



引文格式: 吴妍蓉, 周海, 赵国春, 等. 中亚造山带南蒙古地区石炭纪—二叠纪岩浆活动及其构造意义[J]. 西北地质, 2024, 57(3): 11–28. DOI: 10.12401/j.nwg.2023152

Citation: WU Yanrong, ZHOU Hai, ZHAO Guochun, et al. Carboniferous-Permian Magmatism of Southern Mongolia, Central Asian Orogenic Belt and Its Tectonic Implications[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(3): 11–28. DOI: 10.12401/j.nwg.2023152

中亚造山带南蒙古地区石炭纪—二叠纪岩浆活动及其构造意义

吴妍蓉¹, 周海^{1,2,*}, 赵国春^{2,3}, 韩以贵², 张东海², 王盟¹, 赵少伟¹, 裴先治¹, 赵千⁴,
Narantsetseg Tserendash⁵, 耿红燕⁶, Enkh-Orshikh Orsoo⁷

(1. 长安大学地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054; 2. 西北大学地质学系, 国家大陆动力学重点实验室, 陕西 西安 710069; 3. 香港大学地球科学系, 香港 999077; 4. 三明学院, 国家公园研究中心, 福建 三明 365004; 5. 蒙古国国家科学院, 古生物与地质研究所, 乌兰巴托 999097-15141; 6. 岭南大学科学教研组, 香港 999077; 7. 马可波罗矿业有限公司, 乌兰巴托 999097-15141)

摘要: 中亚造山带作为显生宙以来全球最大的增生型造山带, 记录了古亚洲洋俯冲、增生、闭合的全过程。南蒙古地区位于中亚造山带南缘中段, 其晚古生代先后发育弧岩浆活动以及与伸展活动相关的岩石组合, 是研究陆壳增生和改造的热点区域。笔者结合区域地质特征及前人研究对南蒙古地区石炭纪—二叠纪这一关键时期的岩石组合做出系统梳理和总结, 研究区石炭纪—二叠纪岩浆活动大致可以分为早石炭世 (350~325 Ma), 晚石炭世 (320~305 Ma) 和早二叠世 (300~280 Ma) 3 个阶段。早石炭世 (350~325 Ma) 发育典型的弧岩浆岩且具有向南变年轻的趋势。此外, 全岩 Nd 和锆石 Hf 同位素显示其主体具有显著的地幔贡献。综合前人认识, 笔者认为这是古亚洲洋主洋盆以北多个次生的弧后洋盆俯冲后撤的结果。晚石炭世 (320~305 Ma) 以高硅花岗岩为主, 尤其 315~310 Ma 的碱长花岗岩、碱长正长岩等是年轻弧地体重熔的产物, 是俯冲大洋板片显著消耗的结束。早二叠世 (300~280 Ma) 发育伸展相关的岩石组合 (如 A 型花岗岩、双峰式火山岩和基性岩墙), 这些岩浆活动显示高温特征, 且具有显著的地幔物质贡献。结合前人工作, 特别是笔者的前期工作, 上述岩浆活动是由石炭纪板片后撤之后高角度俯冲诱发的俯冲板片断离所造成, 且前人研究成果表明南蒙古东西两侧均有类似的岩石、构造和沉积记录。因此, 笔者提出, 古亚洲洋主洋盆泥盆纪—二叠纪多期次的俯冲后撤导致了其北侧一系列次生的弧后洋盆的开启、俯冲至闭合, 上述过程伴随了中亚造山带南缘最后一次大规模侧向增生及其结束后板片断离诱发的垂向地壳增生。

关键词: 中亚造山带; 石炭纪—二叠纪; 岩浆活动; 构造演化; 南蒙古地区

中图分类号: P548

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2024)03-0011-18

收稿日期: 2023-06-14; 修回日期: 2023-07-27; 责任编辑: 曹佰迪

基金项目: 国家自然科学基金 (42102260、41730213、41890831、42072267、41972229), 长安大学中央高校基本科研业务专项资金-高新技术研究支持计划培养项目 (300102272204), 裴槎基金会 Croucher Chinese Visitorships (2022-2023), 陕西高校青年创新团队 The Youth Innovation Team of Shaanxi Universities 联合资助。

作者简介: 吴妍蓉 (2000–), 女, 硕士, 主要研究方向为构造地质学。E-mail: 2967138083@qq.com。

* 通讯作者: 周海 (1988–), 男, 副教授, 硕士研究生导师, 主要从事造山带地质、岩石大地构造方面的研究。E-mail: zhouhai@chd.edu.cn。

Carboniferous-Permian Magmatism of Southern Mongolia, Central Asian Orogenic Belt and Its Tectonic Implications

WU Yanrong¹, ZHOU Hai^{1,2,*}, ZHAO Guochun^{2,3}, HAN Yigui², ZHANG Donghai², WANG Meng¹, ZHAO Shaowei¹, PEI Xianzhi¹, ZHAO Qian⁴, Narantsetseg Tserendash⁵, GENG Hongyan⁶, Enkh-Orshikh Orsoo⁷

(1. School of Earth Sciences and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China; 3. Department of Earth Sciences, University of Hong Kong, Hong Kong 999077, China; 4. National Park Research Center, Sanming University, Sanming 365004, Fujian, China; 5. Institute of Paleontology and Geology, Mongolian Academy of Sciences, Ulaanbaatar 999097-15141, Mongolia; 6. Science Unit, Lingnan University, Hong Kong 999077, China; 7. Marco Polo Limited liability Company, Ulaanbaatar 999097-15141, Mongolia)

Abstract: As the largest Phanerozoic accretionary orogenic belt in the world, the Central Asian Orogenic Belt (CAOB) records the whole process of subduction, accretion and closure of the Paleo-Asian Ocean (PAO). The southern Mongolia, in the central segment of the southern CAOB, has successively developed rock associations of arc-magmatic activity and later extensional activity during the late Paleozoic, which is a key area for studying the accretion and transformation of continental crust. Combined with regional geological characteristics and previous studies, this paper systematically sorted out and summarized the rock association of the key period of Carboniferous-Permian in Southern Mongolia and the magmatic activity can be roughly divided into three stages: Early Carboniferous (350~325 Ma), Late Carboniferous (320~305 Ma), and the early Permian (300~280 Ma). During Early Carboniferous (350~325 Ma), the Southern Mongolia developed typical arc-type magmatic rocks having a southward migration trend. Whole-rock Nd and zircon Hf isotopes show that these rocks have significant mantle contribution. Combined with previous works, this resulted from slab retreating of a series of secondary back-arc oceans of the PAO on the north of its main ocean basin. During Late Carboniferous (320~305 Ma), The southern Mongolia was dominated by high silica granites, especially the alkaline feldspar granites and syenites (315~310 Ma), which were produced by the remelting of earlier arc crusts, indicating the cessation of significant consumption of subducted oceanic plates. During the early Permian (300~280 Ma), extension-related magmatic rocks, such as A-type granite, bi-model volcanic rocks and basic dikes, were developed. The above magmatic activities showed the characteristics of high temperature and significant contribution of mantle materials. Therefore, we support that it was caused by the slab breakoff by high-angle subduction resulted from the aforementioned Carboniferous slab retreating. Previous studies show that there are similar rocks, structure and sedimentary records on both east and west sides of Southern Mongolia. Therefore, the Devonian-Permian subduction and slab retreating of the main basin of the PAO caused the opening, subduction and closure of a series of secondary back-arc basins on the northern side of the PAO, which were accompanied by the last large-scale lateral crustal accretion of the southern CAOB and its cessation with subsequent slab-breakoff-induced vertical crustal accretion.

Keywords: Central Asian Orogenic Belt; carboniferous-permian; magmatic activity; tectonic evolution; Southern Mongolia region

中亚造山带(Central Asian Orogenic Belt, CAOB)是显生宙以来世界上最大且演化时间最长的增生型造山带(Xiao et al., 2015; Zhao et al., 2018; 肖文交等, 2019),其南北分别被东欧-西伯利亚克拉通和塔里木-华北克拉通所围限,以宽缓的增生造山区和巨量的新

生地壳为显著特征(图 1)(Sengör et al., 1993; Xiao et al., 2003; Jahn, 2004; Xiao et al., 2004, 2015, Kröner et al., 2014)。中亚造山带的形成与古亚洲洋(Paleo-Asian Ocean, PAO)的俯冲、增生、闭合过程息息相关,期间经历了洋内一系列微陆块、大洋壳、岛弧带及相应的



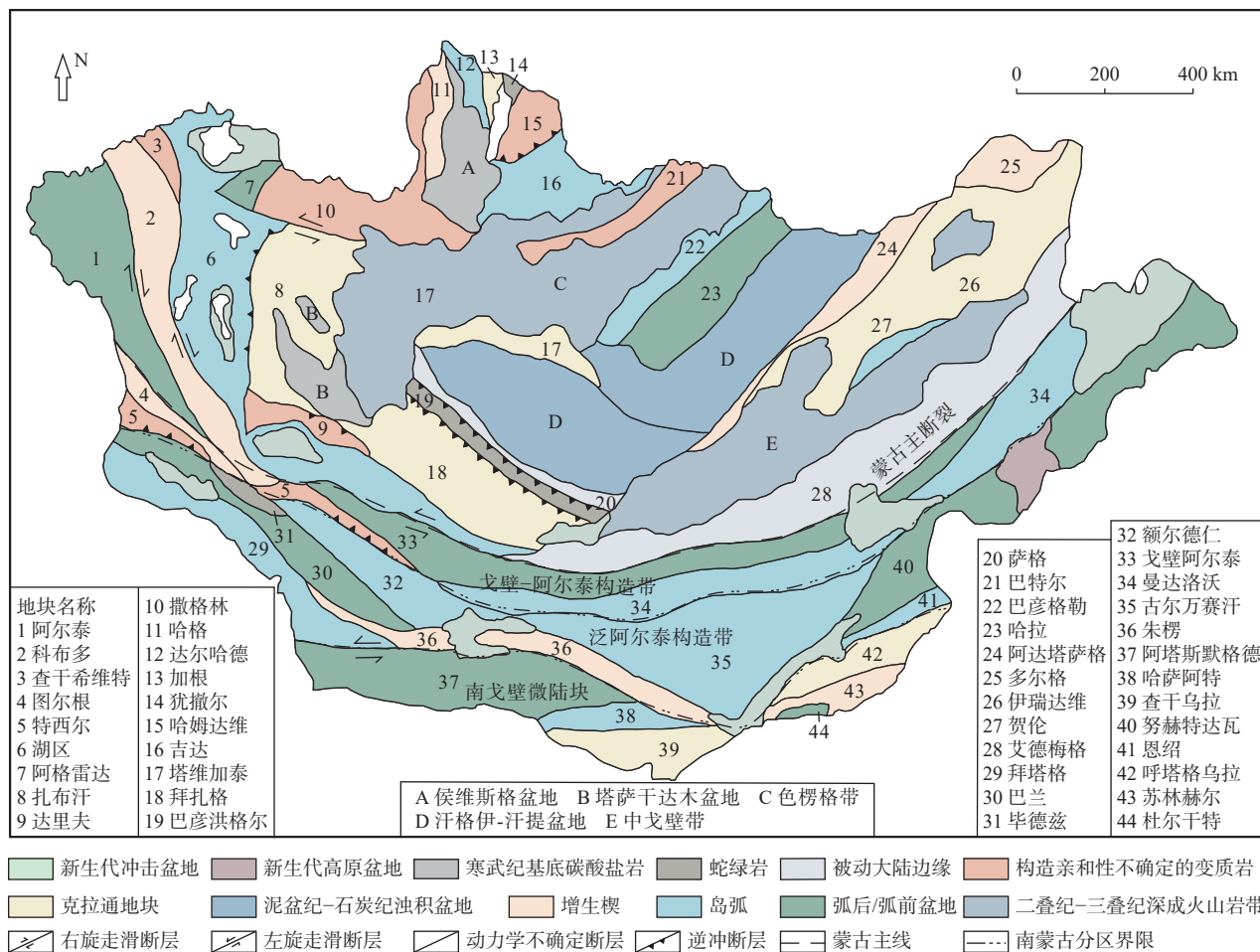
图1 中亚造山带地质简图(据肖文交等, 2019 修)

Fig. 1 Geological map of Central Asian Orogenic Belt

俯冲-增生楔长期而复杂的构造演化, 保存了亚洲大陆古生代增生聚合和洋-陆格局转变的重要信息, 是研究大陆地壳生长和壳-幔相互作用的天然实验室(Xiao et al., 2003, 2015; Zhao et al., 2018; 肖文交等, 2019; 王博等, 2021; 付超等, 2023; 张永玲等, 2024)。目前多数研究认为古亚洲洋最终在晚石炭纪—三叠纪闭合于南天山-索伦缝合带(Xiao et al., 2003, 2004, 2015)。现有研究表明, 石炭纪之前, 中亚造山带主要的陆壳增生与俯冲过程有关, 即以侧向增生方式为主(Windley et al., 2007; Xiao et al., 2015; Zhou et al., 2018, 2022)。此外, 部分学者指出中亚造山带晚期(石炭纪之后)发育大量具有亏损 Nd 和 Hf 同位素的花岗岩和火山岩, 可能暗示其经历了一定程度的垂向增生(Jahn, 2004; Chen et al., 2005; Zhou et al., 2021b)。因此, 中亚造山带晚期, 特别是石炭纪以来可能发生了明显的构造转换(Xiao et al., 2018)。研究中亚造山带石炭纪—二叠纪构造演化对于深化理解其晚期的地壳增生和改造具有重要的意义。

南蒙古拼贴体系位于中亚造山带南缘中段, 其北和南分别以蒙古主断裂(Main Mongolian Lineament, MML)和锡林浩特断裂为界, 与北侧较老的部分和南侧的索伦缝合带相邻(Xiao et al., 2003, 2015)。南蒙古地区地处蒙古国南部(图2), 其西侧与哈萨克斯坦和中

国新疆甘肃一带的天山-北山造山带相邻, 东侧与中国的内蒙古自治区中部的广大地区相邻。目前, 前人围绕研究区西侧的哈萨克斯坦拼贴体系内的弧体系, 如准噶尔-天山造山带(Xiao et al., 2004, 2015; Shu et al., 2005; 陈维民等, 2017; 滕飞等, 2017; Zhang et al., 2018; Han et al., 2018)和东侧的内蒙古自治区中部的南蒙古拼贴体系部分(Xiao et al., 2003; Jian et al., 2010; Li et al., 2017; Chai et al., 2020; Lu et al., 2020)的石炭纪大地构造展开了大量研究, 涉及岩浆、沉积以及变质变形等多方面工作, 取得了新的研究成果。南蒙古地区是东西向连接上述两个区域的关键地带, 其特征是广泛发育石炭纪增生型弧岩浆活动, 构成了南蒙古拼贴体系的主体部分(Badarch et al., 2002; Kröner et al., 2014; Xiao et al., 2015, 2018)。这种发育典型增生型弧岩浆活动的区域与塔里木-华北拼贴体系明显不同, 后者在石炭纪除了增生作用之外亦发育显著的改造相关的岩浆作用, 因此南蒙古地区被认为是中亚造山带典型的增生造山区(Kröner et al., 2014; Xiao et al., 2015)。其次, 南蒙古地区还发育二叠纪伸展相关的岩浆活动, 如 A 型花岗岩(Kovalenko et al., 2010; Blight et al., 2010), 双峰式火山岩(Kovalenko et al., 2010), 基性岩墙(Hu et al., 2017; Zhou et al., 2021a)等。这些不同时期的岩石组合为研究中亚造山带晚期侧向增生作用及其结束后



蒙古国地层地体的划分参考 Badarch 等(Badarch 等(2002)), 南蒙古地区构造单元的划分参考 Kröner 等(2010)和 Lehmann 等(2010)

图2 蒙古国构造地层地体图(据 Badarch et al., 2002; Kröner et al., 2010 修)

Fig. 2 Tectonic stratigraphy of Mongolia

的大地构造环境和动力学机制提供了理想窗口。

然而, 由于研究对象与研究方法的不同, 目前对于南蒙古地区石炭纪弧的性质及其演化仍存在较大争议。一些学者基于早石炭世(350~325 Ma)弧火山岩较老的全岩 Nd 同位素模式年龄(0.78~0.5 Ga), 明显的陆壳信息(如 Pb 和 K 的正异常等), 认为该岩浆弧是古亚洲洋次生的弧后洋盆俯冲在大陆边缘之下的产物, 可能有一定古老地壳的改造(Yarmolyuk et al., 2008b; Zhou et al., 2021a, 2022); Safonova 等(2014)则认为古亚洲洋的岩浆弧大多数为洋内弧, 并且一些学者通过研究指出早石炭世弧火山岩及同时代火山碎屑岩具有如下的特征: ①泥盆纪为主的捕获(或继承)锆石(Yang et al., 2019)。②占一定比例的岛弧拉斑玄武岩(Helo et al., 2006), 上述现象均暗示该弧在早石炭世具有显著的地壳增生, 可能为洋洋俯冲的产物。其次, 一些学者针对南蒙古地区及其邻区陆壳普遍发育的正长花岗岩(320~300 Ma)和泛阿尔泰构造带石

炭纪末期(~300 Ma)岩墙的研究认为, 该早石炭世岩浆弧在石炭纪末期发生明显改变, 可能暗示俯冲在石炭纪末期结束, 转变为以陆壳改造为主(Yarmolyuk et al., 2008a; Guy et al., 2014; Hu et al., 2017; Wei et al., 2018; Zhou et al., 2018, 2021a, 2021b, 2023); 而另一些学者强调晚石炭世(320~305 Ma)除了陆壳重融型花岗岩的发育之外, 还有一定量的辉长岩和闪长岩, 花岗闪长岩, 安山岩等钙碱性弧特征的岩浆岩的发育(Kröner et al., 2010)。上述现象表明相对于早石炭世, 晚石炭世洋盆的俯冲发生了明显变化, 并且该时期岩浆活动以陆壳改造为主的同时可能仍有一定的地幔物质加入。此外, 对于该岩浆弧构造演化的动力学机制也存在较大的争议: 主要有古亚洲洋主洋盆晚期多次板片后撤(Xiao et al., 2018), 及由晚石炭世-早二叠世地幔柱(Yarmolyuk et al., 2013)或后碰撞伸展机制(Yarmolyuk et al., 2008b)等两种主要认识。

总之, 目前关于南蒙古地区石炭纪弧的性质及其

构造演化,特别是其地壳增生和改造过程的认识仍较为模糊。对古亚洲洋(包括次生洋盆)石炭纪俯冲过程的深入认识是理解上述的问题的关键。笔者在前期工作的基础上,结合前人研究将南蒙古地区石炭纪—二叠纪岩浆活动进行系统梳理,讨论其岩石组合和构造环境,对南蒙古地区,及其两侧的中亚造山带南缘索伦缝合带以北的石炭纪弧的性质和构造演化过程进行深入探究。

1 区域背景

1.1 构造单元划分

蒙古拼贴体系被近东西向的蒙古主断裂划分为南北两个构造域,其中北域主要发育前寒武纪和早古生代变质岩、新元古代蛇绿岩、早古生代花岗岩和伴生的火山碎屑岩;南域主要发育早—中古生代弧相关火山岩和火山碎屑岩,夹杂蛇绿岩和蛇纹石混杂岩以及广泛分布的晚石炭纪—二叠纪火山岩(Badarch et al., 2002; Kröner et al., 2010)。上述岩石均被石炭纪—二叠纪花岗岩广泛侵入,随后被侏罗纪—白垩纪陆源火山岩和沉积岩覆盖(Helo et al., 2006)。

南蒙古拼贴体系是在西伯利亚南缘新元古代—早古生代前期构造基础上,由其北侧湖区和南侧的南戈壁等前寒武纪微陆块经历晚古生代,甚至三叠纪不同期次的俯冲增生和拼贴形成的,因而为研究中亚造山带晚期侧向增生作用提供了理想窗口(Lehmann et al., 2010; Kröner et al., 2010; Xiao et al., 2018)。南蒙古地区由北向南大致可以分为:戈壁—阿尔泰构造带(Gobi-Altai Zone, GAZ)、泛阿尔泰构造带(Trans-Altai Zone, TAZ)和南戈壁微陆块(South Gobi Zone, SGZ)(Kröner et al., 2010)(图2)。其中戈壁—阿尔泰构造带与泛阿尔泰构造带具有相似的晚古生代增生杂岩,可能属于一个相邻的岛弧,被后来的右旋走滑断层所隔开。而南戈壁微陆块具有新元古代片岩基底,可能暗示其具有古老基底(Blight et al., 2010; Zhou et al., 2021a, 2021b, 2022)。

1.2 南蒙古地区构造单元地质概况

1.2.1 戈壁—阿尔泰构造带

戈壁—阿尔泰构造带宽约为50 km,长约为1800 km,位于蒙古主断裂以南,泛阿尔泰断裂(Trans-Altai)以北,构成了南蒙古拼贴体系的北缘(Helo et al., 2006; Yarmolyuk et al., 2008b)(图2)。该构造带形成于弧后/弧前盆地环境,区域内部构造演化复杂,发育多期岩

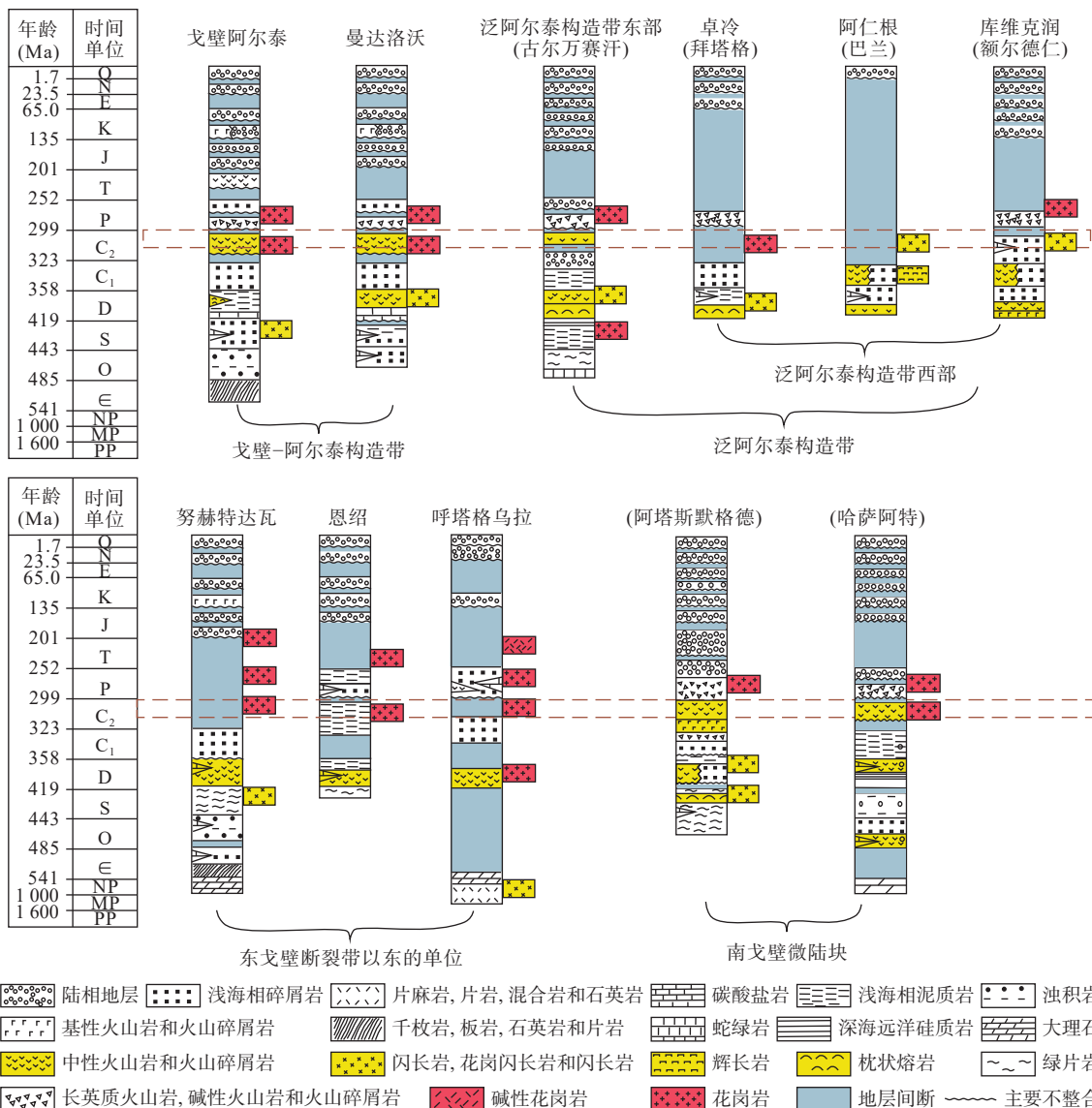
石组合(Badarch et al., 2002)。其中,构造最古老的图格里格组(Tugrig)可能属于寒武纪,主要为扁平的绿片岩相火山碎屑岩和次火山岩,内部含有蛇纹岩和辉长岩的透镜体。其次为巴扬萨甘组(Bayantsagaan),属于早奥陶世。这些岩石被志留纪—泥盆纪以含生物礁大理岩为特征的被动大陆边缘沉积岩或泥盆纪—石炭纪弧相关火山岩及火山碎屑岩所覆盖(Kröner et al., 2010)。泥盆纪—石炭纪则发育各种砾岩、砂岩、粉砂岩,并和枕状玄武岩、安山岩和凝灰岩互层。此外,还发育大量志留纪—泥盆纪和石炭纪—二叠纪花岗岩(Badarch et al., 2002)(图3)。

1.2.2 泛阿尔泰构造带

泛阿尔泰构造带位于戈壁—阿尔泰构造带以南,戈壁天山断裂(Gobi Tianshan)以北(Xiao et al., 2015)(图2)。该构造带主要由蛇绿岩、火山岩和火山—沉积岩系列组成,还包括弧地体和增生杂岩(Badarch et al., 2002; Yarmolyuk et al., 2008b)(图3)。其中,区域内最老的岩石位于泛阿尔泰断裂内,沉积时代为早泥盆世,岩石组合下部为粗碎屑沉积岩,上部为砂岩、页岩、凝灰岩和硅质岩。这些早泥盆世层序不仅剖面变形强烈,且横向出现自西向东逐渐变薄并由海洋沉积序列—火山序列的变化趋势。泥盆纪地层被后来的早石炭世碎屑层序覆盖,包括:砂岩、砾岩、页岩和一些凝灰岩。石炭纪地层则主要为玄武岩、玄武安山岩、安山岩及相应的凝灰岩,如凝灰质砂岩、凝灰质粉砂岩和凝灰质砾岩(Kröner et al., 2010)。晚石炭世—早二叠世花岗岩广泛侵入上述岩层,其时代大多为320~280 Ma,主要显示高硅高碱的特征,其中有一部分显示典型的A型花岗岩的特征,可能与后碰撞环境有关(Blight et al., 2010)。这些岩石最终被白垩纪的碎屑岩所覆盖,包括砾岩、砂岩和硅质岩等,可能与蒙古—鄂霍次克洋闭合后的伸展环境有关(Meng, 2003)。

1.2.3 南戈壁微陆块

南戈壁微陆块位于南蒙古拼贴体系的最南端(图2),南以锡林浩特断裂为界与索伦缝合带相邻。该构造带除了分布有少量新元古代残余变质基底岩石,主要由早古生代盖层沉积和泥盆纪—石炭纪火山及陆源沉积岩组成(Kröner et al., 2010)(图3)。早古生代盖层沉积组合为:奥陶纪陆源碎屑岩,主要包括硅质碎屑岩、石英岩、砂岩、砂砾和砾岩;志留纪变质岩,主要包括角闪岩、角闪岩片岩和角岩,层间为灰绿色绿泥石或绢云母—绿泥石片岩。泥盆纪—石炭纪火



构造单元划分来自 Kröner 等(2010), 括号内的单元由 Badarch 等(2002)命名; 黄色单元与俯冲有关, 红色单元与俯冲无关

图3 南蒙古地区主要构造单元地层柱(据 Badarch et al., 2002; Kröner et al., 2010; Zhou et al., 2023 修)

Fig. 3 Stratigraphic columns of main tectonic units of the Southern Mongolia

山及陆缘沉积岩包括: 早泥盆世火山岩、火山-沉积岩和带透镜体的沉积岩以及灰岩和石英岩; 中泥盆世黑灰色层序板状变质泥岩、变质砂岩和钙硅酸盐岩; 它们被早石炭世沉积物不整合覆盖。石炭纪岩石在该地区最为广泛发育, 主要为凝灰质砂岩和玄武岩、安山岩、英安岩、流纹岩等火山岩(Kröner et al., 2010)。

2 南蒙古地区石炭纪—早二叠世构造岩浆事件及构造环境

2.1 早石炭世岩浆活动及构造环境

南蒙古地区早石炭世岩浆活动的时期为

350~325 Ma, 以玄武岩、玄武安山岩、安山岩、英安岩和流纹岩等火山岩为主, 还有少量火山碎屑岩和花岗岩。这些岩石组合主要出露于泛阿尔泰构造带内, 例如, 东部的古尔万赛汗地区和西部的阿兹默格德、巴兰等地区; 少部分出露于戈壁-阿尔泰构造带, 包括东部的曼达洛沃、戈壁阿尔泰地区和西部的特西尔地区(表 1)(Helo et al., 2006; Hrdličková et al., 2008; Yarmolyuk et al., 2008b; Kröner et al., 2010)。现有研究表明, 上述岩石主要显示出低钾拉斑系列-钙碱性系列-高钾钙碱性系列的特征(图 4a、图 4b)。在 A/NK-A/CNK 图解中, 流纹岩以及酸性侵入岩显示出准铝质-弱过铝质的特征(图 5a)。此外, 这些早石炭世火山岩

表1 南蒙古地区石炭纪—早二叠世岩浆岩年龄

Tab. 1 Age of Carboniferous-Early Permian magmatic rocks in southern Mongolia

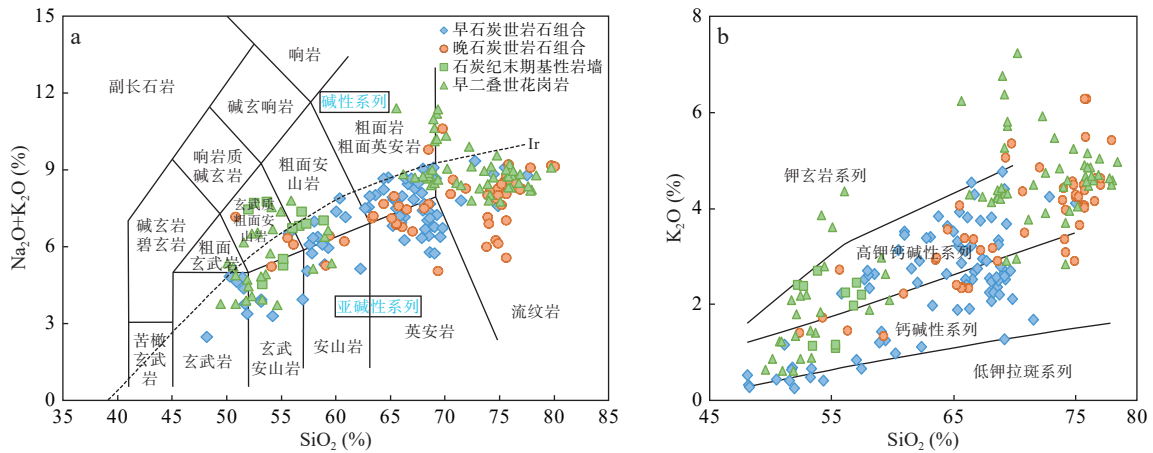
时期	采样地点	岩石类型	样品编号	年龄 (Ma)	参考文献
早石炭世	特西尔地区	花岗片麻岩	M107/06-2	350.4±1.7	Kröner et al., 2010
	古尔万赛汗-奥尤陶勒盖矿床	花岗闪长岩	AJW03-074	350	Wainwright et al., 2011
	阿兹默格德地区	花岗闪长岩	—	348±1	Yarmolyuk et al., 2008b
	古尔万赛汗-奥尤陶勒盖矿床	英安岩	AJW03-091	347	Wainwright et al., 2011
	古尔万赛汗-奥尤陶勒盖矿床	安山岩	AJW03-055	346	Wainwright et al., 2011
	戈壁阿尔泰-坎德曼地区	花岗岩	—	345±2	Hrdličková et al., 2008
	古尔万赛汗-奥尤陶勒盖矿床	安山岩	AJW03-183	345	Wainwright et al., 2011
	特西尔地区	花岗岩	M103/06-2	340.9±2.5	Kröner et al., 2010
	古尔万赛汗-汗默格德地区	安山岩	MG27-4	339±3	Zhou et al., 2021a
	古尔万赛汗-佐格多铜矿床	花岗闪长岩	TS-37	335.1±4.4	Davaasuren et al., 2021
	古尔万赛汗-奥尤陶勒盖矿床	流纹岩	AJW03-107; AJW03-125	335	Wainwright et al., 2011
	古尔万赛汗-汗默格德地区	流纹斑岩	MG09-1	334±9	Zhou et al., 2021a
	古尔万赛汗-布兰泽福克斯矿床	花岗闪长岩	BFD	333.6±0.6	Blight et al., 2010
	曼达洛沃-纳林胡杜格地区	二长岩	JBSP010	333.22±0.6	Blight et al., 2010
	古尔万赛汗-南丹亨迪地区	花岗闪长岩	2012SM-128	333±4	Zhu et al., 2016
	古尔万赛汗-佐格多铜矿床	花岗闪长岩	TS-21	331.4	Davaasuren et al., 2021
	曼达洛沃-奥尤特乌兰矿床	石英二长岩	88.3A	330±0.5	Blight et al., 2010
	古尔万赛汗-佐格多铜矿床	二长花岗岩	TS-30	329.9	Davaasuren et al., 2021
	古尔万赛汗-佐格多铜矿床	花岗闪长岩	TS-34	329.1	Davaasuren et al., 2021
	古尔万赛汗-莫戈伊特山地区	石英斑岩	T2-025	329±6	Guy et al., 2014
	巴兰地区	角闪石闪长岩	—	329±1	Yarmolyuk et al., 2008b
	古尔万赛汗-佐格多铜矿床	花岗闪长岩	TS-29	326.4	Davaasuren et al., 2021
	古尔万赛汗-佐格多铜矿床	二长花岗岩	TS-20	326.1	Davaasuren et al., 2021
	古尔万赛汗-舒廷地区	石英二长岩	97.2A	325.4±1.0	Blight et al., 2010
	古尔万赛汗-南丹亨迪地区	安山岩	2012SM-104	325±3	Zhu et al., 2016
	古尔万赛汗-奥尤陶勒盖矿床	花岗岩	AJW03-132	324	Wainwright et al., 2011
晚石炭世	古尔万赛汗-奥尤陶勒盖矿床	花岗岩	AJW03-116	321	Wainwright et al., 2011
	古尔万赛汗-南丹亨迪地区	石英闪长岩	T2-062	319±6	Guy et al., 2014
	古尔万赛汗-巴彦奥沃地区	花岗岩	T2-029	319±5	Guy et al., 2014
	阿塔斯默格德地区	碱性花岗岩	YUM-32/22	319±4	Kozlovsky et al., 2012
	特西尔地区	碱性长石花岗岩	YUM-34/12	318.3±2.1	Yarmolyuk et al., 2017
	古尔万赛汗-伊赫尔斯山地区	花岗岩	T2-046	318±9	Guy et al., 2014
	古尔万赛汗-巴伦卡拉特地区	花岗闪长岩	T2-042	318±8	Guy et al., 2014
	额尔德仁-塔文塔尔地区	花岗闪长岩	YUM-34/21	318±2.2	Yarmolyuk et al., 2017
	戈壁阿尔泰-苏门可汗德地区	碱性长石花岗岩	YUM-34/13	317.3±2.3	Yarmolyuk et al., 2017
	特西尔地区	碱性花岗岩	YUM-33/1	316.7±2.5	Yarmolyuk et al., 2017
	古尔万赛汗-察夫齐尔胡杜格地区	流纹岩	2012SM-22	315±4	Zhu et al., 2016
	古尔万赛汗-汗默格德地区	碱性长石花岗岩	MG44-3	315±2	Zhou et al., 2021b
	古尔万赛汗-哈察维奇山地区	花岗岩	T2-019	314±5	Guy et al., 2014
	古尔万赛汗-汗默格德地区	碱性长石花岗岩	MG04-1	313±2	Zhou et al., 2021b
	古尔万赛汗-汗默格德地区	碱性长石花岗岩	MG05-1	312±2	Zhou et al., 2021b
	古尔万赛汗-汗默格德地区	二长闪长岩	MG37-1	312±2	Zhou et al., 2021b
	古尔万赛汗-汗默格德地区	碱性长石花岗岩	MG08-5	311±4	Zhou et al., 2021b
	古尔万赛汗-汗默格德地区	石英二长岩	MG36-1	311±2	Zhou et al., 2021b
	察干乌拉-哈尔奥维地区	花岗岩	T1-192	308±4	Guy et al., 2014
	古尔万赛汗-塞夫雷地区	石英二长岩	T1-239	307±6	Guy et al., 2014
	古尔万赛汗-伊赫乌尔齐特乌尔山地区	花岗岩	2012SM-64	304±4	Zhu et al., 2014

续表1

时期	采样地点	岩石类型	样品编号	年龄 (Ma)	参考文献
石炭纪末期—早二叠世	阿塔斯默格德地区	花岗闪长岩	—	302±3	Yarmolyuk et al., 2008b
	阿塔斯默格德地区	花岗片麻岩	28/5 325	301.4±1.2	Kröner et al., 2010
	阿塔斯默格德地区	花岗闪长岩	M33/06	299.9±1.6	Kröner et al., 2010
	古尔万赛汗-汗默格德地区	基性岩墙	MG07; MG03-1	299±3	Zhou et al., 2021a
	阿塔斯默格德地区	黑云母花岗岩	YuM-25/12	299±1	Kozlovsky et al., 2012
	古尔万赛汗-伊赫山海地区	石英二长斑岩	T2-048	298±4	Guy et al., 2014
	戈壁阿尔泰-额尔德尼地区	花岗岩	M135	295.7±2.2	Kröner et al., 2010
	阿兹默格德地区	亚碱性花岗岩	—	294±5	Yarmolyuk et al., 2008b
	古尔万赛汗-汗默格德地区	碱性花岗岩	Zircon	293.4±2.6	Gerdes et al., 2017
	古尔万赛汗-汗默格德地区	碱性花岗岩	Late armstrongite	293±55	Gerdes et al., 2017
	古尔万赛汗-汗默格德地区	碱性花岗岩	MG50-1	293±4	Zhou et al., 2021b
	古尔万赛汗-汗默格德地区	碱性花岗岩	Zircon early	292.8±2.6	Gerdes et al., 2017
	曼达洛沃-曼达克山地区	花岗岩	51.7A	292.3±0.5	Blight et al., 2010
	古尔万赛汗-汗默格德地区	碱性花岗岩	MG01-1	292±5	Zhou et al., 2021b
	古尔万赛汗-汗默格德地区	碱性花岗岩	KHB-1 745	292±1	Kovalenko et al., 2006
	曼达洛沃-曼达克山地区	亚碱性花岗岩	—	292±1	Yarmolyuk et al., 2008b
	古尔万赛汗-汗默格德地区	碱性花岗岩	—	292±1	Yarmolyuk et al., 2008b
	阿塔斯默格德地区	碱性花岗斑岩	YuM-24/1	292±1	Kozlovsky et al., 2012
	古尔万赛汗-汗默格德地区	碱性花岗岩	Zircon late	291.7±2.6	Gerdes et al., 2017
	古尔万赛汗-汗默格德地区	碱性花岗岩	Cyrtolite	290.8±2.5	Gerdes et al., 2017
	古尔万赛汗-汗默格德地区	黑云母花岗岩	KhB-4 448	290±1	Kovalenko et al., 2006
	古尔万赛汗-汗默格德地区	碱性花岗岩	KhB-1807	290±1	Kovalenko et al., 2006
	特西尔地区	闪长岩	M132	289.2±2.3	Kröner et al., 2010
	古尔万赛汗-哈尔哈德地区	亚碱性花岗岩	YuM-18/117	289±3	Kozlovsky et al., 2012
	古尔万赛汗-塔万塔希尔山地区	花岗闪长岩	T2-015	288±8	Guy et al., 2014
	古尔万赛汗-汗默格德地区	碱性花岗岩	Zircon late	287.3±4.2	Gerdes et al., 2017
	戈壁阿尔泰-额尔德尼地区	花岗岩	M65/06-1	286.8±1.8	Kröner et al., 2010
	古尔万赛汗-伊赫山海地区	石英斑岩	T2-058	286±5	Guy et al., 2014
	戈壁阿尔泰-巴彦查干地区	碱性花岗岩	BaTs-1/1	286±2	Kozlovsky et al., 2015
	戈壁阿尔泰-哈尔乌祖尔地区	碱性花岗岩	BaTs-3/2	284±1	Kozlovsky et al., 2015
	戈壁阿尔泰-乌兰乌尔地区	碱性花岗岩	KhT-4/11	284±1	Kozlovsky et al., 2015
	古尔万赛汗-诺贡地区	碱性流纹岩	YuM-18/109	281±3	Kozlovsky et al., 2012
	特西尔地区	花岗岩	M83/06	279.6±3.9	Kröner et al., 2010
	戈壁阿尔泰-祖恩默格德地区	碱性花岗岩	DZB-1/1	279±1	Kozlovsky et al., 2015
	戈壁阿尔泰-新津地区	花岗岩	M62/06-2	277±2.4	Kröner et al., 2010

以及大部分酸性侵入岩富集大离子亲石元素(如 Ba 和 U), 亏损高场强元素(如 Nb、Ta 和 Ti), 具有弱的轻稀土富集、重稀土亏损特征, 且没有明显的 Eu 异常, 显示出典型弧岩浆特征, 在 Rb-(Y+Nb)图解中也均落

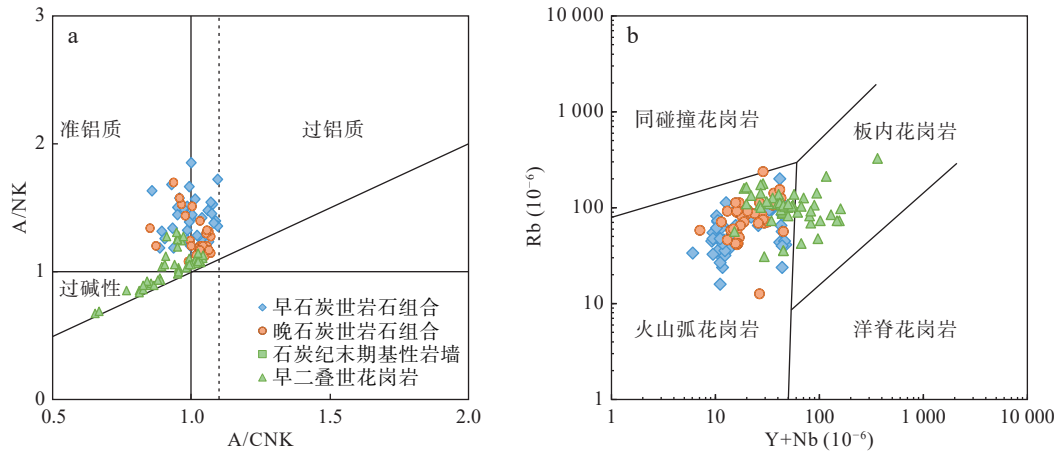
入火山弧花岗岩的范围内(图 5b、图 6a、图 6b)。以上结果表明这些弧岩浆岩具有典型的俯冲环境特征。同时期除了上述弧岩浆岩以外, 亦发育少量火山



早石炭世岩石数据来自 Blight 等 (2010), Wainwright 等 (2011), Zhu 等 (2016), Davaasuren 等 (2021), Zhou 等 (2021a, 2022); 晚石炭世岩石数据来自 Wainwright 等 (2011), Guy 等 (2014), Zhu 等 (2016), Zhou 等 (2021b, 2022); 石炭纪末期基性岩墙数据来自 Zhou 等 (2021a); 早二叠世花岗岩数据来自 Kovalenko 等 (2006), Yarmolyuk 等 (2008b), Blight 等 (2010), Kozlovsky 等 (2012), Guy 等 (2014), Zhou 等 (2021b)

图4 南蒙古地区石炭纪—早二叠世岩石 TAS 图解 (a) (据 Middlemost, 1994 修) 和 K_2O - SiO_2 图解 (b) (据 Peccerillo et al., 1976 修)

Fig. 4 (a) TAS diagram and (b) K_2O - SiO_2 diagram of Carboniferous-Early Permian rocks in Southern Mongolia



图例、数据来源参考图 4

图5 南蒙古地区石炭纪—早二叠世岩石 A/NK-A/CNK 图解 (a) (据 Miniard et al., 1989 修) 和 $\text{Rb}-(\text{Y}+\text{Nb})$ 图解 (b) (据 Pearce, 1996 修)

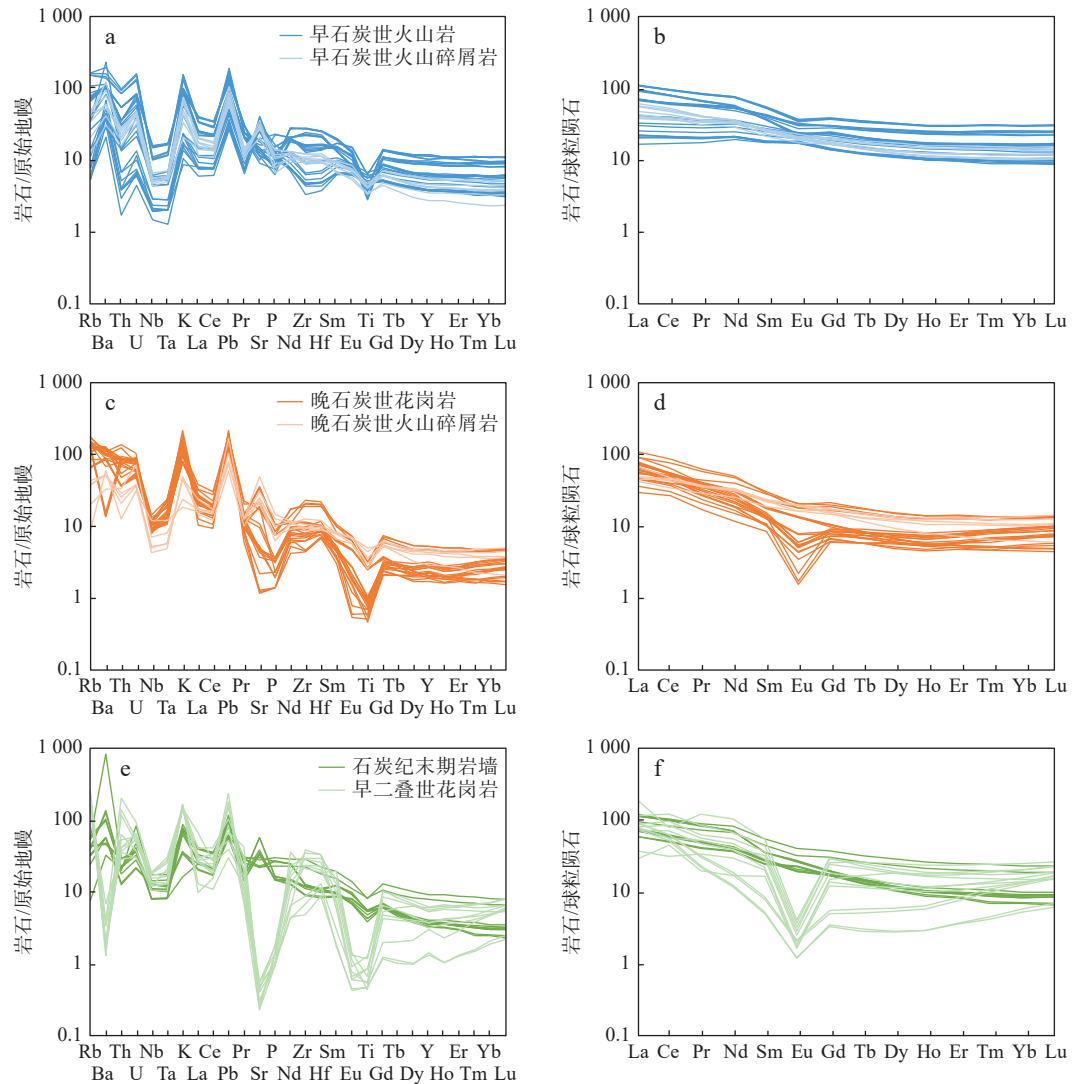
Fig. 5 (a) A/NK-A/CNK diagram and (b) Rb-(Y+Nb) diagram of Carboniferous-Early Permian rocks in Southern Mongolia

碎屑岩。该阶段火山碎屑岩大部分位于泛阿尔泰构造带的北部地区, 与上述火山岩互层或被火山岩覆盖, 形成于近同时代或略早 (锆石年代学工作和野外接触关系表明其形成于 370~350 Ma), 野外工作和岩相学研究表明其结构成熟度低, 并与这些火山岩具有相似的地球化学特征, 因而其主要物源为同时期火山弧岩浆作用 (Helo et al., 2006; Yarmolyuk et al., 2008b; Zhou et al., 2022)。它们还具有正的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ (4~17) 值, 且火山碎屑岩也显示出正的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ (4~6) 值, 暗示了地幔来源和一个总体年轻的岩浆成分特征 (图 7a、图 7b)。

此外, 值得注意的是, 近同时期亦有少量花岗岩和安山岩 (锆石年龄为 335~325 Ma), 显示典型的埃达克岩特征, 如高 MgO , Sr 和低 Y 含量以及高 Sr/Y , 是由俯冲洋壳部分熔融形成的 (Zhu et al., 2016; Davaasuren et al., 2021)。综上所述, 该时期南蒙古地区处于典型的洋盆俯冲环境。

2.2 晚石炭世岩浆活动及构造环境

晚石炭世岩浆活动主要集中在 320~305 Ma, 以花岗岩为主, 并且还有夹杂有大量同时期火山碎屑岩, 它们主要出露于南蒙古地区的东部和中部, 例如, 泛



早石炭世火山岩、火山碎屑岩数据分别来自 Zhou 等(2021a, 2022); 晚石炭世花岗岩、火山碎屑岩数据分别来自 Zhou 等(2021b, 2022); 石炭纪末期岩墙及早二叠世花岗岩数据分别来自 Zhou 等(2021a, 2021b)

图6 南蒙古地区石炭纪—早二叠世岩石稀土元素配分模式图(a)及微量元素蛛网图(b)(球粒陨石标准化值和原始地幔标准化值引自 Sun et al., 1989)

Fig. 6 (a) Distribution patterns of rare earth elements and (b) trace elements in Carboniferous and Early Permian rocks in Southern Mongolia

阿尔泰构造带的古尔万赛汗、额尔德仁地区以及南戈壁微陆块的察干乌拉地区;其次,在南蒙古西部(如戈壁—阿尔泰构造带的特西尔、戈壁阿尔泰地区以及南戈壁微陆块的阿塔斯默格德地区)有少量碱性花岗岩分布(表 1)(Helo et al., 2006; Yarmolyuk et al., 2008b, 2017; Kozlovsky et al., 2012)。前人研究认为,该时期南蒙古地区出现大量花岗岩的原因与石炭纪俯冲相关的岩浆作用有关,并伴随着大规模的地壳增厚(Guy et al., 2014)。上述花岗岩表现出钙碱性系列-高钾钙碱性系列和准铝质-弱过铝质的特征(图 4a、图 4b、图 5a)。并且,这些花岗岩与早石炭世岩石相比含有

更高的 SiO_2 和 K_2O 含量,较低的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(主要集中于 8~15,早石炭主要集中于 9~17),还具有弱的大离子亲石元素富集和高场强元素的亏损,以及明显的轻稀土富集、重稀土亏损的特征,并显示一定的 Eu 异常(图 6c、图 6d、图 7a)。以上结果表明晚石炭世花岗岩相较于早石炭世具有更为成熟的弧岩浆岩的特征,这与其具有更高的 Rb 和 (Y+Nb) 含量从而落入更靠近同碰撞和后碰撞区域是一致的(图 5b)。

同时期火山碎屑岩主要出露于泛阿尔泰构造带南部,锆石年代学工作和野外接触关系表明其形成于 350~315 Ma,比上述泛阿尔泰构造带北部的火山碎

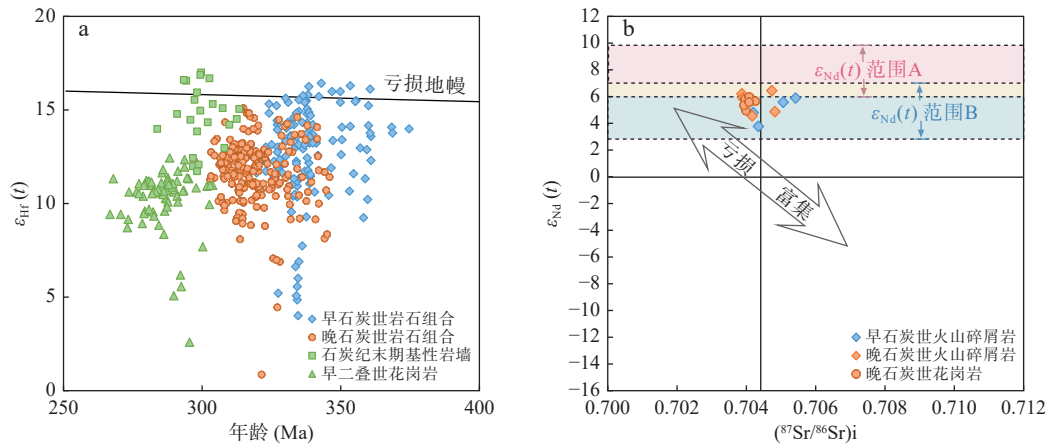


图 a 中的数据来源于参考图 4, 图 b 中的数据来自 Zhou 等(2021b, 2022)

图7 南蒙古地区石炭纪—早二叠世岩石锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ -年龄图解(a)和 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ - $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 图解(b)

Fig. 7 (a) zircon $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ -t diagram and (b) $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ - $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ diagram of Carboniferous-Early Permian rocks in South Mongolia area

屑岩(370~350 Ma)更年轻,并显示出类似的年轻的弧地球化特征:富集大离子亲石元素,亏损高场强元素,以及弱的轻稀土富集、重稀土亏损和无明显 Eu 异常(图 6c、图 6d),还有极为亏损的全岩 Nd 和锆石 Hf 同位素(图 7a、图 7b)。此外,这些火山碎屑岩的物源中还有一些寒武纪—志留纪(530~400 Ma)和元古代(1.84~1.12 Ga)地壳物质的参与(Zhou et al., 2022)。

315~310 Ma 的碱性长石花岗岩也显示出地壳来源,研究表明可能是年轻弧地体重熔的产物,具体表现为:高 SiO_2 含量,低 $\text{Mg}^\#$ 值, Pb 和 K 正异常, Nb、Ta 和 Ti 负异常以及 Ba 和 Sr 的亏损(图 6c、图 6d), Nb/Ta 值也显示出低于原始地幔和亏损地幔,以及接近年轻弧地体的全岩 Nd 和锆石 Hf 同位素特征(图 7a、图 7b)(Zhou et al., 2021b)。此外,这些岩石组合还具有正的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(5~7),表明具有亏损特征,代表了年轻物质的加入(图 7b)。综上所述,该时期南蒙古地区的构造环境为俯冲末期,处于洋-陆过渡的阶段。

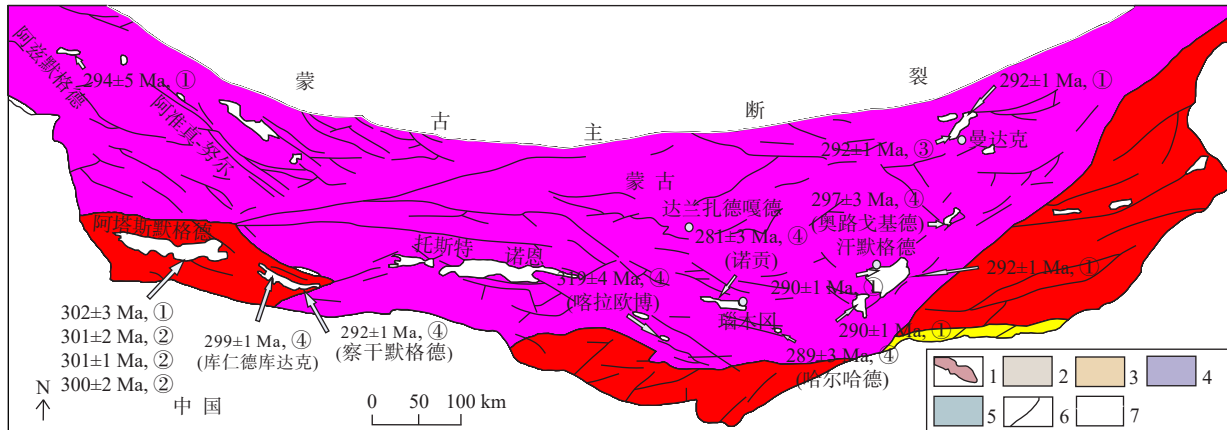
2.3 石炭纪末期-早二叠世岩浆活动及构造环境

石炭纪末期—早二叠世岩浆活动主要集中于 300~280 Ma, 广泛出露在整个南蒙古地区(表 1, 图 8)。该阶段最显著的特征是广泛出露的碱性花岗岩且伴随发育双峰式火山岩和基性岩墙(Kovalenko et al., 2006; Yarmolyuk et al., 2008b; Gerdes et al., 2017; Kozlovsky et al., 2012, 2015; Zhou et al., 2021a, 2021b)。在 TAS 图解中,这些岩石总体显示出明显的双峰式特征,即缺乏中性端元(图 4a)。上述酸性端元的岩石,包括碱性花岗岩和少量喷出岩,如流纹岩和英安岩等,显示出高硅和高碱的特征(图 4b)。在 A/NK-A/CNK

图解中,大部分岩石呈现出过碱性特征(图 5a)。结合其中的花岗岩碱性暗色矿物的出现和($>800^\circ\text{C}$)高温岩浆的特征(全岩 Zr 饱和温度计)(Watson et al., 1983)这些过碱性特征的岩石为碱性花岗岩,这与晚石炭世(315~310 Ma)呈现准铝质-弱过铝质的碱性长石花岗岩明显不同(Zhou et al., 2021b)。

此外,这些碱性花岗岩显示出 A 型花岗岩的典型特征,如含有高 SiO_2 和 $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ 含量,相对富集轻稀土元素和大离子亲石元素,亏损重稀土元素和高场强元素(图 6e、图 6f)(Whalen et al., 1987)。这种高温岩浆与晚石炭世壳源花岗岩明显不同,应该为软流圈上涌提供热量,引发大陆地壳减压熔融,最终产生大规模伸展相关的岩浆岩(Zhang et al., 2015)。Yarmolyuk 等(2008b)也表示同时期双峰式火山岩与裂谷作用有关,导致了戈壁天山裂谷带的发育。前人研究表明这种大规模伸展相关的岩浆岩属于后碰撞构造环境,且在 Rb-(Y+Nb)图解中有一部分岩石落入板内花岗岩范围内,印证了上述观点(图 5b)(Yarmolyuk et al., 2008b; Blight et al., 2010; Guy et al., 2014; Zhou et al., 2021b, 2023)。

而基性端元的岩石,显示出明显的俯冲信息的加入,以石炭纪末期(~300 Ma)岩墙为例,其具有类似于早石炭世弧火山岩的特征:如,富集大离子亲石元素,亏损高场强元素,呈现典型的轻稀土富集、重稀土亏损特征,无明显 Eu 异常等(图 6e、图 6f)。此外,这些基性岩墙的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(主要集中于 12~16),要明显高于碱性花岗岩(主要集中于 8~12),暗示可能有更深的亏损地幔源区物质的加入(图 7a)。综上所述,该



1.非造山岩浆杂岩; 2-5.不同时期中亚褶皱带的褶皱构造: 2.华力西期构造带; 3.加里东期构造带; 4.印支期构造带; 5.南戈壁微陆块与前文德期大陆地壳的块体; 6.断裂; 7.蒙古主断裂; ①标注的岩体年龄数据来自 Yarmolyuk et al., 2008b; ②标注的岩体年龄数据来自 Kröner et al., 2010; ③标注的岩体年龄数据来自 Blight et al., 2010; ④标注的岩体年龄数据来自 Kozlovsky et al., 2012

图8 南蒙古地区非造山岩浆活动示意图(据 Kozlovsky et al., 2012 修)

Fig. 8 Schematic diagram of non-orogenic magmatic activities in Southern Mongolia

时期具有高温岩浆活动和地幔物质贡献的特征,表明南蒙古地区处于碰撞后伸展的构造环境。

3 讨论

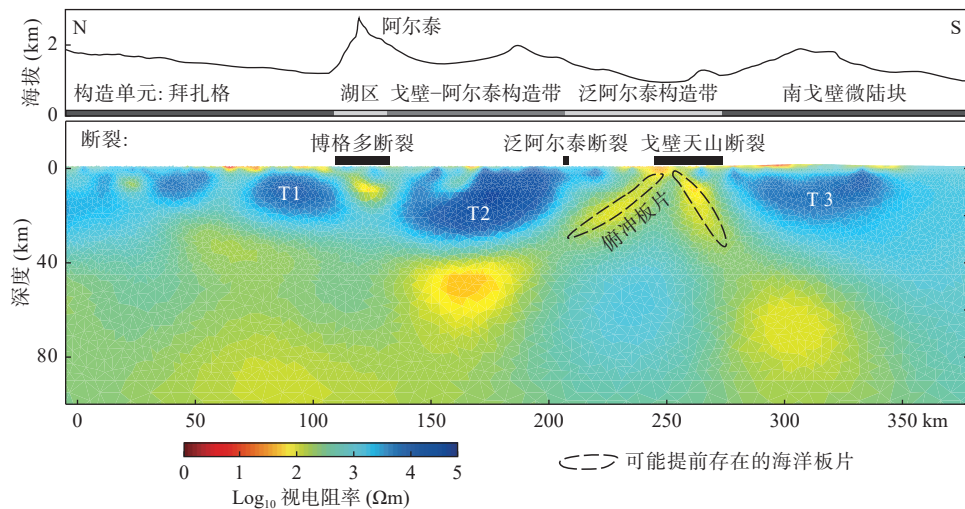
3.1 南蒙古地区泥盆纪—石炭纪弧迁移的动力学机制

南蒙古地区发育一系列志留纪—石炭纪的弧火山岩,通常认为与古亚洲洋的北向俯冲有关(Badarch et al., 2002; Kröner et al., 2010; Xiao et al., 2015, 2018)。其中,泥盆纪—石炭纪的弧火山作用主要发育在东西向展布的泛阿尔泰构造带内(Helo et al., 2006; Yarmolyuk et al., 2008b)。现有研究表明,该构造带内较老的弧岩浆岩应该发育在西北一侧附近,而靠近南部一侧则相对较年轻(Helo et al., 2006; Yarmolyuk et al., 2008a; Zhou et al., 2022)。早石炭世(350~325 Ma)弧岩浆作用的特征是以玄武岩—安山岩和英安岩—流纹岩为主的火山作用,还夹杂少部分火山碎屑岩和侵入岩体(Yarmolyuk et al., 2008b; Blight et al., 2010; Wainwright et al., 2011; Zhu et al., 2016; Davaasuren et al., 2021; Zhou et al., 2021a, 2022)。前人研究表明,火山岩中的长英质部分可能是与其玄武质部分源区相同的岩浆通过结晶分异形成的,具有典型的俯冲流体信息和年轻的(极为亏损的全岩的Nd和锆石的Hf)弧岩浆特征,大部分侵入岩也显示弧岩浆岩特征(Blight et al., 2010; Wainwright et al., 2011; Zhu et al., 2016; Davaasuren et al., 2021; Zhou et al.,

2021a)。除此之外,还有少部分酸性岩浆岩(包括少量花岗岩和安山岩样品)显示出典型的埃达克岩特征(Zhu et al., 2016; Davaasuren et al., 2021)。因此笔者认为南蒙古地区在早石炭世仍然是洋盆俯冲的构造环境。

其次,对近同时期或稍晚沉积的石炭纪火山碎屑岩的研究表明,南部的火山作用从沉积时代上和火山碎屑组分上,均年轻于北部的火山作用。同时,研究部北部具有变化范围更大且更高的 $La/Sc_{whole-rock}$, $Th/Sc_{whole-rock}$, $La/Co_{whole-rock}$, 和更低的 $Cr/Th_{whole-rock}$ 值,以及一些更高的 Hf_{zircon} , 更低的 Zr/Hf_{zircon} 和 Nb/Ta_{zircon} 比值等特征,均表明南部较年轻的火山弧岩浆活动也具有演化程度更高(即酸性成分更多)的特征(Zhou et al., 2022)。这一事实和目前泛阿尔泰构造带南部大量的酸性火山岩浆活动的报道是吻合的(Yarmolyuk et al., 2008a; Kröner et al., 2010)。结合前人认为该构造带内较老的弧岩浆作用发育在西北一侧的事实,笔者提出泛阿尔泰构造带内的弧岩浆岩具有北老南新的分布特征。也就是说,南蒙古地区泥盆纪—石炭纪的弧岩浆活动具有向南迁移的特征。

此外,大地电磁学研究表明,泛阿尔泰构造带石炭纪弧和相邻的戈壁-阿尔泰大陆边缘弧之下存在一个高角度俯冲的残余俯冲洋片(图9)(Comeau et al., 2020)。这一现象极有可能暗示了古亚洲洋次生洋盆的高角度俯冲。结合以上证据,笔者支持俯冲板片后撤是造成南蒙古地区泥盆纪—石炭纪弧火山作用迁移的动力学机制。



T1、T2、T3 分别代表湖区微陆块、戈壁阿尔泰大陆边缘和南蒙古微陆块

图9 南蒙古地区大地电磁阻抗的二维模型(据 Comeau et al., 2020 修)

Fig. 9 Two-dimensional model of magnetotelluric impedance in Southern Mongolia

3.2 南蒙古地区泥盆纪—石炭纪弧的性质和成因

关于该岩浆弧的性质, Zhou 等 (2021a) 从玄武岩样品中捕获的前寒武纪锆石 (MG19-1, 2.5~1.9 Ga) 的存在表明与古老大陆的可能联系。综合上述证据, 笔者初步推测泛阿尔泰构造带是发育在其以北的戈壁—阿尔泰奥陶纪—志留纪大陆边缘弧之上的早石炭世 (350~324 Ma) 火山弧。此外, 前述的石炭纪火山碎屑岩的物源区中除了有泥盆系—石炭系火山弧岩浆岩之外, 还有少量的寒武纪—志留纪和元古代地壳物质 (Zhou et al., 2022)。综合上述证据, 泛阿尔泰构造带应该是发育在其以北的戈壁—阿尔泰奥陶纪—志留纪大陆边缘弧之上的泥盆纪—石炭纪 (410~325 Ma) 火山弧。

如前所述, 南蒙古地区泛阿尔泰构造带内的玄武岩-安山岩均显示正 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ (大多数 >10), 而 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 接近的长英质部分的火山岩是其结晶分异的产物。因此, 在南蒙古地区的弧火山作用有显著的地幔贡献, 即泥盆纪—石炭纪南蒙古地区地壳发生了显著的侧向增生, 而类似的俯冲板片后撤引起增生型弧岩浆在研究区西侧的哈萨克斯坦山弯的弧体系 (如准噶尔弧, 北天山弧等) 中 (Tang et al., 2017; 陈维民等, 2017; 滕飞等, 2017; Zhang et al., 2018; Han et al., 2018) 和研究区东侧的内蒙古中部地区 (Xu et al., 2019) 均有报道。据此, 笔者支持前期提出的观点, 即这期大规模分布在 中亚造山带南缘的俯冲板片后撤引起的侧向增生应该与古亚洲洋主洋盆以北多个次生弧后洋盆的俯

冲后撤有关。

3.3 南蒙古地区泥盆纪—石炭纪弧岩浆作用的结束方式

在整个南蒙古地区, 晚石炭世—早二叠世大规模出露以高硅花岗岩为主的酸性侵入岩, 其时代基本集中在 320~280 Ma (Kovalenko et al., 2006; Yarmolyuk et al., 2008b)。相比于泥盆纪—石炭纪弧岩浆活动中显示的显著地幔参与, 在南蒙古泛阿尔泰构造带和南戈壁微陆块之上广泛出露的晚石炭世 (315~310 Ma) 碱性长石花岗岩为主的壳源岩浆岩 (Yarmolyuk et al., 2008b; Kröner et al., 2010; Zhou et al., 2021b, 2023)。而更晚的石炭纪末—早二叠世 (300~280 Ma) 花岗岩则主要为和伸展活动相关的成因 (Kovalenko et al., 2006; Yarmolyuk et al., 2008b; Zhou et al., 2021b, 2023)。鉴于从晚石炭世 (315~310 Ma) 开始, 弧相关岩浆活动的出露极为有限 (Yarmolyuk et al., 2008b; Zhou et al., 2021b)。因此, 这些晚石炭世 (315~310 Ma) 陆壳重融型花岗岩应该暗示了俯冲大洋板片显著消耗的结束 (图 10a)。

~300 Ma 的基性岩墙群显示出明显高于其他同时期岩浆活动的锆石 Hf 同位素值, 暗示可能有更深的亏损地幔源区物质的加入。而 290~280 Ma 的碱性花岗岩显示出 A 型岩浆岩的地球化学特征。这种类似的 A 型岩浆作用除了在泛阿尔泰构造带之外, 在其北侧的戈壁—阿尔泰构造带和南侧的南戈壁微陆块中也有很好的记录 (Yarmolyuk et al., 2008a;

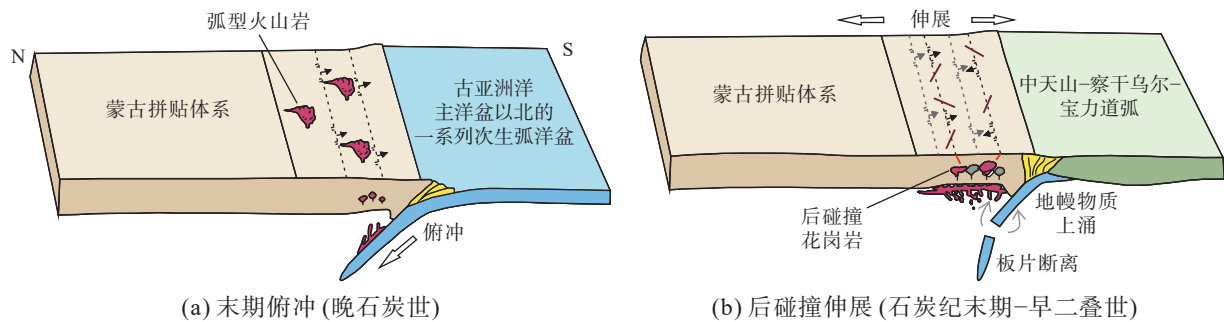


图10 中亚造山带南缘南蒙古地区晚石炭—早二叠世构造演化示意图(据 Zhou et al., 2021a 修改)

Fig. 10 Late Carboniferous-Early Permian tectonic evolution of the southern Mongolia in the Central Asian orogenic Belt

Blight et al., 2010; Kröner et al., 2010)。此外,南蒙古地区在早二叠世有一系列双峰式岩浆活动以及基性岩墙群,如南蒙古地区西部阿塔格德地区~300 Ma 的双峰式岩浆岩(Yarmolyuk et al., 2008a),南蒙古地区东部汗默格德地区~290 Ma 的双峰式火山岩组合(Kovalenko et al., 2010),南蒙古地区东部靠近中国内蒙古中段的扎门乌德地区 305~300 Ma 的双峰式岩浆(Hu et al., 2017)。与上述晚石炭世(315~310 Ma)岩浆作用相比,整个南蒙古地区石炭纪末期—早二叠世(300~280 Ma)岩浆活动显示出地幔物质上涌以及深部异常的热源加入的特征。目前,对于地幔物质上涌的构造模式一般有拆沉(Meissner et al., 1998)、洋中脊俯冲(Windley et al., 2018)以及俯冲板片断离(Davies et al., 1995)等模式。南蒙古地区几乎没有关于加厚地壳存在的岩石记录,如陆壳型埃达克岩的出现(Chung et al., 2003),笔者排除了加厚地壳拆沉的模式。而洋中脊俯冲通常会伴随埃达克岩出现(Windley et al., 2018),基于石炭纪末期南蒙古地区尚无上述岩浆活动的报道,笔者认为洋中脊俯冲的可能性不高。依据地球物理数据揭示的石炭纪俯冲带下方可能存在的断离板片(图9)以及上述的弧岩浆活动的减少指示的俯冲洋壳显著消耗的结束,笔者认为这些 300~280 Ma 伸展相关的岩浆作用可能是由俯冲板片断离引起。且 Yarmolyuk 等(2008b)表示中亚造山带二叠纪—侏罗纪有大量造山后年轻的花岗岩侵入,认为是板片断离导致的地幔物质向地壳的主要转移。进一步,基于前述的整个中亚造山带南缘石炭纪发生的板片后撤(Xiao et al., 2015),笔者的前期工作(Zhou et al., 2021b)推测该俯冲板片断离可能由于俯冲板片后撤之后造成的高角度俯冲引发的(图10b)。此外,上述俯冲板片断离过程前后的岩浆活动其锆石 Hf 同位素均为极正的值,暗示了

整体年轻的陆壳组成。这和发生在古老陆壳之下的俯冲板片断离的岩浆活动具有明显不同的锆石 Hf 同位素,即整体为负的 Hf 同位素组成中伴随明显亏损的正的 Hf 同位素组成(Zhou et al., 2019)。

3.4 中亚造山带最后一次大规模增生及其结束

在南蒙古东侧的中国内蒙古中段地区,石炭纪末期—早二叠世(300~280 Ma)的火山碎屑岩和碎屑岩(Xu et al., 2019; Lu et al., 2020),针对大规模分布的 A 型花岗岩(Zhang et al., 2015; Wei et al., 2018)和基性岩墙(Liu et al., 2021)等的相关研究,也揭示出类似的板片断离相关的伸展环境,暗示南蒙古拼贴体系内的古亚洲洋次生洋盆在石炭纪末期已经闭合。在研究区西侧的哈萨克斯坦山弯内的北天山弧、准噶尔弧体系内也具有上述类似的岩石类型转变,即从典型的弧岩浆转变为板片断离引起的伸展相关的岩石组合(Zhang et al., 2016; 陈维民等, 2017; 滕飞等, 2017; Du et al., 2018; Long et al., 2020)。上述证据暗示了古亚洲洋最终缝合带以北的多个次生弧后洋盆的强烈收缩乃至闭合。

此外,最近报道的古地磁研究表明,位于最终缝合带以南的华北拼贴体系和最终缝合带以北的蒙古拼贴体系的古纬度在~290 Ma 有显著的接近(Zhang et al., 2021)。而沉积和古生物研究也表明,蒙古拼贴体系内的冷水生物群和华北拼贴体系的暖水生物群在石炭纪之后(275~260 Ma)开始混生,且洋盆面积急剧减少(Niu et al., 2021)。这些多方面的证据均表明石炭纪之后伴随着众多次生弧后洋盆关闭的古亚洲洋洋盆面积剧烈收缩的发生。因此,尽管在石炭纪之后古亚洲洋主洋盆可能仍然在持续俯冲(Xiao et al., 2015),但是古亚洲洋主洋盆面积剧烈收缩和同时期伴随众多次生洋盆的关闭导致弧后洋盆相关的大规模侧向增生停止。据此,笔者的前期工作认为本次发

生在弧后(次生)洋盆大规模侧向增生是中亚造山带最后一次大规模的侧向增生,而俯冲板片断离则是其结束的标志(Zhou et al., 2021a, 2022)。鉴于俯冲板片断离过程中有一定的地幔物质的加入和在中亚造山带南缘的普遍发育,笔者认为其是中亚造山带末期演化中一种重要的地壳垂向增生机制。

4 结论

(1)南蒙古地区早石炭世(350~325 Ma)岩浆活动以弧岩浆岩为主,全岩 Nd 和锆石 Hf 同位素显示其主体具有显著的地幔贡献,且含有一定的大陆地球化学信息和古老的碎屑锆石年龄信息,因此很可能是在大陆弧环境中形成的;此外还有少量俯冲洋壳部分熔融形成的埃达克岩,表明南蒙古地区该阶段处于俯冲洋盆环境之下。通过对泛阿尔泰构造带南北部的火山碎屑岩进行分析发现泥盆纪—早石炭世火山弧岩浆活动具有向南迁移的特征,结合南蒙古拼合体系大地电磁数据揭示的高角度俯冲的特征和前人关于古亚洲洋主洋盆多期次俯冲板片后撤的模型,笔者倾向于认为该侧向增生的形成机制为南蒙古地区古亚洲洋主洋盆的次生弧后洋盆的俯冲板片后撤。而同时期类似的弧后洋盆后撤增生在研究区东西两侧,即整个中亚造山带南缘均有发育且在石炭纪之后停止,因此代表了中亚造山带南缘最后一次大规模侧向增生。

(2)晚石炭世(320~305 Ma)岩浆活动以高硅花岗岩为主,还有少量火山碎屑岩。相比于早石炭世,该时期弧岩浆岩的成熟度更高。此外,315~310 Ma 的碱性长石花岗岩是年轻弧地体重熔的产物,加之这时弧相关岩浆活动的急剧减少,暗示了俯冲大洋板片显著消耗的结束,表明南蒙古地区在该阶段处于俯冲末期的构造环境。

(3)石炭纪末期—早二叠世(300~280 Ma)发育伸展相关岩浆活动,以 A 型花岗岩为主,同时期伴随发育双峰式火山岩和基性岩墙。结合大地电磁数据揭示的残余俯冲板片信息,这些岩石组合很可能和俯冲板片断离造成的地幔物质上涌有关。而研究区东西两侧,即整个中亚造山带南缘都有俯冲板片断离机制造成的岩浆岩、沉积岩等多方面的证据。上述现象暗示了古亚洲洋主洋盆以北多个次生的弧后洋盆闭合后板片断离的发生。鉴于在中亚造山带演化的最

后阶段涉及多期次的俯冲,笔者认为俯冲板片断离在地壳的晚石炭世—早二叠世俯冲板片断离标志着中亚造山带南缘最后一次大规模侧向增生的结束且是一种重要的垂向增生方式。

致谢:本研究受国家自然科学基金(42102260、41730213、41890831、42072267 和 41972229),长安大学中央高校基本科研业务专项资金-高新技术研究支持计划培养项目(300102272204),裘槎基金会 Croucher Chinese Visitorships(2022-2023)和陕西高校青年创新团队 The Youth Innovation Team of Shaanxi Universities 联合资助。感谢匿名审稿人的修改意见和建议!

参考文献(References):

- 陈维民, 白建科, 仇银江, 等. 西天山特克斯地区哈拉达拉基性岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J]. *西北地质*, 2017, 50(02): 69-79.
- CHEN Weimin, BAI Jianke, CHOU Yinjiang, et al. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Dating of the Haladala Basic Pluton in Tekesi County, Western Tianshan and Its Geological Implication[J]. *Northwestern Geology*, 2017, 50(02): 69-79.
- 付超, 李俊建, 张帅, 等. 中蒙边界地区侵入岩时空分布特征及对构造演化的启示[J]. *华北地质*, 2023, 46(1): 1-19.
- FU Chao, LI Junjian, ZHANG Shuai, et al. The temporal and spatial distribution characteristics of intrusive rocks in the border area between China and Mongolia and its implications for tectonic evolution[J]. *North China Geology*, 2023, 46(1): 1-19.
- 滕飞, 苏春乾, 夏明哲, 等. 北天山东段石英滩地区早二叠世火山岩岩石组合与岩浆生成动力学机制[J]. *西北地质*, 2017, 50(01): 110-125.
- TENG Fei, SU Chunqian, XIA Mingzhe, et al. The Early Permian Volcanic Rock Association and the Dynamics Mechanism for the Magma Generation in the Shiyintang Area, Eastern Tianshan[J]. *Northwestern Geology*, 2017, 50(01): 110-125.
- 王博, 赵国春. 古亚洲洋的最终闭合时限: 来自白乃庙岛弧带东段二叠纪—三叠纪岩浆作用的证据[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 2021, 51(06): 1019-1030.
- WANG Bo, ZHAO Guochun. Final closure of the Paleo-Asian ocean: Constraints from permian-triassic magmatism in the eastern segment of the Bainaimiao Arc Belt[J]. *Journal of northwest university (natural science edition)*, 2021, 51(06): 1019-1030.
- 肖文交, 宋东方, Windley B F, 等. 中亚增生造山过程与成矿作用研究进展[J]. *中国科学: 地球科学*, 2014, 49(10): 1512-1545.
- XIAO Wenjiao, SONG Dongfang, Windley B F, et al. Research progress of accretive orogeny and mineralization in Central Asia[J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2014, 49(10): 1512-1545.

- 张永玲, 张治国, 刘希军, 等. 内蒙朝克山辉长岩中单斜辉石矿物化学特征及地质意义[J]. 西北地质, 2024, 57(1): 122–138.
- ZHANG Yongling, ZHANG Zhiguo, LIU Xijun, et al. Mineralogical Chemistry Characteristics and Geological Significance of the Clinopyroxene from Chaokeshan Gabbro, Inner Mongolia[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(1): 122–138.
- Badarch G, Cunningham W D, Windley B F. A new terrane subdivision for Mongolia: implications for the Phanerozoic crustal growth of Central Asia[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2002, 21(1): 87–110.
- Blight J H S, Crowley Q G, Petterson M G, et al. Granites of the Southern Mongolia Carboniferous Arc: New geochronological and geochemical constraints[J]. *Lithos*, 2010, 116(1–2): 35–52.
- Comeau M J, Becken M, Kauf J S, et al. Evidence for terrane boundaries and suture zones across Southern Mongolia detected with a 2-dimensional magnetotelluric transect[J]. *Earth Planets and Space*, 2020, 72(1): 87–110.
- Chai H, Ma Y F, Santosh M, et al. Late Carboniferous to early Permian oceanic subduction in central Inner Mongolia and its correlation with the tectonic evolution of the southeastern Central Asian Orogenic Belt[J]. *Gondwana Research*, 2020, 84: 245–259.
- Chen B, Arakawa Y. Elemental and Nd-Sr isotopic geochemistry of granitoids from the West Junggar foldbelt (NW China), with implications for Phanerozoic continental growth[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2005, 69(5): 1307–1320.
- Chung S L, Liu D, Ji J, et al. Adakites from continental collision zones: Melting of thickened lower crust beneath southern Tibet[J]. *Geology*, 2003, 31(11): 1021–1024.
- Davies J H, Blanckenburg F V. Slab breakoff: A model of lithosphere detachment and its test in the magmatism and deformation of collisional orogens[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1995, 129(1–4): 85–102.
- Davaasuren O E, Koh S M, Kim N, et al. Late Paleozoic adakitic magmatism in the Zogdor Cu occurrences, southern Mongolia, and their tectonic implications: New SHRIMP zircon age dating, Lu-Hf isotope systematics and geochemical constraints[J]. *Ore Geology Reviews*, 2021, 138: 104356.
- Du L, Long X P, Yuan C, et al. Petrogenesis of Late Paleozoic diorites and A-type granites in the central Eastern Tianshan, NW China: Response to post-collisional extension triggered by slab breakoff[J]. *Lithos*, 2018, 318–319: 47–59.
- Eby G N. Chemical subdivision of the A-type granitoids: Petrogenetic and tectonic implications[J]. *Geology*, 1992, 20(7): 641–644.
- Jahn B M. The Central Asian Orogenic Belt and growth of the continental crust in the Phanerozoic[J]. *Geological Society London Special Publications*, 2004, 226(1): 73–100.
- Jian P, Liu D, Kröner A, et al. Evolution of a Permian intraoceanic arc-trench system in the Solonker suture zone, Central Asian Orogenic Belt, China and Mongolia[J]. *Lithos*, 2010, 118(1–2): 169–190.
- Han Y G, Zhao G C. Final amalgamation of the Tianshan and Junggar orogenic collage in the southwestern Central Asian Orogenic Belt: Constraints on the closure of the Paleo-Asian Ocean[J]. *Earth-Science Reviews*, 2018, 186: 129–152.
- Helo C, Hegner E, Kröner A, et al. Geochemical signature of Paleozoic accretionary complexes of the Central Asian Orogenic Belt in South Mongolia: Constraints on arc environments and crustal growth[J]. *Chemical Geology*, 2006, 227(3): 236–257.
- Hrdličková K, Bolormaa K, Buriánek D, et al. Petrology and age of metamorphosed rock in tectonic slices inside the Palaeozoic sediments of the eastern Mongolian Altay, SW Mongolia[J]. *Journal of Geosciences*, 2008, 53: 139–165.
- Hu C S, Li W B, Huang Q Y, et al. Geochemistry and petrogenesis of Late Carboniferous igneous rocks from southern Mongolia: Implications for the post-collisional extension in the southeastern Central Asian Orogenic Belt[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2017, 144: 141–154.
- Gerdes A, Kogarko L N, Vladyskin N V. New data on the age and nature of the Khan-Bogd alkaline granites, Mongolia[J]. *Doklady Earth Sciences*, 2017, 477(1): 1320–1324.
- Guy A, Schulmann K, Clauer N, et al. Late Paleozoic–Mesozoic tectonic evolution of the Trans-Altai and South Gobi Zones in southern Mongolia based on structural and geochronological data[J]. *Gondwana Research*, 2014, 25(1): 309–337.
- Kozlovsky A M, Yarmolyuk V V, Travin A V, et al. Stages and regularities in the development of Late Paleozoic anorogenic volcanism in the southern Mongolia Hercynides[J]. *Doklady Earth Sciences*, 2012, 445(1): 811–817.
- Kozlovsky A M, Yarmolyuk V V, Sal'nikova E B, et al. Late Paleozoic anorogenic magmatism of the Gobi Altai (SW Mongolia): Tectonic position, geochronology and correlation with igneous activity of the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 113(1): 524–541.
- Kovalenko V I, Yarmoluyk V V, Sal'nikova E B, et al. Geology, Geochronology, and Geodynamics of the Khan Bogd Alkali Granite Pluton in Southern Mongolia[J]. *Geotectonics*, 2006, 40(6): 450–446.
- Kovalenko V I, Kozlovsky A M, Yarmolyuk V V. Comendite-Bearing Subduction Related Volcanic Associations in the Khan-Bogd Area, Southern Mongolia: Geochemical Data[J]. *Petrology*, 2010, 18(6): 571–595.
- Kröner A, Lehmann J, Schulmann K, et al. Lithostratigraphic and Geochronological Constraints on the Evolution of the Central Asian Orogenic Belt in SW Mongolia: Early Paleozoic Rifting Followed by Late Paleozoic Accretion[J]. *American Journal of Science*, 2010, 310(7): 523–574.

- Kröner A, Kovach V, Belousova E, et al. Reassessment of continental growth during the accretionary history of the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Gondwana Research*, 2014, 25(1): 103–125.
- Lehmann J, Schulmann K, Lexa O, et al. Structural constraints on the evolution of the Central Asian Orogenic Belt in SW Mongolia[J]. *American Journal of Science*, 2010, 61: 135–140.
- Li S, Chung S L, Wilde S A, et al. Early-Middle Triassic high Sr/Y granitoids in the southern Central Asian Orogenic Belt: Implications for ocean closure in accretionary orogens[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2017, 122: 2291–2309.
- Liu H D, Cheng Y H, Santosh M, et al. Magmatism associated with lithospheric thinning, mantle upwelling, and extensional tectonics: Evidence from Carboniferous-Permian dyke swarms and granitoids from Inner Mongolia, Central Asian Orogenic Belt[J]. *Lithos*, 2021, 386: 106004.
- Long X P, Wu B, Sun M, et al. Geochronology and geochemistry of Late Carboniferous dykes in the Aqishan-Yamansu belt, Eastern Tianshan: evidence for a post-collisional slab breakoff[J]. *Geoscience Frontiers*, 2020, 11(1): 347–362.
- Lu L, Qin Y, Han C Y, et al. Provenance and tectonic settings of the Late Paleozoic sandstones in central Inner Mongolia, NE China: Constraints on the evolution of the southeastern Central Asian Orogenic Belt[J]. *Gondwana Research*, 2020, 77: 111–135.
- Meissner R, Mooney W. Weakness of the lower continental crust: a condition for delamination, uplift, and escape[J]. *Tectonophysics*, 1998, 296: 47–60.
- Meng Q R. What drove late Mesozoic extension of the northern China-Mongolia tract[J]. *Tectonophysics*, 2003, 369(3): 155–174.
- Middlemost E A K. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. *Earth-Science Reviews*, 1994, 37(3–4): 215–224.
- Miniar P D, Piccoli P M. Tectonic discrimination of granitoids[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1989, 101(5): 635–643.
- Niu Y Z, Shi G R, Ji W H, et al. Paleogeographic evolution of a Carboniferous–Permian sea in the southernmost part of the Central Asian Orogenic Belt, NW China: Evidence from microfacies, provenance and paleobiogeography[J]. *Earth-Science Reviews*, 2021, 220: 103738.
- Peccerillo A, Taylor S R. Geochemistry of Eocene calcalkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1976, 58(1): 63–81.
- Safonova I, Maruyama S. Asia: a frontier for a future supercontinent Amasia[J]. *International Geology Review*, 2014, 56(9): 1051–1071.
- Sengör A C, Natal'in B A, Burtman V S. Evolution of the Altaid tectonic collage and Palaeozoic crustal growth in Eurasia[J]. *Nature*, 1993, 364: 299–306.
- Shu L S, Zhu W B, Wang B, et al. The post-collision intracontinental rifting and olistostrome on the southern slope of Bogda Mountains, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2005, 21(1): 25–36.
- Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[J]. *Geological Society London Special Publications*, 1989, 42: 313–345.
- Tang G J, Chung S L, Hawkesworth C J, et al. Short episodes of crust generation during protracted accretionary processes: Evidence from Central Asian Orogenic Belt, NW China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2017, 464: 142–154.
- Wainwright A J, Tosdal R M, Wooden J L, et al. U–Pb (zircon) and geochemical constraints on the age, origin, and evolution of Paleozoic arc magmas in the Oyu Tolgoi porphyry Cu–Au district, southern Mongolia[J]. *Gondwana Research*, 2011, 19(3): 764–787.
- Watson E B, Harrison T M. Zircon saturation revisited: temperature and composition effects in a variety of crustal magma types[J]. *Earth Planetary Science Letters*, 1983, 64: 295–304.
- Wei R H, Gao Y F, Xu S C, et al. Carboniferous continental arc in the Hegenshan accretionary belt: Constrains from plutonic complex in central Inner Mongolia[J]. *Lithos*, 2018, 308–309: 242–261.
- Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1987, 95(4): 407–419.
- Windley B F, Alexeiev D, Xiao W J, et al. Tectonic models for accretion of the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Journal of the Geological Society*, 2007, 164(1): 31–47.
- Windley B F, Xiao W J. Ridge subduction and slab windows in the Central Asian Orogenic Belt: Tectonic implications for the evolution of an accretionary orogen[J]. *Gondwana Research*, 2018, 61: 73–87.
- Xiao W J, Windley B F, Hao J, et al. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China: Termination of the central Asian orogenic belt[J]. *Tectonics*, 2003, 22(6): 1484–1505.
- Xiao W J, Zhang L C, Qin K Z, et al. Paleozoic accretionary and collisional tectonics of the eastern Tianshan (China): Implications for the continental growth of central Asia[J]. *American Journal of Science*, 2004, 304(4): 370–395.
- Xiao W J, Windley B F, Sun S, et al. A Tale of Amalgamation of Three Permo-Triassic Collage Systems in Central Asia: Orogens, Sutures, and Terminal Accretion[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2015, 43(1): 477–507.
- Xiao W J, Windley B F, Han C M, et al. Late Paleozoic to early Triassic multiple roll-back and oroclinal bending of the Mongolia collage in Central Asia[J]. *Earth-Science Reviews*, 2018, 186:

- 94–128.
- Xu B, Zhao G C, Li J H, et al. Ages and Hf isotopes of detrital zircons from the Permian strata in the Bengbatu are (Inner Mongolia) and tectonic implications[J]. *Geoscience Frontiers*, 2019, 10(1): 195–212.
- Yang S H, Miao L C, Zhang F C, et al. Detrital zircon age spectra of the Gurvan Sayhan accretionary complex in South Mongolia: Constraints on the Late Paleozoic evolution of the southern Central Asian Orogenic Belt[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2019, 175: 213–229.
- Yarmolyuk V V, Kovalenko V I, Sal'nikova E B, et al. Geochronology of igneous rocks and formation of the late Paleozoic south Mongolian active margin of the Siberian continent[J]. *Stratigraphy and Geological Correlation*, 2008a, 16(2): 162–181.
- Yarmolyuk V V, Kovalenko V I, Kozlovsky A M, et al. Crust-forming processes in the Hercynides of the Central Asian Foldbelt[J]. *Petrology*, 2008b, 16(7): 679–709.
- Yarmolyuk V V, Kuzmin M I, Kozlovsky A M. Late Paleozoic-Early Mesozoic Within Plate Magmatism in North Asia: Traps, Rifts, Giant Batholiths, and the Geodynamics of Their Origin[J]. *Petrology*, 2013, 21(2): 115–142.
- Yarmolyuk V V, Kozlovsky A M, Travina A V. Late Paleozoic anorogenic magmatism in Southern Mongolia: Evolutionary stages and structural control[J]. *Doklady Earth Sciences*, 2017, 475(1): 753–757.
- Zhang D H, Huang B C, Zhao G C, et al. Quantifying the extent of the Paleo-Asian Ocean during the Late Carboniferous to Early Permian[J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48(15): e2021GL094498.
- Zhang S H, Zhao Y, Liu J M, et al. Different sources involved in generation of continental arc volcanism: The Carboniferous–Permian volcanic rocks in the northern margin of the North China block[J]. *Lithos*, 2016, 240–243: 382–401.
- Zhang X H, Yuan L L, Xue F H, et al. Early Permian A-type granites from central Inner Mongolia, North China: Magmatic tracer of post-collisional tectonics and oceanic crustal recycling[J]. *Gondwana Research*, 2015, 28(1): 311–327.
- Zhang Y Y, Sun M, Yuan C, et al. Alternating Trench Advance and Retreat: Insights from Paleozoic Magmatism in the Eastern Tianshan, Central Asian Orogenic Belt[J]. *Tectonics*, 2018, 37: 2142–2164.
- Zhao G C, Wang Y J, Huang B C, et al. Geological reconstructions of the East Asian blocks: From the breakup of Rodinia to the assembly of Pangea[J]. *Earth-Science Reviews*, 2018, 186: 262–286.
- Zhou H, Zhao G C, Han Y G, et al. Geochemistry and zircon U–Pb–Hf isotopes of Paleozoic intrusive rocks in the Damao area in Inner Mongolia, northern China: Implications for the tectonic evolution of the Bainaimiao arc[J]. *Lithos*, 2018, 314–315: 119–139.
- Zhou H, Zhao G C, Li J H, et al. Magmatic evidence for middle-late Permian tectonic evolution on the northern margin of the North China Craton[J]. *Lithos*, 2019, 336–337: 125–142.
- Zhou H, Zhao G C, Han Y G, et al. The Late Carboniferous to Early Permian high silica magmatism in the Southern Mongolia: Implications for tectonic evolution and continental growth[J]. *Gondwana Research*, 2021a, 97: 34–50.
- Zhou H, Zhao G C, Han Y G, et al. Magmatic evidence for Late Carboniferous–Early Permian slab breakoff and extension of the southern Mongolia collage system in Central Asia[J]. *Gondwana Research*, 2021b, 89: 105–118.
- Zhou H, Zhao G C, Han Y G, et al. Carboniferous slab-retreating subduction of backarc oceans: the final large-scale lateral accretion of the southern Central Asian Orogenic Belt[J]. *Science Bulletin*, 2022, 67(13): 1388–1398.
- Zhou H, Zhao G C, Han Y G, et al. The early Permian high-temperature felsic magmatism induced by slab breakoff in Southern Mongolia, Central Asian Orogenic Belt and its tectonic implications[J]. *Lithos*, 2023, 442–443: 107083.
- Zhu M S, Baatar M, Miao L C, et al. Zircon ages and geochemical compositions of the Manlay ophiolite and coeval island arc: Implications for the tectonic evolution of South Mongolia[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, 96(15): 108–122.
- Zhu M S, Miao L C, Baatar M, et al. Late Paleozoic magmatic record of Middle Gobi area, South Mongolia and its implications for tectonic evolution: Evidences from zircon U–Pb dating and geochemistry[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2016, 115: 507–519.