

阿拉善东部波罗斯坦庙杂岩含石榴子石黑云斜长片麻岩的 $p-t$ 演化及独居石 U-Pb 年龄

马椰婷, 苟龙龙, 周峰, 田智博

(西北大学地质学系, 大陆演化与早期生命全国重点实验室, 陕西 西安 710069)

摘要: 波罗斯坦庙杂岩是阿拉善地块东部高级变质杂岩之一, 对研究阿拉善地块晚古生代构造演化具有重要的地质意义。本研究对阿拉善地块东部波罗斯坦庙杂岩中的长英质片麻岩进行了详细的野外地质调查、岩相学、LA-ICP-MS 独居石 U-Pb 定年和变质相平衡模拟工作, 用于揭示其变质演化特征, 进而阐明其形成的构造背景。长英质片麻岩主要由含石榴子石黑云斜长片麻岩和黑云斜长片麻岩两类岩石组成, 岩相学观察显示 2 个含石榴子石黑云斜长片麻岩样品 ALS2202 和 ALS2204 记录的峰期变质矿物组合为石榴子石+黑云母+白云母+钛铁矿+斜长石+钾长石+石英+熔体, 结合相平衡模拟计算得到 2 个样品的峰期变质温压条件分别为 $777\sim 751^{\circ}\text{C}/820\sim 1\,030\text{ MPa}$ 和 $730\sim 751^{\circ}\text{C}/930\sim 1\,070\text{ MPa}$ 。通过石榴子石-黑云母-斜长石-石英 (GBPQ) 地质温压计计算得到退变质冷却阶段的温压条件为 $629\sim 672^{\circ}\text{C}/410\sim 490\text{ MPa}$ 和 $620\sim 657^{\circ}\text{C}/330\sim 400\text{ MPa}$ 。综合以上变质温压结果, 2 个样品均显示顺时针的 $p-t$ 演化轨迹。LA-ICP-MS 独居石 U-Pb 定年得到含石榴子石黑云斜长片麻岩样品 ALS2207 和黑云斜长片麻岩 ALS2210 样品的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄分别为 $264\pm 2\text{ Ma}$ 和 $255\pm 2\text{ Ma}$, 代表峰期变质作用或深熔作用的年代。根据矿物组合推测波罗斯坦庙杂岩中长英质片麻岩应为副变质岩, 结合该岩石记录的变质温压条件和顺时针轨迹, 表明波罗斯坦庙杂岩在二叠纪中晚期经历了一次显著的地壳加厚过程, 该过程可能与古亚洲洋的闭合有关。

关键词: 波罗斯坦庙杂岩; LA-ICP-MS 独居石 U-Pb 定年; 相平衡模拟; 顺时针 $p-t$ 轨迹; 中亚造山带

中图分类号: P517.3, P518.3+5

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2025)04-0870-25

Metamorphic $p-t$ evolution and tectonic implications of garnet-bearing biotite-plagioclase gneiss from the Boluositanmiao Complex of the eastern Alxa Block

MA Ye-ting, GOU Long-long, ZHOU Feng and TIAN Zhi-bo

(State Key Laboratory of Continental Evolution and Early Life, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China)

Abstract: The Boluositanmiao Complex in the eastern part of the Alxa Block, is one of the high-grade metamorphic complexes, which has important geological significance for the late Paleozoic tectonic evolution of the Alxa Block. In this paper, a combined study of detailed geological investigation, petrography, LA-ICP-MS monazite U-Pb dating and phase equilibrium modeling, were carried out for felsic gneisses of the Boluositanmiao Complex, which is used to reveal their metamorphic evolution and tectonic implications. Felsic gneisses are mainly composed of garnet-bearing biotite-plagioclase gneiss and biotite-plagioclase gneiss. The garnet-bearing biotite-plagioclase gneiss samples ALS2202 and ALS2204 record peak mineral assemblage of garnet+biotite+muscovite+ilmenite+plagioclase+

收稿日期: 2024-11-28; 接受日期: 2025-06-10; 编辑: 尹淑苹; 英文审校: 王丹

基金项目: 国家自然科学基金项目(41772051); 大陆动力学国家重点实验室团队项目(SKLCD04); 大陆动力学国家重点实验室开放基金项目(22LCD16)

作者简介: 马椰婷(1998-), 女, 硕士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: 2568345652@qq.com; 通讯作者: 苟龙龙(1984-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 变质地质学, E-mail: LLgou@nwwu.edu.cn.

K-feldspar+quartz+melt. Combined with phase equilibrium modeling, the peak p - t conditions of two samples were constrained at 727~751°C/820~1 030 MPa and 730~751°C/930~1 070 MPa, respectively. In addition, the garnet-biotite-plagioclase-quartz (GBPQ) geothermobarometry yields relatively low metamorphic p - t conditions of 629~672°C/410~490 MPa and 620~657°C/330~400 MPa, which correspond to the retrograde cooling. Based on the above results, a clockwise p - t evolution was obtained for the garnet-bearing biotite-plagioclase gneiss samples ALS2202 and ALS2204. LA-ICP-MS monazite U-Pb analyses obtained the weighted mean $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages of 268 ± 4 Ma and 255 ± 2 Ma for the garnet-bearing biotite-plagioclase gneiss sample ALS2207 and the biotite-plagioclase gneiss sample ALS2210, respectively, which may represent the timing of peak metamorphism or anatexis. Based on the mineral assemblage, it suggests that the protolith of these felsic gneisses should be sedimentary rocks. Combined with the clockwise p - t path and previously published data in the region, this indicates a significant crustal thickening process in the middle and late Permian, which may be related to the closure of the Paleo-Asian Ocean.

Key words: the Boluositanmiao Complex; LA-ICP-MS monazite U-Pb dating; phase equilibrium modeling; clockwise p - t path; Central Asian Orogenic Belt

Fund support: National Natural Science Foundation of China (41772051); State Key Laboratory of Continental Dynamics, Northwest University (SKLCD04); Open Fund Project of State Key Laboratory of Continental Dynamics (22LCD16)

中亚造山带位于西伯利亚克拉通、塔里木和华北克拉通之间,是通过一些微陆块、陆缘弧、大洋岛弧、增生杂岩、蛇绿混杂岩和古大陆边缘等地质构造单元拼贴形成的巨型增生造山带(Sengör *et al.*, 1993; Jahn, 2004; Winkler *et al.*, 2007; 李锦轶等, 2009; Xiao *et al.*, 2013, 2018; 邹雷等, 2019)。阿拉善地块位于中亚造山带南侧,广泛发育有与中亚造山带增生造山作用有关的古生代岩浆活动,主要集中在晚奥陶世-早泥盆世(460~390 Ma)、石炭纪(360~300 Ma)和二叠纪(299~250 Ma)。晚奥陶世-早泥盆世岩浆活动产物(460~390 Ma)包括460~397 Ma 闪长岩和花岗岩类以及424~421 Ma 辉绿岩(李俊建, 2006; 魏俏巧等, 2013; Duan *et al.*, 2015; Wang *et al.*, 2015, 2016; 郑荣国等, 2016; Liu *et al.*, 2016a; Zhou *et al.*, 2016; Dan *et al.*, 2016),主要分布在龙首山、北大山、诺尔公及狼山地区;石炭纪岩浆活动产物(360~300 Ma)包括328~306 Ma 辉长岩、338~324 Ma 辉长闪长岩、302 Ma 枕状熔岩和360~300 Ma 花岗岩类(Feng *et al.*, 2013; 杨奇荻等, 2014; Zheng *et al.*, 2014; 张伟等, 2014; 徐琳等, 2015; Wang *et al.*, 2015; Dan *et al.*, 2016; Liu *et al.*, 2016b; Xue *et al.*, 2017; 雷聪聪等, 2023),主要出露于龙首山、北大山、巴彦乌拉山、诺尔公、叠布斯格及狼山地区;二叠纪岩浆活动产物(299~230 Ma)包括306~262 Ma 辉长岩(李俊建, 2006; 赵磊等, 2011; 王行军, 2012; Feng *et al.*,

2013; 张磊等, 2013; 史兴俊等, 2014; 徐东卓等, 2014; Shi *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2015, 2016; 肖进等, 2016)、300~250 Ma 花岗岩类(李俊建, 2006; 仵康林, 2011; 冉皞等, 2012; 李杰, 2012; 耿元生等, 2012; 史兴俊, 2012; 张文等, 2013; 史兴俊等, 2014; 杨奇荻等, 2014; 谢奋全, 2014; Dan *et al.*, 2014, 2015; 陈高潮等, 2015; 张建军, 2015; Wang *et al.*, 2015; 叶珂等, 2016)和276~250 Ma 火山岩(包创等, 2012; 张进等, 2013),主要分布在宗乃山-沙拉扎山、雅布赖山和诺尔公-狼山地区。

目前在阿拉善地块与中亚造山带相关的变质作用研究仅有少量报道(Chen *et al.*, 2015; 刘平华等, 2019; 邹雷等, 2019)。Chen 等(2015)对狼山北部宝音图群中的石榴子石角闪岩进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学研究,获得了 399 ± 6 Ma 的变质年龄。刘平华等(2019)对阿拉善地块东部阿拉坦敖包地区德尔和通特组含蓝晶石泥质片岩分别通过 LA-ICP-MS 独居石和锆石 U-Pb 定年获得 419 ± 3 Ma 和 406 ± 7 Ma 的变质年龄。420~400 Ma 的变质作用具有顺时针的变质 p - t 轨迹,被解释为形成于地壳加厚环境(Chen *et al.*, 2015; 刘平华等, 2019)。邹雷等(2019)报道了阿拉善地块东部的波罗斯坦庙杂岩中石英闪长质片麻岩的变质时代为 274 ± 6 Ma 和 272 ± 5 Ma,斜长角闪岩的变质时代为 269 ± 3 Ma 和 268 ± 2 Ma。然而,前人对波罗斯坦庙杂岩变质温压条件的限定和变质演化的研究相对薄弱(邹雷等,

2019),影响了对该期变质作用地质意义的理解。

本文对阿拉善地块东部波罗斯坦庙杂岩中的含石榴子石黑云斜长片麻岩和黑云斜长片麻岩进行了详细的岩相学、矿物化学、LA-ICP-MS 独居石 U-Pb 年代学分析,结合传统地质温压计和变质相平衡模拟,限定了含石榴子石黑云斜长片麻岩的变质温压条件和 $p-t$ 轨迹,进而探讨了阿拉善地块东部二叠纪中晚期变质作用的构造意义。

1 区域地质背景

阿拉善地块位于华北克拉通西部,位于中亚造山带、祁连山造山带和敦煌地块之间(Zhang *et al.*,

2013a; Wang *et al.*, 2016; 张建新等, 2018),是研究古亚洲洋晚古生代构造演化问题的重要区域(张建军, 2015)。前人根据早前寒武变质基底的出露与分布特点,以腾格里沙漠为界,将阿拉善地块划分为东西两个部分(张建新等, 2018; 邹雷等, 2019),本文研究区域位于阿拉善地块东部(图1)。王廷印等(1992)将阿拉善地块东部分为3个构造单元:珠斯楞-杭乌拉构造带、宗乃山-沙拉扎山构造带和诺尔公-红谷尔玉林构造带,分别由恩格尔乌苏蛇绿岩带和查干楚鲁蛇绿岩带隔开,两条蛇绿岩带被解释为具有缝合带特征(Feng *et al.*, 2013)。阿拉善地块具有前寒武纪变质基底、中-新元古代沉积岩系和大量显生宙岩浆岩(张建新等, 2018)。

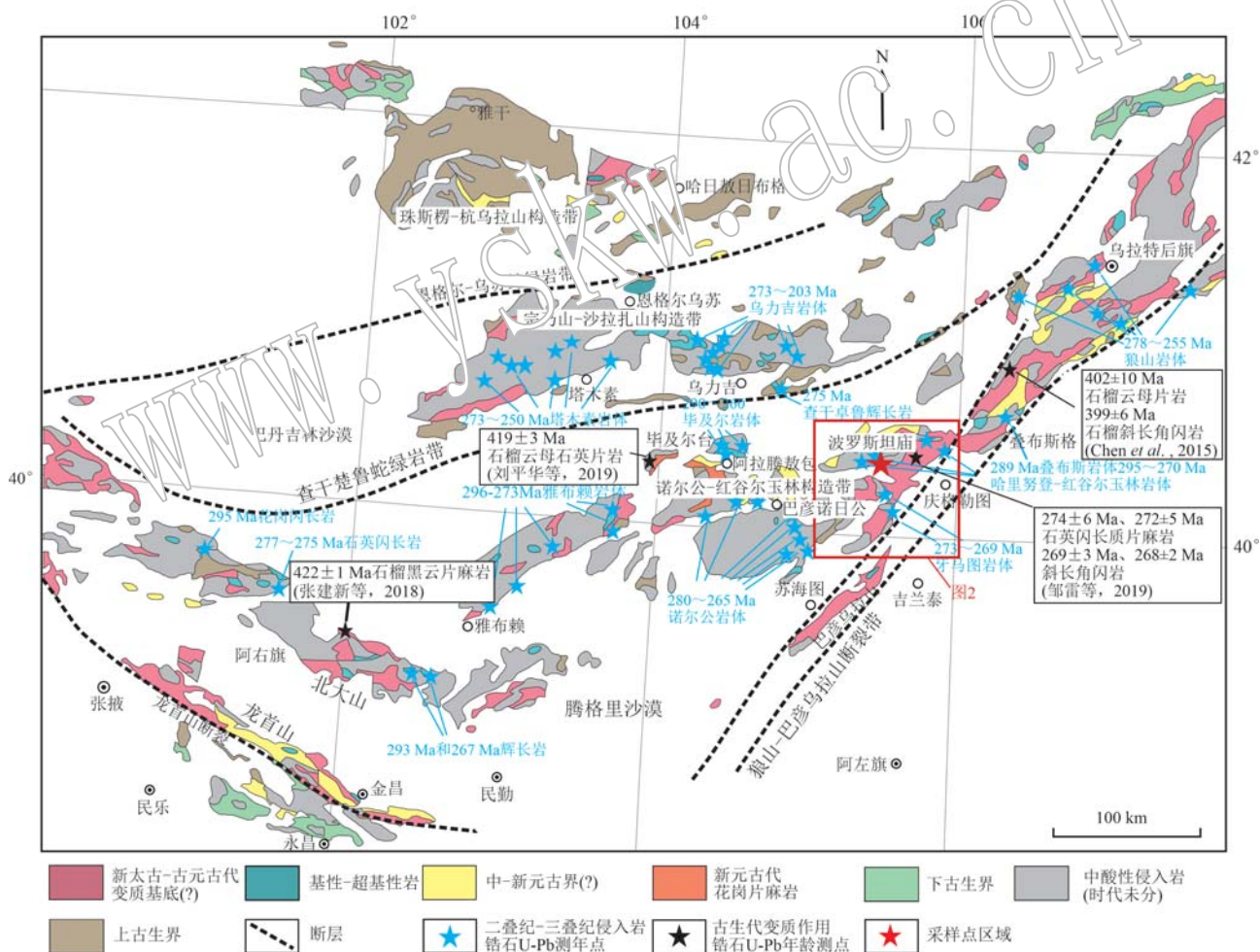


图1 阿拉善地块及邻区构造位置地质简图(据张建新等, 2018; 邹雷等, 2019)

Fig. 1 Simplified geological map of the Alxa Block and its adjacent areas (modified after Zhang Jianxin *et al.*, 2018; Zou Lei *et al.*, 2019)

前寒武变质基底岩石在阿拉善地块的东部和西部均有出露(修群业等, 2004; Li *et al.*, 2004; 沈其韩等, 2005; 耿元生等, 2006, 2007, 2010; 周红英

等, 2007; 刘勇, 2008; 宫江华等, 2011, Dan *et al.*, 2012; 包创等, 2013; Zhang *et al.*, 2013a; Wu *et al.*, 2014; Gong *et al.*, 2016; Zeng *et al.*, 2018;

Liu *et al.*, 2020; Zou *et al.*, 2020, 2021, 2022; Wang *et al.*, 2023; Zhou *et al.*, 2023, 2024), 这些变质基底岩石记录了阿拉善地块经历了 3.7 ~ 3.0 Ga 的陆壳生长、约 2.5 Ga 的 TTG 岩浆-变质事件、2.3 ~ 2.0 Ga 的岩浆事件以及 1.95 ~ 1.90 Ga 和 1.85 ~ 1.80 Ga 两期变质事件(张建新等, 2018)。中-新元古代地层主要分布在阿拉善地块的东部狼山、巴彦诺尔公和西部龙首山地区(宫江华等, 2011; Gong *et al.*, 2016)。

阿拉善地块显生宙以来的岩浆作用分布广泛, 奥陶纪岩浆活动产物包括 458 ~ 443 Ma 花岗岩类岩石(魏俏巧等, 2013; Wang *et al.*, 2015, 2016; Liu *et al.*, 2016a), 出露在龙首山、狼山和北大山地区。志留纪岩浆活动产物(443 ~ 420 Ma) 包括 443 ~ 418 Ma 花岗岩类岩石(Wang *et al.*, 2015, 2016; Dan *et al.*, 2016; 郑荣国等, 2016) 和 423 ~ 420 Ma 辉绿岩(Duan *et al.*, 2015)。早古生代花岗岩类岩石出露在巴彦布拉格、恩格尔乌苏和狼山地区, 被认为与阿拉善地块与华北克拉通的汇聚相关; 辉绿岩出露在狼山地区, 这些岩浆事件被解释为与祁连山向阿拉善地块的俯冲与拆沉相关(Zhang *et al.*, 2017)。泥盆纪岩浆活动产物包括 417 ~ 366 Ma 花岗岩类(李俊建, 2006; Zou *et al.*, 2010; Dan *et al.*, 2016; Liu *et al.*, 2016a), 主要出露在北大山和巴彦乌拉山地区。石炭纪岩浆活动产物(360 ~ 300 Ma) 包括 360 ~ 300 Ma 花岗岩类(杨奇荻等, 2014; 张伟等, 2014; 徐琳等, 2015; Wang *et al.*, 2015; Dan *et al.*, 2016; Liu *et al.*, 2016b; Xue *et al.*, 2017; 雷聪聪等, 2023)、328 ~ 306 Ma 辉长岩(Feng *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2015; Liu *et al.*, 2016a)、338 ~ 324 Ma 辉长闪长岩(Wang *et al.*, 2015) 和 302 Ma 枕状熔岩(Zheng *et al.*, 2014)。晚古生代花岗岩类岩石出露在龙首山、北大山、巴彦乌拉山、诺尔公、叠布斯格及狼山地区, 该期岩浆岩被认为形成于俯冲环境(徐琳等, 2015; Wang *et al.*, 2015; Xue *et al.*, 2017) 或下地壳增厚熔融(Dan *et al.*, 2016); 辉长岩出露在红谷尔玉林和狼山地区, 被认为形成于俯冲环境(Feng *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2015; Liu *et al.*, 2016b); 辉长闪长岩出露在狼山地区, 被解释形成于被俯冲改造的大陆岩石圈地幔(Wang *et al.*, 2015); 枕状熔岩出露于恩格尔乌苏地区, 被认为形成于洋中脊环境(Zheng *et al.*, 2014)。前人根据恩格尔乌苏蛇绿混杂岩和查干楚鲁蛇绿混杂岩, 划分出宗乃山-沙

拉扎山岩浆岩带和雅布赖山-诺尔公-红谷尔玉林-狼山岩浆岩带。宗乃山-沙拉扎山岩浆岩带出露 300 ~ 250 Ma 花岗岩类岩石(仵康林, 2011; 冉皦等, 2012; 张文等, 2013; 史兴俊等, 2014; 杨奇荻等, 2014; 谢奋全, 2014; 陈高潮等, 2015) 和 266 ~ 250 Ma 辉长岩(李俊建, 2006; 王行军, 2012; 徐东卓等, 2014; Shi *et al.*, 2014), 该岩浆岩带被认为是在阿拉善地块北缘裂解出去的陆壳上发育的岩浆弧, 但近年来一些学者认为该带应归属于中亚造山带(史兴俊等, 2014; Shi *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2015); 雅布赖山-诺尔公-红谷尔玉林-狼山岩浆岩带出露 300 ~ 250 Ma 花岗岩类岩石(李俊建, 2006; 仵康林, 2011; 李杰, 2012; 耿元生等, 2012; 史兴俊, 2012; Dan *et al.*, 2014, 2015; 张建军, 2015; Wang *et al.*, 2015; 叶珂等, 2016)、36 ~ 262 Ma 辉长岩(李俊建, 2006; 赵磊等, 2011; 王行军, 2012; Feng *et al.*, 2013; 张磊等, 2013; 史兴俊等, 2014; 徐东卓等, 2014; Shi *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2015, 2016; 肖进等, 2016), 被认为是在早前寒武纪变质基底上发育的陆缘弧, 并且向西延伸到北大山及龙首山(赖新荣等, 2007; 陈炜等, 2013; 张伟等, 2014; 焦建刚等, 2017)。

近年来, 多位学者对阿拉善地块显生宙以来的变质岩做了年代学研究: Zhang 等(2013b) 在阿拉善东部花岗糜棱岩中获得了 ~351 Ma 和 ~250 Ma 年龄, 推测与板块碰撞有关; 张建新等(2018) 在阿拉善西部副片麻岩中获得了 422 ± 1 Ma 变质年龄, 记录了高温变质作用; Chen 等(2015) 在阿拉善北部石榴斜长角闪岩和含蓝晶石十字石石榴云母片岩中获得了 399 ± 6 Ma 和 402 ± 10 Ma 的变质年龄, 解释与地壳增厚有关; 刘平华等(2019) 在阿拉善东部含蓝晶石石榴云母石英片岩中获得了 419 ± 3 Ma 和 406 ± 7 Ma 的变质年龄, 解释为角闪岩相变质时代; 邹雷等(2019) 在阿拉善东部石英闪长质片麻岩中获得了 274 ± 6 Ma 和 272 ± 5 Ma 的变质年龄, 同样解释为角闪岩相变质时代。

2 分析方法

全岩主量元素分析在澳实矿物实验室(广州)通过 X 射线荧光光谱仪(XRF)分析完成, 仪器型号是 PW2424, 实验步骤为: 称取两份试样, 一份试样中加入含硝酸锂的熔融助熔剂, 充分混合后, 高温熔融,

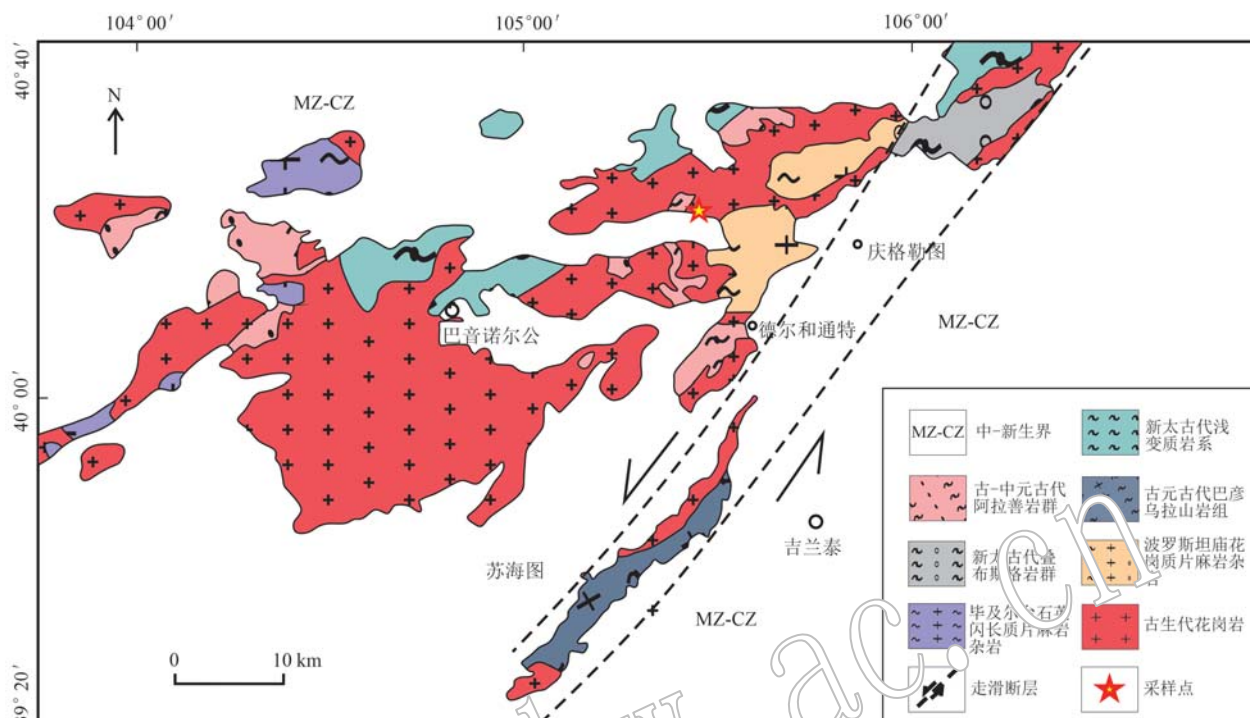


图2 阿拉善地块东部地质简图(据邹雷等, 2019)

Fig. 2 Simplified geological map of the eastern part of the Alxa Block (after Zou Lei *et al.*, 2019)

熔融物倒入铂金模子制作玻璃片后,再用X射线荧光光谱仪分析,其中FeO通过滴定法测定,然后用差值法计算 Fe_2O_3 ;另一份试样进行1000℃灼烧,冷却后称重,样品加热前后的质量差即是烧失量。

矿物化学分析在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成,实验仪器型号为JEOL公司的JXA-8230;实验条件为:加速电压15 kV,电流为10 nA,分析束斑为2 μm,均采用SPI公司提供的不同矿物标样对数据进行校正。

LA-ICP-MS独居石U-Pb年代学分析在中国地质调查局西安地质调查中心完成,实验条件为:16 μm的激光束斑直径、6.0 J/cm²的激光能量密度和6 Hz的激光频率。同位素²⁰⁴Pb、²⁰⁸Pb和²³²Th采用10 ms、²⁰⁶Pb采用100 ms、²³⁸U采用50 ms、²⁰⁷Pb采用200 ms的积分时间;采用独居石标样44069作为外标进行U-Pb同位素分馏效应的校正,而用独居石标样117531与DD90-26A作为监控标样来监测测试过程的稳定性,保证每8个样品点至少插一组标样。运用软件ICPMSDataCal进行离线数据处理(Liu *et al.*, 2008, 2010),使用程序Isoplot/Ex_ver3对独居石同位素数据进行²⁰⁶Pb/²³⁸U-²⁰⁷Pb/²³⁵U谐和图投

图,并计算谐和测点年龄的²⁰⁶Pb/²³⁸U加权平均值。

本文中所用矿物缩写符号均引自Whitney and Evans (2010): 钠长石 Ab, 黑云母 Bt, 堇青石 Crd, 石榴子石 Grt, 钛铁矿 Ilm, 白云母 M, 钾长石 Kfs, 熔体 Liq, 斜方辉石 Opx, 斜长石 Pl, 石英 Qz, 十字石 St, 锆石 Zrn, 金红石 Rt。

3 岩相学及矿物化学

本研究中的长英质片麻岩样品采自阿拉善地块东部的波罗斯坦庙杂岩(图2)。长英质片麻岩中除了有黑云母定向排列外,还发育有透入性的浅色体(图3a),这些浅色体沿着片麻理方向定向排列,表明该套片麻岩经历了较为强烈的深熔作用。此外,在其新鲜面上可观察到石榴子石(图3b),结合室内岩相学观察结果,选取了4个样品进行研究,对其中含石榴子石黑云斜长片麻岩样品ALS2202和ALS2204进行了详细的岩相学、矿物化学以及相平衡模拟研究,而对含石榴子石黑云斜长片麻岩样品ALS2207和黑云斜长片麻岩样品ALS2210进行了年代学分析。

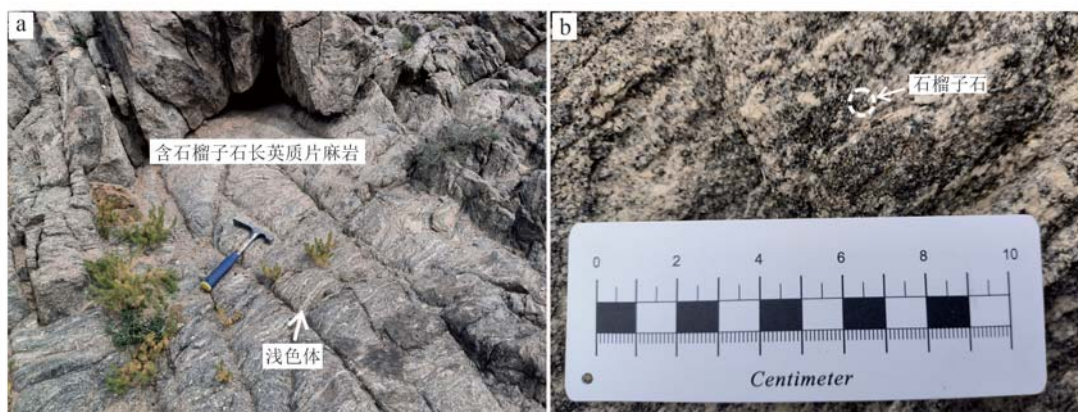


图3 波罗斯坦庙杂岩中长英质片麻岩的野外露头照片

Fig. 3 Field photographs of felsic gneiss in the Boluositanmiao Complex

a—混合岩化的含石榴子石长英质片麻岩,可见透入性浅色体; b—长英质片麻岩中可见石榴子石变晶
a—garnet-bearing felsic gneiss with pervasive leucosome; b—garnet porphyroblast in the felsic gneiss

3.1 样品 ALS2202

样品 ALS2202 为含石榴子石黑云斜长片麻岩,主要组成矿物有石榴子石 (~10%)、黑云母 (~18%)、白云母 (~5%)、斜长石 (~30%)、钾长石 (~5%) 和石英 (~30%) (图 4a、4b),副矿物有钛铁矿、独居石和锆石。石榴子石在单偏光下具有核边结构,核部呈浅红色,而边部为无色(图 4a),核部包裹有锆石、钛铁矿、黑云母和石英矿物包裹体,边部通常与黑云母直接接触(图 4c)。斜长石呈板状与黑云母、白云母、石榴子石和钾长石平衡共生(图 4b、4d),正交偏光下聚片双晶明显(图 4b)。钾长石在基质中与其他矿物共生,有些以客晶形式出溶在斜长石中(图 4b、4d)。黑云母呈细粒鳞片状定向排列,主要以 3 种形式存在:①石榴子石的矿物包裹体(图 4c);②在基质中与石榴子石接触(图 4a、4c);③在基质中与石榴子石、钾长石、白云母和石英等矿物平衡共生(图 4a~4c)。白云母在基质中与钾长石、石英、斜长石和黑云母平衡共生(图 4b),或与黑云母交生在一起(图 4c)。

通过镜下观察,选择该样品中 2 颗典型的石榴子石(Grt-1 和 Grt-2)进行主量成分分析(表 1),石榴子石成分主要为铁铝榴石和锰铝榴石($X_{\text{Alm}} = 0.55 \sim 0.61$, $X_{\text{Sps}} = 0.24 \sim 0.32$),而镁铝榴石和钙铝榴石的含量较低($X_{\text{Py}} = 0.08 \sim 0.12$, $X_{\text{Grs}} = 0.03 \sim 0.04$) (图 5a、表 1)。石榴子石成分剖面分析显示,铁铝榴石和镁铝榴石成分由核部到边部呈现出微弱的下降趋势,而锰铝榴石成分由核到边呈现出上升趋势,钙铝榴石成分基本保持不变(图 5a),具有扩散成分

环带的特征。对不同产状(石榴子石包体、与石榴子石接触和基质的黑云母进行成分分析,与石榴子石接触的黑云母 Fe^{2+} 值(1.21~1.24)与 Mg 值(0.99~1.01)和基质中的黑云母 Fe^{2+} 值(1.22~1.26)与 Mg 值(0.97~1.02)差别不大, Ti 含量均在 0.12~0.15 之间, X_{Mg} 均在 0.44~0.46 之间;石榴子石中黑云母包裹体 Fe^{2+} 值(0.84~0.87)较低和 Mg 值(1.36~1.40)较高, Ti 含量在 0.11~0.13 之间, X_{Mg} 在 0.61~0.62 之间(表 1)。基质中白云母的 Si 含量为 3.08~3.12(表 1)。基质中斜长石成分均一,均为奥长石(图 5c),其 X_{An} 的变化范围为 0.21~0.24(表 1)。基质中钾长石为透长石(图 5c), X_{Or} 含量较高,范围在 0.01~0.03(表 1)。

3.2 样品 ALS2204

样品 ALS2204 为含石榴子石黑云斜长片麻岩,其岩石学特征与样品 ALS2202 相似,主要矿物组成有石榴子石 (~10%)、黑云母 (~20%)、白云母 (~3%)、斜长石 (~30%)、钾长石 (~5%) 和石英 (~28%),副矿物有钛铁矿、独居石和锆石(图 4e、4f)。石榴子石含有钛铁矿、黑云母和石英矿物包裹体(图 4g)。斜长石与黑云母、白云母、石榴子石和钾长石平衡共生(图 4f、4h)。钾长石在基质中与其他矿物共生,有些以客晶形式出溶在斜长石中(图 4f、4h)。黑云母呈鳞片状主要分布于基质中,基质中黑云母除少量与石榴子石直接接触外(图 4e、4g),多数与石榴子石、斜长石、石英、钾长石和白云母共生(图 4e~4g),少量以包体的形式存在于石榴子石中(图 4g)。白云母在基质中与钾长石、石英、

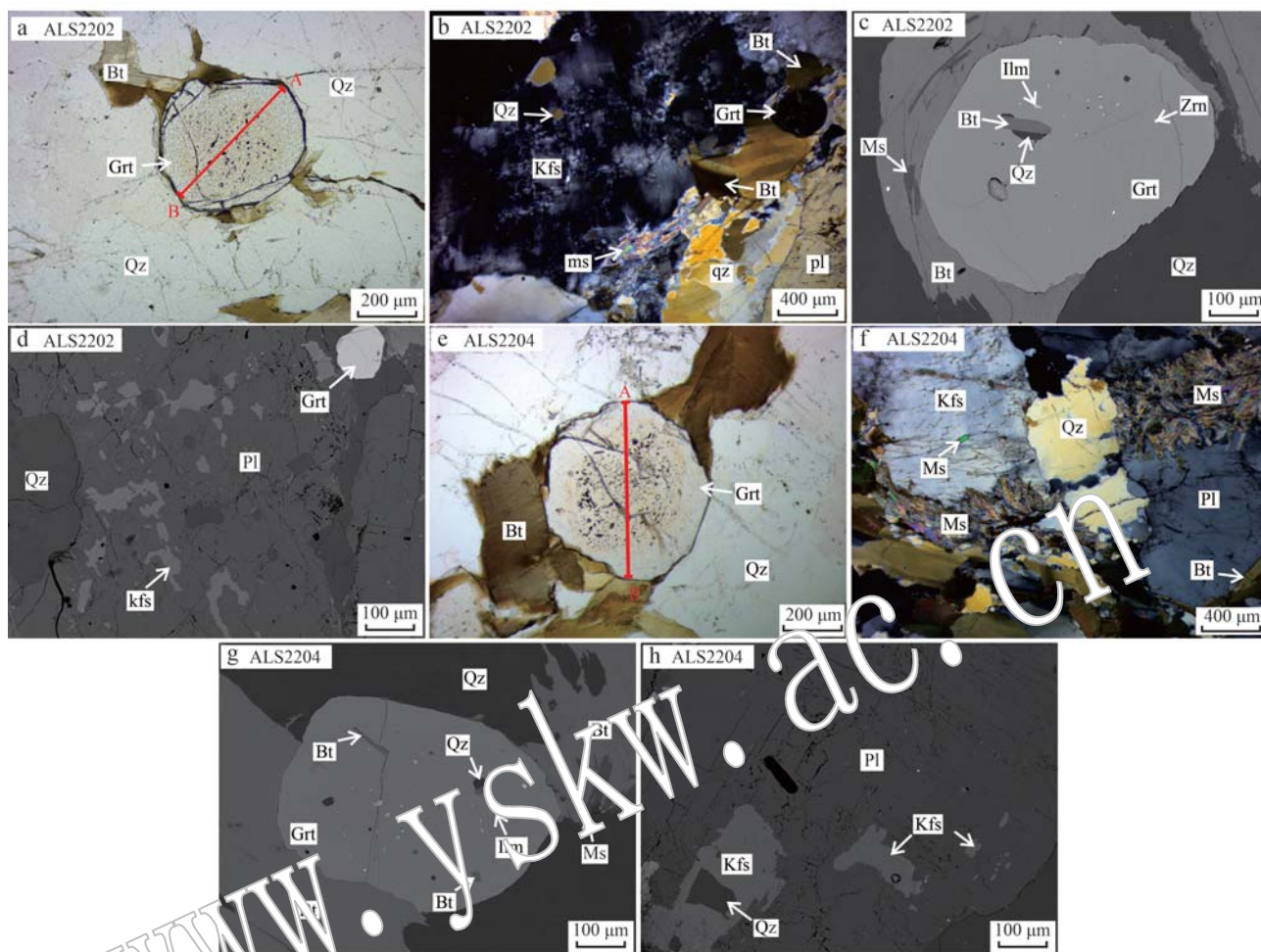


图4 含石榴子石黑云斜长片麻岩样品 ALS2202 和 ALS2204 的显微岩相学照片

Fig. 4 Photomicrographs of garnet-bearing biotite-plagioclase gneiss samples ALS2202 and ALS2204

a、b—样品 ALS2202 中的石榴子石与基质中的黑云母、白云母、斜长石、钾长石和石英；c—样品 ALS2202 石榴子石中的锆石、钛铁矿、黑云母和石英矿物包裹体；d—样品 ALS2202 中钾长石部分包裹在斜长石内部；e、f—样品 ALS2204 中的石榴子石与基质中的黑云母、白云母、钾长石、斜长石和石英；g—样品 ALS2204 石榴子石中的钛铁矿、黑云母和石英矿物包裹体；h—样品 ALS2204 中钾长石部分包裹在斜长石内部

a, b—garnet and matrix minerals of biotite, muscovite, plagioclase, K-feldspar, and quartz the sample ALS2202; c—mineral inclusions of zircon, ilmenite, biotite and quartz within the garnet from the sample ALS2202; d—K-feldspar within the plagioclase of sample ALS2202; e, f—garnet and matrix minerals of biotite, muscovite, K-feldspar, plagioclase, and quartz the sample ALS2204; g—mineral inclusions of ilmenite, biotite and quartz within the garnet from the sample ALS2204; h—K-feldspar within the plagioclase of sample ALS2204

斜长石和黑云母平衡共生(图4f),或与黑云母交生在一起(图4g)。

同样,选择了该样品中2颗典型的石榴子石(Grt-1和Grt-2)进行主量成分分析(表2),石榴子石的成分与样品 ALS2202 相似($X_{\text{Alm}} = 0.48 \sim 0.61$; $X_{\text{Sps}} = 0.24 \sim 0.44$; $X_{\text{Py}} = 0.05 \sim 0.11$; $X_{\text{Grs}} = 0.03 \sim 0.04$)(图5b,表2),也有明显的扩散环带特征。不同产状的黑云母主量成分也不同,与石榴子石接触的黑云母 Fe^{2+} (1.21~1.28) 与 Mg 值(1.01~1.11)

和基质中的黑云母 Fe^{2+} (1.20~1.24) 与 Mg 值(1.01~1.03)差别不大,Ti 含量均为 0.10~0.16 之间, X_{Mg} 均为 0.45~0.47; 石榴子石中黑云母包裹体 Fe^{2+} (0.92~0.95) 较低而 Mg 值(1.31~1.35)较高,Ti 含量在 0.10~0.13 之间, X_{Mg} 在 0.59~0.62 之间(表2)。基质中白云母的 Si 含量为 3.10~3.15。基质中的斜长石为奥长石(图5d),其 X_{An} 为 0.20~0.25(表2)。基质中的钾长石为透长石,其 X_{Or} 为 0.00~0.04。

表 1 含石榴子石黑云斜长片麻岩样品 ALS2202 中代表性石榴子石、黑云母、白云母、斜长石和钾长石的矿物化学成分表 $w_B/\%$
 Table 1 Representative mineral compositions of garnet, biotite, muscovite, plagioclase and K-feldspar in the garnet-bearing biotite-plagioclase gneiss from the sample ALS2202

矿物	Grt-1			Grt-2			Bt			Ms			Pl		Kfs	
产状	核	幔	边	核	幔	边	In-Grt	C-Grt	M	M	M	M	M	M	M	M
SiO ₂	37.14	36.82	37.02	37.27	37.20	36.82	36.79	35.39	35.22	45.89	46.20	63.38	63.40	65.70	65.70	
TiO ₂	0.07	0.03	0.00	0.00	0.00	0.10	2.01	2.45	2.23	0.81	0.59	0.01	0.04	0.09	0.00	
Al ₂ O ₃	20.15	20.34	19.97	19.94	20.16	20.39	20.09	17.26	17.86	34.06	34.20	23.08	22.82	17.90	18.34	
Cr ₂ O ₃	0.00	0.15	0.00	0.40	0.15	0.00	0.12	0.28	0.20	0.10	0.01	0.00	0.00	0.22	0.00	
Fe ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.03	0.04	0.02	
FeO	27.05	27.73	26.96	26.27	26.61	26.72	13.85	18.90	19.38	1.34	1.36	0.00	0.00	0.00	0.00	
MnO	10.79	10.99	11.97	10.97	10.71	12.13	0.41	0.66	0.66	0.04	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	
MgO	2.93	2.89	2.53	3.03	2.93	2.49	12.75	8.48	8.72	0.86	0.93	0.01	0.00	0.00	0.00	
CaO	1.34	1.26	1.10	1.28	1.25	1.08	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	4.86	4.92	0.00	0.01	
Na ₂ O	0.00	0.02	0.00	0.00	0.01	0.00	0.22	0.04	0.07	0.39	0.49	8.62	8.55	0.80	1.22	
K ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	9.52	9.85	9.88	11.04	10.80	0.25	0.26	15.60	15.26	
总量	99.52	100.27	99.56	99.22	99.06	99.74	95.75	93.31	94.22	94.54	94.63	100.24	100.13	100.35	100.55	
O	12	12	12	12	12	12	11	11	11	11	11	8	8	8	8	
Si	3.02	2.97	3.02	3.03	3.03	2.99	2.71	2.77	2.75	3.00	3.10	2.80	2.80	3.02	3.01	
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.11	0.14	0.13	0.04	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	
Al	1.93	1.94	1.92	1.91	1.94	1.95	1.74	1.59	1.63	2.71	2.71	1.20	1.19	0.97	0.99	
Cr	0.00	0.01	0.00	0.03	0.01	0.00	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	
Fe ³⁺	0.03	0.11	0.05	0.00	0.00	0.05	0.00	0.10	0.00	0.00	0.00	—	—	0.00	0.00	
Fe ²⁺	1.81	1.76	1.79	1.79	1.81	1.77	0.85	1.24	1.26	0.08	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	
Mn	0.74	0.75	0.83	0.76	0.74	0.84	0.03	0.04	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Mg	0.35	0.35	0.27	0.37	0.36	0.30	1.40	0.99	1.01	0.09	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	
Ca	0.12	0.11	0.10	0.11	0.11	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.23	0.23	0.00	0.00	
Na	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.01	0.01	0.05	0.06	0.74	0.73	0.07	0.11	
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.89	0.98	0.98	0.95	0.93	0.01	0.02	0.91	0.89	
总和	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	7.77	7.78	7.81	7.01	7.01	4.98	4.98	4.98	5.00	
X_{Alm}	0.6	0.59	0.59	0.59	0.60	0.59										
X_{Sps}	0.25	0.25	0.27	0.25	0.24	0.28										
X_{Py}	0.12	0.12	0.10	0.12	0.12	0.10										
X_{Grs}	0.04	0.04	0.03	0.04	0.04	0.03										
X_{Mg}	0.16	0.17	0.15	0.17	0.16	0.15	0.62	0.44	0.45	0.53	0.55					
X_{An}												0.23	0.24	0.00	0.00	
X_{Ab}												0.75	0.75	0.07	0.11	
X_{Or}												0.01	0.02	0.93	0.89	

注: In-Grt 表示石榴子石内部包裹体, C-Grt 表示与石榴子石接触, M 表示基质中; 石榴子石中: $X_{Alm} = Fe^{2+} / (Fe^{2+} + Mn + Mg + Ca)$, $X_{Sps} = Mn / (Fe^{2+} + Mn + Mg + Ca)$, $X_{Py} = Mg / (Fe^{2+} + Mn + Mg + Ca)$, $X_{Grs} = Ca / (Fe^{2+} + Mn + Mg + Ca)$; $X_{Mg} = Mg / (Fe^{2+} + Mg)$; 长石中: $X_{An} = Ca / (Ca + Na + K)$, $X_{Ab} = Na / (Ca + Na + K)$, $X_{Or} = K / (Ca + Na + K)$ 。

3.3 样品 ALS2207

该样品与样品 ALS2202 和 ALS2204 的岩石学特征也极其相似, 为含石榴子石黑云斜长片麻岩, 它主要由石榴子石 (~10%)、黑云母 (~20%)、白云母 (~3%)、斜长石 (~30%)、钾长石 (~5%) 以及石英 (~27%) 组成 (图 6a、6b), 副矿物有钛铁矿、独居石和锆石。石榴子石中含有锆石、钛铁矿、黑云母和石英矿物包裹体 (图 6c), 斜长石与黑云母、白云母、石

榴子石和钾长石平衡共生 (图 6b、6d)。本研究选择该样品进行 LA-ICP-MS 独居石 U-Pb 年代学分析。

3.4 样品 ALS2210

样品 ALS2210 为黑云斜长片麻岩, 主要矿物为黑云母 (20%)、白云母 (5%)、斜长石 (40%) 以及石英 (30%), 副矿物有钛铁矿、独居石和锆石 (图 6e、6f)。本研究也选择对该样品进行了 LA-ICP-MS 独居石 U-Pb 年代学分析。

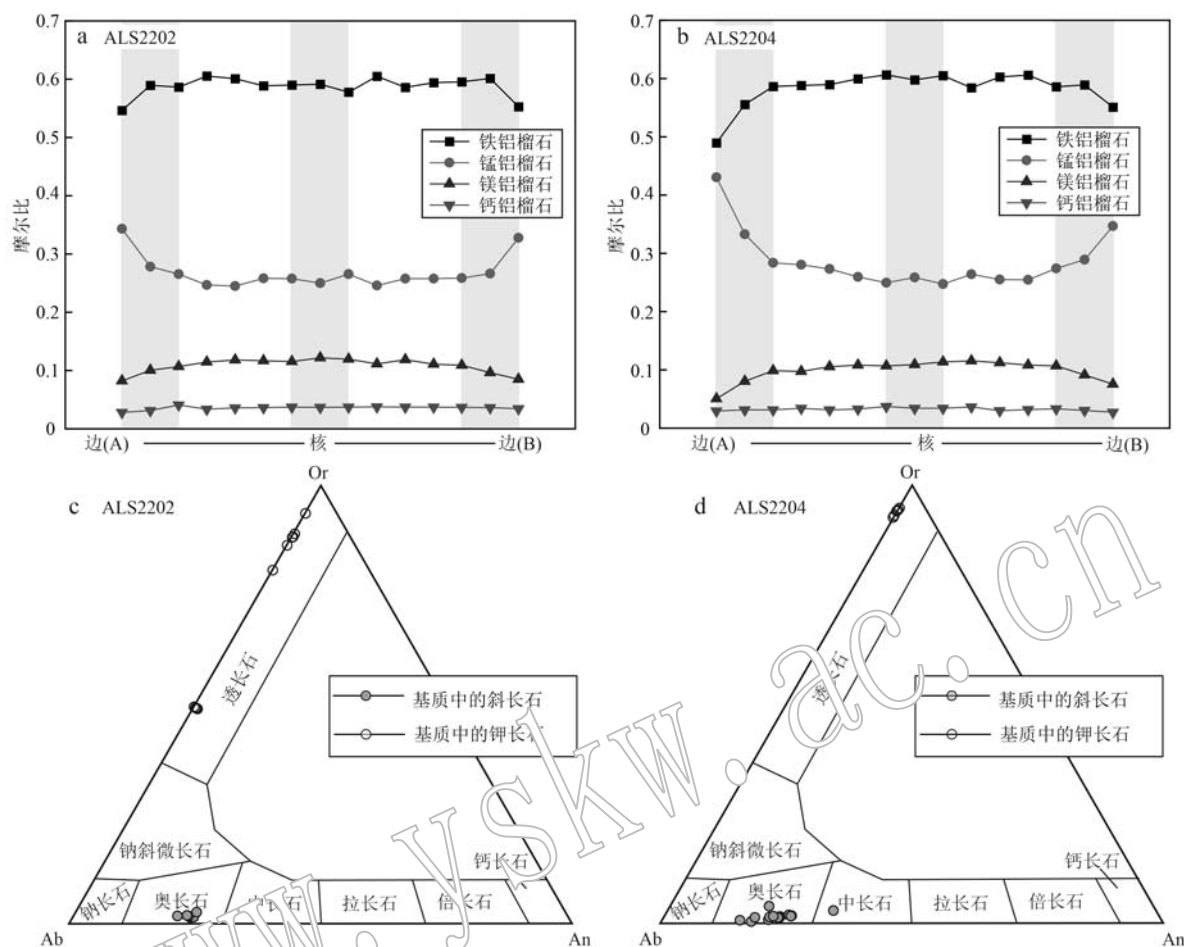


图5 石榴子石成分剖面图和长石分类图解

Fig. 5 Compositional profiles of the garnets and classification diagram for plagioclase and K-feldspar

a、b—含石榴子石黑云斜长片麻岩样品 ALS2202 和 ALS2204 中的石榴子石成分剖面图；c、d—样品 ALS2202 和 ALS2204 中的斜长石和钾长石分类图解

a, b—compositional profiles of the garnets in the garnet-bearing biotite-plagioclase gneiss samples ALS2202 and ALS2204; c, d—classification diagram for plagioclase and K-feldspar of samples ALS2202 and ALS2204

4 LA-ICP-MS 独居石 U-Pb 定年

对含石榴子石黑云斜长片麻岩样品 ALS2207 和黑云斜长片麻岩 ALS2210 进行了独居石 U-Pb 年代学研究。含石榴子石黑云斜长片麻岩 ALS2207 样品中的独居石多呈浑圆状,颗粒较大,长宽比多为 1:1 或 2:1,长为 50~130 μm ,宽为 50~120 μm (图 7a)。对该样品独居石颗粒共进行了 21 个分析点测试,所有测点均在独居石颗粒结构均匀的位置进行(图 7a),其中分析点 18 的同位素比值变化较大且采集信号不平,因此对这些分析点数据结果不用于年龄计算(表 3),其他 20 个分析点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄比较集中,在 286~250 Ma 之间,其加权平均年龄为

268 $\pm$ 4 Ma (图 8a)。20 个独居石的 Th、U 含量变化很大,Th 的含量为 $23\,977\times 10^{-6}\sim 51\,950\times 10^{-6}$,U 含量为 $366\times 10^{-6}\sim 9\,820\times 10^{-6}$,Th/U 值为 3.15~85.67,稀土元素含量总量(ΣREE)为 $484\,138\times 10^{-6}\sim 641\,607\times 10^{-6}$,Y 含量为 $8\,419\times 10^{-6}\sim 25\,278\times 10^{-6}$ (表 4)。球粒陨石标准化稀土元素配分图显示,独居石具有重稀土元素亏损的模式和明显的 Eu 负异常, $\text{Eu}/\text{Eu}^*=0.06\sim 0.57$ (图 8b)。

黑云斜长片麻岩样品 ALS2210 中的独居石呈浑圆状,长宽比多为 1:1,长为 60~130 μm ,宽为 60~130 μm (图 7b)。对该样品独居石颗粒同样进行了 21 个分析点测试(图 7b、表 4),得到的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄比较集中,在 266~239 Ma 之间,其加权平均年龄为 255 $\pm$ 2 Ma (图 8c)。Th 和 U 含量变化也很大,

表 2 含石榴子石黑云斜长片麻岩样品 ALS2204 中代表性石榴子石、黑云母、白云母、斜长石和钾长石的矿物化学成分表 $w_B/\%$

Table 2 Representative mineral compositions of garnet, biotite, muscovite, plagioclase and K-feldspar in the garnet-bearing biotite-plagioclase gneiss sample ALS2204

矿物	Grt-1			Grt-2			Bt			Ms			Pl		Kfs	
产状	核	幔	边	核	幔	边	In-Grt	C-Grt	M	M	M	M	M	M	M	M
SiO ₂	37.64	37.58	36.87	37.03	38.53	37.36	36.76	36.20	35.26	45.79	46.09	63.64	64.84	65.78	64.72	
TiO ₂	0.11	0.00	0.00	0.18	0.07	0.00	1.94	1.75	2.03	0.53	0.63	0.06	0.00	0.02	0.01	
Al ₂ O ₃	20.47	20.73	20.45	19.96	20.62	20.29	18.96	17.28	17.48	33.62	33.61	22.91	22.15	17.78	17.72	
Cr ₂ O ₃	0.11	0.00	0.55	0.52	0.60	0.00	0.00	0.24	0.75	0.00	0.11	0.19	0.00	0.00	1.16	
Fe ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.02	
FeO	27.45	27.34	20.46	26.33	25.58	25.05	14.93	19.39	19.03	1.74	1.80	0.00	0.00	0.00	0.00	
MnO	10.77	10.89	18.79	11.22	11.33	13.39	0.24	0.70	0.57	0.08	0.03	0.00	0.00	0.02	0.00	
MgO	2.81	2.89	1.25	2.72	2.70	2.16	12.11	9.16	8.91	1.04	1.01	0.00	0.00	0.00	0.00	
CaO	1.20	1.11	0.84	1.26	1.21	0.91	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.81	3.71	0.00	0.03	
Na ₂ O	0.00	0.00	0.03	0.00	0.02	0.04	0.27	0.11	0.12	0.33	0.38	8.80	9.39	0.74	0.52	
K ₂ O	0.00	0.00	0.04	0.00	0.28	0.00	9.77	10.06	9.90	11.14	10.87	0.24	0.04	15.68	15.79	
总量	100.56	100.54	99.29	99.22	100.94	99.21	94.99	94.88	94.04	94.27	94.52	100.71	100.14	99.03	99.96	
O	12	12	12	12	12	12	11	11	11	11	11	8	8	8	8	
Si	3.02	3.02	3.02	3.02	3.07	3.05	2.75	2.79	2.74	3.11	3.11	2.80	2.85	3.03	3.00	
Ti	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.11	0.10	0.12	0.03	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	
Al	1.94	1.96	1.98	1.92	1.93	1.95	1.67	1.57	1.60	2.69	2.67	1.19	1.15	0.97	0.97	
Cr	0.01	0.00	0.04	0.03	0.04	0.00	0.00	0.01	0.05	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.04	
Fe ³⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	—	—	0.00	0.00	
Fe ²⁺	1.85	1.84	1.40	1.80	1.70	1.71	0.93	1.25	1.24	0.10	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	
Mn	0.73	0.74	1.30	0.78	0.76	0.83	0.02	0.05	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Mg	0.34	0.35	0.15	0.33	0.32	0.26	1.35	1.05	1.03	0.11	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	
Ca	0.10	0.10	0.08	0.11	0.10	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.23	0.18	0.00	0.00	
Na	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.04	0.02	0.02	0.04	0.05	0.75	0.80	0.07	0.05	
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.93	0.99	0.98	0.96	0.94	0.01	0.00	0.92	0.93	
总和	7.61	8.10	7.98	7.99	7.96	7.98	7.80	7.82	7.82	7.03	7.01	4.99	4.98	4.98	4.99	
X_{Alm}	0.01	0.01	0.48	0.60	0.59	0.57										
X_{Sps}	0.24	0.25	0.44	0.26	0.26	0.31										
X_{Py}	0.11	0.11	0.05	0.11	0.11	0.09										
X_{Grs}	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.03										
X_{Mg}	0.15	0.16	0.10	0.16	0.16	0.13	0.59	0.46	0.45	0.51	0.50					
X_{An}												0.23	0.18	0.00	0.00	
X_{Ab}												0.76	0.82	0.07	0.05	
X_{Or}												0.01	0.00	0.93	0.95	

Th 的含量为 $18\ 361 \times 10^{-6} \sim 61\ 803 \times 10^{-6}$, U 含量为 $1\ 618 \times 10^{-6} \sim 5\ 420 \times 10^{-6}$, Th/U 值为 3.82~16.27, 稀土元素含量总量 (Σ REE) 为 $456\ 055 \times 10^{-6} \sim 564\ 355 \times 10^{-6}$, Y 含量在 $17\ 320 \times 10^{-6} \sim 29\ 999 \times 10^{-6}$ (表 4), 球粒陨石标准化稀土元素配分图显示, 独居石具有重稀土元素亏损的模式和明显的 Eu 负异常, $Eu/Eu^* = 0.03 \sim 0.06$ (图 8d)。

5 变质温压条件计算

本文采用热力学软件 Geo PS (ver. 3.5.4, Xiang and Connolly, 2022) 和热力学数据库 ds62

(Holland and Powell, 1998, 2011) 对含石榴子石黑云斜长片麻岩样品 ALS2202 和 ALS2204 进行了变质相平衡模拟。样品的全岩主量成分见表 5。由于两个样品的全岩成分相似, 且成分中的 MnO 含量较高, 因此, 此次相平衡模拟均选取 MnO-Na₂O-CaO-K₂O-FeO-MgO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O-TiO₂-FeO (MnNCK-FMASHTO) 的成分体系 (White *et al.*, 2014)。选用的矿物活度模型有: 石榴子石、斜方辉石、黑云母、白云母、堇青石、绿泥石、十字石、钛铁矿和熔体 (White *et al.*, 2014)、尖晶石 (White *et al.*, 2002)、斜长石和钾长石 (Holland and Powell, 2003), 石英作为纯的固溶体端员处理。在本研究中, 通过

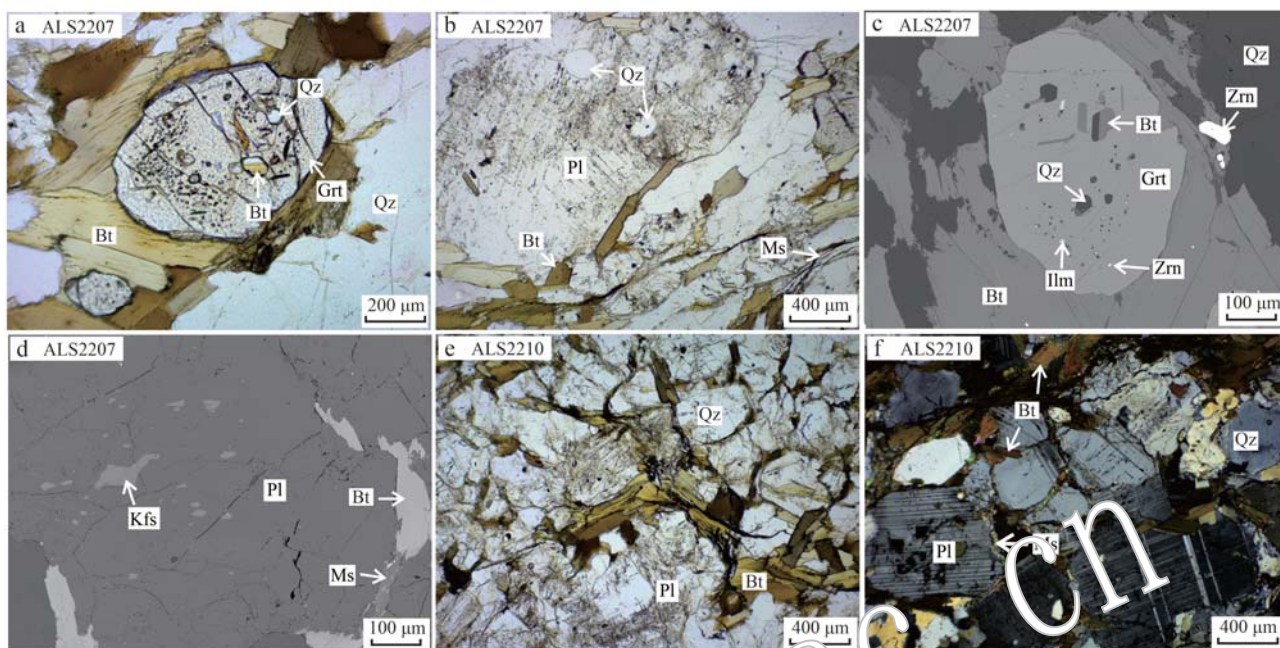


图6 含石榴子石黑云斜长片麻岩样品 ALS2207 与黑云斜长片麻岩样品 ALS2210 的显微岩相学照片

Fig. 6 Microphotographs of garnet-bearing biotite-plagioclase gneiss of the sample ALS2207 and biotite-plagioclase gneiss of the sample ALS2210

a, b—样品 ALS2207 中的石榴子石与基质中的黑云母、白云母、斜长石和石英; c—样品 ALS2207 中石榴子石的锆石、钛铁矿、黑云母和石英矿物包裹体; d—样品 ALS2207 中钾长石部分包裹在斜长石内部; e, f—样品 ALS2210 基质中的黑云母、白云母、斜长石和石英
a, b—garnet and matrix minerals of biotite, muscovite, plagioclase, and quartz in the sample ALS2207; c—mineral inclusions of zircon, ilmenite, biotite, and quartz within garnet of the sample ALS2207; d—K-feldspar partially enclosed within plagioclase in the sample ALS2207; e, f—biotite, muscovite, plagioclase, and quartz in the matrix of the sample ALS2210

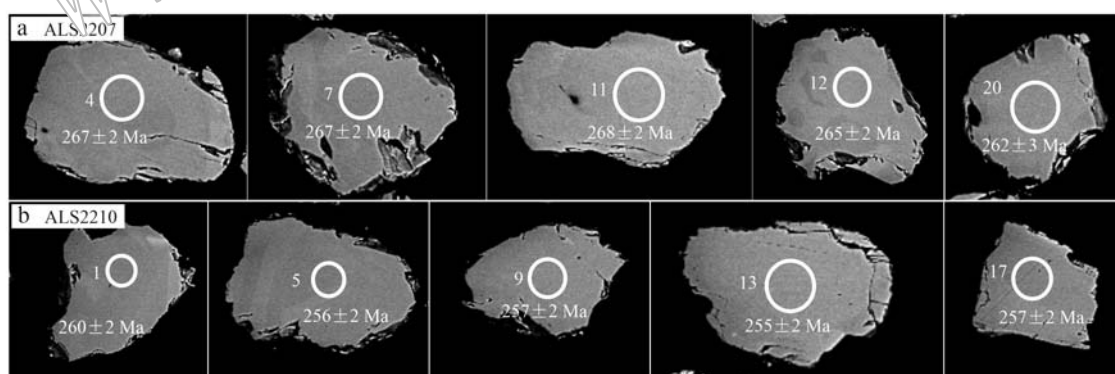


图7 样品 ALS2207 和 ALS2210 中典型独居石颗粒背散射电子图像、测试点位以及对应的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄 (圆圈为激光分析点, 直径为 $16\text{ }\mu\text{m}$)

Fig. 7 Backscattered electron (BSE) images, analytical spots and corresponding $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ apparent ages of representative monazites in the garnet-bearing biotite-plagioclase gneiss of the sample ALS2207 and biotite-plagioclase gneiss of the sample ALS2210 (circles represent laser analytical spots with a diameter of $16\text{ }\mu\text{m}$)

计算 $t-X_{\text{H}_2\text{O}}$ 视剖面图来限定合适的 H_2O 含量, H_2O 含量作为横坐标, 变化范围为 $0\sim 5.0\%$ (摩尔分数), 温度作为纵坐标, 范围为 $550\sim 900^\circ\text{C}$, H_2O 含量的选

取原则是使峰期矿物组合稳定在固相线之上 (White *et al.*, 2002)。本文选取基质中白云母中 Si 成分等值线和基质中黑云母中 Ti 成分等值线对应区域的

表 3 样品 ALS2207 和 ALS2210 的独居石 U-Pb 同位素数据及年龄
Table 3 LA-ICP-MS monazite U-Pb isotopic data and ages for samples ALS2207 and ALS2210

测点	Th	U	Th/U	同位素比值				年龄/Ma				谐和度/%				
				$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ							
样品 ALS2207																
1	45 008	2 465	18.26	0.053 7	0.001 3	0.331 2	0.008 6	0.044 8	0.000 3	367	57	291	6	282	2	97
2	31 329	366	85.67	0.054 9	0.003 0	0.336 8	0.008 6	0.044 6	0.000 6	409	124	295	14	281	4	95
3	26 686	3 802	7.02	0.052 2	0.001 1	0.317 6	0.006 6	0.044 2	0.000 4	295	44	280	5	279	3	99
4	38 296	5 107	7.50	0.053 2	0.001 0	0.310 3	0.005 9	0.042 2	0.000 3	345	47	274	5	267	2	97
5	47 349	9 820	4.82	0.053 8	0.000 8	0.318 1	0.004 4	0.042 8	0.000 3	361	35	280	4	270	2	96
6	42 813	4 103	10.44	0.052 1	0.000 9	0.316 1	0.005 6	0.043 9	0.000 4	300	41	279	4	277	2	99
7	38 225	1 970	19.41	0.054 4	0.001 3	0.317 2	0.007 7	0.042 2	0.000 4	387	54	280	6	267	2	95
8	44 881	5 619	7.99	0.052 4	0.001 2	0.328 2	0.007 5	0.045 4	0.000 5	302	52	288	6	286	3	99
9	38 044	4 899	7.77	0.053 4	0.001 0	0.314 5	0.006 2	0.042 7	0.000 4	346	43	278	5	270	2	97
10	23 977	2 670	8.98	0.053 1	0.001 2	0.312 6	0.008 3	0.042 5	0.000 7	332	55	276	6	269	4	97
11	51 950	8 526	6.09	0.051 0	0.000 9	0.297 9	0.005 3	0.042 4	0.000 4	239	41	265	4	268	2	98
12	46 772	3 933	11.89	0.052 3	0.001 0	0.303 0	0.005 8	0.042 0	0.000 4	298	41	269	5	265	2	98
13	37 146	9 699	3.83	0.052 5	0.001 0	0.303 8	0.006 1	0.042 0	0.000 3	306	44	269	5	265	2	98
14	30 006	9 539	3.15	0.052 7	0.000 8	0.312 8	0.005 2	0.043 0	0.000 4	322	35	276	4	272	2	98
15	36 714	5 841	6.29	0.052 5	0.001 1	0.292 2	0.006 2	0.040 6	0.000 4	309	53	260	5	255	2	97
16	40 080	3 708	10.81	0.052 3	0.001 2	0.296 9	0.007 0	0.041 1	0.000 4	302	49	264	5	260	2	98
17	40 773	3 614	11.28	0.051 6	0.001 6	0.292 1	0.010 6	0.040 1	0.000 4	333	72	260	8	258	3	99
18	44 714	5 021	8.91	0.079 6	0.005 7	0.590 8	0.064 0	0.047 6	0.001 7	1 187	143	471	41	299	11	55
19	48 056	1 223	39.30	0.054 3	0.002 5	0.326 8	0.017 3	0.043 4	0.000 7	383	104	287	13	274	4	95
20	43 192	2 431	17.77	0.051 0	0.001 1	0.292 0	0.006 9	0.041 4	0.000 5	239	55	260	5	262	3	99
21	39 238	2 126	18.46	0.053 6	0.001 5	0.293 0	0.008 0	0.039 6	0.000 4	354	58	261	6	250	2	95
样品 ALS2210																
1	39 499	4 032	9.80	0.049 2	0.000 9	0.279 6	0.005 3	0.041 1	0.000 4	167	44	250	4	260	2	96
2	41 488	3 836	10.82	0.049 8	0.001 0	0.289 6	0.005 2	0.042 2	0.000 4	187	46	258	4	266	3	96
3	18 361	4 806	3.82	0.050 2	0.000 9	0.286 0	0.005 0	0.041 2	0.000 4	106	45	255	4	260	3	98
4	48 059	4 084	11.77	0.051 6	0.001 0	0.297 4	0.006 2	0.041 8	0.000 4	333	51	264	5	264	3	99
5	26 204	2 251	11.64	0.051 0	0.001 2	0.285 5	0.006 7	0.040 6	0.000 4	330	56	255	5	256	2	99
6	33 674	2 467	13.65	0.049 3	0.001 4	0.272 5	0.007 8	0.040 0	0.000 4	165	65	245	6	253	2	96
7	45 332	3 250	13.95	0.051 5	0.001 3	0.285 3	0.007 2	0.040 2	0.000 3	261	55	255	6	254	2	99
8	30 281	2 558	11.84	0.048 7	0.001 1	0.274 8	0.006 3	0.040 9	0.000 4	200	56	246	5	258	2	95
9	47 742	2 465	19.37	0.048 8	0.001 2	0.272 5	0.006 8	0.040 6	0.000 4	200	59	245	5	257	3	95
10	45 743	4 378	10.45	0.049 9	0.000 9	0.276 7	0.005 8	0.040 2	0.000 4	191	43	248	5	254	2	97
11	28 192	2 873	9.81	0.050 0	0.001 3	0.275 8	0.007 2	0.040 1	0.000 4	195	27	247	6	253	2	97
12	42 068	3 065	13.73	0.050 1	0.001 1	0.273 3	0.006 7	0.039 6	0.000 4	165	44	245	5	250	2	98
13	50 699	5 420	9.35	0.051 4	0.001 1	0.285 4	0.006 7	0.040 3	0.000 4	217	48	255	5	255	2	99
14	37 846	3 313	11.42	0.050 8	0.001 3	0.279 4	0.007 4	0.039 8	0.000 3	232	54	250	6	252	2	99
15	58 828	2 670	22.03	0.051 1	0.001 5	0.291 1	0.009 3	0.041 2	0.000 4	256	73	259	7	260	2	99
16	61 803	4 821	12.82	0.050 8	0.001 2	0.277 8	0.006 6	0.039 7	0.000 3	232	54	249	5	251	2	99
17	33 414	3 498	9.55	0.052 4	0.001 2	0.294 0	0.006 4	0.040 7	0.000 3	302	52	262	5	257	2	98
18	34 168	3 690	9.26	0.050 7	0.001 0	0.284 9	0.005 7	0.040 7	0.000 4	233	42	255	5	257	3	98
19	47 400	4 864	9.75	0.051 1	0.001 0	0.282 7	0.005 5	0.040 1	0.000 3	243	38	253	4	253	2	99
20	26 334	1 618	16.27	0.051 9	0.002 3	0.279 5	0.013 2	0.039 2	0.000 6	280	100	250	11	248	4	99
21	28 864	1 968	14.67	0.049 7	0.001 8	0.257 6	0.010 3	0.037 8	0.000 6	189	81	233	8	239	4	97

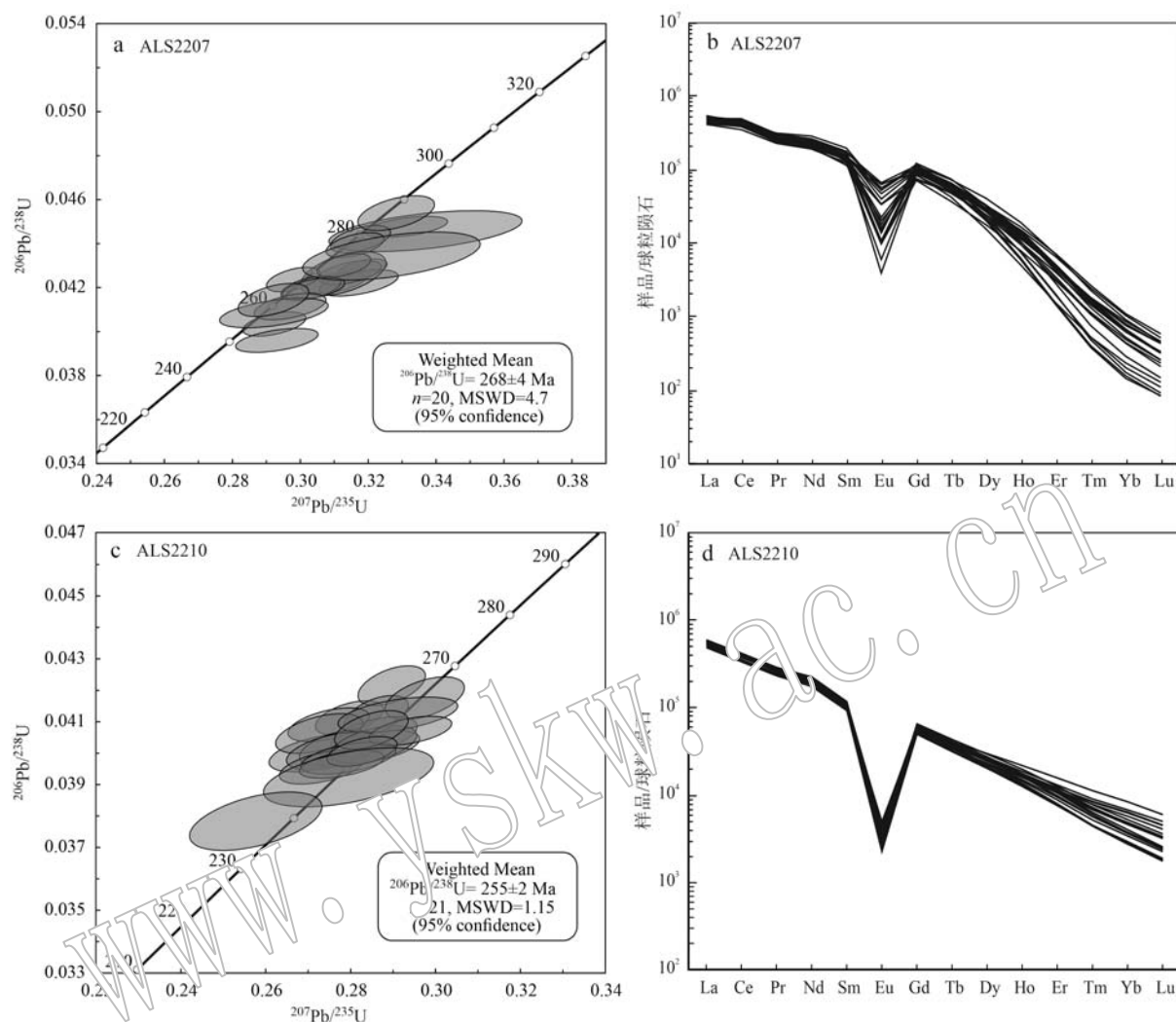


图8 片麻岩样品的 LA-ICP-MS 独居石 U-Pb 定年谐和图

Fig. 8 Concordia diagrams of LA-ICP-MS monazite U-Pb dating in the gneiss samples

a—含石榴子石黑云斜长片麻岩样品 ALS2207; b—样品 ALS2207 独居石球粒陨石标准化稀土元素配分图; c—黑云斜长片麻岩样品

ALS2210; d—样品 ALS2210 独居石球粒陨石标准化稀土元素配分图, 标准化值引自 Sun and McDonough (1989)

a—garnet-bearing biotite-plagioclase gneiss sample ALS2207; b—the chondrite-normalized REE patterns for monazite from sample ALS2207; c—biotite-plagioclase gneiss sample ALS2210; d—the chondrite-normalized REE patterns for monazite from sample ALS2210; normalization values from Sun and McDonough (1989)

中间位置为合适的 H_2O 含量,进而用限定的 H_2O 含量计算研究样品的 p - t 视剖面图。

5.1 样品 ALS2202 峰期和退变质温压条件

根据岩相学观察确定含石榴子石黑云斜长片麻岩样品 ALS2202 峰期矿物组合为: 石榴子石+黑云母+白云母+钛铁矿+斜长石+钾长石+石英+熔体 ($Grt+Bt+Ms+Ilm+Pl+Kfs+Qz+Liq$)。 t - X_{H_2O} 视剖面图模拟计算选择的压力为 900 MPa, 温度为 550 ~ 950°C, X_{H_2O} 为 0.26~0.58, 根据计算的基质中白云母中 Si 成分等值线 (3.08~3.12) 和基质中黑云母中

Ti 成分等值线 (0.12~0.15) 取 $X_{H_2O} = 0.48$ (2.4%, 摩尔分数) 为合适的 H_2O 含量计算 p - t 视剖面图 (图 9a)。 p - t 视剖面图模拟的温度和压力范围分别为 550~950°C 和 200~1 400 MPa, 固相线的温度范围为 687~749°C, 该样品的峰期矿物组合 $Grt+Bt+Ms+Ilm+Pl+Kfs+Qz+Liq$ 对应的温度和压力范围为 711~781°C 和 550~1 290 MPa, 利用基质中白云母中 Si 成分等值线 (3.08~3.12) 和基质中黑云母中 Ti 成分等值线 (0.12~0.15) 共同将峰期矿物组合的变质温压范围限定为 727~751°C 和 820~1 030 MPa 之间 (图 9b)。

表 4 样品 ALS2207 和 ALS2210 中独居石的微量元素组成
Table 4 LA-ICP-MS trace element compositions of monazite from samples ALS2207 and ALS2210

测点	Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Σ REE	Eu/Eu^*
$w_N/10^{-6}$																	
样品 ALS2207																	
1	14 248	106 644	248 053	23 835	94 218	18 256	1 204	1 849	1 831	6 218	549	541	28	75	5	517 306	0.22
2	19 203	118 977	271 302	26 163	107 857	23 754	3 722	20 916	2 324	8 567	853	851	41	115	8	585 451	0.51
3	17 807	115 352	255 472	24 097	95 368	21 501	3 784	19 064	2 217	7 804	737	760	39	108	8	546 412	0.57
4	21 196	109 321	252 705	24 762	100 650	21 735	1 328	10 572	2 357	8 446	816	858	44	117	8	542 920	0.20
5	13 910	111 876	253 255	26 596	111 367	24 955	2 354	10 176	1 944	6 085	589	672	38	107	9	560 022	0.32
6	14 696	109 528	262 218	25 510	104 355	21 939	953	19 486	1 163	6 954	601	582	28	76	6	554 399	0.14
7	17 605	131 211	266 898	25 346	106 623	23 735	3 116	22 000	2 514	8 589	758	710	34	90	7	592 318	0.41
8	14 932	120 205	266 920	27 110	109 513	22 467	2 009	17 500	1 865	6 338	654	797	47	148	12	575 645	0.31
9	20 853	131 166	277 197	26 067	97 346	17 930	1 989	15 192	1 895	7 694	873	1 101	63	179	13	578 705	0.37
10	24 361	124 247	284 270	27 512	112 864	26 620	3 932	23 715	2 781	10 608	1 098	1 178	59	157	12	619 051	0.48
11	14 715	117 509	270 659	30 575	136 847	30 889	3 107	24 653	2 293	6 915	683	807	46	137	11	625 129	0.34
12	8 419	122 935	290 377	28 343	115 254	23 800	890	20 106	2 007	5 250	341	245	10	25	2	609 585	0.12
13	15 727	123 943	282 471	29 745	125 992	27 871	3 341	22 526	2 577	7 328	720	827	45	131	11	627 224	0.41
14	17 245	127 530	295 487	27 692	109 985	23 362	2 801	20 809	2 466	8 337	782	807	41	108	8	620 216	0.39
15	14 810	119 196	284 513	28 277	118 852	26 647	813	25 619	2 856	8 414	607	473	20	50	4	616 339	0.10
16	10 282	120 955	307 813	29 949	124 032	26 204	1 065	22 301	2 148	6 229	431	329	14	35	3	641 607	0.13
17	8 618	124 514	294 221	28 873	116 962	24 563	638	21 215	2 155	5 522	359	253	10	27	2	619 301	0.09
18	6 784	108 731	259 839	25 490	104 726	22 090	232	17 859	1 628	4 056	290	258	14	41	3	545 255	0.04
19	10 200	121 951	275 062	27 548	109 755	20 341	576	15 027	1 419	4 606	451	515	29	84	7	577 373	0.10
20	9 130	103 314	240 424	23 318	95 834	21 565	588	19 019	1 983	5 700	440	338	12	30	2	512 568	0.09
21	25 278	100 300	218 898	22 199	91 509	19 470	355	18 372	2 155	6 454	956	1 199	69	189	15	484 138	0.06
样品 ALS2210																	
1	21 747	122 683	214 519	22 825	85 391	14 206	131	10 342	1 234	5 776	886	1 733	171	772	80	480 749	0.03
2	19 031	113 731	203 836	22 262	85 214	14 789	140	10 993	1 255	5 000	799	1 428	130	569	56	460 733	0.03
3	17 320	118 234	202 606	21 774	80 472	13 999	129	10 041	1 155	5 060	714	1 255	111	461	44	456 055	0.03
4	20 400	118 904	213 524	23 304	87 368	14 970	154	10 863	1 261	5 699	836	1 534	142	628	62	479 250	0.04
5	16 792	134 087	232 847	24 650	90 140	15 187	143	10 550	1 178	5 075	701	1 232	113	490	47	516 439	0.03
6	17 734	133 386	240 449	26 390	100 181	17 073	223	11 890	1 313	5 585	759	1 290	113	473	44	539 172	0.05
7	23 259	126 503	227 092	24 551	91 826	15 762	200	10 892	1 324	6 145	900	1 961	212	1 068	114	508 605	0.05
8	20 842	134 155	241 164	25 703	94 638	16 538	177	12 099	1 438	6 382	900	1 596	143	616	60	535 609	0.04
9	22 391	134 301	237 715	25 336	93 781	15 949	204	11 243	1 332	6 101	923	1 847	196	958	102	529 988	0.05
10	21 453	133 594	241 276	25 910	96 064	16 801	215	11 725	1 379	6 183	906	1 719	170	790	80	536 812	0.05
11	23 577	139 758	249 229	26 553	96 909	16 141	166	11 331	1 334	6 202	934	1 878	181	793	80	551 526	0.04
12	25 218	138 769	251 539	27 075	101 600	17 292	223	12 185	1 450	6 744	1 038	2 120	226	1 134	125	561 520	0.05
13	26 623	128 349	238 070	25 983	98 529	17 577	182	13 237	1 594	7 334	1 103	2 046	194	877	90	535 164	0.04
14	22 813	133 729	243 536	25 948	98 412	17 398	253	12 660	1 518	6 827	982	1 793	159	671	64	543 908	0.05
15	22 800	131 310	228 831	24 364	90 036	15 407	240	11 117	1 330	6 166	932	1 791	176	801	82	512 582	0.06
16	29 999	138 175	235 608	24 675	90 736	15 429	282	11 437	1 486	7 439	1 211	2 003	282	1402	150	530 874	0.06
17	21 872	138 434	253 244	27 018	103 861	17 713	179	12 881	1 428	6 299	907	1 585	142	606	59	564 355	0.04
18	22 742	129 591	237 360	25 905	98 386	17 043	267	12 364	1 466	6 650	971	1 593	175	812	83	532 866	0.06
19	23 309	137 203	238 865	25 090	92 750	15 881	132	11 424	1 368	6 373	981	1 961	208	1043	112	533 391	0.03
20	23 002	136 640	241 818	25 887	97 979	16 869	164	12 374	1 425	6 433	957	1 719	151	627	61	543 103	0.03
21	18 120	131 017	236 388	25 919	98 710	16 486	150	11 477	1 240	5 271	736	1 264	111	460	45	529 273	0.03

注: $Eu/Eu^* = Eu_N / [(Sm)_N \times (Gd)_N]^{1/2}$ 。

表 5 含石榴子石黑云斜长片麻岩样品 ALS2202 和 ALS2204 用于变质相平衡模拟的全岩成分
Table 5 Bulk-rock compositions of garnet-bearing biotite-plagioclase gneiss samples ALS2202 and ALS2204 used for phase equilibrium modeling

样品号	全岩主量各组分含量 ($w_B/\%$)												
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI	Total
ALS2202	74.06	0.54	10.54	0.00	4.40	0.51	2.24	1.05	1.89	2.60	0.03	0.91	98.77
ALS2204	75.24	0.47	10.37	0.00	4.17	0.59	1.92	1.17	2.23	2.06	0.04	0.69	98.95

样品号	相平衡模拟中的各组分含量 ($x_B/\%$)												
		H ₂ O	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	FeO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	MnO	O*	
ALS2202	$t-X_{H_2O}$	$X=0$	79.07	6.63	1.20	3.57	4.59	1.77	1.96	0.43	0.46	0.33	图 9a
		$X=5$	75.11	6.30	1.14	3.39	4.36	1.68	1.86	0.41	0.44	0.31	
	$p-t$		2.40	77.17	6.47	1.17	3.48	4.48	1.73	1.91	0.42	0.45	图 9b
ALS2204	$t-X_{H_2O}$	$X=0$	80.06	6.50	1.33	3.05	4.20	1.40	2.30	0.38	0.53	0.25	图 10a
		$X=5$	76.06	6.18	1.27	2.89	3.99	1.33	2.19	0.36	0.51	0.23	
	$p-t$		1.75	78.66	6.39	1.31	2.99	4.13	1.37	2.26	0.37	0.52	图 10b

此外,采用石榴子石-黑云母-斜长石-石英 (GBPQ) 传统地质温压计 (Holdaway, 2000; Wu *et al.*, 2004) 进行了变质温压条件限定。该样品中的石榴子石有明显扩散环带特征,与退变质过程中 Fe-Mg 扩散有关。尽管斜长石 Ca 成分不易受到退变质扩散的影响,本文选择其边部成分结合石榴子石边部以及石榴子石接触的黑云母进行传统温压计计算。利用该样品中石榴子石边部、与石榴子石接触的黑云母和基质中斜长石的边部成分计算得到的 3 组变质温压条件分别为 629℃ 和 410 MPa、654℃ 和 430 MPa、672℃ 和 490 MPa (图 9b),该结果反映了退变质冷却阶段的温压条件。最后,结合变质相平衡和地质温压计两种方法限定的变质温压条件,可以确定该样品经历了顺时针的 $p-t$ 演化轨迹 (图 9b)。

5.2 样品 ALS2204 峰期和退变质温压条件

含石榴子石黑云斜长片麻岩样品 ALS2204 的峰期矿物组合为石榴子石+黑云母+白云母+钛铁矿+斜长石+钾长石+石英+熔体 (Grt+Bt+Ms+Ilm+Pl+Kfs+Qz+Liq)。 $t-X_{H_2O}$ 视剖面图模拟选择温度范围为 550~950℃,压力为 1 000 MPa 计算,峰期矿物组合 (Grt+Bt+Ms+Ilm+Pl+Kfs+Qz+Liq) 恰好在固相线之上时, X_{H_2O} 为 0.24~0.43。进一步利用基质中白云母中 Si 成分等值线 X_{Si} (3.10~3.15) 和基质中黑云母中 Ti 成分等值线 X_{Ti} (0.10~0.16),最终取水值 $X_{H_2O}=0.35$ (1.7%,摩尔分数) 作为合适的水含量计算 $p-t$ 视剖面图 (图 10a)。样品 ALS2204 的 $p-t$ 视剖面图模拟温压范围分别为 550~950℃ 和 200~1 400 MPa,固相线的温度范围为 718~766℃,该样品的峰期

矿物组合 (Grt+Bt+Ms+Ilm+Pl+Kfs+Qz+Liq) 对应的温度和压力范围为 718~766℃/620~1 180 MPa,利用基质中白云母 Si 成分等值线 (3.10~3.15) 和基质中黑云母 Ti 成分等值线 (0.10~0.16) 将峰期矿物组合的变质温压范围进一步限定为 730~751℃ 和 930~1 070 MPa 之间 (图 10b)。

同样采用石榴子石-黑云母-斜长石-石英 (GBPQ) 传统地质温压计 (Holdaway, 2000; Wu *et al.*, 2004),对样品 ALS2204 变质温压条件进行了限定,选用该样品石榴子石边部、与石榴子石接触的黑云母和基质中斜长石的边部成分,计算得到 3 组变质温压条件分别为: 620℃ 和 330 MPa、657℃ 和 400 MPa、655℃/340 MPa,反映了该样品退变质冷却阶段的温压条件,结合变质相平衡模拟计算的温压结果,确定其经历了顺时针的 $p-t$ 演化轨迹 (图 10b)。

6 讨论

6.1 变质时代

近年来,陆续有学者对阿拉善地块古生代时期的变质变形时代进行了研究和讨论 (Zhang *et al.*, 2013b; Chen *et al.*, 2015; 张建新等, 2018; 刘平华等, 2019; 邹雷等, 2019)。Zhang 等 (2013b) 在阿拉善地块东部的巴彦乌拉山-狼山一带的花岗糜棱岩通过黑云母和白云母 Ar-Ar 测年获得了 ~351 Ma 和 ~250 Ma 两期变形年龄, ~351 Ma 的变形年龄被解释为从东向西剪切的韧性逆冲构造作用时代,而 ~250 Ma 的年龄被解释为晚期北西向左韧性剪切变形

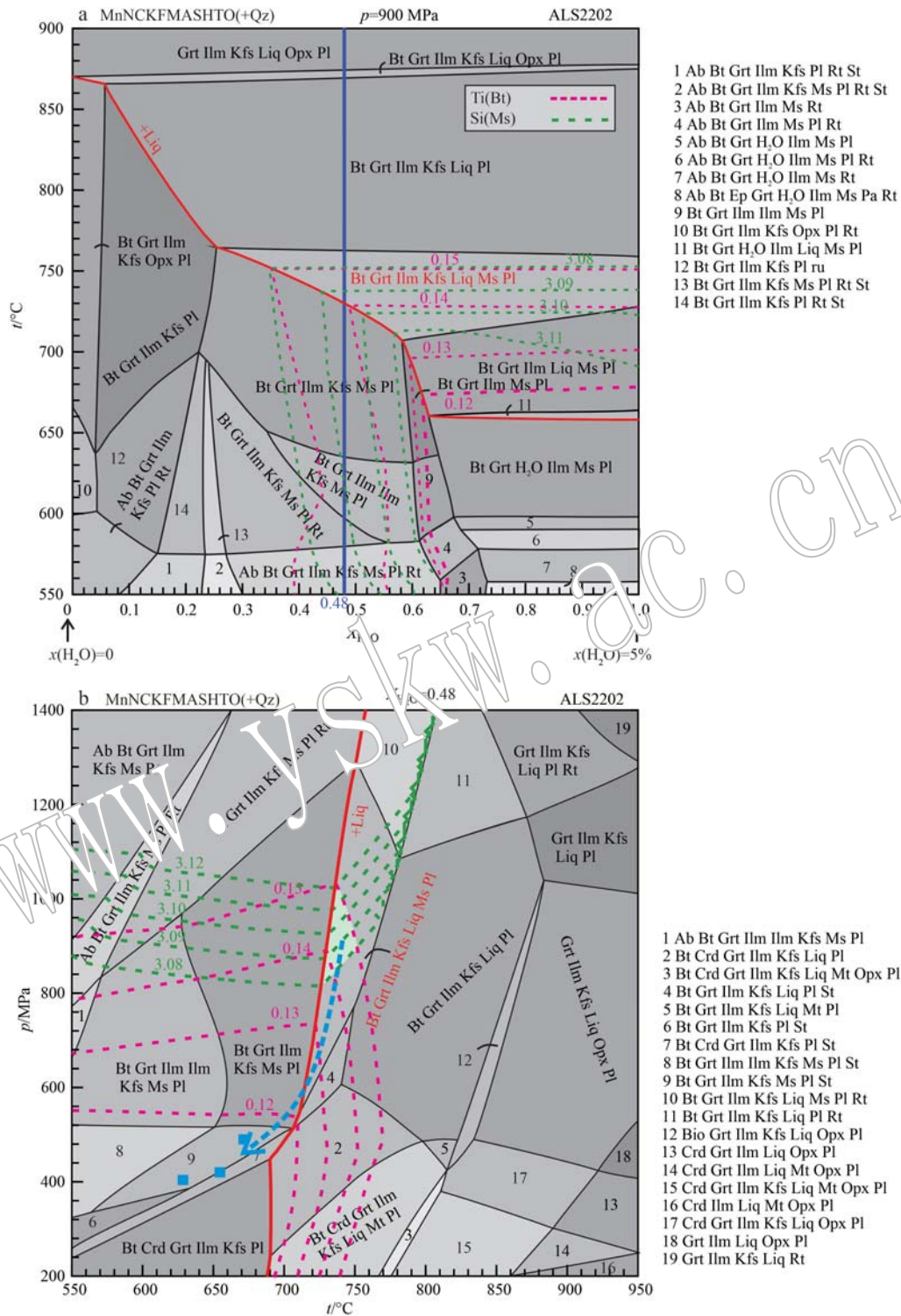
图9 含石榴子石黑云斜长片麻岩样品 ALS2202 变质相平衡 p - t 视剖面图

Fig. 9 Phase equilibrium modeling for the garnet-bearing biotite-plagioclase gneiss samples ALS2202

a—压力为 900 MPa 时 t - $X_{\text{H}_2\text{O}}$ 视剖面图; b— p - t 视剖面图和顺时针 p - t 轨迹(图 a 中深蓝色线为 t - $X_{\text{H}_2\text{O}}$ 中水的取值,红色字体标记峰期矿物

组合,浅绿色阴影区域表示白云母 Si 成分等值线和黑云母 Ti 成分等值线共同限定的峰期温压范围)

a—the t - $X_{\text{H}_2\text{O}}$ pseudosection at 900 MPa; b—the p - t pseudosection with p - t path (dark blue line in Fig. a denotes H_2O content used for subsequent modeling; the peak mineral assemblage of Bt+Grt+Ilm+Kfs+Liq+Ms+Pl (+ Qz) is marked in red color, and the light green area represents the peak metamorphic p - t constrained using isopleths of both Si in muscovite and Ti in biotite)

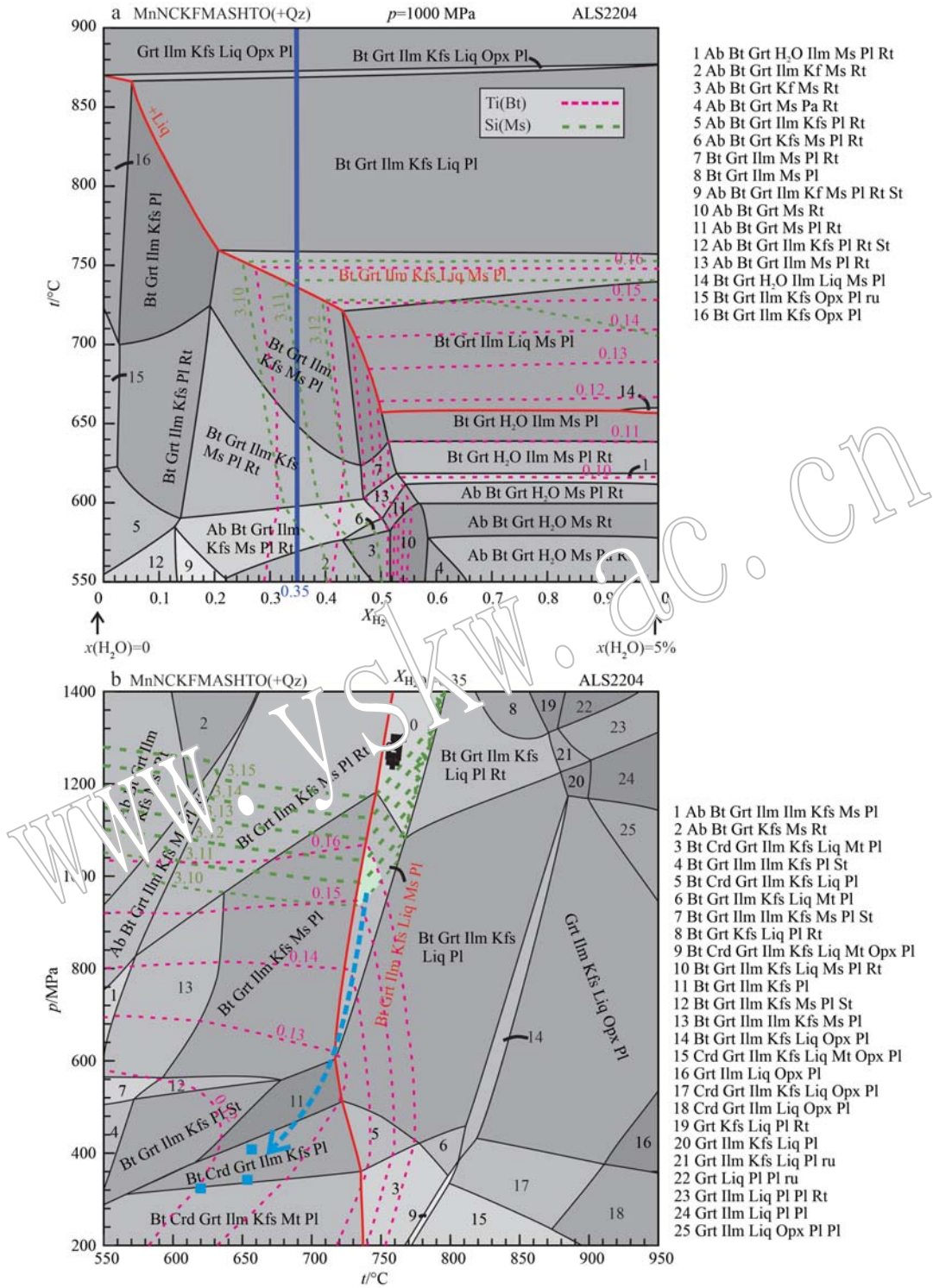


图 10 含石榴子石黑云斜长片麻岩样品 ALS2204 变质相平衡视剖面图

Fig. 10 Phase equilibrium modeling for the garnet-bearing biotite-plagioclase gneiss samples ALS2204

a—压力为 1 000 MPa 时计算的 $t-X_{H_2O}$ 视剖面图; b— $p-t$ 视剖面图和顺时针 $p-t$ 轨迹 (图 a 中深蓝色线为 $t-X_{H_2O}$ 中水的取值, 红色字体标记峰期矿物组合, 绿色阴影区域表示白云母 Si 成分等值线和黑云母 Ti 成分等值线共同限定的峰期温压范围)

a—the $t-X_{H_2O}$ pseudosection at 1 000 MPa; b—the $p-t$ pseudosection with $p-t$ path (dark blue line denotes H_2O content used for subsequent modeling; the peak mineral assemblage of Bt+Grt+Ilm+Kfs+Liq+Ms+Pl (+Qz) is marked by red type, and the light green area represents the range of peak metamorphic $p-t$ conditions constrained by isopleths of both Si in muscovite and Ti in biotite)

时代,可能指示华北板块和扬子板块之间的碰撞。张建新等(2018)对阿拉善地块西部北大山的高级变质副片麻岩通过 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年,获得了 422 Ma 的变质年龄,认为其代表阿拉善地块西部的北大山杂岩经历了早古生代晚期区域高温变质的时代。刘平华等(2019)对阿拉善地块东部阿拉坦敖包地区德尔和通特组含蓝晶石石榴云母石英片岩分别通过 LA-ICP-MS 独居石和锆石 U-Pb 获得了 419 ± 3 Ma 和 406 ± 7 Ma 的变质年龄,被解释为角闪岩相变质时代,推测是阿拉善地块与周缘微陆块早古生代末碰撞造山作用的响应。Chen 等(2015)对狼山北部宝音图群石榴斜长角闪岩和含蓝晶石十字石石榴云母片岩进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学研究,分别获得了 399 ± 6 Ma 和 402 ± 10 Ma 的变质年龄,解释该期变质作用事件与古亚洲洋闭合后碰撞造山作用有关。

邹雷等(2019)对阿拉善地块东部诺尔公-红古尔玉林带的东北端波罗斯坦庙杂岩进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学研究,得到石英闪长质片麻岩的变质时代为 274 ± 6 Ma 和 272 ± 5 Ma,斜长角闪岩的变质时代为 269 ± 3 Ma 和 268 ± 2 Ma,认为 280~260 Ma 对应角闪岩相变质作用的时代,推测它们是卷入晚古生代中-晚造山带造山作用的产物。总之,关于阿拉善地块古生代时期的年代学研究和变质变形事件的研究还需进一步探讨。本文在阿拉善地块东部波罗斯坦庙杂岩的含石榴子石黑云斜长片麻岩样品 ALS2207 和黑云斜长片麻岩样品 ALS2210 进行了 LA-ICP-MS 独居石 U-Pb 定年,得到它们的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄分别为 268 ± 4 Ma 和 255 ± 2 Ma。野外观察显示样品浅色体发育透入性面理,具有较为明显的熔融作用特征,且独居石 U-Pb 年代学研究中显示其定年结果较为集中,未显示出多期变质事件,因此认为波罗斯坦庙杂岩中含石榴子石黑云斜长片麻岩经历的峰期变质作用或深熔作用的时代为 268~255 Ma,该变质时代与邹雷等(2019)在阿拉善地块东部诺尔公-红古尔玉林带波罗斯坦庙组的石英闪长质片麻岩和斜长角闪岩的变质时代 280~260 Ma 基本一致。

6.2 变质温压演化

本研究通过变质相平衡模拟和变质矿物组合分析相结合对波罗斯坦庙杂岩中含石榴子石黑云斜长片麻岩的变质温压演化进行了限定。如 5.1 所述,样品 ALS2202 含石榴子石黑云斜长片麻岩的峰期矿

物组合为石榴子石+黑云母+白云母+钛铁矿+斜长石+钾长石+石英+熔体,结合基质中白云母 Si 成分等值线和黑云母 Ti 成分等值线,限定出该样品的峰期变质 p - t 条件为 727~751℃ 和 820~1 030 MPa。此外,GBPQ 地质温压计限定了退变质阶段的变质 p - t 条件。综合以上变质温压条件计算结果,本研究限定了含石榴子石黑云斜长片麻岩样品 ALS2202 具有顺时针,并以近等温降压为特点的变质作用 p - t 演化轨迹。此外,含石榴子石黑云斜长片麻岩样品 ALS2204 的变质 p - t 条件和演化轨迹与样品 ALS2202 相似,其峰期 p - t 条件为 730~751℃ 和 930~1 070 MPa,并且同样记录了顺时针的 p - t 演化轨迹,经历了高角闪岩相的变质作用。

前人对阿拉善地块东部的研究主要集中在年代学方面,而变质演化方面的研究相对较少,Chen 等(2015)对狼山地区宝音图群石榴斜长角闪岩和含蓝晶石十字石石榴云母片岩进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年获得了 402~399 Ma 变质时代,峰期变质条件为 300 MPa 和 725℃,记录了顺时针 p - t 轨迹,解释其构造背景与造山过程中的地壳增厚有关。本研究得到的波罗斯坦庙杂岩中含石榴子石黑云斜长片麻岩变质 p - t 演化结果是对阿拉善地块东部晚古生代变质作用研究的补充。

6.3 构造意义

近年来,前人基于岩石地球地化数据,对阿拉善地块古生代岩浆岩形成构造背景提出了 4 种不同的构造模型:① 石炭纪-二叠纪的岩浆作用是古亚洲洋向南俯冲消减的大陆弧环境的结果,古亚洲洋最终闭合时间可能晚于早二叠世(Feng *et al.*, 2013; Zheng *et al.*, 2014; Liu *et al.*, 2017);② 古亚洲洋在二叠纪之前闭合,并且认为阿拉善地块中大规模二叠纪岩浆作用形成于伸展环境(Shi *et al.*, 2018; Chen *et al.*, 2020);③ 由于形成于伸展环境的大量早二叠纪花岗岩在空间或时间上没有明显的分带,Dan 等(2014)提出了 280 Ma 的塔里木地幔柱可能引发了阿拉善地块大规模硅质火成岩省的形成;④ Xie 等(2021)提出 253~248 Ma 的弱铝质和钙碱性 I 型花岗岩来自下地壳的部分熔融,指示古亚洲洋在二叠纪晚期持续俯冲,可能在三叠纪早期闭合。

最近,基于对诺尔公-狼山构造带发育的闪长岩和花岗岩(279~275 Ma)的研究,Tian 等(2021)提出一个新构造模型用于解释古亚洲洋在阿拉善地块北部的构造演化过程。在石炭纪早期(400~325 Ma),

古亚洲洋俯冲到诺尔公-狼山构造带下方形成大陆弧,俯冲作用引起下地壳重熔形成 345~327 Ma 的埃达克岩 (Dan *et al.*, 2016; Liu *et al.*, 2016b; Xue *et al.*, 2017), 这些岩浆侵入到大陆弧环境, 引发了地壳加厚。随后, 石炭纪晚期至二叠纪 (320~285 Ma) 岩浆活动处于平静期, 板块回卷导致软流圈上涌和岩石圈减薄, 同时古亚洲洋在宗乃山-沙拉扎山构造带下向北俯冲, 形成 ~301 Ma 的埃达克岩 (Shi *et al.*, 2014) 和花岗闪长岩 (杨奇荻等, 2014)。持续的俯冲作用导致发育在宗乃山-沙拉扎山构造带和诺尔公-狼山构造带之间的弧后洋盆缩小, 最终在二叠纪早期 (278~275 Ma) 闭合 (Zheng *et al.*, 2014, 2018), 古亚洲洋岩石圈板块持续俯冲和随后的弧陆碰撞导致了地壳加厚, 并在早二叠世引起了诺尔公-狼山构造带的岩浆作用。在二叠纪中晚期 (270~250 Ma), 古亚洲洋岩石圈继续沿恩格尔乌苏缝合带俯冲到宗乃山-沙拉扎山构造带下方, 形成了大量的深成岩体, 包括花岗岩、花岗闪长岩和闪长岩 (Ran *et al.*, 2012; 刘治博等, 2014; 谢奋全等, 2015)。最终古亚洲洋在二叠纪晚期沿恩格尔乌苏缝合带闭合。

目前与中亚造山带形成相关的变质作用资料很少, Chen 等 (2015) 揭示狼山北部宝音图群的变质年龄为 ~460 Ma, 解释该期变质作用与地壳加厚的造山过程有关, 发生在古亚洲洋在早泥盆世之前闭合后的后碰撞环境, 支持古亚洲洋在泥盆纪之前闭合这一观点 (Chen *et al.*, 2020)。然而阿拉善地块早古生代岩浆岩形成的构造背景并不支持以上观点, 如北大山和诺尔公地区 460~397 Ma 闪长岩和花岗岩具有岛弧地球化学特征, 被解释为与古亚洲洋的俯冲造山过程相关 (Liu *et al.*, 2016a; Zhou *et al.*, 2016)。本研究得到的波罗斯坦庙杂岩变质年龄为 268~255 Ma, 结合邹雷等 (2019) 从波罗斯坦庙杂岩中的石英闪长质片麻岩和斜长角闪岩获得的 ~270 Ma 的变质时代, 支持古亚洲洋在二叠纪中晚期闭合这一观点 (Tian *et al.*, 2021)。此外, 含石榴子石黑云斜长片麻岩记录了顺时针的 p - t 演化轨迹, 峰期变质温压条件为 727~751℃ 和 820~1 030 MPa 和 730~751℃ 和 930~1 070 MPa, 压力峰期对应的地热梯度在 21~27℃/km 之间, 与典型的巴罗型变质系列 (11~30℃/km) 一致, 形成于大陆碰撞环境 (England and Thompson, 1984; Brown, 2007; Brown and Johnson, 2018; Zheng and Zhao, 2020)。本研究根

据矿物组合推测含石榴子石黑云斜长片麻岩为副变质岩, 其形成过程应为地表沉积物通过构造掩埋到中下地壳, 因而指示波罗斯坦庙杂岩在二叠纪中晚期经历了一次显著的地壳加厚过程, 该过程可能与古亚洲洋的闭合有关。

7 结论

(1) LA-ICP-MS 独居石 U-Pb 定年获得波罗斯坦庙杂岩中的含石榴子石黑云斜长片麻岩样品 ALS2207 和黑云斜长片麻岩样品 ALS2210 的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄分别是 268 ± 4 Ma 和 255 ± 2 Ma, 代表峰期变质作用或者深熔作用时代。

(2) 波罗斯坦庙杂岩中含石榴子石黑云斜长片麻岩样品 ALS2202 和 ALS2204 记录的峰期变质 p - t 条件相似, 分别为 727~751℃ 和 820~1 030 MPa、730~751℃ 和 930~1 070 MPa, 指示经历了高角闪岩相的变质作用。

(3) 两个含石榴子石黑云斜长片麻岩样品从峰期到退变质阶段都记录了顺时针的 p - t 演化轨迹, 表明阿拉善地块东部波罗斯坦庙杂岩在二叠纪中晚期经历了一次显著的地壳加厚过程, 该过程可能与古亚洲洋的闭合有关。

References

- Bao Chuang, Chen Yuelong and Li Dapeng. 2012. Discovery of the Late Permian volcanics in the Zhulazhagamaodao, northern margin of the Alxa Block[J]. *Earth Science Frontiers*, 19(5): 156~163 (in Chinese with English abstract).
- Bao Chuang, Chen Yuelong and Li Dapeng. 2013. LA-MC-ICP-MS zircon U-Pb dating and Hf isotopic compositions of the Paleoproterozoic amphibolite in Bayan Ul area, Inner Mongolia[J]. *Geological Bulletin of China*, 32(10): 1 513~1 524 (in Chinese with English abstract).
- Brown M. 2007. Metamorphic conditions in orogenic belts: A record of secular change[J]. *International Geology Review*, 49(3): 193~234.
- Brown M and Johnson T. 2018. Secular change in metamorphism and the onset of global plate tectonics[J]. *American Mineralogist*, 103(2): 181~196.
- 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 Alashan, Inner Mongolia; Evidences from zircon U-Pb geochronology and geochemistry[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 33(4): 53~60 (in Chinese with English abstract).
- Chen Y, Wu T R, Zhang Z C, *et al.* 2020. Provenance of the Permian-Carboniferous sediments in the northern Alxa and its tectonic implications for the southernmost Central Asian Orogenic Belt[J]. Geoscience Frontiers, 11(4): 1 415~1 429.
- Chen Y P, Wei C J, Zhang J R, *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 W, Li X H, Guo J H, *et al.* 2012. Paleoproterozoic evolution of the eastern Alxa Block, westernmost North China: Evidence from in situ zircon U-Pb dating and Hf-O isotopes[J]. Gondwana Research, 21(4): 838~864.
- Dan W, Li X H, Wang Q, *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 W, Li X H, Wang Q, *et al.* 2015. Paleoproterozoic 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.
- Dan W, Wang Q, Wang X C, *et al.* 2015. Overlapping Sr-Nd-Hf-O isotopic compositions in Permian mafic enclaves and host granitoids in Alxa Block, NW China: Evidence for crust-mantle interaction and implications for the generation of silicic igneous provinces [J]. Lithos, 230: 133~145.
- Duan J, Li C S, Qian Z Z, *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.
- England P C and Thompson A B. 1984. Pressure-temperature-time paths of regional metamorphism I. Heat transfer during the evolution of regions of thickened continental crust[J]. Journal of Petrology, 25(4): 894~928.
- Feng J Y, Xiao W J, Windley B, *et al.* 2013. Field geology, geochronology and geochemistry of mafic-ultramafic rocks from Alxa, China: Implications for Late Permian accretionary tectonics in the southern Altaids[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 78: 114~142.
- Geng Y S, Wang Xinshe, Shen Qihan, *et al.* 2006. Redefinition of the Alxa Group-complex (Precambrian metamorphic basement) in the Alxa area, Inner Mongolia[J]. Geology in 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]. Geology in China, 34(2): 251~261 (in Chinese with English abstract).
- Geng Yuansheng and Zhou Xiwen. 2010. Early Neoproterozoic granite events in Alxa area of Inner Mongolia and their geological significance: Evidence from geochronology[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 29(6): 779~795 (in Chinese with English abstract).
- Geng Yuansheng and Zhou Xiwen. 2012. Early Permian magmatic events in the Alxa metamorphic basement: Evidence from geochronology [J]. Acta Petrologica Sinica, 28(5): 2 667~2 685 (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]. Gondwana Research, 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 Petrologica et Mineralogica, 30(5): 795~818 (in Chinese with English abstract).
- Holdaway M J. 2000. Application of new experimental and garnet Margules data to the garnet-biotite geothermometer[J]. American Mineralogist, 85(7~8): 881~892.
- Holland T J B and Powell R. 1998. An internally consistent thermodynamic data set for phases of petrological interest[J]. Journal of metamorphic Geology, 16(3): 309~343.
- Holland T J B and Powell R. 2003. Activity-composition relations for phases in petrological calculations: An asymmetric multicomponent formulation[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 145: 492~501.
- Holland T J B and Powell R. 2011. An improved and extended internally consistent thermodynamic dataset for phases of petrological interest, involving a new equation of state for solids[J]. Journal of Metamorphic Geology, 29(3): 333~383.
- Jahn B M. 2004. The Central Asian Orogenic Belt and growth of the continental crust in the Phanerozoic[J]. Geological Society, London, Special Publications, 226(1): 73~100.
- Jiao Jiangang, Jin Shufang, Rui Huichao, *et al.* 2017. Petrology, geo-

- chemistry 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).
- Lai Xinrong, Jiang Sihong, Qiu Xiaoping, *et al.* 2007. ^{40}Ar - ^{39}Ar age and geochemical features of Hercynian intermediate acidity rock in beidas-han rock belt, Alxa[J]. *Acta Geologica Sinica*, 81(3): 370~380 (in Chinese with English abstract).
- Lei Gongcong, Li Weixing, Zhang Chao, *et al.* 2023. Zircon U-Pb ages, whole-rock geochemical characteristics and their tectonic significances of the Dalunwusu intermediate-acidic intrusive rocks in the northern margin of the Alxa Block[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 42(4): 860~872 (in Chinese with English abstract).
- Li Jie. 2012. Characteristics and Tectonic Significance of Late Paleozoic Intrusive Rocks Along the Yabrai-Bay An Noel of Alxa, Inner Mongolia[D]. Beijing: China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).
- Li Jinyi, Zhang Jin, Yang Tiannan, *et al.* 2009. Crustal tectonic division and evolution of the southern part of the North Asian orogenic region and its adjacent areas[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 39: 584~605 (in Chinese with English abstract).
- Li Junjian. 2006. Regional Metallogenic System of Alxa Block in Inner Mongolia Autonomous Region[D]. Beijing: China University of Geosciences (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 Ul area, western Inner Mongolia[J]. *Geological Bulletin of China*, 23(12): 1 243~1 245 (in Chinese with English abstract).
- Liu J N, Yin C, Zhang J, *et al.* 2020. Tectonic evolution of the Alxa Block and its affinity: Evidence from the U-Pb geochronology and Lu-Hf isotopes of detrital zircons from the longshoushan belt[J]. *Precambrian Research*, 344: 105733.
- Liu M, Zhang D, Xiong G Q, *et al.* 2016b. 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 Pinghua, Zou Lei, Tian Zhonghua, *et al.* 2019. Discovery and geological significance of an Early Paleozoic (ca. 420 Ma) metamorphic event from the eastern Alxa Block: New evidence from monazite and zircon LA-ICP-MS U-Pb dating[J]. *Earth Science*, 44(7): 2 441~2 470 (in Chinese with English abstract).
- Liu Q, Zhao G C, Han Y G, *et al.* 2017. Timing of the final closure of the Paleo-Asian Ocean in the Alxa Terrane: Constraints from geochronology and geochemistry of Late Carboniferous to Permian gabbros and diorites[J]. *Lithos*, 274: 19~30.
- Liu Q, Zhao G C, Sun M, *et al.* 2016a. 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 Yong. 2008. Characteristics and Their Geological Significance of Paleoproterozoic Granite in Jinchuan, Gansu Province [D]. Beijing: China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).
- Liu Y S, Gao S, Hu Z C, *et al.* 2010. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths[J]. *Journal of Petrology*, 51(1~2): 537~571.
- Liu Y S, Hu Z C, Gao S, *et al.* 2008. In situ analysis of major and trace elements of hydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. *Chemical Geology*, 257(1~2): 34~43.
- Liu Zhibo and Zhang Weijie. 2014. Geochemical characteristics and LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of the late Permian granodiorite in Hanggale, Alax Right Banner, Inner Mongolia[J]. *Geological Review*, 60(2): 409~426 (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).
- Sengör A M C, Natal'in B A and Burtman V S. 1993. Evolution of the Altaid tectonic collage and Palaeozoic crustal growth in Eurasia[J]. *Nature*, 364(6 435): 299~307.
- Shen Qihan, Geng Yuansheng, Wang Xinshe, *et al.* 2005. Petrology, geochemistry, formation environment and ages of Precambrian amphibolites in Alxa region[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 24(1): 21~31 (in Chinese with English abstract).
- Shi G Z, Wang H, Liu E T, *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 Xinjun. 2012. The Geochronology, Geochemistry and Petrogenesis of Granitoid in Qinggele Area, Northern Alax[D]. Beijing: China University of Geosciences (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 intru-

- sions in the Shalazhashan of northern Alxa: Constraints on the southernmost boundary of the Central Asian Orogenic Belt [J]. *Lithos*, 208: 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 Petrologica et Mineralogica*, 33(6): 989~1 007 (in Chinese with English abstract).
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313~345.
- Tian R S, Xie G A, Zhu W B, *et al.* 2021. Late Paleozoic magmatic flare-up in the Nuogong-Langshan Belt, Alxa Block: Insights into tectonic evolution of the southern Paleo-Asian Ocean [J]. *Lithos*, 398: 106310.
- Wang Tingyin, Wang Jinrong and Wang Shizheng. 1992. Discovery of the Enger Us ophiolitic mélange belt in Northern Alxa and its tectonic implications [J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Science)*, 28: 194~196 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xingjun. 2012. The Geochemical Character and Its Tectonic Implications of Ophiolites in Alxa Area, Inner Mongolia [D]. Beijing: China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).
- Wang Y, Ge R J and Si Y. 2023. Late Paleoproterozoic ultrahigh-temperature mafic granulite from the eastern Alxa Block, North China Craton [J]. *Precambrian Research*, 397: 107172.
- Wang Z Z, Han B F, Feng L X, *et al.* 2015. Geochronology, geochemistry and origins of the Paleozoic-Triassic plutons in the Langshan area, western Inner Mongolia, China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 97: 337~351.
- Wang Z Z, Han B F, Feng L X, *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 Qiaoqiao, 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).
- White R W, Powell R and Clarke G L. 2002. The interpretation of reaction textures in Fe-rich metapelitic granulites of the Musgrave Block, central Australia: Constraints from mineral equilibria calculations in the system K_2O -FeO-MgO- Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O -TiO₂-Fe₂O₃ [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 20(1): 41~55.
- White R W, Powell R, Holland T J B, *et al.* 2014. New mineral activity-composition relations for thermodynamic calculations in metapelitic systems [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 32(3): 261~286.
- Whitney D L and Evans B W. 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals [J]. *American Mineralogist*, 95(1): 185~187.
- Windley B F, Alexeiev D, Xiao W J, *et al.* 2007. Tectonic models for accretion of the Central Asian Orogenic Belt [J]. *Journal of the Geological Society*, 164(1): 31~47.
- Wu C M, Zhang J and Ren L D. 2004. Empirical garnet-biotite-plagioclase-quartz (GBPQ) geobarometry in medium- to high-grade metapelites [J]. *Journal of Petrology*, 45(9): 1 907~1 921.
- Wu Kanglin. 2011. Geochemical Characteristics and Tectonic Setting of late Varisian Period in Alashan block [D]. Xi'an: Chang'an University (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]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 94: 226~239.
- Xiang H and Connolly J A D. 2022. GeoPS: An interactive visual computing tool for thermodynamic modelling of phase equilibria [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 40(2): 243~255.
- Xiao Jin, Sun Ping and Xu Lin. 2016. LA-ICP-MS zircon U-Pb age, geochemical characteristics and genesis of the Early Permian gabbro in Nuogong area, northern Alxa [J]. *Western Resources*, 13(4): 55~60 (in Chinese with English abstract).
- Xiao W J, Windley B F, Han C M, *et al.* 2018. Late Paleozoic to Early Triassic multiple roll-back and oroclinal bending of the Mongolia collage in Central Asia [J]. *Earth-Science Reviews*, 186: 94~128.
- Xiao W J, Windley B F, Sun S, *et al.* 2015. A tale of amalgamation of three permo-Triassic collage systems in central Asia: Oroclines, sutures, and terminal accretion [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 43(1): 477~507.
- Xie Fenquan. 2014. Study of Granites Rock Mass of Zongnai, Shalaza and Bayinnuogong [D]. Beijing: China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).
- Xie Fenquan, Wang Lidong, Li Qi, *et al.* 2015. Zircon LA-ICP-MS dating of granites from the southeastern Zongnai Mountain Alax and its geochemical characteristics [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 34(3): 375~382 (in Chinese with English abstract).
- Xie F Q, Wu J H, Sun Y H, *et al.* 2021. Permian to Triassic tectonic evolution of the Alxa tectonic belt, NW China: Constraints from petrogenesis and geochronology of felsic intrusions [J]. *Lithos*, 384:

- 105980.
- Xiu Qunye, Yu Haifeng, Li Quan, *et al.* 2004. Discussion on the petrogenetic time of Longshoushan Group, Gansu Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 78(3): 366~373 (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 Xie Qixing. 2015. LA-ICP-MS zircon U-Pb age and geochemical characteristics of the Bayannuorigong quartz diorite in Alxa, Inner Mongolia[J]. *Xinjiang Geology*, 33(4): 529~536 (in Chinese with English abstract).
- Xue S, Ling M X, Liu Y L, *et al.* 2017. The genesis of Early Carboniferous adakitic rocks at the southern margin of the Alxa Block, North China[J]. *Lithos*, 278: 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 northern margin of the Alxa Block, Inner Mongolia and their implications[J]. *Geological Bulletin of China*, 33(6): 775~787 (in Chinese with English abstract).
- Ye Ke, Zhang Lei, Wang Tao, *et al.* 2016. Geochronology, geochemistry and zircon Hf isotopes of the Permian intermediate-acid igneous rocks from the Yehun Mountain in western Alxa, Inner Mongolia, and their tectonic implications[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 35(6): 901~928 (in Chinese with English abstract).
- Zeng R Y, Lai J Q, Mao X C, *et al.* 2018. Paleoproterozoic multiple tectonothermal events in the Longshoushan Area, western North China Craton and their geological implication: Evidence from geochemistry, zircon U-Pb geochronology and Hf Isotopes[J]. *Minerals*, 8(9): 361.
- Zhang Jin, Li Jinyi, Liu Jianfeng, *et al.* 2013. LA-ICP-MS U-Pb ages of pillow lava basalts in southwestern Langshan, Inner Mongolia and their implication[J]. *Geological Bulletin of China*, 32(2): 287~296 (in Chinese with English abstract).
- Zhang J, Li J Y, Xiao W X, *et al.* 2013b. 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 Jianjun. 2015. Petrogenesis of the Permian Granitoids from the Northern Alxa Block and their Geodynamic Implications[D]. Beijing: China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).
- Zhang J J, Wang T, Castro A, *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 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]. *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 J X, Gong J H, Yu S Y, *et al.* 2013a. Neoproterozoic-Paleoproterozoic multiple tectonothermal events in the western Alxa block, North China Craton and their geological implication: Evidence from zircon U-Pb ages and Hf isotopic composition[J]. *Precambrian Research*, 235: 36~51.
- Zhang L, 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): 1536~1547 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Lei, Wu Tairan and Luo Hongling. 2011. SHRIMP U-Pb dating, geochemistry and tectonic implications of the Beiqigetao gabbros in Urad Zhongqi area, Inner Mongolia[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(10): 3071~3082 (in Chinese with English abstract).
- Zhang L Q, Zhang H F, Zhang S S, *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: 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(Terrae)*, 43(8): 1299~1311 (in Chinese with English abstract).
- 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): 1725~1736 (in Chinese with English abstract).
- Zheng R G, Li J Y, Xiao W J, *et al.* 2018. A new ophiolitic mélange

- containing boninitic blocks in Alxa region: Implications for Permian subduction events in southern CAOB[J]. *Geoscience Frontiers*, 9(5): 1355~1367.
- Zheng R G, Wu T R, Zhang W, *et al.* 2014. Late Paleozoic subduction system in the northern margin of the Alxa block, Altaids: Geochronological and geochemical evidences from ophiolites[J]. *Gondwana Research*, 25(2): 842~858.
- Zheng Y F and Zhao G C. 2020. Two styles of plate tectonics in Earth's history[J]. *Science Bulletin*, 65(4): 329 ~ 334.
- Zhou F, Gou L L, Dong Y P, *et al.* 2024. Paleoproterozoic orogenesis of the eastern Alxa Block, North China Craton: Evidences from metamorphic evolution and zircon U-Pb geochronology of garnet-bearing mafic granulites[J]. *Precambrian Research*, 410: 107434.
- Zhou F, Gou L L, Xu X F, *et al.* 2023. Metamorphic ages and PT conditions of amphibolites in the diebusige and bayanwulashan complexes of the Alxa Block, North China Craton[J]. *Minerals*, 13(11): 1426.
- 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]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 26(3): 22 ~223 (in Chinese with English abstract).
- Zhou X C, Zhang H F, Luo P J, *et al.* 2016. Origin of high Sr/Y-type granitic magmatism in the south eastern of the Alxa Block, Northwest China[J]. *Geotitles*, 16: 211~227.
- Zou L, Guo J H, Luo S J, *et al.* 2022. Paleoproterozoic ultrahigh-temperature metamorphism in the Alxa Block, the Khondalite Belt, North China Craton: Petrology and phase equilibria of quartz-absent corundum-bearing pelitic granulites[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 40(7): 1159~1187.
- Zou L, Guo J H, Liu L S, *et al.* 2021. Palaeoproterozoic granulite-facies metamorphism in the eastern Alxa Block: New petrological and geochronological evidence from the Diebusige complex[J]. *Precambrian Research*, 354: 106051.
- Zou L, Liu P H, Liu L S, *et al.* 2020. Diagenetic and metamorphic timing of the Diebusige complex, the eastern Alxa Block: New evidence from zircon LA-ICP-MS U-Pb dating of biotite-plagioclase gneiss[J]. *Earth Science*, 45(9): 3313~3329.
- Zou Lei, Liu Pinghua, Tian Zhonghua, *et al.* 2019. Late Paleozoic metamorphic complex of Precambrian metamorphic basement from eastern Alxa block: New evidence from zircon LA-ICP-MS U-Pb dating of Boluositanmiao complex[J]. *Earth Science*, 44(4): 1406~1423 (in Chinese with English abstract).
- 包 创, 陈岳龙, 李大鹏. 2012. 阿拉善地块北缘朱拉扎嘎毛道晚二叠世火山岩的发现[J]. *地质前缘*, 19(5): 156~163.
- 包 创, 陈岳龙, 李大鹏, 等. 2013. 内蒙古巴彦乌拉山古元古代斜长角闪岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成[J]. *地质通报*, 32(10): 1513~1524.
- 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): 1884~1896.
- 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.
- 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, 王新社, 沈其韩, 等. 2006. 内蒙古阿拉善地区前寒武系变质基底阿拉善群的再厘定[J]. *中国地质*, 33(1): 138~145.
- 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. 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. 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.
- 焦建刚, 靳树芳, 芮会超, 等. 2017. 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.
- 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.
- 雷聪聪, 李卫星, 张 超, 等. 2023. 阿拉善地块北缘达伦乌苏中酸性侵入岩锆石 U-Pb 年龄、岩石地球化学特征及其构造演化意义[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 42(4): 860~872.
- 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[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 李锦轶, 张 进, 杨天南, 等. 2009. 北亚造山区南部及其毗邻地区地壳构造分区与构造演化[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 39(4): 584~605.

- 李俊建. 2006. 内蒙古阿拉善地块区域成矿系统[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 李俊建, 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.
- 刘平华, 邹 雷, 田忠华, 等. 2019. 阿拉善地块东部早古生代(约 420 Ma)变质事件的发现及其地质意义: 来自独居石与锆石 U-Pb 定年的新证据[J]. 地球科学, 44(7): 2 441~2 460.
- 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(北京).
- 刘治博, 张维杰. 2014. 内蒙古阿拉善右旗杭嘎勒晚二叠世花岗闪长岩地球化学特征和 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年[J]. 地质评论, 60(2): 409~426.
- 冉 皞, 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): 1 565~1 575.
- 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.
- 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[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 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(1): 99~1 100.
- 王廷印, 王金荣, 王士政. 1992. 阿拉善北部恩格尔乌苏蛇绿混杂岩带的发现及其构造意义[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 28: 194~196.
- 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[D]. 北京: 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-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 32(6): 729~735.
- 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[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, 13(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[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 谢奋全, 王黎栋, 李 琦, 等. 2015. 阿拉善宗乃山岩体东南缘花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄与地球化学特征[J]. 岩矿测试, 34(3): 375~382.
- 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 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.
- 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.
- 杨奇获, 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.
- 叶 珂, 张 磊, 王 涛, 等. 2016. 阿拉善雅布赖山二叠纪酸性岩浆岩年代学、地球化学、锆石 Hf 同位素特征及其构造意义[J]. 岩石矿物学杂志, 35(5): 901~928.
- 张 进, 李锦轶, 刘建峰, 等. 2013. 内蒙古狼山西南地区枕状玄武岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及意义[J]. 地质通报, 32(2): 287~296.
- 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[D]. 北京: 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 磊, 史兴俊, 张建军, 等. 2013. 内蒙古阿拉善北部陶蒙托西圈辉长岩 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.
- 张文, 吴泰然, 冯继承, 等. 2013. 阿拉善地块北缘古大洋闭合的时间制约: 来自乌力吉花岗岩体的证据[J]. 中国科学: 地球科学, 43(8): 1 299~1 311.
- 赵 磊, 吴泰然, 罗红玲. 2011. 内蒙古乌拉特中旗北七哥陶辉长岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 27(10): 3 071~3 082.
- 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.
- 周红英, 莫宣学, 李俊建, 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.
- 邹 雷, 刘平华, 田忠华, 等. 2019. 东阿拉善地块前寒武纪变质基底中晚古生代变质杂岩: 来自波罗斯坦庙杂岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年的新证据[J]. 地球科学, 44(4): 1 406~1 423.