

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

王毛毛^{1,2}, 张磊¹, 霍雨佳^{1,2}, 史兴俊³, 刘翠²

(1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 2. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083;
3. 信阳师范学院, 城市与环境科学学院, 河南 信阳 464000)

摘要: 阿拉善北大山西北部地区出露少量原属“龙首山岩群”的前寒武纪岩石, 其形成时代和同位素特征对于了解该地区的基底性质和探讨阿拉善北部构造格架具有重要意义。本文对北大山西北部海森楚鲁地区出露的片麻岩开展了详细的岩石学、锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素研究, 并对其构造意义进行了初步探讨。海森楚鲁片麻岩为一套具有片麻状构造的长英质正片麻岩。锆石核部的 LA-ICP MS 分析结果显示, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄相对集中, 并在 U-Pb 谐和图上获得了 $1408 \pm 29 \text{ Ma}$ (MSWD = 13) 的上交点年龄, 表明海森楚鲁片麻岩的原岩形成于 $\sim 1.4 \text{ Ga}$ 。海森楚鲁片麻岩的锆石 Hf 同位素分析结果显示, 锆石 $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 值变化范围为 $-4.38 \sim +6.68$, 二阶段模式年龄为 $2091 \sim 1624 \text{ Ma}$, 反映了片麻岩原岩岩浆可能来自相对年轻的地壳物质。结合前人研究成果, 认为龙首山-北大山北部出露的前寒武纪岩石主要形成于中元古代及以后, 而不是以往认识的中太古代-古元古代; 龙首山-北大山北部可能不是阿拉善地块的组成部分。

关键词: 阿拉善; 北大山; 中元古代; 片麻岩; 龙首山岩群; 锆石 U-Pb 年龄; 锆石 Hf 同位素

中图分类号: P588; P597

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2019)05-0631-15

Tectonic affinity of the northern Longshoushan-Beidashan: Constraints from the zircon U-Pb age and Hf isotopic compositions of the Haisen Chulu gneiss

WANG Mao-mao^{1,2}, ZHANG Lei¹, HUO Yu-jia^{1,2}, SHI Xing-jun³ and LIU Cui²

(1. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 3. Faculty of City and Environmental Science, Xinyang Normal University, Xinyang 464000, China)

Abstract: Exposed in the northern Beidashan area of Alxa, minor Precambrian rocks have been traditionally considered to be a part of the Longshoushan Group. The age and isotopic characteristics of these Precambrian rocks are important for the understanding of the local basement characteristics and the tectonic architecture of north Alxa area. This study presents detailed petrology, zircon U-Pb age and Hf isotope of the Haisen Chulu gneiss from the north Beidashan area and discusses its tectonic implications. Field observation and petrological features indicate that the Haisen Chulu gneiss is orthogneiss. LA-ICPMS zircon U-Pb dating performed on the inner part of the zircons yielded an upper intercept age of $1408 \pm 29 \text{ Ma}$ (MSWD = 13) on the concordia diagram, which indicates that

收稿日期: 2019-01-04; 接受日期: 2019-06-13; 编辑: 尹淑苹

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFC0601301); 中国地质调查局二级项目(DD20190001, DD20160123, DD20160456)

作者简介: 王毛毛(1993-), 男, 汉族, 地质工程专业硕士研究生, 主要从事岩浆作用与资源环境方面研究, E-mail: 1107976656@qq.com; 通讯作者: 张磊(1983-), 副研究员, 主要从事岩浆岩岩石学和大地构造研究, E-mail: leizhang@cags.ac.cn。

the protolith for the gneiss intruded at ~ 1.4 Ga. The zircons from Haisen Chulu gneiss show positive $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values between -4.38 and $+6.68$, and the two-stage Hf model ages are in the range of 2 091 to 1 624 Ma, indicating that the protoliths were mainly derived from the juvenile crust. This study, in combination with previous work, indicates that the Precambrian rocks outcropped in northern Longshoushan-Beidashan area were formed in Mesoproterozoic or later instead of in Archean or Paleoproterozoic as previously proposed. The northern Longshoushan-Beidashan area could not be part of the Alxa block during early Precambrian time.

Key words: Alxa; Beidashan; Mesoproterozoic; gneiss; Longshoushan Group; zircon U-Pb age; zircon Hf isotope

Fund support: National Key Research and Development Project of China (2017YFC0601301); China Geological Survey Project (DD20190001, DD20160123, DD20160456)

阿拉善地块北邻中亚造山带,西接塔里木板块,南为祁连-秦岭造山带,其构造位置十分关键,是探讨阿拉善地块、华北克拉通与中亚造山带相互关系以及研究古亚洲洋构造演化问题的重要窗口(Feng *et al.*, 2013)。在阿拉善北部,存在两条重要的近东西向展布的蛇绿岩带,即北部的恩格尔乌苏蛇绿岩带和南部的查干础鲁蛇绿岩带(吴泰然等, 1993; 王廷印等, 1993, 1994, 1998)。恩格尔乌苏蛇绿岩带长期被认为是阿拉善地块的北界(吴泰然等, 1993; 王廷印等, 1994; 李俊健, 2006),但近年来也有一些研究提出查干础鲁蛇绿岩带可能代表了阿拉善地块北界的位置(Shi *et al.*, 2014; 史兴俊等, 2014, 2016; Zhang *et al.*, 2015; 叶珂等, 2016)。在阿拉善地区,出露一些太古宙到新元古代的变质岩(修群业等, 2002, 2004; 沈其韩等, 2005; 董春燕等, 2007; 耿元生等, 2007, 2010; 宫江华等, 2011, 2012, 2013; Dan *et al.*, 2012, 2014; Wu *et al.*, 2014; Gong *et al.*, 2016),这些前寒武纪变质岩的时空分布和组成特征对于认识阿拉善地区的构造划分具有重要意义。

根据早期的一些调查研究工作,阿拉善地区的前寒武纪变质岩主要分为中东部的阿拉善岩群(李俊健等, 2004; 沈其韩等, 2005; 耿元生等, 2006, 2007, 2010, 2011; Dan *et al.*, 2012)以及西部的北大山岩群和龙首山岩群(修群业等, 2002, 2004; 宫江华等, 2011, 2012; Zhang *et al.*, 2013a; Gong *et al.*, 2016)。普遍认为这3套岩群主要形成于太古宙到古元古代,是阿拉善地块基底的组成部分(吴泰然等, 1993; 王廷印等, 1994; 修群业等, 2002, 2004; 沈其韩等, 2005; 耿元生等, 2010; 宫江华等, 2011, 2012; Gong *et al.*, 2016; 张建新等,

2018)。根据近年来相继获得的一批高精度年龄数据,早期认识的阿拉善岩群被解体划分为新太古代叠布斯格群(约2 700 Ma)、古元古代巴彦乌拉山群(2 500 ~ 2 267 Ma)以及古元古代阿拉善岩群(耿元生等, 2006)。其中,太古宙-古元古代变质岩均出露于查干础鲁蛇绿岩带以南(李俊健等, 2004; 沈其韩等, 2005; 耿元生等, 2007, 2010; Dan *et al.*, 2012)。位于恩格尔乌苏蛇绿岩带和查干础鲁蛇绿岩带之间的宗乃山地区的变质岩早期被认为形成于太古宙到古元古代,现在被重新厘定为中元古代(卿芸, 2010; 宋伟, 2014; 史兴俊等, 2016),因而一些研究提出这一地区可能并不是阿拉善地块的组成部分(史兴俊等, 2016)。

北大山岩群和龙首山岩群组出露于阿拉善西部的龙首山和北大山地区(修群业等, 2002, 2004; 宫江华等, 2011, 2012; Gong *et al.*, 2016)。近年来获得的一些高精度年龄数据揭示北大山中东部地区TTG岩石形成于 ~ 2.5 Ga(宫江华等, 2012),龙首山南部地区变质基底中的正片麻岩形成于2.33 ~ 2.0 Ga之间(Gong *et al.*, 2016)。这些研究表明龙首山和北大山南部也存在太古宙到古元古代变质岩。然而,目前对阿拉善西部地区北大山岩群和龙首山岩群的研究主要集中于南部地区,龙首山-北大山北部同样出露一些前寒武纪岩石,早期地质调查工作通过区域对比推测它们同样形成于古元古代,将其定为龙首山岩群,并认为它们是阿拉善地块基底的组成部分^①。最近有研究表明,龙首山西北部的原属于龙首山岩群的深变质岩中识别出中元古代侵入体并具有早新元古代碎屑锆石的变沉积岩(Song *et al.*, 2017),与南部龙首山岩群的研究并不一致。因此,确定龙首山-北大山北部的前寒武纪变质岩是

① 甘肃省区域地质调查队. 1980. 1:20 万咸水福地质报告.

否属于龙首山岩群,对于确定阿拉善北部构造划分具有重要意义。

本文选择阿拉善北大山西北部地区海森楚鲁片麻岩开展了详细的岩石学、年代学和锆石 Hf 同位素研究,以期查明其形成时代和源区同位素组成特征,并与其南部传统的阿拉善地块内部以及北部中亚造山带进行对比,进一步探讨龙首山-北大山北部的构造归属。

1 区域地质背景

阿拉善地块是位于祁连山以北、贺兰山以西、中亚造山带以南的具有前寒武纪基底岩石的古老地块(图1)。以腾格里沙漠为界,阿拉善地块早前寒武纪变质岩可分为东西两部分。其中,阿拉善地块西部的前寒武纪基底岩石在北大山和龙首山地区都有出露,主要为北大山岩群和龙首山岩群。

北大山岩群从西向东主要分布在努尔盖公社高家窑、阿拉善右旗次井子-青土井-周家井和莱芙山等地区,岩性主要为一套中基性火山岩,后期经历了

较为强烈的混合岩化作用,并存在新太古代末-古元古代早期的岩浆-变质事件(宫江华等, 2012; Zhang *et al.*, 2013a)。龙首山岩群西起金塔县境内,向东南经高台县合黎山、张掖东大山,到金昌市龙首山一带,断续延伸约 400 km。由于时代较老,后期经历多期强烈的变质变形作用而变得支离破碎,层序不清(汤中立等, 1999)。

龙首山岩群自下而上主要由片麻岩、云母石英片岩、斜长角闪岩、变粒岩及混合岩,期间夹大理岩等组成,为一套中-中低级区域变质岩系。前人利用 Sm-Nd 等时线年龄确定龙首山岩群下段为新太古代,上段为古元古代(2.5 ~ 1.6 Ga)(汤中立等, 1999, 2001)。近年来一些高精度的锆石 U-Pb 年代数据(2.17 ~ 2.04 Ga)表明龙首山岩群形成于古元古代(修群业等, 2002, 2004; 宫江华等, 2011)。近年来,有学者获得龙首山岩群正片麻岩年龄为 2.33 Ga、2.17 ~ 2.15 Ga 和 2.06 ~ 2.0 Ga, 副片麻岩锆石年龄在 2.2 ~ 2.0 Ga 之间,并且都经历了 1.96 ~ 1.90 Ga 和 1.85 Ga 两期的变质事件(Gong *et al.*, 2016)。

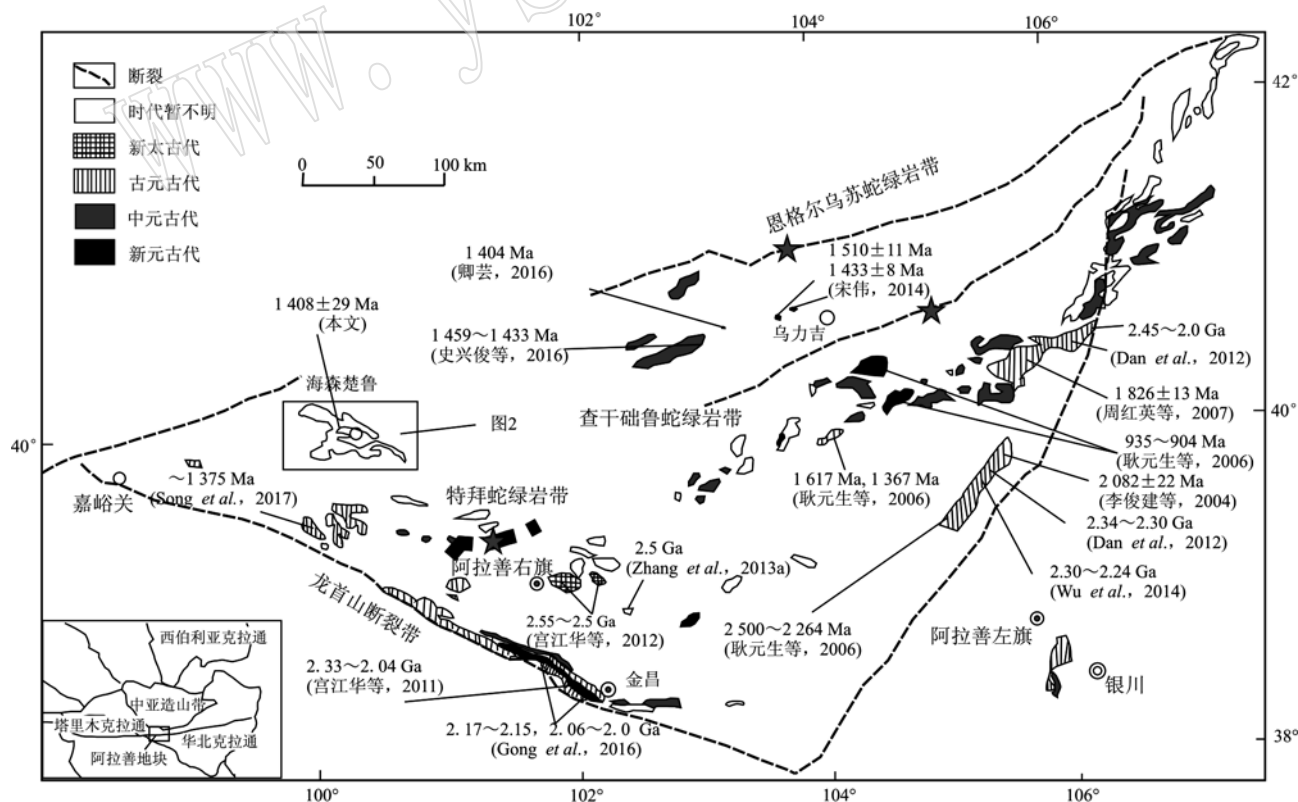


图1 阿拉善地区前寒武纪岩石分布图(据 Dan *et al.*, 2012 修改)

Fig. 1 Sketch map showing the Precambrian rocks in the Alxa region (modified after Dan *et al.*, 2012)

2 样品描述

海森楚鲁片麻岩出露于北大山西北段(图2),在野外呈现块状构造,破碎强烈,内部不发育后期岩脉(图3a)。岩石呈现块状构造,混合岩化程度较低,由于风化严重,岩体呈断续分布,与周围岩体的接触产状不明显。该片麻岩(样品号 16AX16, 采样位置 GPS: E100°9.56', N40°5.77')在显微镜下显示出粒状变晶结构(图3b),主要组成矿物有钾长石(约25%)、斜长石(约25%)、石英(约40%)和黑云母(约10%)。其中钾长石和斜长石呈板状;斜长石具有微弱的绢云母化;石英部分发生了重结晶作用,呈一定的定向排列(图3b)。

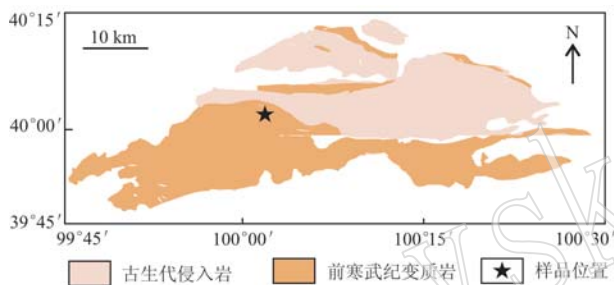


图2 海森楚鲁地区地质简图和采样位置
(据甘肃省地质局区域调查队,1980^①修改)

Fig. 2 Geological sketch map of the Haisen Chulu area and sampling location (modified after Geological Survey Party of Geological Bureau of Gansu Province^①, 1980)

3 测试方法

锆石单矿物挑选采用常规方法完成。将原岩样品粉碎,经常规重选和电磁选后,在双目镜下挑选锆石。将完整的典型锆石颗粒置于环氧树脂中,待固结后抛磨,使锆石内部充分暴露,然后进行锆石显微(反射光和透射光)照相和阴极发光(CL)照相。

锆石 U-Pb 同位素定年在西北大学大陆动力学实验室完成,分析仪器为 Elan 6100DRC 型四级杆质谱仪和 Geolas 200M 型激光剥蚀系统,激光器为 193 nm ArF 准分子激光器,单脉冲能量 210 mJ。分析采用的激光斑束直径为 40 μm ,采用标准锆石 91500 为外部标样进行同位素比值分馏校正,以保证标准和样品的仪器条件完全一致,采用 Andersen 的方法进行普通铅校正(Anderson, 2002),以扣除普通 Pb 的影响。测试结果通过 GLITTER(ver 4.0, Macquarie University) 软件计算得出 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 3 组同位素比值、年龄及误差,最后采用 Isoplot 软件进行统计计算(Ludwig, 1991)。所给定的同位素比值和年龄的误差(标准偏差)在 1 σ 水平。详细的实验原理和流程见 Yuan 等(2004)。

锆石 Hf 同位素分析在中国地质科学院地质研究所完成。测定使用国际锆石标样 GJ-1 作为参考物质,GJ-1 的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 测试加权平均值为 $0.282\,015 \pm$

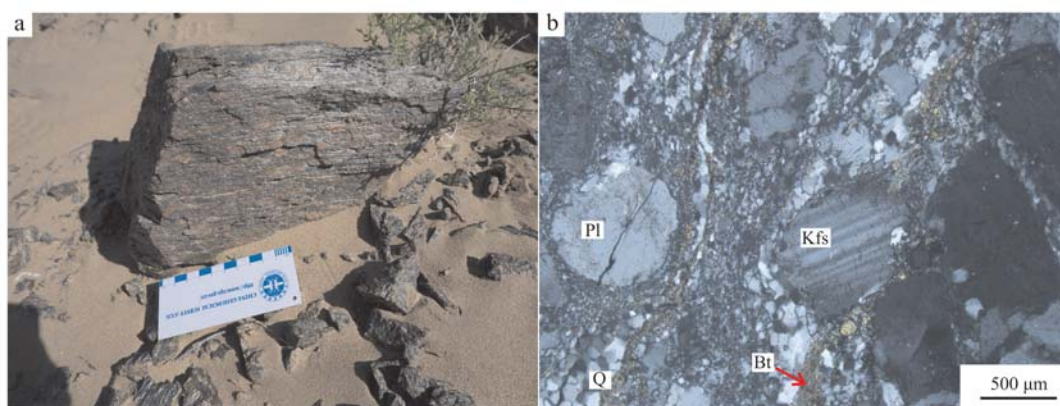


图3 海森楚鲁片麻岩野外(a)及单偏光镜下特征(b)

Fig. 3 Outcrop (a) and photomicrograph showing the texture and mineral assemblage (b) of Haisen Chulu gneiss

Q—石英; Pl—斜长石; Kfs—钾长石; Bt—黑云母

Q—quartz; Pl—plagioclase; Kfs—potassium feldspar; Bt—biotite

① 甘肃省区域地质调查队, 1980. 1:20 万咸水福地质报告.

0.000 008(2 σ , $n=10$)。为使 Hf 同位素分析与锆石 U-Pb 年龄分析相对应, 锆石 Hf 同位素的分析点与锆石 U-Pb 年龄分析点位于同颗锆石晶体的相同位置或者结构相似处。计算 ^{176}Lu 衰变常数采用 $1.867 \times 10^{-11}/\text{a}$ (Soderlund *et al.*, 2004)。球粒陨石的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 和 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 的比值分别为 0.033 2 和 0.282 772 (Blichert-Toft and Albarede, 1997), 亏损地幔的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 和 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 的比值分别为 0.038 4 和 0.283 25 (Griffin *et al.*, 2000), $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 平均地壳为 0.015 (Chauvel *et al.*, 2014)。

4 测试结果

4.1 锆石 U-Pb 年代学

海森楚鲁片麻岩样品(16AX16)中挑选的锆石

呈无色透明, 半自形-自形, 多数呈长柱状, 部分短柱状, 锆石宽约 100 μm , 长约 200 ~ 300 μm , 长宽比 2:1 ~ 3:1 (图 4)。阴极发光图像显示这些锆石普遍具有典型的岩浆结晶环带, 未见继承核, 多数锆石边部有极窄的明亮边, 可能与后期变质作用有关。在锆石阴极发光照片中选择没有裂隙、没有包裹体、锆石内部环带均匀的位置, 共选取 60 颗锆石进行了 60 个测点的 U-Pb 测年分析, 测试结果见表 1。其中, 测试点 27、28 的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄明显远离谐和曲线, 不参与年龄计算。其余 58 个测点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄集中在 1 509 ~ 1 034 Ma 之间, 大部分测点存在一定的 Pb 丢失 (袁洪林等, 2003; 徐夕生等, 2003), 但在锆石 U-Pb 年龄谐和图中总体呈完好的线性排列。在锆石 U-Pb 年龄谐和图 (图 5) 中, 不一致线上交点年龄为 $1\,408 \pm 29$ Ma (MSWD = 13)。

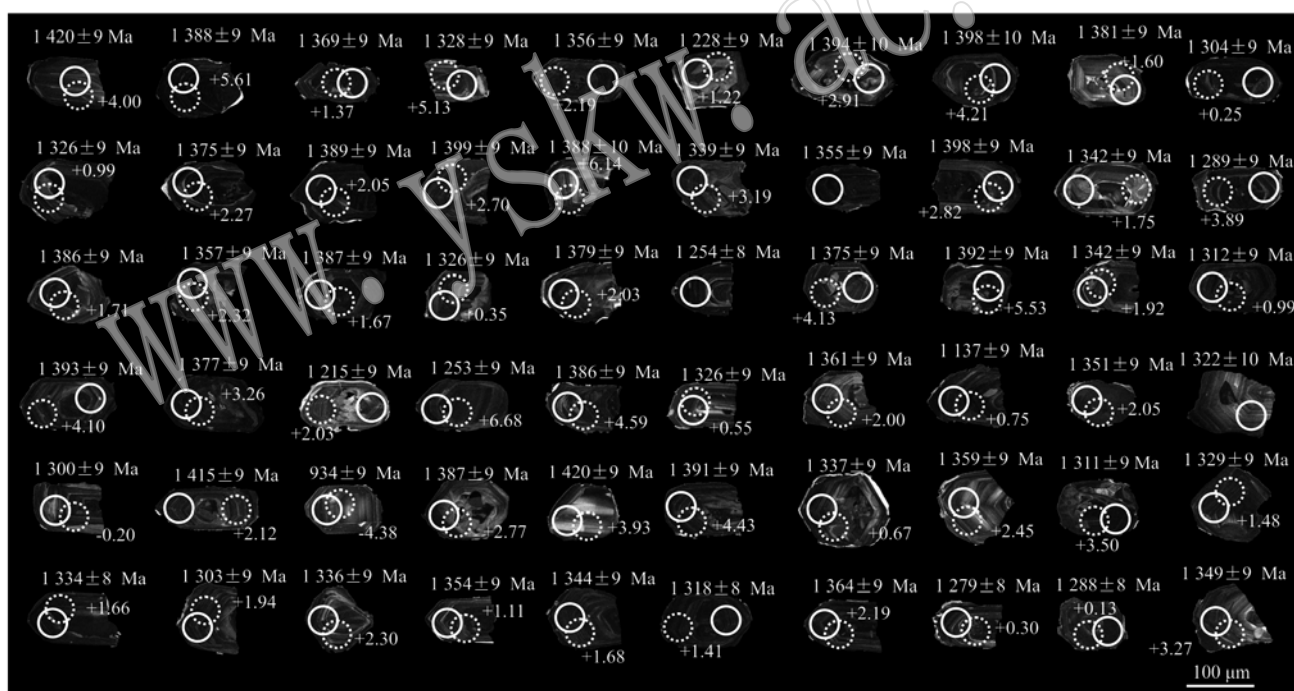


图 4 锆石阴极发光图像及测点位置 (实线圆圈代表锆石 U-Pb 测年分析点, 虚线圆圈代表锆石 Hf 同位素分析点)

Fig. 4 CL images of zircon grains from the Haisen Chulu gneiss (the white circles indicating the location of analyzed sites for U-Pb dating, and dotted line circles for Hf isotopic analysis)

4.2 锆石 Hf 同位素特征

选取完成了 U-Pb 定年的锆石, 在与定年分析位置相同或内部结构相似处开展了激光原位 Hf 同位素分析, 分析结果见表 2。片麻岩中锆石的 Lu/Hf 值为 0.000 742 ~ 0.002 893, 未校正 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.281 982 ~ 0.282 203。利用单颗粒锆石的

$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 年龄对相应的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值进行校正, 得出该片麻岩中锆石的初始 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值变化范围为 0.281 943 ~ 0.282 174, $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 值变化范围为 -4.38 ~ +6.68 (57 个点平均值为 +2.35), Hf 同位素二阶段地壳模式年龄为 2 066 ~ 1 624 Ma (57 个点平均值为 1 962 Ma)。

表1 海森楚鲁片麻岩锆石 LA-ICP MS U-Pb 分析结果
Table 1 LA-ICP MS isotopic analyses for zircons from the Haisen Chulu gneiss

测点号	同位素比值						年龄/Ma					
	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ
16AX16.01	0.090 2	0.001 9	0.244 9	0.002 8	3.047 1	0.037 7	1 430	39	1 412	15	1 420	9
16AX16.02	0.090 8	0.001 9	0.233 5	0.002 7	2.925 0	0.036 0	1 443	39	1 353	14	1 388	9
16AX16.03	0.090 2	0.001 9	0.229 2	0.002 7	2.850 9	0.034 9	1 430	39	1 330	14	1 369	9
16AX16.04	0.090 2	0.001 9	0.216 9	0.002 5	2.696 9	0.033 5	1 429	39	1 266	13	1 328	9
16AX16.05	0.090 9	0.001 9	0.223 6	0.002 6	2.801 2	0.035 2	1 444	39	1 301	14	1 356	9
16AX16.06	0.085 3	0.001 8	0.199 8	0.002 3	2.350 6	0.029 8	1 323	40	1 174	13	1 228	9
16AX16.07	0.089 3	0.001 9	0.239 3	0.002 8	2.946 4	0.037 4	1 411	39	1 383	15	1 394	10
16AX16.08	0.089 7	0.001 9	0.239 6	0.002 8	2.962 9	0.038 4	1 419	40	1 385	15	1 398	10
16AX16.09	0.089 6	0.001 8	0.234 6	0.002 7	2.896 8	0.035 3	1 416	39	1 359	14	1 381	9
16AX16.10	0.090 7	0.001 9	0.208 8	0.002 4	2.610 1	0.032 0	1 440	39	1 222	13	1 304	9
16AX16.11	0.089 8	0.001 9	0.217 4	0.002 5	2.692 5	0.033 8	1 422	39	1 268	13	1 326	9
16AX16.12	0.088 4	0.001 8	0.235 7	0.002 7	2.873 7	0.033 9	1 392	38	1 365	14	1 375	9
16AX16.13	0.090 4	0.001 8	0.235 0	0.002 7	2.928 5	0.034 7	1 434	38	1 361	14	1 389	9
16AX16.14	0.088 7	0.001 8	0.242 6	0.002 8	2.967 5	0.035 5	1 398	38	1 400	15	1 399	9
16AX16.15	0.089 4	0.001 9	0.237 2	0.002 8	2.923 2	0.037 5	1 413	39	1 372	15	1 388	10
16AX16.16	0.094 1	0.001 9	0.211 2	0.002 5	2.738 1	0.033 4	1 509	38	1 235	13	1 339	9
16AX16.17	0.089 0	0.001 8	0.228 2	0.002 6	2.798 4	0.032 8	1 403	38	1 325	14	1 355	9
16AX16.18	0.088 4	0.001 8	0.242 9	0.002 8	2.960 7	0.036 0	1 392	38	1 402	15	1 398	9
16AX16.19	0.088 5	0.001 8	0.225 3	0.002 6	2.749 5	0.034 3	1 394	39	1 310	14	1 342	9
16AX16.20	0.087 6	0.001 8	0.211 9	0.002 5	2.558 5	0.030 8	1 374	38	1 239	13	1 289	9
16AX16.21	0.089 0	0.001 8	0.237 5	0.002 7	2.914 2	0.034 5	1 404	38	1 374	14	1 386	9
16AX16.22	0.089 0	0.001 8	0.228 8	0.002 6	2.805 0	0.033 2	1 403	38	1 328	14	1 357	9
16AX16.23	0.091 2	0.001 9	0.232 2	0.002 7	2.919 9	0.037 7	1 451	39	1 346	14	1 387	10
16AX16.24	0.091 8	0.001 9	0.212 6	0.002 5	2.689 9	0.033 1	1 463	38	1 243	13	1 326	9
16AX16.25	0.087 0	0.001 8	0.240 8	0.002 8	2.889 0	0.034 8	1 361	38	1 391	14	1 379	9
16AX16.26	0.085 7	0.001 7	0.206 6	0.002 4	2.439 7	0.028 3	1 331	38	1 210	13	1 254	8
16AX16.27	0.098 8	0.002 0	0.211 0	0.002 4	2.872 9	0.034 3	1 601	37	1 234	13	1 375	9
16AX16.28	0.101 8	0.002 1	0.209 4	0.002 5	2.937 2	0.036 3	1 657	37	1 226	13	1 392	9
16AX16.29	0.089 0	0.001 8	0.224 3	0.002 6	2.750 7	0.032 5	1 404	38	1 304	14	1 342	9
16AX16.30	0.091 0	0.001 8	0.210 5	0.002 4	2.640 8	0.030 7	1 447	37	1 232	13	1 312	9
16AX16.31	0.092 6	0.001 9	0.230 6	0.002 7	2.943 7	0.036 8	1 480	38	1 337	14	1 393	9
16AX16.32	0.087 1	0.001 7	0.240 0	0.002 8	2.880 6	0.033 9	1 362	38	1 387	14	1 377	9
16AX16.33	0.082 6	0.001 7	0.202 9	0.002 4	2.309 2	0.029 4	1 260	39	1 191	13	1 215	9
16AX16.34	0.086 0	0.001 8	0.205 5	0.002 4	2.435 1	0.031 6	1 338	39	1 205	13	1 253	9
16AX16.35	0.090 4	0.001 8	0.234 0	0.002 7	2.915 2	0.035 4	1 434	38	1 356	14	1 386	9
16AX16.36	0.087 2	0.001 8	0.223 9	0.002 6	2.690 1	0.032 9	1 364	38	1 303	14	1 326	9
16AX16.37	0.085 6	0.001 7	0.239 1	0.002 8	2.820 6	0.035 4	1 329	39	1 382	15	1 361	9
16AX16.38	0.083 7	0.001 7	0.179 0	0.002 1	2.062 9	0.024 8	1 284	38	1 061	11	1 137	8
16AX16.39	0.086 2	0.001 7	0.234 5	0.002 7	2.784 1	0.032 9	1 342	38	1 358	14	1 351	9
16AX16.40	0.087 3	0.001 8	0.222 3	0.002 7	2.674 9	0.035 3	1 367	39	1 294	14	1 322	10
16AX16.41	0.090 4	0.001 8	0.208 7	0.002 4	2.599 0	0.030 5	1 433	37	1 222	13	1 300	9
16AX16.42	0.088 9	0.001 8	0.247 0	0.002 9	3.027 8	0.035 6	1 403	37	1 423	15	1 415	9
16AX16.43	0.073 7	0.001 6	0.148 5	0.001 8	1.509 2	0.021 3	1 034	42	893	10	934	9
16AX16.44	0.090 0	0.001 8	0.235 3	0.002 7	2.918 5	0.034 4	1 426	37	1 362	14	1 387	9
16AX16.45	0.088 4	0.001 7	0.250 3	0.002 9	3.049 5	0.035 7	1 391	37	1 440	15	1 420	9
16AX16.46	0.091 9	0.001 8	0.231 8	0.002 7	2.934 0	0.034 2	1 464	37	1 344	14	1 391	9
16AX16.47	0.085 7	0.001 7	0.231 4	0.002 7	2.732 1	0.032 9	1 331	38	1 342	14	1 337	9
16AX16.48	0.084 6	0.001 7	0.241 0	0.002 8	2.811 0	0.032 8	1 307	38	1 392	14	1 359	9
16AX16.49	0.087 3	0.001 7	0.219 2	0.002 6	2.638 2	0.032 4	1 368	38	1 278	14	1 311	9
16AX16.50	0.084 3	0.001 7	0.232 5	0.002 7	2.701 0	0.032 4	1 300	38	1 348	14	1 329	9
16AX16.51	0.084 7	0.001 6	0.233 2	0.002 7	2.720 7	0.030 9	1 308	37	1 351	14	1 334	8
16AX16.52	0.084 0	0.001 6	0.225 5	0.002 6	2.609 2	0.030 3	1 291	37	1 311	14	1 303	9
16AX16.53	0.085 2	0.001 7	0.232 3	0.002 7	2.726 5	0.032 9	1 320	38	1 346	14	1 336	9
16AX16.54	0.085 3	0.001 7	0.237 6	0.002 8	2.793 1	0.033 3	1 323	38	1 374	14	1 354	9
16AX16.55	0.084 6	0.001 6	0.236 5	0.002 7	2.756 8	0.031 7	1 307	37	1 368	14	1 344	9
16AX16.56	0.085 7	0.001 7	0.225 4	0.002 6	2.661 6	0.030 6	1 332	37	1 310	14	1 318	8
16AX16.57	0.087 4	0.001 7	0.235 0	0.002 7	2.830 9	0.032 2	1 370	37	1 361	14	1 364	9
16AX16.58	0.085 5	0.001 7	0.214 2	0.002 5	2.523 9	0.029 1	1 327	37	1 251	13	1 279	8
16AX16.59	0.085 2	0.001 6	0.217 6	0.002 5	2.555 4	0.028 8	1 321	37	1 269	13	1 288	8
16AX16.60	0.083 9	0.001 6	0.240 0	0.002 8	2.774 6	0.032 4	1 290	37	1 387	14	1 349	9

表2 海森楚鲁片麻岩锆石 Hf 同位素分析结果
Table 2 Analytical results of zircons Hf isotopes for Haisen Chulu gneiss

测点号	年龄/Ma	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$	$\varepsilon\text{Hf}(0)$	$\varepsilon\text{Hf}(t)$	t_{DM1}/Ma	t_{DM2}/Ma	$f_{\text{Lu/Hf}}$
16AX16.01	1 420	0.021 812	0.000 857	0.282 016	0.281 992	-26.74	4.00	1 732	1 921	-0.97
16AX16.02	1 388	0.040 098	0.001 586	0.282 100	0.282 058	-23.76	5.61	1 647	1 796	-0.95
16AX16.03	1 369	0.039 851	0.001 468	0.281 989	0.281 951	-27.68	1.37	1 798	2 046	-0.96
16AX16.04	1 328	0.028 789	0.001 227	0.282 114	0.282 083	-23.27	5.13	1 612	1 780	-0.96
16AX16.05	1 356	0.031 696	0.001 232	0.282 014	0.281 982	-26.81	2.19	1 752	1 985	-0.96
16AX16.06	1 228	0.018 315	0.000 766	0.282 054	0.282 036	-25.39	1.22	1 676	1 948	-0.98
16AX16.07	1 394	0.028 600	0.001 077	0.282 007	0.281 978	-27.05	2.91	1 755	1 969	-0.97
16AX16.08	1 398	0.056 117	0.002 070	0.282 068	0.282 012	-24.91	4.21	1 716	1 891	-0.94
16AX16.09	1 381	0.057 169	0.002 088	0.282 004	0.281 950	-27.14	1.60	1 806	2 041	-0.94
16AX16.10	1 304	0.078 875	0.002 848	0.282 031	0.281 960	-26.20	0.25	1 806	2 066	-0.91
16AX16.11	1 326	0.057 788	0.002 132	0.282 021	0.281 967	-26.56	0.99	1 785	2 037	-0.94
16AX16.12	1 375	0.025 053	0.000 969	0.281 998	0.281 972	-27.37	2.27	1 762	1 994	-0.97
16AX16.13	1 389	0.025 383	0.000 961	0.281 982	0.281 957	-27.91	2.05	1 783	2 019	-0.97
16AX16.14	1 399	0.023 522	0.000 900	0.281 993	0.281 969	-27.54	2.70	1 767	1 987	-0.97
16AX16.15	1 388	0.028 440	0.001 108	0.282 102	0.282 073	-23.67	6.14	1 623	1 763	-0.97
16AX16.16	1 339	0.028 766	0.001 122	0.282 052	0.282 021	-25.53	3.19	1 697	1 909	-0.97
16AX16.18	1 398	0.067 583	0.002 463	0.282 038	0.281 973	-25.93	2.82	1 776	1 978	-0.93
16AX16.19	1 342	0.056 889	0.002 132	0.282 033	0.281 979	-26.13	1.75	1 768	2 002	-0.94
16AX16.20	1 289	0.054 071	0.002 041	0.282 122	0.282 073	-22.96	3.89	1 635	1 827	-0.94
16AX16.21	1 386	0.056 112	0.002 024	0.282 002	0.281 949	-27.20	1.71	1 806	2 038	-0.94
16AX16.22	1 357	0.029 538	0.001 144	0.282 014	0.281 985	-26.77	2.32	1 747	1 978	-0.97
16AX16.23	1 387	0.049 001	0.001 770	0.281 994	0.281 948	-27.49	1.67	1 805	2 041	-0.95
16AX16.24	1 326	0.057 534	0.002 056	0.282 001	0.281 949	-27.26	0.35	1 810	2 077	-0.94
16AX16.25	1 379	0.031 860	0.001 191	0.281 994	0.281 963	-27.50	2.03	1 778	2 013	-0.96
16AX16.27	1 375	0.076 030	0.002 893	0.282 100	0.282 025	-23.75	4.13	1 707	1 878	-0.91
16AX16.28	1 392	0.054 291	0.002 021	0.282 107	0.282 053	-23.51	5.53	1 657	1 804	-0.94
16AX16.29	1 342	0.034 502	0.001 298	0.282 016	0.281 983	-26.71	1.92	1 751	1 991	-0.96
16AX16.30	1 312	0.032 236	0.001 235	0.282 007	0.281 976	-27.05	0.99	1 762	2 026	-0.96
16AX16.31	1 393	0.057 627	0.002 179	0.282 070	0.282 012	-24.82	4.10	1 717	1 894	-0.93
16AX16.32	1 377	0.034 819	0.001 369	0.282 034	0.281 999	-26.07	3.26	1 729	1 934	-0.96
16AX16.33	1 215	0.029 871	0.001 167	0.282 094	0.282 067	-23.97	2.03	1 637	1 887	-0.96
16AX16.34	1 253	0.029 447	0.001 235	0.282 203	0.282 174	-20.09	6.68	1 487	1 624	-0.96
16AX16.35	1 386	0.023 628	0.000 993	0.282 057	0.282 031	-25.28	4.59	1 681	1 858	-0.97
16AX16.36	1 326	0.035 832	0.001 408	0.281 990	0.281 955	-27.63	0.55	1 793	2 065	-0.96
16AX16.37	1 361	0.024 832	0.000 989	0.281 999	0.281 974	-27.32	2.00	1 761	2 001	-0.97
16AX16.38	1 137	0.024 463	0.000 993	0.282 102	0.282 081	-23.68	0.75	1 619	1 907	-0.97
16AX16.39	1 351	0.039 783	0.001 536	0.282 021	0.281 982	-26.56	2.05	1 757	1 990	-0.95
16AX16.41	1 300	0.036 437	0.001 360	0.281 984	0.281 951	-27.86	-0.20	1 800	2 091	-0.96
16AX16.42	1 415	0.044 109	0.001 588	0.281 985	0.281 943	-27.82	2.12	1 809	2 035	-0.95
16AX16.43	934	0.018 928	0.000 742	0.282 078	0.282 065	-24.56	-4.38	1 642	2 074	-0.98
16AX16.44	1 387	0.027 240	0.001 012	0.282 006	0.281 979	-27.10	2.77	1 754	1 973	-0.97
16AX16.45	1 420	0.049 196	0.001 754	0.282 038	0.281 991	-25.96	3.93	1 743	1 926	-0.95
16AX16.46	1 391	0.063 571	0.002 272	0.282 083	0.282 023	-24.36	4.43	1 703	1 872	-0.93
16AX16.47	1 337	0.041 558	0.001 515	0.281 990	0.281 952	-27.65	0.67	1 799	2 065	-0.95
16AX16.48	1 359	0.031 217	0.001 186	0.282 018	0.281 988	-26.65	2.45	1 744	1 971	-0.96
16AX16.49	1 311	0.065 616	0.002 663	0.282 114	0.282 048	-23.27	3.50	1 676	1 868	-0.92
16AX16.50	1 329	0.026 640	0.001 004	0.282 005	0.281 980	-27.13	1.48	1 754	2 009	-0.97
16AX16.51	1 334	0.074 820	0.002 704	0.282 050	0.281 982	-25.54	1.66	1 771	2 001	-0.92
16AX16.52	1 303	0.036 320	0.001 382	0.282 043	0.282 009	-25.77	1.94	1 718	1 960	-0.96
16AX16.53	1 336	0.051 726	0.001 931	0.282 047	0.281 999	-25.63	2.30	1 738	1 963	-0.94
16AX16.54	1 354	0.029 866	0.001 144	0.281 983	0.281 953	-27.91	1.11	1 792	2 051	-0.97
16AX16.55	1 344	0.025 814	0.001 017	0.282 002	0.281 976	-27.25	1.68	1 760	2 008	-0.97
16AX16.56	1 318	0.067 862	0.002 483	0.282 047	0.281 985	-25.65	1.41	1 765	2 004	-0.93
16AX16.57	1 364	0.060 611	0.002 176	0.282 034	0.281 977	-26.12	2.19	1 769	1 991	-0.93
16AX16.58	1 279	0.056 693	0.002 209	0.282 032	0.281 978	-26.19	0.30	1 774	2 044	-0.93
16AX16.59	1 288	0.039 681	0.001 493	0.282 004	0.281 967	-27.16	0.13	1 778	2 062	-0.96
16AX16.60	1 349	0.023 056	0.000 891	0.282 040	0.282 018	-25.88	3.27	1 700	1 912	-0.97

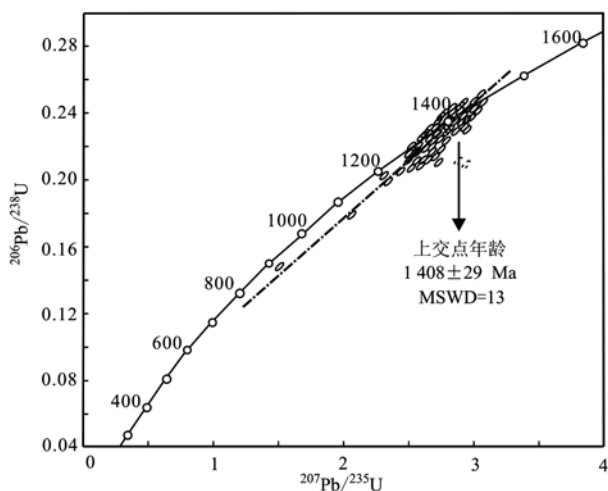


图5 海森楚鲁片麻岩锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 5 Zircon U-Pb concordia diagram for the Haisen Chulu gneiss

5 讨论

5.1 形成时代

根据矿物组成和矿物特征,海森楚鲁片麻岩为长英质变质岩,而长英质变质岩的原岩可能是岩浆岩,也可能是砂质沉积岩(李曙光等,1989)。海森楚鲁片麻岩具有糜棱岩化特征,但是成分比较均匀,没有明显的层理构造。显微镜下长石碎斑大小基本一致,表面比较干净,并没有经历后期变质而产生的剪切变形和细粒化特征,而且各种组成矿物分布比较均匀(图3b)。野外和镜下特征均不符合沉积岩的特征,因而原岩可能是岩浆岩。此外,海森楚鲁片麻岩中挑选出的锆石具有相似的形态,大部分锆石均具有较窄的白色增生边,而测年结果显示这些锆石的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄非常集中,数据点多分布在谐和线上或呈线状分布在谐和线右侧(图5)。锆石的特征和分析结果进一步表明该片麻岩应当是酸性岩浆岩经历后期变质作用而形成的,上交点年龄 $1408 \pm 29 \text{ Ma}$ (MSWD = 13)应当代表了原岩的形成时代。

早期的调查研究中,通过与龙首山其他地区出露的前震旦系龙首山岩群的岩性进行对比,提出北大山西北部地区的变质岩可能为龙首山岩群^①。近年来龙首山南部金昌市附近龙首山群的研究显示,下部的花岗质片麻岩的测年结果集中在 $2.3 \sim 2.0$

Ga,上部副片麻岩碎屑锆石的测年结果集中在 $2.2 \sim 2.0 \text{ Ga}$,并普遍经历了 $1.96 \sim 1.85 \text{ Ga}$ 的变质事件(修群业等,2002,2004;宫江华等,2011;Gong *et al.*, 2016)。在北大山西北部,近年来对于前人划分的龙首山岩群的深变质岩中识别出中元古代侵入体和具有新元古代早期碎屑锆石的变沉积岩(Song *et al.*, 2017)。本文研究表明海森楚鲁片麻岩的原岩形成于大约 $1408 \pm 29 \text{ Ma}$ 。目前,北大山西北部尚未发现太古宙-古元古代基底岩石。现有的研究结果均表明北大山西北部的这些前寒武纪正片麻岩原岩的侵位时代应当在大约 $1400 \sim 1200 \text{ Ma}$,变质作用发生时代更晚,这与传统龙首山岩群的研究结果不一致(Tung *et al.*, 2007; 宫江华等, 2011; Gong *et al.*, 2016)。因而龙首山-北大山北部原被划为“龙首山岩群”的变质岩可能并不属于传统的龙首山岩群。

5.2 物源组成

结合锆石的 U-Pb 年龄,获取准确的 Hf 同位素初始比值,能够很好地示踪物质的来源,了解大陆地壳增长和演化(Amelin *et al.*, 2000; Bodet and Schorcr, 2000; 吴福元等, 2007)。

锆石 Hf 同位素资料表明,海森楚鲁片麻岩原岩的源区物质组成与龙首山-北大山南部以及阿拉善中东部的太古代宙-古元古代基底岩石不同,而与宗乃山地区中元古代片麻岩相近(图6)。片麻岩中锆石的 $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 值大多集中于 $+0.13 \sim +6.68$,而宗乃山地区片麻岩(年龄为 $1.5 \sim 1.4 \text{ Ga}$)中锆石 $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 值绝大多数集中于 $+0.1 \sim +6.3$ (史兴俊等, 2016)。二者的锆石二阶段模式年龄均位于 $2.20 \sim 1.8 \text{ Ga}$ 之间。阿拉善西南部的龙首山岩群正片麻岩($2.17 \sim 2.04 \text{ Ga}$),北大山地区正片麻岩(2.55 Ga)和阿拉善中东部雅布赖-红古尔玉林一带巴彦乌拉山地区角闪岩(2.34 Ga)、叠布斯格岩群(2.7 Ga)的形成年龄略有不同,但是锆石的二阶段模式年龄均在 $3.25 \sim 2.45 \text{ Ga}$ 之间(图6, Dan *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2013a)。因此,龙首山-北大山南部与阿拉善中东部雅布赖-红古尔玉林地区具有相似的物质组成,而龙首山-北大山北部应当与龙首山-北大山南部具有不同的基底物质组成,却与宗乃山地区具有相似的基底物质组成。

① 甘肃省区域地质调查队. 1980. 1:20 万咸水湖地质报告.

5.3 龙首山-北大山北部的构造属性

阿拉善西北部的龙首山-北大山北部地区, 仅出露有少量的前寒武纪岩石。在早期的研究中, 这些前寒武纪岩石均被认为与龙首山-北大山南部出露的前寒武纪岩石相同, 均形成于太古宙或古元古代, 因而这两个地区往往被作为一个统一的构造单元(任继舜等, 1980; 董申保, 1986; 汤中立等, 1999, 2001; 修群业等, 2002; Zhao *et al.*, 2012; Gong *et al.*, 2016; Song *et al.*, 2017, 2018)。本文及近年来的研究表明, 龙首山-北大山北部地区出露的前寒武纪岩石可能形成于中元古代或更晚(Song *et al.*, 2017), 该地区迄今为止均尚未发现太古宙-古元古代基底岩石。同位素组成上, 龙首山-北大山北部地区的前寒武纪岩石具有相对较年轻的 Hf 同位素模式年龄, 而龙首山-北大山南部 Hf 同位素模式年龄相对较老(图 6)(宫江华等, 2011, 2012)。由此

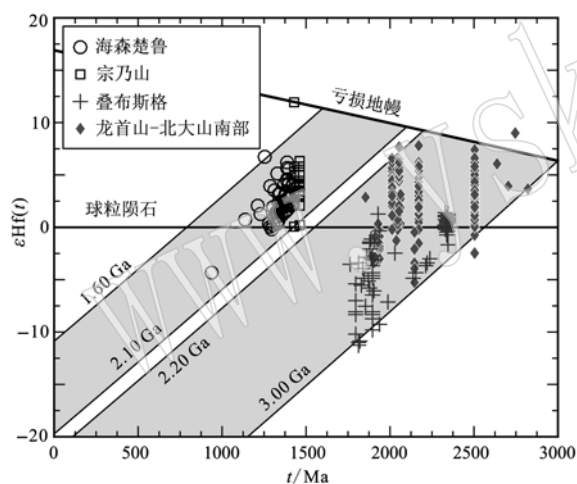


图 6 阿拉善地区前寒武纪片麻岩锆石 $\varepsilon\text{Hf}(t)$ - t 图解
Fig. 6 Zircon $\varepsilon\text{Hf}(t)$ versus age of the Precambrian rocks in Alxa region

采用 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}=0.015$ 计算各平均地壳演化线; 数据来源: 陆松年等(2002); 修群业等(2002, 2004); 李俊健等(2004); 沈其韩等(2005); 周红英等(2007); 耿元生等(2007, 2010); 董春燕等(2007); 刘勇(2008); 宫江华等(2011, 2012); 李倩(2012); Dan 等(2012, 2014); Zhang 等(2013a); 宋伟(2014); Wu 等(2014); 肖志斌等(2015); 史兴俊等(2016); Gong 等(2016)

$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}=0.015$ has been used in calculation of average crust evolution lines; Data sources: Lu Songnian *et al.*, 2002; Xiu Qunye *et al.*, 2002, 2004; Li Junjian *et al.*, 2004; Shen Qihan *et al.*, 2005; Zhou Hongying *et al.*, 2007; Geng Yuansheng *et al.*, 2007, 2010; Dong Chunyan *et al.*, 2007; Liu Yong, 2008; Gong Jianghua *et al.*, 2011, 2012; Li Qian, 2012; Dan *et al.*, 2012, 2014; Zhang *et al.*, 2013a; Song Wei, 2014; Wu *et al.*, 2014; Xiao Zhibin *et al.*, 2015; Shi Xingjun *et al.*, 2016; Gong *et al.*, 2016

可见, 无论是形成时代(图 7), 还是物源组成, 龙首山-北大山北部与南部分布的前寒武纪岩石都呈现出明显不同的特征。因此, 这两个地区应该作为两个不同的构造单元。

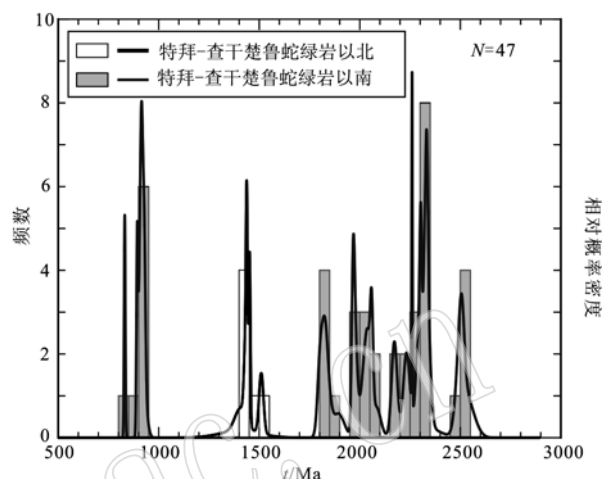


图 7 阿拉善地区前寒武纪变质岩结晶年龄统计图(数据来源: 宫江华等, 2012; Dan *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2013a; 史兴俊等, 2016; Gong *et al.*, 2016)

Fig. 7 Statistical graph showing the distribution of the protolith crystallization age for the Precambrian rocks in Alxa area (data sources: Gong Jianghua *et al.*, 2012; Dan *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2013a; Shi Xingjun *et al.*, 2016; Gong *et al.*, 2016)

尽管被巴丹吉林沙漠分隔, 龙首山-北大山北部地区与宗乃山-沙拉扎山地区出露的前寒武纪岩石均形成于中元古代或更晚(图 7), 锆石 Hf 同位素模式年龄也都集中分布于 2.10 ~ 1.60 Ga(图 6)。因此, 龙首山-北大山北部与宗乃山-沙拉扎山地区可能具有相同或相似的构造属性。近期, 在北大山中部地区识别出的特拜蛇绿岩(图 1)的研究结果表明, 该蛇绿岩可能形成于 278.4 ± 3.3 Ma, 并且富集相容元素, 强烈亏损稀土元素和高场强元素, 表明可能形成于俯冲环境(Zheng *et al.*, 2018)。这些特征与阿拉善中东部的查干础鲁蛇绿岩(图 1, 吴泰然等, 1993; Zheng *et al.*, 2014)相似, 被认为是查干础鲁蛇绿岩向西的延伸(Zheng *et al.*, 2018)。如果特拜蛇绿岩和查干础鲁蛇绿岩是同一洋盆闭合的残余, 位于这条蛇绿岩带以北的龙首山-北大山北部地区和宗乃山-沙拉扎山地区应当属于同一构造带。

龙首山-北大山北部地区与宗乃山-沙拉扎山地区出露的前寒武纪岩石曾被认为形成于太古宙或古

元古代,与阿拉善南部地区的前寒武纪岩石相似,共同构成阿拉善地块的变质基底(霍福臣等,1987;杨振德等,1988;吴泰然等,1993;王廷印等,1994;陈志勇等,2004)。一些研究认为在早古生代时期,龙首山-北大山北部地区与宗乃山-沙拉扎山地区从阿拉善地块上裂解出去,并在之间形成了以特拜蛇绿岩和查干础鲁蛇绿岩为代表的洋盆(吴泰然等,1993; Zhang *et al.*, 2013b; Zheng *et al.*, 2014, 2018)。然而根据现有资料,特拜-查干础鲁蛇绿岩一带南北两侧的前寒武纪岩石在形成时代和物源组成方面具有明显的不同(图6、图7)。龙首山-北大山北部地区,以及宗乃山-沙拉扎山地区出露的前寒武纪变质岩均形成于中元古代或更晚(卿芸等,2010;宋伟,2014;史兴俊等,2016; Song *et al.*, 2017),物源主要为相对年轻的地壳物质(图6)。龙首山-北大山南部与雅布赖-诺尔公-红古尔玉林一带出露大量太古宙或古元古代的变质岩(图7)(修群业等,2002,2004;耿元生等,2002,2006;李江海等,2006; Tung *et al.*, 2007; 宫江华等,2011; Dan *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2013a),其物源主要为古老的地壳物质(图6),显示了典型古老地体的Hf同位素特征(Dan *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2013a)。目前在特拜-查干础鲁蛇绿岩南北两侧尚未发现具有相同形成时代和物源组成的前寒武纪岩石。因而,龙首山-北大山北部地区和宗乃山-沙拉扎山地区可能并不是阿拉善地块在早古生代时期裂解形成的。

近年来,在阿拉善以西和以东的中亚造山带南缘地区均识别出一系列具有中元古基底的微陆块。例如,在阿拉善以西的星星峡、尾亚和阿拉塔格东等地识别出1459~1405 Ma的花岗质片麻岩(胡霭琴等,2006;施文翔等,2010; He *et al.*, 2015);在北大山造山带南部获得正片麻岩锆石U-Pb年龄为1408±4 Ma(贺振宇等,2015)。在阿拉善以东锡林浩特地块的原宝音图群中花岗片麻岩获得了1516~1390 Ma的年龄(孙立新等,2013)。而且它们都具有为正且较高的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(+1~+7), t_{DM} 模式年龄(2.0~1.5 Ga)与其岩浆岩结晶年龄相近,表明它们的源岩都来自亏损地幔或新生地壳(孙立新等,2013; Liu *et al.*, 2014; 贺振宇等,2015)。中亚造山带南缘这些中元古(1.5~1.4 Ga)基底的微陆块在形成时代、物质组成上与海森楚鲁地区以及宗乃山-沙拉扎山地区出露的前寒武纪变质岩相似,而不

同于塔里木克拉通、华北克拉通等古老地体(t_{DM} 模式年龄3.0~2.5 Ga)(Jiang *et al.*, 2011; 相振群, 2014; 贺振宇等, 2015)。因此,特拜-查干础鲁蛇绿岩可能代表了阿拉善地块的北界,其南部的龙首山-北大山南部地区和雅布赖-诺尔公-红古尔玉林一带属于阿拉善地块,而北部的龙首山-北大山北部地区以及宗乃山-沙拉扎山一带出露的前寒武纪变质岩可能是中亚造山带中的古老微板块。

6 结论

(1) 海森楚鲁地区出露的前寒武纪片麻岩是正片麻岩,其原岩形成于中元古代(1408±29 Ma)。结合前人研究成果,龙首山-北大山北部原被划为龙首山岩群的变质岩可能并不属于传统的龙首山岩群。

(2) 海森楚鲁片麻岩具有较高的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(-4.38~+6.68)和较年轻的二阶段模式年龄(2091~1624 Ma),表明原岩的源区来自亏损地幔或新生地壳。海森楚鲁片麻岩源区特征与阿拉善中东部的宗乃山-沙拉扎山地区以及中亚造山带南缘微陆块相似,而与阿拉善中东部的雅布赖-诺尔公-红古尔玉林地区、龙首山-北大山南部有差别。

(3) 龙首山-北大山北部地区与东部的宗乃山-沙拉扎山地区具有相同的构造属性,可能不是阿拉善地块的组成部分。

致谢 两位评审人对本文的初稿提出了宝贵的修改建议,在此表示衷心的感谢!

References

- Amelin Y, Lee D C and Halliday A N. 2000. Early middle Archean crustal evolution deduced from Lu-Hf and U-Pb isotopic studies of single zircon grains[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 64: 4 205~4 225.
- Anderson T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. *Chem. Geol.*, 192: 59~79.
- Blichert-Toft J and Albarède F. 1997. The Lu-Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 148: 243~258.
- Bodet F and SchorCr U. 2000. Evolution of the EA-Asian continent from U-Pb and Hf isotopes in single grains of zircon and baddeleyite from large river[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 64: 2 067~2 091.

- Chauvel C, Garçon M, Bureau S, *et al.* 2014. Constraints from loess on the Hf-Nd isotopic composition of the upper continental crust[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 388: 48 ~ 58.
- Chen Zhiyong, Yang Shuaishi and Meng Ergen. 2004. Revision of Precambrian stratigraphic units in the Bayan Nuruare, Alxa Zuoqi Inner Mongolia[J]. *Geol. Bull. China*, 23(4): 345 ~ 351 (in Chinese with English abstract).
- 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]. *Gond. Res.*, 21: 838 ~ 864.
- Dan W, Li X H, Wang Q, *et al.* 2014. Neoproterozoic S-type granites in the eastern Alxa Block, westernmost North China and tectonic implications: In situ zircon U-Pb-Hf-O isotopic and geochemical constraints[J]. *Am. J. Sci.*, 314: 110 ~ 153.
- Dong Chunyan, Liu Dunyi, Li Junjian, *et al.* 2007. Palaeoproterozoic Khondalite Belt in the western North China Craton: New evidence from SHRIMP date and Hf isotope composition of zircons from metamorphic rocks in the Bayan UL-Helan Mountains area[J]. *Chinese Sci. Bull.*, 52(16): 1 913 ~ 1 922 (in Chinese with English abstract).
- Dong Shenbao. 1986. The Relationship Between Metamorphism and Crustal Evolution in China[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese with English abstract).
- 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]. *J. Asian Earth Sci.*, 78: 114 ~ 142.
- Geng Yuansheng, Wang Xinshe, Shen Qihan, *et al.* 2002. The discovery of Neoproterozoic jinninggain deformed granites in Alxa areas and its significance[J]. *Acta Petrol. Mineral.*, 21(4): 412 ~ 420 (in Chinese with English abstract).
- Geng Yuansheng, Wang Xinshe, Shen Qihan, *et al.* 2006. Redefinition of the Alxa Group-complex (Precambrian metamorphic basement) in the Alxa area, Inner Mongolia[J]. *Geol. China*, 33(1): 138 ~ 145 (in Chinese with English abstract).
- Geng Yuansheng, Wang Xinshe, Shen Qihan, *et al.* 2007. Chronology of the Precambrian metamorphic series in the Alxa area, Inner Mongolia [J]. *Geol. China*, 34(2): 251 ~ 261 (in Chinese with English abstract).
- Geng Yuansheng and Zhou Xiwen. 2010. Early Neoproterozoic granite events in Alax area of Inner Mongolia and their geological significance: Evidence from geochronology[J]. *Acta Petrol. Mineral.*, 29(6): 779 ~ 795 (in Chinese with English abstract).
- Geng Yuansheng and Zhou Xiwen. 2011. Characteristics of geochemistry and zircon Hf isotope of the Early Neoproterozoic granite in Alxa area, Inner Mongolia[J]. *Acta Petrol. Sin.*, 27(4): 897 ~ 908 (in Chinese with English abstract).
- Gong J H, Zhang J C, 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]. *Gond. Res.*, 36: 359 ~ 375.
- Gong Jianghua, Zhang Jianxin and Yu Shengyao. 2011. The origin of Longshoushan Group and associated rocks in the southern part of the Alxa block: Constraint from LA-ICP-MS U-Pb zircon dating[J]. *Acta Petrol. Mineral.*, 30(5): 795 ~ 818 (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 Sci. Bull.*, 57(28 ~ 29): 4 064 ~ 4 076 (in Chinese with English abstract).
- Gong Jianghua, Zhang Jianxin and Yu Shengyao. 2013. Redefinition of the “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 Petrol. Mineral.*, 32(1): 1 ~ 22 (in Chinese with English abstract).
- Griffin W L, Pearson N J, Belousova E, *et al.* 2000. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LA-MC-ICP-MS analysis of zircon megacrysts in kimberlites[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 64: 133 ~ 147.
- He Z Y, Klemd R, Zhang Z M, *et al.* 2015. Mesoproterozoic continental arc magmatism and crustal growth in the eastern Central Tianshan Arc Terrane of the southern Central Asian Orogenic Belt: Geochronological and geochemical evidence[J]. *Lithos*, 236 ~ 237: 74 ~ 89.
- He Zhenyu, Sun Lixin, Mao Lingjuan, *et al.* 2015. Zircon U-Pb and Hf isotopic study of gneiss and granodiorite from the southern Beishan orogenic collage: Mesoproterozoic magmatism and crustal growth[J]. *Chinese Sci. Bull.*, 60(4): 389 ~ 399 (in Chinese with English abstract).
- Hu AiQin, Wei Gangjian, Deng Wenfeng, *et al.* 2006. 1.4 Ga SHRIMP U-Pb age for zircons of granodiorite and its geological significance from the eastern segment of the Tianshan Mountains, Xinjiang, China[J]. *Geochim.*, 35(4): 333 ~ 345 (in Chinese with English abstract).
- Huo Fuchen, Cao Jingxuan and Dong Yansheng. 1987. The division, correlation, metamorphism and mineralization features of the Lower and

- Middle Precambrian in the Helanshan Mountain-alashan region, China[J]. J. Changchun Geol. Institute, 17(1): 35 ~46(in Chinese with English abstract).
- Jiang N, Guo J H and Zhai M G. 2011. Mature and origin of the Wenquan granite: Implications for the provenance of Proterozoic A-type granites in the North China craton[J]. J. Asian Earth Sci., 42(1 ~ 2): 76 ~82.
- Li Jianghai, Niu Xianglong, Cheng Suhua, *et al.* 2006. The early Precambrian tectonic evolution of continental craton: A case study from North China[J]. Earth Sci., 31(3): 285 ~293(in Chinese with English abstract).
- Li Junjian. 2006. Regional Metallogenic System of Alashan Block in Inner Mongolia Autonomous Region [D]. Ph. D. Dissertation. Beijing: China University of Geosciences, 1 ~134(in Chinese with English abstract).
- Li Junjian, Shen Baofeng, Li Huimin, *et al.* 2004. Single zircon U-Pb age of granodioritic gneiss in the Bayan UI area, western Inner Mongolia[J]. Geol. Bull. China, 23(12): 1 243 ~1 245(in Chinese with English abstract).
- Li Qian. 2012. Study of the Precambrian Metamorphic Plutonic in Alaten-gaobao Region of Alxa Youqi, Inner Mongolia[D]. Master Degree Thesis. Beijing: China University of Geoscience (in Chinese with English abstract).
- Li Shuguang, Liu Shudao, Li Binxian, *et al.* 1989. The recognition of original rocks of felsic metamorphic rock in Gongchangling Archean banded ironformation and stratigraphic implication[J]. Acta Petrol. Sin., 5(3): 66 ~75(in Chinese with English abstract).
- Liu Hongsheng, Wang Bo, Shu Liangshu, *et al.* 2014. Detrital zircon age of Proterozoic meta-sedimentary rocks and Paleozoic sedimentary cover of the northern Yili block: Implication for the tectonics of microcontinent in the Central Asian Orogenic Belt[J]. Precam. Res., 252: 209 ~222.
- Liu Yong. 2008. Characteristics and Their Geological Significance of Paleoproterozoic Granite in Jinchuan, Gansu Province[D]. Beijing: China University of Geoscience(in Chinese with English abstract).
- Lu Songnian, Yu Haifeng, Jin Wei, *et al.* 2002. Microcontinents on the eastern margin of Tarim paleocontinent[J]. Acta Petrol. Mineral., 21(4): 317 ~326(in Chinese with English abstract).
- Ludwig K R. 1991. ISOPLOT: A Plotting and Regression Program For radiogenic-Isotope Data[M]. US Geological Survey Open-File Report, 39
- Qing Yun. 2010. Study of the Metamorphosed Basement in Tamusu Region of Alxa Youqi, Inner Mongolia [D]. Beijing: China University of Geoscience, 16 ~37(in Chinese with English abstract).
- Ren Jishun, Jang Chunfa and Zhang Zhengkun. 1980. China's Geotectonics and Their Evolution [M]. Beijing: Science Press(in Chinese with English abstract).
- Shen Qihan, Geng Yuansheng, Wang Xinshe, *et al.* 2005. Petrology, geochemistry, formation environment and ages of Precambrian Amphibolites in Alxa region[J]. Acta Petrol. Mineral., 24(1): 21 ~31(in Chinese with English abstract).
- Shi Wenxiang, Liao Qun'an, Hu Yuanqing, *et al.* 2010. Characteristics of Mesoproterozoic granites and their geological significances from Middle Tianshan block, East Tianshan district, NW China [J]. Geol. Sci. Tech. Inform., 29(1): 29 ~37(in Chinese with English abstract).
- 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 Xingjun, 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 Petrol. Mineral., 33(6): 989 ~1 007(in Chinese with English abstract).
- Shi Xingjun, Zhang Lei, Wang Tao, *et al.* 2016. Zircon geochronology and Hf isotopic compositions for the Mesoproterozoic gneisses in Zongnaishan areas, northern Alxa and its tectonic affinity[J]. Acta Petrol. Sin., 32(11): 3 518 ~3 536(in Chinese with English abstract).
- Soderlund U, Patchett P J, Vervoort J D, *et al.* 2004. The ^{176}Lu decay constant determined by Lu-Hf and U-Pb isotope systematic of Precambrian mafic intrusions[J]. Earth Planet. Sci. Lett., 219: 311 ~324.
- Song D F, Gloria S, Xiao W J, *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 D F, Xiao W J, Collins A, *et al.* 2017. New chronological contains on the tectonic affinity of the Alxa Block, NW China[J]. Precamb. Res., 299: 230 ~243.
- Song Wei. 2014. Research on Precambrian Metamorphosed Plutonic Intrusions in the Northern Alxa, Inner Mongolia[D]. Beijing: China University of Geosciences, 1 ~50(in Chinese with English abstract).

- Sun Lixin, Ren Bangfang, Zhao Fengqing, *et al.* 2013. Zircon U-Pb dating and Hf isotopic compositions of the Mesoproterozoic granitic gneiss in Xilinhote Block, Inner Mongolia[J]. *Geol. Bull. China*, 32(2): 327 ~ 340(in Chinese with English abstract).
- Tang Zhongli and Bai Yunlai. 1999. Geotectonic framework and metallogenic system in the southwest margin of north China Palecontinent [J]. *Earth Sci. Front.*, 6(2): 271 ~ 283(in Chinese with English abstract).
- Tang Zhongli and Bai Yunlai. 2001. Geological tectonic setting of large and superlarge deposits in the southwestern margin of the ancient continent of north China[J]. *Acta Geologica Gansu*, 9(1): 1 ~ 15 (in Chinese with English abstract).
- Tung K A, Yang H Y, Liu D Y, *et al.* 2007. SHRIMP U-Pb geochronology of the detrital zircons from the Longshoushan Group and its tectonic significance[J]. *Chinese Sci. Bull.*, 52: 1 411 ~ 1 425.
- Wang Tingyin, Gao Junping and Wang Shizheng. 1993. Geological and chemical characteristics of the ophiolitic melange zone in Chaganchulu, north of Alxa[J]. *Acta Geologica Gansu*, 1: 46 ~ 53(in Chinese with English abstract).
- Wang Tingyin, Wang Shizheng and Wang Jinrong. 1994. Formation and Evolution of Paleozoic Crust in Alxa Region[M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 31 ~ 178(in Chinese with English abstract).
- Wang Tingyin, Zhang Mingjie and Wang Jinrong. 1998. The significance of Engerwusu thrust belt and geotectonics[J]. *Geol. Sci.*, 4: 126 ~ 137(in Chinese with English abstract).
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Zheng Yongfei, *et al.* 2007. Lu-Hf isotopic systematic and their applications in petrology[J]. *Acta Petrol. Sin.*, 23(2): 185 ~ 220(in Chinese with English abstract).
- Wu S J, Hu J M, Ren M H, *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]. *J. Asian Earth Sci.*, 94: 226 ~ 239.
- Wu Tairan and He Guoqi. 1993. Division of tectonic units and the basic characteristics of each unit in the northern margin of Alashan, Inner Mongolia block[J]. *Acta Geologica Sinica*, 62(2): 98 ~ 108 (in Chinese with English abstract).
- Xiang Zhenqun. 2014. Mesoproterozoic Magmatic Events and Mineralization in the North China Craton[D]. Beijing: China University of Geosciences, 1 ~ 150(in Chinese with English abstract).
- Xiao Zhibin, Kang Jianli, Wang Huichu, *et al.* 2015. Formation age of Alxa Group-complex (Special) in Alxa area, Inner Mongolia[J]. *Geol. Surv. Res.*, 38(3): 182 ~ 191(in Chinese with English abstract).
- Xiu Qunye, Lu Songnian, Yu Haifeng, *et al.* 2002. The isotopic age evidence for Main Longshoushan Group Contributing to Palaeoproterozoic [J]. *Prog. Precamb. Res.*, 25(2): 93 ~ 96 (in Chinese with English abstract).
- Xiu Qunye, Yu Haifeng, Li Quan, *et al.* 2004. Discussion on the petrogenic time of Longshoushan Group, Gansu Province[J]. *Acta Geol. Sin.*, 78(3): 366 ~ 373(in Chinese with English abstract).
- Xu Xisheng and Deng Ping. 2003. ICP MS U-Pb dating and diagenesis significance of single grain zircon from the Guidong complex in south China[J]. *Chinese Sci. Bull.*, 48(12): 1 328 ~ 1 334(in Chinese with English abstract).
- Yang Zhende, Pan Xingshi and Yang Yifu. 1988. Geological Structure and Characteristics and Deposits of Alxa Blocks and Adjacent Region[M]. Beijing: Science Press, 1 ~ 254(in Chinese with English abstract).
- Ye Ke, Zhang Lei, Wang Tao, *et al.* 2016. Characteristics of geochronology, geochemistry and zircon Hf isotope of Permian intermediate-acid magmatic rocks in Yabulai area, Alxa and its tectonic significance [J]. *Acta Petrol. Mineral.*, 35(6): 901 ~ 928(in Chinese with English abstract).
- Yuan Honglin, Wu Fuyuan, Gao Shan, *et al.* 2003. U-Pb age determination of zircon from Cenozoic intrusions in northeast China and analysis of rare earth elements[J]. *Chinese Sci. Bull.*, 48(14): 1 511 ~ 1 520(in Chinese with English abstract).
- Zhang J J, Wang T, Zhang L, *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]. *J. Asian Earth Sci.*, 108: 150 ~ 169.
- Zhang Jianxin and Gong Jianghua. 2018. Revisiting the nature and affinity of the Alxa Block[J]. *Acta Petrol. Sin.*, 34(4): 940 ~ 962(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 age and Hf isotopic composition[J]. *Precamb. Res.*, 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]. *Sci. China(Earth Sci.)*, 56: 153 ~ 164.
- Zhao G C, Cawood P A, Li S Z, *et al.* 2012. Amalgamation of the North China Craton: Key issues and discussion[J]. *Precamb. Res.*, 222 ~ 223: 55 ~ 76.
- Zheng R G, Li J Y, Xiao W J, *et al.* 2018. A new ophiolitic mélangé

containing boninitic blocks in Alxa region: Implications for Permian subduction events in southern CAOB[J]. *Geosci. Front.*, 9: 1 355 ~1 367.

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]. *Gond. Res.*, 25: 842 ~858.

Zhou Hongying, Mo Xuanxue, Li Junjian, *et al.* 2007. The U-Pb isotopic dating age of single zircon from biotite plagioclase gneiss in the Qinggele area, Alashan, Western Inner Mongolia [J]. *Bull. Mineral., Petrol. Geochem.*, 26 (3): 221 ~223 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

陈志勇, 杨帅师, 孟二根. 2004. 内蒙古阿拉善左旗巴音诺日公地区前寒武系的厘定[J]. *地质通报*, 23(4): 345 ~351.

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.

董申保. 1986. 地质专报(系列三), 第4号, 中国变质作用及其与地壳的演化关系[M]. 北京: 地质出版社.

耿元生, 王新社, 沈其韩, 等. 2002. 阿拉善地区新元古代晋宁期变形花岗岩的发现及其地质意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 21(4): 412 ~420.

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(1): 138 ~145.

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 ~261.

耿元生, 周喜文. 2010. 阿拉善地区新元古代岩浆事件及其地质意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 29(6): 779 ~795.

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(4): 897 ~908.

宫江华, 张建新, 于胜尧. 2011. 阿拉善地块南缘龙首山岩群及相关岩石的起源和归属——来自 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄的制约[J]. *岩石矿物学杂志*, 30(5): 795 ~818.

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): 2 715 ~2 728.

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.

贺振宇, 孙立新, 毛玲娟, 等. 2015. 北山造山带南部片麻岩和花岗

闪长岩的锆石 U-Pb 定年和 Hf 同位素: 中元古代的岩浆作用与地壳生长[J]. *科学通报*, 60(4): 389 ~399.

胡霭琴, 韦刚健, 邓文峰, 等. 2006. 天山东段 1. 4 Ga 花岗闪长质片麻岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. *地球化学*, 35(4): 333 ~345.

霍福臣, 曹景轩, 董燕生. 1987. 贺兰山-阿拉善地区下、中前寒武系的划分对比 及其变质、成矿作用特征[J]. *长春地质学院学报*, 17(1): 35 ~46.

李江海, 牛向龙, 程素华, 等. 2006. 大陆克拉通早期构造演化历史探讨: 以华北为例[J]. *地球科学*, 31(3): 285 ~293.

李俊健. 2006. 内蒙古阿拉善地块区域成矿系统[D]. 北京: 中国地质大学, 1 ~134.

李俊健, 沈保丰, 李惠民, 等. 2004. 内蒙古西部巴彦乌拉山地区花岗闪长岩质片麻岩的单颗粒锆石 U-Pb 法年龄[J]. *地质通报*, 23(12): 1 243 ~1 245.

李倩. 2012. 内蒙古阿拉善右旗阿拉腾敖包一带前寒武纪变质深成岩研究[D]. 北京: 中国地质大学.

李曙光, 林树道, 李彬贤, 等. 1989. 弓长岭太古代条带状硅铁建造中长英质变质岩的原岩恢复及地层学意义[J]. *岩石学报*, 5 (3): 66 ~75.

刘勇. 2008. 甘肃金川古元古代花岗岩的特征及地质意义[D]. 北京: 中国地质大学.

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.

卿芸. 2010. 内蒙古阿拉善右旗塔木素地区变质基底研究[D]. 北京: 中国地质大学.

任继舜, 姜春发, 张正坤. 1980. 中国大地构造及其演化(1:400 万中国大地构造图简要说明书)[M]. 北京: 科学出版社.

沈其韩, 耿元生, 王新社, 等. 2005. 阿拉善地区前寒武纪斜长角闪岩的岩石学、地球化学、形成环境和年代学[J]. *岩石矿物学杂志*, 24(1): 21 ~31.

施文翔, 廖群安, 胡远清, 等. 2010. 东天山地区中天山地块内中元古代花岗岩的特征及地质意义[J]. *地质科技情报*, 29(1): 29 ~37.

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 ~1 007.

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索[J]. *岩石学报*, 32(11): 3 518 ~3 536.

宋伟. 2014. 内蒙古阿拉善北部准敖呼图-筭布尔乌拉变质深成岩研究[D]. 北京: 中国地质大学.

孙立新, 任邦方, 赵凤清, 等. 2013. 内蒙古锡林浩特地块中元古代

- 花岗岩麻岩的锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素特征[J]. 地质通报, 32(2): 327~340.
- 汤中立, 白云来. 1999. 华北古大陆西南边缘构造格架与成矿系统[J]. 地学前缘, 6(2): 271~283.
- 汤中立, 白云来. 2001. 华北板块西南缘大型、超大型矿床的地质构造背景[J]. 甘肃地质学报, 9(1): 1~15.
- 王廷印, 高军平, 王士政. 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, 1: 46~53.
- 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[J]. 兰州: 兰州大学出版社, 31~178.
- 王廷印, 张铭杰, 王金荣. 1998. 恩格尔乌苏冲断带特征及大地构造意义[J]. 地质科学, 4: 126~137.
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 等. 2007. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用[J]. 岩石学报, 23(2): 185~220.
- 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, 62(2): 98~108.
- 相振群. 2014. 华北克拉通中元古代岩浆事件群与成矿作用[D]. 北京: 中国地质大学, 1~150.
- 肖志斌, 康健丽, 王惠初, 等. 2015. 内蒙古阿拉善地区阿拉善群(狭义)的形成时代[J]. 地质调查与研究, 38(3): 182~191.
- 修群业, 陆松年, 于海峰, 等. 2002. 龙首山岩群主体划归古元古代的同位素年龄证据[J]. 前寒武纪研究进展, 25(2): 93~96.
- 修群业, 于海峰, 李 铨, 等. 2004. 龙首山岩群成岩时代探讨[J]. 地质学报, 78(3): 366~373.
- 徐夕生, 邓 平, O'Reilly S Y, 等. 2003. 华南贵东杂岩体单颗粒锆石激光探针 ICP MS U-Pb 定年及其成岩意义[J]. 科学通报, 48(12): 1328~1334.
- 杨振德, 潘行适, 杨易福. 1988. 阿拉善地块及邻区地质构造特征与矿产[M]. 北京: 科学出版社, 1~254.
- 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.
- 袁洪林, 吴福元, 高山, 等. 2003. 东北地区新生代侵入体的锆石激光探针 U-Pb 年龄测定与稀土元素成分分析[J]. 科学通报, 48(14): 1511~1520.
- 张建新, 宫江华. 2018. 阿拉善地块性质和归属再认识[J]. 岩石学报, 34(4): 940~962.
- 周红英, 莫宣学, 李俊健, 等. 2007. 内蒙古阿拉善庆格勒图黑云斜长片麻岩的单颗粒锆石 U-Pb 法年龄[J]. 矿物岩石地球化学通报, 26(3): 221~223.