变辉长岩的锆石 U-Pb 测年结果为约 262 Ma,多硅白云母⁴⁰ Ar/³⁹ Ar 测年结果为 201 Ma。 岩石地化特征表明该带为 SSZ 型蛇绿岩。Karakaya 增生杂岩带上段为强烈变形的三叠纪砂岩、基性火 山岩和外来岩块组成。外来岩块为石炭纪、三叠纪 灰岩和中泥盆世—早三叠世放射虫硅质岩。这些 特征表明 Karakaya 是中二叠—早三叠世增生杂岩 带,但古特提斯洋盆可能在中泥盆世已存在(Moix et al., 2008; Koglin et al., 2009; Bonev and Dilek, 2010; Topuz et al., 2018)。该带在三叠纪末期造山 隆起(图3B)。

Sakarya 俯冲增生杂岩单元向西延伸,在爱琴海 东侧的 Lesvos 岛包括 4 个亚单元 (Koglin et al., 2009):(1)片岩-大理岩岩组,包括弱变质强变形 的页岩、千枚岩、变质砂石、砾岩,夹大理岩和白云 岩等,根据化石确定这套地层的时代为石炭纪—三 叠纪;(2)蛇绿混杂岩带,包括强变形的变枕状玄武 岩、变辉长岩、片岩、结晶灰岩和变砂岩等,变质强 度为绿片岩相,构造混杂强烈,根据沉积物中的牙 形刺确定该混杂带的时代为二叠纪至中三叠世,辉 长岩的锆石 SHRIMP 测年结果为 253 Ma, 而锆石变 质边的年龄为236 Ma;(3)超镁铁岩逆冲岩片,逆冲 到上述单元之上,岩性为蛇纹石化的二辉橄榄岩、 少量方辉橄榄岩、纯橄榄岩,底部逆冲带中出露角 闪片岩类,仰冲及构造变质时代为158~153 Ma; (4)广泛分布的新生代盖层,为中新世到上新世高 钾安山岩和少量碎屑岩、泥灰岩。Sakarya 单元在区

域上还有大量的代表基梅里造山晚期的晚三叠世 A - 型花岗岩(Schmid et al., 2008, 2020; Koglin et al., 2009)。

4.2.2 Rhodope 增生杂岩带

位于 Moesia 地块以南,伊斯坦布尔地块以西的 Rhodope-Strandja 单元相当于 Sakarya 单元的西部延 伸(图1)。Rhodope 单元前中生代基底岩系主要为 片麻岩、各类片岩、大理岩、角闪岩等,并包含大量 的 MORB 成分特征的镁铁 - 超镁铁岩透镜体。有 些地段含拉斑玄武系列和钙碱性系列的变辉长岩 和变闪长岩岩块,显示岛弧特征。据 SHRIMP 和 Rb-Sr 法测年结果,角闪岩(变辉长岩)的原岩年龄 为石炭—二叠纪(310~253 Ma),代表古特提斯的 岛弧和弧后盆地的残余。Rhodope 地块中西段还发 现三叠纪裂谷型的辉长岩和玄武岩类,在侏罗纪— 中新世有花岗岩侵入,为新特提斯 Vardar 洋盆演化 的结果。本区在阿尔卑斯期普遍达到角闪岩相变 质,局部达到榴辉岩相变质强度(Bonev and Dilek, 2010; Furnes et al., 2020)。

综合分析认为, Rhodopes 和 Pontides 带在石炭 纪—早中三叠世为古特提斯向北俯冲形成的多岛 弧 – 弧后盆地系统,晚期转化为基梅里造山带(系) (图 3A,B)(Schmid et al., 2020)。Rhodopes 带在晚 三叠世之后发生裂谷事件,随后形成侏罗纪的新特 提斯洋 Vardar 等洋盆。巴尔干—爱琴海地区在晚 侏罗世—始新世以强烈的挤压应力为主,先后发生 蛇绿岩岩片仰冲、大规模逆冲推覆和走滑作用。始 新世之后发生地壳伸展,形成拉分盆地沉积,同时 伴随始新世—渐新世的大量火山喷发(Bonev and Dilek, 2010)。

4.3 Scythian - 高加索 - 土兰弧盆系

位于欧洲 - 俄罗斯 - 中亚华力西造山系与特 提斯构造域之间的 Scythian - 土兰和塔里木地块群 被称为"中间构造单元(Intermediate units)"(Zuza and Yin, 2017; Şengör et al., 2018),相当于 Stampfli and Borel(2002, 2004)提出的 Hunic 超级 地块群的东段,他们认为 Hun 超级地块群在志留纪 末(约420 Ma)从冈瓦纳大陆北缘裂解出去并开始 形成古特提斯洋。由于中、新生界的强烈覆盖,该 带在古生代的构造属性并不清楚。

4.3.1 Scythian - 土兰弧盆系

分布于里海东、西两侧的 Scythian 和土兰是两个中新生代沉积盆地(图1),盆地的基底为古生代

至三叠纪地层,地表出露较少。Scythian-Turan 弧盆 系向西延伸到黑海北侧尖灭,向东延伸到伊朗北部 的 Kopet-Dagh 带和北帕米尔 - Mashhad 岛弧带 (Moghadam and Stern, 2014)。它们的北界为 Scytho-Turanian 断裂,南界为大高加索构造带。由 于里海周围是历史上著名的油气资源产区,积累了 大量的钻井和地球物理勘探资料。根据这些资料 和少量露头,判断 Scythian 和土兰盆地的基底是一 系列 NW 向展布的透镜状构造断片,可划分为岩浆 弧、弧前增生杂岩带、陆块残片等构造单元(Natal' in and Şengör, 2005)。

Scythian 盆地基底包括 Stavropol、Eysk-Berezansk、Kuma 和 Dagestan 等地质单元。Stavropol 单元主要由早石炭世千枚岩、页岩、硅质页岩、砂 岩、石灰岩、泥灰岩、辉绿岩、安山岩和英安岩组成。 这些岩石被晚石炭世和二叠纪花岗岩侵入(同位素 年龄为320~230 Ma),二叠系出现陆相红层沉积。 Kuma 和 Dagestan 单元为三叠纪岛弧带,钻孔岩心 以大量的钙碱性基性--酸性火山岩为特征,还包括 三叠纪弧前盆地页岩和碳酸盐沉积。岩心还有晚 古生代花岗岩类(Tikhomirov et al., 2004)。Eysk-Berezansk 单元为弧前增生杂岩带,除了少量二叠纪 碎屑岩外,主要由强烈变形的海相三叠系和下侏罗 统岩石组成,包括暗色粉砂岩、页岩、细砂岩(通常 为浊积岩)、石灰岩(含生物礁)、细碧岩和石英角斑 岩等(Nikishin et al., 2002)。Scythian 盆地基底的 石炭纪—三叠纪岩浆岩均具有岛弧特征 (Natal' in and Şengör, 2005), 略早于 Eysk-Berezansk 弧前增 生杂岩带的沉积时代。

土兰盆地侏罗纪—新生代地层广泛覆盖在晚 古生代褶皱基底上,其中南里海的侏罗纪—古新世 为弧后盆地洋壳沉积(Moghadam and Stern, 2014) (图1)。根据钻探和少量的露头地质调查,土兰地 块古生代基底划分出 Bukhara、Chardjou、Karakum、 Tuarkyr 和 Karabogaz 等地质单元(构造岩片),每个 单元均包括岛弧和弧前增生杂岩带两类地质体。 岛弧岩石主要为晚古生代—三叠纪的花岗岩、镁铁 质和长英质火山岩。岛弧带包括晚石炭—中二叠 世大型花岗岩体(316~274 Ma)和上覆二叠—三叠 纪玄武岩、英安岩、流纹岩、安山岩、凝灰岩、粉砂岩 等。花岗岩侵入的围岩可能为志留纪—早泥盆世 的绿片岩类。弧前增生杂岩带位于岛弧带以南,主 要为强变形弱变质的砂板岩、灰岩和少量细碧岩、 安山岩等,其中火山岩测得 270 ± 15 Ma 的年龄 (Natal'in and Şengör, 2005)。

4.3.2 高加索弧盆系

该带包括北部的大高加索(Great Caucasus)和 南部的小高加索(Lesser Caucasus)。地质学家对该 带研究程度低,且争议较大。根据对小高加索的研 究,认为该带是一个古生代微地块,有明确的泛非 期基底,包括新元古代的变蛇绿岩、岛弧岩浆岩和 页岩等。寒武系—下奥陶统盖层为石英岩、页岩、 火山碎屑岩和碳酸盐,其上不整合覆盖了下石炭统 火山碎屑岩、碳酸盐和板岩等,上石炭统含煤碎屑 岩,早中二叠世磨拉石建造(Okay et al., 2008; Kalvoda and Bábek, 2010)。Manafi et al. (2013)认 为高加索中部存在向北俯冲到 Baltic 克拉通之下的 原特提斯弧盆系和向南俯冲到伊朗地块之下的古 特提斯弧盆系。Rolland (2017)认为整个高加索是 一个 450~350 Ma 期间从冈瓦纳北缘裂解出去的地 块,属于 Armorica 地块群,并且随着 Rheic 洋在石炭 纪闭合,形成华力西造山带。

据 Natal'in and \$engör(2005)介绍,大高加索 是由中、下侏罗统页岩和砂岩组成的褶皱带。褶皱 轴部出露的少量晚古生代岩石是多期花岗岩和代 表岩浆弧的安山岩到长英质熔岩,陆相和海相的碎 屑岩、碳酸盐等。山脉南侧的 Dizi 混杂岩带为强变 形弱变质的晚古生代—三叠纪复理石建造。中侏 罗世为辉长岩和细晶花岗岩侵入(175~165 Ma), 上侏罗统碳酸盐不整合覆盖在下伏岩石之上。Dizi 杂岩带的西段可能接 Tavric 混杂带,为强变形的浊 积岩组成,其中发现灰岩外来岩块,含有特提斯型 石炭纪和二叠纪化石。

综合以上信息,笔者认为高加索弧盆系存在原特提斯的地质信息,可能代表 Tornquist 洋的东段。 大高加索的晚古生代—三叠纪火山 – 沉积岩系与 Scythian – 土兰带类似,也反映古特提斯岛弧和弧前 增生杂岩带特征。

4.4 伊朗北部 Rasht- Mashhad 古特提斯缝合带

伊朗北部的古生代蛇绿岩主要出露于 Rasht、 Mashhad 和 Aghdarband 一带(图 1)。Rasht-Mashhad 蛇绿岩带北侧为 Scythian – 高加索 – 土兰 一带的石炭纪—三叠纪弧盆系,南侧是 Alborz 地块 和中伊朗地块。该带向西可能对应于土耳其北部 与 Karakaya 增生杂岩带相关的古特提斯缝合带 (Şengör et al. 1991; Karimpour and Farmer, 2010; Saccani et al., 2013; Moghadam and Stern, 2014)。 该带向东在帕米尔地块北部延伸情况不明。

4.4.1 Aghdarband 蛇绿混杂岩带

Aghdarband 蛇绿混杂岩带位于伊朗北部的 Kopet-Dagh 构造带。该带出露基质为泥盆—石炭纪 火山碎屑岩、页岩和碳酸盐岩块,蛇绿岩带出露范 围达5×2 km,包括蛇纹石化橄榄岩(二辉橄榄岩、 纯橄岩)、辉长岩(局部层状构造)、枕状玄武岩和放 射虫页岩等等,表现为不同岩石构成的蛇绿混杂岩 带。玄武岩具有 OIB 和 IAB 成分特征。蛇绿岩带 上覆岩系的灰岩中含早二叠世微体化石,碎屑岩含 晚二叠世化石,它们不整合覆盖在蛇绿岩之上。 Aghdarband 蛇绿岩获得锆石 U-Pb 年龄 383~380 Ma,蛇绿岩以南的 Misho 辉长岩中获得了锆石 U-Pb 年龄为 356.7 ± 3.4 Ma(Saccani et al., 2013; Furnes et al., 2020),获得40 Ar/39 Ar 测年结果为 288~282 Ma(Moghadam and Stern, 2014)。深海沉积岩中微 体化石的时代为早、中二叠世。可见 U-Pb 同位素 年龄比40Ar/39Ar 测年结果和地层中化石时代要老 100 Ma 左右。Aghdarband 蛇绿混杂岩带可能代表 最早为晚泥盆世的古特提斯洋盆,在二叠纪向北俯 冲形成岛弧和弧后盆地。

4.4.2 Mashhad 和 Rasht 蛇绿混杂岩带

Mashhad 蛇绿岩位于 Aghdarband 蛇绿岩以西约 80 km,包括地幔橄榄岩、辉长岩(局部呈层状)、枕 状玄武岩、重结晶的深海灰岩和硅质岩等。局部硅 质岩与深海灰岩、玄武岩等互层。蛇绿岩与深海浊 积岩和火山碎屑岩共生。蛇绿岩的围岩为深海复 理石变质沉积岩系,包括板岩、千枚岩、片岩、大理 岩夹火山岩,时代可能为二叠—三叠纪。Mashhad 蛇绿岩仰冲岩片被时代为217~199.8 Ma 的晚三叠 世同碰撞—后碰撞花岗岩侵入。再上不整合覆盖 中侏罗世砾岩、砂岩和页岩等,并且底砾岩中含有 这套花岗岩的砾石,说明在晚三叠世之前 Mashhad 蛇绿岩已经发生仰冲和构造叠置(Karimpour and Farmer, 2010; Moghadam and Stern, 2014)。

Rasht 蛇绿混杂岩带位于里海西南缘,包括 Gasht 杂岩和 Shanderman 杂岩,为一套强变形的板 岩、千枚岩、片岩、片麻岩、角闪岩类等。蛇绿岩混 杂带以蛇纹石化橄榄岩、镁铁质榴辉岩、石榴石蓝 晶石片岩、变玄武岩等构造岩块为代表。该带白云 母的⁴⁰ Ar/³⁹ Ar 测年结果为约 330 Ma,代表 UHP 变 质年龄,因此推测 Rasht 蛇绿岩与 DarrehanjirMashhad 蛇绿岩带相当,时代为 380 ~ 375 Ma (Moghadam and Stern, 2014)。

4.4.3 Takab 和 Jandagh-Anarak 蛇绿混杂岩带

Takab 蛇绿混杂岩带位于伊朗地块西部,也可 能属于东 Anatolia 或 Sanandaj-Sirjan 增生杂岩带(图 1)。岩石组合为麻粒岩、片岩、角闪岩、花岗片麻岩 等,包含蛇纹石化橄榄岩(尖晶石二辉橄榄岩和纯 橄岩)透镜体。本带缺乏研究,这套岩石是否代表 肢解的蛇绿岩尚不清楚,蛇绿岩的时代不详 (Moghadam and Stern, 2014),也有人解释为原特提 斯的残余(Hajialioghli et al., 2007; Saki, 2010)。

Jandagh-Anarak 蛇绿混杂岩带位于伊朗中部 Lut 地块西部边界断裂带中。该带出露中伊朗地块 泛非期基底变质岩系,上覆晚泥盆世—早石炭世海 相沉积岩系。蛇绿混杂岩带包括肢解的橄榄岩、辉 长岩、玄武岩、碳酸盐岩和岛弧型中酸性火山岩等 岩块。基质为强烈变质、变形的碎屑岩。斜长(奥 长)花岗岩的锆石 U-Pb 年龄为 262.3 Ma(晚二叠 世)。这些特征说明 Jandagh-Anarak 带可能在晚泥 盆世为古特提斯洋盆,在二叠纪演化为岛弧环境 (Buchs et al., 2013)。后期侵入的花岗岩和英云闪 长岩的锆石 U-Pb 年龄为 215 Ma(晚三叠世),与 Mashahd 和 Torbat 蛇绿混杂岩带相似(Bagheri and Stampfli, 2008)。

Takab 和 Jandagh-Anarak 蛇绿岩并不位于 Rasht-Mashhad 缝合带之中,目前对它们的时代和构 造环境研究程度不够。它们是古特提斯的不同分 支洋盆,还是 Rasht-Mashhad 带蛇绿岩后期构造错 位的结果,甚至可能有原特提斯的残余,尚需研究 (Poshtkoohi et al., 2018)。

伊朗北部的古生代蛇绿岩具有 SSZ 型、MORB 型和 OIB 型岩石地化特征,代表洋盆和弧后盆地的 时代为泥盆纪—晚二叠世,持续了至少 120 Ma。与 蛇绿岩共生的增生杂岩带主体为二叠纪浊积岩,局 部与 UHP-和 HP-变质岩共生。古特提斯在晚三叠 世(约 225 Ma)闭合造山(图 3B),伴随同碰撞、后碰 撞花岗岩侵入,上部被中侏罗世 Kashafrud 组砾岩、 砂岩和页岩不整合覆盖。侏罗纪之后为新特提斯 演化阶段。

4.4.4 特提斯带内主要地块

位于特提斯构造带内的地块大致包括两类,一 类是来自北部华力西造山带的 Anatolide 地块和 Pannon 地块,另一类是来自南部冈瓦纳板块的基梅 里地块,如中伊朗地块、Alborz地块、Taurus-Menderes地块和阿富汗 – 喀布尔地块等(Moghadam and Stern, 2015)。

Pannon 盆地具有泛非期变质基底,早古生代— 早石炭世为海相碎屑岩、碳酸盐和复理石沉积,晚 石炭世形成华力西造山带。中生代主要为新特提 斯洋形成的弧盆系统,中生代的前陆盆地沉积岩系 形成 Pannon 盆地的油气资源储集层(Pamić, 1993)。

Anatolia 地块包括中部结晶杂岩系和南侧的 Lycian、Beyschir-Hoyran 逆冲推覆体等构造单元。 Anatolia 地块在志留纪一石炭纪主要为被动边缘相 的深海碎屑岩(Whitney and Dilek, 1997, 1998)。 Anatolia 地块南侧的 Lycian 逆冲岩片发现早石炭世 构造混杂带残余,包含 MORB 岩块、复理石沉积、深 海灰岩和放射虫硅质岩,以及晚石炭世海山残片等 等。晚二叠世和三叠纪有岛弧火山岩喷发,其中三 叠纪岛弧火山岩是 Anatolia 地块的一个重要地质特 征。由此可见 Anatolia 地块在华力西造山之后卷入 古特提斯岛弧、弧前盆地和陆缘弧系统中,并在晚 三叠世闭合(Moix et al., 2008)。

Taurus-Menderes 是典型的基梅里地块,核部为 新元古代—寒武纪片麻岩、片岩、变质花岗岩和混 合岩、变辉长岩等,代表约 550 Ma 的泛非基底 (Baran et al., 2017)。盖层为奥陶纪—泥盆纪片 岩、变质砂砾岩,石炭—二叠纪变石英砂岩、碳酸 盐,上三叠统砾岩、砂岩砂岩等(Hetzel and Reischmann, 1996; Gessner et al., 2001)。它们不 含华力西构造界面,但广泛存在古特提斯闭合形成 的基梅里构造界面和新特提斯裂解、打开的地质信 息,上覆侏罗—白垩系为台地相灰岩。在伊朗地块 也有类似信息。Menderes 是新生代的变质核杂岩, 在 4~2 Ma 的隆升剥蚀速率达 3.25~1.75 km/Myr (Baran et al., 2017)。

中伊朗和 Yazd-Lut 地块的前寒武纪基底杂岩 包括花岗质片麻岩、角闪(片)岩类、变辉长岩、变闪 长岩、云母片岩和镁铁、超镁铁岩岩块。超镁铁岩 为变橄榄岩、滑石蛇纹岩、蛇纹岩等。花岗质片麻 岩具有陆缘弧岩浆岩特征,它们代表元古代的裂谷 或岩浆弧环境。中伊朗地块基底岩系克拉通化和 泛非期造山作用发生于新元古代(Poshtkoohi, 2012;Moghadam and Stern, 2015; Poshtkoohi et al., 2018)。Alborz 地块属于古特提斯南侧的早古生代 被动边缘盆地沉积系统。白垩纪—中新世均为海 相碳酸盐岩、碎屑岩和火山岩沉积,不整合覆盖在 侏罗纪 Shemshak 组之上(Guest et al., 2006)。中伊 朗和 Alborz 等地块经受了古特提斯闭合的基梅里 造山作用,中生代为相对稳定的浅海盆地。

5 原特提斯、古特提斯构造演化

大部分学者认为大约在 10 亿年前全球形成 Rodinia 超大陆,并在约8亿年前后开始裂解 (Torsvik, 2003)。Laurentia、Baltica、西伯利亚和北 极克拉通从超大陆裂解出去。裂谷作用在这些地 块的边缘持续到约 600 Ma, Iapetus 打开和 Rodinia 超大陆最终解体(Robert et al., 2020)。在约550 Ma,南极、南非、印度、阿拉伯和西澳大利亚等板块 重新汇聚,形成冈瓦纳大陆。本次汇聚在欧洲南部 和北非称为卡多米(Cadomian)造山,在东非、马达 加斯加和印度称为泛非造山 (Torsvik and Rehnström, 2003)。在整个早古生代,全球洋陆格 局均为北散、南聚的状态(潘桂棠等, 1997),而位于 南、北大陆之间的大洋经历了原特提斯、Rheic 和古 特提斯的演化,在320~310 Ma 冈瓦纳大陆西部与 北美克拉通碰撞,形成 Pangea 超大陆(图 2、图 3A、 图 4A-C)。

5.1 原特提斯演化

Rodinia 超大陆在新元古代裂解形成的原特提 斯大洋,在寒武纪开始向南俯冲、消减,在冈瓦纳大 陆北缘形成岛弧、弧后盆地和弧前增生杂岩带,并 导致 Avalonia 和 Armorica 地块群裂解出去。在 Armorica 地块群中形成494~460 Ma 的岛弧型岩浆 作用(Abati et al., 2010; Antić et al., 2016),550~ 490 Ma 的 SSZ 型蛇绿岩和增生杂岩带(图4A)。也 有人认为该期活动陆缘导致了 Bimphedian 造山和 冈瓦纳大陆的最终形成(Cawood et al., 2007)。

原特提斯洋的扩张和 Rheic 的打开可能与西澳 大利亚的中寒武世 Kalkarindji 大火成岩省(约 510 Ma)活动有关(Glass and Phillips, 2006)。寒武—奥 陶纪之交发生显著的裂谷事件,奥陶纪期间狭长的 Avalonia 地块群脱离冈瓦纳大陆,加速向北西方向 漂移,使 Rheic 和原特提斯洋进一步扩张(Torsvik and Cocks, 2013)。

早古生代是板块构造的运动活跃时期, Avalonia 地块群与 Baltica 大陆之间的 Tornquist 洋大约在 450~440 Ma闭合, Iapetus 洋盆于约 420 Ma 完全闭 合。随着欧洲北部和东部加里东造山作用的完成, 北方大陆的主体 Laurussia(劳俄大陆)已经形成(图 4B)。英国加里东造山带和格陵兰地块中早古生代 变质岩系被中志留世—中泥盆世老红色砂岩陆相 磨拉石不整合覆盖,逆冲推覆体、榴辉岩相变质和 柯石英的形成时代为505~380 Ma(Brueckner et al. , 1998; Johnston et al., 2010; Bingen et al., 2011), 说明加里东期造山作用持续时间较长。

我国的原特提斯构造域主要分布于秦祁昆造 山系中,也有学者称中央造山带(潘桂棠等,2002), 包括阿尔金、北祁连、柴北缘、中昆仑等结合带和弧 盆系统中,造山时代为530~480 Ma。造山系南缘 为阿尼玛卿-勉略结合带,向西接古生代南昆仑俯 冲增生杂岩带,再向西为西昆仑带的库地-祁曼于 特和康西瓦-苏巴什两条蛇绿混杂岩带,在帕米尔 和 Kopet - Dagh 带以北走向不明。秦祁昆弧盆系在 早古生代末消亡,形成广泛分布的泥盆纪前陆盆地 磨拉石不整合覆盖在下伏构造地层之上和以榴辉 岩、蓝片岩等为代表的 HP-UHP 变质带, 榴辉岩相变 质作用的形成时代在阿尔金(约500 Ma)、北祁连 (520~460 Ma)、柴北缘(440~423 Ma)和东昆仑 (430~410 Ma)等结合带中有一定差异(许志琴等, 2006; 宋述光等, 2013; Song et al., 2018)。综合判 断秦祁昆原特提斯弧盆系最终关闭的时代为440~ 420 Ma(张克信等, 2015; Li et al., 2018; 吴福元 等, 2020), 与欧洲加里东造山带相似(图 2B、图 4B)_°

李三忠等(2016a,b)认为,全球早古生代造山 作用以板块或地块之间的碰撞作用为特征,并且在 500~400 Ma 普遍发生榴辉岩相变质作用,可能表 明在早古生代期间的1亿年内发生了全球性板块聚 合运动。

5.2 Rheic 与古特提斯演化

冈瓦纳超大陆北缘大约在晚寒武世开始裂解, 早奧陶世 Avalonia 地块脱离出去, Rheic 洋在中奧陶 世扩张成为宽阔大洋, 并在志留—泥盆纪演化为华 力西多岛洋系统(Stampfli and Borel, 2002; Franke et al., 2017; Torsvik, 2019)(图 2B、图 4B)。在奥陶 纪末,由于 Avalonia 地块与 Baltica 和劳伦大陆的汇 聚,冈瓦纳克拉通的非洲西北部发生裂谷, 并先后 打开 Saxo-Thuringian、Rheno-Hercynian 和 Galicia-Moldanubian 小洋盆,导致 Franconia-Thuringia, Iberian-Armorica-Bohemia 等微地块群先后从非洲西 北部分离出去。Rheic 洋在志留—泥盆纪由分支小 洋盆和 Armorica 裂离地块群组成(图4B)。晚志留 世开始,Rheic 的分支洋盆 Rheno-Hercynian 向西北 部的劳俄大陆和南侧的 Franconia 地块发生双向俯 冲和洋脊俯冲,形成岩浆弧活动和弧后盆地,最终 在早石炭世闭合。Saxo-Thuringian 和 Galicia-Moldanubian 分支洋盆在晚泥盆世(约380 Ma)闭 合,造成 Famennian 浊积岩系逆冲到 Thuringian 地块 之上和中压变质作用。Galicia-Moldanubian、Saxo-Thuringian 和 Rheno-Hercynian 分支洋盆从南向北先 后关闭,冈瓦纳来源的地块群通过复杂的华力西运 动重新聚合在一起(Franke et al., 2017; 袁四化等, 2020)(图4C)。

传统观点认为古特提斯洋的打开起源于 Rheic 洋向南俯冲形成的弧后盆地扩张。泥盆纪期间位 于 Armorica 地块群和冈瓦纳大陆之间的弧后盆地 逐渐打开为宽阔的古特提斯洋(Stampfli and Borel, 2002,2004)。但是按照新的构造古地理模式和华 力西造山带古生代多岛洋格局(Franke et al.,2017; Torsvik,2019),现今的欧洲大陆到南阿尔卑斯带在 志留纪—泥盆纪实际上是一个由 Rheic 洋衍生出的 分支洋盆、地块群和边缘弧盆系统。在泥盆纪时 期,古特提斯是该多岛弧盆系统的一个分支洋盆 (Zulauf et al.,2015; Franke et al.,2017)(图4B)。



图 4 特提斯演化示意图(据文献 Abati et al., 2010; Moghadam and Stern, 2014; Zulauf et al., 2015; Franke et al., 2017 汇编) Ava—Avalonia 地块群; Arm—Armorica 地块群; N. Am—北 Armorica (Franconia, Vesser Rift, Thuringia); S. Am—南 Armorica (Bohemia); (A) 在寒 武一奧陶纪, 原特提斯向南俯冲、消减, 在冈瓦纳大陆北缘形成岛弧、弧后盆地和弧前增生杂岩带; (B) 志留纪晚期, 劳伦地块与 Baltica、 Avalonia 聚合形成劳俄大陆,志留纪—泥盆纪, Rheic 洋南部演化成为华力西多岛洋系统, 传统意义上的泥盆纪古特提斯仅为多岛洋中的分支 洋盆; (C) 在 320~310 Ma, 劳俄大陆、Armorica 地块群与冈瓦纳大陆西缘汇聚形成 Pangea 超大陆, 形成华力西造山带; (D) 基梅里地块群大约 在二叠纪从冈瓦纳北缘裂离出去, 并形成新特提斯洋; (E) 晚三叠世在劳亚大陆南缘形成基梅里增生造山带

Fig. 4 Diagrammatic sketches showing the evolution of the Tethys(modified from Abati et al., 2010; Moghadam and Stern, 2014; Zulauf et al., 2015; Franke et al., 2017)

大约在石炭纪晚期(320~310 Ma), 劳俄 (Laurussia)大陆与冈瓦纳大陆汇聚形成 Pangea 超 大陆, Rheic 各分支洋盆最终关闭(图4C)。之后的 晚石炭世—早三叠世古特提斯洋是华力西造山之 后一个向东开口的残余洋盆(图3A,B)。在中奥地 利阿尔卑斯地块最新发现的南绍山早泥盆世蛇绿 岩(418~414 Ma),可能代表古特提斯最早、最西端 的洋壳记录,再往西则未见古特提斯蛇绿岩的报导 (袁四化等,2020)。

华力西造山导致的地壳缩短量超过 1000 km, 主要由 Rheno-Hercynian 缝合带汇聚吸收(Hatcher, 2002)。在造山过程中 Armorica 地块群与古亚德里 亚地块汇聚,并发生与西北非洲冈瓦纳之间大规模 的右旋走滑,使各地体发生位移、旋转(Doublier et al., 2012)。该机制有助于解释 Moesia 和伊斯坦布 尔地块的南移(Franke et al., 2017)。

笔者认为 Rheic 洋实质上具有 Iapetus-Tornquist 洋连续演化的地质记录,为古生代的特提斯主大洋 的西段,而特提斯大洋的东段为班公湖 – 双湖 – 昌 宁 – 孟连洋(图 2B、图 4B)。该洋盆的西段在晚石 炭世闭合,而中东段在晚三叠世闭合(图 3A,B)。 金沙江 – 哀牢山带和甘孜 – 理塘带为该主洋盆闭 合期间俯冲消减形成的弧后盆地或弧后扩张带(潘 桂棠等,2002,2004,2012)。

5.3 丝绸之路岩浆弧与增生造山带

南阿尔卑斯 Plankogel 带、土耳其北部 Pontides 带和伊朗北部 Rasht-Mashhad 为古特提斯缝合带, 代表泥盆纪—二叠纪的洋盆。该洋盆在晚石炭 世---早三叠世向北西方向斜向俯冲,形成以 Scythian-土兰和高加索为代表的一系列增生杂岩 带、岩浆弧和弧后盆地等。有学者认为该带向东经 Kopet-Dagh 带和北 Pamir 带,可能延伸到西昆仑弧 盆系,构成一条长约8300 km 的丝绸之路岩浆弧 (Silk Road Arc) (Natal' in and Şengör, 2005; Moghadam and Stern, 2014), 而我国学者认为西昆 仑弧盆系属于秦祁昆原特提斯构造域。实际上秦 祁昆原特提斯构造域相当于特提斯中西段的 Iapetus-Tornquist 加里东构造域。Scythian - 高加索 - 土兰弧盆系应对应于我国羌塘中部石炭纪的望 果山组岛弧火山岩和石炭—二叠纪弧前增生楔盆 地(图 3A、图 4C,D)。它们同为古特提斯石炭—二 叠纪弧盆系统,在晚三叠世分别形成基梅里和印支 期造山带(耿全如等, 2011; 江庆源等, 2014; Liang et al., 2017)(图4E)。

这两条造山带的另一个共同特征是拥有宽阔的增生杂岩带和高压变质带。在土耳其、伊朗北部,基梅里期的增生杂岩带包括洋壳、岩浆弧残片和巨厚的弧前盆地复理石沉积,宽度超过300 km。 在羌塘中部,印支期的增生杂岩带、蛇绿混杂岩带和以榴辉岩、蓝片岩为主的高压变质带宽度超过200 km。它们都是增生型造山带的典型代表(李继亮,2004;毛晓长等,2015;Şengör et al., 2018)。

最新的研究表明古特提斯向北俯冲的驱动力 来自洋脊俯冲,并导致南侧的被动大陆边缘裂解 (万博等, 2019; Zhong and Li, 2019, 2020)。据此 模式,伊朗地块中部的 Jandagh-Anarak 和 Takab 蛇 绿岩带也可能是北部俯冲阶段南侧拉张的结果。 由于古特提斯向北西方向的斜向俯冲,在增生造山 过程中使基梅里造山带前缘著名的 Scytho-Turanian 断裂带发生强烈的右旋走滑(图1)。据估算位移距 离达 300~350 km。在俯冲杂岩带和岩浆弧不断增 生和走滑断裂的双重作用下,造成基梅里造山带古 特提斯弧盆系地质体平行位移和最终斜列式拼合 (Natal'in and Şengör, 2005; Moghadam and Stern, 2014)。

6 结论

(1)Rodinia 超大陆在新元古代裂解形成的原特 提斯大洋,在寒武纪开始向南俯冲消减,在冈瓦纳 大陆北缘形成活动大陆边缘。欧洲原特提斯闭合 (约420 Ma)形成的加里东造山作用以出现陆相磨 拉石建造、逆冲推覆体和高压变质带为代表,持续 时间为505~380 Ma,主要保存于 Iapetus 和 Tornquist 缝合带及相关构造单元中。我国的原特提 斯构造域主要分布于秦祁昆造山系中,洋盆以及弧 盆系统的闭合造山时代为530~480 Ma,具有与欧 洲加里东造山带类似的地质特征。

(2)欧洲 Rheic 洋在奥陶纪扩张成为宽阔大洋, 在志留—泥盆纪演化为由 Saxo-Thuringian、Rheno-Hercynian 和 Galicia-Moldanubian 等分支小洋盆以及 Armorica 游离地块群构成的多岛洋格局。泥盆纪形 成的古特提斯实际上为 Rheic 洋向南俯冲形成的弧 后盆地。Rheic 洋类似于特提斯东段的班公湖 – 双 湖 – 昌宁 – 孟连洋,为古生代的特提斯主大洋。金 沙江 – 哀牢山带和甘孜 – 理塘带为主洋盆闭合期 间俯冲消减形成的弧后洋盆。Rheic 洋各分支洋盆 在 320~310 Ma 闭合,形成华力西造山带和 Pangea 超大陆。

(3)南阿尔卑斯 Plankogel带、土耳其北部 Pontides带和伊朗北部 Rasht-Mashhad带为古特提 斯缝合带,代表泥盆纪—二叠纪的洋盆。该洋盆在 晚石炭世—早三叠世向北西方向斜向俯冲,形成以 Scythian - 土兰和高加索为代表的一系列增生杂岩 带、岩浆弧和弧后盆地等。其中的晚石炭世—早三 叠世丝绸之路岩浆弧与我国羌塘中部的望果山火 山弧相对应。

(4)特提斯中西段的基梅里造山带和羌塘中部的印支期造山带为古特提斯增生型造山的典型代表。它们均包括巨厚、强变形的弧前复理石沉积建造,洋壳和岩浆弧残片,并伴随以榴辉岩、蓝片岩为主的高压变质带。

2021 年是我国著名大地构造学家潘桂棠研究 员 80 岁华诞,也是他从事地质事业整整 60 周年。 笔者作为潘老师的学生,祝老师生日快乐、幸福安 康! 在本文的写作过程中始终得到潘老师的亲自 指导和学术思想的指引。笔者认识到潘老师提出 的主大洋模式、多岛弧盆系和增生造山理论对于探 讨特提斯洋陆格局演化的重要性,并且以此为依 据,通过大量的文献阅读和研究,最终完成了本篇 论文。

参考文献(References):

- Abati J, Gerdes A, Suárez J F, et al., 2010. Magmatism and early-Variscan continental subduction in the northern Gondwana margin recorded in zircons from the basal units of Galicia, NW Spain[J]. GSA Bulletin, 122(1-2): 219-235.
- Ager D V, 1980. The Geology of Europe[M]. London: McGraw-Hill.
- Alvarez-Marron J, Brown D, Perez-Estaun A, et al., 2000. Accretionary complex structure and kinematics during Paleozoic arc-continent collision in the southern Urals [J]. Tectonophysics, 325(1-2): 175-191.
- Antić M, Peytcheva I, Von Quadt A, et al., 2016. Pre-Alpine evolution of a segment of the North-Gondwanan margin: geochronological and geochemical evidence from the central Serbo-Macedonian Massif [J]. Gondwana Research, 36: 523 – 544.
- Augland L E, Andresen A, Corfu F, 2012. Late ordovician to silurian ensialic magmatism in liverpool land, east Greenland: new evidence extending the northeastern branch of the continental laurentian magmatic arc[J]. Geological Magazine, 149(4): 561 – 577.

Bagheri S, Stampfli G M, 2008. The Anarak, Jandaq and Posht-e-

Badam metamorphic complexes in central Iran: new geological data, relationships and tectonic implications [J]. Tectonophysics, 451(1-4): 123-155.

- Baran Z O, Dilek Y, Stockli D, 2017. Diachronous uplift and cooling history of the Menderes core complex, western Anatolia (Turkey), based on new Zircon (U-Th)/He ages[J]. Tectonophysics, 694: 181-196.
- Bingen B, Belousova E A, Griffin W L, 2011. Neoproterozoic Recycling of the Sveconorwegian Orogenic Belt: detrital-zircon data from the Sparagmite Basins in the Scandinavian Caledonides [J]. Precambrian Research, 189(3-4): 347-367.
- Bonev N, Dilek Y, 2010. Geochemistry and tectonic significance of proto-ophiolitic metamafic units from the Serbo-Macedonian and western Rhodope massifs (Bulgaria-Greece) [J]. International Geology Review, 52(2-3): 298-335.
- Brown D, Spadea P, Puchkov V, et al., 2006. Arc-continent collision in the Southern Urals [J]. Earth-Science Reviews, 79 (3 - 4): 261 -287.
- Brueckner H K, Gilotti J A, Nutman A P, 1998. Caledonian eclogitefacies metamorphism of Early Proterozoic protoliths from the North-East Greenland Eclogite Province [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 130(2): 103 – 120.
- Buchs D M, Bagheri S, Martin L, et al., 2013. Paleozoic to Triassic ocean opening and closure preserved in Central Iran: constraints from the geochemistry of meta-igneous rocks of the Anarak area[J]. Lithos, 172 - 173: 267 - 287.
- Cawood P A, Johnson M R W, Nemchin A A, 2007. Early Palaeozoic orogenesis along the Indian margin of Gondwana: tectonic response to Gondwana assembly [J]. Earth and Planetary Science Letters, 255(1-2): 70-84.
- Charvet J, Shu L S, Laurent-Charvet S, et al., 2011. Palaeozoic tectonic evolution of the Tianshan belt, NW China[J]. Science China Earth Sciences, 54(2): 166 – 184.
- Doublier M P, Potel S, Franke W, et al., 2012. Very low-grade metamorphism of Rheno-Hercynian allochthons (Variscides, Germany): facts and tectonic consequences [J]. International Journal of Earth Sciences, 101(5): 1229 – 1252.
- Fernández R D, Arenas R, Pereira M F, et al., 2016. Tectonic evolution of Variscan Iberia: Gondwana-Laurussia collision revisited [J]. Earth-Science Reviews, 162: 269 – 292.
- Franke W, Cocks L R M, Torsvik T H, 2017. The Palaeozoic Variscan oceans revisited[J]. Gondwana Research, 48: 257-284.
- Furnes H, Dilek Y, Zhao G C, et al., 2020. Geochemical characterization of ophiolites in the Alpine-Himalayan Orogenic Belt: magmatically and tectonically diverse evolution of the Mesozoic Neotethyan oceanic crust [J]. Earth-Science Reviews, 208: 103258.
- Gessner K, Piazolo S, Güngör T, et al., 2001. Tectonic significance of deformation patterns in granitoid rocks of the Menderes nappes, Anatolide belt, southwest Turkey[J]. International Journal of Earth Sciences, 89(4): 766 – 780.

- Glass L M, Phillips D, 2006. The Kalkarindji continental flood basalt province: a new Cambrian large igneous province in Australia with possible links to faunal extinctions [J]. Geology, 34(6): 461 -464.
- Görür N, 1991. Aptian-Albian palaeogeography of Neo-Tethyan domain [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 87 (1 – 4): 267 – 288.
- Guest B, Axen G J, Lam P S, et al., 2006. Late Cenozoic shortening in the west-central Alborz Mountains, northern Iran, by combined conjugate strike-slip and thin-skinned deformation [J]. Geosphere, 2(1): 35-52.
- Guillot F, Schaltegger U, Bertrand J M, et al., 2002. Zircon U-Pb geochronology of Ordovician magmatism in the polycyclic Ruitor Massif (Internal W Alps) [J]. International Journal of Earth Sciences, 91(6): 964 – 978.
- Hajialioghli R, Moazzen M, Droop G T R, et al., 2007. Serpentine polymorphs and P-T evolution of metaperidotites and serpentinites in the Takab area, NW Iran [J]. Mineralogical Magazine, 71(2): 203-222.
- Hatcher Jr R D, 2002. Alleghanian (Appalachian) orogeny, a product of zipper tectonics: rotational transpressive continent-continent collision and closing of ancient oceans along irregular margins[M]// Martinez Catalan J R, Hatcher Jr R D, Arenas R, et al. Variscan-Appalachian Dynamics: the Building of the Late Paleozoic Basement. Special Paper of the Geological Society of America. 199 208.
- Hetzel R, Reischmann T, 1996. Intrusion age of Pan-African augen gneisses in the southern Menderes massif and the age of cooling after Alpine ductile extensional deformation [J]. Geological Magazine, 133(5): 565 - 572.
- Hippolyte J C, 2002. Geodynamics of Dobrogea (Romania): new constraints on the evolution of the Tornquist-Teisseyre Line, the Black Sea and the Carpathians [J]. Tectonophysics, 357(1-4): 33-53.
- Hsü K J, Pan G T, Sengör A M C, et al., 1995. Tectonic evolution of the Tibetan Plateau: a working hypothesis based on the Archipelago model of orogenesis[J]. International Geology Review, 37(6): 473 – 508.
- Ivanov K S, Puchkov V N, Fyodorov Y N, et al., 2013. Tectonics of the Urals and adjacent part of the West-Siberian platform basement: Main features of geology and development [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 72: 12 – 24.
- Johnston S M, Hartz E H, Brueckner H K, et al., 2010. U-Pb zircon geochronology and tectonostratigraphy of southern liverpool land, east greenland: implications for deformation in the overriding plates of continental collisions [J]. Earth and Planetary Science Letters, 297(3-4): 512-524.
- Kalsbeek F, Jepsen H F, Nutman A P, 2001. From source migmatites to plutons: tracking the origin of ca. 435 Ma S-Type granites in the east greenland caledonian orogen[J]. Lithos, 57(1): 1 – 21.
- Kalvoda J, Bábek O, 2010. The margins of laurussia in central and

southeast Europe and southwest Asia[J]. Gondwana Research, 17
(2-3): 526-545.

- Karimpour M H, Farmer G L, Stern C R, 2010. Geochronology, radiogenic isotope geochemistry, and petrogenesis of Sangbast Paleo-Tethys monzogranite, Mashhad, Iran[J]. Journal of Crystallography and Mineralogy, 17(4): 707 – 719.
- Koglin N, Kostopoulos D, Reischmann T, 2009. The Lesvos maficultramafic complex, Greece: ophiolite or incipient rift? [J]. Lithos, 108(1-4): 243-261.
- Li S Z, Zhao S J, Liu X, et al., 2018. Closure of the Proto-Tethys Ocean and Early Paleozoic amalgamation of microcontinental blocks in East Asia[J]. Earth-Science Reviews, 186: 37-75.
- Liang X, Wang G H, Yang B, et al., 2017. Stepwise exhumation of the Triassic Lanling high-pressure metamorphic belt in Central Qiangtang, Tibet: Insights from a coupled study of metamorphism, deformation, and geochronology [J]. Tectonics, 36 (4): 652 -670.
- Liu Y J, Neubauer F, Yuan S H, et al., 2019. The Plankogel complex within the Austroalpine nappe complex of Eastern Alps: A Paleotethyan suture? [C]//Emile Argand Conference on Alpine Geological Studies 2019. Sion.
- Maino M, Gaggero L, Langone A, et al., 2019. Cambro-Silurian magmatisms at the northern Gondwana margin (Penninic basement of the Ligurian Alps) [J]. Geoscience Frontiers, 10(1): 315 -330.
- Manafi M, Arian M, Raeesi S H T, et al., 2013. Tethys subduction history in Caucasus Region [J]. Open Journal of Geology, 3(3): 222-232.
- Mazur S, Krzywiec P, Malinowski M, et al., 2018. On the nature of the Teisseyre-Tornquist Zone [J]. Geology, Geophysics & Environment, 44(1); 17 - 30.
- Moghadam H S, Stern R J, 2014. Ophiolites of Iran: keys to understanding the tectonic evolution of SW Asia: (1) Paleozoic ophiolites[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 91: 19 – 38.
- Moghadam H S, Stern R J, 2015. Ophiolites of Iran: keys to understanding the tectonic evolution of SW Asia: (II) Mesozoic ophiolites[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 100: 31-59.
- Moix P, Beccaletto L, Kozur H W, et al., 2008. A new classification of the Turkish terranes and sutures and its implication for the paleotectonic history of the region [J]. Tectonophysics, 451 (1 – 4): 7 – 39.
- Natal' in B A, Şengör A M C, 2005. Late Palaeozoic to Triassic evolution of the Turan and Scythian platforms: The pre-history of the Palaeo-Tethyan closure [J]. Tectonophysics, 404 (3 - 4): 175 - 202.
- Nikishin A M, Ziegler P A, Abbott D, et al., 2002. Permo-Triassic intraplate magmatism and rifting in Eurasia: implications for mantle plumes and mantle dynamics [J]. Tectonophysics, 351(1-2): 3 -39.
- Okay A I, Bozkurt E, Satır M, et al., 2008. Defining the southern margin of Avalonia in the Pontides: Geochronological data from the

Late Proterozoic and Ordovician granitoids from NW Turkey [J]. Tectonophysics, 461(1-4): 252 - 264.

- Palmeri R, Fanning M, Franceschelli M, et al., 2004. SHRIMP dating of zircons in eclogite from the Variscan basement in north-eastern Sardinia (Italy) [J]. Neues Jahrbuch Für Mineralogie-Monatshefte (6): 275 – 288.
- Pamić J, 1993. Eoalpine to Neoalpine magmatic and metamorphic processes in the northwestern Vardar Zone, the easternmost Periadriatic Zone and the southwestern Pannonian Basin [J]. Tectonophysics, 226(1-4): 503-518.
- Pan G T, Wang L Q, Li R S, et al., 2012. Tectonic evolution of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 53: 3 -14.
- Pereira M F, Castro A, Fernández C, 2015. The inception of a Paleotethyan magmatic arc in Iberia [J]. Geoscience Frontiers, 6 (2): 297-306.
- Poshtkoohi M, 2012. Evaluation of tectonic setting of the Proto-tethyan remnants in Central Iran: a geochemical study[J]. Acta Geoscietica Sinica, 33(S1): 55 – 57.
- Poshtkoohi M, Ahmad T, Choudhary A K, 2018. Geochemistry and petrogenesis of Biabanak-Bafq mafic magmatism: Implication for the evolution of central Iranian terrane [J]. Journal of Earth System Science, 127(5): 72, doi: 10.1007/s12040-018-0969-5.
- Reischmann T, Kostopoulos D K, Loos S, et al., 2001. Late palaeozoic magmatism in the basement rocks Southwest of Mt. Olympos, Central Pelagonian zone, Greece: Remnants of a permocarboniferous magmatic arc[J]. Bulletin of the Geological Society of Greece, 34(3): 985 – 993.
- Robert B, Domeier M, Jakob J, 2020. Iapetan oceans: an analog of tethys? [J]. Geology, 48(9): 929 - 933.
- Robertson A, 2004. Development of concepts concerning the genesis and emplacement of Tethyan ophiolites in the Eastern Mediterranean and Oman regions [J]. Earth-Science Reviews, 66(3-4): 331-387.
- Rolland Y, 2017. Caucasus collisional history: review of data from East Anatolia to West Iran[J]. Gondwana Research, 49: 130-146.
- Saccani E, Azimzadeh Z, Dilek Y, Jahangiri A, 2013. Geochronology and petrology of the Early Carboniferous Misho Mafic Complex (NW Iran), and implications for the melt evolution of Paleo-Tethyan rifting in Western Cimmeria [J]. Lithos, 162 – 163: 264 – 278.
- Saki A, 2010. Proto-Tethyan remnants in northwest Iran: geochemistry of the gneisses and metapelitic rocks [J]. Gondwana Research, 17 (4): 704-714.
- Schmid S M, Bernoulli D, Fügenschuh B, et al., 2008. The Alpine-Carpathian-Dinaridic orogenic system: correlation and evolution of tectonic units [J]. Swiss Journal of Geosciences, 101 (1): 139 - 183.
- Schmid S M, Fügenschuh B, Kounov A, et al., 2020. Tectonic units of the Alpine collision zone between Eastern Alps and western Turkey [J]. Gondwana Research, 78: 308 – 374.
- Şengör A M C, 1979. Mid-mesozoic closure of Permo-Triassic Tethys and its implications[J]. Nature, 279(5714): 590-593.

- Şengör A M C, 1989. The Tethyside orogenic system: an introduction
 [M]//Şengör A M C. Tectonic Evolution of the Tethyan Region.
 Dordrecht: Springer. 1 22.
- Şengör A M C, Cin A, Rowley D B, et al., 1991. Magmatic evolution of the Tethysides: a guide to reconstruction of collage history [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 87 (1 - 4): 411 - 440.
- Şengör A M C, Natal' in B A, Sunal G, et al., 2018. The tectonics of the altaids: crustal growth during the construction of the continental lithosphere of central Asia between ~750 and ~130 Ma Ago[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 46: 439 – 494.
- Song S G, Bi H Z, Qi S S, et al., 2018. HP-UHP metamorphic belt in the East Kunlun Orogen: Final closure of the Proto-Tethys Ocean and formation of the Pan-North-China continent [J]. Journal of Petrology, 59(11): 2043 - 2060.
- Stampfli G M, Borel G D, 2002. A plate tectonic model for the Paleozoic and Mesozoic constrained by dynamic plate boundaries and restored synthetic oceanic isochrons [J]. Earth and Planetary Science Letters, 196(1-2): 17-33.
- Stampfli G M, Borel G D, 2004. The TRANSMED transects in space and time: constraints on the Paleotectonic evolution of the Mediterranean domain [M]//Cavazza W, Roure F, Spakman W, et al. The Transmed Atlas: the Mediterranean Region from Crust to Mantle. Heidelberg: Springer. 53 - 90.
- Stöcklin J, 1968. Structural history and tectonics of Iran: a review [J]. AAPG Bulletin, 52(7): 1229 - 1258.
- Tikhomirov P L, Chalot-Prat F, Nazarevich B P, 2004. Triassic volcanism in the Eastern Fore-Caucasus: evolution and geodynamic interpretation [J]. Tectonophysics, 381(1-4): 119-142.
- Topuz G, Okay A I, Schwarz W H, et al., 2018. A middle Permian ophiolite fragment in Late Triassic greenschist-to blueschist-facies rocks in NW Turkey: an earlier pulse of suprasubduction-zone ophiolite formation in the Tethyan belt[J]. Lithos, 300 – 301: 121 – 135.
- Torsvik T H, 2019. Earth history: a journey in time and space from base to top[J]. Tectonophysics, 760: 297-313.
- Torsvik T H, Cocks L R M, 2013. Gondwana from top to base in space and time [J]. Gondwana Research, 24(3-4): 999-1030.
- Torsvik T H, Rehnström E F, 2003. The Tornquist sea and Baltica-Avalonia docking[J]. Tectonophysics, 362(1-4): 67-82.
- Von Raumer J F, Bussy F, Stampfli G M, 2009. The Variscan evolution in the External massifs of the Alps and place in their Variscan framework[J]. Comptes Rendus Geoscience, 341 (2 - 3): 239 -252.
- Von Raumer J F, Stampfli G M, 2008. The birth of the Rheic ocean: Early Palaeozoic subsidence patterns and subsequent tectonic plate scenarios[J]. Tectonophysics, 461(1-4): 9-20.
- Whitney D L, Dilek Y, 1997. Core complex development in Central Anatolia, Turkey[J]. Geology, 25(11): 1023 - 1026.
- Whitney D L, Dilek Y, 1998. Metamorphism during Alpine crustal thickening and extension in central Anatolia, Turkey: the Niğde

metamorphic core complex [J]. Journal of Petrology, 39(7): 1385 – 1403.

- Yanev S, 2000. Palaeozoic terranes of the Balkan Peninsula in the framework of Pangea assembly [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 161(1-2): 151-177.
- Yiğitbaş E, Kerrich R, Yılmaz Y, et al., 2004. Characteristics and geochemistry of Precambrian ophiolites and related volcanics from the Istanbul-Zonguldak Unit, Northwestern Anatolia, Turkey: following the missing chain of the Precambrian South European suture zone to the east [J]. Precambrian Research, 132(1-2): 179-206.
- Zhong X Y, Li Z H, 2019. Forced subduction initiation at passive continental margins: velocity-driven versus stress-driven [J]. Geophysical Research Letters, 46 (20): 11054-11064, doi: 10. 1029/2019GL084022.
- Zhong X Y, Li Z H, 2020. Subduction initiation during collision-induced subduction transference: numerical modeling and implications for the Tethyan evolution [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 125(2): e2019JB019288, doi: 10.1029/2019JB019288.
- Zulauf G, Dörr W, Fisher-Spurlock S C, et al., 2015. Closure of the paleotethys in the external hellenides: constraints from U-Pb ages of magmatic and detrital zircons (Crete) [J]. Gondwana Research, 28 (2): 642-667.
- Zuza A V, Yin A, 2017. Balkatach hypothesis: a new model for the evolution of the Pacific, Tethyan, and Paleo-Asian oceanic domains [J]. Geosphere, 13(5): 1664 - 1712.
- 耿全如,潘桂棠,王立全,等,2011. 班公湖-怒江带、羌塘地块特 提斯演化与成矿地质背景[J]. 地质通报,30(8):1261-1274.
- 黄岗,张占武,董志辉,等,2011.南天山铜花山蛇绿混杂岩中斜长 花岗岩锆石 LA-ICP-MS 微区 U-Pb 定年及其地质意义[J].中国 地质,38(1):94-102.
- 黄汲清,陈炳蔚,1987.中国及邻区特提斯海的演化[M].北京:地 质出版社.1-90.
- 江庆源,李才,解超明,等,2014. 藏北羌塘冈玛错地区望果山组火 山岩地球化学特征及 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄[J]. 地质通 报,33(11):1702-1714.
- 李才, 董永胜, 翟庆国, 等, 2008. 青藏高原羌塘早古生代蛇绿 岩——堆晶辉长岩的锆石 SHRIMP 定年及其意义[J]. 岩石学 报, 24(1): 31-36.
- 李才,黄小鹏,翟庆国,等,2006. 龙木错一双湖一吉塘板块缝合带 与青藏高原冈瓦纳北界[J]. 地学前缘,13(4):136-147.
- 李才,谢尧武,董永胜,等,2009. 北澜沧江带的性质 是冈瓦纳板 块与扬子板块的界线吗? [J]. 地质通报,28(12):1711 1719.
- 李继亮, 2004. 增生型造山带的基本特征[J]. 地质通报, 23(9-10): 947-951.
- 李三忠,杨朝,赵淑娟,等,2016a. 全球早古生代造山带(Ⅱ):俯 冲一增生型造山[J]. 吉林大学学报(地球科学版),46(4): 968-1004.
- 李三忠,杨朝,赵淑娟,等,2016b. 全球早古生代造山带(I):碰 撞型造山[J]. 吉林大学学报(地球科学版),46(4):945

-967.

- 刘凤山, 1999. 欧洲大陆岩石圈动力学研究现状与进展[J]. 地质科 技情报, 18(4): 1-6.
- 马中平,夏林圻,徐学义,等,2007. 南天山库勒湖蛇绿岩锆石年龄 及其地质意义[J].西北大学学报(自然科学版),37(1):107 -110.
- 毛晓长, 王根厚, 梁晓, 等, 2015. 增生杂岩带 1:5 万地质填图的实 践与探索: 以西藏羌塘中部角木日地区为例[J]. 地学前缘, 22 (3): 382-393.
- 潘桂棠,陈智梁,李兴振,等,1997.东特提斯地质构造形成演化[M].北京:地质出版社.1-197.
- 潘桂棠,李兴振,王立全,等,2002. 青藏高原及邻区大地构造单元 初步划分[J]. 地质通报,21(11):701-707.
- 潘桂棠,王立全,耿全如,等,2020. 班公湖-双湖-怒江-昌宁-孟连对接带时空结构——特提斯大洋地质及演化问题[J]. 沉 积与特提斯地质,40(3):1-19.
- 潘桂棠,王立全,李荣社,2012. 多岛弧盆系构造模式:认识大陆地 质的关键[J]. 沉积与特提斯地质,32(3):1-20.
- 潘桂棠,王立全,尹福光,等,2004. 从多岛弧盆系研究实践看板块 构造登陆的魅力[J]. 地质通报,23(9-10):933-939.
- 潘桂棠,肖庆辉,陆松年,等,2008.大地构造相的定义、划分、特征 及其鉴别标志[J].地质通报,27(10):1613-1637.
- 潘桂棠,肖庆辉,陆松年,等,2009.中国大地构造单元划分[J]. 中国地质,36(1):1-28.
- 潘桂棠,肖庆辉,尹福光,等,2015.中国大地构造图(1:250万)说明书[M].北京:地质出版社.
- 彭智敏, 耿全如, 潘桂棠, 等, 2014. 青藏高原羌塘中部变玄武岩锆 石 SHRIMP 年代学及 Nd-Pb 同位素特征[J]. 中国科学: 地球 科学, 44(5): 872-883.
- 宋述光,张贵宾,张聪,等,2013.大洋俯冲和大陆碰撞的动力学过程:北祁连-柴北缘高压-超高压变质带的岩石学制约[J].
 科学通报,58(23):2240-2245.
- 万博, 吴福元, 陈凌, 等, 2019. 重力驱动的特提斯单向裂解 聚合动力学[J]. 中国科学(地球科学), 49(12): 2004 2017.
- 王保弟,王立全,潘桂棠,等,2013. 昌宁-孟连结合带南汀河早古 生代辉长岩锆石年代学及地质意义[J].科学通报,58(4): 344-354.
- 王斌,陈博,计文化,等,2016. 吉尔吉斯南天山 Djanydjer 蛇绿混 杂岩地质特征及辉长岩年代学研究[J]. 地学前缘,23(3): 198-209.
- 王鸿祯, 1997. 地球的节律与大陆动力学的思考[J]. 地学前缘, 4 (3-4): 1-12.
- 王立全, 潘桂棠, 李才, 等, 2008a. 藏北羌塘中部果干加年山早古 生代堆晶辉长岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄 – 兼论原 – 古特提 斯洋的演化[J]. 地质通报, 27(12): 2045 – 2056.
- 王立全,潘桂棠,朱弟成,等,2008b. 西藏冈底斯带石炭纪 二叠
 纪岛弧造山作用:火山岩和地球化学证据[J]. 地质通报,27
 (9):1509-1534.
- 吴福元,万博,赵亮,等,2020. 特提斯地球动力学[J]. 岩石学报, 36(6):1627-1674.
- 许志琴,杨经绥,李海兵,等,2006.中央造山带早古生代地体构架

与高压/超高压变质带的形成[J]. 地质学报, 80(12): 1793-1806.

袁四化, 刘永江, Neubauer F, 等, 2020. 东阿尔卑斯原 – 古特提斯 构造演化[J]. 岩石学报, 36(8): 2357 – 2382.

袁四化,刘永江,常瑞虹,等,2021. 从多岛弧盆系构造看西特提斯造 山系构造演化[J/OL]. 沉积与特提斯地质. https://doi.org/10. 19826/j. cnki. 1009 – 3850. 2021. 02004.

- 张克信,潘桂棠,何卫红,等,2015.中国构造-地层大区划分新方案[J].地球科学-中国地质大学学报,40(2):206-233.
- 周鼎武, 苏犁, 简平, 等, 2004. 南天山榆树沟蛇绿岩地体中高压麻 粒岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及构造意义[J]. 科学通报, 49 (14): 1411-1415.

Paleozoic tectonic framework and evolution of the central and western Tethys

GENG Quanru, LI Wenchang, WANG Liquan, ZENG Xiangting, PENG Zhimin, ZHANG Xiangfei, ZHANG Zhang, CONG Feng, GUAN Junlei

(Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu 610081, Sichuan, China)

Abstract: The Paleozoic tectonic domain in central and western Tethys is divided in this paper on the basis of the results of research and regional geological correlation at home and abroad, into the Iapetus tornquist Caledonian orogenic belt, the Rheic Variscan orogenic belt and the Ural Tianshan Central Asia orogenic belt. The results of research in this paper led us to the following conclusions. (1) The Proto-Tethyan ocean formed by the break-up of Rodinia supercontinent during the Neoproterozoic is represented by the Iapetus and Tornquist suture zones in Europe, which closed to form Caledonian orogenic zones at ~ 420 Ma, similar to the Qinling-Qilian-Kunlun orogenic zones in China. (2) The Rheic Ocean is similar to the Longmucuo-Shuanghu-Changning-Mmenglian Ocean in the eastern part of the Tethys. It was the major Paleozoic Tethyan Ocean and the Paleo-Tethys formed during the Devonian was actually one of its sub-branches. All of the Rheic sub-branch oceans closed at 320 ~ 310 Ma, forming the Variscan orogenic zone and Pangea supercontinent. (3) The Plankogel zone in the Southern Alps, the pontides zone in northern Turkey and the Rasht -Mashhad zone in northern Iran are Paleo-Tethyan suture zones, representing Devonian-Permian ocean basins. The Late Carboniferous-Early Triassic Silk Road Arc corresponds to the Wangguoshan volcanic arc in central Qiangtang, China. (4) The Cimmerides zone in central and western Tethys and the Indosinian zone in central Qiangtang are typical accretionary orogenic zones of Paleo-Tethys.

Key words: central and western Tethys; Paleozoic ophiolite zone; accretionary complex zone; tectonic framework; tectonic evolution.