

阿拉善地块晚奥陶世—石炭纪的构造演化历史

——来自北大山地区多期岩浆-变质-变形事件的约束

宫江华¹, 张建新², 王宗起¹, 于胜尧³, 王东升¹

(1. 中国地质科学院 矿产资源研究所, 自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037; 2. 中国地质科学院 地质研究所, 北京 100037; 3. 中国海洋大学 海洋地球科学学院, 海底科学与探测技术教育部重点实验室, 山东 青岛 266100)

摘要: 阿拉善地块西部的北大山地区识别出两期韧性变形构造, 早期的韧性变形以从南(南东)向北(北西)逆冲为特征, 晚期的韧性变形以近东西向左行剪切为特征。利用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年方法, 在记录早期韧性变形的片麻岩中获得锆石的变质年龄为 422 ± 1 Ma, 代表晚志留世变质事件; 在记录晚期韧性变形的 2 件二长花岗岩中获得锆石结晶年龄分别为 326.2 ± 1.2 Ma 和 323.8 ± 2.6 Ma, 代表早石炭世岩浆活动。结合前人研究成果, 发现阿拉善地块西部北大山地区的两期韧性变形特征、变形时代与阿拉善地块东部巴彦乌拉山-狼山地区相似, 同时阿拉善地块东、西部晚奥陶世-石炭纪多期岩浆活动的岩石类型、期次、地化及 Nd 同位素等特征也非常相似。以上特征表明, 阿拉善地块东、西部经历了相同的构造演化历史, 形成一条发育在早前寒武纪变质基底之上、呈近东西向弧形展布的晚奥陶世-石炭纪构造-岩浆岩带(西起桃花拉山, 经北大山、诺尔公-巴彦乌拉山, 东到狼山), 其成因与古亚洲洋的俯冲造山事件密切相关。

关键词: 阿拉善地块; 晚奥陶世-石炭纪岩浆岩; 构造变形; 锆石 U-Pb 定年; 古亚洲洋

中图分类号: P542; P597+.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2018)05-0771-28

Late Ordovician-Carboniferous tectonic evolutionary history of the Alxa Block: Constrained by the multistage magmatic-metamorphic-deformation events in Beidashan area

GONG Jiang-hua¹, ZHANG Jian-xin², WANG Zong-qi¹, YU Sheng-yao³ and WANG Dong-sheng¹

(1. MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3. Key Laboratory of Submarine Geosciences and Prospecting Technique, Ministry of Education; College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: Two ductile deformations were identified in Beidashan area, which lies in the western Alxa Block. Early ductile deformation is characterized by top-to-the-north (northwest) ductile thrust structure, and a late Silurian metamorphic age of 422 ± 1 Ma was yielded by the paragneiss which was related to the thrust deformation. Later ductile deformation was characterized by EW-trending sinistral shear, and two zircon U-Pb crystallization ages of

收稿日期: 2018-02-26; 接受日期: 2018-07-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(41702234)

作者简介: 宫江华(1984-), 男, 汉族, 助理研究员, 主要从事造山带的变质变形研究, E-mail: ba-ma521@163.com。

326.2 ± 1.2 Ma and 323.8 ± 2.6 Ma were yielded for two monzonitic granites which experienced the shear deformation. Combined with previous research on Alxa Block, a comprehensive comparison of the late Ordovician-Carboniferous magmatic-metamorphic-deformation events between the western and the eastern Alxa Block was made in this study. On the one hand, the characteristics and ages of two ductile deformations in Beidashan are similar to those of Bayanwulashan-Langshan which lies in the eastern Alxa Block. On the other hand, late Ordovician-Carboniferous magmatic rocks in the western and eastern Alxa Block also have similar rock types, ages as well as geochemical and Nd isotopic characteristics. All these characteristics indicate that the western and eastern Alxa Block went through the same tectonic evolution, and these authors also hold that a late Ordovician-Carboniferous tectonic-magmatic belt was developed in the early Precambrian metamorphic basement of the Alxa Block. This tectonic-magmatic belt extends from the Taohualashan in the west, through Beidashan, Nuoergong, Bayanwulashan, to the Langshan in the east and its origin was related to the continuous southward subduction of the Paleo Asian Ocean.

Key words: Alxa Block; Late Ordovician-Carboniferous magmatite; tectonic deformation; zircon U-Pb dating; Paleo-Asian Ocean

Fund support: National Science Foundation of China (41702234)

阿拉善地块位于华北克拉通西部,北邻中亚造山带,西接塔里木克拉通,西南为祁连造山带(图1a),是一个多地体相互作用的太古宙微陆块,具有复杂的演化历史。目前阿拉善地块与中亚陆块(或塔里木克拉通)的拼贴历史(Wu *et al.*, 1998; Feng *et al.*, 2013; Zhang Wen *et al.*, 2013; Zheng *et al.*, 2014)、与祁连地块的拼贴历史(张建新等, 1997; Song *et al.*, 2013)已经相对清楚,但它与华北克拉通的关系却始终存在争议。一种观点认为阿拉善地块具有与华北克拉通相似的早前寒武纪变质基底和盖层,在新太古代或古元古代末期已经成为华北克拉通的一部分(Zhai *et al.*, 2005; Zhao *et al.*, 2005; 董春燕等, 2007; Zhang Jianxin *et al.*, 2013);另一种观点认为阿拉善地块具有与扬子、塔里木克拉通相似的变质基底和盖层(葛肖虹等, 2000; 陆松年等, 2002; 段吉业等, 2005; Zhang *et al.*, 2011),或是独立微陆块(Dan *et al.*, 2012),它与华北克拉通彼此独立,自显生宙以来才拼贴为统一陆块。在后一种观点的基础上,一些学者根据地块南部河西走廊地区古生代地层的碎屑锆石及古地磁研究,提出它们的拼贴时代为晚寒武世(黄宝春等, 2000)、中奥陶世—早泥盆世(张进等, 2012; 李锦轶等, 2012)、晚泥盆世—早石炭世(Yuan and Yang, 2015a; Zhang Jin *et al.*, 2016; Zhao Xiaochen *et al.*, 2016)、晚二叠世—早三叠世(葛肖虹等, 2009)、早中三叠世(杨振宇等, 2014)或晚三叠世—早白垩世(Yuan and Yang, 2015b)等不同认识。但是这些古生代地层是否属于阿拉善地块还存在争议,其碎屑

锆石组成和代表的物源特征被认为不能作为阿拉善地块与华北克拉通古生代分离的证据(宫江华等, 2013; Liu Qian *et al.*, 2016; 张建新等, 2018)。近年来,又有学者对阿拉善地块东部巴彦乌拉山、狼山南部地区的晚奥陶世—石炭纪岩浆岩和变形构造进行研究,认为是阿拉善地块与华北克拉通古生代碰撞的产物(Zhang Jin *et al.*, 2013; Dan *et al.*, 2016; Wang *et al.*, 2016)。事实上,阿拉善地块西部(北大山、龙首山)同样出露大量的晚奥陶世—石炭纪岩浆岩,其成因普遍被认为与古亚洲洋的俯冲相关(Liu Qian *et al.*, 2016; Zhou *et al.*, 2016; Xue *et al.*, 2017)或与祁连洋的俯冲碰撞造山作用相关(魏俏巧等, 2013; 段俊等, 2015; Duan *et al.*, 2015; Zhang *et al.*, 2017)。最近,笔者在北大山地区又识别出与阿拉善地块东部相似的两期韧性变形构造,这意味着阿拉善地块东、西部地区不但经历了同期的晚奥陶世—石炭纪多期岩浆事件,也经历了相似的构造变形事件。因此,如何认识阿拉善地块不同地区的晚奥陶世—石炭纪多期岩浆活动及相关变形构造的成因?它们究竟是中亚造山事件、祁连造山事件,还是阿拉善地块与华北克拉通汇聚的产物?这些问题的探讨,是解决晚奥陶世—石炭纪阿拉善地块的构造演化历史及其与周缘地体相互关系的关键。

本文报道了北大山地区两期韧性变形特征,并通过对变形岩石的锆石 U-Pb 定年,分别获得晚志留世变质年龄、石炭纪岩浆结晶年龄。结合前人在北大山及邻区的研究成果,对比了阿拉善地块东、西部地区的构造变形特征,同时总结了晚奥陶世—石炭纪

岩浆岩的类型、分布、地球化学及 Sr-Nd 同位素特征,在此基础上探讨了阿拉善地块晚奥陶世—石炭纪的演化历史及区域构造意义。

1 地质背景

阿拉善地块位于华北克拉通最西端,是一个被造山带和断裂带围限的太古宙微陆块(图1)。它的北缘经历了古亚洲洋一直持续到晚古生代末的俯冲—增生造山作用(Wu *et al.*, 1998; Feng *et al.*, 2013; Zhang Wen *et al.*, 2013; Zheng *et al.*, 2014);西南缘经历了祁连山早古生代的俯冲—增生造山作用(张建新等, 1997; Song *et al.*, 2013);东南缘可能经历了晚古生代—早中生代与华北板块的碰撞拼合事件(张进等, 2012; 李锦轶等, 2012; 杨振宇等, 2014; Zhang Jin *et al.*, 2013, 2016; Dan *et al.*, 2016)。这些不同阶段造山事件的叠加影响,形成了遍布阿拉善地区的巨量岩浆活动及不同性质的多期变形构造,

记录了显生宙以来阿拉善地块与周缘地体相互作用的构造演化历史。

根据目前已报道显生宙岩浆岩的锆石年龄峰期(表1),阿拉善地块的显生宙岩浆活动大体上可以分为4个阶段:二叠纪—早三叠世(299~230 Ma)、石炭纪(360~300 Ma)、早泥盆世(419~390 Ma)和晚奥陶世—志留纪(460~420 Ma)。二叠纪—早三叠世岩浆岩出露范围最广,主要分布于阿拉善地块北缘及其内部,岩性包括不同类型的超基性—基性—中酸性侵入岩和火山岩。前人根据两条“板块缝合带”(恩格尔—乌苏、查干楚鲁蛇绿混杂岩带),将阿拉善地块北缘出露的二叠纪—早三叠世岩浆岩划分为两条岩浆岩带,分别为具有“火山弧”性质的宗乃山—沙拉扎山岩浆岩带和具有“陆缘弧”性质的雅布赖山—巴音诺尔公—红谷尔玉林岩浆岩带(图1;吴泰然等, 1992, 1993; 王廷印等, 1993, 1994, 1998a, 1998b; Zheng *et al.*, 2014)。普遍认为,这两条二叠纪—早三叠世岩浆岩带形成于古亚洲洋向阿拉善地块北

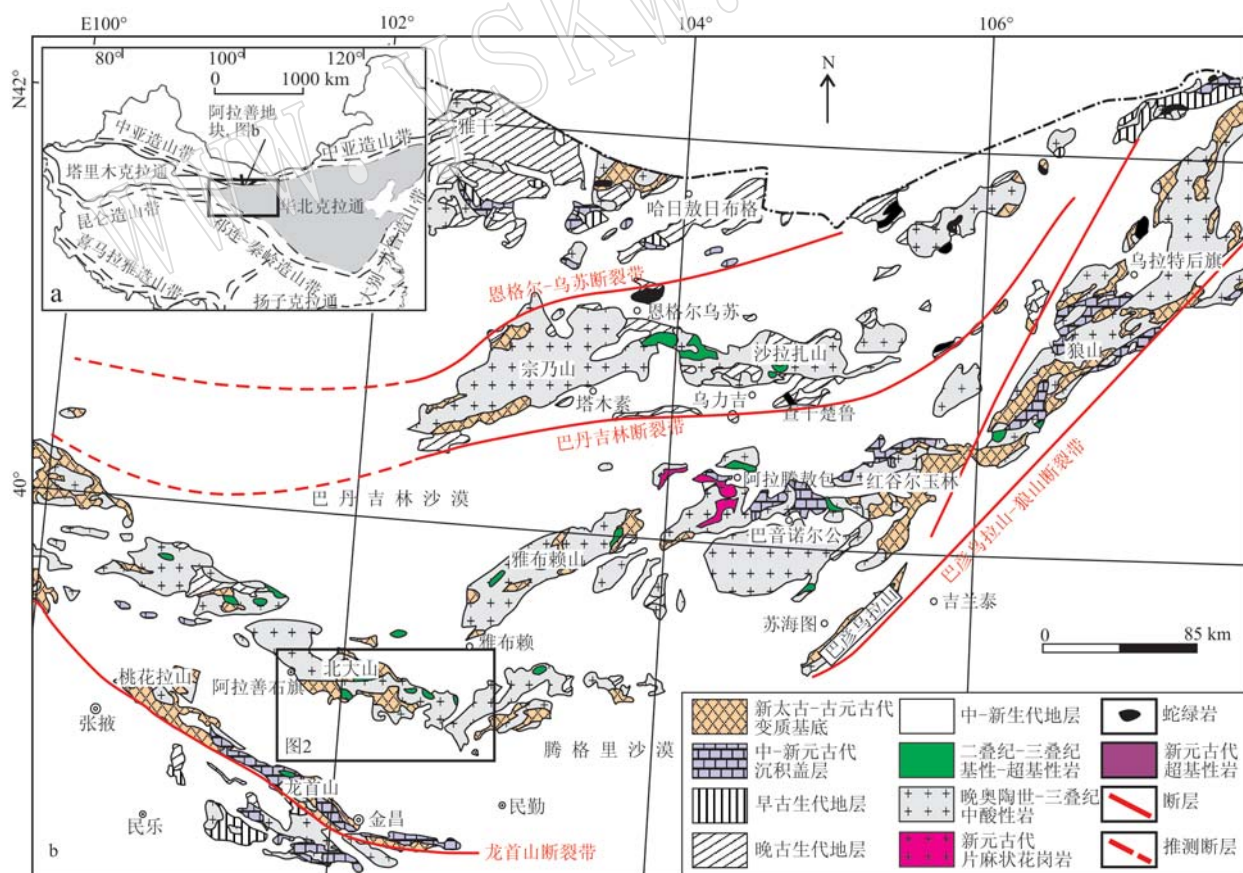


图1 阿拉善地块区域地质图及研究区位置[据张建新等(2018)修改]

Fig. 1 Regional geological sketch map of the Alxa Block, showing the location of the study area (modified after Zhang Jianxin *et al.*, 2018)

表1 阿拉善地块及邻区显生宙岩浆岩的锆石 U-Pb 测年及 Nd 同位素数据汇总

Table 1 Compilation of zircon U-Pb dating data and Nd isotopic data of Phanerozoic magmatic rocks from the Alxa Block and adjacent areas			
采样位置	岩石类型	测年方法	成岩年龄/Ma
晚奥陶世-泥盆纪(460 ~ 390 Ma) 岩浆事件, 阿拉善地块西部地区			$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值
北大山	闪长岩、花岗闪长岩、二长花岗岩	LA-ICPMS	455 ± 3, 450 ± 3, 458 ± 4, 443 ± 3, 452 ± 3
北大山	石英闪长岩、二长花岗岩	LA-ICPMS	407 ± 3, 417 ± 3, 415 ± 3
北大山	黑云母花岗岩、二长花岗岩	LA-ICPMS	408 ± 3, 411 ± 3, 397 ± 4, 409 ± 5
北大山	片麻状花岗岩	LA-ICPMS	410 ~ 390
雅布赖山	黑云母花岗岩	LA-ICPMS	390
龙首山	正长花岗岩	LA-ICPMS	433.4 ± 3.7
龙首山	辉绿岩	LA-ICPMS	420.6 ± 3.1, 423.5 ± 1.4
龙首山	花岗岩	LA-ICPMS	444 ± 2
河西走廊	花岗岩	LA-ICPMS	426 ± 2.8, 424 ± 1.6
河西走廊	花岗岩、花岗闪长岩、石英闪长岩	LA-ICPMS	443 ± 4 ~ 414 ± 3
晚奥陶世-泥盆纪(460 ~ 390 Ma) 岩浆事件, 阿拉善地块东部及狼山地区			
巴彦布拉格	石英闪长岩	LA-ICPMS	423 ± 3
诺尔公	石英闪长岩	LA-ICPMS	440 ± 1
巴彦乌拉山	闪长岩	TIMS	394 ± 7.2
狼山	花岗岩	LA-ICPMS	418 ± 2.3, 443.9 ± 2.4
狼山	花岗闪长岩	TIMS	446.6 ± 4.6
狼山	流纹岩	TIMS	447 ± 3
晚奥陶世-泥盆纪(460 ~ 390 Ma) 岩浆事件, 阿拉善地块北部地区			
雅干地区	黑云母二长花岗岩	SHRIMP	426 ± 6.3
恩格尔乌苏	石英闪长岩	SHRIMP	396.8 ± 3.1
恩格尔乌苏	黑云母花岗岩	LA-ICPMS	423 ± 4.5, 434 ± 1
英巴地区	花岗质片麻岩	LA-ICPMS	417.2 ± 3.5
石炭纪(360 ~ 300 Ma) 岩浆事件, 阿拉善地块西部			
龙首山	花岗岩	LA-ICPMS	329 ± 3 ~ 332 ± 3
龙首山	花岗闪长岩	LA-ICPMS	361.7 ± 4.6
北大山	花岗闪长岩	LA-ICPMS	327 ~ 324
北大山	石英闪长岩	LA-ICPMS	302 ± 9.2
石炭纪(360 ~ 300 Ma) 岩浆事件, 阿拉善地块东部和狼山地区			
巴彦乌拉山	二长花岗岩	SIMS	345 ± 4
巴彦乌拉山	花岗闪长岩	LA-ICPMS	358.7 ± 4.1
诺尔公	石英闪长岩	LA-ICPMS	317 ± 0.8
红古玉林	辉长岩	LA-ICPMS	306 ± 3
诺尔公	角闪辉长岩	LA-ICPMS	300 ± 1

参考文献

Liu Qian *et al.*, 2016
 Liu Qian *et al.*, 2016
 Zhou *et al.*, 2016
 作者未发表数据
 作者未发表数据
 Zeng *et al.*, 2016
 Duan *et al.*, 2015
 魏倩巧等, 2013
 孙宝璐等, 2017
 Zhang *et al.*, 2017
 Dan *et al.*, 2016
 Liu Qian *et al.*, 2016
 李俊建, 2006
 Wang *et al.*, 2015, 2016
 李俊建, 2006
 李俊建, 2006
 李俊健, 2006
 李俊健, 2006
 郑荣国等, 2016
 周印章等, 2013
 Xue *et al.*, 2017
 Zeng *et al.*, 2016
 本文
 张伟等, 2014
 Dan *et al.*, 2016
 Zhang Jin *et al.*, 2013
 徐琳等, 2015
 Feng *et al.*, 2013
 Liu *et al.*, 2017

续表 1-1
Continued Table 1-1

采样位置	岩石类型	测年方法	成岩年龄/Ma	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值	参考文献
叠布斯格	二长花岗岩	SIMS	346 ± 4, 344 ± 5, 337 ± 5	-19.2 ~ -18	Dan <i>et al.</i> , 2016
德尔和通特	花岗岩	LA-ICPMS	321 ± 1	-16.3 ~ -14.4	史兴俊, 2012
狼山	花岗闪长岩	LA-ICPMS	329 ± 1.5		Zhang Jin <i>et al.</i> , 2013
狼山	辉长闪长岩、辉长岩	LA-ICPMS	320.2 ± 1.9, 327.9 ± 2.1	-4.5 ~ -0.4	Wang <i>et al.</i> , 2015
狼山	石英闪长岩、英云闪长岩、辉长岩	LA-ICPMS	337.9 ± 1, 324.7 ± 1.4, 327.2 ± 1.2		Liu Min <i>et al.</i> , 2016
狼山东升庙	花岗岩	LA-ICPMS	304 ± 3.4, 321 ± 2.9		刘晔等, 2013
石炭纪(360 ~ 300 Ma)岩浆事件, 阿拉善地块北部					
恩格尔鸟苏	枕状熔岩	LA-ICPMS	302 ± 14		Zheng <i>et al.</i> , 2014
沙拉扎山	花岗闪长岩	LA-ICPMS	301 ± 2		杨奇狄等, 2014
狼山北部	似斑状花岗岩	LA-ICPMS	313.3 ± 4.5		韩宝福等, 2010
二叠纪—早三叠世(299 ~ 230 Ma)岩浆事件, 阿拉善地块龙首山—北大山—雅布赖山—诺尔公—红谷尔—玉林—狼山—岩带					
龙首山	橄辉岩	SHRIMP	284.4 ± 3.5	+6.09 ~ +7.77	焦建刚等, 2017b
北大山	花岗闪长岩	LA-ICPMS	295 ± 2		陈伟等, 2013
北大山	石英闪长岩、石英二长岩	^{40}Ar — ^{39}Ar	277 ± 4, 275 ± 4		赖新荣等, 2007
北大山	石英闪长岩	^{40}Ar — ^{39}Ar	278 ± 2		苏巧云等, 2012
北大山	辉长岩	LA-ICPMS	293 ± 2 和 267 ± 2		作者未发表数据
雅布赖山	花岗岩	LA-ICPMS	273 ± 7		仵康林, 2011
雅布赖山	花岗岩、花岗闪长岩、闪长岩、英安岩	LA-ICPMS	286 ± 1, 280 ± 1, 272 ± 1, 275 ± 2		叶珂等, 2016
雅布赖山	角闪辉长岩	LA-ICPMS	278 ± 1		王行军, 2012
毕及尔台	闪长岩、石英闪长岩	SIMS	282 ± 2, 280 ± 2	-12 ~ -9.5	Dan <i>et al.</i> , 2014
毕及尔台	片麻状花岗岩	SHRIMP	289 ± 3, 284 ± 3		耿元生等, 2012
毕及尔台	片麻状闪长岩	SHRIMP	279 ± 2, 276 ± 2		耿元生等, 2012
毕及尔台	角闪辉石岩、角闪石岩	LA-ICPMS	286 ± 2, 267 ± 1		王行军, 2012
毕及尔台	辉长岩	LA-ICPMS	274 ± 3		Feng <i>et al.</i> , 2013
诺尔公	花岗闪长岩、二长花岗岩	LA-ICPMS	265 ± 1, 278 ± 1		李杰, 2012
诺尔公	闪长玢岩	SHRIMP	280 ± 5		李俊建, 2006
诺尔公	花岗闪长岩、二长花岗岩	SIMS	278 ± 2, 284 ± 3, 279 ± 2, 281 ± 2, 283 ± 2	-14.3 ~ -8.4	Dan <i>et al.</i> , 2014
诺尔公	花岗岩	LA-ICPMS	272 ± 9		仵康林, 2011
诺尔公	流纹岩	LA-ICPMS	259		包创等, 2012
诺尔公	流纹岩	LA-ICPMS	265 ± 2		徐琳等, 2015
诺尔公	花岗岩	LA-ICPMS	252 ± 1		谢奋全, 2014
诺尔公	辉长岩	LA-ICPMS	276 ± 2		肖进等, 2016
诺尔公	角闪辉长岩、石英闪长岩	LA-ICPMS	279 ± 1, 268 ± 1	-10.3 ~ -7.3	Liu <i>et al.</i> , 2017

续表 1-2
Continued Table 1-2

采样位置	岩石类型	测年方法	成岩年龄/Ma	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值	参考文献
牙马图	花岗闪长岩、英云闪长岩	LA-ICPMS	276 ± 2, 269 ± 2		耿元生等, 2012
牙马图	花岗岩、二长花岗岩	LA-ICPMS	276 ~ 269	-12.4 ~ -8.2	Zhang Jianjun <i>et al.</i> , 2015, 2016
牙马图	石英闪长岩、花岗岩	LA-ICPMS	295 ± 2, 273 ± 1		李俊建, 2006
牙马图	辉长岩	LA-ICPMS	276 ± 2, 275 ± 1	-7.4 ~ -7	Zhang Jianjun <i>et al.</i> , 2016
牙马图	辉长岩	LA-ICPMS	275 ± 1		张磊等, 2013
牙马图	辉长岩	LA-ICPMS	262 ± 5		Feng <i>et al.</i> , 2013
哈里努登	花岗闪长岩	LA-ICPMS	284 ± 2		史兴俊等, 2012
哈里努登	闪长岩	LA-ICPMS	270 ± 2, 276 ± 2		耿元生等, 2012
狼山	花岗岩、花岗闪长岩、辉长岩	LA-ICPMS	278 ± 2, 273 ± 2, 260 ± 1, 255 ± 2	-8.6 ~ 0.6	Wang <i>et al.</i> , 2015
狼山	花岗岩	LA-ICPMS	289		李俊建, 2006
狼山	辉长-闪长岩	LA-ICPMS	274 ± 1		皮桥辉等, 2010
狼山	花岗斑岩、闪长岩	LA-ICPMS	285 ± 2, 292 ± 2, 256 ± 3		Lin <i>et al.</i> , 2014
狼山	花岗岩、石英闪长岩	LA-ICPMS	287 ± 1, 284 ± 2, 275 ± 1		Hu <i>et al.</i> , 2015
二叠纪-早三叠世(299 ~ 230 Ma)岩浆事件, 阿拉善地块北部, 宗乃山-沙拉扎山岩浆岩带和查干楚鲁蛇绿混杂岩带					
宗乃山	二长花岗岩、英云闪长岩	LA-ICPMS	264 ± 3, 273 ± 3		陈高潮等, 2015
宗乃山	二长花岗岩	LA-ICPMS	253.5 ± 8		冉峰等, 2012
宗乃山	钾长花岗岩、闪长岩、花岗闪长岩	LA-ICPMS	272 ± 1, 249 ± 1, 247 ± 1		史兴俊等, 2014
宗乃山	片麻状花岗岩、花岗岩	LA-ICPMS	268.4 ± 0.69, 236.6 ± 0.95, 249.7 ± 2.6		谢奋全, 2014
宗乃山	二长花岗岩	LA-ICPMS	251 ± 2	-0.1 ~ +1.3	Zhang Wen <i>et al.</i> , 2013
宗乃山	辉长岩	LA-ICPMS	266 ± 5		李俊建, 2006
宗乃山	花岗岩	LA-ICPMS	273 ± 4, 273 ± 3, 274 ± 4, 251 ± 3		仵康林, 2011
宗乃山	角闪辉长岩	LA-ICPMS	248 ± 1		徐东卓等, 2014
宗乃山	英云闪长岩、二长花岗岩	LA-ICPMS	250 ± 1, 251 ± 1		张正平等, 2016
沙拉扎山	辉长岩、花岗岩和花岗闪长岩	LA-ICPMS	264 ± 3, 266 ± 2, 254 ± 2, 251 ± 2, 250 ± 2		Shi <i>et al.</i> , 2014
沙拉扎山	花岗岩、花岗闪长岩	LA-ICPMS	236 ± 1, 249 ± 1		谢奋全, 2014
沙拉扎山	玄武安山岩	LA-ICPMS	284 ± 3	+2.7 ~ +8	Shi <i>et al.</i> , 2018
查干楚鲁	辉长岩	LA-ICPMS	275 ± 3		Zheng <i>et al.</i> , 2014
查干楚鲁	花岗闪长岩、英安岩	LA-ICPMS	290 ± 3, 254 ± 3		Shi <i>et al.</i> , 2016

的西延部分(图 1b)。北大山地区出露地层主要包括少量前震旦纪变质基底和中新生代地层,缺失古生代地层(图 2),说明北大山地区在古生代期间长期隆起剥蚀。甘肃省地质局第一区测队(1971)^①首先将该地区的前震旦纪中深变质岩称为北大山群;甘肃省地质矿产局(1989)进一步将北大山群分为 3 个岩组:A 组分布在北大山西部,由黑云斜长片麻岩、黑云角闪斜长片麻岩夹黑云母石英片岩、云母片岩、斜长角闪岩、大理岩、石英岩等组成,变质程度为角闪岩相;B 组分布在北大山中东部,由大理岩、白云岩和角闪片麻岩、黑云斜长片麻岩、含石榴子石云母石英片岩、含石榴子石角闪片岩夹石英岩、变粒岩等组成,变质程度为角闪岩相;C 组见于北大山东端,由黑云片岩、二云石英片岩、斜长角闪岩、黑云变粒岩夹黑云斜长片麻岩等组成,为高绿片岩-角闪岩相。由于北大山地区出露的这套变质岩系既有变质表壳岩,也有变质深成岩,我们称其为北大山杂岩。近年来,在北大山杂岩中已识别出大量 2.5 Ga TTG 片麻岩,证明阿拉善地块存在新太古代变质基底(宫江华等, 2012; Zhang Jianxin *et al.*, 2013)。大量不同类型及成因的显生宙岩浆岩侵入到北大山杂岩中(图 2)。根据岩体野外穿切关系及前人报道的锆石 U-Pb 测试结果,北大山及其北西延伸地区的岩浆岩主要包括:晚奥陶世-泥盆纪中酸性侵入岩(460 ~

北大山位于阿拉善地块西部,走向近北西-南东向,向南东逐渐转为北东向,总体上呈向南突出的弧形。它的东北部为雅布赖山,以雅布赖盆地相隔;南部与龙首山近似平行,之间相隔潮水盆地;北部为巴丹吉林沙漠,东部为腾格里沙漠。从构造位置上看,北大山可能属于雅布赖-诺尔公-红谷尔玉林岩浆带

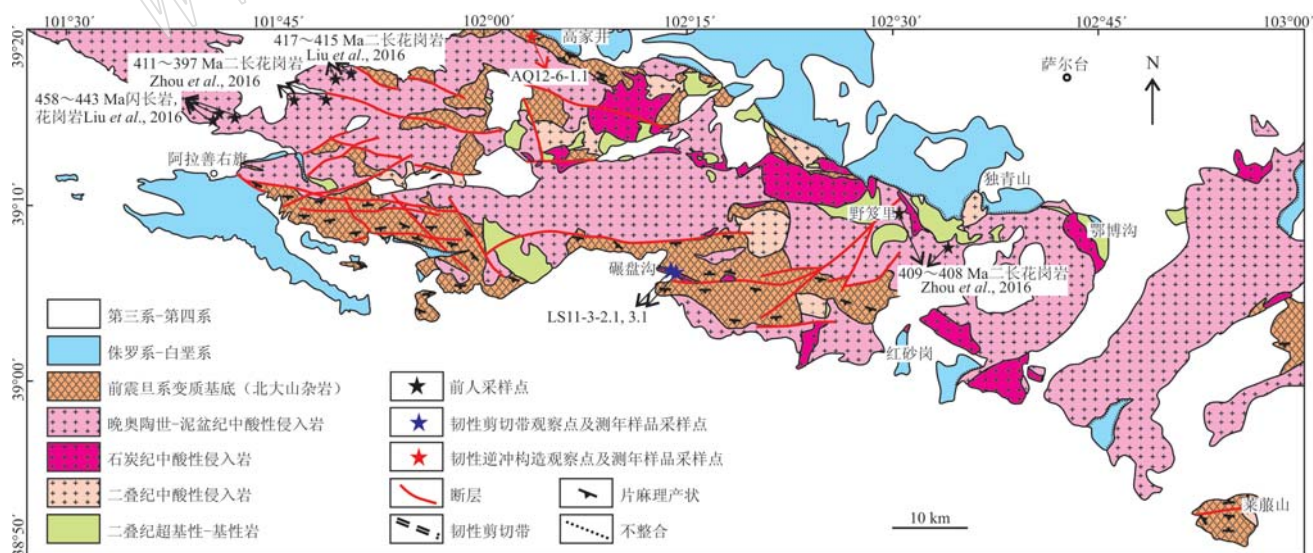


Fig. 2 Regional geological map of the Beidashan region(after No.2 Geological Party of BGMR of Gansu Province, 1974)^②

② 甘肃省地质局第二区测队. 1974. 中华人民共和国 1:200 000 地质图(萨尔台幅), J-48-VII.

397 Ma; Liu Qian *et al.*, 2016; Zhou *et al.*, 2016)、石炭纪中酸性侵入岩(302 Ma; 张伟等, 2014)和二叠纪超基性-基性-中酸性侵入岩(295 ~ 267 Ma; 赖欣荣等, 2007; 苏巧云等, 2012; 陈炜等, 2013; 焦建刚等, 2017a)。此外,在北大山南部的龙首山及其延伸地区也报道有晚奥陶世-二叠纪基性、中酸性侵入岩(魏俏巧等, 2013; 段俊等, 2015; Duan *et al.*, 2015; Zeng *et al.*, 2016; 孙宝璐等, 2017; 焦建刚等, 2017b; Xue *et al.*, 2017)。值得注意的是,野外工作中发现,部分侵入北大山杂岩中的显生宙岩浆岩中也发育片麻状构造,与变质基底岩系有时难以区分,在过去的地质资料中被划为前震旦系变质基底,这些片麻状岩浆岩指示北大山经历了一直持续到显生宙的多期变质变形作用。

2 变形构造及样品特征

本次工作在北大山地区的高家井、碾盘沟地区分别识别出两类韧性变形构造(图2、图3)。

高家井地区出露一套糜棱岩化片麻岩,在1:20万地质图(萨尔台幅)中被定为前震旦纪变质基底(图2)。区域上北大山地区变质基底岩系的片麻理产状总体倾向南。该点处片麻理倾向SSE,近直立(产状 $160^{\circ}\angle 76^{\circ}$),发育典型的拉伸线理及S-C结构,显示出从南(南东)向北(北东)的韧性逆冲变形特征(图3a)。这套片麻岩具有明显混合岩化和部分熔融特征,推测该变形发生在高温条件下,相关的变质作用达到高角闪岩-麻粒岩相条件。采集该韧性变形带中的糜棱岩化片麻岩AQ12-6-1.1用于锆石U-Pb测年分析(采样点坐标: $39^{\circ}20.41'$, $102^{\circ}7.62'$)。该样品具有糜棱结构,片麻状构造,主要矿物包括石英、斜长石、黑云母、少量石榴石及副矿物,旋转碎斑主要为斜长石(图3b)。

碾盘沟地区出露一套糜棱岩化花岗岩,在1:20万地质图(萨尔台幅)中被定为华力西晚期钾长花岗岩,它侵位于前震旦系变质基底中(图2)。露头上糜棱岩化带宽约数十米,发育近水平拉伸线理(La: $120^{\circ}\sim 130^{\circ}\angle 15^{\circ}\sim 25^{\circ}$),指示剪切方向为近东西向

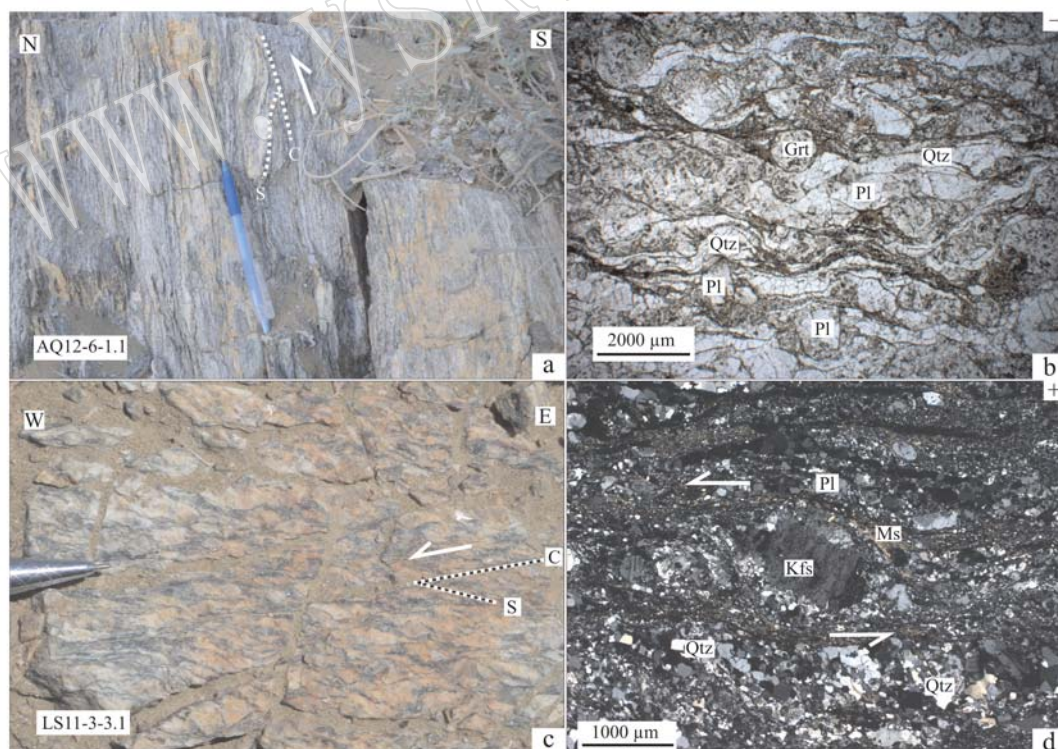


图3 北大山地区两期韧性变形的野外露头(a、c)及相关糜棱岩化岩石的显微特征(b为单偏光, d为正交偏光)

Fig. 3 Field photos of outcrops (a, c) and photomicrographs (b, plainlight; d, crossed nicols) of two mylonitic rocks from two ductile deformation belts in Beidashan region

Pl—斜长石; Qtz—石英; Grt—石榴子石; Kfs—钾长石; Ms—白云母
Pl—plagioclase; Qtz—quartz; Grt—garnet; Kfs—K-feldspar; Ms—muscovite

(图3c)。在该地区采集同一套花岗岩中弱变形(LS11-3-2.1)和强变形(LS11-3-3.1)两件样品分别进行锆石测年及地球化学分析(采样点坐标: $39^{\circ}6.17', 102^{\circ}14.20'$)。样品 LS11-3-2.1 呈粉红色, 中粗粒结构, 弱片麻状构造。显微镜下岩石呈花岗岩结构, 主要矿物为钾长石(30%)、斜长石(35%)、石英(30%)、黑云母(3%~5%)及少量锆石、磷灰石等副矿物, 为二长花岗岩。样品 LS11-3-3.1 明显糜棱岩化, 露头上发育 S-C 组构。显微镜下岩石为糜棱结构, XZ 面显示左行剪切特征, 与露头特征一致。主要矿物组成与前者一致, 但矿物已经明显被压碎, 基质主要为石英和云母组成, 云母类矿物呈定向分布, 碎斑主要为钾长石(图3d)。

3 测试方法

锆石分选工作由河北省区域地质矿产调查研究所实验室完成。野外采集新鲜且无脉体穿插的样品, 将样品破碎到适当大小(一般为 80~100 目)、淘洗, 然后经人工重砂、电磁分选等多种方法分离锆石, 并在双目镜下手工挑选。随机挑选锆石 100~150 粒粘到双面胶上, 加注环氧树脂进行制靶, 待固化后, 将靶内锆石打磨至原尺寸一半大小, 抛光之后在光学显微镜下拍摄锆石的反射光和透射光照片。详细制靶流程及注意事项见宋彪等(2002)。为查明锆石内部结构及成因, 又对锆石进行了阴极发光

(CL)图像采集, 该工作在北京离子探针中心完成。

锆石 U-Pb 测年由 中国地质调查局天津地质调查中心实验室完成。所用仪器为 Neptune 多接收器电感耦合等离子体质谱仪和 193 nm 激光取样系统(LA-MC-ICP-MS)。实验根据锆石阴极发光照片、反射光和透射光照片选择测点位置, 利用激光器对锆石进行剥蚀, 剥蚀斑束为 $35\ \mu\text{m}$, 能量密度为 $13\sim14\ \text{J}/\text{cm}^2$, 频率为 $8\sim10\ \text{Hz}$, 激光剥蚀物质以 He 为载气送入 Neptune, 利用动态变焦扩大色散使质量数相差很大的 U、Pb 同位素可以同时接收, 从而进行 U-Pb 同位素测定。锆石标样采用 TEMORA 标准锆石和 GJ-1 作为外部锆石年龄标准进行 U、Pb 同位素分馏校正(Black *et al.*, 2003), 采用 ICPMS Data Cal 程序(Liu *et al.*, 2010)和 ISPLIT 程序(Ludwig, 2005)进行数据分析处理和作图, 采用 ^{208}Pb 进行普通铅校正(Andersen, 2002), 利用 NIST612 玻璃标样作为外标计算锆石样品的 Pb、U、Th 含量。

4 锆石 U-Pb 测试结果

高家井地区片麻岩样品 AQ12-6-1.1 中的锆石呈浑圆状, 粒径约 0.1~0.15 mm 左右。CL 图像显示, 锆石内部具有斑杂状或足球花纹状结构, 为典型高温变质锆石特征(图4a)。对其中 50 粒锆石进行测年, 测年结果见表2。样品中全部锆石的 Th/U 值介于 0.05~0.30 之间, 绝大多数小于 0.2。在锆石年

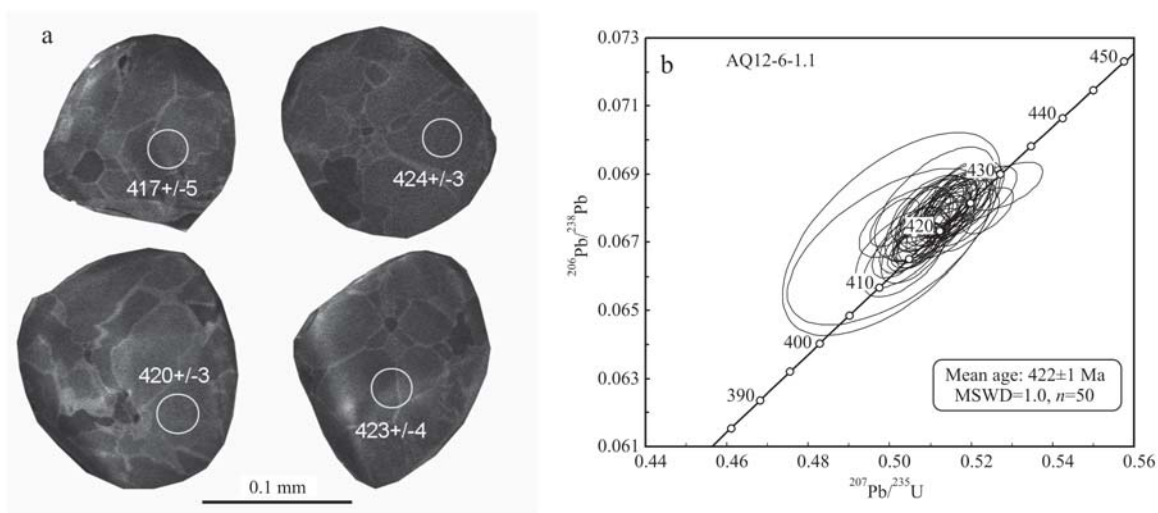


图4 北大山高家井地区糜棱岩化片麻岩的锆石 CL 图像及年龄谐和图

Fig. 4 Zircon cathodoluminescence characteristics and U-Pb dating results of the mylonitized gneiss from Gaojiajing area, Beidashan

表 2 阿拉善地块北大山地区糜棱岩化片麻岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果
Table 2 LA-ICP-MS zircon dating results of mylonitized gneiss from Beidashan region, Alxa Block

测点号	$w_B/10^{-6}$		Th/U	同位素比值				年龄/Ma																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
	Pb	U		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
AQ12-6-1.1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												

续表 2
Continued Table 2

测点号	$w_B/10^{-6}$		Th/U	同位素比值				年龄/Ma			
	Pb	U		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ
27	21	122	0.15	0.510 5	0.005 6	0.067 4	0.000 7	0.054 985	0.000 305	420	4
28	19	136	0.07	0.514 2	0.003 7	0.068 1	0.000 4	0.054 764	0.000 244	425	2
29	26	135	0.17	0.513 9	0.004 5	0.067 6	0.000 4	0.055 155	0.000 444	422	2
30	23	133	0.20	0.515 4	0.003 1	0.068 0	0.000 3	0.055 014	0.000 230	424	2
31	17	80	0.20	0.528 6	0.006 0	0.068 6	0.000 5	0.055 863	0.000 498	428	3
32	34	128	0.17	0.513 4	0.003 8	0.067 8	0.000 4	0.054 945	0.000 237	423	2
33	15	187	0.12	0.506 2	0.003 6	0.067 0	0.000 4	0.054 847	0.000 336	418	2
34	45	127	0.31	0.518 0	0.005 9	0.067 6	0.000 6	0.055 551	0.000 359	422	4
35	39	82	0.29	0.511 1	0.009 7	0.068 1	0.001 1	0.054 410	0.000 550	425	7
36	33	97	0.18	0.517 1	0.007 2	0.068 2	0.000 7	0.054 963	0.000 522	426	4
37	21	127	0.21	0.519 5	0.004 6	0.068 4	0.000 5	0.055 096	0.000 268	427	3
38	43	159	0.30	0.515 6	0.003 8	0.068 1	0.000 4	0.054 890	0.000 260	425	2
39	44	133	0.28	0.508 3	0.004 3	0.067 4	0.000 5	0.054 660	0.000 253	421	3
40	46	165	0.20	0.507 2	0.005 5	0.067 5	0.000 7	0.054 521	0.000 246	421	4
41	26	172	0.12	0.514 8	0.004 4	0.068 0	0.000 6	0.054 925	0.000 207	424	3
42	44	192	0.19	0.516 5	0.004 8	0.068 3	0.000 6	0.054 866	0.000 198	426	3
43	55	130	0.30	0.517 4	0.004 8	0.068 1	0.000 5	0.055 070	0.000 274	425	3
44	59	182	0.11	0.524 0	0.004 2	0.067 9	0.000 5	0.055 936	0.000 220	424	3
45	136	329	0.27	0.510 3	0.004 1	0.067 6	0.000 5	0.054 721	0.000 182	422	3
46	104	302	0.18	0.513 5	0.004 8	0.067 4	0.000 5	0.055 288	0.000 240	420	3
47	30	177	0.08	0.517 9	0.005 4	0.067 8	0.000 6	0.055 387	0.000 264	423	4
48	23	185	0.12	0.513 4	0.005 4	0.067 9	0.000 7	0.054 889	0.000 218	423	4
49	73	215	0.20	0.518 1	0.004 9	0.068 0	0.000 6	0.055 243	0.000 201	424	4
50	47	178	0.20	0.517 0	0.005 3	0.068 1	0.000 7	0.055 102	0.000 237	425	4

龄谐和图中,全部测点数据均位于谐和线上,锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于 $428 \pm 3 \sim 415 \pm 4$ Ma之间,加权平均值为 422 ± 1 Ma(图4b),解释为变质年龄。

碾盘沟地区两件花岗岩样品 LS11-3-2.1 和 LS11-3-3.1 中的锆石相似,大多为无色透明、棱柱状自形晶体,偶有粒状他形晶体。锆石长轴约 $100 \sim 500 \mu\text{m}$,长宽比介于 $1:1 \sim 5:1$ 之间。CL 照片显示,大多数锆石具有密集的生长环带,为典型岩浆成因锆石,少数他形锆石的环带不明显,可能为捕获成因(图5a、5b)。分别对两件样品中明显岩浆成因的锆石进行 U-Pb 测年,测年结果见表3。

样品 LS11-3-2.1 中 32 粒锆石的 Th/U 值多数大于 1.0,支持锆石为岩浆成因。在锆石年龄谐和图中,全部测点数据均位于谐和线上,锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$

^{238}U 年龄介于 $328 \pm 3 \sim 326 \pm 3$ Ma 之间,加权平均值为 326.6 ± 1.2 Ma(图5c),解释为岩浆结晶年龄。样品 LS11-3-3.1 中 16 粒锆石的 Th/U 值介于 0.4 ~ 1.49 之间,支持锆石为岩浆成因。在锆石年龄谐和图中,全部测点数据均位于谐和线上,其中 14 粒锆石获得的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于 $334 \pm 3 \sim 317 \pm 3$ Ma 之间,加权平均年龄为 323.8 ± 2.6 Ma(图5d),解释为岩浆结晶年龄。此外,还有 2 粒锆石获得 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄分别为 425 ± 6 Ma 和 413 ± 4 Ma,与北大山地区广泛出露的早古生代花岗岩时代一致(Liu Qian *et al.*, 2016; Zhou *et al.*, 2016),可能为岩浆侵位过程中捕获的锆石。两件花岗岩样品获得的年龄在误差范围内一致,将岩浆侵位时代限定为 $327 \sim 324$ Ma。

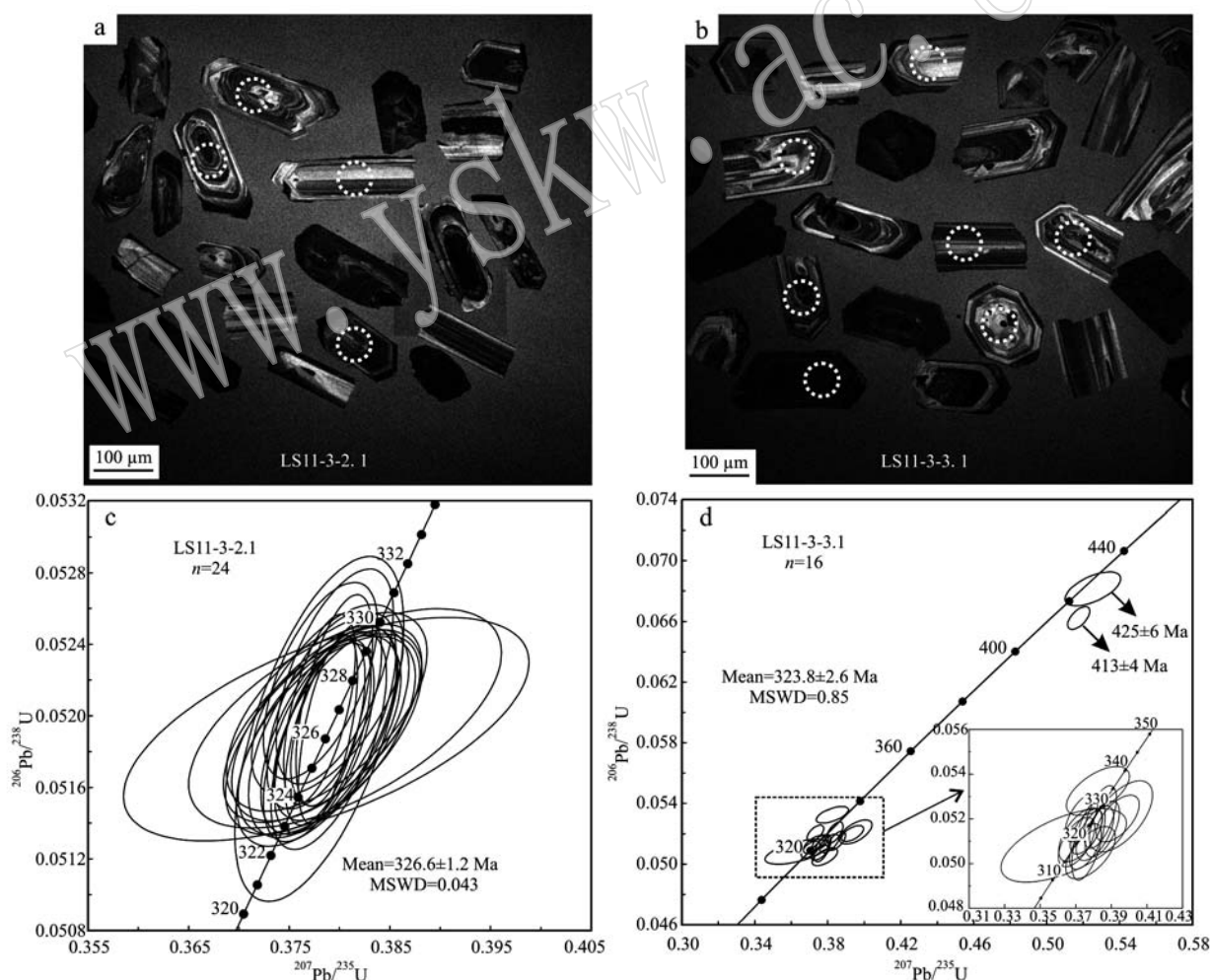


图5 北大山碾盘沟地区弱变形和强变形花岗岩样品的锆石 CL 图像(a、b)和年龄谐和图(c、d)

Fig. 5 Zircon cathodoluminescence characteristics (a, b) and U-Pb concordia diagrams (c, d) of the weakly and strongly deformed granite from Nianpangou area, Beidashan

表 3 阿拉善地块北大山地区石炭纪花岗岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果

Table 3 LA-ICP-MS zircon dating results of Carboniferous granites from Beidashan region, Alxa Block

测点号	$w_B/10^{-6}$		Th/U	同位素比值				年龄/Ma							
	Pb	U		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ
LS11-3-2.1															
1	21	285	1.91	0.378 7	0.007 2	0.051 9	0.000 5	0.052 9	0.001 0	326	3	326	6	326	41
2	80	1 337	1.03	0.378 0	0.002 9	0.052 0	0.000 4	0.052 7	0.000 4	327	3	326	3	315	17
3	16	244	1.44	0.378 7	0.008 1	0.052 0	0.000 5	0.052 8	0.001 1	327	3	326	7	320	49
4	30	442	1.60	0.380 4	0.004 3	0.052 0	0.000 4	0.053 0	0.000 6	327	3	327	4	330	24
5	94	1 788	0.12	0.378 5	0.004 7	0.052 0	0.000 4	0.052 8	0.000 7	327	3	326	4	318	30
6	15	251	0.91	0.378 4	0.008 0	0.051 9	0.000 5	0.052 9	0.001 1	326	3	326	7	323	46
7	67	1 072	0.98	0.380 6	0.012 7	0.052 0	0.000 5	0.053 1	0.001 5	327	3	327	11	333	62
8	26	368	1.76	0.378 0	0.006 9	0.051 9	0.000 8	0.052 8	0.000 8	326	5	326	6	320	33
9	32	426	2.05	0.378 3	0.006 0	0.051 9	0.000 5	0.052 9	0.000 8	326	3	326	5	323	36
10	11	168	1.67	0.378 7	0.016 5	0.051 9	0.000 5	0.052 9	0.002 3	326	3	326	14	324	98
11	19	290	1.47	0.377 9	0.006 7	0.051 9	0.000 5	0.052 9	0.000 9	326	3	326	6	322	37
12	47	787	0.99	0.378 3	0.003 9	0.051 9	0.000 4	0.052 9	0.000 5	326	3	326	3	324	23
13	32	525	0.99	0.378 1	0.004 6	0.052 2	0.000 4	0.052 5	0.000 7	328	3	326	4	309	30
14	27	452	0.92	0.379 5	0.004 8	0.052 2	0.000 5	0.052 7	0.000 6	328	3	327	4	316	27
15	23	362	1.17	0.379 0	0.005 6	0.051 9	0.000 5	0.052 9	0.000 7	326	3	326	5	326	31
16	87	1 460	1.92	0.379 5	0.003 1	0.052 1	0.000 5	0.052 8	0.000 5	327	3	327	3	322	21
17	553	10 074	0.55	0.378 8	0.002 4	0.051 9	0.000 4	0.052 9	0.000 3	326	3	326	2	325	14
18	20	318	1.17	0.378 7	0.007 7	0.052 0	0.000 4	0.052 9	0.001 0	327	3	326	7	323	44
19	17	349	0.06	0.380 2	0.005 5	0.051 9	0.000 4	0.053 1	0.000 8	326	3	327	5	332	33
20	28	503	0.64	0.378 9	0.004 7	0.051 9	0.000 5	0.053 0	0.000 7	326	3	326	4	328	29
21	73	1 093	1.27	0.378 6	0.003 2	0.051 9	0.000 4	0.052 9	0.000 4	326	3	326	3	324	19
22	21	275	2.12	0.378 2	0.008 0	0.051 9	0.000 4	0.052 8	0.001 1	326	3	326	7	321	47
23	26	401	1.35	0.377 9	0.004 5	0.051 9	0.000 5	0.052 9	0.000 6	326	3	326	4	323	26
24	34	489	1.45	0.378 8	0.006 2	0.052 1	0.000 4	0.052 7	0.000 9	327	3	326	5	318	38

Continued Table 3

测点号	$w_B/10^{-6}$		Th/U	同位素比值				年龄/Ma							
	Pb	U		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{236}\text{Pb}$	1 σ				
LS11-3-3.1															
1	25	390	1.21	0.384 9	0.003 9	0.051 5	0.000 5	0.054 2	0.000 5	324	3	331	3	378	21
2	34	563	0.94	0.383 8	0.003 7	0.052 1	0.000 6	0.053 4	0.000 5	327	4	330	3	348	23
3	32	557	0.89	0.376 0	0.003 7	0.051 4	0.000 4	0.053 0	0.000 6	323	3	324	3	330	25
4	15	245	1.29	0.378 4	0.005 7	0.050 5	0.000 5	0.054 4	0.000 8	317	3	326	5	386	34
5	41	739	0.75	0.370 5	0.004 2	0.051 0	0.000 5	0.052 7	0.000 5	320	3	320	4	317	21
6	22	357	1.23	0.373 2	0.003 7	0.052 0	0.000 4	0.052 0	0.000 5	327	3	322	3	286	23
7	5	89	0.89	0.363 2	0.014 4	0.050 8	0.000 7	0.051 8	0.002 0	320	4	315	12	279	88
8	25	450	0.90	0.375 4	0.003 6	0.050 8	0.000 4	0.053 6	0.000 5	319	3	324	3	356	21
9	54	969	0.40	0.380 8	0.004 3	0.051 4	0.000 5	0.053 8	0.000 6	323	3	328	4	362	26
10	27	455	1.12	0.377 1	0.003 8	0.051 1	0.000 7	0.053 6	0.000 5	321	5	325	3	353	23
11	17	268	1.36	0.393 6	0.004 9	0.052 0	0.000 4	0.054 9	0.000 7	327	3	337	4	407	27
12	12	176	1.34	0.382 5	0.007 2	0.053 2	0.000 4	0.052 1	0.001 0	334	3	329	6	290	42
13	8	103	0.90	0.525 3	0.012 5	0.068 1	0.000 9	0.055 9	0.001 3	425	6	429	10	449	53
14	21	305	0.43	0.517 6	0.005 0	0.066 2	0.000 6	0.056 7	0.000 5	413	4	424	4	479	20
15	20	330	0.90	0.395 4	0.007 3	0.052 1	0.000 6	0.055 0	0.001 0	327	4	338	6	413	41
16	26	395	1.49	0.372 6	0.005 0	0.051 3	0.000 5	0.052 7	0.000 7	322	3	322	4	315	29

5 讨论

5.1 阿拉善地块东、西部经历了相同的显生宙构造—岩浆事件

5.1.1 阿拉善地块东、西部的构造变形特征

Zhang Jin 等(2013)在阿拉善地块东部的巴彦乌拉山和狼山地区识别出两期韧性变形构造: 早期为从东向西的韧性逆冲构造, 变形构造包括近东西向拉伸线理、不同类型鞘褶皱和枢纽为东西向的倾斜褶皱, 长英质糜棱岩中黑云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 坪年龄($\sim 351\text{ Ma}$)被认为代表该期变形时代; 晚期的韧性变形以北东向左行剪切为特征, 剪切带中黑云母和白云母的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 坪年龄($\sim 250\text{ Ma}$)被认为代表该期变形时代。该作者推断早期的韧性逆冲构造形成于阿拉善地块与华北克拉通的碰撞事件, 碰撞界限可能向南延伸到香山地区, 而晚期的左行韧性剪切带可能与扬子、华北克拉通在三叠纪期间的碰撞相关。吴素娟(2014)同样获得巴彦乌拉山—狼山地区糜棱岩的白云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 坪年龄($\sim 350\text{ Ma}$), 支持存在早石炭世构造变形事件, 并造成大量同构造花岗岩的侵入, 但认为 $\sim 250\text{ Ma}$ 并不是变形时代, 而是阿拉善地区二叠纪($290\sim 260\text{ Ma}$)岩浆热事件的冷却年龄。

笔者在阿拉善地块西部的北大山地区同样识别出两期韧性变形。早期的韧性变形以南(南东)向北(北西)逆冲为特征(图3a), 与此期变形有关的片麻岩具有明显的混合岩化和部分熔融特征。本文对该片麻岩中锆石进行 U-Pb 定年获得 $422 \pm 1\text{ Ma}$ 的变质年龄, 属晚志留世。此年龄明显早于前人在巴彦乌拉山—狼山地区获得的早期逆冲变形年龄 $\sim 350\text{ Ma}$, 但考虑到后者是通过 ^{40}Ar - ^{39}Ar 定年所获得的, 不排除东、西阿拉善地区经历了同期的韧性逆冲变形作用和相关的变质作用。此外, 北大山地区石炭纪($326\sim 323\text{ Ma}$)花岗岩经历了强烈的韧性变形, 为近 EW 向左行剪切(图3c)。尽管本文未获得热年代学年龄, 但阿拉善地块东部的同期侵入岩体, 如狼山地区 329 Ma 花岗糜棱岩、巴彦乌拉山 359 Ma 花岗糜棱岩中都记录了左行剪切变形, 它们可能经历了相同的韧性变形作用(Zhang Jin *et al.*, 2013), 因此推测阿拉善地块东部的两期韧性变形均可与阿拉善地块西部北大山地区的两期韧性变形对比, 早期的韧性逆冲剪切带可向西延至北大山, 而不是向南延伸;

晚期的左行走滑韧性带也可延至北大山。

5.1.2 阿拉善地块东、西部的晚奥陶世—石炭纪岩浆事件

相比广泛出露的二叠纪—早三叠世岩浆岩, 阿拉善地块的晚奥陶世—石炭纪岩浆岩的分布范围相对较小, 主要见于地块主体及其南缘地区(图6)。根据近年来报道的锆石 U-Pb 测年结果(表1), 本文将该期岩浆活动大体上划分为晚奥陶世—泥盆纪($460\sim 390\text{ Ma}$)和石炭纪($359\sim 300\text{ Ma}$)两期。

晚奥陶世—泥盆纪岩浆活动主要分布于阿拉善地块西部的龙首山、北大山和东部的诺尔公南、巴彦乌拉山、红谷尔玉林及狼山地区(图6)。龙首山地区报道的晚奥陶世—泥盆纪岩浆活动, 包括 $444\sim 414\text{ Ma}$ 闪长岩和花岗岩类(魏俏巧等, 2013; Zeng *et al.*, 2016; 孙宝璐等, 2017; Zhang *et al.*, 2017)以及 $424\sim 421\text{ Ma}$ 超基性岩—基性岩(段俊等, 2015; Duan *et al.*, 2015); 而北大山、诺尔公南、巴彦乌拉山、红谷尔玉林及狼山地区主要出露 $460\sim 390\text{ Ma}$ 闪长岩和花岗岩类(李俊健, 2006; Wang *et al.*, 2015, 2016; Liu Qian *et al.*, 2016; Zhou *et al.*, 2016; Dan *et al.*, 2016)。

尽管成岩时代相近, 但大量研究成果表明, 龙首山及其南部河西走廊地区的晚奥陶世—志留纪岩浆岩侵位于 $460\sim 420\text{ Ma}$ 的祁连地块与阿拉善地块碰撞造山后的岩石圈拆沉(或俯冲板片断离)引起的软流圈地幔上涌过程中, 与祁连山的俯冲造山作用相关(Tseng *et al.*, 2009; 熊子良等, 2012; Duan *et al.*, 2015; Zeng *et al.*, 2016; Zhang *et al.*, 2017; 孙宝璐等, 2017)。目前在龙首山及河西走廊地区已识别出该时期的岩石类型包括高 Sr/Y 值具埃达克性质的中酸性侵入岩、低 Sr/Y 值的中酸性侵入岩、A 型花岗岩、橄榄岩、辉长岩及辉绿岩等。与龙首山北部北大山及东部巴彦乌拉山、狼山地区同期侵入岩相比, 龙首山地区的晚奥陶世—泥盆纪岩浆岩明显具有不同的岩石组合, 而且它们的($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 值和 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值也与前者明显存在较大差异, 而与北祁连同期岩浆岩一致(图7a、7b), 进一步说明龙首山地区的晚奥陶世—泥盆纪岩浆岩与祁连造山事件相关。

北大山、巴彦乌拉山和狼山地区出露的晚奥陶世—泥盆纪中酸性岩浆岩均以花岗岩和闪长岩为主, 它们具有相似的地球化学性质, 在稀土元素配分图解中, 这些不同地区的岩浆岩均呈现轻稀土元素富

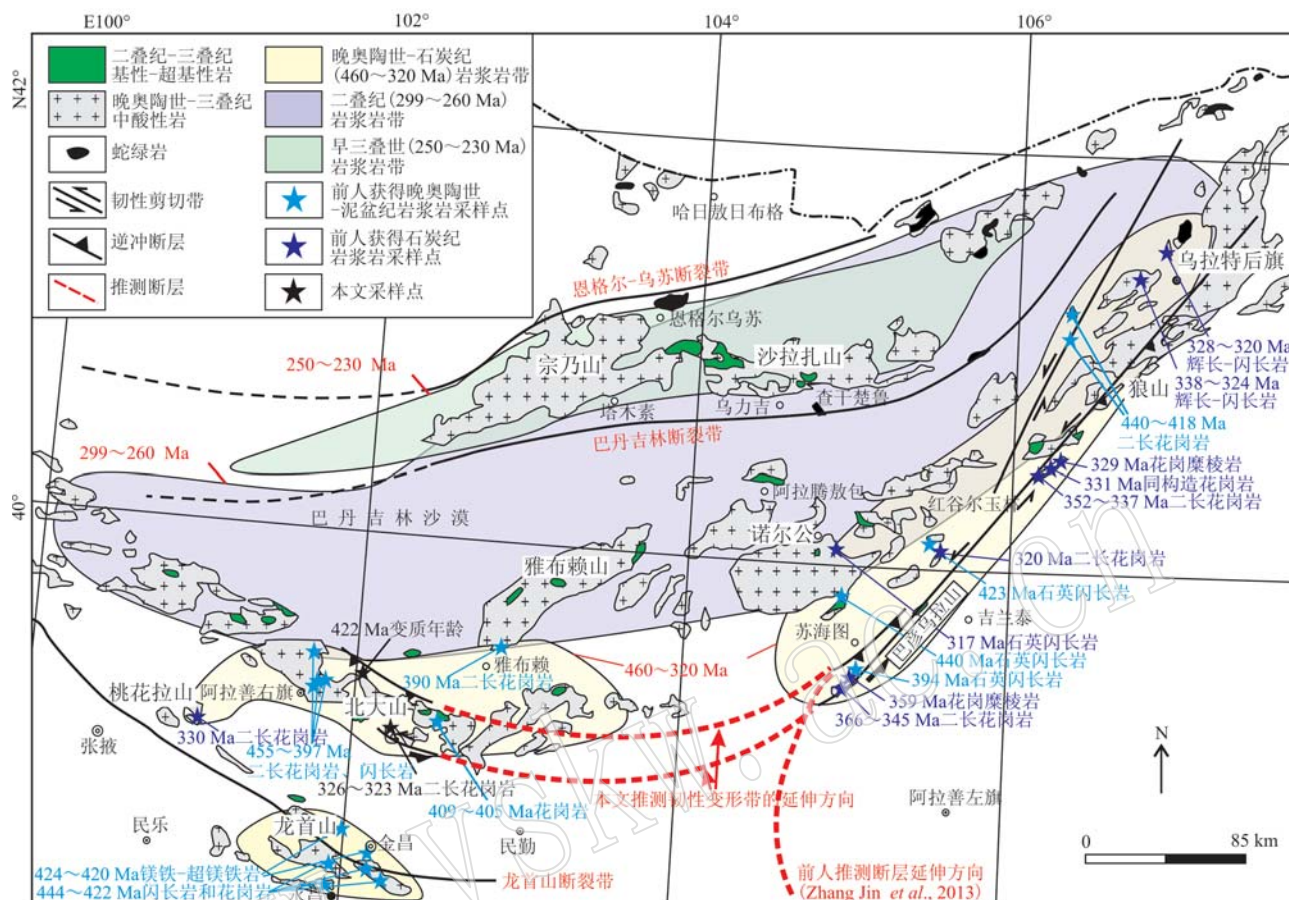


图6 阿拉善地块及邻区显生宙岩浆岩的分布(图中引用数据见表1)

Fig. 6 The distribution of the Phanerozoic magmatic rocks in Alxa Block (the dating data shown in Table 1)

集、重稀土元素亏损的右倾型分布;在微量元素标准化图解中,富集大离子亲石元素 Rb、Ba、K, 亏损高场强元素 Nb、Ta、P、Ti、U 等(图8)。此外,不同地区岩浆岩的 Sr-Nd 同位素特征也非常相似(图7a、7b),这些特征说明阿拉善地块东、西部地区的晚奥陶世-泥盆纪岩浆岩具有相同成因。

石炭纪岩浆活动主要分布于阿拉善地块西部的桃花拉山、北大山地区和东部的诺尔公南、巴彦乌拉山、红谷尔玉林及狼山地区(图6)。龙首山、桃花拉山和北大山地区出露 362~320 Ma 花岗岩、花岗闪长岩和石英闪长岩等(Zeng *et al.*, 2016; Xue *et al.*, 2017; 本文数据);诺尔公南、巴彦乌拉山、红谷尔玉林和狼山地区主要出露 366~304 Ma 花岗岩、闪长岩及少量辉长-闪长岩(史兴俊, 2012; 刘晔等, 2013; Zhang Jin *et al.*, 2013; Feng *et al.*, 2013; 吴素娟, 2014; 徐琳等, 2015; Wang *et al.*, 2015; Dan *et al.*, 2016; Liu Min *et al.*, 2016)。

由于石炭纪时期祁连造山运动早已结束,因此可以排除阿拉善地块的石炭纪岩浆活动与之相关。龙首山地区的早石炭世(~330 Ma)花岗岩具有埃达克岩地化特征(Xue *et al.*, 2017),与阿拉善地块东部巴彦乌拉山、红谷尔玉林、狼山地区出露的早石炭世(345~321 Ma)高 Sr/Y 值花岗岩(史兴俊, 2012; Dan *et al.*, 2016; Liu Min *et al.*, 2016)的地球化学特征相似(图9),在稀土元素配分图解中,这些地区的石炭纪花岗岩都呈轻稀土元素富集、重稀土元素亏损的右倾型分布特征;在微量元素标准化图解中,富集大离子亲石元素 Rb、Ba、K, 亏损高场强元素 Nb、Ta、P、Ti、U 等。此外,这些石炭纪花岗岩的 Sr-Nd 同位素特征也非常相似(图7c、7d)。这些特征均说明这些分布在阿拉善地块东、西部地区的石炭纪岩浆岩也具有相同成因。

因此,除龙首山地区出露的晚奥陶世-志留纪侵入岩之外,阿拉善地块东、西部地区晚奥陶世-石炭

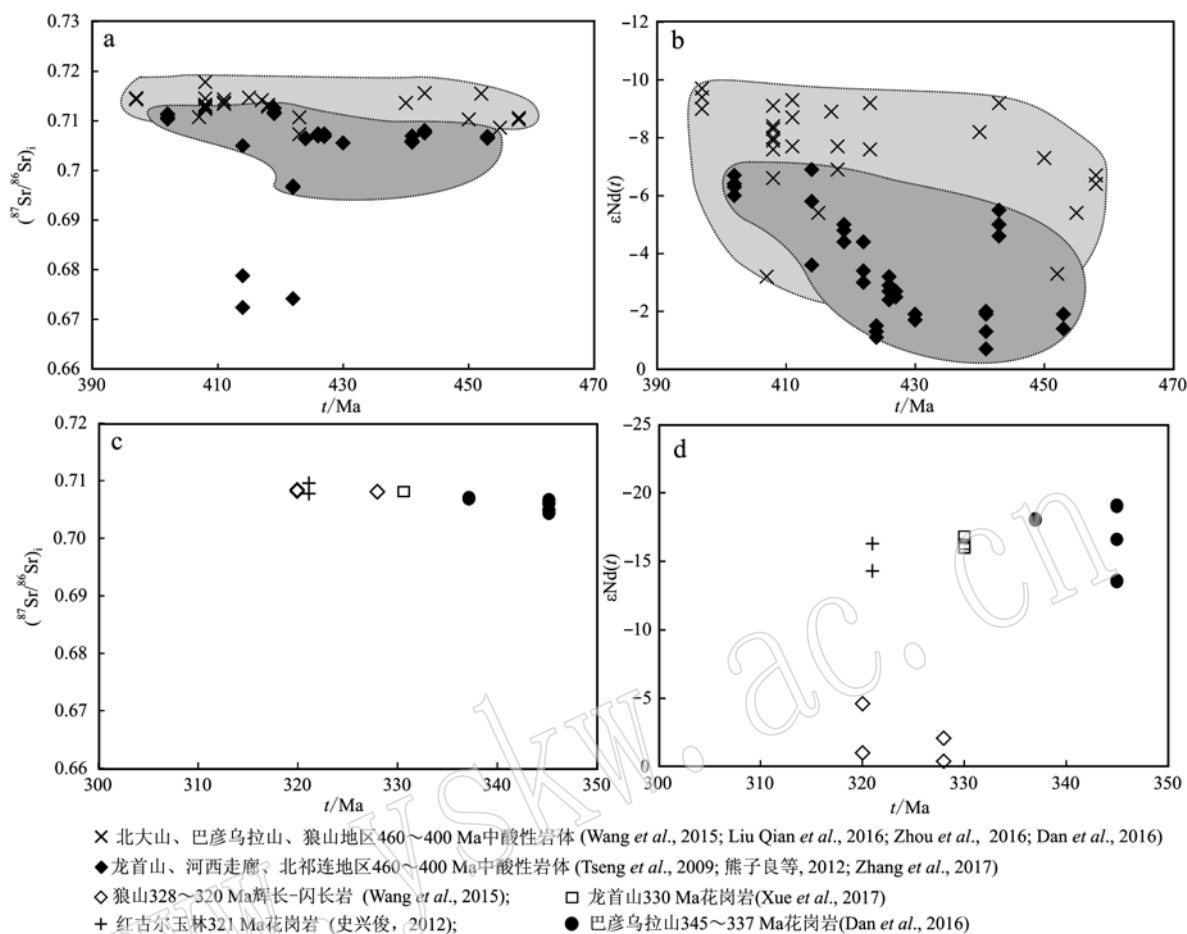


图7 阿拉善地块及邻区晚奥陶世-石炭纪侵入岩的 Sr-Nd 同位素特征

Fig. 7 Sr-Nd isotopic characteristics of Late Ordovician-Carboniferous intrusive rocks in Alxa Block and adjacent areas

纪岩浆岩的类型、期次、地球化学和同位素特征及其两期韧性变形特征及时代均可以对比。原先认为呈线性分布于狼山-巴彦乌拉山地区的早期韧性逆冲剪切带和晚期左行韧性剪切带,可能向西延至北大山和桃花拉山地区,而不是向南延伸(图6),这也与周良仁(1989)提出阿拉善弧形构造带的认识一致。这些不同期次的岩浆岩及韧性变形可能形成于相同的构造背景下,构成一条西起桃花拉山、北大山,经巴彦乌拉山,东到狼山的晚奥陶世-石炭纪构造-岩浆岩带,它呈向南挤出的弧形展布(图6),向东可与华北克拉通北缘相连(Liu Min *et al.*, 2016 及相关文献)。近年来,阿拉善地块西部的敦煌-北山地区也报道有大量晚奥陶世-石炭纪岩浆活动和与阿拉善地区类似的多期韧性变形构造(朱涛等, 2014; 王楠等, 2016; Song *et al.*, 2015, 2016; Zhao Yan *et al.*, 2016),暗示该构造-岩浆岩带可能向北西延伸进入敦煌-北山地区。

5.2 阿拉善地块晚奥陶世-石炭纪时期的构造演化过程

阿拉善地块西部北大山地区~422 Ma的变质年龄及区域上出露460~390 Ma具有陆弧性质的中酸性侵入岩是晚奥陶世-泥盆纪俯冲造山存在的证据,同时北大山地区变质基底中记录的由南向北韧性逆冲构造及巴彦乌拉山-狼山变质基底中记录的自东向西韧性逆冲变形构造,进一步指示古亚洲洋向南俯冲的演化过程。前人获得早期韧性逆冲断层带中变质矿物的⁴⁰Ar-³⁹Ar坪年龄357~351 Ma为冷却年龄(Zhang Jin *et al.*, 2013; 吴素娟, 2014),晚于本文获得的变质时代,可能代表一次重要构造变形事件的结束。该期变形事件同样被记录在巴音诺尔公地区的中元古代地层中,表现为近NNW-SSE向挤压形成的片理及紧闭褶皱(王东升等, 2016)。Liu Qian等(2016)提出晚奥陶世-泥盆纪期间古亚洲洋存在“前进式俯冲”向“后撤式俯冲”的构造体制转

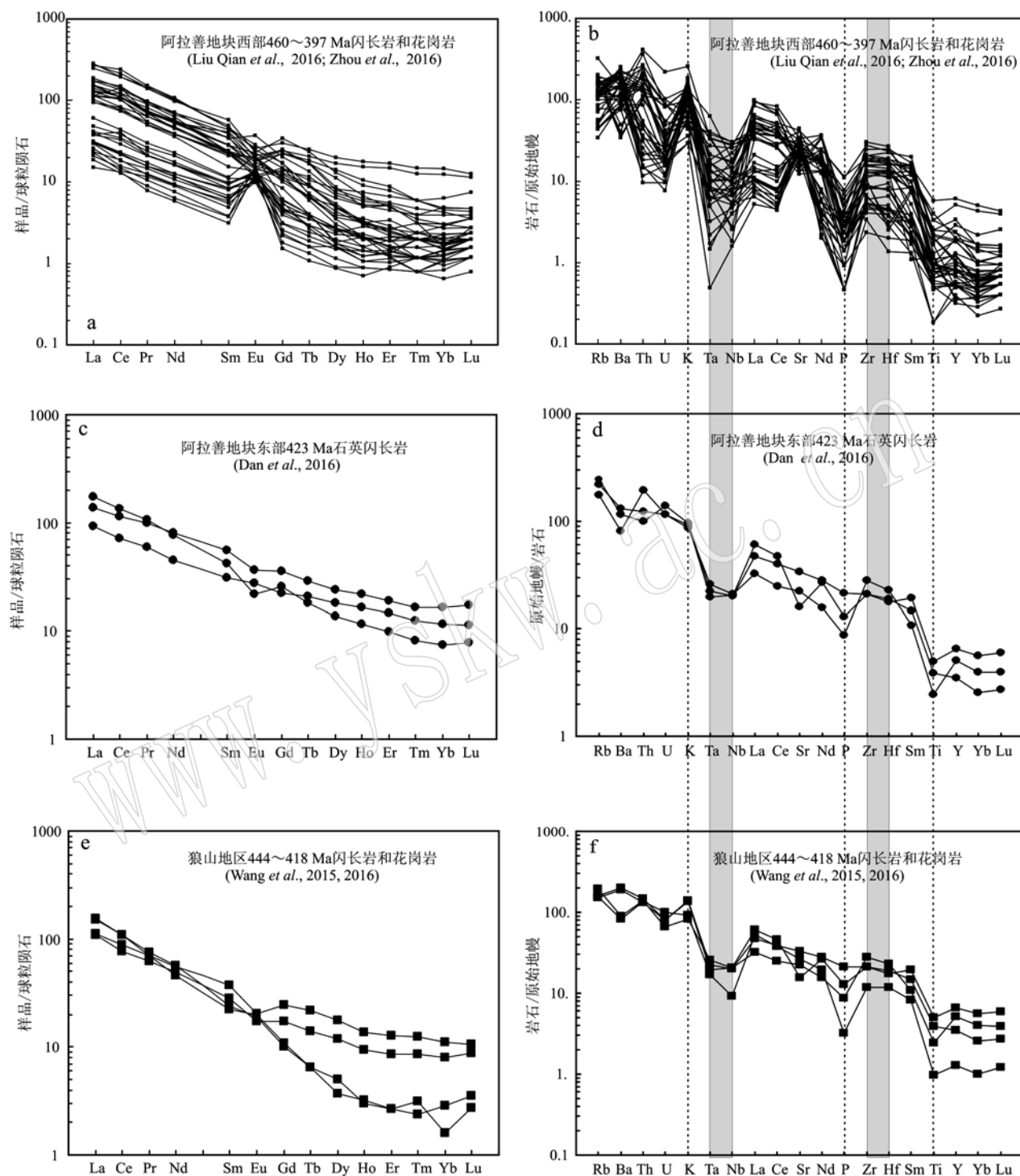


图8 阿拉善地块及狼山地区晚奥陶世-泥盆纪岩浆岩的地球化学特征

Fig. 8 Geochemical characteristics of late Ordovician- Devonian magmatic rocks in Alxa Block and Langshan region

化,本文获得的变质时代~420 Ma可能代表了本次构造体制转折的时间。总体上看,晚奥陶世-泥盆纪期间(460~390 Ma),阿拉善地块处于古亚洲洋向南持续俯冲的构造背景下。

阿拉善地块龙首山、北大山、巴彦乌拉山、红谷尔玉林及狼山地区的石炭纪(350~320 Ma)岩浆活动产物主要包括埃达克质中酸性侵入岩和少量基性岩。前人研究表明,这些岩石普遍被认为形成于增

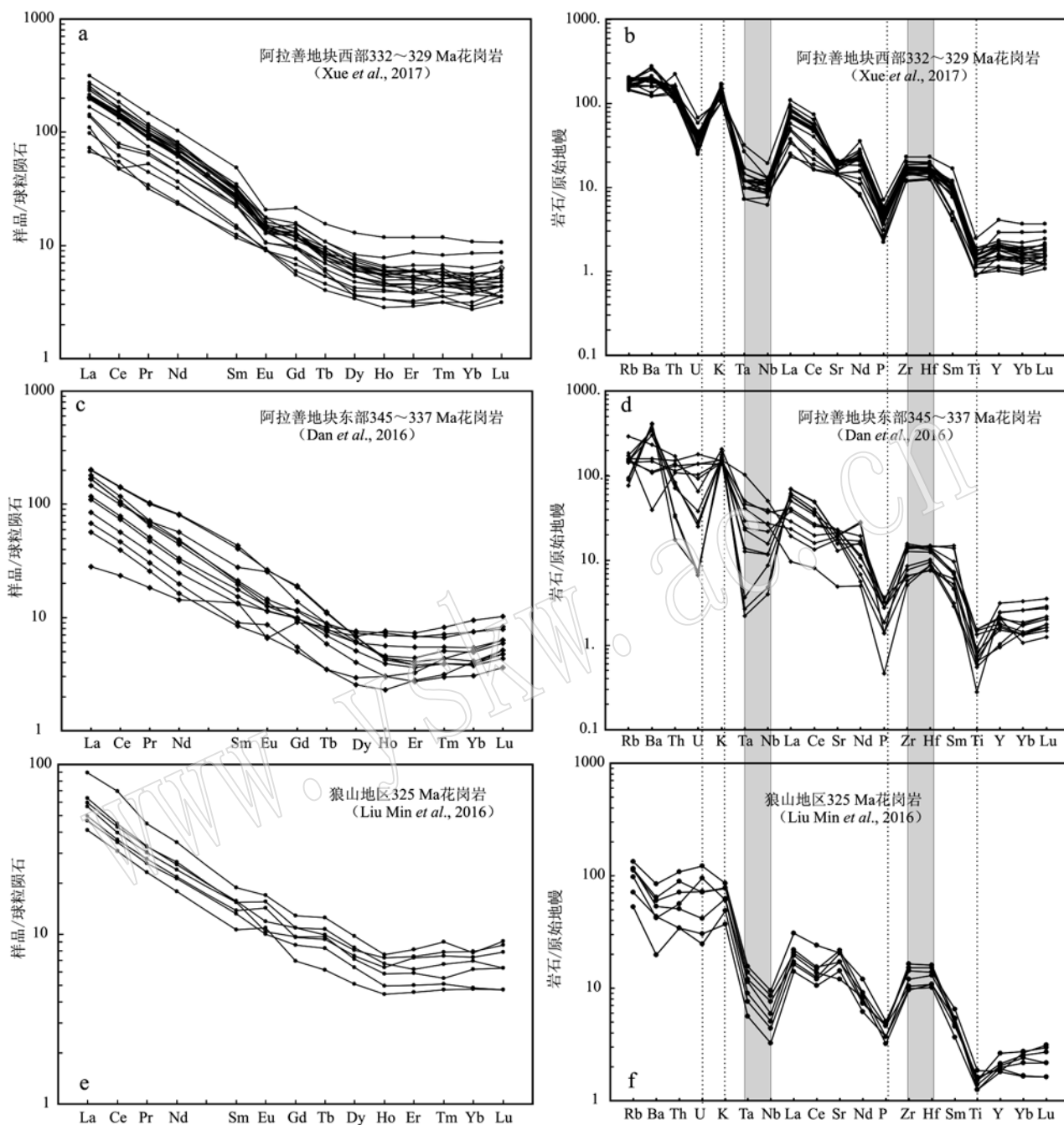


图9 阿拉善地块及狼山地区石炭纪岩浆岩的地球化学特征

Fig. 9 Geochemical characteristics of Carboniferous magmatic rocks in Alxa Block and Langshan region

厚下地壳的部分熔融,是太古宙-古元古代陆壳物质重融的产物,与造山作用密切相关(Xue *et al.*, 2017; Dan *et al.*, 2016; Liu Min *et al.*, 2016)。狼山地区出露的同期 338 ~ 320 Ma 辉长岩、辉长闪长岩相对花岗岩类具有较高的 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值(图 7d),其成因被认为是受俯冲流体或熔体改造的岩石圈地幔的部分熔融(Wang *et al.*, 2015; Liu Min *et al.*,

2016),同样说明与俯冲造山作用相关。近年来,阿拉善地块还报道有具有弧性质的晚石炭世(306 ~ 300 Ma)辉长岩、埃达克质侵入岩(Feng *et al.*, 2013; 张伟等, 2014; Liu *et al.*, 2017),说明阿拉善地块存在的洋壳俯冲造山作用一直持续到晚石炭世之后。

对于阿拉善地块晚奥陶世-石炭纪岩浆岩形成

的构造背景,目前存在与中亚造山带有关(Liu Qian *et al.*, 2016; Zhou *et al.*, 2016; Wang *et al.*, 2015)及与华北克拉通碰撞相关(Zhang Jin *et al.*, 2013; Dan *et al.*, 2016)两种争议。本文支持该构造-岩浆岩带的形成与中亚造山带相关,主要理由为: ① 目前发现的晚奥陶世-石炭纪岩浆活动及两期韧性变形并非仅沿阿拉善地块和华北克拉通之间线性分布,而是向西延伸到北大山、桃花拉山地区,呈近东西向弧形展布,这显然不能用阿拉善地块与华北克拉通的碰撞解释,而最可能与古亚洲洋的俯冲有关。② 如图6所示,晚奥陶世-石炭纪岩浆岩主要侵位于阿拉善地块的早前寒武纪变质基底中,反映出该阶段岩浆活动均发育在陆壳基底上。除了直接侵位的岩浆岩外,北大山地区的变质基底中还记录了~422 Ma 变质变形事件及晚期的左行剪切变形事件(<320 Ma, 本文数据)。区域上,前人在雅布赖山地区的古-中元古代阿拉善岩群中获得482 Ma 和266 Ma 两组新生锆石年龄(耿元生等, 2007);在巴彦乌拉山-狼山地区的古元古代变质基底中获得357 ~ 351 Ma 及约250 Ma 两期 ^{40}Ar - ^{39}Ar 冷却年龄(Zhang Jin *et al.*, 2013; 吴素娟, 2014),同时也获得446 Ma 和281 Ma 两组新生锆石年龄(耿元生等, 2007);在古元古代波罗素坦庙杂岩中获得480 Ma 和281 Ma 两组新生锆石年龄,并获得大量288 ~ 277 Ma 的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄(耿元生等, 2007)。最近, Song 等(2018)获得的北大山和桃花拉山地区不同类型岩石中的磷灰石 U-Pb 冷却年龄集中在晚奥陶世—早志留世(约450 ~ 430 Ma)和二叠纪(约290 ~ 257 Ma)两期。这些数据表明,阿拉善地块的早前寒武纪变质基底普遍受到了早古生代和晚古生代末两期构造热事件的改造。从区域上看,这些构造热事件并不是仅沿巴彦乌拉山-狼山构造带展布,而是广泛分布于变质基底出露区,其形成最可能与古亚洲洋的俯冲造山作用相关,俯冲时代至少始于晚奥陶世。③ 阿拉善地块的晚奥陶世-石炭纪岩浆岩与华北克拉通北缘同期岩浆岩具有相似的岩石组合、成岩时代、地化及同位素特征,被认为是华北克拉通北缘岩浆弧的西延(Wang *et al.*, 2015; Liu Min *et al.*, 2016),而华北克拉通北缘该阶段的岩浆活动普遍被认为与中亚造山事件相关(Jian *et al.*, 2008; 童英等, 2010; Lin *et al.*, 2014)。④ 狼山北部地区宝音图群中获得与古亚洲洋俯冲碰撞相关的早泥盆世(399 ± 6 Ma)变质事件(陈亚平等, 2015),与本文在

北大山地区获得的变质年龄 422 ± 1 Ma 接近,显示可能形成于相同的构造事件。

阿拉善地块北缘的古亚洲洋俯冲并最终闭合的时代为二叠纪已得到广泛认同(史兴俊, 2012; Zhang Wen *et al.*, 2013; Feng *et al.*, 2013; Zheng *et al.*, 2014; Shi *et al.*, 2014),这也说明阿拉善地块在二叠纪之前长期处于洋壳向南俯冲的构造背景下。Liu Qian 等(2016)根据岩浆岩的锆石 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值和全岩 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值的变化,提出北大山地区460 ~ 407 Ma 期间经历了前进式向后撤式俯冲的构造体制转变。此外,阿拉善地块自南向北显生宙岩浆岩的时代逐渐变新,从晚奥陶世-石炭纪岩浆岩为主转变为以二叠纪-晚三叠世岩浆岩为主,也反映出俯冲板片的后撤(图6; Xue *et al.*, 2017)。阿拉善地块内部不同期次岩浆岩的锆石 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值和全岩 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值均以较大的负值为特征(图7b、7d; Dan *et al.*, 2014),而向北逐渐增大为正值(Shi *et al.*, 2014),反映出构造环境以陆壳物质部分熔融为主的大陆弧环境,向以亏损地幔物质大量加入的洋弧转变,同样揭示出俯冲板片后撤的过程。此外,阿拉善地块内部缺失与古亚洲洋俯冲相关的晚奥陶世-石炭纪沉积地层,说明晚奥陶世—石炭纪期间阿拉善地块总体处于造山隆起阶段,没有发育与该时期俯冲相关的弧后盆地。发育在阿拉善地块北缘的晚石炭世—早二叠世阿木山组火山-沉积地层,以往被认为是古亚洲洋俯冲形成的弧后盆地沉积,其主要依据是认为宗乃山-沙拉扎山的岩浆岩具有岛弧性质,且变质基底与阿拉善地块相似(吴泰然等, 1992, 1993; 王廷印等, 1993; Feng *et al.*, 2013)。但近年的研究表明,宗乃山-沙拉扎山的变质基底并非是从阿拉善地块裂解出去的早前寒武纪陆块(Shi *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2015)。因此,本文认为发育在阿拉善地块北缘的阿木山组不是弧后盆地沉积,也不是近期有学者提出的陆内裂谷沉积(Yin *et al.*, 2016),而可能形成于俯冲板块后撤过程中的陆缘海沉积,其碎屑物源来自阿拉善地块造山隆起区。另外,阿拉善地块内部不同地区的韧性剪切带中获得的变形年龄(260 ~ 250 Ma)(关晶, 2010; Zhang Jin *et al.*, 2013; 吴凤萍, 2009; 吴素娟, 2014)与古亚洲洋在阿拉善地块北缘闭合的时代相近,因此,本文推测北大山、巴彦乌拉山、狼山地区的晚期左行韧性剪切变形可能与古亚洲洋的碰撞闭合作用相关。综上所述,晚奥陶世—石炭纪期间,阿拉善地块长期处于古

亚洲洋向南的持续俯冲过程中,并经历多次的俯冲板片后撤过程,在阿拉善地块陆壳基底上形成多期晚奥陶世—石炭纪岩浆活动,最终在中晚二叠世完成碰撞闭合过程。

6 结论

(1) 阿拉善地块西部的北大山地区识别出与阿拉善地块东部相似的两期韧性变形:早期的韧性变形以从南(南东)向北(北西)逆冲为特征;晚期的韧性变形以近东西向左行剪切为特征。

(2) 利用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年方法,在记录早期韧性变形的片麻岩中获得锆石变质年龄为 422 ± 1 Ma,代表晚志留世高温变质事件;在记录晚期韧性变形的两件二长花岗岩中获得锆石结晶年龄分别为 326.2 ± 1.2 Ma 和 323.8 ± 2.6 Ma,代表早石炭世岩浆活动。

(3) 除龙首山地区的晚奥陶世—泥盆纪岩浆活动外,阿拉善地块东、西部及狼山地区的晚奥陶世—石炭纪岩浆岩的岩石组合、期次、地球化学特征、Sr-Nd 同位素特征均可以对比。本文认为存在一条发育在阿拉善地块变质基底之上,呈近 EW 向弧形展布的晚奥陶世—石炭纪构造—岩浆岩带(西起桃花拉山,经北大山、诺尔公、巴彦乌拉山,东到狼山),向东可与华北克拉通北缘岩浆岩带相连,其成因与古亚洲洋的俯冲造山事件相关。

致谢 中国地质调查局天津地调中心李怀坤研究员和匿名审稿人对本文提出了建设性修改意见,责任编辑对文章进行了润色加工,在此一并致以衷心的感谢!

References

- Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. *Chemical geology*, 192: 59 ~ 79.
- Bao Chuang, Chen Yuelong and Li Dapeng. 2012. Discovery of the Late Permian volcanics in the Zhualazhagamaodao, northern margin of the Alxa Block [J]. *Earth Science Frontiers*, 19(5): 156 ~ 163 (in Chinese with English abstract).
- Black L P, Kamo S L, Allen C M, *et al.* 2003. TEMORA 1: A new zircon standard for Phanerozoic U-Pb geochronology [J]. *Chemical Geology*, 200: 155 ~ 170.
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Gansu Province. 1989. *Regional Geology of Gansu Province* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 10 ~ 12 (in Chinese).
- Chen Gaochao, Shi Jizhong, Jiang Ting, *et al.* 2015. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating and geochemistry of granitoids in Tamusu, Alxa Right Banner, Inner Mongolia [J]. *Geological Bulletin of China*, 34(10): 1 884 ~ 1 896 (in Chinese with English abstract).
- Chen Wei, Zhou Wenping, Chen Kaixu, *et al.* 2013. Subduction-related early Permian granodiorite in Jinchangshan of Alxa, Inner Mongolia: Evidences from zircon U-Pb geochronology and geochemistry [J]. *Journal of Mineral Petrology*, 33(4): 53 ~ 60 (in Chinese with English abstract).
- Chen Yaping, Wei Chunjing, Zhang Jinrui, *et al.* 2015. Metamorphism and zircon U-Pb dating of garnet amphibolite in the Baoyintu Group, Inner Mongolia [J]. *Science Bulletin*, 60(19): 1 698 ~ 1 707.
- Dan Wei, Li Xianhua, Guo Jinhui, *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*, 12: 838 ~ 864.
- Dan Wei, Li Xianhua, Wang Qiang, *et al.* 2014. 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 Wei, Li Xianhua, Wang Qiang, *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.
- Dong Chunyan, Liu Dunyi, Li Junjian, *et al.* 2007. Paleoproterozoic Khondalite Belt in the western North China Craton: New evidence from SHRIMP dating and Hf isotope composition of zircons from metamorphic rocks in the Bayan Ul-Helan Mountains area [J]. *Chinese Science Bulletin*, 52(21): 2 984 ~ 2 994.
- Duan Jiye and Ge Xiaohong. 2005. Stratigraphic and paleobiogeographic affinities between different units in northwestern China—with a discussion of the tectonic framework of northwestern China [J]. *Geological Bulletin of China*, 24(6): 558 ~ 563 (in Chinese with English abstract).
- Duan Jun, Li Chusi, Qian Zhuangzhi, *et al.* 2015. Geochronological and geochemical constraints on the petrogenesis and tectonic significance of Paleozoic dolerite dykes in the southern margin of Alxa Block, North China Craton [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 111: 244 ~ 253.
- Duan Jun, Qian Zhuangzhi, Jiao Jiangang, *et al.* 2015. Genesis of Xijing

- intrusion from Longshoushan terrane and the tectonic significance [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 45(3): 832 ~ 846 (in Chinese with English abstract).
- Feng Jianyun, Xiao Wenjiao, Windley Brian, *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.
- Ge Xiaohong and Liu Junlai. 2000. Broken "Western China Craton" [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 16(1): 59 ~ 66 (in Chinese with English abstract).
- Ge Xiaohong, Ma Wenpu, Liu Junlai, *et al.* 2009. A discussion on the tectonic framework of Chinese mainland [J]. *Geology in China*, 36(5): 949 ~ 965 (in Chinese with English abstract).
- Geng Yuansheng, Wang Xinshe and Shen Qihan. 2007. Chronology of the Precambrian metamorphic series in the Alxa, Inner Mongolia [J]. *Geology in China*, 34(2): 251 ~ 261 (in Chinese with English abstract).
- Geng Yuansheng and Zhou Xiwen. 2012. Early Permian magmatic events in the Alxa metamorphic basement: Evidence from geochronology [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(9): 2 667 ~ 2 685 (in Chinese with English abstract).
- Gong Jianghua, Zhang Jianxin, Yu Shengyao, *et al.* (2012). Ca. 2.5 Ga TTG rocks in the western Alxa Block and their implications [J]. *Chinese Science Bulletin*, 57(31): 4 064 ~ 4 076.
- Gong Jianghua, Zhang Jianxin and Yu Shengyao. 2013. Redefinition of Longshoushan group outcropped in the eastern segment of Longshoushan on the southern margin of Alxa block: Evidence from detrital zircon U-Pb dating results [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 32(1): 1 ~ 22 (in Chinese with English abstract).
- Guan Jing. 2010. Study of the Aergashun Ductile Shear Zone in Tamusu Region of Alxa Youqi, Inner Mongolia (Master Dissertation) [D]. China University of Geoscience (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Han Baofu, Zhang Chen, Zhao Lei, *et al.* 2010. A Preliminary study of granitoids in western Inner Mongolia [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 29(6): 741 ~ 749 (in Chinese with English abstract).
- Hu Chuansheng, Li Wenbo, Xu Chen, *et al.* 2015. Geochemistry and petrogenesis of Permian granitoids in the northwestern margin of the North China Craton: insights from the Dongshengmiao pluton, Inner Mongolia [J]. *International, Geology Review*, 57(14): 1 843 ~ 1 860.
- Huang Baochun, Otofui Yo-Ichiro, Yang Zhengyu, *et al.* 2000. Preliminary results and its tectonic implications of Middle Cambrian Paleomagnetism in the Alashan and Hexi Corridor Terrane [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 43(3): 393 ~ 401 (in Chinese with English abstract).
- Jian Ping, Liu Dunyi, Kröner A, *et al.* 2008. Time scale of an early to mid-Paleozoic orogenic cycle of the long lived Central Asian Orogenic Belt, Inner Mongolia of China: implications for continental growth [J]. *Lithos*, 101: 233 ~ 259.
- Jiao Jiangang, Ji Shufang, Rui Huichao, *et al.* 2017b. Petrology, geochemistry and chronology study of the Xiaokouzi mafic-ultramafic intrusion in the eastern section of Longshou mountains, Gansu [J]. *Acta Geologica Sinica*, 91(4): 736 ~ 747 (in Chinese with English abstract).
- Jiao Jiangang, Ma Zeming, Lu hao, *et al.* 2017a. Zircon U-Pb dating of Yejili mafic-ultramafic intrusion in southern margin of Alxa Block, and its geological implication [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 41(5): 950 ~ 959 (in Chinese with English abstract).
- Lai Xinrong, Jiang Sihong, Qiu Xiaoping, *et al.* 2007. ^{40}Ar - ^{39}Ar age and geochemical features of Hercynian intermediate acidity rock in Beidashan rock belt, Alxa [J]. *Acta Geologica Sinica*, 81(3): 370 ~ 380 (in Chinese with English abstract).
- Li Jie. 2012. Characteristics and Tectonic Significance of Late Paleozoic Intrusive Rocks along the Yabrai-Bayan Noel of Alxa, Inner Mongolia (Master Dissertation) [D]. China University of Geoscience (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Li Jinyi, Zhang Jin and Qu Junfeng. 2012. Amalgamation of North China Craton with Alxa Block in the Late of early Paleozoic: Evidence from sedimentary sequences in the Niushou Mountain, Ningxia Hui Autonomous Region, NW China [J]. *Geological Review*, 58(2): 208 ~ 214 (in Chinese with English abstract).
- Li Junjian. 2006. Regional Metallogenic System of Alxa Block in Inner Mongolia Autonomous Region (Doctoral Dissertation) [D]. China University of Geoscience (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Lin Lina, Xiao Wenjiao, Wan Bo, *et al.* 2014. Geochronologic and geochemical 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(2): 679 ~ 703.
- Liu Min, Zhang Da, Xiong Guangqiang, *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 Qian, Zhao Guochun, Han Yigui, *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 Qian, Zhao Guochun, Sun Min, *et al.* 2016. Early Paleozoic subduction processes of the Paleo-Asian Ocean: Insights from geochronology and geochemistry of Paleozoic plutons in the Alxa Terrane[J]. *Lithos*, 262: 546 ~ 560.
- Liu Ye, Qian Jianqiang and Yang Bin. 2013. Zircon geochronology of granitic mass in Dongshengmiaof of Inner Mongolia and tectonic significance[J]. *Gansu Geology*, 22(4): 37 ~ 44(in Chinese with English abstract).
- Liu Yongsheng, Hu Zhaochu, Zong Keqing, *et al.* 2010. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS[J]. *Chinese Science Bulletin*, 55(15): 1 535 ~ 1 546.
- Lu Songnian, Yu Haifeng, Jin Wei, *et al.* 2002. Microcontinents on the eastern margin of Tarim paleocontinent[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 21(4): 317 ~ 326(in Chinese with English abstract).
- Ludwig K R. 2005. SQUID 1.12 A User's Manual. A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[J]. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 1 ~ 22.
- Pi Qiaohui, Liu Changzheng, Chen Yuelong, *et al.* 2010. Formation epoch and genesis of intrusive rocks in Huogeqi orefield of Inner Mongolia and their relationship with copper mineralization[J]. *Mineral Deposits*, 29(3): 437 ~ 451(in Chinese with English abstract).
- Ran Hao, Zhang Weijie and Liu Zhibo. 2012. Geochemical characteristics and LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of the Late Permian monzogranite in Hanggale, Alax Right Banner, Inner Mongolia[J]. *Geological Bulletin of China*, 31(10): 1 565 ~ 1 575(in Chinese with English abstract).
- Shi Guanzhong, Song Guangzeng, Wang Hua, *et al.* 2016. Late Paleozoic tectonics of the Solonker Zone in the Wuliji area, Inner Mongolia, China: Insights from stratigraphic sequence, chronology, and sandstone geochemistry[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 127: 100 ~ 118.
- Shi Guanzhong, Wang Hua, Liu Entao, *et al.* 2018. Sr-Nd-Pb isotope systematics of the Permian volcanic rocks in the northern margin of the Alxa Block (the Shalazhashan Belt) and comparisons with the nearby regions: Implications for a Permian rift setting? [J]. *Journal of Geodynamics*, 115: 43 ~ 56.
- Shi Xingjun. 2012. The Geochronology, Geochemistry and Petrogenesis of Granitoid in Qinggele Area, Northern Alxa (Master Dissertation) [D]. China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Shi Xingjun, Tong Ying, Wang Tao, *et al.* 2012. LA-ICP-MS zircon U-Pb age and geochemistry of the Early Permian Halinudeng granite in northern Alxa area, western Inner Mongolia[J]. *Geological Bulletin of China*, 31(5): 662 ~ 670(in Chinese with English abstract).
- Shi Xingjun, Wang Tao, Zhang Lei, *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 Xinjun, Zhang Lei, Wang Tao, *et al.* 2014. Geochronology and geochemistry of the intermediate-acid intrusive rocks from Zongnaishan area in northern Alxa, Inner Mongolia, and their tectonic implications[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 33(6): 989 ~ 1 007(in Chinese with English abstract).
- Song Biao, Zhang Yuhai, Wan Yusheng, *et al.* 2002. Mount making and procedure of the SHRIMP Dating[J]. *Geological Review*, 48: 26 ~ 30(in Chinese with English abstract).
- Song Dongfang, Glorie Stijn, Xiao Wenjiao, *et al.* 2018. Tectono-thermal evolution of the southwestern Alxa Tectonic Belt, NW China: Constrained by apatite U-Pb and fission track thermochronology [J]. *Tectonophysics*, 722: 577 ~ 594.
- Song Dongfang, Xiao Wenjiao, Windley B F, *et al.* 2015. A Paleozoic Japan-type subduction-accretion system in the Beishan orogenic collage, southern Central Asian Orogenic Belt[J]. *Lithos*, 224 ~ 225: 195 ~ 213.
- Song Dongfang, Xiao Wenjiao, Windley B F, *et al.* 2016. Metamorphic complexes in accretionary orogens: Insights from the Beishan collage, southern Central Asian Orogenic Belt[J]. *Tectonophysics*, 688: 135 ~ 147.
- Song Shuguang, Niu Yaoling, Su Li, *et al.* 2013. Tectonics of the North Qilian orogen, NW China[J]. *Gondwana Research*, 23: 1 378 ~ 1 401.
- Su Qiaoyun and Duanmu Heshun. 2012. Geochemical characteristics of quartz-diorite in Kuhewula right-banner Alxa and its geological significance[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 31(2): 146 ~ 151(in Chinese with English abstract).
- Sun Baolu, Qian Qing and Zhang Jianxin. 2017. Zircon U-Pb geochronology, Hf-O isotopes, whole-rock geochemistry of the Dafosi and Jinfo-si granite plutons, Gansu Province and geological implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(10): 3 091 ~ 3 108(in Chinese with English abstract).

- Tong Ying, Hong Dawei, Wang Tao, *et al.* 2010. Spatial and temporal distribution of granitoids in the middle segment of the sino-Mongolian border and its tectonic and metallogenic implications[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 31(3): 395 ~ 412 (in Chinese with English abstract).
- Tseng Chienyuan, Yang Huaijen, Yang Hounyi, *et al.* 2009. Continuity of the North Qilian and North Qinling orogenic belts, Central Orogenic System of China: Evidence from newly discovered Paleozoic adakitic rocks[J]. *Gondwana Research*, 16: 285 ~ 293.
- Wang Dongsheng, Gong Jianghua, Zhang Jianxin, *et al.* 2016. Tectonic deformation characteristics of the Mesoproterozoic Nuorgong Group in the Alxa Block[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 35(2): 306 ~ 320 (in Chinese with English abstract).
- Wang Nan, Wu Cailai, Ma Changqian, *et al.* 2016. Geochemistry, zircon U-Pb geochronology and Hf isotopic characteristics for granites in southern Dunhuang block[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 32(12): 3753 ~ 3780 (in Chinese with English abstract).
- Wang Tingyin, Gao Junping, Wang Jinrong, *et al.* 1998a. Magmatism of collisional and postorogenic period in Northern Alxa region in Inner Mongolia[J]. *Acta Geologica Sinica*, 72(2): 126 ~ 137 (in Chinese with English abstract).
- Wang Tingyin, Wang Jinrong, Liu Jinkun, *et al.* 1994. Igneous rock associations and geochemical characteristics of volcanic arc with continental crustal basement in Zongnaishan-Shalazhashan[J]. *Geochemical*, 23: 162 ~ 172 (in Chinese with English abstract).
- Wang Tingyin, Wang Jinrong, Wang Shizheng, *et al.* 1993. Geological and geochemical characteristics of the ophiolitic mélange zone for Chagachulu-Huoersen, North of Alxa[J]. *Acta Geologica Gansu*, 2(1): 46 ~ 53 (in Chinese with English abstract).
- Wang Tingyin, Zhang Mingjie, Wang Jinrong, *et al.* 1998b. The characteristics and tectonic implications of the thrust belt in Engerwusu, China[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 33(4): 385 ~ 394 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xingjun. 2012. The Geochemical Characters and Its Tectonic Implications of Ophiolites in Alxa Area, Inner Mongolia (Doctoral dissertation)[D]. China University of Geoscience(Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Wang Zengzhen, Han Baofu, Feng Lixia, *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.
- Wang Zengzhen, Han Baofu, Feng Lixia, *et al.* 2016. Tectonic attribution of the Langshan area in western Inner Mongolia and implications for the Neoproterozoic-Paleoproterozoic evolution of the Western North China Craton: Evidence from LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of the Langshan basement[J]. *Lithos*, 261: 278 ~ 295.
- Wei Qiaqiao, Hao Libo, Lu Jilong, *et al.* 2013. LA-MC-ICP-MS zircon U-Pb dating of Hexipu granite and its geological implications[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 32(6): 729 ~ 735 (in Chinese with English abstract).
- Wu Fengping. 2009. Study of the NNE Ductile Shear Zone in Tamusu Region of Alxa Youqi, Inner Mongolia (Master Dissertation)[D]. China University of Geoscience (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Wu Kanglin. 2011. Geochemical Characteristics and Tectonic Setting of Late Varisian Period in Alashan Block (Master Dissertation)[D]. Xi'an: Chang'an University (in Chinese with English abstract).
- Wu Maobing. 1993. The geological and geochemical feature of igneous rocks and the tectonic evolution of the continental margin arc zone in northern Alashan, Inner Mongolia[J]. *Acta Geologica Gansu*, 2(2): 23 ~ 33 (in Chinese with English abstract).
- Wu Sujuan. 2014. Metamorphism and Deformation History of the Basement Rocks from the Northeastern Alxa Block and Their Tectonic Implications (Doctor Dissertation)[D]. Chinese Academy of Geological Sciences (in Chinese with English abstract).
- Wu Tairan and He Guoqi. 1992. Ophiolitic mélange belts in the northern margin of the Alxa Block. *Geoscience*[J]. *Journal of Graduate School, China University of Geosciences*, 6(3): 286 ~ 296 (in Chinese with English abstract).
- Wu Tairan and He Guoqi. 1993. Tectonic units and their fundamental characteristics on the northern margin of the Alxa Block[J]. *Acta Geologica Sinica*, 67(2): 97 ~ 108 (in Chinese with English abstract).
- Wu Tairan, He Guoqi and Zhang Chen. 1998. On Palaeozoic tectonics in the Alxa Region, Inner Mongolia, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 72(3): 256 ~ 263.
- Xiao Jin, Sun Ping and Xu Lin. 2016. Zircon dating, geochemical characteristics and genesis of the early-Premain gabbro in Nuorgong area, northern Alxa[J]. *Western Resource*, 4: 55 ~ 60 (in Chinese).
- Xie Fenquan. 2014. Study of Granites Rock Mass of Zongnaishan, Shalaza and Bayinnuorgong (Master Dissertation)[D]. China University of Geoscience (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Xiong Ziliang, Zhang Hongfei and Zhang Jie. 2012. Petrogenesis and tectonic implications of the Maozangsi and Huangyanghe granitic intrusions in Lenglongling area, the eastern part of North Qilian

- Mountains[J]. *Earth Sciences Frontiers*, 19(3): 214 ~ 227 (in Chinese with English abstract).
- Xu Dongzhuo, Zhang Weijie, Zhou Haitao, *et al.* 2014. Characteristics, zircon dating and tectonic significance of the gabbros along the north-central segments of the Alxa Block, Inner Mongolia[J]. *Geological Bulletin of China*, 33(5): 661 ~ 671 (in Chinese with English abstract).
- Xu Lin and Xiao Jin. 2015. Zircon dating and geochemical characteristics of late Permian Alakekeerte volcanic rocks from northern Alxa Block, Inner Mongolia[J]. *Western Resource*, 1: 107 ~ 111 (in Chinese).
- Xu Lin and Xie Qixing. 2015. LA-ICP-MS zircon U-Pb age and geochemical characteristics of the Bayannurigong quartz diorite in Alxa, Inner Mongolia[J]. *Xinjiang Geology*, 33(4): 529 ~ 536 (in Chinese with English abstract).
- Xue Shuo, Ling Mingxing, Liu Yulong, *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.
- Yang Qidi, Zhang Lei, Wang Tao, *et al.* 2014. Geochemistry and LA-ICP-MS zircon U-Pb age of Late Carboniferous Shalazhashan pluton on the northwestern margin of the Alxa Block, Inner Mongolia and their implications[J]. *Geological Bulletin of China*, 33(6): 776 ~ 787 (in Chinese with English abstract).
- Yang Zhenyu, Yuan Wei, Tong Yabo, *et al.* 2014. Tectonic affinity reconnaissance of the Alxa Block in the Pre-Mesozoic[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 35(6): 673 ~ 681 (in Chinese with English abstract).
- Ye Ke, Zhang Lei, Wang Tao, *et al.* 2016. Geochronology, geochemistry and zircon Hf isotope of the Permian intermediate-acid igneous rocks from the Yabulai mountain in the western Alxa, Inner Mongolia, and their tectonic implications[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 35(6): 901 ~ 928 (in Chinese with English abstract).
- Yin Haiquan, Zhou Hongrui, Zhang Weijie, *et al.* 2016. Late Carboniferous to early Permian sedimentary tectonic evolution of the north of Alxa, Inner Mongolia, China: Evidence from the Amushan Formation[J]. *Geoscience Frontiers*, 7: 733 ~ 741.
- Yuan Wei and Yang Zhenyu. 2015a. The Alashan Terrane was not part of North China by the Late Devonian: Evidence from detrital zircon U-Pb geochronology and Hf isotopes[J]. *Gondwana Research*, 27: 1 270 ~ 1 282.
- Yuan Wei and Yang Zhenyu. 2015b. The Alashan Terrane did not amalgamate with North China block by the Late Permian: Evidence from Carboniferous and Permian paleomagnetic results[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 104: 145 ~ 159.
- Zeng Renyu, Lai Jianqing, Mao Xiancheng, *et al.* 2016. Geochemistry, zircon U-Pb dating and Hf isotopes composition of Paleozoic granitoids in Jinchuan, NW China: Constraints on their petrogenesis, source characteristics and tectonic implication[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 121: 20 ~ 33.
- Zhai Mingguo, Guo Jinhui and Liu Wenjun. 2005. Neoproterozoic to Paleoproterozoic continental evolution and tectonic history of the North China Craton: A review[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24(5): 547 ~ 561.
- Zhang Jianjun. 2015. Petrogenesis of the Permian Granitoids from the Northern Alxa Block and Their Geodynamic Implications (Doctor Dissertation)[D]. China University of Geoscience (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jianjun, Wang Tao, Castro Antonio, *et al.* 2016. Multiple Mixing and Hybridization from Magma Source to Final Emplacement in the Permian Yamatu Pluton, the Northern Alxa Block, China[J]. *Journal of Petrology*, 57(5): 933 ~ 980.
- Zhang Jianjun, Wang Tao, Zhang Lei, *et al.* 2015. Tracking deep crust by zircon xenocrysts within igneous rocks from the northern Alxa, China: Constraints on the southern boundary of the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 108: 150 ~ 169.
- Zhang Jianxin and Gong Jianghua. 2018. Revisiting the nature and affinity of the Alxa Block[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 34(4): 940 ~ 962 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jianxin, Gong Jianghua, Yu Shengyao, *et al.* 2013. 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 Jianxin, Xu Zhiqin, Chen Wen, *et al.* 1997. A tentative discussion on the ages of the subduction-accretionary complex/volcanic arcs in the middle sector of North Qilian mountain[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 16(2): 112 ~ 119 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jin, Li Jinyi, Liu Jianfeng, *et al.* 2011. Detrital zircon U-Pb ages of Middle Ordovician flysch sandstones in the western ordo margin: New constraints on their provenances, and tectonic implications[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 42: 1 030 ~ 1 047.
- Zhang Jin, Li Jinyi, Liu Jianfeng, *et al.* 2012. The relationship between the Alxa Block and the North China Plate during the Early Paleozoic: New information from the Middle Ordovician detrital zircon ages in the eastern Alxa Block[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(9): 2 912 ~

- 2 934(in Chinese with English abstract).
- Zhang Jin, Li Jinyi, Xiao Wenjiao, *et al.* 2013. Kinematics and geochronology of multistage ductile deformation along the eastern Alxa block, NW China: New constraints on the relationship between the North China Plate and the Alxa block[J]. *Journal of Structural Geology*, 57: 38 ~ 57.
- Zhang Jin, Zhang Beihang and Zhao Heng. 2016. Timing of amalgamation of the Alxa Block and the North China Block: Constraints based on detrital zircon U-Pb ages and sedimentologic and structural evidence [J]. *Tectonophysics*, 668 ~ 669: 65 ~ 81.
- Zhang Lei, Shi Xingjun, Zhang Jianjun, *et al.* 2013. LA-ICP-MS zircon U-Pb age and geochemical characteristics of the Taohaotuoxiquan gabbro in northern Alxa, Inner Mongolia[J]. *Geological Bulletin of China*, 32 (10): 1 536 ~ 1 547(in Chinese with English abstract).
- Zhang Liqi, Zhang Hongfei, Zhang Shasha, *et al.* 2017. Lithospheric delamination in post-collisional setting: Evidence from intrusive magmatism from the North Qilian orogen to southern margin of the Alxa block, NW China[J]. *Lithos*, 288 ~ 289: 20 ~ 34.
- Zhang Wei, Wang Jinrong, Chen Wanfeng, *et al.* 2014. The discovery of the Carboniferous adakite and its tectonic implications in Alxa Youqi [J]. *Geological Journal of China Universities*, 20(3): 378 ~ 387 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Wen, Wu Tairan, Feng Jicheng, *et al.* 2013. 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.
- Zhang Zhengping, Liu Guang, Xu Cui, *et al.* 2016. Geochemical characteristics and LA-ICP-MS Zircon U-Pb dating of the Late Permian granites in the Tamusu area of Alxa Right Banner, Inner Mongolia and their implications[J]. *Geology and Exploration*, 52(5): 893 ~ 909(in Chinese with English abstract).
- Zhao Guochun, Sun Min, Wilde Simon A, *et al.* 2005. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: key issues revisited[J]. *Precambrian Research*, 136: 177 ~ 202.
- Zhao Xiaochen, Liu Chiyang, Wang Jianqiang, *et al.* 2016. Detrital zircon U-Pb ages of Paleozoic sedimentary rocks from the eastern Hexi Corridor Belt (NW China): Provenance and geodynamic implications [J]. *Sedimentary Geology*, 339: 32 ~ 45.
- Zhao Yan, Sun Yong, Diwu Chunrong, *et al.* 2016. The Dunhuang block is a Paleozoic orogenic belt and part of the Central Asian Orogenic Belt (CAOB), NW China[J]. *Gondwana Research*, 30: 207 ~ 223.
- Zheng Rongguo, Li Jinyi, Xiao Wenjiao, *et al.* 2016. Discovery of Silurian pluton in the Enger Us Region in the northern margin of Alxa Block[J]. *Acta Geologica Sinica*, 90(8): 1 725 ~ 1 736(in Chinese with English abstract).
- Zheng Rongguo, Wu Tairan, Zhang Wen, *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(2): 842 ~ 858.
- Zhou Liangren. 1989. The basic features of arc-shape tectonic belt in Alxa area[J]. *Northwestern Geology*, 2: 1 ~ 8 (in Chinese).
- Zhou Xiaochun, Zhang Hongfei, Luo Biji, *et al.* 2016. Origin of high Sr/Y-type granitic magmatism in the southwestern of the Alxa Block, Northwest China[J]. *Lithos*, 256 ~ 257: 211 ~ 227.
- Zhou Yinzhang, Han Baofu, Xu Zhao, *et al.* 2013. The age of the Proterozoic rocks in Yingba area in western Inner Mongolia: Constraints on the distribution of the South Gobi micro-continent in the Central Asian orogenic belt[J]. *Geological Bulletin of China*, 32(2 ~ 3): 318 ~ 326(in Chinese with English abstract).
- Zhu Tao, Wang Hongliang, Xu Xueyi, *et al.* 2014. Discovery of adakitic rocks in south margin of Dunhuang block and its geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(02): 491 ~ 502(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 包 创, 陈岳龙, 李大鹏. 2012. 阿拉善地块北缘珠拉扎嘎毛道晚二叠世火山岩的发现[J]. *地学前缘*, 19(5): 156 ~ 163.
- 陈高潮, 史冀中, 姜 亭, 等. 2015. 内蒙古阿拉善右旗塔木素地区酸性侵入岩锆石 U-Pb 年龄与地球化学特征[J]. *地质通报*, 34(10): 1 884 ~ 1 896.
- 陈 炜, 周文平, 陈开旭, 等. 2013. 内蒙古阿拉善右旗金长山早二叠世花岗岩闪长岩锆石 U-Pb 年代学及地球化学特征[J]. *矿物岩石*, 33(4): 53 ~ 60.
- 陈亚平, 魏春景, 张晋瑞, 等. 2015. 内蒙古中西部地区宝音图群石榴石斜长角闪岩的变质作用和锆石 U-Pb 年代学[J]. *科学通报*, 60(36): 3 636.
- 董春燕, 刘敦一, 李俊健, 等. 2007. 华北克拉通西部孔兹岩带形成时代新证据: 巴彦乌拉-贺兰山地区锆石 SHRIMP 定年和 Hf 同位素组成[J]. *科学通报*, 52(16): 1 913 ~ 1 922.
- 段吉业, 葛肖虹. 2005. 中国西北地区各构造单元之间地层和生物古地理的亲缘关系——兼论西北地区构造格局[J]. *地质通报*, 24(6): 558 ~ 563.
- 段 俊, 钱壮志, 焦建刚, 等. 2015. 甘肃龙首山岩带西井镁铁质岩

- 体成因及其构造意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 45(3): 832~846.
- 甘肃省地质矿产局. 1989. 甘肃省区域地质志[M]. 北京:地质出版社, 10~12.
- 葛肖虹, 刘俊来. 2000. 被肢解的“西域克拉通”[J]. 岩石学报, 16(1): 59~66.
- 葛肖虹, 马文璞, 刘俊来, 等. 2009. 对祖国大陆构造格架的讨论[J]. 中国地质, 36(5): 949~965.
- 耿元生, 王新社, 沈其韩, 等. 2007. 内蒙古阿拉善地区前寒武纪变质岩系形成时代的初步研究[J]. 中国地质, 34(2): 251~260.
- 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(9): 2667~2685.
- 宫江华, 张建新, 于胜尧, 等. 2012. 西阿拉善地块~2.5 Ga TTG岩石及地质意义[J]. 科学通报, 57(28~29): 2715~2728.
- 宫江华, 张建新, 于胜尧. 2013. 阿拉善地块南缘龙首山东段“龙首山岩群”的再厘定——来自碎屑锆石 U-Pb 定年的证据[J]. 岩石矿物学杂志, 32(1): 1~22.
- 关晶. 2010. 内蒙古阿拉善右旗塔木素地区阿尔嘎顺韧性剪切带研究(硕士学位论文)[D]. 中国地质大学(北京).
- 韩宝福, 张臣, 赵磊, 等. 2010. 内蒙古西部呼伦陶勒盖地区花岗岩类的初步研究[J]. 岩石矿物学杂志, 29(6): 741~749.
- 黄宝春, Otofujii Y I, 杨振宇, 等. 2000. 河西走廊和阿拉善东缘地区中寒武世古地磁研究的初步结果[J]. 地球物理学报, 43(3): 393~401.
- 焦建刚, 靳树芳, 芮会超, 等. 2017b. 甘肃龙首山东段小口子镁铁—超镁铁质岩体岩石学、地球化学及年代学研究[J]. 地质学报, 91(4): 736~747.
- 焦建刚, 马泽明, 鲁浩, 等. 2017a. 阿拉善地块南缘野笈里镁铁—超镁铁质岩体锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 大地构造与成矿学, 41(5): 950~959.
- 赖新荣, 江思宏, 邱小平, 等. 2007. 阿拉善北大山岩带海西期中酸性岩 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄及其地球化学特征[J]. 地质学报, 81(3): 370~380.
- 李杰. 2012. 内蒙古阿拉善地区雅布赖-巴音诺尔公晚古生代侵入岩特征及其大地构造意义(硕士学位论文)[D]. 中国地质大学(北京).
- 李锦轶, 张进, 曲军峰. 2012. 华北与阿拉善两个古陆在早古生代晚期拼合:来自宁夏牛首山沉积岩系的证据[J]. 地质论评, 58(2): 208~214.
- 李俊健. 2006. 内蒙古阿拉善地块区域成矿系统(博士学位论文)[D]. 中国地质大学(北京).
- 刘晔, 钱建强, 杨斌. 2013. 内蒙古东升庙一带花岗质岩体锆石年代学及其构造意义[J]. 甘肃地质, 22(4): 37~44.
- 陆松年, 于海峰, 金巍, 等. 2002. 塔里木古大陆东缘的微小陆块体群[J]. 岩石矿物学杂志, 21(4): 317~326.
- 皮桥辉, 刘长征, 陈岳龙, 等. 2010. 内蒙古霍各乞海西期侵入岩形成时代、成因及其与铜矿体的关系[J]. 矿床地质, 29(3): 437~451.
- 冉焱, 张维杰, 刘治博. 2012. 内蒙古阿拉善右旗杭嘎勒晚二叠世二长花岗岩地球化学特征和 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年[J]. 地质通报, 31(10): 1565~1575.
- 史兴俊. 2012. 阿拉善北部庆格勒地区花岗岩年代学、地球化学及岩石成因(硕士学位论文)[D]. 中国地质大学(北京).
- 史兴俊, 童英, 王涛, 等. 2012. 内蒙古西部阿拉善地区哈里努登花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄和地球化学特征[J]. 地质通报, 31(5): 662~670.
- 史兴俊, 张磊, 王涛, 等. 2014. 内蒙古阿拉善盟北部宗乃山中酸性侵入岩年代学、地球化学及构造意义[J]. 岩石矿物学杂志, 33(6): 989~1007.
- 宋彪, 张玉海, 万渝生, 等. 2002. 锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论[J]. 地质论评, 48(1): 26~30.
- 苏巧云, 端木合顺. 2012. 阿拉善右旗库和乌拉石英闪长岩体地球化学特征及其地质意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 31(2): 146~151.
- 孙宝璐, 钱青, 张建新. 2017. 甘肃大佛寺、金佛寺花岗岩体的锆石 U-Pb 年龄、Hf-O 同位素和全岩地球化学特征及地质意义[J]. 岩石学报, 33(10): 3091~3108.
- 童英, 洪大卫, 王涛, 等. 2010. 中蒙边境中段花岗岩时空分布特征及构造和找矿意义[J]. 地球学报, 31(3): 395~412.
- 王东升, 宫江华, 张建新, 等. 2016. 阿拉善地块中元古代诺尔公群的构造变形特征[J]. 岩石矿物学杂志, 35(2): 306~320.
- 王楠, 吴才来, 马昌前, 等. 2016. 敦煌地块南部古生代花岗岩地球化学、锆石 U-Pb 定年及 Hf 同位素特征研究[J]. 岩石学报, 32(12): 3753~3780.
- 王廷印, 高军平, 王金荣, 等. 1998a. 内蒙古阿拉善北部地区碰撞期和后造山期岩浆作用[J]. 地质学报, 72(2): 126~137.
- 王廷印, 王金荣, 刘金坤, 等. 1994. 宗乃山-沙拉扎山陆壳基底火山弧火成岩组合及地球化学特征[J]. 地球化学, 23: 163~172.
- 王廷印, 王金荣, 王士政, 等. 1993. 阿拉善北部查干础鲁-霍尔森蛇绿混杂岩带地质地球化学特征[J]. 甘肃地质学报, 2(1): 46~53.
- 王廷印, 张铭杰, 王金荣, 等. 1998b. 恩格尔乌苏冲断带特征及大地构造意义[J]. 地质科学, 33(4): 385~394.
- 王行军. 2012. 内蒙古阿拉善地区蛇绿岩的地球化学特征及其构造意义(博士学位论文)[D]. 中国地质大学(北京).
- 魏俏巧, 郝立波, 陆继龙, 等. 2013. 甘肃河西堡花岗岩 LA-MS-ICP-

- MS 年龄及其地质意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 32(6): 729 ~ 735.
- 吴凤萍. 2009. 内蒙古阿拉善右旗塔木素地区 NNE 向韧性剪切带研究(硕士学位论文)[D]. 中国地质大学(北京).
- 吴茂炳. 1993. 内蒙古阿拉善北缘陆缘弧区火成岩的地质地球化学特征及构造演化[J]. 甘肃地质学报, 2(2): 23 ~ 33.
- 吴素娟. 2014. 阿拉善地块北东缘变质变形研究及其大地构造意义(博士学位论文)[D]. 北京: 中国地质科学院.
- 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(3): 286 ~ 296.
- 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(2): 97 ~ 108.
- 仵康林. 2011. 阿拉善地区华力西晚期花岗岩类岩石地球化学特征及其构造意义(硕士学位论文)[D]. 西安: 长安大学.
- 肖进, 孙萍, 徐琳. 2016. 阿拉善北部诺尔公地区早二叠世辉长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及成因[J]. 西部资源, 4: 55 ~ 60.
- 谢奋全. 2014. 阿拉善宗乃山、沙拉扎与巴音诺尔公花岗岩体研究(硕士学位论文)[D]. 中国地质大学(北京).
- 熊子良, 张宏飞, 张杰. 2012. 北祁连东段冷龙岭地区毛藏寺岩体和黄羊河岩体的岩石成因及其构造意义[J]. 地学前缘, 19(3): 214 ~ 227.
- 徐东卓, 张维杰, 周海涛, 等. 2014. 内蒙古阿拉善地块中北部地区辉长岩岩体特征, 锆石定年及其构造意义[J]. 地质通报, 33(5): 661 ~ 671.
- 徐琳, 肖进. 2015. 内蒙古阿拉善北部阿拉克克尔特晚二叠世火山岩锆石 U-Pb 年龄及其地球化学特征[J]. 西部资源, 1: 107 ~ 111.
- 徐琳, 谢启兴. 2015. 内蒙古阿拉善巴彦诺日公石英闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及地球化学特征[J]. 新疆地质, 33(4): 529 ~ 536.
- 杨奇荻, 张磊, 王涛, 等. 2014. 内蒙古阿拉善地块北缘沙拉扎山晚石炭世岩体地球化学特征与 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄[J]. 地质通报, 33(6): 776 ~ 787.
- 杨振宇, 袁伟, 全亚博, 等. 2014. 阿拉善地块前中生代构造归属的新认识[J]. 地球学报, 35(6): 673 ~ 681.
- 叶珂, 张磊, 王涛, 等. 2016. 阿拉善雅布赖山二叠纪中酸性岩浆岩年代学、地球化学、锆石 Hf 同位素特征及构造意义[J]. 岩石矿物学杂志, 35(6): 901 ~ 928.
- 张建军. 2015. 阿拉善地块北部二叠纪花岗岩类成因及地质意义(博士学位论文)[D]. 中国地质大学(北京).
- 张建新, 宫江华. 2018. 阿拉善地块性质和归属的再认识[J]. 岩石学报, 34(4): 940 ~ 962.
- 张建新, 许志琴, 陈文, 等. 1997. 北祁连中段俯冲-增生杂岩/火山弧的时代探讨[J]. 岩石矿物学杂志, 16(2): 112 ~ 119.
- 张进, 李锦轶, 刘建峰, 等. 2012. 早古生代阿拉善地块与华北地块之间的关系: 来自阿拉善东缘中奥陶统碎屑锆石的信息[J]. 岩石学报, 28(9): 2 912 ~ 2 934.
- 张磊, 史兴俊, 张建军, 等. 2013. 内蒙古阿拉善北部陶陶托西圈辉长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄和地球化学特征[J]. 地质通报, 32(10): 1 536 ~ 1 547.
- 张伟, 王金荣, 陈万峰, 等. 2014. 阿拉善右旗地区晚石炭世埃达克岩的发现及其大地构造意义[J]. 高校地质学报, 20(3): 378 ~ 387.
- 张正平, 刘广, 徐翠, 等. 2016. 内蒙古阿拉善右旗塔木素地区晚二叠世花岗岩地球化学特征、LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其意义[J]. 地质与勘探, 52(5): 893 ~ 909.
- 郑荣国, 李锦轶, 肖文交, 等. 2016. 阿拉善地块北缘恩格尔乌苏地区发现志留纪侵入体[J]. 地质学报, 90(8): 1 725 ~ 1 736.
- 周良仁. 1989. 阿拉善弧形构造带的基本特征[J]. 西北地质, 2: 1 ~ 8.
- 周印章, 韩宝福, 徐钊, 等. 2013. 中蒙边界英巴地区元古宙杂岩的时代及其对南戈壁微陆块分布范围的限定[J]. 地质通报, 32(2~3): 318 ~ 326.
- 朱涛, 王洪亮, 徐学义, 等. 2014. 敦煌地块南缘石炭纪埃达克岩的发现及其地质意义[J]. 岩石学报, 30(2): 491 ~ 502.