

doi: 10.12097/gbc.2024.08.028

阿拉善南部地区石炭纪—二叠纪期间的构造体制转换

郑荣国, 张进

ZHENG Rongguo, ZHANG Jin

中国地质科学院地质研究所/自然资源部深地科学与探测技术实验室, 北京 100037

Chinese Academy of Geological Sciences/SinoProbe Laboratory/Institute of Geology, Beijing 100037, China

摘要: 阿拉善地区位于中亚造山带南缘中段, 该地区出露大量古生代的蛇绿混杂岩、增生杂岩和岩浆岩, 记录了古亚洲洋闭合过程对大陆地壳的改造。本文系统总结了阿拉善南部地区蛇绿混杂岩及石炭纪—早三叠世岩浆岩的研究进展, 收集整理了该地区岩浆岩的年代学、全岩地球化学和同位素数据。结果发现, 阿拉善南部地区分布有早二叠世俯冲相关蛇绿混杂岩, 中、晚二叠世高镁安山岩和埃达克岩, 表明该地区的古大洋在晚二叠世尚未闭合。阿拉善南部地区岩浆岩的时空分布反映出该地区岩浆岩带向北西方向迁移的特征, 揭示了阿拉善地块晚古生代向北增生的过程。阿拉善南部地区从早石炭世的前进型俯冲带转换为晚石炭世—二叠纪的后撤型俯冲带。

关键词: 阿拉善; 中亚造山带; 蛇绿混杂岩; 后撤型俯冲带

中图分类号: P54 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2024)12-2190-14

Zheng R G, Zhang J. Tectonic switching during Carboniferous-Early Triassic within the southern Alxa. *Geological Bulletin of China*, 2024, 43(12): 2190-2203

Abstract: Numerous Paleozoic ophiolitic mélangé, accretionary complex and plutons are exposed in the Alxa region, located in the central segment of the Central Asian Orogenic Belt, which may record the reworking process of continental crust during the closure of the Paleo-Asian Ocean. In this study, we collected and compiled new published data of zircon U-Pb age, whole-rock major and trace element and zircon Hf isotope for ophiolitic mélangé and plutons in the southern Alxa. Based on these new data, we propose that Permian SSZ-type ophiolitic mélangé and Middle-Late Permian high-Mg diorites and adakites support the hypothesis that a Permian oceanic slab subduction in the southern Alxa. The zircon U-Pb ages of Carboniferous-Permian magmatism show a younging trend toward the northwest in the southern Alxa region, indicating a northward accretion of the Alxa Block. Temporal-spatial variations of zircon Hf isotope for plutons suggest tectonic switching from advancing to retreating subduction during Carboniferous-Early Triassic within the southern Alxa.

Key words: Alxa; Central Asian Orogenic Belt; ophiolitic mélangé; retreating subduction

大陆地壳生长一直是固体地球科学领域经久不衰的研究主题, 增生型造山作用作为一种特殊的造山类型, 以显著的大陆地壳侧向增生和垂向增生过程为主要特征, 对大陆地壳的生长具有重要贡献

(Sengör et al., 1991; Jahn et al., 2000), 一直以来吸引了众多地质学家开展相应的研究工作。在增生型造山过程中, 广泛发育岩浆岩带向洋迁移, 并伴随新生地壳和外来微陆块在板块边缘的拼贴过程, 使陆壳发

收稿日期: 2024-08-17; 修订日期: 2024-10-19

资助项目: 国家自然科学基金项目《阿拉善地区增生杂岩对岩浆岩带向洋迁移机制的制约》(批准号: 42272268)和中国地质调查局项目《古生代—中生代中亚造山带中段洋-陆转换专题地质调查》(编号: DD20230217)

作者简介: 郑荣国(1987-), 男, 副研究员, 从事造山作用与大陆地壳演化方面的研究工作。E-mail: rgzheng@163.com

生显著的侧向生长(Moresi et al., 2014)。例如,位于澳大利亚东南部的塔斯马尼亚造山系统,是发育在元古宙克拉通基底上的增生型造山带。在塔斯马尼亚造山系统中发育有持续近 200 Ma 的岩浆活动,并表现出从大陆基底不断向大洋方向迁移的特征,形成了不同时代的造山带(Collins, 2002; Spencer et al., 2017; Collins et al., 2020)。该向洋迁移的造山过程形成了澳大利亚大陆近 1/3 的面积(Spencer et al., 2017)。

中亚造山带由一系列增生杂岩、岛弧/陆缘弧、蛇绿岩混杂岩、前寒武纪微陆块、及被动大陆边缘沉积物不断拼贴聚合而成,记录了古亚洲洋长达数亿年的演化历史,反映出极复杂的大陆地壳增生过程(Sengör et al., 1991; Jahn et al., 2000; Windley et al., 2007; Xiao et al., 2015, 2018)。在中亚造山带中,普遍出现岩浆岩带向大洋一侧迁移的现象,在迁移过程中伴随增生杂岩的大量生长(Sengör et al., 1991,

1996)。具体表现为,岩浆岩带通常以不连续跳跃的方式向大洋一侧迁移,在强烈变形的增生基底中形成大范围的弧岩浆岩,并且在迁移的岩浆岩带之间形成大量的增生杂岩(Sengör et al., 1996)。

已有研究发现,在古亚洲洋闭合过程中,西伯利亚克拉通边缘发生了明显的向南(现今方位)的大陆地壳增生,表现为围绕西伯利亚克拉通,增生杂岩不断向洋迁移(图 1; Sengör et al., 1991, 1996)。位于古亚洲洋南侧的大陆(如阿拉善地块等)北缘(现今方位),在古亚洲洋闭合过程中是否发生了类似的向洋增生,目前尚不清楚。此外,关于大陆增生的时限问题也存在争议。以阿拉善南部地区为例,其在二叠纪处于何种构造环境这一科学问题,不同学者提出了不同的认识。一种观点认为,阿拉善南部地区在二叠纪处于大洋俯冲环境(Feng et al., 2013; Lin et al., 2014; Zheng et al., 2014, 2019b, 2022);也有观点

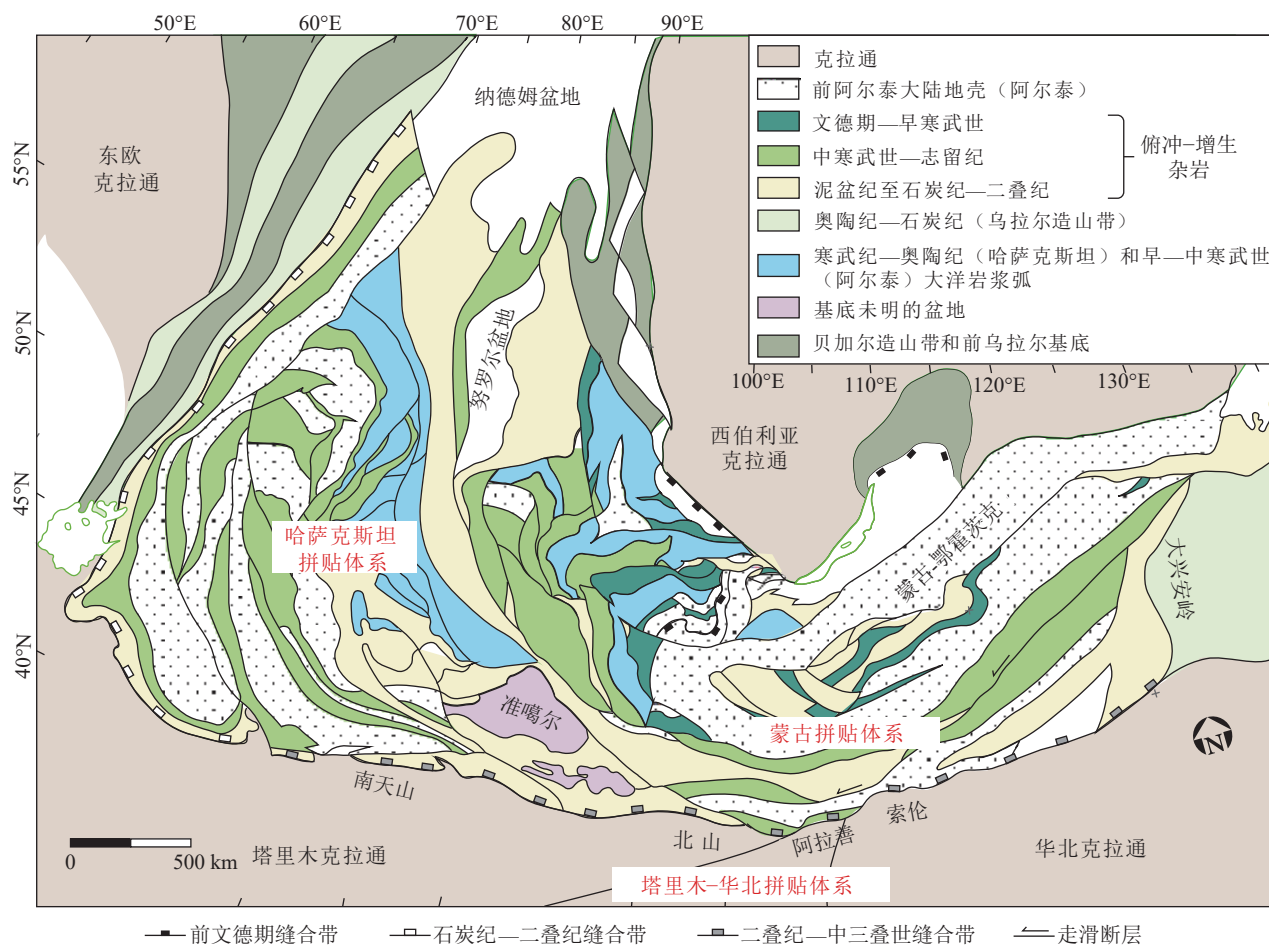


图 1 中亚造山带构造组成图(据Sengör et al., 1991; Xiao et al., 2015 修改)

Fig. 1 Tectonic map of the main components of the Central Asian Orogenic Belt

认为,在二叠纪,阿拉善南部地区的古大洋已经闭合,整体进入后碰撞的环境(Zhang et al., 2013b);还有学者认为,阿拉善南部地区受到塔里木地幔柱的影响,大陆地壳处于伸展环境,形成大量的二叠纪岩浆岩(Dan et al., 2014a);还有一种观点认为,阿拉善南部地区在二叠纪从俯冲环境转换为后碰撞环境,该构造转换造成了该时期岩浆岩同位素的显著改变(Shi et al., 2014; Liu et al., 2017)。近年来,在中亚造山带中段的阿拉善地区发现了岩浆岩带向洋迁移的地质记录,本文系统总结了阿拉善地区石炭纪—二叠纪蛇绿混杂岩、侵入岩,以及火山-沉积组合等方面的研究进展,根据已发表的数据,限定了阿拉善地区古亚洲洋闭合的时限,恢复了该地区石炭纪—二叠纪岩浆岩带的向洋迁移过程,建立了阿拉善地区

石炭纪—二叠纪的构造体制转换过程。

1 区域地质背景

阿拉善地块位于中亚造山带的南侧(图 1),受古亚洲洋闭合过程影响,阿拉善地块北缘地区(以下简称为阿拉善地区)发育大量古生代的增生杂岩、蛇绿混杂岩、岩浆岩等。阿拉善地区自北而南分布 3 条北东东向延伸的断裂带(图 2):雅干断裂带、恩格尔乌苏断裂带和巴丹吉林断裂带,在恩格尔乌苏和巴丹吉林断裂带中,分别出露恩格尔乌苏和查干础鲁蛇绿岩带。根据断裂带相邻地区的地质特征,以 3 条断裂带为界,阿拉善地块北缘地区可分为 4 个次级构造单元(自北向南):雅干构造带、珠斯楞-杭乌拉构造带、宗乃山-沙拉扎山构造带和诺尔公-狼山构造带。

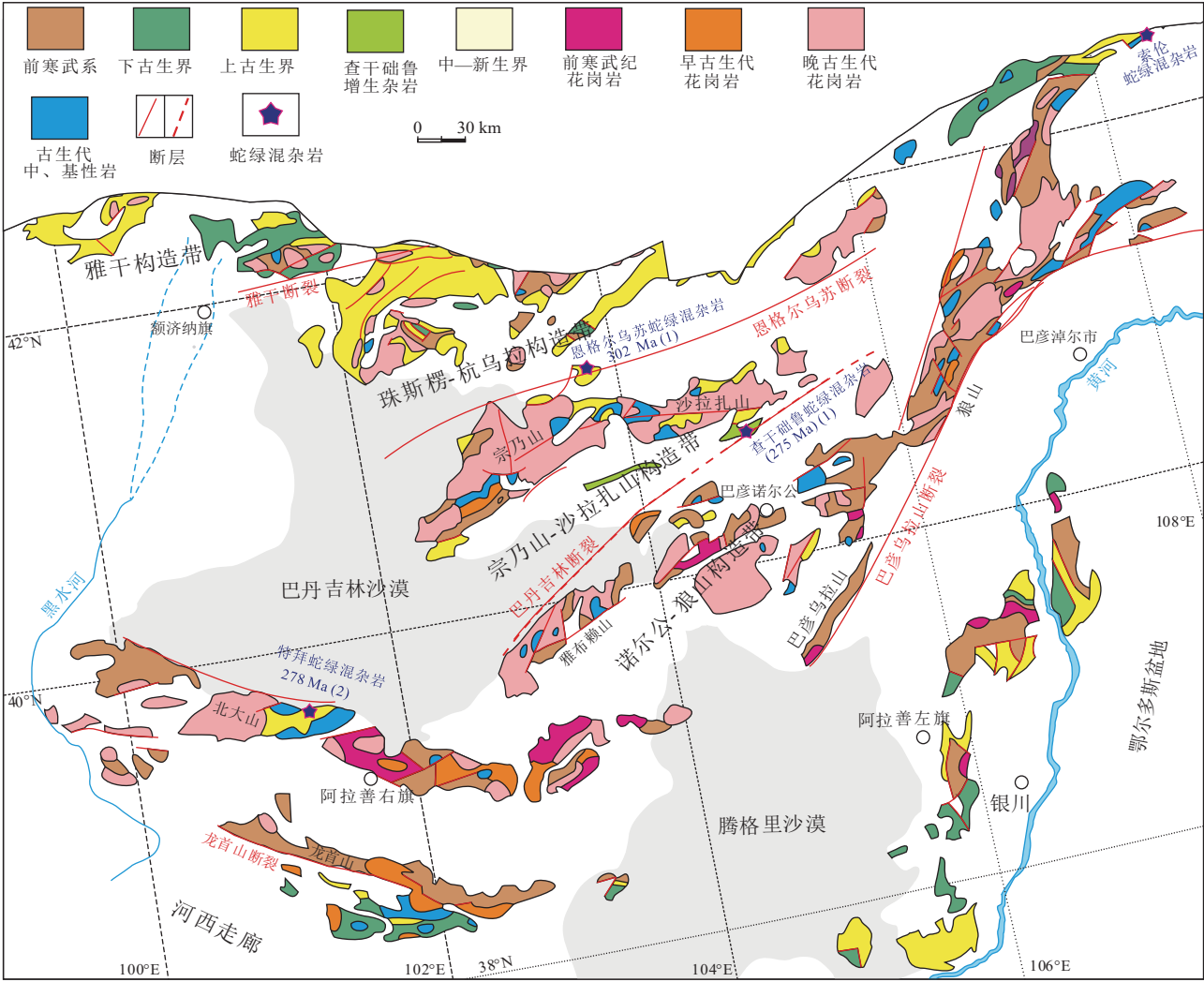


图 2 阿拉善地区区域地质图

Fig. 2 The geological map of the Alxa

造带(吴泰然等, 1993)。本文重点对阿拉善南部的宗乃山-沙拉扎山构造带和诺尔公-狼山构造带(以下简称阿拉善南部地区)进行研究。

宗乃山-沙拉扎山构造带位于恩格尔乌苏断裂带和巴丹吉林断裂带之间, 向南西方向延伸至北大山北部地区(图 2), 该构造带内脆性、韧性断裂发育, 断裂规模巨大, 岩浆岩发育。该构造带内的前寒武纪岩石主要出露于宗乃山西段, 岩性包括黑云二长片麻岩、黑云斜长片麻岩、角闪黑云斜长条带状混合岩、眼球状混合岩夹大理岩, 以及少量黑云斜长变粒岩、二长浅粒岩、斜长角闪岩等, 呈残留体形态产出, 大多经历了绿片岩相—角闪岩相的中高级变质作用(王廷印等, 1994; 史兴俊等, 2016)。该地区正片麻的锆石 U-Pb 年龄数据表明其形成于中元古代(1.4~1.5 Ga; 史兴俊等, 2016)。

宗乃山-沙拉扎山构造带内广泛发育阿木山组, 根据岩性特征, 该构造带的阿木山组可分为 3 个岩段, 下部为以浅海相中酸性火山碎屑岩、长石砂岩、板岩为代表的火山岩-碎屑岩组合; 中部以碳酸盐岩为主, 出露范围较大, 富含丰富的化石; 上部则为以砾岩及长石石英砂岩为代表的浅海相—滨海相碎屑岩。阿木山组下部火山-碎屑岩段中的凝灰熔岩锆石 U-Pb 年龄为 315 Ma(郑荣国等, 2017), 该岩段内开始大量出现 *Triticites* 化石, 并伴生有珊瑚、腕足类等化石。因此, 锆石 U-Pb 年代学和古生物化石证据表明, 阿木山组的火山-碎屑岩岩段形成于晚石炭世。阿木山组中部的碳酸盐岩段以厚层的灰岩、白云质灰岩和大理岩为主, 夹有钙质砂岩; 阿木山组上部的碎屑岩段以板岩、千层岩、钙质砂岩和砾岩为主(王廷印等, 1994; Chen et al., 2020)。这 2 个岩段都产出大量 *Pseudoschwagerina* 带化石的重要分子 *Pseudoschwagerina*, *Quasifusulina*, *Rugosofusulina* 等。另外, 阿木山组碎屑岩岩段中砂岩的碎屑锆石年代学谱图中出现了 279 Ma 的最小峰值年龄(Chen et al., 2020), 因此, 阿木山组的灰岩和碎屑岩岩段在时代上应为早二叠世。侵入至阿木山组的岩体年龄介于 266~251 Ma 之间, 表明阿木山组应在 266 Ma 之前完成沉积(郑荣国等, 2017)。因此, 宗乃山-沙拉扎山构造带内的阿木山组时代应为晚石炭世—早二叠世。

宗乃山-沙拉扎山构造带内出露大量岩浆岩, 整体构成一条近东西走向的岩浆岩带, 侵入岩的岩石

类型包括花岗岩、花岗闪长岩、石英闪长岩、闪长岩、辉长岩等。大部分岩体侵入至阿木山组。已有锆石年龄数据表明, 宗乃山-沙拉扎山构造带中侵入体的时代集中在 270~240 Ma 之间, 还有少量岩体形成于晚石炭世—早二叠世(Zheng et al., 2019b)。该构造带内的岩体都具有相对亏损的锆石 Hf 同位素和全岩 Nd 同位素组成, 以及中—新元古代二阶段模式年龄(Shi et al., 2014; Liu et al., 2017; Zheng et al., 2019b)。

诺尔公-狼山构造带以巴丹吉林断裂带为北界, 南界不明。该构造带主要由前寒武纪结晶基底和盖层岩石、石炭纪—二叠纪火山-沉积建造及古生代(石炭纪、二叠纪为主)侵入岩组成(吴泰然等, 1993; 王廷印等, 1993, 1994; Zheng et al., 2014, 2022, 2023)。已有研究表明, 诺尔公-狼山构造带的前寒武纪岩石主要包括新太古代—古元古代变质杂岩、新元古代片麻岩、花岗岩和变质表壳岩(耿元生等, 2006, 2010, 2011; Zhang et al., 2013a; Dan et al., 2014b; Hu et al., 2014; Gong et al., 2016; Zheng et al., 2022)。新太古代杂岩的岩性以石榴黑云斜长片麻岩、黑云二长片麻岩、含辉石角闪斜长片麻岩、透辉大理岩、条纹条带状铁英岩为主, 变质程度为麻粒岩相—高角闪岩相; 古元古代杂岩以黑云石榴斜长角闪岩、透辉斜长角闪岩、黑云斜长片麻岩、角闪斜长片麻岩、黑云斜长片麻岩、大理岩、变粒岩、石英岩为主, 变质程度为角闪岩相(耿元生等, 2006)。新元古代—古元古代变质杂岩在诺尔公-狼山构造带广泛出露, 在狼山南部地区出露的高级变质杂岩(即叠布斯格杂岩)主要包括角闪岩、镁铁质片麻岩、TTG 片麻岩、副片麻岩、磁铁石英岩和大理岩(Dan et al., 2012)。叠布斯格副片麻岩的最大沉积年龄约为 2.45 Ga(Dan et al., 2012)。叠布斯格杂岩被 1.97 Ga 的花岗岩体侵入, 两者又一起经历了 2 期高级变质作用的改造, 变质时代分别约为 1.89 Ga 和 1.79 Ga(Dan et al., 2012)。在巴彦乌拉山地区, 前寒武纪的镁铁质、长英质片麻岩和角闪岩、大理岩呈互层形式产出。巴彦乌拉山地区的正片麻岩形成于 2.30~2.24 Ga, 随后经历了 2 期变质作用的改造, 时代分别为 1.94~1.91 Ga 和 1.88~1.86 Ga(Wu et al., 2014)。此外, 北大山地区也出露中元古代花岗质片麻岩, 时代为 1.4 Ga 和 1.2 Ga(Song et al., 2017; 王毛毛等, 2019)。

新元古代片麻岩主要分布在阿拉腾敖包附近,

时代为 930~904 Ma, 大多经历了强烈的构造作用改造, 并表现出 S 型花岗岩的特征(耿元生等, 2010; Dan et al., 2014b); 在狼山南部地区发现新元古代镁铁质侵入体, 时代集中在 827~819 Ma 之间(Zheng et al., 2023a)。新元古代火山-沉积岩主要分布在狼山南部地区, 其中, 狼山群是阿拉善地区新元古代火山-沉积岩的典型代表之一。狼山群主要由变沉积岩和酸性火山岩组成, 岩石类型包括变质砂岩、云母石英片岩、石英岩、大理岩等(彭润民等, 2010; Hu et al., 2014; Liu et al., 2019)。狼山群通常被分为 4 个岩段, 已有学者在狼山群第二岩段中发现了酸性火山岩夹层, 其锆石 U-Pb 年龄为 878~804 Ma(Peng et al., 2010; Hu et al., 2014; Liu et al., 2019)。第一、第三和第四岩段中变质沉积岩的最大沉积年龄分别为 1829 Ma, 810 Ma 和 1118 Ma(Hu et al., 2014; Liu et al., 2019), 表明狼山群经历了长期的沉积-火山岩喷发过程。新元古代片麻岩主要分布在诺尔公-狼山构造带的中部地区, 岩石类型主要有眼球状片麻岩和条带状片麻岩, 分别形成于 971~845 Ma 和 926~904 Ma(耿元生等, 2006, 2010, 2011)。

诺尔公-狼山构造带出露大量古生代岩浆岩, 整体形成一条北东—南西走向的岩浆岩带, 其中, 侵入

岩类大多侵入至该地区的前寒武纪岩石中。已有研究表明, 诺尔公-狼山构造带中的古生代岩浆岩大多形成于石炭纪—二叠纪, 并具有富集的锆石 Hf 同位素组成和古老的锆石 Hf 同位素模式年龄, 通常被认为是古老地壳物质重熔的产物(耿元生等, 2012; Shi et al., 2014; Liu et al., 2017; Zheng et al., 2019b, 2022, 2023b)。

2 阿拉善地区蛇绿混杂岩

2.1 恩格尔乌苏蛇绿混杂岩

恩格尔乌苏蛇绿岩出露于恩格尔乌苏断裂带内(图 3), 以巨大的混杂带形式产出, 混杂带内不同地质体及地层关系完全遭到构造破坏, 破坏程度向北呈减弱趋势。混杂带总体上由一系列向南倾斜, 或向北逆冲推覆的叠瓦状构造岩片组成, 构造岩片倾角一般在 20°~30°之间, 劈理也主要向南倾, 倾角在 32°~45°之间或更大。混杂带基质主要由粉砂岩、杂砂岩、砂岩、砂质凝灰岩和凝灰岩组成, 大多经历了强烈的挤压作用改造。构造块体主要是蛇绿岩套的组成单元, 包括超镁铁质岩、辉长岩、玄武岩、硅质岩、铁碧玉岩等(图 3; 吴泰然等, 1992, 1993; 王廷印等, 1994; 王金荣等, 1995; Zheng et al., 2014)。超镁

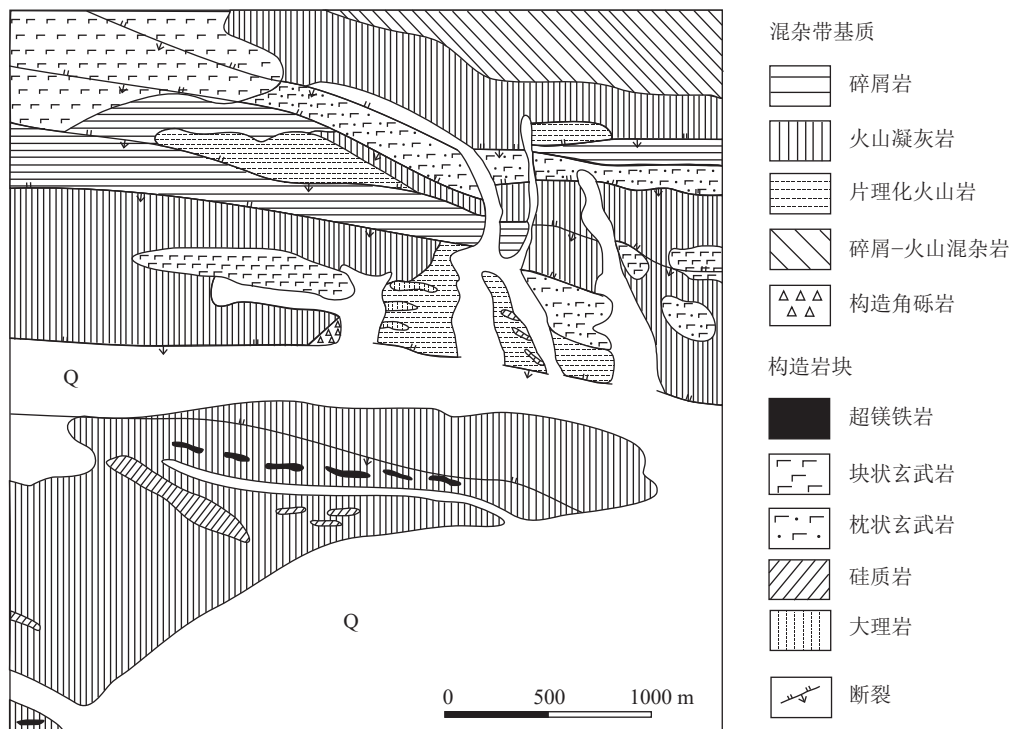


图 3 恩格尔乌苏蛇绿混杂岩地质图(据 Zheng et al., 2014)

Fig. 3 The geological map of the Enger Us ophiolitic mélangé

铁岩分布较广泛,大都发生碳酸盐岩化、硅化,常呈正地形出露于断裂带中。辉长岩较少,且分布于主断裂带以南,主要为角闪辉长岩,具辉长结构。玄武岩分布广泛,具有块状构造和枕状构造(Zheng et al., 2014)。

恩格尔乌苏蛇绿混杂岩中的块状和枕状玄武岩都表现出正常型大洋中脊玄武岩(N-MORB)的地球化学特征,具体表现为具有较高的 TiO_2 含量和低的 K_2O 含量,轻稀土元素亏损,没有高场强元素的分异,且 Nb-Ta 无异常(Zheng et al., 2014; 图 4),表明岩石形成过程中没有俯冲带物质的加入。恩格尔乌苏蛇绿混杂岩中的块状和枕状玄武岩的微量元素整体组成特征类似于 N-MORB,表明恩格尔乌苏蛇绿混杂岩代表的古大洋形成于大洋中脊环境(吴泰然等, 1992, 1993; 王廷印等, 1993, 1994; Zheng et al., 2014)。

恩格尔乌苏枕状玄武岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄约为 302 Ma(Zheng et al., 2014)。另外,已有研究在恩格尔乌苏蛇绿混杂岩的硅质岩岩块中发现了阿尔拜虫目放射虫化石,经过对比研究,确定 2 个放射虫化石组合的时代分别为早二叠世和中二叠世晚期—晚二叠世早期(谢力等, 2014)。现有的年代学证据表明,恩格尔乌苏蛇绿混杂岩代表的古洋盆在晚石炭世仍然在扩张并形成新的洋壳,且该洋盆闭合的时代应在晚二叠世之后。

2.2 查干础鲁蛇绿混杂岩

查干础鲁蛇绿岩以混杂岩的形式产出巴丹吉林断裂带中,构造岩块混杂于基质中,卷入混杂带的

岩石普遍劈理化,或脆性碎裂岩化。查干础鲁蛇绿混杂岩带是由多条不同级别的逆冲断层组成的叠瓦状推覆构造体系,且经历了近南北向的挤压作用。构造包体以脆性剪切破碎为主,弱劈理化,而基质以韧性剪切变形为主,强劈理化,形成软弱层或滑动层(吴泰然等, 1992, 1993; 王廷印等, 1994; Zheng et al., 2014)。

混杂带的构造块体多呈透镜状、条带状,常见超镁铁岩、辉长岩、硅质岩,偶见玄武岩。基质主要为细碎屑岩,最常见的是凝灰岩、粉砂岩、粉砂质泥岩、泥岩等。超镁铁岩多发生碳酸盐岩化和硅化,以构造侵位的方式赋存于基质中。辉长岩构造块体广泛出露,在局部地段分布较集中。辉长岩构造变形强烈,有单斜辉长岩、橄榄辉长岩等。硅质岩类主要为灰色条带的铁质碧玉岩和一些含硅质成分较高的硅质泥岩。玄武岩构造块体在混杂带内出露较少(吴泰然等, 1992, 1993; 王廷印等, 1994; Zheng et al., 2014)。

查干础鲁蛇绿混杂岩中的辉长岩表现出类似于玻安岩类的地球化学特征,例如高的 MgO 含量、 $\text{Mg}^\#$ 值、相容元素含量(Ni, Co, Sc, V)和 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 比值;极低的 TiO_2 含量和稀土元素含量(图 4);高场强元素强烈亏损,高的 LILE/HFSE 值(Zheng et al., 2014)。特殊的地球化学组成表明,其形成于已经经历一次或多次玄武质岩浆抽取后的地幔源区的再次熔融,并且在形成过程中经历了携带大离子亲石元素(LILE)的俯冲带流体/熔体的富集过程(Zheng et al., 2014)。地球化学数据表明,查干础鲁蛇绿混杂岩是

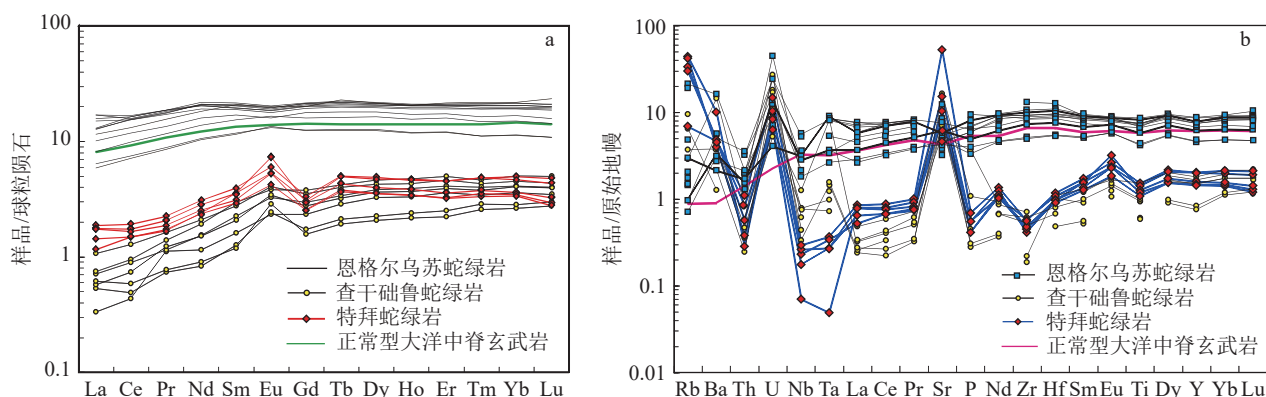


图 4 阿拉善地区蛇绿混杂岩代表性岩石的稀土元素配分图(a)和微量元素蛛网图(b)

(稀土元素和微量元素数据据 Zheng et al., 2014, 2018)

Fig. 4 The rare earth element patterns (a) and trace element spidergram (b) for representative samples of ophiolitic mélanges in the southern Alxa

SSZ 型蛇绿岩,形成于俯冲带相关的构造环境中。

查干础鲁蛇绿混杂岩中辉长岩岩块的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 275 Ma (Zheng et al., 2014)。已有研究发现,该蛇绿混杂岩中含有早二叠世放射虫化石 (尹海权, 2016)。现有的年代学证据表明,查干础鲁代表的古大洋在早二叠世仍然扩张形成新的洋壳,而该洋盆的闭合时限还没有进一步的证据限定。

2.3 特拜蛇绿混杂岩

特拜蛇绿混杂岩出露于北大山地区,以混杂带的形式产出 (图 2),整体向北逆冲到晚古生代岩体之上。混杂带基质主要为强烈变形的白云母石英片岩、蛇纹岩等,片理走向为北北东向。混杂带的构造块体为近东西向分布的蛇纹石化橄榄岩、蛇纹岩、糜棱岩化辉长岩、辉长岩、玄武岩、硅质岩等 (Zheng et al., 2018)。

特拜蛇绿混杂岩中辉长岩岩块的锆石 U-Pb 年龄为 278 Ma (Zheng et al., 2018)。另外,特拜蛇绿混杂岩中辉长岩岩块的地球化学组成类似于查干础鲁蛇绿混杂岩,同样表现出类似玻安岩的元素组成特征 (图 4),两者还具有类似的氧同位素组成,表明特拜蛇绿混杂岩形成于与俯冲相关的环境 (Zheng et al., 2018)。另外,通过对比发现,特拜蛇绿岩与查干础鲁蛇绿岩在岩石组成、时代及地球化学特征方面具有一致性,因此,特拜蛇绿岩向东可与查干础鲁蛇绿岩连接,是阿拉善地区一条重要的构造单元界线。

3 阿拉善南部地区二叠纪构造环境

阿拉善南部地区在二叠纪的构造环境尚处于争议中。本文通过收集整理阿拉善南部地区石炭纪—二叠纪岩浆岩类的全岩地球化学数据发现,绝大多数镁铁质岩石表现出钙碱性系列的元素组成特征,除少量高分异的花岗岩类外,大部分花岗岩类表现出钙碱性—高钾钙碱性的元素组成特征 (图 5; Zheng et al., 2022, 2023b)。阿拉善南部地区石炭纪—二叠纪岩浆岩类的元素组成并没有随时代的变化发生显著的变化,暗示石炭纪—二叠纪阿拉善南部地区的构造环境没有明显变化。本次研究整理归纳了近年来阿拉善南部地区的研究进展,对该地区二叠纪的构造环境提出进一步限定。

在蛇绿混杂岩方面,恩格尔乌苏蛇绿混杂岩中硅质岩岩块的放射虫化石证据表明,阿拉善南部地区古大洋闭合的时间应晚于晚二叠世 (谢力等, 2014)。另外,阿拉善南部地区的查干础鲁蛇绿混杂岩和特拜蛇绿混杂岩属于 SSZ 型蛇绿岩,形成于大洋俯冲环境 (Zheng et al., 2014, 2018)。在特殊元素组成的岩浆岩方面,相关研究在沙拉扎山东段发现了晚二叠世的埃达克岩质岩墙 (255 Ma),形成于俯冲大洋板片的部分熔融过程;沙拉扎山地区还发现了中二叠世的埃达克质高镁闪长岩 (271~262 Ma),形成于俯冲大洋板片熔体被上覆地幔楔交代的过程 (Zheng et al., 2022)。因此,蛇绿混杂岩和岩浆岩的证据表明,阿拉善南部地区在二叠纪仍存在古大洋

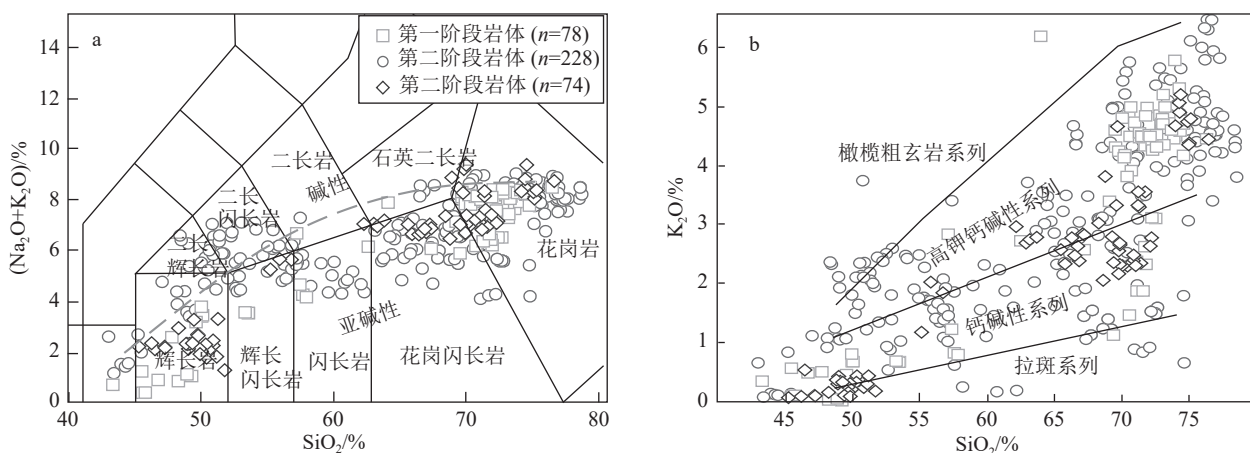


图 5 阿拉善南部地区侵入岩 SiO_2 -($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$) (a, 底图据 Wilson, 1989) 和 SiO_2 - K_2O 图解 (b, 底图据 Peccerillo et al., 1976) (地球化学数据据 Zheng et al., 2022)

Fig. 5 SiO_2 versus ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) diagram (a) and SiO_2 versus K_2O discrimination diagram (b) for plutons in the southern Alxa

的俯冲过程。

锆石年代学和古生物化石证据表明,阿拉善南部地区的阿木山组形成于晚石炭世—晚二叠世(尹海权, 2016; 郑荣国等, 2017; Chen et al., 2020),阿木山组碎屑岩的地球化学组成表明其形成于俯冲相关的构造环境,类似于活动大陆边缘相关盆地沉积的碎屑岩(尹海权, 2016)。另外,相关研究发现,阿木山组碎屑岩的碎屑锆石年龄以古生代为主,前寒武纪年龄的锆石数量较少,表明阿拉善南部地区古老大陆并非阿木山组沉积的主要物源区,这一现象类似于汇聚板块边缘环境(如洋内弧和弧后盆地环境)的碎屑岩,表明阿木山组形成于俯冲相关的环境(尹海权, 2016; Zheng et al., 2022)。

综上,阿拉善南部地区在二叠纪存在古大洋的俯冲过程,该过程中形成了 SSZ 型蛇绿岩,俯冲的大洋板片发生部分熔融及地幔交代作用,形成了高镁安山岩、埃达克岩的岩浆岩。同时,在俯冲相关盆地中形成了阿木山组的火山-沉积建造。

4 阿拉善南部地区构造体制的转变

阿拉善南部地区出露大量的晚古生代侵入岩,其时代集中在石炭纪—二叠纪。本次研究系统归纳

整理了阿拉善南部地区侵入岩的锆石年代学、Hf 同位素及全岩地球化学数据,研究其时空分布特征,探讨其地质意义。

4.1 阿拉善南部地区岩浆岩带的时空分布特征

统计近年来的锆石 U-Pb 年代学数据发现(图 6),诺尔公构造带岩浆岩类的时代集中在 350~265 Ma,且表现出 280 Ma 和 330 Ma 左右的年龄峰值(图 7-a)。沙拉扎山构造带中岩浆岩类的时代跨度较大,早石炭世—早三叠世的岩体都有报道,大多数岩体时代集中在晚二叠世—早三叠世,并表现出明显的 250 Ma 的年龄峰值(图 7-a)。从空间分布看,早石炭世侵入岩集中分布在最东南侧的狼山—巴彦乌拉山一带,晚石炭世—中二叠世侵入岩集中分布在雅布赖山—诺尔公—狼山一带,中二叠世—早三叠世侵入岩集中分布在宗乃山—沙拉扎山一带,总体看,阿拉善南部地区的侵入岩表现出从东南向西北变年轻的趋势(图 5)。从同位素组成看,诺尔公构造带的侵入岩,都具有富集的同位素组成,表现为负的锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和全岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(图 7-b),以及较大的二阶段模式年龄,表明古老陆壳物质参与到古生代岩体的形成过程中。相比而言,沙拉扎山构造带的侵入岩则具有正的锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和全岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(图 7-b),以

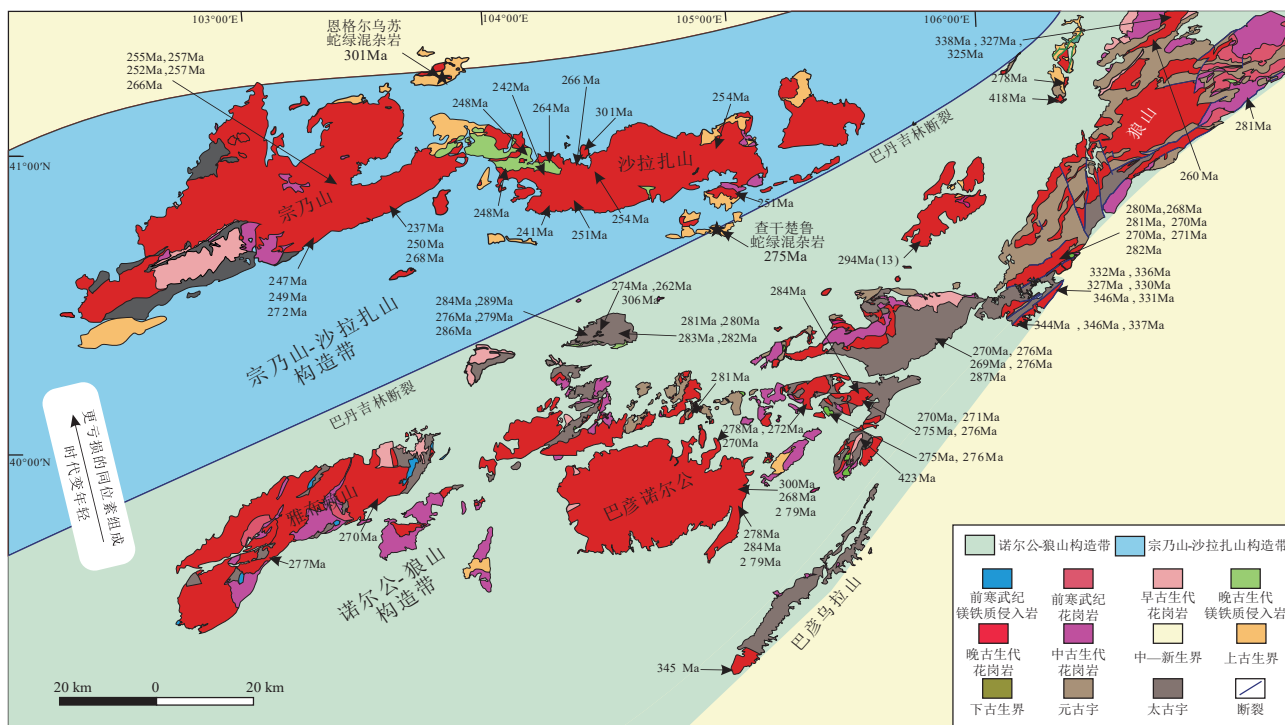


图 6 阿拉善南部地区地质图及侵入体年代学数据(年代学数据据 Zheng et al., 2019b)

Fig. 6 The geological map of southern Alxa, mainly showing zircon U-Pb age data of plutons

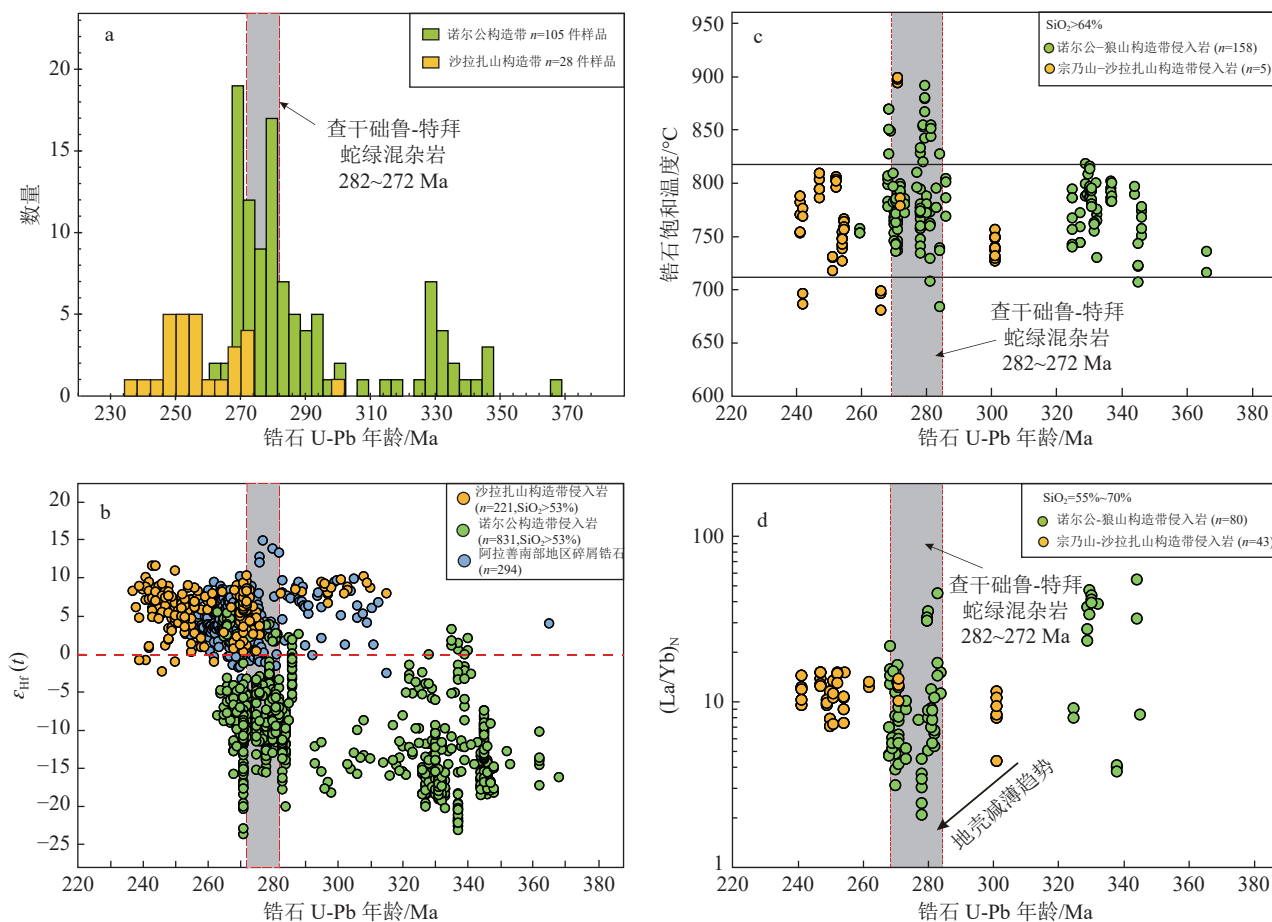


图7 阿拉善南部晚古生代岩体特征图

Fig. 7 Characteristics diagrams of plutons in the southern Alxa

a—阿拉善南部晚古生代岩体年代学概率图; b—阿拉善南部晚古生代岩体及碎屑岩锆石 U-Pb 年龄- $\epsilon_{Hf}(t)$ 值图解; c—阿拉善南部晚古生代中酸性岩体锆石 U-Pb 年龄-锆石饱和温度图解; d—阿拉善南部晚古生代花岗岩锆石 U-Pb 年龄- $(La/Yb)_N$ 值图解(据 Zheng et al., 2022 修改)

及较年轻的二阶段模式年龄,表明新生陆壳物质或地幔来源物质参与其成岩过程中。总体看,从东南到西北,阿拉善南部地区侵入岩的源区中古老陆壳物质的比例变小。另外,诺尔公构造带是发育在新太古代—古元古代大陆基底之上的岩浆岩带,而沙拉扎山构造带以北的恩格尔乌苏蛇绿混杂岩通常被认为是阿拉善地区古大洋的残余,且该大洋至少持续到晚二叠世。综上,阿拉善南部地区的侵入岩表现出从大陆向大洋一侧(北西)迁移的趋势,并且在岩浆岩带迁移过程中,源区的古老陆壳物质比例变小。

4.2 阿拉善南部地区石炭纪—二叠纪构造转换过程

根据侵入体的时代、同位素组成等特征,将阿拉善南部地区的侵入体分为 2 个阶段。第一阶段岩浆岩(350~315 Ma)主要分布在阿拉善南部的狼山、巴

彦乌拉山和龙首山一带,岩石类型包括橄榄辉长岩、辉长闪长岩、石英闪长岩、英云闪长岩、二长花岗岩和糜棱岩化花岗岩(Wang et al., 2015; Dan et al., 2016; Liu et al., 2016; Xue et al., 2017)。该阶段的镁铁质侵入岩表现出钙碱性—高钾钙碱性的特征,富集大离子亲石元素、亏损高场强元素,同时具有类似于正常型大洋中脊玄武岩(N-MORB)的稀土元素配分模型(Wang et al., 2015)。该阶段的镁铁质侵入岩具有类似的同位素组成,表现为极富集的同位素(全岩 Nd 同位素和锆石 Hf 同位素)组成,以及古元古代—新太古代二阶段模式年龄,表明古元古代—新太古代的陆壳物质是重要的物源(Dan et al., 2016; Xue et al., 2017; Zheng et al., 2019a)。已有研究表明,阿拉善南部地区的早石炭世闪长岩和花岗岩形成于大陆弧环境(Wang et al., 2015; Liu et al., 2016; Zheng et al., 2019a)。此外,龙首山地区的早石炭世花岗岩具

有较高的 Sr/Y 和 $(La/Yb)_N$ 值, 形成于加厚大陆地壳的部分熔融过程 (Dan et al., 2016; Xue et al., 2017)。综上, 早石炭世阿拉善南部地区存在加厚的大陆地壳, 且古元古代—新太古代大陆地壳物质参与到该时期岩浆岩形成过程中, 发生了明显的陆壳物质再循环, 类似于典型的前进型俯冲带 (Cawood et al., 2009)。

第二阶段的岩浆岩时代集中在晚石炭世—早三叠世, 在宗乃山-沙拉扎山构造带和诺尔公-狼山构造带都有分布 (图 6)。统计数据表明, 年龄小于 315 Ma 的岩体锆石 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值与其锆石年龄之间呈负相关关系 (图 7-b), 几乎所有年龄小于 265 Ma 的岩体都具有正的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值 (图 7-b)。该变化趋势表明, 315 Ma 之后, 越来越多的新生壳源物质或幔源物质参与到阿拉善南部地区岩体的形成过程中。年龄在 315~265 Ma 之间的岩体具有变化较大的锆石 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值, 表明古老陆壳物质和幔源物质或新生壳源物质都参与到该阶段岩体的形成过程中。锆石 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值在 265 Ma 发生突变, 表明该时间点之后古老陆壳物质几乎不参与岩体的形成过程中。阿拉善南部地区石炭纪—早三叠世岩体的锆石 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值的时间变化规律与形成于后撤型俯冲带的岩体类似, 如澳大利亚的塔斯马尼亚造山带 (Kemp et al., 2009)、秘鲁的安第斯活动大陆边缘 (Boekhout et al., 2015) 等。

另外, 利用统计数据, 重新计算阿拉善南部地区石炭纪—早三叠世岩体的锆石饱和温度之后发现, 年龄在 285~265 Ma 之间的花岗岩类具有很高的锆石饱和温度 ($>820^{\circ}\text{C}$, 图 7-c), 暗示该时期阿拉善南部地区处于高温环境。另外, 通过计算发现, 该时期 (285~265 Ma) 的中酸性侵入岩具有较低的 $(La/Yb)_N$ 值, 暗示了地壳减薄的构造环境 (图 7-d)。有学者发现, 阿拉善南部地区存在早—中二叠世的 A_2 型花岗岩 (281~268 Ma), 暗示了伸展的构造环境 (Dan et al., 2014a; Zheng et al., 2019b, 2022)。此外, 阿拉善南部的查干础鲁和特拜蛇绿混杂岩都被认为形成于弧后盆地环境, 其时代分别为 275 Ma 和 278 Ma (吴泰然等, 1993; 王廷印等, 1994; Zheng et al., 2014, 2018)。上述研究证明, 阿拉善南部地区弧后盆地的拉张导致地幔物质上涌, 形成了高温、地壳拉伸减薄的构造环境。

综上, 岩浆源区的古老地壳物质越来越少, 地壳减薄及弧后盆地形成都与后撤型俯冲带环境类似

(Collins, 2002; Cawood et al., 2009), 表明阿拉善南部地区从早石炭世的前进型俯冲带转变为晚石炭世—早三叠世的后撤型俯冲带。

4.3 阿拉善南部地区石炭纪—二叠纪期间的构造演化过程

前人研究表明, 恩格尔乌苏蛇绿混杂岩所代表的古洋壳在泥盆纪开始向南俯冲到古老的陆壳之下 (吴泰然等, 1993; 王廷印等, 1994)。随着古大洋的闭合, 大洋板片不断向南俯冲, 早石炭世在阿拉善南部地区形成了加厚的地壳, 表现为前进型俯冲带的特征 (图 8-a)。在俯冲过程中, 加厚地壳发生部分熔融, 形成了高 Sr/Y 值的花岗岩类。另外, 该阶段形成的酸性侵入岩具有明显富集的同位素组成, 暗示侵入体来源于古老大陆地壳的部分熔融 (图 8-a)。

随着时间推移, 俯冲板片前端低密度矿物相变为高密度矿物, 引起俯冲角度变大, 形成俯冲板片向北西方向的回转, 俯冲板块的回转进一步引起软流圈地幔上涌, 造成 315 Ma 之后形成的侵入体开始表现出正的锆石 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值。俯冲板片的回转造成上覆阿拉善地块的伸展, 在伸展环境下形成阿木山组的碎屑岩沉积。随着进一步的大陆地壳伸展, 大量早二叠世的 A_2 型花岗岩在宗乃山-沙拉扎山构造带和诺尔公-狼山构造带形成 (图 8-b)。

大陆地壳进一步伸展之后, 造成阿拉善地块裂解, 形成弧后盆地, 该弧后盆地洋壳侵位之后形成了查干础鲁蛇绿混杂岩和特拜蛇绿混杂岩。另外, 随着俯冲角度的进一步增大, 俯冲带流体和熔体上升影响的范围进一步缩小, 造成约 265 Ma 之后的岩浆岩记录大多出现在宗乃山-沙拉扎山构造带内 (图 8-c)。该阶段, 俯冲的大洋板片发生部分熔融, 形成了埃达克岩; 部分熔体与上覆地幔楔发生交代, 形成了高镁闪长岩 (图 8-c)。

5 结 论

(1) 阿拉善南部地区的蛇绿混杂岩、岩浆岩和火山-沉积建造证据表明, 该地区的古大洋在晚二叠世仍存在, 处于大洋俯冲环境。

(2) 阿拉善南部地区石炭纪—早三叠世的岩浆岩带表现出向洋迁移的特征, 指示了阿拉善地块向北增生的过程。

(3) 阿拉善南部地区在早石炭世处于前进型大洋俯冲环境, 在晚石炭世—早三叠世处于后撤型大

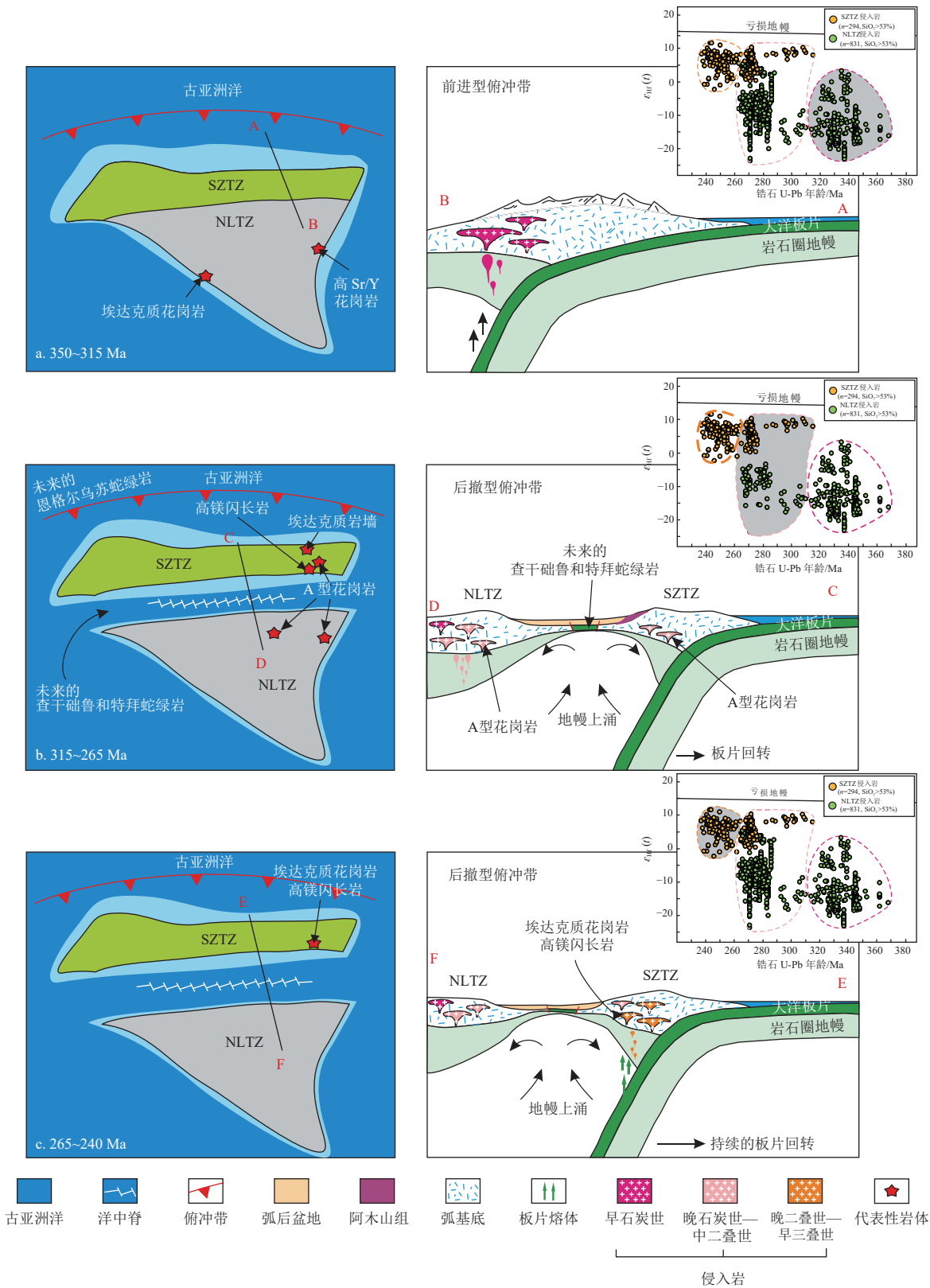


图 8 阿拉善南部地区石炭纪—早三叠世构造演化示意图(据 Zheng et al., 2022)

Fig. 8 Tectonic evolution of the southern Alxa during Early Carboniferous—Early Trisistic
SZTZ—宗乃山-沙拉扎山构造带; NLTZ—诺尔公-狼山构造带

洋俯冲环境。

致谢: 审稿专家对本文提出了宝贵的修改意见, 在此表示诚挚的感谢。本文献给李春昱院士诞辰 120 周年, 并向李院士在中国地质学领域作出的卓越贡献致以崇高的敬意!

References

- Boekhout F, Roberts N M W, Gerdes A, et al. 2015. A Hf-isotope perspective on continent formation in the south Peruvian Andes[J]. Geological Society, London, Special Publications, 389: 305–321.
- Chen Y, Wu T R, Zhang Z C, et al. 2020. Provenance of the Permo–Carboniferous sediments in the northern Alxa and its tectonic implications for the southernmost Central Asian Orogenic Belt[J]. Geoscience Frontiers, 11: 1415–1429.
- Collins W J. 2002. Hot orogens, tectonic switching, and creation of continental crust[J]. Geology, 30: 535–538.
- Collins W J, Huang H Q, Bowden P, et al. 2020. Repeated S–I–A-type granite trilogy in the Lachlan Orogen, and geochemical contrasts with A-type granites in Nigeria: Implications for petrogenesis and tectonic discrimination[J]. Geological Society London Special Publications, 491(1): SP491–2018–159.
- Cawood P A, Kröner A, Collins W J, et al. 2009. Accretionary orogens through Earth history, in earth accretionary systems in space and time[C]//Cawood P A, Kröner A. Geological Society of London, Special Publication, 318(1): 1–36.
- Dan W, Li X H, Guo J H, et al. 2012. Paleoproterozoic evolution of the eastern Alxa Block, westernmost North China: Evidence from in situ zircon U–Pb dating and Hf–O isotopes[J]. *Gondwana Research*, 21: 838–864.
- Dan W, Li X H, Wang Q, et al. 2014a. An Early Permian (ca. 280 Ma) silicic igneous province in the Alxa Block, NW China: A magmatic flare-up triggered by a mantle–plume? [J]. *Lithos*, 204: 144–158.
- Dan W, Li X H, Wang Q, et al. 2014b. Neoproterozoic S-type granites in the Alxa Block, westernmost North China and tectonic implications: In situ zircon U–Pb–Hf–O isotopic and geochemical constraints[J]. *American Journal of Science*, 314(1): 110–153.
- Dan W, Wang Q, Wang X C, et al. 2015. Overlapping Sr–Nd–Hf–O isotopic compositions in Permian mafic enclaves and host granitoids in Alxa Block, NW China: Evidence for crust–mantle interaction and implications for the generation of silicic igneous provinces[J]. *Lithos*, 230: 133–145.
- Dan W, Li X H, Wang Q, et al. 2016. Phanerozoic amalgamation of the Alxa Block and North China Craton: Evidence from Paleozoic granitoids, U–Pb geochronology and Sr–Nd–Pb–Hf–O isotope geochemistry[J]. *Gondwana Research*, 32: 105–121.
- Feng J Y, Xiao W J, Windley B, et al. 2013. Field geology, geochronology and geochemistry of mafic–ultramafic rocks from Alxa, China: Implications for Late Permian accretionary tectonics in the southern Altaids[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 78: 114–142.
- Geng Y S, Wang X S, Shen Q H, et al. 2006. Redefinition of the Alxa Group of Precambrian metamorphic basement in Alxa region, Inner Mongolia[J]. *Geology in China*, 33: 138–145 (in Chinese with English abstract).
- Geng Y S, Zhou X W. 2010. Early Neoproterozoic granite events in Alax area of Inner Mongolia and their geological significance: Evidence from geochronology[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 29(6): 779–795 (in Chinese with English abstract).
- Geng Y S, Zhou X W. 2011. Characteristics of geochemistry and zircon Hf isotope of the early Neoproterozoic granite in Alax area, Inner Mongolia[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(4): 897–908 (in Chinese with English abstract).
- Geng Y S, Zhou X W. 2012. Early Permian magmatic events in the Alxa metamorphic basement: Evidence from geochronology[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(9): 2667–2685 (in Chinese with English abstract).
- Gong J H, Zhang J X, Wang Z Q, et al. 2016. Origin of the Alxa Block, western China: New evidence from zircon U–Pb geochronology and Hf isotopes of the Longshoushan Complex[J]. *Gondwana Research*, 36: 359–375.
- Han B F, He G Q, Wang X C, et al. 2011. Late Carboniferous collision between the Tarim and Kazakhstan–Yili terranes in the western segment of the South Tian Shan Orogen, Central Asia, and implications for the Northern Xinjiang, western China[J]. *Earth–Science Reviews*, 109: 74–93.
- Hu J M, Gong W B, Wu S J, et al. 2014. LA–ICP–MS zircon U–Pb dating of the Langshan Group in the northeast margin of the Alxa block, with tectonic implications[J]. *Precambrian Research*, 255: 756–770.
- Jahn B M, Wu F Y, Hong D W. 2000. Important crustal growth in the Phanerozoic: Isotopic evidence of granitoids from east–central Asia[J]. *Journal of Earth System Science*, 109: 5–20.
- Kemp A I S, Hawkesworth C J, Collins W J, et al. 2009. Isotopic evidence for rapid continental growth in an extensional accretionary orogen: the Tasmanides, eastern Australia[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 284: 455–466.
- Lin L N, Xiao W J, Wan B, et al. 2014. Geochronology and geological evidence for persistence of south–dipping subduction to Late Permian time, Langshan area, Inner Mongolia (China): Significance for termination of accretionary orogenesis in the southern Altaids[J]. *American Journal of Science*, 314: 679–703.
- Liu M, Zhang D, Xiong G Q, et al. 2016. Zircon U–Pb age, Hf isotope and geochemistry of Carboniferous intrusions from the Langshan area, Inner Mongolia: Petrogenesis and tectonic implications[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 120: 139–158.
- Liu Q, Zhao G C, Han Y G, et al. 2017. Timing of the final closure of the Paleo–Asian Ocean in the Alxa Terrane: Constraints from geochronology and geochemistry of Late Carboniferous to Permian gabbros and diorites[J]. *Lithos*, 274/275: 19–30.
- Liu C H, Zhao G C, Liu F L, et al. 2019. Late Precambrian tectonic affinity of the Alxa block and the North China Craton: Evidence from

- zircon U–Pb dating and Lu–Hf isotopes of the Langshan Group[J]. *Precambrian Research*, 326: 312–332.
- Moresi L N, Betts P G, Miller M S, et al. 2014. Dynamics of continental accretion[J]. *Nature*, 508: 7495.
- Peccerillo A, Taylor S R. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58: 63–81.
- Peng R M, Zhai Y S, Wang J P, et al. 2010. Discovery of Neoproterozoic acid volcanic rock in the western section of Langshan, Inner Mongolia, and its geological significance[J]. *Chinese Science Bulletin*, 55: 2611–2620 (in Chinese with English abstract).
- Spencer C J, Roberts N M W, Santosh M. 2017. Growth, destruction, and preservation of earth's continental crust[J]. *Earth-Science Reviews*, 172: 87–106.
- Sengör A M C, Natal'in B A. 1996. Paleotectonics of Asia: Fragments of a synthesis, in *The Tectonic Evolution of Asia*[C]//Yin A, Harrison T M. Cambridge Univ. Press, New York: 486–640.
- Sengör A M C, Okurogullari A H. 1991. The role of accretionary wedges in the growth of continents: Asiatic examples from Argand to Plate Tectonics[J]. *Eclogae Geol. Helv.*, 84: 535–597.
- Shi X J, Wang T, Zhang L, et al. 2014. Timing, petrogenesis and tectonic setting of the Late Paleozoic gabbro–granodiorite–granite intrusions in the Shalazhashan of northern Alxa: constraints on the southernmost boundary of the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Lithos*, 208/209: 158–177.
- Shi X J, Zhang L, Wang T, et al. 2016. Zircon geochronology and Hf isotopic compositions for the Mesoproterozoic gneisses in Zongnaishan area, northern Alxa and its tectonic affinity[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 32(11): 3518–3536 (in Chinese with English abstract).
- Song D F, Xiao W J, Collins A S, et al. 2017. New chronological constraints on the tectonic affinity of the Alxa Block, NW China[J]. *Precambrian Research*, 299: 230–243.
- Wang M M, Zhang L, Huo Y J, et al. 2019. Tectonic affinity of the northern Longshoushan–Beidashan: Constraints from the zircon U–Pb age and Hf isotopic compositions of the Haisen Chulu gneiss [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 38(5): 631–645 (in Chinese with English abstract).
- Wang J R, Song C H, Gao J P. 1995. The original mechanism of the Enger Us ophiolitic mélange, North Alaxa [J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 31(2): 140–147 (in Chinese with English abstract).
- Wang T Y, Wang J R, Liu J K. 1993. Relationships between the North China and Tarim Plate[J]. *Acta Geologica Sinica*, 67: 287–300 (in Chinese with English abstract).
- Wang T Y, Wang S Z, Wang J R. 1994. The Formation and Evolution of Paleozoic Continental Crust in Alxa Region[M]. Lanzhou: Lanzhou University Press (in Chinese).
- Wang Z Z, Han B F, Feng L X, et al. 2015. Geochronology, geochemistry and origins of the Paleozoic–Triassic plutons in the Langshan area, western Inner Mongolia, China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 97: 337–351.
- Wilson M. 1989. *Igneous Petrogenesis*[M]. Unwin Hyman Press, London: 295–323.
- Windley B F, Alexeiev D, Xiao W J, et al. 2007. Tectonic models for accretion of the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Journal of the Geological Society of London*, 164: 31–47.
- Wu S, Hu J, Ren M, et al. 2014. Petrography and zircon U–Pb isotopic study of the Bayanwulashan Complex: Constrains on the Paleoproterozoic evolution of the Alxa Block, westernmost North China Craton[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 94: 226–239.
- Wu T R, He G Q. 1992. Ophiolitic mélange belts in the northern margin of the Alashan Block[J]. *Geoscience*, 6: 69–78 (in Chinese with English abstract).
- Wu T R, He G Q. 1993. Tectonic units and their fundamental characteristics on the northern margin of the Alxa block[J]. *Acta Geologica Sinica*, 6: 373–385 (in Chinese with English abstract).
- Xiao W J, Windley B F, Sun S, et al. 2015. A tale of amalgamation of three Permo–Triassic collage systems in Central Asia: Oroclines, sutures, and terminal accretion[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 43: 477–507.
- Xiao W J, Windley B F, Han C, et al. 2018. Late Paleozoic to early Triassic multiple roll-back and oroclinal bending of the Mongolia collage in Central Asia[J]. *Earth-Science Reviews*, 186: 94–128.
- Xie L, Yin H Q, Zhou H R, et al. 2014. Permian radiolarians from the Engeerwusu suture zone in Alashan area, Inner Mongolia and its geological significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 33: 691–697 (in Chinese with English abstract).
- Xue S, Ling M M, Liu Y L, et al. 2017. The genesis of early Carboniferous adakitic rocks at the southern margin of the Alxa Block, North China[J]. *Lithos*, 278/281: 181–194.
- Yin H Q. 2016. Late Paleozoic Sedimentary Characteristics and its Tectonic Evolution in Northern Alax area, Inner Mongolia [D]. Doctoral Dissertation of China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Zhang J X, Gong J H, Yu S Y, et al. 2013a. Neoproterozoic–Paleoproterozoic multiple tectonothermal events in the western Alxa block, North China Craton and their geological implication: evidence from zircon U–Pb ages and Hf isotopic composition[J]. *Precambrian Research*, 235: 36–57.
- Zhang W, Wu T R, Feng J C, et al. 2013b. Time constraints for the closing of the Paleo–Asian Ocean in the Northern Alxa Region: evidence from Wuliji granites[J]. *Science China: Earth Sciences*, 56(1): 153–164.
- Zheng R G, Wu T R, Zhang W, et al. 2014. Late Paleozoic subduction system in the northern margin of the Alxa block, Altaids: geochronological and geochemical evidences from ophiolites[J]. *Gondwana Research*, 25: 842–858.
- Zheng R G, Li J Y, Liu J F. 2017. The age of volcanic rocks of Amushan Formation on the northern margin of Alxa block: Evidence from zircon U–Pb data[J]. *Geology in China*, 44(3): 612–613 (in Chinese with English abstract).
- Zheng R G, Li J Y, Xiao W J, et al. 2018. A new ophiolitic mélange

- containing boninitic blocks in Alxa region: Implications for Permian subduction events in southern CAOB[J]. *Geoscience Frontiers*, 9: 1355–1367.
- Zheng R G, Li J Y, Zhang J, et al. 2019a. Early Carboniferous High Ba–Sr Granitoid in Southern Langshan of Northeastern Alxa: Implications for Accretionary Tectonics along Southern Central Asian Orogenic Belt[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 93(4): 820–844.
- Zheng R G, Zhang J, Xiao W J. 2019b. Association of Permian gabbro and granite in the Langshan, southern Central Asian Orogenic Belt: age, origin, and tectonic implications[J]. *Lithos*, 348/349: 105174.
- Zheng R G, Li J Y, Zhang J. 2022. Juvenile hafnium isotopic compositions recording a Late Carboniferous–Early Triassic retreating subduction in the southern Central Asian Orogenic Belt: A case study from the southern Alxa[J]. *GSA Bulletin*, 134(5/6): 1375–1396.
- Zheng R G, Li J Y, Xiao W J, et al. 2023a. A combination of plume and subduction tectonics contributing to breakup of northern Rodinia: Constraints from the Neoproterozoic magmatism in the Dunhuang–Alxa Block, northwest China[J]. *GSA Bulletin*, 135(5/6): 1109–1126.
- Zheng R G, Zhang J, Xiao W J. 2023b. Continental crust delamination in a retreating subduction zone: a case study in the southern Alxa, Central Asian Orogenic Belt[J]. *GSA Bulletin*, 135(11/12): 3241–3257.
- 耿元生, 王新社, 沈其韩, 等. 2006. 内蒙古阿拉善地区前寒武纪变质基底阿拉善群的再厘定[J]. *中国地质*, 33: 138–145.
- 耿元生, 王新社, 吴春明, 等. 2010. 阿拉善变质基底古元古代晚期的构造热事件[J]. *岩石学报*, 26: 1159–1170.
- 耿元生, 周喜文. 2011. 阿拉善地区新元古代早期花岗岩的地球化学和锆石 Hf 同位素特征[J]. *岩石学报*, 27: 897–908.
- 耿元生, 周喜文. 2012. 阿拉善变质基底中的早二叠世岩浆热事件-来自同位素年代学的证据[J]. *岩石学报*, 28: 2667–2685.
- 彭润民, 翟裕生, 王建平, 等. 2010. 内蒙狼山新元古代酸性火山岩的发现及其地质意义[J]. *科学通报*, 55(26): 2611–2620.
- 史兴俊, 张磊, 王涛, 等. 2016. 阿拉善北部宗乃山地区片麻岩锆石 U–Pb 年龄、Hf 同位素特征及其构造归属探讨[J]. *岩石学报*, 32(11): 3518–3536.
- 王毛毛, 张磊, 霍雨佳. 2019. 龙首山-北大山北部的属性-来自海森楚鲁片麻岩锆石 U–Pb 年龄和 Hf 同位素的约束[J]. *岩石矿物学杂志*, 38(5): 631–645.
- 王金荣, 宋春晖, 高军平, 等. 1995. 阿拉善北部恩格尔乌苏蛇绿混杂岩的形成机制[J]. *兰州大学学报 (自然科学版)*, 31(2): 140–147.
- 王廷印, 王士政. 1993. 华北板块和塔里木板块之关系[J]. *地质学报*, 67: 287–300.
- 王廷印, 王士政, 王金荣. 1994. 阿拉善地区古生代陆壳的形成和演化[M]. 兰州: 兰州大学出版社.
- 吴泰然, 何国琦. 1992. 阿拉善地块北缘的蛇绿混杂岩带及其大地构造意义[J]. *现代地质*, 6: 69–78.
- 吴泰然, 何国琦. 1993. 内蒙古阿拉善地块北缘的构造单元划分及各单元的基本特征[J]. *地质学报*, 67: 97–108.
- 谢力, 尹海权, 周洪瑞, 等. 2014. 内蒙古阿拉善地区恩格尔乌苏缝合带二叠纪放射虫及其地质意义[J]. *地质通报*, 33(5): 691–697.
- 尹海权. 2016. 内蒙古阿拉善地区北部古生代沉积及其大地构造演化特征[D]. 中国地质大学 (北京) 博士学位论文.
- 郑荣国, 李锦轶, 刘建峰. 2017. 阿拉善地块北缘地区阿木山组火山岩时代: 锆石 U–Pb 定年证据[J]. *中国地质*, 44(3): 612–613.

附中文参考文献