

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2023.11.007

内蒙古北山造山带圆包山—希热哈达地区白山组火山岩锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及对古亚洲洋俯冲作用的启示

杜庆祥¹, 伍赛男¹, 张永^{2,3*}, 沈晓丽¹, 韩金瑞¹DU Qingxiang¹, WU Sainan¹, ZHANG Yong^{2,3*}, SHEN Xiaoli¹, HAN Jinrui¹

1. 山东省沉积成矿作用与沉积矿产重点实验室(山东科技大学)/山东科技大学地球科学与工程学院, 山东 青岛 266590;

2. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170;

3. 华北地质科技创新中心, 天津 300170

1. Key Laboratory of Depositional Mineralization & Sedimentary Mineral of Shandong Province, College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, Shandong, China;

2. Tianjin Center, China Geological Survey, Tianjin 300170, China;

3. North China Center for Geoscience Innovation, Tianjin 300170, China

摘要:在内蒙古北山造山带北部圆包山—希热哈达地区白山组采集了安山岩和含角砾花岗岩斑岩,并对其进行了岩相学、LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄和地球化学分析,探讨北山地区晚古生代构造演化历史。锆石 U-Pb 定年结果显示,安山岩和含角砾花岗岩斑岩的年龄加权平均值分别为 300.0 ± 2.5 Ma (MSWD=2.0, $n=13$) 和 300.3 ± 1.9 Ma (MSWD=1.9, $n=23$), 确认研究区白山组地层时代为晚石炭世。该套火山岩相对富集轻稀土元素和 Rb、K、Ba 等大离子亲石元素,亏损重稀土元素和 Nb、P、Ti 等高场强元素,具有活动性大陆边缘弧的地球化学特征,表明晚古生代北山北部古亚洲洋板块的俯冲持续到晚石炭世。岩石地球化学研究显示,石炭纪白山组安山岩的岩浆是俯冲带流体交代中—下地壳,并使其部分熔融形成;含角砾花岗岩斑岩主要为中—下地壳物质熔融的产物,源区有沉积物熔体的加入。由北往南,白山组火山岩从中性钙碱性向酸性、酸性高钾钙碱性火山岩过渡,其分布规律指示了古亚洲洋板块由北向南的俯冲极性。

关键词:北山造山带;白山组;圆包山;中亚造山带;古亚洲洋

中图分类号:P588.14;P597⁺.3;P534.45 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2023)11-1875-19

Du Q X, Wu S N, Zhang Y, Shen X L, Han J R. Zircon U-Pb ages and geochemistry of volcanic rocks from the Baishan Formation in the Yuanbaoshan-Xirehada area in Beishan orogenic collage, Inner Mongolia, NW China, and implications for the subduction history of the Paleo-Asian Ocean. *Geological Bulletin of China*, 2023, 42(11): 1875-1893

Abstract: Andesite and breccia-bearing granite porphyry samples were collected from the Baishan Formation in the Yuanbaoshan-Xirehada area of the northern Beishan orogenic collage in Inner Mongolia, NW China. Petrographic, LA-ICP-MS zircon U-Pb

收稿日期:2022-06-05;修订日期:2022-09-04

资助项目:国家自然科学基金项目《华北板块北缘东段石炭纪古亚洲洋俯冲起始的沉积记录》(批准号:42272120)、中国地质调查局项目《阴山成矿带小狐狸山和雅布赖地区地质矿产调查》(编号:DD20160039)、山东省高校科研计划《延边地区解放村组地层形成时代及构造意义》(编号:J18KA213)、山东省高校优秀青年创新团队《郯庐断裂带两侧恐龙动物群对比与启示》(编号:2019KJH004)

作者简介:杜庆祥(1984-),男,博士,副教授,从事构造沉积学、油气地质学研究。E-mail:geodqx@foxmail.com

* 通信作者:张永(1984-),男,硕士,高级工程师,从事岩石大地构造研究工作。E-mail:278377324@qq.com

geochronology, and geochemical analyses were conducted to examine the Late Paleozoic tectonic evolution history in the Beishan area. The zircon U-Pb dating results suggest that the weighted mean ages of andesite and breccia-bearing granite porphyry are 300.0 ± 2.5 Ma (MSWD = 2.0, $n = 13$) and 300.3 ± 1.9 Ma (MSWD = 1.9, $n = 23$), respectively. These findings confirm that the stratigraphic age of Baishan Formation in the study area is Late Carboniferous. The volcanic rocks are relatively enriched in light rare earth elements and large ion lithophile elements (e.g. Rb, K, and Ba) and depleted in heavy rare earth elements and high field strength elements (e.g. Nb, P, and Ti). They exhibit geochemical characteristics related with active continental margin volcanic arcs, which indicate that the subduction history of the Paleo-Asian Ocean continued into the Late Carboniferous in the northern Beishan orogenic collage. Geochemical studies further suggest that the magma source of the andesite in the Carboniferous Baishan Formation is the middle-lower crust metasomatized by fluid in the subduction zone, and the breccia-bearing granite porphyry is mainly the product of the middle-lower crust melting, and the samples exhibit sediment incorporation. The volcanic rocks from the Baishan Formation changed from neutral and calc-alkalic rock series in the northern part to intermediate-acid or acid and high potassium calc-alkalic rock series in the southern part along the ophiolite mélange belt, indicating the southern subducted polarity of the Paleo-Asian Ocean plate.

Key words: Beishan orogenic collage; Baishan Formation; Yuanbaoshan area; Central Asian Orogenic Belt; Paleo-Asian Ocean

中亚造山带横跨欧亚大陆,北邻西伯利亚克拉通南缘,南接塔里木克拉通和华北克拉通北缘,包括不同地质历史时期形成的多个微陆块、岛弧、蛇绿混杂岩、增生杂岩等,是典型的显生宙增生型造山带 (Şengör et al., 1993; Jahn et al., 2000; Xiao et al., 2003; 2015; Kirscher et al., 2017; Liu et al., 2017; Safonova, 2017; Zheng et al., 2018; Zhou et al., 2018; Ma et al., 2022; 李光速等, 2022)。中亚造山带在古生代的演化受到古亚洲洋的俯冲作用控制,古亚洲洋漫长的地质演化历史,见证了罗迪尼亚超大陆的解体和潘吉亚大陆的聚集 (Şengör et al., 1993; Dobretsov et al., 1995; Xiao et al., 2003; Cawood et al., 2009)。然而,目前关于古亚洲洋最终关闭时限仍然存在较大争议,制约了中亚造山带的构造演化研究。

内蒙古北山造山带位于中亚造山带的最南端,是连接天山造山带和兴蒙造山带的重要部位 (Xiao et al., 2010)。北山造山带记录了古亚洲洋多期次的俯冲和弧陆、陆陆碰撞作用过程,是中亚构造域研究的关键部位 (Xiao et al., 2010; Li et al., 2012; 牛文超等, 2019) (图 1-a)。自北向南,北山造山带主要出露 4 条近东西向分布的蛇绿混杂岩带,分别为晚古生代红石山-百合山-额勒根乌兰乌拉带、古生代石板井-小黄山带、早古生代月牙山-洗肠井带和晚古生代柳园-账房山带 (左国朝等, 1990b; 何世平等, 2002; 杨合群等, 2010; 辛后田等, 2020; 张正平等, 2020; 王国强等, 2021) (图 1-b)。围绕该 4 条蛇绿混杂岩带,前人对古亚洲洋在北山地区的最终闭

合时限和闭合位置提出了不同观点,主要包括:①早古生代古亚洲洋闭合,最终的缝合带位于石板井-小黄山一线 (左国朝等, 1990b);②中一晚泥盆世古亚洲洋闭合 (李向民等, 2011; Yu et al., 2016; Niu et al., 2018),最终的缝合带为月牙山-洗肠井蛇绿混杂岩带 (杨合群等, 2008; 2010; 孙立新等, 2017);③石炭纪古亚洲洋闭合,最终的缝合带为红石山-百合山-额勒根乌兰乌拉一线 (何世平等, 2002; 龚全胜等, 2003; 方维萱等, 2021);④早二叠世-三叠纪古亚洲洋闭合,最终的缝合带为柳园-账房山蛇绿混杂岩带 (Xiao et al., 2010; Mao et al., 2011; Tian et al., 2014; 辛后田等, 2020)。其中,红石山-百合山-额勒根乌兰乌拉晚古生代蛇绿混杂岩带西起甘肃省肃北县红石山地区,在内蒙古境内经过小红山-天目山和百合山,向东延至额勒根乌兰乌拉一带 (张正平等, 2020),整体上该缝合带呈北西-南东向展布 (辛后田等, 2020)。

前人对晚古生代红石山-百合山-额勒根乌兰乌拉蛇绿混杂岩带的区域地质研究主要集中于西段红石山-百合山地区 (牛文超等, 2020),对于东段圆包山-希热哈达地区的构造和岩浆作用则很少报道 (程海峰等, 2022) (表 1)。本文通过对内蒙古北山造山带圆包山-希热哈达地区石炭纪白山组火山岩的锆石 U-Pb 年龄和地球化学特征开展研究,分析其地层时代、岩石成因及构造背景,为北山造山带晚古生代的构造演化研究提供基础资料,为制约古亚洲洋的俯冲作用和关闭时限提供重要证据。

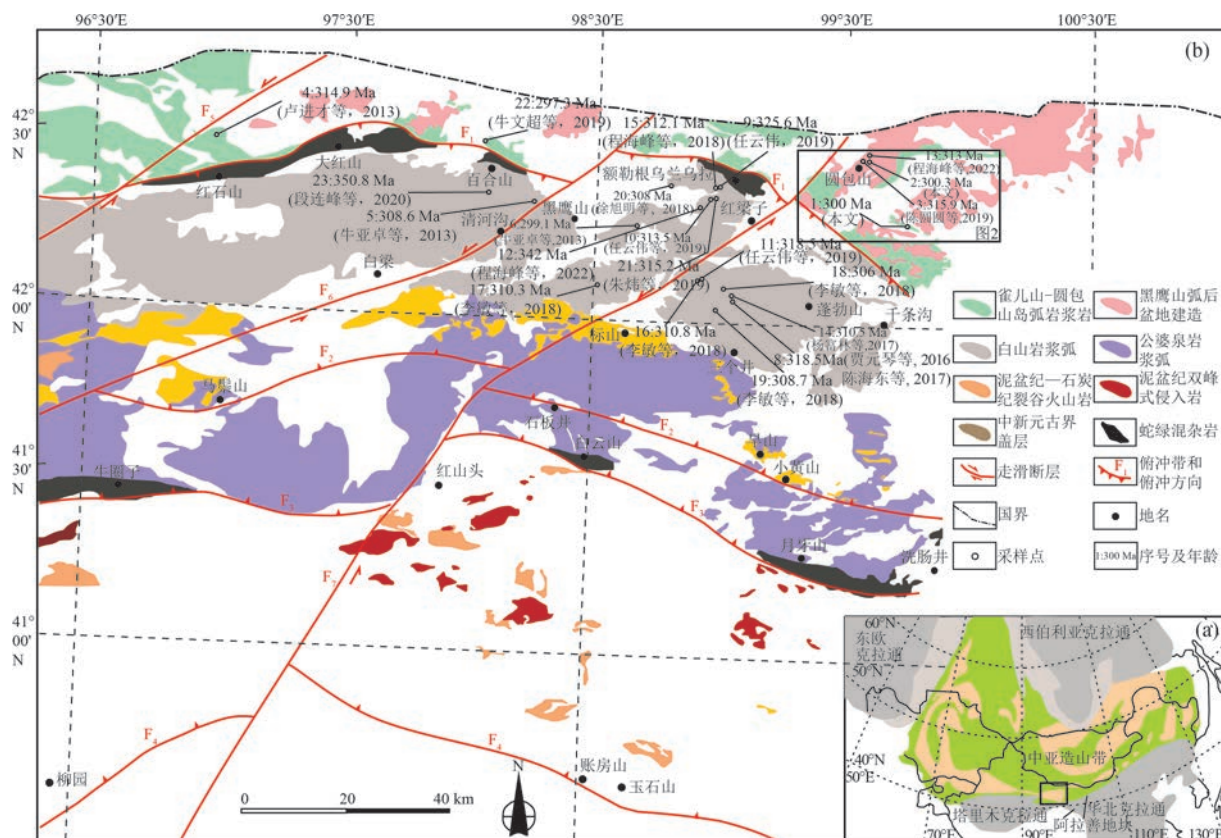


图 1 中亚造山带东部主要板块(a,据 Wang et al.,2022 修改)和内蒙古北山造山带大地构造单元划分图(b,据辛后田等,2020 修改)

Fig. 1 The division diagram of major blocks in the eastern Central Asian Orogenic Belt(a) and the tectonic units of the Beishan orogenic collage in Inner Mongolia(b)

F₁—红石山-百合山-额勒根乌兰乌拉晚古生代蛇绿混杂岩带;F₂—石板井-小黄山古生代蛇绿混杂岩带;F₃—月牙山-洗肠井早古生代蛇绿混杂岩带;F₄—柳园-帐房山晚古生代蛇绿混杂岩带;F₅—星星峡走滑断裂;F₆—清河沟走滑断裂;F₇—红梁子走滑断裂

1 地质概况

内蒙古自治区额济纳旗北部圆包山—希热哈达地区位于中蒙边境,晚古生代大地构造位置属于北山—天山造山系之下的额济纳—北山弧盆系(潘桂棠等,2016)。蛇绿岩带两侧均以逆冲断层分隔了南侧的马鬃山微陆块和北侧的西伯利亚南部陆缘增生带(辛后田等,2020)。前人将该蛇绿岩带对应关闭的大洋称为红石山洋,为古亚洲洋的分支洋之一(Xiao et al.,2010;任云伟等,2019;辛后田等,2020)。

马鬃山微陆块可能为古元古代板块的裂离地块,与东部的阿拉善地块等可能属于同一块体(辛后田等,2020)。马鬃山微陆块位于牛圈子—洗肠井蛇绿混杂岩带以北,红石山—百合山—额勒根乌兰乌

拉蛇绿混杂岩带以南,根据不同的物质组成和大地构造环境可进一步划分为公婆泉—东七一山早古生代岩浆弧、早山地块和黑鹰山—额济纳旗晚古生代弧盆系 3 个次级构造单元。前人早期研究认为,该区的前寒武纪地层主要分布在牛圈子、盐池等地,岩性以北山岩群浅变质—中深变质岩系为主(Song et al.,2013);早古生代沉积地层主要分布在破城山及公婆泉一带,岩性以碎屑岩和浅变质岩为主;晚古生代地层主要分布在三个井、敦敦山及破城山一带,岩性以火山碎屑岩及火山熔岩为主(Guo et al.,2012)。最新研究认为,马鬃山整体为古生代的日本型岛弧;前人所谓的前寒武纪变质岩系并非微陆块结晶基底,而是岛弧—增生杂岩的组成部分,并且很多前寒武纪岩石的年龄并不可靠(Song et al.,2015)。

表 1 内蒙古北山造山带北部石炭纪岩浆岩锆石年龄统计结果

Table 1 Statistics of zircon U-Pb ages of Carboniferous magmatic rocks in the northern Beishan orogenic collage, Inner Mongolia

序号	编号	经度(E)	纬度(N)	位置	岩性	方法	年龄/Ma	文献来源
1	BS06			圆包山	安山岩	LA-ICPMS	300±2.5	本文
2	BS08			圆包山	花岗斑岩	LA-ICPMS	300.3±1.9	本文
3	P4RZ1			圆包山	英安质凝灰岩	LA-ICPMS	315.9±3.4	陈圆圆等,2019
4	12BYQ-TW1			红石山	凝灰熔岩	LA-ICPMS	314.9±3.3	卢进才等,2013
5	12HYS-TW1			黑鹰山	英安斑岩	LA-ICPMS	308.6±1.0	牛亚卓等,2013
6	12D252-TW1			哈珠南	角砾熔岩、凝灰岩	LA-ICPMS	299.1±2.4	牛亚卓等,2013
7	D3240-1-TW1			六陀山	英安岩	LA-ICPMS	310.86±0.86	邹运鑫等,2015
8	TW6151	99°15'24"	41°57'23"	风雷山	流纹岩	LA-ICPMS	318.5±1.2	贾元琴等,2016 陈海东等,2017
9	TW9015-2			哈珠	安山岩	LA-ICPMS	325.6±1.4	任云伟等,2019
10	TW2506-1			哈珠	英安岩	LA-ICPMS	313.5±3.4	任云伟等,2019
11	TW7756-1			哈珠	流纹岩	LA-ICPMS	314.7±1.7	任云伟等,2019
12	TW1			黑红山—圆包山	安山岩	LA-ICPMS	342±5.0	程海峰等,2022
13	TW23			黑红山—圆包山	英安质角砾熔岩	LA-ICPMS	313±2.9	程海峰等,2022
14	D0761-1	99°03'21"	42°03'28"	蓬勃山南	石英闪长岩	LA-ICPMS	310.59±0.88	杨富林等,2017
15	P2TW1	98°56'55"	42°24'15"	黑红山	花岗闪长岩	LA-ICPMS	312.1±3.2	程海峰等,2018
16	02TW1			砾石滩	英云闪长岩	LA-ICPMS	310.8±1.4	李敏等,2018
17	06TW27			砾石滩	花岗闪长岩	LA-ICPMS	310.3±1.4	李敏等,2018
18	16TW10			砾石滩	花岗闪长岩	LA-ICPMS	306.0±1.2	李敏等,2018
19	14TW20			砾石滩	二长花岗岩	LA-ICPMS	308.7±1.4	李敏等,2018
20	P13TW2	98°47'27"	42°24'31"	黑红山	石英闪长岩	LA-ICPMS	308±3.1	徐旭明等,2018
21	PM03TW1	98°56'00"	42°20'40"	黑红山	二长花岗岩	LA-ICPMS	315.2±2.5	朱炜等,2019
22	TW5804	98°5'4.94"	42°28'5.96"	百合山	斜长花岗岩	LA-ICPMS	297.3±1.5	牛文超等,2019
23	TW1024-1			百合山	石英闪长岩	LA-ICPMS	350.8±1.5	段连峰等,2020

西伯利亚板块南部陆缘增生带,按建造类型及其构造特征,可进一步划分为雀儿山-圆包山早—中古生代岛弧带和黑鹰山晚古生代弧后盆地(图 1-b)。雀儿山-圆包山早—中古生代岛弧带位于红石山-百合山-额勒根乌兰乌拉蛇绿混杂岩带北侧,主要出露奥陶纪—泥盆纪岩浆岩和同期的陆源碎屑岩及碳酸盐岩。黑鹰山晚古生代弧后盆地位于北侧的雀儿山-圆包山岛弧和南侧的白山岩浆弧之间,紧邻红石山-百合山-额勒根乌兰乌拉蛇绿混杂岩带北侧,在内蒙古北山地区大体呈北西—南东向展布,主要由早石炭世绿条山组、白山组和少量石炭纪—二叠纪花岗岩组成(辛后田等,2020)。

内蒙古北山造山带北部晚古生代中酸性岩浆岩分布广泛,喷出岩主要为石炭纪白山组巨厚层火山岩,侵入岩包括石炭纪斑状花岗闪长岩、二长花岗岩等(程海峰等,2018;朱炜等,2019)。区内出露的古生代地层由老到新依次为早—中奥陶世咸水湖组、早志留世圆包山组、早石炭世绿条山组和石炭纪白山组(图 2)。

咸水湖组位于中蒙边境圆包山岩浆弧内,主要为中基性—酸性火山岩夹正常碎屑岩,火山岩主体为一套玄武岩—玄武安山岩—安山岩—流纹岩及同成分的火山碎屑岩、火山碎屑熔岩,百合山北部地区的咸水湖组流纹质晶屑凝灰岩和流纹岩指示其形成时代为早—中奥陶世(陈智斌等,2020)。

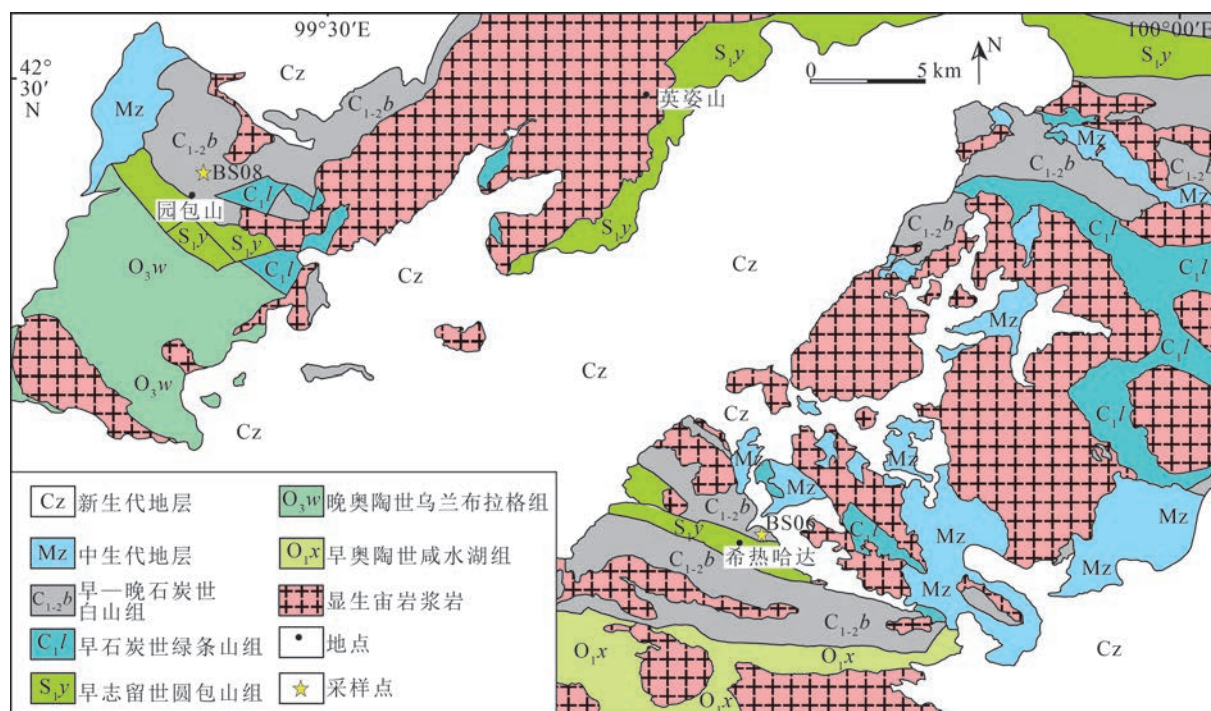


图 2 内蒙古北山造山带北部圆包山—希热哈达地区地质简图及采样位置

Fig. 2 Generalized geological map and sampling locations in the Yuanbaoshan-Xirehada area in the northern Beishan orogenic collage, Inner Mongolia

圆包山组位于西伯利亚南部陆缘增生带石板井—小黄山蛇绿岩带以北,该地层属浅海相沉积,岩石组合为中细粒砂岩和粉砂岩,夹泥页岩及少量灰岩透镜体(陈圆圆等,2019)。关于地层时代,前人曾在希热哈达一带圆包山组中发现了单列笔石(*Stimulograptus Sedgwickii*),指示地层形成于早志留世(辛后田等,2020)。另外,前人在内蒙古阿拉善圆包山组中发现早志留世 *Demirastrites*。(半耙笔石)、*Torquigraptus*。(扭曲笔石)(王挨顺等,2019),以及在阿拉善北部杭乌拉地区圆包山组开展的碎屑锆石测年结果将圆包山组的地层时代置于早志留世至早泥盆世(尹海权等,2015;2017)。

绿条山组位于北山北部红石山和黑鹰山地区,该组下部岩性主要为细粒杂砂岩夹砾岩、灰岩,上部岩性主要为千枚状板岩、千枚岩和斜长流纹岩,地层形成于早石炭世—晚石炭世早期(牛亚卓等,2014)。

白山组广泛分布于内蒙古北山地区红石山—百合山—额勒根乌兰乌拉 SSZ 型蛇绿混杂岩带南北两

侧。白山组火山岩以安山岩、英安岩、流纹岩和同成分的火山碎屑岩为主,局部含火山角砾岩(黄增保等,2006a;卢进才等,2018)。地层形成于早石炭世—晚石炭世(程海峰等,2022),而目前关于地层时代的上限仍没有很好地限制,且位于圆包山—希热哈达地区的白山组研究较少。

2 样品描述

在内蒙古北山造山带北部圆包山—希热哈达地区白山组采集了 2 件火成岩样品,分别为安山岩(BS06)和含角砾花岗斑岩(BS08)(图 2)。

安山岩(图 3-a,b):灰绿色,斑状结构,块状构造。岩石由斑晶和基质组成。斑晶由斜长石(20%)和少量角闪石(5%)组成,粒度 0.2~2 mm,少量 2~4.5 mm。斜长石大多为半自形板状,杂乱分布,少数呈聚斑或联斑状,局部见环带结构;角闪石呈半自形柱状、柱粒状,均被碳酸盐、绿泥石、铁质交代呈假象,零星分布。基质由斜长石(70%)和暗色矿物(5%)组成,斜长石呈半自形板条状,粒度一般小于 0.2 mm,似交织状分布;暗色矿物呈他形

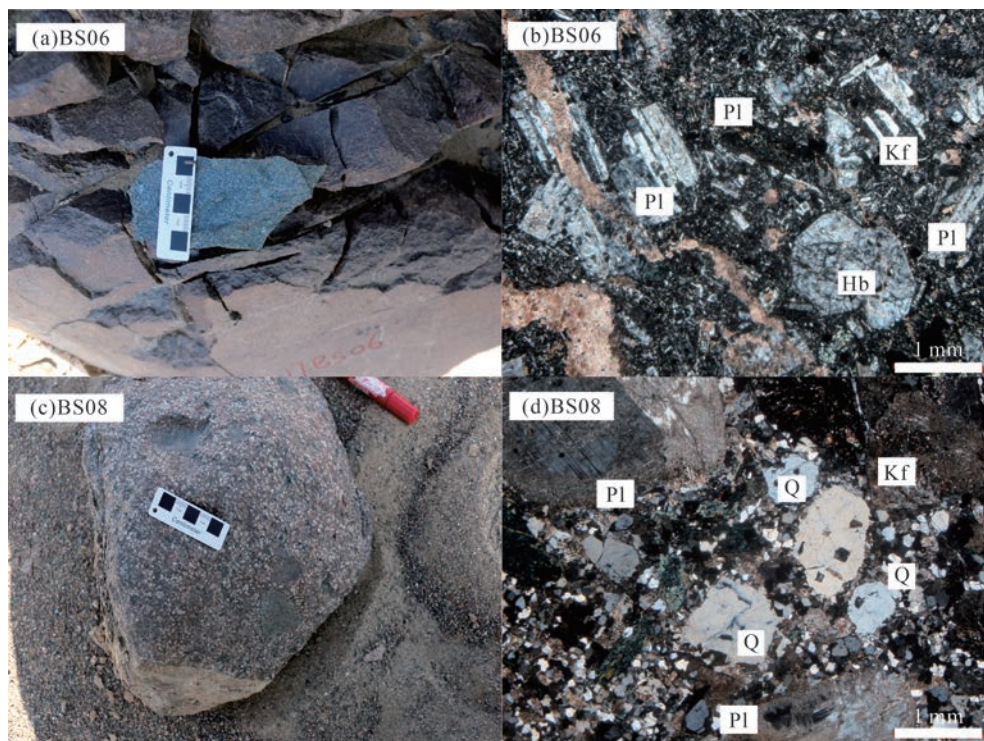


图3 内蒙古北山造山带北部白山组火山岩野外露头 and 显微照片

Fig. 3 Field outcrop and microphotographs of volcanic rocks from the Baishan Formation in the northern Beishan orogenic collage, Inner Mongolia

a—安山岩野外照片;b—安山岩显微照片(正交偏光);c—含角砾花岗斑岩野外照片;d—含角砾花岗斑岩显微照片(正交偏光)。Q—石英;Pl—斜长石;Kf—钾长石;Hb—角闪石

粒状,均被绿泥石、碳酸盐交代呈假象,以填隙状分布于斜长石粒间。

含角砾花岗斑岩(图3-c、d):灰红色,斑状结构;基质微晶结构,块状构造。岩石由斑晶(50%)、基质(40%)和角砾(10%)组成。斑晶主要为斜长石(25%)、钾长石(10%)、石英(10%)、黑云母(5%),粒度0.2~2 mm,少量2~5 mm。斜长石主要呈半自形板状,杂乱分布,部分呈聚斑或联斑状;钾长石主要为正长石,具高岭土化、碳酸盐化、绿帘石化等;石英呈他形粒状,表面较干净,多呈熔蚀状、港湾状等,边缘多与钾长石呈文象状交生;黑云母呈片状,均被绿泥石、绿帘石、碳酸盐交代呈假象。基质主要由长英质和少量黑云母组成,部分长英质呈微晶状,粒度小于0.2 mm,杂乱分布;黑云母呈鳞片状,均被绿泥石、绿帘石交代呈假象,零星分布。角砾主要呈团块状,粒度2~11 mm,杂乱分布,主要成分为花岗岩、细粒闪长岩等,部分被碳酸盐交代。

3 样品测试方法

3.1 锆石 U-Pb 同位素测试

样品的锆石挑选工作完成于河北区域地质矿产调查研究所实验室。样品经过常规粉碎淘洗并通过磁选及重液分离工序,在双目镜下手工挑选纯度高于99%的锆石。锆石制靶和透射光、反射光、阴极发光照相等工作在北京锆年领航科技有限公司完成。锆石定年在中国地质调查局天津地质调查中心完成。采用激光剥蚀多接收等离子体质谱仪(LA-ICP-MS)进行锆石微区原位定年分析,仪器由美国ESI公司的NEW WAVE 193nm FX激光器和美国赛默飞世尔公司的NEPTUNE质谱仪组成。激光束斑直径为35 μm ,频率8~10 Hz,激光器能量密度13~14 J/cm²,以氦气作为剥蚀物质的载气(Yuan et al., 2004)。采用GJ-1作为外部锆石年龄标准进行U-Pb同位素分馏校正,利用NIST610玻璃标样为外标计算锆石样品的Pb、U、Th含量。

数据处理采用 ICPMSDataCal 程序 (Liu et al., 2010), U-Pb 谐和图及加权平均年龄计算采用 Isoplot 4.15 程序 (Ludwig, 2003)。

3.2 岩石地球化学测试

样品的碎样工作在河北省区域地质矿产调查研究所实验室完成,首先选择新鲜样品,去除风化表皮并用破碎机粉碎,再用球磨机研磨至 200 目的粉末状。样品的主量和微量元素测试分析完成于中国地质调查局天津地质调查中心。主量元素测定采用硼酸锂熔融消解和 X 射线荧光光谱法 (XRF),分析偏差优于 1%。微量和稀土元素采用四酸消解和等离子质谱综合分析 (ICP-MS),分析偏差优于 5%。

4 分析结果

4.1 锆石年龄

安山岩样品 (BS06) 和含角砾花岗斑岩样品 (BS08) 的锆石 U-Pb 年龄测试结果见表 2。

安山岩样品 (BS06) 锆石为长柱状、短柱状、半晶形—自形晶形,长宽比为 1.5:1~3:1;在锆石阴极发光图像中,该组锆石具有明暗相间的条带结构和典型的韵律环带结构 (图 4-a)。本次共测试了 32 个测点,测试结果表明,锆石具有较高的 Th ($29 \times 10^{-6} \sim 598 \times 10^{-6}$)、U ($115 \times 10^{-6} \sim 967 \times 10^{-6}$) 含量, Th/U 值均位于 0.20~1.14 之间,属于岩浆锆石。所有测点的年龄值较谐和一致, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值较集中 (296~322 Ma),其年龄加权平均值为 300.0 ± 2.5 Ma (MSWD=2.0, $n=13$) (图 5-a、b),代表了安山岩的成岩年龄,时代为晚石炭世。

含角砾花岗斑岩样品 (BS08) 锆石为长柱状、短柱状,半自形—自形晶体,长宽比为 1.5:1~3:1。在锆石阴极发光图像中,该组锆石具有典型的岩浆韵律环带结构 (图 4-b)。本次有效测试点共 23 个,测试结果表明,锆石具有较高的 Th ($32 \times 10^{-6} \sim 93 \times 10^{-6}$) 和 U ($110 \times 10^{-6} \sim 221 \times 10^{-6}$) 含量, Th/U 值均位于 0.29~0.45 之间,属于岩浆锆石。所有测点的年龄值较谐和一致, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值较集中 (290~307 Ma),其年龄加权平均值为 300.3 ± 1.9 Ma (MSWD=1.9, $n=23$) (图 5-c、d),代表了含角砾花岗斑岩的成岩年龄,时代为晚石炭世。

4.2 全岩化学元素分析

采集的安山岩样品 (BS06) 和含角砾花岗斑岩样品 (BS08) 的主量和微量元素分析结果见表 3。

4.2.1 主量元素

安山岩样品 (BS06) SiO_2 含量为 55.9%~57.66%, Na_2O 含量为 4.13%~4.29%, K_2O 含量为 0.86%~1.33%, ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$) 含量为 5.13%~5.46%, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 值为 3.11~4.97, 相对富钠贫钾, 在 $\text{SiO}_2-(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ 图 (图 6-a) 中表现为安山岩的特征; 在 $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}$ 图解 (图 6-b) 中, 样品主要落在钙碱性系列区域; Al_2O_3 含量为 16.93%~17.86%, 平均值为 17.24%, 属高铝火山岩; CaO 含量为 5.09%~5.87%, 平均值为 5.48%; TFe_2O_3 含量为 7.10%~7.90%, 平均值为 7.43%; MnO 含量为 0.13%~0.15%, 平均值为 0.14%; P_2O_5 含量为 0.19%。

含角砾花岗斑岩样品 (BS08) SiO_2 含量为 66.13%~67.51%, Na_2O 含量为 4.43%~4.50%, K_2O 含量为 2.16%~2.58%, ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$) 含量为 6.66%~7.06%, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 值为 1.74~2.08, 相对富钠贫钾, 在 $\text{SiO}_2-(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ 图解 (图 6-a) 中表现为英安岩的特征。在 $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}$ 图解 (图 6-b) 中, 样品点主要落在钙碱性系列区域; Al_2O_3 含量为 14.72%~15.17%, 平均值为 14.96%, 属高铝火山岩, 在 A/CNK-A/NK 图解 (图 7-a) 中显示为准铝质; CaO 含量为 2.72%~3.25%, 平均值为 2.93%; TFe_2O_3 含量为 4.06%~4.85%, 平均值为 4.36%; MnO 含量为 0.11%~0.13%, 平均值为 0.12%; P_2O_5 含量约为 0.11%。

4.2.2 微量元素

安山岩样品 (BS06) 稀土元素总量 (ΣREE) 介于 $72.41 \times 10^{-6} \sim 76.14 \times 10^{-6}$ 之间, 平均值为 74.53×10^{-6} 。在球粒陨石标准化稀土元素配分模式图 (Boynton, 1984) (图 8-a) 中, 配分曲线整体形式较一致, 显示轻稀土元素相对富集和重稀土元素亏损的右倾分布形式, 轻稀土元素分馏相对明显, 重稀土元素分馏不明显, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 3.19 \sim 3.33$, 平均值为 3.25。Eu 异常整体不明显, $\delta\text{Eu} = 0.94 \sim 0.97$, 平均值为 0.96。在原始地幔标准化微量元素蛛网图 (Sun et al., 1989) (图 8-b) 中, 整体显示富集 Ba、K、Sr 等大离子亲石元素, 亏损 Nb、Th、P、Ti 等高场强元素的特点。

表 2 内蒙古北山造山带北部白山组火山岩锆石 U-Th-Pb 分析结果
Table 2 Zircon U-Th-Pb data for volcanic rocks from the Baishan Formation
in the northern Beishan orogenic collage, Inner Mongolia

测点	Th / 10^{-6}	U / 10^{-6}	Th/U	同位素比值						年龄/Ma						不谐和 度/%
				$^{207}\text{Pb}/$ ^{206}Pb	1σ	$^{207}\text{Pb}/$ ^{235}U	1σ	$^{206}\text{Pb}/$ ^{238}U	1σ	$^{207}\text{Pb}/$ ^{206}Pb	1σ	$^{207}\text{Pb}/$ ^{235}U	1σ	$^{206}\text{Pb}/$ ^{238}U	1σ	
BS06.01	226	951	0.24	0.0552	0.0008	0.3756	0.0061	0.0493	0.0006	422	32	324	5	310	3	26
BS06.02	124	347	0.37	0.0526	0.0011	0.3654	0.0080	0.0504	0.0005	311	47	316	7	317	3	-2
BS06.03	129	235	0.56	0.0549	0.0011	0.5131	0.0114	0.0678	0.0007	407	47	421	9	423	5	-4
BS06.04	131	338	0.40	0.0531	0.0010	0.3743	0.0075	0.0511	0.0005	334	43	323	6	321	3	4
BS06.05	44	135	0.33	0.0522	0.0027	0.3612	0.0187	0.0502	0.0006	292	117	313	16	316	4	-8
BS06.06	99	238	0.43	0.0550	0.0015	0.3767	0.0107	0.0497	0.0005	410	63	325	9	313	3	24
BS06.07	55	153	0.37	0.0535	0.0025	0.3761	0.0179	0.0510	0.0005	349	106	324	15	321	3	8
BS06.08	55	176	0.32	0.0525	0.0022	0.3649	0.0159	0.0504	0.0006	308	97	316	14	317	4	-3
BS06.09	143	387	0.38	0.0540	0.0020	0.3777	0.0140	0.0508	0.0006	369	81	325	12	319	4	14
BS06.10	58	140	0.42	0.0546	0.0020	0.3834	0.0140	0.0509	0.0005	397	81	330	12	320	3	19
BS06.11	44	140	0.32	0.0519	0.0020	0.3629	0.0147	0.0508	0.0006	280	90	314	13	319	4	-14
BS06.12	59	190	0.32	0.0542	0.0015	0.3777	0.0106	0.0505	0.0005	380	61	325	9	318	3	16
BS06.13	121	181	0.69	0.0528	0.0019	0.3711	0.0144	0.0509	0.0006	322	83	320	12	320	3	1
BS06.14	128	394	0.33	0.0541	0.0010	0.3786	0.0073	0.0508	0.0005	375	40	326	6	319	3	15
BS06.15	58	156	0.38	0.0543	0.0023	0.3710	0.0163	0.0495	0.0005	385	97	320	14	312	3	19
BS06.16	211	290	0.75	0.0546	0.0017	0.3630	0.0115	0.0482	0.0005	397	70	314	10	303	3	23
BS06.17	364	967	0.39	0.0532	0.0007	0.3452	0.0052	0.0471	0.0005	337	31	301	5	297	3	12
BS06.18	316	285	1.14	0.0531	0.0015	0.3554	0.0101	0.0485	0.0005	335	63	309	9	305	3	9
BS06.19	215	513	0.43	0.0529	0.0012	0.3424	0.0080	0.0469	0.0005	326	52	299	7	296	3	9
BS06.20	33	148	0.23	0.0535	0.0023	0.3506	0.0154	0.0476	0.0005	349	99	305	13	299	3	14
BS06.21	87	465	0.19	0.0537	0.0012	0.3504	0.0104	0.0473	0.0005	358	50	305	9	298	3	17
BS06.22	98	330	0.30	0.0531	0.0012	0.3564	0.0087	0.0487	0.0005	332	53	310	8	306	3	8
BS06.23	73	276	0.27	0.0533	0.0015	0.3423	0.0097	0.0466	0.0005	340	62	299	8	294	3	14
BS06.24	34	152	0.23	0.0534	0.0019	0.3561	0.0129	0.0484	0.0005	346	81	309	11	304	3	12
BS06.25	170	223	0.78	0.0534	0.0033	0.3769	0.0241	0.0512	0.0005	344	142	325	21	322	3	6
BS06.26	101	457	0.23	0.0525	0.0015	0.3399	0.0099	0.0469	0.0005	308	65	297	9	296	3	4
BS06.27	63	190	0.34	0.0541	0.0016	0.3714	0.0111	0.0497	0.0005	377	65	321	10	313	3	17
BS06.28	598	859	0.71	0.0530	0.0007	0.3498	0.0051	0.0479	0.0005	327	30	305	4	302	3	8
BS06.29	30	153	0.20	0.0533	0.0022	0.3523	0.0151	0.0480	0.0005	340	96	306	13	302	3	11
BS06.30	29	115	0.26	0.0534	0.0026	0.3493	0.0170	0.0474	0.0005	346	109	304	15	299	3	14
BS06.31	45	137	0.33	0.0528	0.0030	0.3722	0.0215	0.0512	0.0005	318	129	321	19	322	3	-1
BS06.32	43	155	0.29	0.0525	0.0020	0.3693	0.0143	0.0511	0.0005	306	86	319	12	321	3	-5
BS08.01	93	221	0.43	0.0526	0.0010	0.3466	0.0071	0.0478	0.0005	313	43	302	6	301	3	4
BS08.02	42	141	0.30	0.0532	0.0013	0.3523	0.0092	0.0480	0.0005	338	57	306	8	302	3	11
BS08.03	81	201	0.41	0.0516	0.0010	0.3446	0.0069	0.0485	0.0005	266	43	301	6	305	3	-15

续表 2

测点	Th / 10^{-6}	U / 10^{-6}	Th/U	同位素比值						年龄/Ma						不谐和 度/%
				$^{207}\text{Pb}/$ ^{206}Pb	1σ	$^{207}\text{Pb}/$ ^{235}U	1σ	$^{206}\text{Pb}/$ ^{238}U	1σ	$^{207}\text{Pb}/$ ^{206}Pb	1σ	$^{207}\text{Pb}/$ ^{235}U	1σ	$^{206}\text{Pb}/$ ^{238}U	1σ	
BS08.04	46	123	0.38	0.0524	0.0014	0.3498	0.0098	0.0484	0.0005	302	61	305	9	305	3	-1
BS08.05	35	110	0.33	0.0533	0.0018	0.3527	0.0121	0.0480	0.0005	341	76	307	11	302	3	11
BS08.06	85	194	0.45	0.0537	0.0011	0.3608	0.0076	0.0488	0.0005	357	44	313	7	307	3	14
BS08.07	37	123	0.31	0.0525	0.0015	0.3511	0.0104	0.0485	0.0005	308	65	306	9	305	3	1
BS08.09	67	180	0.38	0.0542	0.0013	0.3604	0.0142	0.0482	0.0006	379	53	313	12	304	4	20
BS08.10	56	161	0.36	0.0542	0.0022	0.3610	0.0149	0.0483	0.0005	380	91	313	13	304	3	20
BS08.11	37	113	0.33	0.0535	0.0026	0.3514	0.0177	0.0477	0.0005	349	112	306	15	300	3	14
BS08.12	46	132	0.36	0.0525	0.0029	0.3401	0.0186	0.0470	0.0005	308	125	297	16	296	3	4
BS08.13	56	156	0.37	0.0530	0.0013	0.3433	0.0090	0.0470	0.0005	330	57	300	8	296	3	10
BS08.14	72	201	0.37	0.0549	0.0016	0.3490	0.0108	0.0461	0.0005	410	66	304	9	290	3	29
BS08.15	45	152	0.31	0.0541	0.0013	0.3476	0.0084	0.0466	0.0005	375	52	303	7	294	3	22
BS08.16	53	153	0.36	0.0524	0.0015	0.3448	0.0100	0.0477	0.0005	305	63	301	9	300	3	2
BS08.17	42	148	0.29	0.0537	0.0030	0.3536	0.0200	0.0478	0.0005	359	124	307	17	301	3	16
BS08.18	47	154	0.31	0.0534	0.0022	0.3481	0.0147	0.0473	0.0005	346	93	303	13	298	3	14
BS08.19	40	121	0.33	0.0525	0.0019	0.3478	0.0132	0.0481	0.0005	306	84	303	12	303	3	1
BS08.20	58	158	0.38	0.0528	0.0013	0.3476	0.0087	0.0477	0.0005	322	54	303	8	301	3	7
BS08.21	32	113	0.29	0.0525	0.0031	0.3502	0.0213	0.0484	0.0006	308	135	305	19	305	4	1
BS08.22	81	197	0.42	0.0538	0.0013	0.3575	0.0089	0.0482	0.0005	362	54	310	8	304	3	16
BS08.23	44	127	0.36	0.0550	0.0018	0.3554	0.0123	0.0469	0.0005	413	75	309	11	295	3	28
BS08.24	35	114	0.31	0.0541	0.0014	0.3541	0.0097	0.0475	0.0005	376	59	308	8	299	3	20

注:不谐和度是为了确定 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄之间的误差及是否有 Pb 丢失的影响,一般不谐和度为 $\pm 50\%$,认为锆石年龄是可靠的。不谐和度($\%$)= $(^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb age} - ^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U age})/^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb age} \times 100$ 。 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄均为样品 U-Pb 年龄测试值

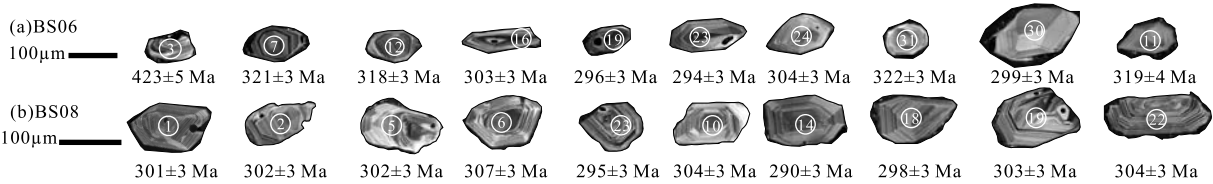


图 4 内蒙古北山造山带北部白山组火山岩代表性锆石阴极发光图像及年龄

Fig. 4 Cathodoluminescence images and dating of selected zircons from volcanic rocks of the Baishan Formation in the northern Beishan orogenic collage, Inner Mongolia

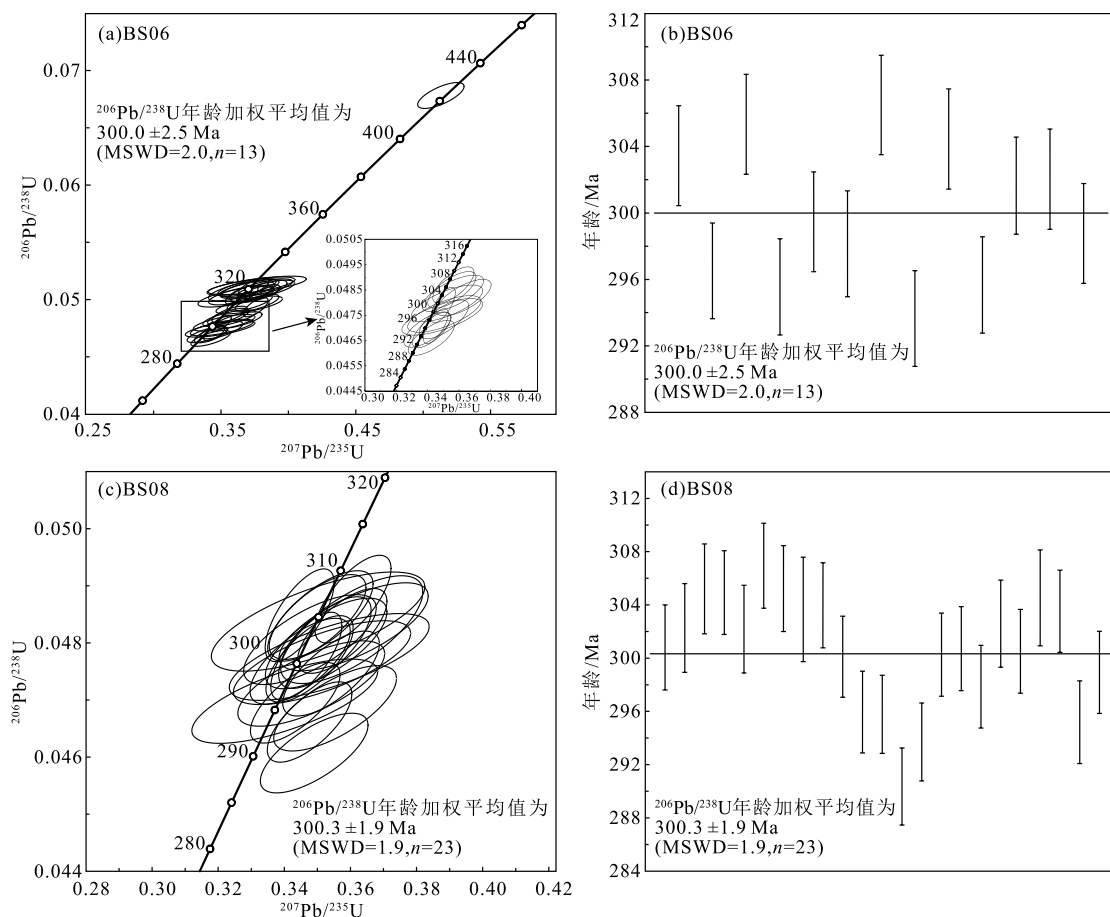


图 5 内蒙古北山造山带北部白山组火山岩锆石 U-Pb 年龄谐和图(a、c)与年龄加权平均值(b、d)

Fig. 5 Zircon U-Pb concordia diagrams(a, c) and weighted mean ages(b, d) of volcanic rocks from the Baishan Formation in the northern Beishan orogenic collage, Inner Mongolia

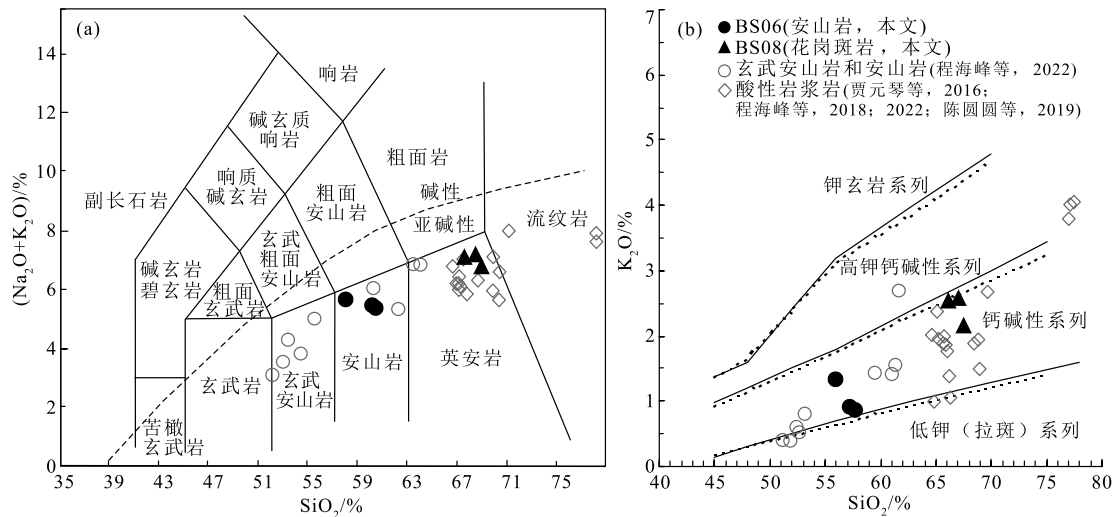


图 6 内蒙古北山造山带北部白山组火山岩 TAS 图解(a)和 SiO_2 - K_2O 图解(b)

(图 a 底图据 Irvine et al., 1971; Le Bas et al., 1986; 图 b 底图据 Peccerillo et al., 1976; Rickwood, 1989)

Fig. 6 Total alkali-silica (TAS) diagram(a) and SiO_2 - K_2O plots(b) for volcanic rocks from the Baishan Formation in the northern Beishan orogenic collage, Inner Mongolia

表 3 内蒙古北山造山带北部白山组火山岩主量、微量和稀土元素分析结果
Table 3 Major, trace and rare earth elements compositions of volcanic rocks from the Baishan
Formation in the northehrn Beishan orogenic collage, Inner Mongolia

元素	BS06-1	BS06-2	BS06-3	BS08-1	BS08-2	BS08-3	元素	BS06-1	BS06-2	BS06-3	BS08-1	BS08-2	BS08-3
	安山岩			花岗斑岩				安山岩			花岗斑岩		
SiO ₂	57.18	55.90	57.66	67.04	66.13	67.51	Li	28.9	21.2	29.2	24.7	23.7	20.7
TiO ₂	0.80	0.90	0.80	0.51	0.58	0.50	Cs	0.83	0.54	0.76	1.25	1.21	0.63
Al ₂ O ₃	16.93	17.86	16.93	15.17	15.00	14.72	Be	0.87	1.00	0.88	1.32	1.29	1.25
TFe ₂ O ₃	7.10	7.90	7.30	4.17	4.85	4.06	Ga	16.5	17.6	16.0	16.4	16.4	15.9
MnO	0.15	0.13	0.14	0.11	0.13	0.11	Cu	18.8	23.6	20.0	5.81	6.30	5.57
MgO	2.68	2.74	2.79	1.32	1.80	1.38	Pb	4.46	4.74	5.53	6.95	9.16	7.33
CaO	5.47	5.87	5.09	2.81	2.72	3.25	Zn	61.9	69.2	64.8	44.1	49.1	39.9
Na ₂ O	4.29	4.13	4.27	4.48	4.43	4.50	Bi	0.04	0.06	0.04	0.01	0.03	0.03
K ₂ O	0.91	1.33	0.86	2.58	2.54	2.16	La	11.2	11.8	11.0	11.0	11.7	11.4
P ₂ O ₅	0.19	0.19	0.19	0.11	0.12	0.11	Ce	25.9	25.0	25.0	24.0	26.8	25.6
烧失量	4.09	2.88	3.79	1.52	1.54	1.47	Pr	3.48	3.60	3.43	3.64	4.25	3.90
总和	99.79	99.83	99.82	99.82	99.84	99.77	Nd	15.4	15.8	15.0	16.5	19.2	18.0
Mg [#]	0.43	0.41	0.43	0.39	0.42	0.40	Sm	3.60	3.68	3.38	4.20	5.03	4.72
Rb	17.70	25.50	15.80	46.30	44.00	37.30	Eu	1.14	1.22	1.10	1.16	1.11	1.15
Sr	553	636	544	337	219	291	Gd	3.83	4.00	3.65	4.75	5.38	5.07
Ba	449	524	454	720	765	630	Tb	0.63	0.66	0.60	0.80	0.94	0.89
Th	2.63	2.46	2.49	5.60	5.30	5.70	Dy	3.80	3.99	3.56	5.07	6.05	5.61
U	1.24	1.11	1.22	1.97	1.91	2.09	Ho	0.77	0.82	0.73	1.04	1.24	1.16
Nb	3.05	3.06	3.01	4.43	5.13	4.56	Er	2.20	2.36	2.06	3.06	3.64	3.38
Ta	0.26	0.26	0.26	0.36	0.41	0.39	Tm	0.35	0.36	0.32	0.48	0.56	0.53
Zr	118	118	117	163	191	167	Yb	2.37	2.46	2.23	3.29	3.83	3.66
Hf	3.53	3.50	3.37	5.24	5.87	5.42	Lu	0.38	0.39	0.35	0.52	0.62	0.58
Co	16.5	18.9	16.8	6.76	8.32	6.47	Y	21.40	22.20	19.50	28.60	33.40	31.90
Ni	5.15	7.31	5.04	3.00	11.80	2.98	ΣREE	75.05	76.14	72.41	79.51	90.35	85.65
Cr	3.14	6.09	2.76	4.59	24.10	5.29	(La/Yb) _N	3.19	3.23	3.33	2.25	2.06	2.10
V	129	156	136	60.9	72.7	61.5	Eu/Eu [*]	0.94	0.97	0.96	0.79	0.65	0.72
Sc	7.90	10.80	8.02	9.85	11.0	8.1							

注:主量元素含量单位为%;稀土和微量元素含量单位为 10⁻⁶。Mg[#]= molar Mg/(Mg + Fe);Eu/Eu^{*} = Eu_N/(Sm_N × Gd_N)^{1/2}

含角砾花岗斑岩样品(BS08)ΣREE 介于 79.51×10⁻⁶~90.35×10⁻⁶之间,平均值为 85.17×10⁻⁶。在球粒陨石标准化稀土元素配分模式图(Boynton, 1984)(图 8-c)中,配分曲线整体形式较一致,显示轻稀土元素相对富集、重稀土元素亏损的右倾分布形式,轻稀土元素分馏相对明显,重稀土元素分馏不明显,(La/Yb)_N=2.06~2.25,平均值为 2.14。具有弱负 Eu 异常,δEu=0.65~0.79,平均值为 0.72。在

原始地幔标准化微量元素蛛网图(Sun et al., 1989)(图 8-d)中,整体显示富集 Ba、K、Sr 等大离子亲石元素,亏损 Nb、Th、P、Ti 等高场强元素的特点。

5 讨 论

5.1 地层形成时代

本文在内蒙古北山造山带北部白山组 2 个火山岩样品中,获取的锆石为韵律环带结构,其 Th/U 值

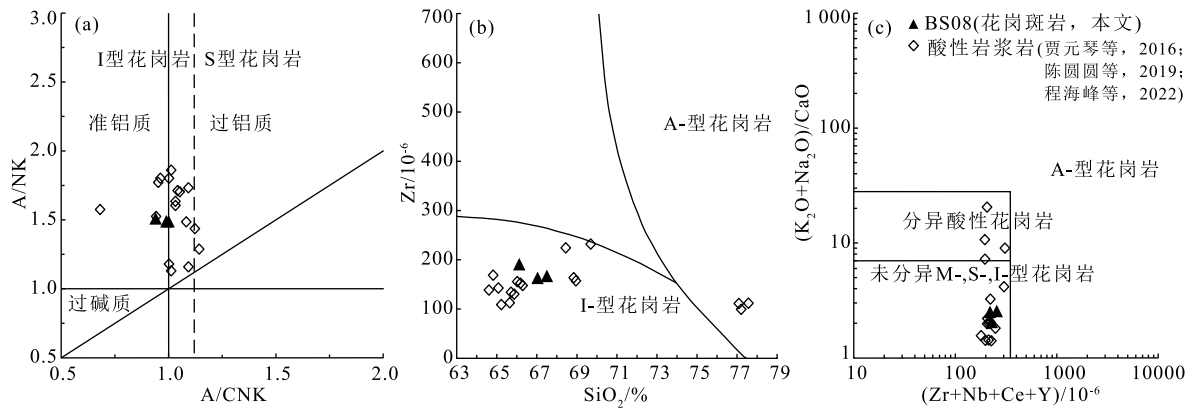


图7 内蒙古北山造山带北部白山组花岗斑岩 A/CNK-A/NK 图解(a)、 SiO_2 -Zr 图解(b)和 $(\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y})-(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})/\text{CaO}$ 图解(c) (图a底图据 Maniar et al., 1989; 图b底图据 Collins et al., 1982; 图c底图据 Whalen et al., 1987)

Fig. 7 A/CNK-A/NK (a), SiO_2 -Zr (b) and $(\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y})-(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})/\text{CaO}$ (c) plots for granite porphyry from the Baishan Formation in the northern Beishan orogenic collage, Inner Mongolia

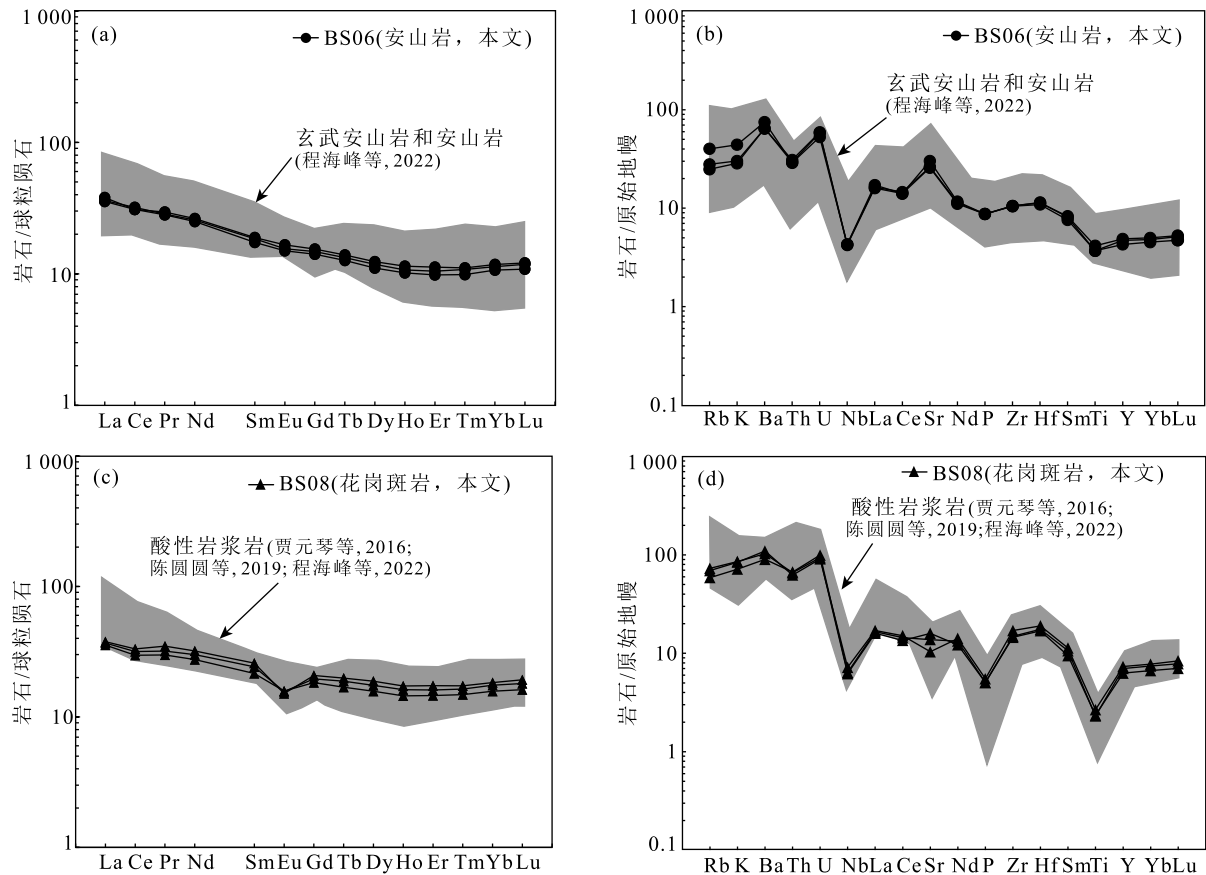


图8 内蒙古北山造山带北部白山组火山岩球粒陨石标准化稀土元素配分模式图(a、c)

和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b、d)

(标准化球粒陨石数据据 Boynton, 1984; 原始地幔数据据 Sun et al., 1989)

Fig. 8 Chondrite-normalized REE distribution patterns (a, c) and primitive mantle-normalized trace element patterns (b, d) of volcanic rocks from the Baishan Formation in the northern Beishan orogenic collage, Inner Mongolia

均大于 0.1, 显示为岩浆成因, 因此 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄代表岩浆岩的形成时代。根据锆石 U-Pb 测年, 安山岩 (BS06) 和含角砾花岗斑岩 (BS08) 样品的年龄值分别为 300.0 ± 2.5 Ma (MSWD = 2.0, $n=13$) 和 300.3 ± 1.9 Ma (MSWD = 1.9, $n=23$) (图 5), 年龄谐和度较高, 表明其形成时代为晚石炭世。

前人在内蒙古北山造山带北部白山组获得了大量可靠的石炭纪地层年龄 (表 1)。陈圆圆等 (2019) 在圆包山地区获得英安质凝灰岩的锆石年龄为 315.9 ± 3.4 Ma。任云伟等 (2019) 在哈珠地区获得安山岩、英安岩、流纹岩的锆石年龄分别为 325.6 ± 1.4 Ma、 313.5 ± 3.4 Ma、 314.7 ± 1.7 Ma, 表明北山北部地区的晚古生代火山活动从早石炭世已经开始。牛亚卓等 (2013) 在黑鹰山地区的黑鹰山、哈珠南白山组的火山岩中获取的同位素年龄分别为 308.6 ± 1.0 Ma 和 299.1 ± 2.4 Ma。卢进才等 (2013) 在黑鹰山、蓬勃山、六驼山和哈珠南等剖面“白山组”火山岩中获得的锆石同位素年龄分布范围为 $297.6 \pm 1.3 \sim 318.5 \pm 4.8$ Ma。邹运鑫等 (2015) 将分布于六陀山地区的中酸性火山碎屑岩夹正常沉积碎屑岩组合归于白山组, 测得的锆石 U-Pb 年龄为 310.86 ± 0.86 Ma。贾元琴等 (2016) 和陈海东等 (2017) 获得风雷山白山组流纹岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 318.5 ± 1.2 Ma。辛后田等 (2020) 在大红山、标山、千条沟等地区白山组火山岩中获得的锆石 U-Pb 年龄大多集中在 320~298 Ma 之间, 包括中基性火山活动时限 315~327 Ma 和英安岩-流纹岩类火山岩活动时限 320~298 Ma, 表明从早石炭世晚期到晚石炭世末白山组火山活动一直在持续, 并以中酸性火山岩活动最强烈。程海峰等 (2022) 在黑红山地区获得的安山岩、英安质角砾熔岩成岩年龄分别为 342 ± 5.0 Ma、 313 ± 2.9 Ma, 进一步说明北山北部晚古生代火山活动始于早石炭世, 并持续到晚石炭世。

综上所述, 结合前人在北山地区白山组获得的中酸性火山岩的锆石 U-Pb 年龄 (卫彦升等, 2020; 程海峰等, 2022), 本文测年结果清楚地表明, 白山组为一套从早石炭世到晚石炭世持续发育的中酸性火山岩地层。

5.2 岩石成因

白山组安山岩样品 (BS06) 具有较低的 $Mg^\#$ 值

(平均值为 0.42)、Cr ($2.76 \times 10^{-6} \sim 6.09 \times 10^{-6}$)、Ni 含量 ($5.04 \times 10^{-6} \sim 7.31 \times 10^{-6}$), 表明安山岩的岩浆不是原始幔源岩浆, 或是经历了一些岩浆分异作用的产物 (Taylor et al., 1995; Du et al., 2017)。样品 Rb/Sr 平均值为 0.03, 接近地幔比值 0.03 (Taylor et al., 1985), 反映了幔源物质的贡献较大。样品 Nb/Ta 值在 11.6~11.8 之间, 平均值为 11.7, 接近于地壳平均值 (11.4) (Rudnick et al., 2003), 且远低于地幔平均值 (17.4) (Sun et al., 1989), 体现出地壳物质来源为主的特点。另外, 样品 Rb/Nb 值在 5.25~8.33 之间, 平均值为 6.46, 接近地壳平均值 (6.13), 远高于地幔平均值 (0.89); Th/Nb 值在 0.80~0.86 之间, 平均值为 0.83, 接近于地壳平均值 (0.70), 高于地幔平均值 (0.12)。以上研究均支持形成安山岩样品的岩浆主要为地壳物质来源的结论 (表 4)。而大离子亲石元素 Rb/Sr 值较低, 则很可能是由于样品受到了地壳物质混染的影响。Devine (1995) 认为, 俯冲带流体具有丰富的 Ba 元素, 一般高 Ba/Th 值 (>300) 和 Ba/La 值 (>13) 指示俯冲带流体对岩浆源区有较显著的贡献。白山组安山岩的 Ba/Th 值较低 (平均值为 189), Ba/La 值较高 (平均值为 42), 表明俯冲带流体对安山岩的岩浆源区具有一定影响, 俯冲带流体作用于地壳, 使其发生部分熔融形成岛弧岩浆。一般来说, 消减带沉积物熔体具有较高的 Th 含量, 且具有较低的 Ce/Th 值 (≈ 8) 和 Ba/Th 值 (≈ 111) (Plank et al., 1998; 南云, 2018)。白山组安山岩 Ce/Th 平均值为 10.02, Ba/Th 平均值为 189, 均分别高于消减带沉积物熔体的 Ce/Th 值和 Ba/Th 值 (Plank et al., 1998; 南云, 2018), 且没有明显的负 Ce 异常, 表明岩浆源区无沉积物熔体的加入。微量元素 Th-U/Th 图解 (图 9-a) 和 Th-Ba/Th 图解 (图 9-b) (Dilek et al., 2008) 表明, 岩浆源区明显受到俯冲带流体的影响而没有沉积物熔体的加入。安山岩样品的 Th 含量在 $2.46 \times 10^{-6} \sim 2.63 \times 10^{-6}$ 之间, 平均值为 2.53×10^{-6} , 位于中地壳 (6.5×10^{-6}) 与下地壳 (0.42×10^{-6}) (Rudnick et al., 2003) 之间, 表明安山岩的岩浆来源为中下地壳部分熔融的物质。综上所述, 白山组安山岩来源于洋壳俯冲过程中, 俯冲带流体作用于中下地壳并使其部分熔融形成的岩浆, 且含有较多的幔源物质。

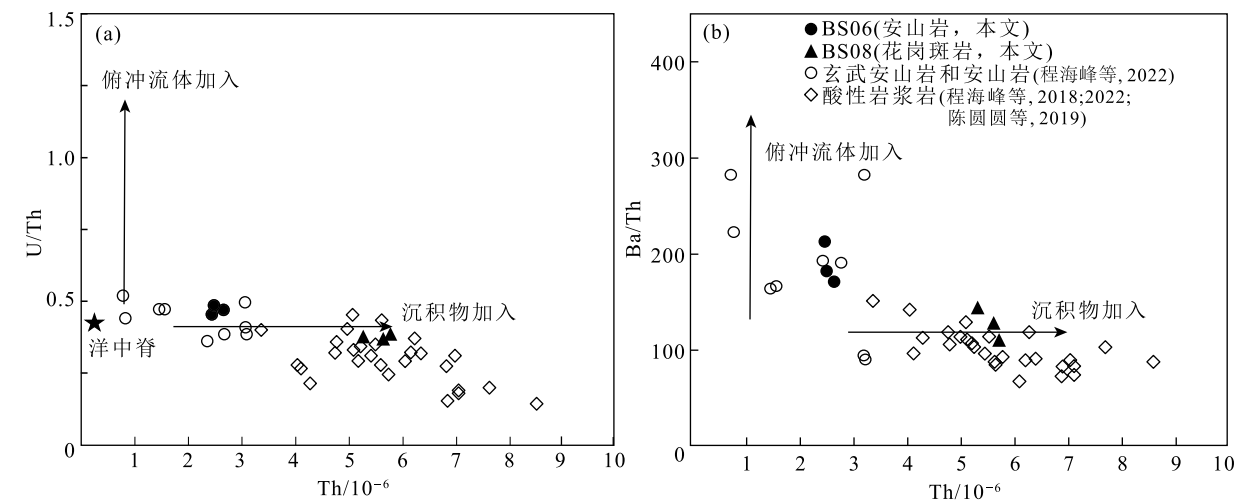


图9 内蒙古北山造山带北部白山组火山岩 Th-U/Th 图解(a)和 Th-Ba/Th 图解(b) (底图据 Dilek et al.,2008)

Fig. 9 Th-U/Th(a) and Th-Ba/Th(b) plots of volcanic rocks from the Baishan Formation in the northern Beishan orogenic collage, Inner Mongolia

表4 内蒙古北山造山带北部白山组安山岩 (BS06) 和花岗斑岩 (BS08) 微量元素比值

Table 4 Ratios of trace elements of andesite(BS06) and granite porphyry(BS08) from the Baishan Formation in the northern Beishan orogenic collage, Inner Mongolia

微量元素比值	Rb/Sr	La/Nb	Ba/Nb	Ba/Th	Rb/Nb	Th/Nb	Th/La	K/Nb
原始地幔	0.03	0.96	9.80	82.00	0.89	0.12	0.12	351
大陆地壳	0.12	2.50	57.00	81.43	6.13	0.70	0.28	1878
BS06	0.03~0.04	3.65~3.86	147.21~171.24	170.71~213	5.25~8.33	0.80~0.86	0.21~0.23	2371~3608
	(0.03)	(3.73)	(156.43)	(188.68)	(6.46)	(0.83)	(0.22)	(2818)
BS08	0.13~0.20	2.28~2.50	138.16~162.53	110.53~144.34	8.18~10.45	1.03~1.26	0.45~0.51	3932~7114
	(0.16)	(2.42)	(149.94)	(127.81)	(9.07)	(1.18)	(0.49)	(5268)
微量元素比值	Ba/La	Sm/Nd	Ba/Rb	Nb/Ta	Ce/Th	Th/Ce	Th/Ta	
原始地幔	10.20	0.33	11.00	17.40	20.88	0.05	2.07	
大陆地壳	22.80	0.195	9.30	11.40	7.68	0.13	8.00	
BS06	40.09~44.41	0.23	20.55~28.73	11.6~11.8	9.85~10.16	0.10	9.46~10.12	
	(41.92)	(0.23)	(24.88)	(11.70)	(10.02)	(0.10)	(9.72)	
BS08	55.26~65.45	0.25~0.26	15.55~17.39	11.69~12.51	4.29~5.06	0.20~0.23	12.93~15.56	
	(62.03)	(0.26)	(16.61)	(12.17)	(4.61)	(0.22)	(14.37)	

注:白山组每个样品地球化学数据采集和测试的数量为3次,测试数据的两端元为最小值和最大值,其平均值显示到括号里面。原始地幔和大陆地壳的 Rb/Sr 值据 Taylor et al. (1985),原始地幔的元素比值 La/Nb, Ba/Nb, Ba/Th, Rb/Nb, Th/Nb, Th/La, K/Nb, Ba/La, Sm/Nd, Ba/Rb, Nb/Ta, Ce/Th, Th/Ce, Th/Ta 据 Sun et al. (1989),大陆地壳的元素比值 La/Nb, Ba/Nb, Ba/Th, Rb/Nb, Th/Nb, Th/La, K/Nb, Ba/La, Sm/Nd, Ba/Rb, Nb/Ta, Ce/Th, Th/Ce, Th/Ta 据 Rudnick et al. (2003)

白山组含角砾花岗斑岩样品 (BS08) 的 Rb/Sr 值为 0.13~0.20,平均值为 0.16,远大于地幔平均值 0.03(Taylor et al.,1985),且高于全球地壳平均值 0.12(Taylor et al.,1985),反映地壳物质来源为主要的特

点。Nb/Ta 值在 11.69~12.51 之间,平均值为 12.17,介于地壳平均值 (11.4) (Rudnick et al.,2003)和地幔平均值 (17.5) (Sun et al.,1989) 之间,反映了以地壳物质来源为主和壳幔混源的特点。

另外,Sm/Nd 值在 0.25~0.26 之间,高于陆壳平均值 0.195(Rudnick et al., 2003);Ba/La 值在 55.26~65.45 之间,高于陆壳 Ba/La 平均值 22.8(Rudnick et al., 2003)。以上特征表明,样品岩浆成分以壳源物质为主,并混有一定幔源物质。白山组含角砾花岗斑岩 Ce/Th 平均值为 4.61,低于消减带沉积物熔体的 Ce/Th 值(Plank et al., 1998;南云, 2018),且有明显的 Ce 负异常,表明岩浆源区受到沉积物熔体的加入影响。微量元素 Th-U/Th(图 9-a)和 Th-Ba/Th 图解(图 9-b)(Dilek et al., 2008)表明,岩浆源区受到沉积物熔体的加入制约而没有受到俯冲带流体的影响。A 型花岗岩往往具有较高的 Zr、Nb、Ce、Y,而本文含角砾花岗斑岩 Zr、Nb、Ce,以及 Zr+Nb+Ce+Y 含量均低于 A 型花岗岩下限值($Zr=250\times 10^{-6}$, $Nb=35\times 10^{-6}$, $Ce=148\times 10^{-6}$, $Zr+Nb+Ce+Y=350\times 10^{-6}$)(Whalen et al., 1987),主要显示 I 型花岗岩特征(Collins et al., 1982; Whalen et al., 1987; Maniar et al., 1989)(图 7)。上述岩石地球化学特征说明,形成含角砾花岗斑岩的岩浆来自于大陆中下地壳的部分熔融,并混有一定量的幔源物质,且有沉积物熔体的加入,与安山岩成因存在一定联系。

综上所述表明,晚石炭世白山组中酸性火山岩可能为同源岩浆连续演化的产物,岩浆源区性质基本相同,都是中—下地壳物质的部分熔融,且混有一定量的幔源物质,后经过结晶分异作用形成。不同的是,安山岩的幔源物质贡献较大,岩浆源区受到流体作用影响明显而缺少沉积物熔体的加入;含角砾花岗斑岩的幔源物质贡献较小,而岩浆源区明显受到沉积物熔体加入的影响。

5.3 构造环境

前人对于内蒙古北山造山带北部石炭纪构造环境存在较大的争议,主要存在 2 种观点。一种观点认为,北山地区晚古生代火山岩具有双峰式特征,主要形成于裂谷环境(左国朝等, 1990a; 徐学义等, 2008; 卢进才等, 2011; 2013; Niu et al., 2018); 北山地区石炭系—二叠系具有上超与下超的沉积特征和边缘相的沉积,为典型的裂谷盆地(卢进才等, 2011; 2013)。另一种观点认为,北山石炭纪岩浆岩属于古亚洲洋分支洋即红石山洋俯冲形成的岩浆弧,相应形成了活动大陆边缘沉积(何世平等, 2005; 贾元琴等, 2016; 程海峰等, 2018; 2022; 李敏等, 2018; 任云伟等, 2019)。

本文从圆包山—希热哈达地区白山组获得的安山岩和含角砾花岗斑岩具高 Al_2O_3 、低 TiO_2 含量(表 2),富集轻稀土元素和大离子亲石元素,亏损重稀土元素和中高场强元素 Nb、Th、P、Ti(图 8),指示其具有岛弧火成岩的特征(贾元琴等, 2016; 程海峰等, 2018; 李敏等, 2019; 任云伟等, 2019)。在 Sc/Ni-La/Yb 图解(Bailey, 1981; Condie, 1986)(图 10-a)和 Th-La/Yb 图解(Bailey, 1981)(图 10-b)中,3 件安山岩样品数据都落入大陆边缘弧或演化的大洋弧中。在 (Y+Nb)-Rb 图解(Pearce et al., 1984)(图 10-c)中,3 件含角砾花岗斑岩样品数据落在岛弧花岗岩(VAG)区域内。在 SiO_2 -TFeO/(TFeO+MgO)图解(Maniar et al., 1989)(图 10-d)中,含角砾花岗斑岩样品数据落入岛弧花岗岩、大陆弧花岗岩或者大陆碰撞花岗岩区域内。在 Y-Sr/Y 图解(Defant et al., 1990)(图 11)中,含角砾花岗斑岩样品数据大部分落在经典岛弧岩石区域。含角砾花岗斑岩低 Sr($219\times 10^{-6}\sim 337\times 10^{-6}$)、高 Yb($3.29\times 10^{-6}\sim 3.83\times 10^{-6}$)、贫 Al_2O_3 (平均值为 14.96%),属于岛弧火山岩,其特征与俯冲的洋壳部分熔融形成的高 Sr($>400\times 10^{-6}$)、低 Yb($<1.9\times 10^{-6}$)、富 Al_2O_3 ($>15\%$)的埃达克岩特征(Defant et al., 1990)明显不同。以上结果表明,研究区晚石炭世安山岩和含角砾花岗斑岩形成于俯冲背景下的大陆边缘岛弧环境。前人沿着红石山—百合山—额勒根乌兰乌拉蛇绿岩带,从白山组中采集的火山岩样品,也具有岩浆岛弧的特征(任云伟等, 2019; 程海峰等, 2022)。总体上,白山组火山岩主要为安山岩、流纹岩,玄武岩较少,不属于双峰式火山岩,因此并不对应裂谷环境;白山组火山岩总体为一套钙碱性岛弧型火山岩组合,多具有陆缘弧岩浆岩特征(黄增保等, 2006b; 贾元琴等, 2016; 程海峰等, 2018; 2022; 李敏等, 2018; 任云伟等, 2019)。白山组岩石组合与地球化学特征显示其形成于活动大陆边缘,表明该地区从早石炭世晚期—晚石炭世持续存在洋—陆俯冲作用。

前人研究表明,内蒙古北山地区北部存在大量的晚石炭世岛弧花岗岩侵入体(程海峰等, 2018; 徐旭明等, 2018; 朱炜等, 2019),整体岩石组合为 TTG 岩石和二长花岗岩(李敏等, 2018),与活动大陆边缘弧更接近(任云伟等, 2019)。侵入岩样品相对富集轻稀土元素和大离子亲石元素 Rb、K、Ba 等,亏损

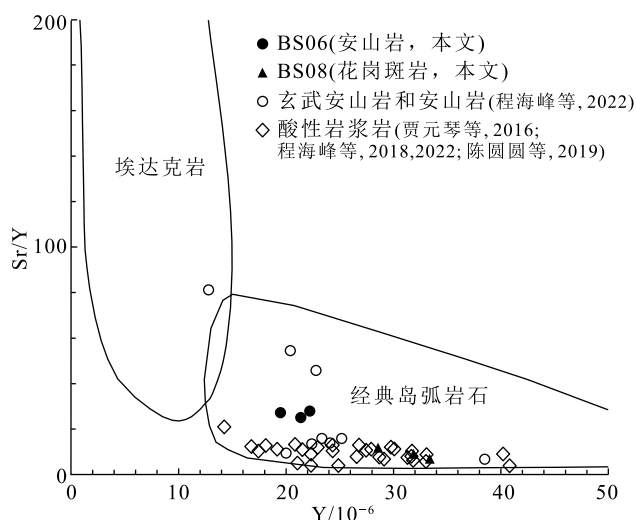


图 11 内蒙古北山造山带北部白山组火山岩 Y-Sr/Y 图解
(底图据 Defant et al., 1990)

Fig. 11 Y-Sr/Y plot of volcanic rocks from the Baishan Formation in the northern Beishan orogenic collage, Inner Mongolia

能具有双向俯冲作用(何世平等, 2005; Xiao et al., 2010; 赵志雄等, 2018)。而关于红石山洋盆在晚石炭世是否发生双向俯冲, 还有待进一步研究。

6 结 论

(1) 内蒙古北山北部圆包山—希热哈达地区白山组安山岩、含角砾花岗斑岩的成岩年龄分别为 300.0 ± 2.5 Ma (MSWD = 2.0, $n = 13$) 和 300.3 ± 1.9 Ma (MSWD = 1.9, $n = 23$), 表明该地区晚古生代火山作用从早石炭世晚期一直持续到晚石炭世。

(2) 晚石炭世白山组中性火山岩与酸性火山岩为同源岩浆连续演化, 岩浆源区都是中下地壳物质的部分熔融, 且混有一定量的幔源物质。安山岩的幔源物质贡献较大, 岩浆源区受到流体作用影响而没有沉积物熔体的加入; 含角砾花岗斑岩的幔源物质贡献较小, 而岩浆源区有沉积物熔体的加入。

(3) 内蒙古北山北部圆包山—希热哈达地区白山组火山岩的地球化学特征与岛弧火山岩类似, 显示其形成于活动大陆边缘, 表明该地区从早石炭世晚期—晚石炭世持续存在洋—陆俯冲作用。

(4) 晚石炭世, 古亚洲洋支洋即红石山洋具有由北向南的俯冲极性, 古亚洲洋在晚石炭世尚未关闭。

参考文献

Bailey J C. Geochemical criteria for a refined tectonic discrimination of

- orogenic andesites[J]. *Chemical Geology*, 1981, 32(1/4): 139–154.
- Boynton W V. Chapter 3—Cosmochemistry of the Rare Earth Elements: Meteorite Studies[M]. Amsterdam: Elsevier, 1984: 63–114.
- Cawood P A, Kroner A, Collins W J, et al. Accretionary orogens through Earth history[J]. *Geological Society London Special Publications*, 2009, 318(1): 1–36.
- Collins W J, Beams S D, White A J R, et al. Nature and origin of A-type granites with particular reference to southeastern Australia [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1982, 80(2): 189–200.
- Condie K C. Geochemistry and tectonic setting of Early Proterozoic supracrustal rocks in the southwestern united states [J]. *Journal of Geology*, 1986, 97: 845–864.
- Defant M J, Drummond M S. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere[J]. *Nature*, 1990, 347(6294): 662–665.
- Devine J D. Petrogenesis of the basalt-andesite-dacite association of Grenada, Lesser Antilles island arc, revisited[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 1995, 69(1): 1–33.
- Dilek Y, Furnes H, Shallo M. Geochemistry of the Jurassic Mirdita ophiolite (Albania) and the MORB to SSZ evolution of a marginal basin oceanic crust[J]. *Lithos*, 2008, 100(1): 174–209.
- Dobretsov N L, Berzin N A, Buslov M M. Opening and Tectonic Evolution of the Paleo-Asian Ocean [J]. *International Geology Review*, 1995, 37(4): 335–360.
- Du Q X, Han Z Z, Shen X L, et al. Geochemistry and geochronology of Upper Permian–Upper Triassic volcanic rocks in eastern Jilin Province, NE China: implications for the tectonic evolution of the Palaeo-Asian Ocean[J]. *International Geology Review*, 2017, 59(3): 368–390.
- Guo Q Q, Xiao W J, Windley B F, et al. Provenance and tectonic settings of Permian turbidites from the Beishan mountains, NW China: Implications for the Late Paleozoic accretionary tectonics of the southern Altai[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 49: 54–68.
- Irvine T N, Baragar W R A. A Guide to the chemical classification of the common volcanic rocks[J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1971, 8(5): 523–548.
- Jahn B M, Wu F Y, Chen B. Granitoids of the Central Asian Orogenic Belt and continental growth in the Phanerozoic[J]. *Geological Society of America Special Papers*, 2000, 91(1/2): 181–193.
- Kirscher U, Bachtadse V, Mikolaichuk A V, et al. Palaeozoic evolution of the North Tianshan based on palaeomagnetic data – transition from Gondwana towards Pangaea[J]. *International Geology Review*, 2017, 59(16): 2003–2020.
- Le Bas M J, Le Maitre R W, Streckeisen A, et al. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram[J]. *Journal of Petrology*, 1986, 27(3): 745–750.
- Li S, Wang T, Wilde S A, et al. Geochronology, petrogenesis and tectonic implications of Triassic granitoids from Beishan, NW China[J]. *Lithos*, 2012, 134/135: 123–145.
- Liu Y J, Li W M, Feng Z Q, et al. A review of the Paleozoic tectonics in the eastern part of Central Asian Orogenic Belt [J]. *Gondwana*

- Research, 2017, 43: 123–148.
- Liu Y S, Gao S, Hu Z C, et al. 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*, 2010, 51(1/2): 537–571.
- Ludwig K R. User's manual for Isoplot 3.00: a geochronological toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center Special Publication, 2003.
- Ma Y F, Liu Y J, Peskov A Y, et al. Paleozoic tectonic evolution of the eastern Central Asian orogenic belt in NE China[J]. *China Geology*, 2022, 5(4): 555–578.
- Maniar P D, Piccoli P M. Tectonic discrimination of granitoids[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1989, 101(5): 635–643.
- Mao Q, Xiao W, Windley B F, et al. The Liuyuan complex in the Beishan, NW China: a Carboniferous–Permian ophiolitic fore–arc sliver in the southern Altaids[J]. *Geological Magazine*, 2011, 149(3): 483–506.
- Niu Y Z, Liu C Y, Shi G R, et al. Unconformity–bounded Upper Paleozoic megasequences in the Beishan Region (NW China) and implications for the timing of the Paleo–Asian Ocean closure[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2018, 167: 11–32.
- Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 1984, 25(4): 956–983.
- Peccerillo A, Taylor S R. Geochemistry of Eocene calc–alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1976, 58(1): 63–81.
- Plank T, Langmuir C H. The chemical composition of subducting sediment and its consequences for the crust and mantle[J]. *Chemical Geology*, 1998, 145(3): 325–394.
- Rickwood P C. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements[J]. *Lithos*, 1989, 22(4): 247–263.
- Rudnick R L, Gao S. 3.01 – Composition of the continental crust[M]. Oxford: Pergamon; 2003: 1–64.
- Safonova I. Juvenile versus recycled crust in the Central Asian Orogenic Belt: Implications from ocean plate stratigraphy, blueschist belts and intra–oceanic arcs[J]. *Gondwana Research*, 2017, 47: 6–27.
- Şengör A M C, Natal'in B A, Burtman V S. Evolution of the Altaid tectonic collage and Palaeozoic crustal growth in Eurasia[J]. *Nature*, 1993, 364(6435): 299–307.
- Song D, Xiao W, Han C, et al. Progressive accretionary tectonics of the Beishan orogenic collage, southern Altaids: Insights from zircon U–Pb and Hf isotopic data of high–grade complexes[J]. *Precambrian Research*, 2013, 227: 368–388.
- Song D, Xiao W, Windley B F, et al. A Paleozoic Japan–type subduction–accretion system in the Beishan orogenic collage, southern Central Asian Orogenic Belt[J]. *Lithos*, 2015, 224/225: 195–213.
- Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1989, 42(1): 313–345.
- Taylor S R, McLennan S M. The continental crust: Its Composition and Evolution: An Examination of the Geochemical Record Preserved in Sedimentary Rocks[M]. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1985.
- Taylor S R, McLennan S M. The Geochemical evolution of the continental crust[J]. *Reviews of Geophysics*, 1995, 33(2): 241–265.
- Tian Z H, Xiao W J, Windley B F, et al. Structure, age, and tectonic development of the Huoshishan–Niujuanzi ophiolitic mélange, Beishan, southernmost Altaids[J]. *Gondwana Research*, 2014, 25(2): 820–841.
- Wang Z W, Wang Z H, Zhang Y, et al. Linking 1.4–0.8 Ga volcano–sedimentary records in eastern Central Asian orogenic belt with southern Laurentia in supercontinent cycles[J]. *Gondwana Research*, 2022, 105: 416–431.
- Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. A–type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1987, 95(4): 407–419.
- Xiao W J, Windley B F, Hao J, et al. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China: Termination of the central Asian orogenic belt[J]. *Tectonics*, 2003, 22(6): 1–20.
- Xiao W J, Mao Q G, Windley B F, et al. Paleozoic multiple accretionary and collisional processes of the Beishan orogenic collage[J]. *American Journal of Science*, 2010, 310(10): 1553–1594.
- Xiao W J, Windley B F, Sun S, et al. 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*, 2015, 43(1): 477–507.
- Yu J, Guo L, Li J, et al. The petrogenesis of sodic granites in the Niujuanzi area and constraints on the Paleozoic tectonic evolution of the Beishan region, NW China[J]. *Lithos*, 2016, 256/257: 250–268.
- Yuan H L, Gao S, Liu X M, et al. Accurate U–Pb age and trace element determinations of zircon by Laser Ablation–Inductively Coupled Plasma–Mass Spectrometry[J]. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 2004, 28(3): 353–370.
- Zheng R, Xiao W, Li J, et al. A Silurian–early Devonian slab window in the southern Central Asian Orogenic Belt: Evidence from high–Mg diorites, adakites and granitoids in the western Central Beishan region, NW China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2018, 153: 75–99.
- Zhou J B, Wilde S A, Zhao G C, et al. Nature and assembly of microcontinental blocks within the Paleo–Asian Ocean[J]. *Earth–Science Reviews*, 2018, 186: 76–93.
- 陈海东, 王子龙, 景耀祖, 等. 内蒙古北山风雷山地区流纹岩 LA–ICP–MS 锆石 U–Pb 年代学及地球化学特征[J]. *中国地质调查*, 2017, 4(5): 48–54.
- 陈圆圆, 李杰, 白春东, 等. 北山北带圆包山地区中酸性火山岩地球化学特征及锆石 U–Pb 年龄[J]. *地质通报*, 2019, 38(2/3): 266–275.
- 陈智斌, 于洋, 薄海军. 内蒙古额济纳地区奥陶纪火山岩地球化学特征及其地质意义[J]. *地球科学*, 2020, 45(2): 503–518.
- 程海峰, 辛后田, 梁国庆, 等. 内蒙古北山地区黑红山一带斑状花岗闪长岩地球化学特征、LA–ICP–MS 锆石 U–Pb 年龄及其地质意义[J]. *地质通报*, 2018, 37(10): 1895–1904.

- 程海峰,张正平,段先乐,等.内蒙古黑红山—圆包山地区石炭纪火山岩的发现及其地质意义[J].地质与勘探,2022,58(2): 335-351.
- 段连峰,牛文超,张永,等.内蒙古北山造山带百合山地区 350 Ma 石英闪长岩的成因及对红石山—百合山洋俯冲时限的制约[J].地质通报,2020,39(9): 1330-1340.
- 方维萱,郑小明,方同辉,等.甘肃红石山地区泥盆纪—石炭纪有限洋盆重建与蛇绿混杂岩深部结构[J].地质通报,2021,40(5): 649-673.
- 龚全胜,刘明强,梁明宏,等.北山造山带大地构造相及构造演化[J].西北地质,2003,36(1): 11-17.
- 何世平,任秉琛,姚文光,等.甘肃内蒙古北山地区构造单元划分[J].西北地质,2002,35(4): 30-40.
- 何世平,周会武,任秉琛,等.甘肃内蒙古北山地区古生代地壳演化[J].西北地质,2005,38(3): 6-15.
- 黄增保,金霞.甘肃红石山地区白山组火山岩地质特征及构造背景[J].甘肃地质,2006a,15(1): 19-24.
- 黄增保,金霞.甘肃北山红石山蛇绿混杂岩带中基性火山岩构造环境分析[J].中国地质,2006b,33(5): 1030-1037.
- 贾元琴,赵志雄,许海,等.北山风雷山地区白山组流纹岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及构造环境[J].中国地质,2016,43(1): 91-98.
- 李光速,杜庆祥,韩作振,等.吉林省延边地区中酸性岩浆岩年龄、成因及其构造意义[J].吉林大学学报(地球科学版),2022,52(4): 1174-1202.
- 李敏,任邦方,滕学建,等.内蒙古北山造山带花岗岩地球化学、锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素特征及地质意义[J].地球科学,2018,43(12): 4586-4605.
- 李敏,辛后田,任邦方,等.内蒙古哈珠地区晚古生代花岗岩类成因及其构造意义[J].地球科学,2019,44(1): 328-343.
- 李向民,余吉远,王国强,等.甘肃北山红柳园地区泥盆系三个井组和墩墩山群 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年及其意义[J].地质通报,2011,30(10): 1501-1507.
- 卢进才,陈高潮,魏仙样,等.内蒙古西部额济纳旗及邻区石炭系—二叠系沉积建造与生烃条件——石炭系—二叠系油气地质条件研究之一[J].地质通报,2011,30(6): 811-826.
- 卢进才,牛亚卓,魏仙样,等.北山红石山地区晚古生代火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其构造意义[J].岩石学报,2013,29(8): 2685-2694.
- 卢进才,史冀忠,牛亚卓,等.内蒙古西部北山—银额地区石炭纪—二叠纪层序地层与沉积演化[J].岩石学报,2018,34(10): 3101-3115.
- 南云.新疆东北部三塘湖地区晚石炭世—二叠纪岩浆活动及成盆构造背景研究[D].西北大学博士学位论文,2018.
- 牛文超,辛后田,段连峰,等.内蒙古北山地区百合山蛇绿混杂岩带的厘定及其洋盆俯冲极性——基于 1:5 万清河沟幅地质图的新认识[J].中国地质,2019,46(5): 977-994.
- 牛文超,辛后田,段连峰,等.内蒙古北山造山带百合山 SSZ 型蛇绿岩地球化学特征、锆石 U-Pb 年龄及其对古亚洲洋演化的指示[J].地质通报,2020,39(9): 1317-1329.
- 牛亚卓,魏建设,史冀忠,等.甘肃北山地区北部上石炭统火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其构造意义[J].地质通报,2013,32(11): 1720-1727.
- 牛亚卓,卢进才,魏建设,等.甘蒙北山地区下石炭统绿条山组时代修正及其构造意义[J].地质论评,2014,60(3): 567-576.
- 潘桂棠,陆松年,肖庆辉,等.中国大地构造阶段划分和演化[J].地学前缘,2016,23(6): 1-23.
- 任云伟,任邦方,牛文超,等.内蒙古哈珠地区石炭纪白山组火山岩:北山北部晚古生代活动陆缘岩浆作用的产物[J].地球科学,2019,44(1): 312-327.
- 孙立新,张家辉,任邦方,等.北山造山带白云山蛇绿混杂岩的地球化学特征、时代及地质意义[J].岩石矿物学杂志,2017,36(2): 131-147.
- 王接顺,马云飞,张宝艳,等.内蒙古阿拉善左旗乌兰尚德地区志留系圆包山组笔石化石的发现及其地质意义[J].地质通报,2019,38(6): 950-958.
- 王国强,李向民,徐学义,等.北山造山带古生代蛇绿混杂岩研究现状及进展[J].地质通报,2021,40(1): 71-81.
- 卫彦升,闫涛,杨五宝,等.内蒙古北山造山带北带晚古生代地层时空格架的建立[J].地质通报,2020,39(9): 1367-1388.
- 辛后田,牛文超,田健,等.内蒙古北山造山带时空结构与古亚洲洋演化[J].地质通报,2020,39(9): 1297-1316.
- 徐旭明,鲁扬,辛后田,等.内蒙古北山北缘古亚洲洋闭合时间制约:来自黑红山晚石炭世石英闪长岩的证据[J].矿物岩石,2018,38(4): 66-75.
- 徐学义,何世平,王洪亮.中国西北部地质概论——秦岭、祁连、天山地区[M].北京:科学出版社,2008.
- 杨富林,邹运鑫,曹霞,等.内蒙古北山地区蓬勃山南石英闪长岩 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 测年及其意义[J].地质调查与研究,2017,40(2): 109-118.
- 杨合群,李英,李文明,等.北山成矿构造背景概论[J].西北地质,2008,41(1): 22-28.
- 杨合群,李英,赵国斌,等.北山蛇绿岩特征及构造属性[J].西北地质,2010,43(1): 26-36.
- 尹海权,周洪瑞,程瑞,等.内蒙古阿拉善北部杭乌拉地区圆包山组时代、沉积特征及大地构造意义[J].沉积学报,2015,33(4): 665-678.
- 尹海权,周洪瑞,徐东卓,等.中亚造山带中段南缘圆包山组碎屑锆石 U-Pb 年龄、物源及其构造演化意义[J].地质学报,2017,91(10): 2196-2211.
- 张正平,辛后田,程海峰,等.内蒙古北山造山带发现额勒根蛇绿岩——红石山—百合山蛇绿岩带东延的证据[J].地质通报,2020,39(9): 1389-1403.
- 赵志雄,贾元琴,许海,等.北山交叉沟石英闪长岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄及构造意义[J].地质学报,2015,89(7): 1210-1218.
- 赵志雄,熊煜,贾元琴,等.北山独龙包地区晚石炭世陆缘弧岩浆作用——花岗闪长岩锆石 U-Pb 年龄及地球化学证据[J].地质论评,2018,64(3): 597-609.
- 朱炜,张正平,孙璎姝,等.内蒙古北山北缘蓬勃山一带古亚洲洋闭合时间制约——来自黑红山二长花岗岩的证据[J].地质通报,2019,38(11): 1846-1857.
- 邹运鑫,曹霞,亢文丽.北山六陀山地区上石炭统白山组 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄[J].西部资源,2015,(5): 65-66.
- 左国朝,何国琦,等.北山板块构造及成矿规律[M].北京:北京大学出版社,1990a.
- 左国朝,张淑玲,何国琦,等.北山地区早古生代板块构造特征[J].地质科学,1990b,25(4): 305-314.